



CONTACT

Musée EDF Hydrélec
Route du Lac — le Verney
38114 VAUJANY

04 76 80 78 00 / contact@musee-edf-hydrelec.fr

Véronique Bourgoïn / v.bourgoïn@musee-edf-hydrelec.fr



SOMMAIRE

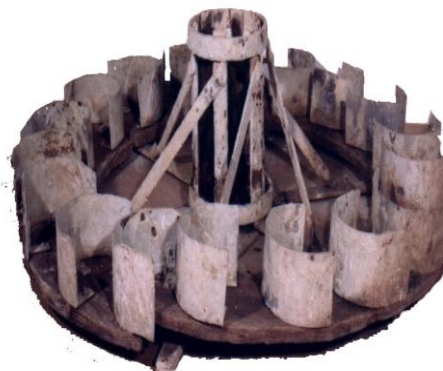
1) IL ETAIT UNE FOIS ... L'ENERGIE HYDRAULIQUE	p. 3
2) L'EAU UNE ENERGIE QUI COULE DE SOURCE	p. 5
3) DE L'EAU A L'ELECTRICITE : UN PASSIONNANT VOYAGE	p. 6
<i>Les aménagements hydrauliques</i>	p. 7
<i>Les différents types d'usines</i>	p. 8
4) LES BARRAGES : LA MAITRISE DE L'EAU	p. 9
5) LES TURBINES	p. 11
6) LES ALTERNATEURS	p. 12
7) LE TRANSPORT DE L'ELECTRICITE	p. 13
8) GLOSSAIRE	p. 14



1) IL ETAIT UNE FOIS ... L'ENERGIE HYDRAULIQUE

Au II^{ème} siècle avant J.C., la roue était déjà utilisée : la roue à augets tourne grâce au poids de l'eau et la roue à palettes avec la vitesse ; toutes deux sont les ancêtres de la turbine.

Au Moyen Age, l'énergie hydraulique est à la base de beaucoup de travaux essentiels tels que pour actionner les martinets de forge ou de soufflerie. Les moulins, scieries, papeteries, ateliers métallurgiques se développèrent dans les régions montagneuses.



Les exploitations hydrauliques progressent rapidement grâce aux inventions de Benoît Fourneyron. Il comprit en 1827 qu'il fallait dépouiller l'eau de son énergie lorsqu'elle passe, en un temps très bref, dans l'auget : c'est le système de la **turbine à réaction**. Celle-ci résout les problèmes de la roue : elle peut être immergée ou émergée et s'adapte à toutes les hauteurs de chute. Les papeteries iséroises l'utiliseront jusqu'au début du XX^{ème} siècle. Désormais, la contrainte majeure est de l'installer au bas des chutes d'eau. Les premières conduites forcées voient le jour en 1835 avec Aristide Bergès qui équipe les chutes de Lancey, hautes de 200 m. La puissance installée s'élève à 700 kW* et entraîne les machines d'une papeterie.

Les découvertes de Volta (1800) ont permis à Gramme de créer la première dynamo en 1872, puis la génératrice conçue par Siemens et Alteneck apparaît en 1878. Dès lors, l'énergie hydraulique permet de créer l'énergie électrique et les cours d'eau seront dorénavant aménagés pour cela.

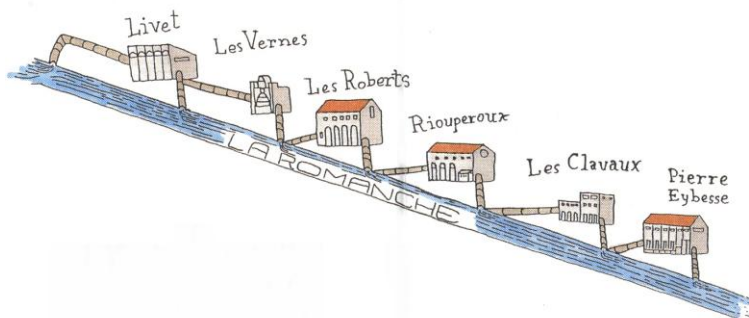
En 1883, Marcel Desprez réussit à « transporter la force à distance » : la première ligne de transport est née, elle relie Vizille à Grenoble sur 14 km.

Usine hydroélectrique des Vernes, construite en 1918 sur la Romanche et toujours en activité



Dans les années 1900, on construit les premières centrales hydroélectriques pour turbiner les eaux de la Romanche. On en compte huit sur 300 m de dénivelée ; la centrale du Verney est encore en activité. L'industrialisation de la vallée débute avec le succès de la « Société Keller et Leleux » dès 1906. Elle contribue entre autre à l'effort de guerre en fabriquant des obus pendant la première Guerre Mondiale.

« La vallée hydroélectrique la plus intéressante du Monde », selon un ingénieur américain, comprend vite ses atouts. Les industriels affluent pour construire des usines et des centrales : le barrage du Chambon est un des premiers ouvrages (construit en 1934), il régularise le débit de la Romanche. Entre 1920 et 1940, 51 barrages sont construits dans les montagnes françaises.



A la suite de la loi de nationalisation de l'industrie électrique en 1946, la plupart de ces centrales électriques sont absorbées par EDF, à qui l'Etat a confié la conception, l'exploitation et la vente de l'électricité en France.

Le premier choc pétrolier en 1974 voit renaître un certain intérêt pour l'hydraulique bien que l'énergie nucléaire commence à apparaître. La vallée de la Romanche offre des conditions géographiques et géologiques suffisamment intéressantes pour inciter EDF à implanter un des derniers grands ouvrages hydrauliques, la station de transfert d'énergie par pompage (STEP) la plus puissante de France : GRAND'MAISON, mise en service en 1987.

Désormais, grâce à sa souplesse d'utilisation et à sa rapidité de réaction, le rôle de l'hydraulique est de réguler le réseau.



2) L'EAU UNE ENERGIE QUI COULE DE SOURCE

Parmi toutes les énergies renouvelables, l'hydroélectricité occupe une place privilégiée. Elle produit 18% de l'électricité à l'échelon mondial.

Mobiliser l'eau à défaut de l'électricité

A la différence de l'électricité, que l'on ne peut pas stocker, l'eau en revanche peut être accumulée dans les nombreuses retenues d'EDF : elles représentent un volume total d'environ 7 milliards de m³, soit les 3/4 des réserves d'eau constituées en surface sur le territoire français. Cette énergie accumulée est facilement mobilisable : il suffit de deux minutes à l'usine de Grand'Maison pour fournir 1 800 MW* au réseau. Cette souplesse de fonctionnement permet d'ajuster en permanence la production aux variations de la demande en électricité.

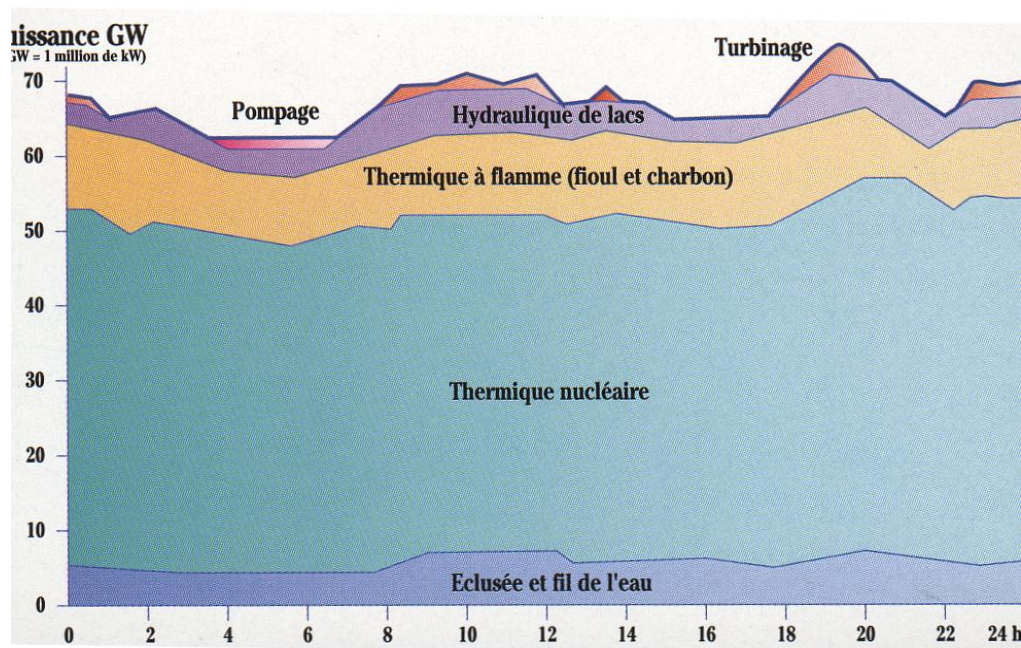
L'hydraulique, acteur de l'aménagement du territoire

Au delà du seul aspect énergétique, l'hydroélectricité est étroitement liée à l'aménagement du territoire. Par leur taille et par les réserves d'eau qu'ils constituent, les barrages sont des éléments importants dans la vie locale : l'eau « maîtrisée » peut servir à l'amélioration de la production agricole avec l'irrigation des terres, elle peut se montrer très précieuse pour l'alimentation des régions en eau potable, les grands barrages EDF constituent autant de lacs, ce qui représente une grande richesse touristique : EDF a ouvert de nombreux plans d'eau aux activités nautiques et contribue ainsi au développement des communes et des régions.

Le parc hydroélectrique Français

La France possède et exploite 220 barrages qui alimentent quelque 550 centrales pour une puissance totale de 23 000 MW* soit 25% de la puissance électrique* totale installée en France . Les 70 TWh* produits en une année d'hydraulicité normale représente 15% de la production totale annuelle.

Courbe de production d'une journée « type » en hiver



3) DE L'EAU A L'ELECTRICITE : UN PASSIONNANT VOYAGE

Les principes généraux

L'eau accumulée dans les barrages ou dérivée dans les prises d'eau constitue une énergie disponible utilisée pour actionner la roue d'une turbine.

L'énergie hydraulique se transforme alors en énergie mécanique. Cette turbine, à son tour, entraîne un alternateur* grâce auquel l'énergie mécanique va devenir énergie électrique.

La hauteur de la chute et le débit influencent directement la puissance* disponible.

Pour une même puissance, une turbine peut donc être alimentée par un faible débit avec une hauteur de chute importante ou, au contraire, par un débit important avec une faible hauteur de chute.

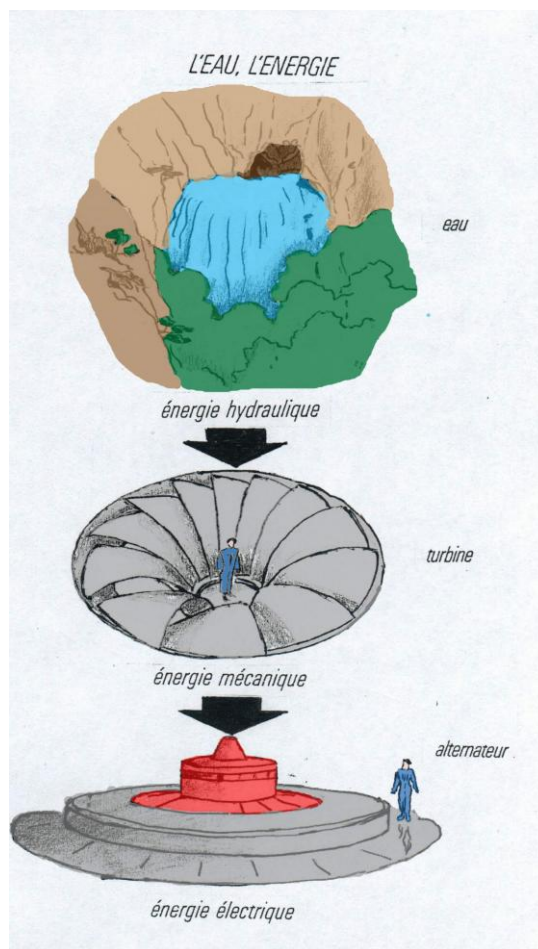
La puissance exprimée en kilowatt* (kW) est donnée par la formule : $P = k \times h \times \text{débit}$

k est un coefficient propre à l'installation qui correspond à environ 8 :

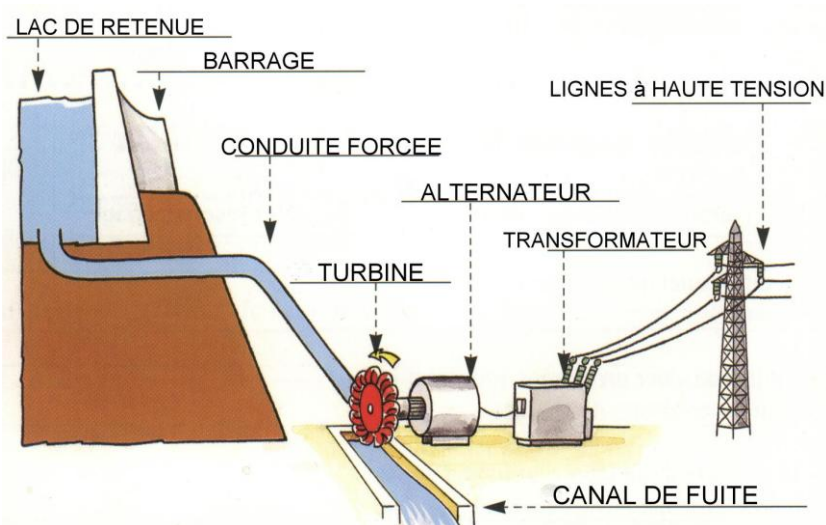
rendement = $(0.82) \times \text{gravité } (9.81)$

Le débit est exprimé en m^3/s (mètres cube par seconde)

h est la chute, exprimée en mètres



PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT D'UNE CENTRALE HYDRAULIQUE

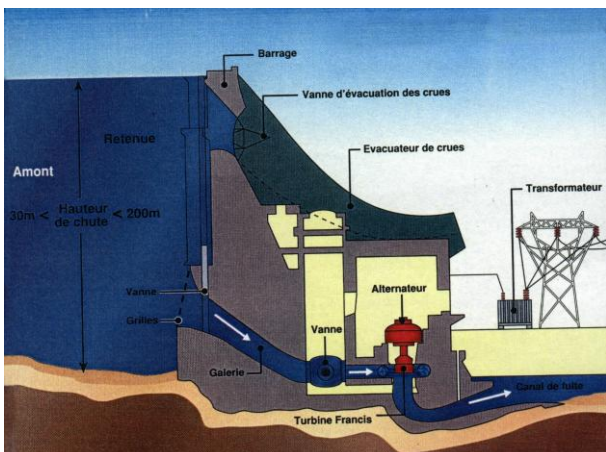
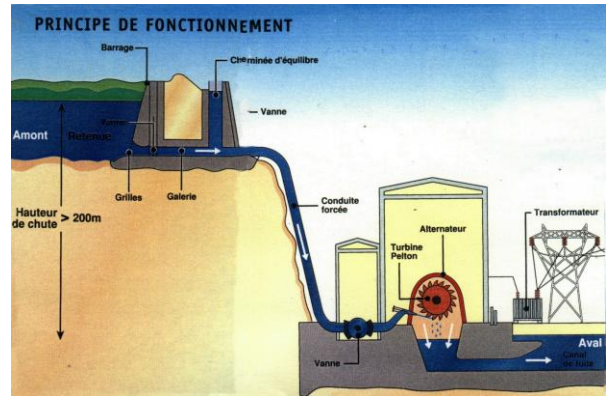


Les aménagements hydrauliques

Chaque site possède des caractéristiques géographiques, géologiques, topographiques, hydrologiques qui lui sont propres. C'est pourquoi les aménagements hydrauliques présentent une grande diversité. Toutefois, on peut distinguer quatre grands types d'aménagements répondant chacun à une fonction spécifique dans l'organisation générale de la production.

Les aménagements de haute chute : plus de 400 m

Ils équipent les sites de montagne qui bénéficient, pour des débits souvent très faibles, de très importantes dénivelées. L'eau des torrents et des rivières est emmagasinée dans une retenue. Elle est dirigée par des canaux ou des galeries et des conduites forcées vers les turbines où son énergie se transforme en énergie cinétique entraînant un alternateur.

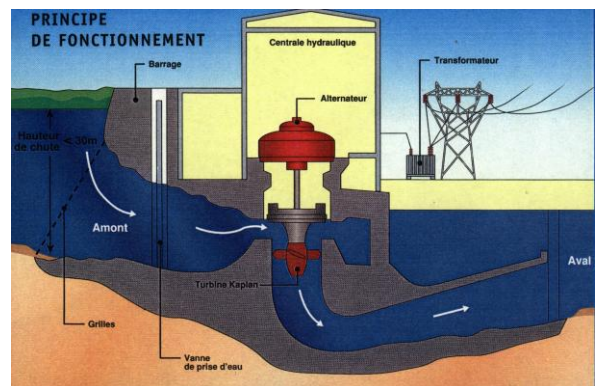


Les aménagements de moyenne chute : moins de 400 m

Ces équipements sont situés sur des cours d'eau à pente assez forte et à débit abondant. Leur capacité de stockage est souvent moins importante que celle des équipements de hautes chutes.

Les aménagements de basse chute : moins de 40 m

Ce sont des équipements adaptés aux cours d'eau à faible pente et à très fort débit. Ils ne disposent pratiquement d'aucune capacité de stockage.

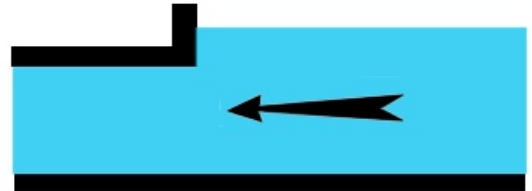


Les différents types d'usines

Derrière les barrages on constitue un réservoir d'eau qui permet un stockage plus ou moins long. Selon que l'aménagement offre ou non une telle possibilité, on le classe dans l'une des catégories suivantes.

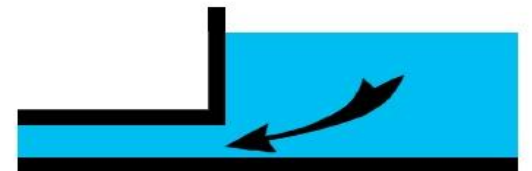
Les usines au fil de l'eau :

Elles n'ont pas de réserve de tête et ne peuvent modifier le débit du cours d'eau qui les traverse.



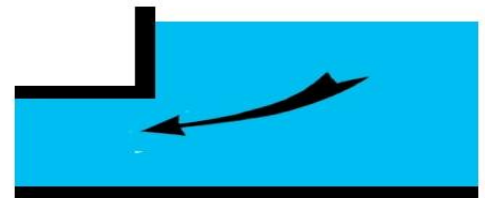
Les usines d'éclusée :

Elles disposent d'un réservoir où l'on peut accumuler une partie de l'eau recueillie et reporter la production d'électricité de réserve des heures pleines sur les heures creuses. La capacité de réserve d'une usine d'éclusée a une durée de remplissage comprise entre 2 et 400 heures.



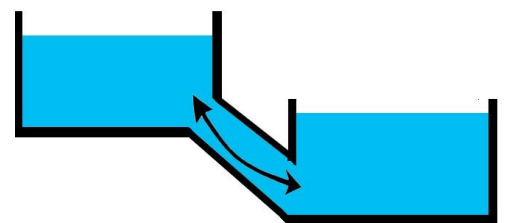
Les usines de lac :

Elles sont alimentées par une retenue suffisamment importante pour permettre le transfert des apports d'une saison sur l'autre ou même d'une année sur l'autre. La durée de leur remplissage est supérieur à 400 heures. Ces réserves saisonnières sont le plus souvent constituées à l'aide de grands barrages.



Les Stations de Transfert d'Énergie par pompage (STEP) :

Le principe consiste à échanger une masse d'eau entre deux bassins séparés par une dénivellation. Le transfert d'énergie par pompage absorbe l'énergie produite aux heures creuses par les centrales thermiques, notamment nucléaires, dont la puissance est peu modulable. Grâce à leur souplesse de fonctionnement, les usines de pompage constituent une réserve de puissance pour assurer le réglage du réseau et également en cas de défaillance d'une grosse unité de production thermique.



4) LES BARRAGES : LA MAITRISE DE L'EAU

En s'opposant à l'écoulement naturel de l'eau, un barrage remplit deux fonctions importantes. D'une part il permet, en dérivant l'eau et en créant une chute, de produire de l'électricité et d'autre part, il constitue une réserve correspondant à un potentiel d'énergie utilisable instantanément en cas de besoin. On distingue deux grandes catégories de barrages : les barrages fixes et les barrages mobiles.

Les barrages fixes

Il en existe de très nombreux types, que l'on peut toutefois diviser en deux sous-catégories selon la nature des matériaux utilisés pour leur construction.

Les barrages en béton

Ces barrages s'opposent aux forces créées par la pression de l'eau, soit par leur propre poids (**barrages poids**), soit en reportant sur les rives par un effet de voûte la poussée hydraulique (**barrages voûtes**), soit encore en associant ces deux possibilités (barrages mixtes), soit enfin en reportant les efforts sur le sol par l'intermédiaire de contreforts (**barrages contreforts**).

Les barrages poids :

Caractérisés par une section pratiquement triangulaire, ils présentent l'avantage de ne solliciter que très peu la résistance des berges. Toutefois, leur construction requiert une grande quantité de béton.



Les barrages voûtes :

Ils sont constitués par une coque en béton à simple ou double courbure. Le côté convexe est dirigé vers l'amont. Ce type de barrage est implanté dès qu'une vallée est assez étroite pour permettre l'arc-boutement de l'ouvrage et lorsque les rives sont géologiquement très saines.

Les barrages contreforts :

Les contreforts en béton de forme triangulaire supportent en principe des voûtes de faible portée ou des dalles planes qui transmettent la poussée de l'eau vers le sol. Ces barrages nécessitent moins de béton que les barrages poids et n'exigent pas des vallées étroites comme les barrages voûtes. Il est néanmoins nécessaire que le rocher soit de bonne qualité.



Les barrages en matériaux non liés (remblais)

Ce sont obligatoirement des barrages poids. Ils sont réalisés par l'empilement de matériaux juxtaposés sans éléments de liaison particulier. Ils comportent néanmoins un élément assurant leur étanchéité (noyau ou masque amont).

Ce sont les barrages en enrochement et les barrages en terre.

Les barrages mobiles

Lorsqu'un barrage de faible hauteur est implanté sur une rivière à fort débit, la section nécessaire à l'écoulement des crues est importante. Par opposition aux barrages fixes, les barrages mobiles sont donc des ouvrages dont une grande partie est amovible, permettant ainsi de supprimer une fraction appréciable de l'obstacle et de laisser au cours d'eau un débouché suffisant pour éviter l'élévation du niveau en amont, en particulier pendant les crues. On rencontre fréquemment ce type de barrage dans les basses chutes.



L'auscultation et la surveillance des barrages

Comme toute construction, les barrages sont soumis à des mouvements et déformations. De leur solidité dépend la sécurité des habitants de la vallée. Pour prévenir toute dégradation importante et a fortiori toute rupture, EDF exerce une surveillance constante. L'ensemble des méthodes et des moyens mis en oeuvre pour assurer cette surveillance constitue l'**auscultation** des barrages.

Elle consiste à recueillir, à traiter, à analyser et à synthétiser toutes les informations permettant de contrôler le mode d'action et l'influence des forces auxquelles les ouvrages sont effectivement soumis, et de cerner tous les aspects de leur comportement. On établit tout au long de leur vie leurs « diagnostics de santé ».

Tous les ouvrages de retenue sont soumis à l'action de diverses forces :

- Poids de l'ouvrage
- Forces hydrostatiques (dues à la pression de l'eau)
- Forces thermostatiques (dues aux variations de température)

D'autres forces peuvent se développer par suite de l'apparition de phénomènes secondaires :

- Déformation des massifs naturels (fondations ou rives) ;
- Facteurs physiques et chimiques du béton.

L'auscultation a pour but d'établir un « état de santé » des ouvrages grâce à des contrôles externes et internes, au moyen de divers matériels appropriés : piézomètres, extensomètres, inclinomètres, furets hydrauliques....



Cabine de réception des appareils d'auscultation du barrage du Verney au 1^{er} plan : le furet hydraulique (Photo Artechnique-Piccardy)



Construction du barrage de Grand'Maison : Mise en place d'un élongamètre (Photo Mirabel)



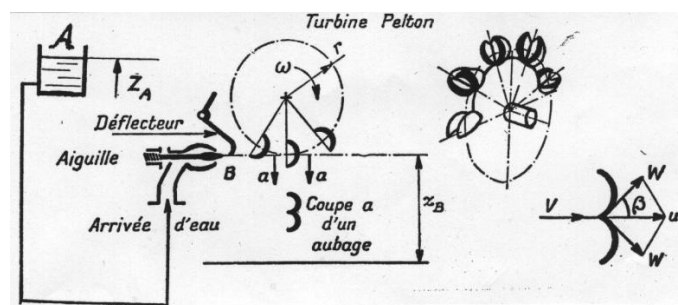
5) LES TURBINES

Les turbines transforment en énergie mécanique l'énergie de l'eau. On distingue les turbines à action (pour les hautes chutes) et les turbines à réaction (pour les moyennes et basses chutes).

Les turbines à action

Dans ce système, l'eau est libérée dans la turbine avec toute la vitesse dont la chute en ce point est capable. Elle est dirigée en puissants jets sur des augets en un ou plusieurs points de sa périphérie. Il y a donc, dans la roue, transformation totale (aux pertes près) de l'énergie cinétique en énergie mécanique de rotation.

Le seul type actuellement construit sur ce modèle est la turbine **Pelton** qui équipe les centrales de hautes et très hautes chutes.



Les turbines à réaction

Dans les turbines à réaction, le dispositif d'injection de l'eau dans la roue de la turbine et la forme de cette roue 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 la roue possède donc à la fois de l'énergie cinétique et de l'énergie potentielle de pression. Plusieurs modèles fonctionnent selon ce principe : les turbines **Francis** et les turbines **Kaplan**, qui portent le nom de leur inventeur.

Les turbines **Francis** sont utilisées pour les chutes moyennes, jusqu'à 400 m environ. Les turbines **Kaplan** sont plus particulièrement destinées aux basses chutes, inférieures à 40 m.



turbine Pelton



turbine Francis



turbine Kaplan

LA PUISSANCE THEORIQUE D'UNE INSTALLATION EST : $P = \rho \cdot G \cdot \text{DEBIT} \cdot H$

ρ : masse volumique de l'eau en kg par mètre cube

H : hauteur de chute en mètres

P : Puissance en Watt
(unités MKSA)



6) LES ALTERNATEURS

L'alternateur* est un générateur dont le principe est simple : le **rotor**, constitué d'électro-aimants*, tourne à l'intérieur du **stator**, constitué de fils de cuivre. Le rotor est l'**inducteur** et le stator est l'**induit**. La production d'électricité se fait par induction. Un réglage du courant dans l'électro-aimant permet de modifier la puissance* débitée.

Le **rotor** est un électroaimant dont les pôles sont alternativement nord et sud. Ces enroulements sont alimentés en courant continu par l'intermédiaire de balais frottant sur deux bagues. Le rotor tournant crée un flux variable à travers les enroulements du stator. Il y a donc création d'une force électromotrice induite dans le stator.

L'alternateur est entraîné par la turbine à une vitesse de rotation variable selon les machines (de moins de 100 à 1000 tours/minutes). La vitesse de la machine et le nombre de pôles conditionnent la fréquence* :

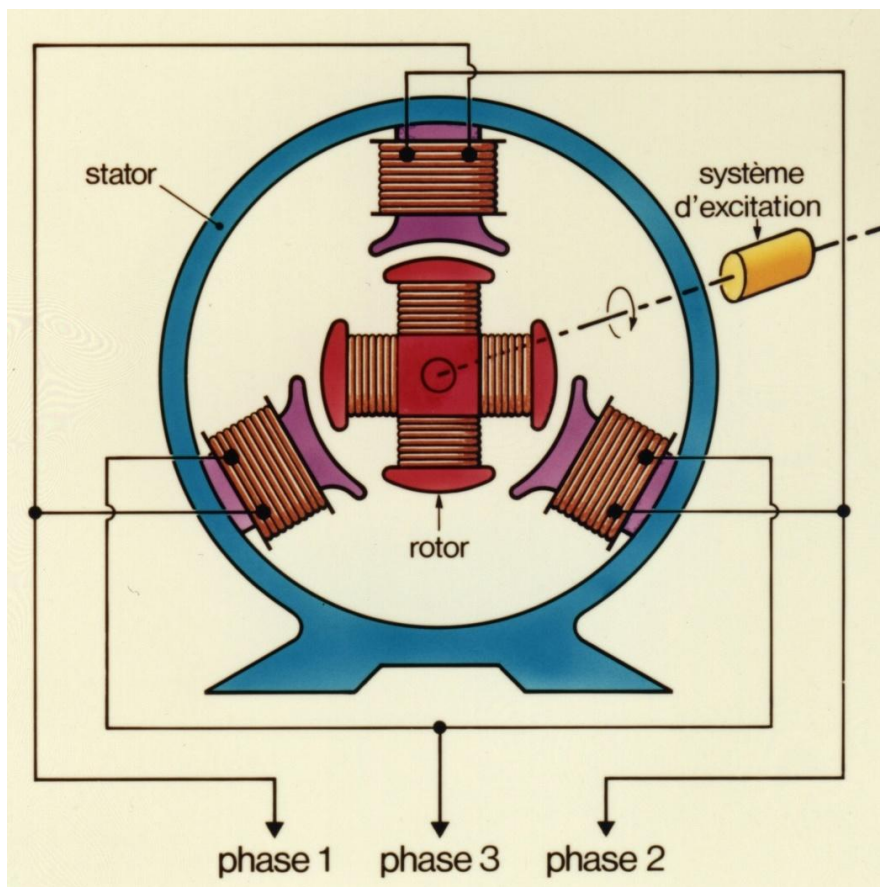
$$60f = pN$$

F = Hertz

P = nombre de **paires de pôles** du rotor

N = nombre de **tours par minute**

Les machines reliées au réseau électrique français, lui-même interconnecté avec les pays de la Communauté Européenne, doivent fonctionner à fréquence constante ; cette fréquence est fixée à **50 Hz**.



7) LE TRANSPORT DE L'ELECTRICITE

L'électricité est une énergie qui ne se stocke pas. Elle est aisément transportable des sites de production aux sites de consommation. Son transport s'effectue par un réseau à très haute tension*. La distribution auprès des clients s'effectue par des réseaux à moyenne et basse tension. La gestion de la totalité du réseau électrique est maintenant confié à RTE (Réseau de Transport de l'Energie) qui assure l'interface entre les producteurs (EDF, CNR, SNET, producteurs européens, ...) et les distributeurs (EDF, Régies, ...) qui, à leur tour livrent les consommateurs (industriels, PME, clients domestiques).

Implantation des sites de production et de transport :

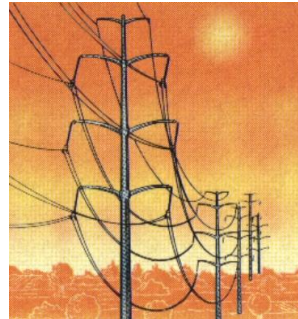
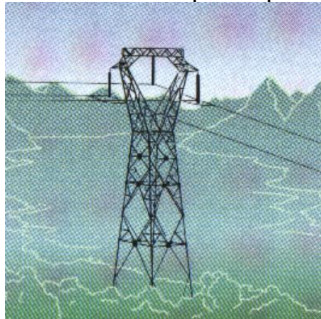
- L'électricité d'origine hydraulique est en général produite dans les régions montagneuses,
- Celle d'origine nucléaire s'effectue dans des sites bénéficiant d'une quantité d'eau suffisante pour le refroidissement,
- Celle produite dans les centrales thermiques à flamme, que l'on pouvait implanter près des agglomérations, est réduite pour des raisons écologiques et économiques.

L'électricité produite doit ensuite être transportée vers ses utilisateurs.

Le réseau de transport

Dès qu'il est produit, le courant électrique* est véhiculé en haute tension à 225 000 V* et 400 000 V et livré à cette tension à la grande industrie et aux chemins de fer. Il est transformé en courant moyenne tension à 15 000 ou 20 000 V, pour être livré aux centres de distribution EDF. Ces centres en assurent la distribution en basse tension auprès de la clientèle dont la plus grande partie est domestique.

Pour des raisons essentiellement techniques, le transport se fait principalement par voie aérienne. Les lignes sont portées par des pylônes. Les conducteurs* sont généralement en aluminium mais ils sont renforcés par de l'acier dans les régions où ils sont menacés par le givre ou la neige. Le tracé des lignes hautes et moyennes tensions doit tenir compte aussi bien des obstacles naturels (fleuves, montagnes) que des exigences humaines (agglomérations, émetteurs de radio ou de télévision, sites classés, etc). Il est réalisé en concertation avec la population et les élus intéressés par le passage des lignes.



Le réseau de distribution

Lorsque le courant passe du réseau de transport sur le réseau de distribution, sa tension doit être réduite, afin que les clients puissent l'utiliser : c'est le rôle des postes de transformation.

La tension est de 15 000 à 20 000 V pour les industries moyennes et de 230 V ou 400 V pour les particuliers.

Aujourd'hui, les réseaux de distribution sont pour la plupart souterrains dans les agglomérations, mais sont encore aériens dans de nombreuses zones rurales.

Puissance à transporter par fil (triphase) : $P = VI$

Pertes par effet Joule : $p = RI^2 = RP^2/V^2$

Ces pertes sont inversement proportionnelles au carré de la tension de transport. Elles diminuent très vite si la tension de transport augmente.



8) GLOSSAIRE

Alternateur : appareil qui transforme une énergie mécanique en courant électrique. Il est composé d'un rotor et d'un stator.

Ampère : unité d'intensité du courant électrique (symbole A).
Un ampère correspond à un débit d'électrons d'environ $6,24 \times 10^{18}$ électrons par seconde.

Atome : constituant de base de la matière, composé d'un noyau de charge positive autour duquel tournent les électrons de charge négative.

Conducteurs : corps qui transmettent la chaleur ou l'électricité.

Courant alternatif : flux d'électrons qui parcourt un circuit en changeant périodiquement de sens dans les conducteurs. On nomme « période » chaque aller et retour du courant, et « fréquence » le nombre d'allers et retours effectués en une seconde. La période s'exprime en seconde, la fréquence en hertz (Hz).

Courant continu : flux d'électrons constant parcourant un circuit électrique dans un sens constant.

Courant électrique : déplacement d'électrons à l'intérieur d'un conducteur, depuis une charge négative vers une charge positive.

Electrons : particules électriquement négatives qui tournent à grande vitesse autour du noyau de l'atome auquel elles appartiennent.

Electro-aimant : barreau de fer doux entouré d'un bobinage qui peut s'aimanter au passage d'un courant en produisant un champ magnétique.

Fréquence : nombre de périodes d'une tension alternative en une seconde (cf. courant alternatif).

Intensité : quantité d'électricité débitée par un courant électrique pendant un temps déterminé. L'intensité se mesure en ampères (symbole A). Elle est « comparable » au débit de l'eau dans une conduite.

Période : intervalle de temps séparant deux passages successifs d'une tension alternative (cf. courant alternatif).

Puissance : produit arithmétique de la tension (en volts) par l'intensité (en ampères). La puissance électrique se mesure en watts (W).

Tension : différence de potentiel électrique mesurée entre deux points d'un circuit électrique. La tension se mesure en volts (symbole V). Elle est « comparable » à la pression existant dans une conduite d'eau.

Volt : unité de mesure qui définit la tension (ou différence de potentiel).

Watt : unité de mesure qui définit la puissance d'un appareil électrique
 $1 \text{ kiloWatt (kW)} = 1\,000 \text{ Watt} - 1 \text{ mégaWatt (MW)} = 1\,000\,000 \text{ Watt} -$
 $1 \text{ gigaWatt (GW)} = 1\,000\,000\,000 \text{ Watt} - 1 \text{ téraWatt (TW)} = 1\,000 \text{ milliard de Watt}$

