

Lycée Gaston Monnerville

PRODUCTION DE L'ENERGIE ELECTRIQUE



Fig. 1. Barrage de Grand Coulee (État-Unis).

Le barrage de Grand Coulee est situé sur le fleuve Columbia, dans l'État de Washington. Il s'agit de l'une des plus grandes installations hydroélectriques du monde de par sa capacité de production.

SOMMAIRE

	PAGE
1. - PROBLEMES DE LA CONSOMMATION EN ENERGIE ELECTRIQUE	3
2. - LES CENTRALES HYDROELECTRIQUES	5
3. - LES CENTRALES THERMIQUES	11
4. - LES CENTRALES NUCLEAIRES	14
5. - AUTRES SOURCES D'ENERGIE	20

- ☛ TRANSFO1.htm (La centrale d'Albi)
- ☛ EOLE - Comment fonctionne une éolienne.htm
- ☛ SOLAIRE.htm

1. - PROBLEMES DE LA CONSOMMATION EN ENERGIE ELECTRIQUE

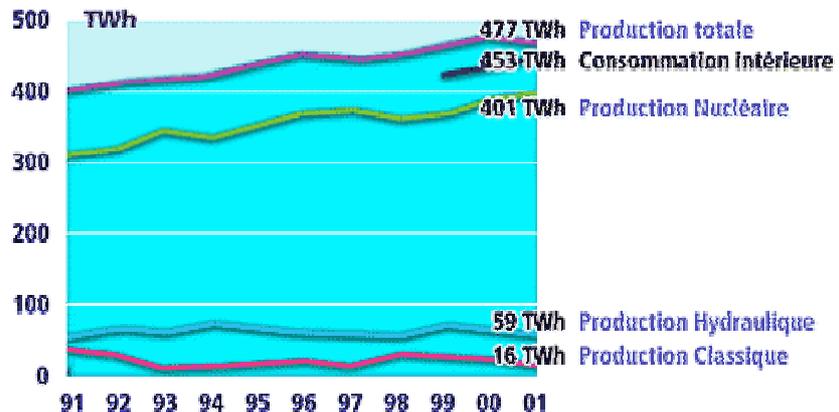
1.1. - Augmentation de la consommation

a) Les besoins en énergie électrique de tous les pays industrialisés **ne cessent d'augmenter**. En France par exemple la consommation, au cours de ces dernières années, est passée :

- de 270 milliards de kWh en 1984,
- à 453 milliards de kWh en 2001.

Fig. 2. Evolution de la production E.D.F.

T : tétra = 10^{12}



b) Il en résulte que les sociétés distributrices d'énergie électrique (E.D.F.) en France doivent, pour faire face à cette demande croissante, **prévoir de nombreuses années à l'avance** (une dizaine par exemple) tous les investissements nécessaires ; il s'agit en effet d'équipements onéreux et longs à mettre en œuvre :

- centrales électriques ;
- lignes de transport et de répartition ;
- postes de transformation.

1.2. - La demande d'énergie électrique n'est pas constante

a) L'énergie électrique consommée varie au cours du temps selon les besoins des usagers ; par exemple elle est plus importante :

- durant l'hiver (spécialement en décembre où les jours sont les plus courts) que pendant l'été ;
- durant les jours ouvrables (où tous les secteurs économiques sont actifs) qu'en fin de semaine.

Au cours d'une même journée d'hiver la consommation est particulièrement élevée :

- avant le lever du jour (alors que le travail a souvent commencé) ;
- après la tombée de la nuit (alors que le travail n'est pas encore terminé).

On parle dans ce cas **d'heures de pointe** par opposition aux **heures creuses**, intervalles de temps où la demande en énergie électrique est minimale (au milieu de la nuit par exemple).

b) Les équipements d'une société distributrice d'énergie doivent être prévus pour

1° satisfaire la demande durant les heures de pointes les plus critiques,

2° tenir compte des matériels inévitablement indisponibles (en panne, en cours de révision périodique, immobilisation par manque d'eau des centrales hydrauliques...).

Il est donc nécessaire que la **puissance installée** soit très supérieure à la **puissance moyenne demandée**, ce qui entraîne une médiocre rentabilité des équipements.

Des solutions ont été imaginées pour améliorer cette rentabilité.

1.3. - Solutions adoptées par E.D.F.

a) E.D.F. incite par des **tarifs réduits** à la consommation d'énergie électrique *durant la nuit* (après 22 heures la demande énergétique est fortement diminuée) ; ces tarifs intéressent spécialement les utilisateurs :

- de chauffage à accumulation ;
- de chauffe-eau électriques ;
- ...

b) E.D.F. a **interconnecté** son réseau avec ceux de tous les pays voisins : Grande-Bretagne, Belgique, Allemagne, Suisse, Italie, Espagne.

Cela permet de profiter :

- du décalage des heures de pointe entre ces pays ;
- des différences d'hydraulicité (remplissage des lacs de retenue) ;
- du soutien de tous les pays voisins en cas de difficulté.

c) D'autre part E.D.F. a équipé certaines de ses centrales hydroélectriques de façon à permettre aux groupes *turbine + alternateur* deux régimes de fonctionnement.

1° En *heures de pointe*, l'eau descend d'une retenue supérieure dans une retenue inférieure, si bien que la centrale **fournit** de l'énergie au réseau.

2° En *heures creuses*, les alternateurs fonctionnent en moteur et les turbines en pompe afin de faire remonter l'eau dans la retenue supérieure. La centrale **consomme** de l'énergie électrique qu'elle stocke sous forme d'*énergie potentielle* d'une certaine masse d'eau (l'énergie électrique ne pouvant être emmagasinée).

d) Enfin, depuis assez longtemps, certaines centrales nucléaires sont modulables c'est à dire **capables d'adapter partiellement leur production** aux besoins des usagers (alors que d'une façon générale, les centrales nucléaires ne peuvent fonctionner qu'à 100 % de leurs possibilités).

1.4. - Origine de l'énergie électrique

a) L'énergie électrique provient de la *transformation* de quatre énergies différentes :

- l'énergie hydraulique ;
- l'énergie thermique du charbon ;
- l'énergie thermique du fuel ;
- l'énergie thermique d'origine nucléaire

b) Depuis 1973, c'est à dire depuis le *premier choc pétrolier* (augmentation brutale du prix du pétrole), E.D.F. a réduit progressivement la part des combustibles importés (essentiellement celle du fuel) au profit :

- dans une proportion faible du charbon d'origine française ;
- dans une proportion considérable du « nucléaire ».

En 1992, les diverses sources de l'énergie électrique se répartissaient, en France, selon les pourcentages approximatifs suivants :

- nucléaire : 78 % ;
- hydraulique : 16 % ;
- charbon national : 5 % ;
- combustibles importés : 1 %.

Diverses sources de l'énergie électrique

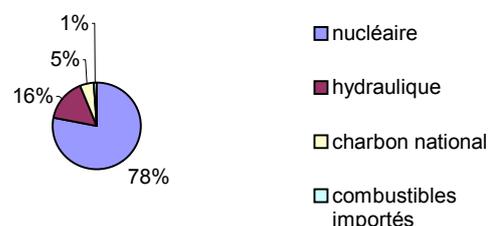
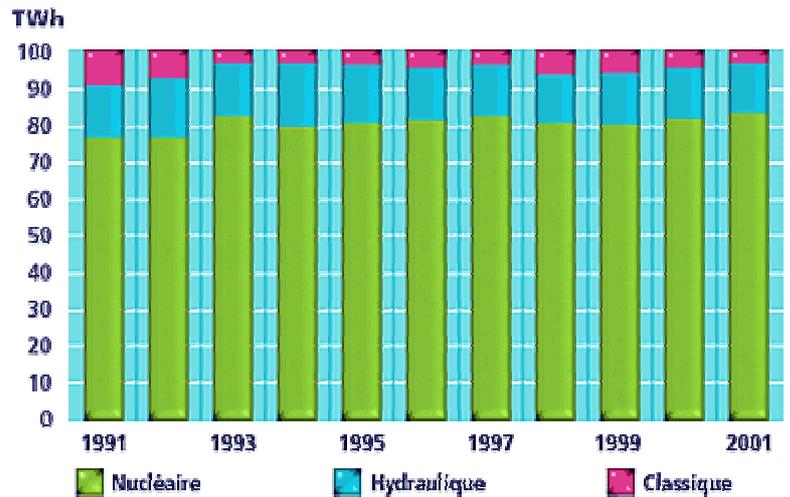


Fig. 3. Evolution de la contribution de chaque source d'énergie à la production annuelle.

(classique = charbon national + combustibles importés).



2. - LES CENTRALES HYDROELECTRIQUES

Fig. 4. Barrage de Kariba.

Ce barrage borde la frontière entre le Zimbabwe et la Zambie, qui utilisent tous deux l'énergie hydroélectrique produite. Situé sur le Zambèze, il crée une retenue d'eau appelée lac de Kariba.



2.1. - Généralités

a) Pour que l'énergie d'origine hydraulique représente encore 16 % de la production énergétique totale, il a fallu aménager pratiquement tous les sites français présentant un intérêt véritable : les ressources hydroélectriques sont presque épuisées si bien que la production n'augmentera plus guère au cours des années à venir.

Pour exploiter au mieux les possibilités hydrauliques du pays, il a été nécessaire d'adapter chaque centrale au site choisi (caractéristique du cours d'eau, conditions géographiques, géologiques, climatiques...). Ainsi, chacune des centrales a sa propre personnalité.

Cependant il est possible de classer les centrales hydroélectriques en trois grandes catégories selon la **hauteur de la chute d'eau** (et par voie de conséquence, selon le débit) ; on trouve :

- les centrales de haute chute ;
- les centrales de moyenne chute ;
- les centrales de basse chute.

b) En effet une turbine hydraulique est un moteur transformant en énergie mécanique, l'énergie que peut fournir l'eau en passant d'une altitude supérieure z_A à une altitude inférieure z_B ; si Q est le débit de l'eau (en m^3/s) la puissance naturelle d'une chute est :

$$P = \rho Q g h \quad \text{avec,}$$

ρ = masse volumique de l'eau (soit $1\,000 \text{ kg}/\text{m}^3$),

$g = 10 \text{ m}/\text{s}^2$,

$h = z_A - z_B$ (en mètres).

C'est cette puissance, au rendement de la turbine près, qui est fournie à l'alternateur sur son arbre.

La même puissance peut être obtenue :

- soit avec une hauteur de chute importante et un faible débit (par exemple $h = 1\,000 \text{ m}$ et $Q = 25 \text{ m}^3/\text{s}$) ;
- soit avec une hauteur de chute faible mais avec un débit élevé (par exemple $h = 50 \text{ m}$ et $Q = 500 \text{ m}^3/\text{s}$).

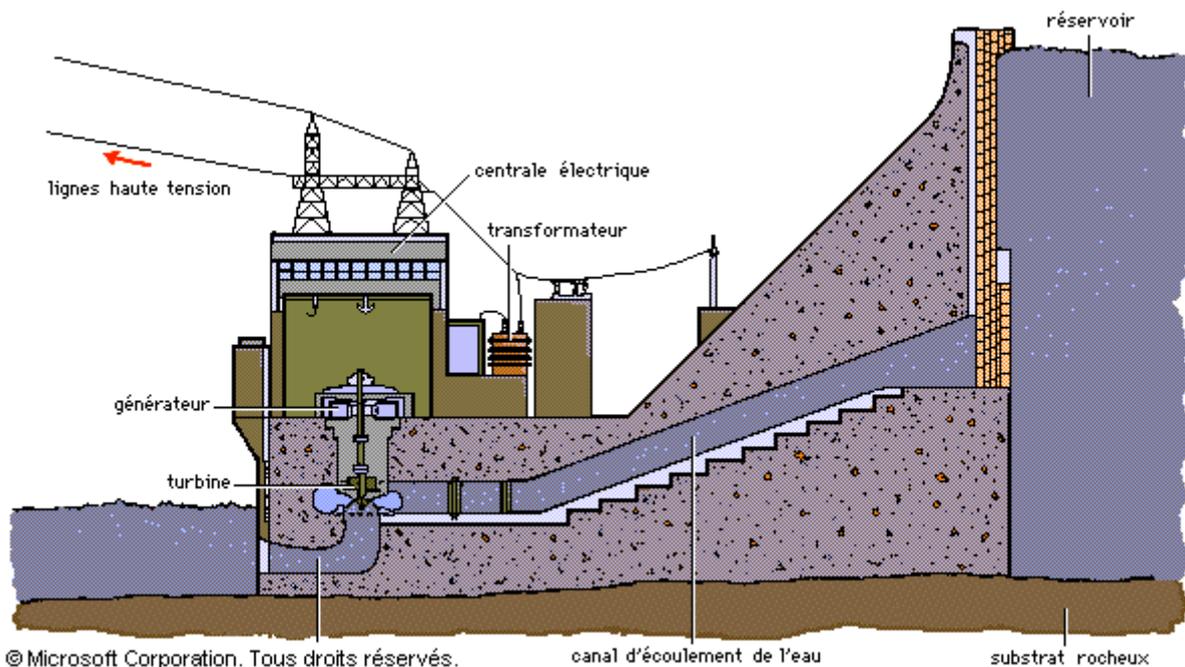


Fig. 5. Coupe d'un barrage hydroélectrique.

Les générateurs (alternateurs) de ce barrage sont reliés à des turbines actionnées par la chute d'eau en provenance du réservoir.

2.2. - Les centrales de haute chute

a) Un lac artificiel en haute montagne, retenu par un barrage, constitue une réserve d'eau ; cette eau est amenée par une ou plusieurs *conduites forcées* (fig. 7) jusqu'à l'usine souvent éloignée de plusieurs kilomètres du barrage.

Les hauteurs de chute sont de 500 à 2 000 mètres, mais les débits moyens ne sont que de quelques dizaines de m^3/s .

A l'arrivée, la vitesse de l'eau est très élevée, si bien que les turbines adoptées sont de type PELTON (roue dont le pourtour est muni d'augets sur lesquels deux *ajustages* projettent l'eau : fig. 8) ; la fréquence de rotation est relativement élevée (de l'ordre de 500 tr/min).

L'axe de l'alternateur, horizontal, dépasse de chaque côté des paliers et aux extrémités une *roue Pelton* est calée en porte-à-faux.

La centrale pouvant stocker de l'eau dans le lac **ne fonctionne pas en permanence** mais essentiellement durant les heures de pointe.

Les turbines hydrauliques convertissent l'énergie potentielle ou cinétique d'une masse d'eau en énergie mécanique. La turbine Kaplan est dotée d'une hélice à pales mobiles. En s'écoulant, l'eau provoque la rotation de l'hélice, qui entraîne l'arbre de la turbine. La turbine Pelton fonctionne selon le principe de la roue à eau.

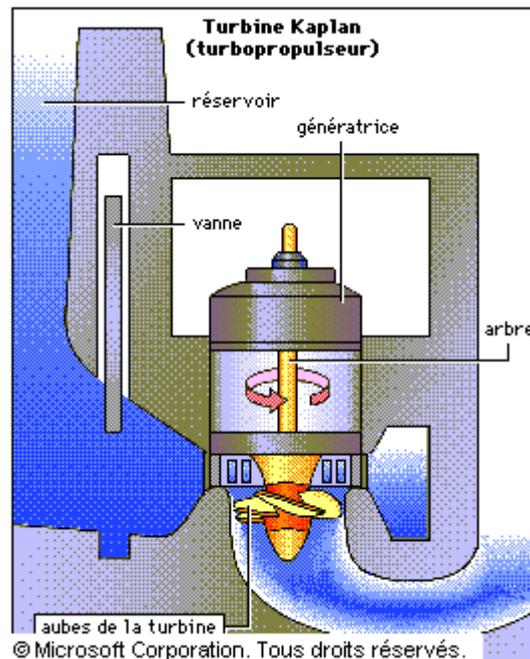


Fig. 6. Turbine Kaplan.

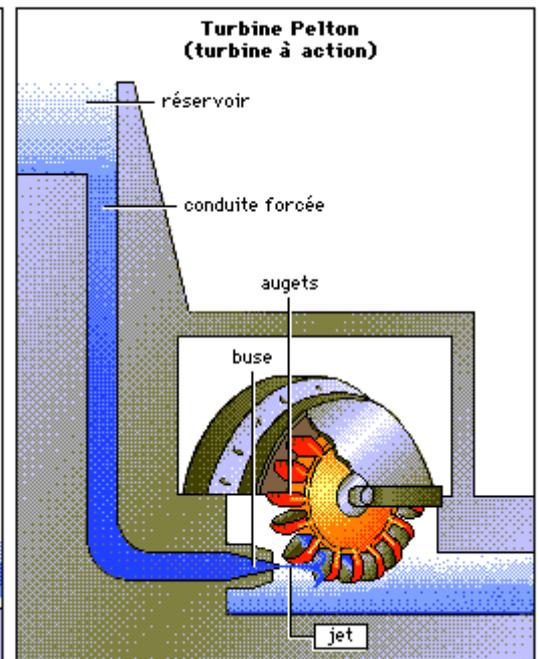


Fig.7. Turbine Pelton.

Fig. 8. Roue Pelton.



Fig. 9. Installation d'une roue Pelton dans la centrale de Fionnay.



b) Exemple : usine de la Bathie (Savoie)

Les eaux sont stockées dans le barrage de Roselend (longueur de 804 m) ;

- hauteur de chute : 1 200 m ;
- débit moyen : 50 m³/s.

L'usine comporte 6 groupes de 88 MVA tournant à 428 tr/min ; les turbines sont du type Pelton à axe horizontal.

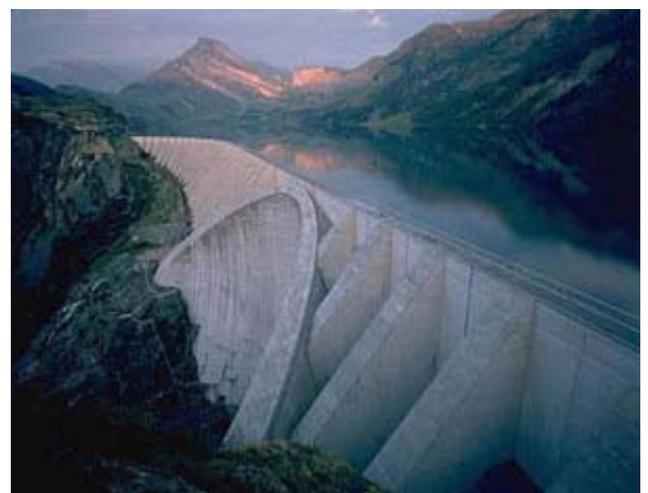


Fig. 10. Barrage et retenue de Roselend, en Savoie, au soleil couchant, vue d'aval.

2.3. - Les centrales de moyenne chute

a) Un barrage, souvent important, coupe une vallée profonde afin de constituer un vaste réservoir ; l'eau arrive à l'usine, située au pied du barrage, par des *conduites forcées* (fig. 6) ayant un diamètre de plusieurs mètres (parfois jusqu'à 10 m).

Les hauteurs de chute sont de l'ordre de 100 mètres et les débits moyens au moins de 100 m³/s.

Les turbines utilisées sont de type FRANCIS (fig. 11 et 12) à axe vertical, directement accouplées à l'alternateur (toujours situé au-dessus de la turbine) ; la fréquence de rotation est inférieure à celle d'un groupe de haute chute.

Fig. 11. Les alternateurs de cette centrale sont reliés à des turbines FRANCIS actionnées par la chute d'eau en provenance du réservoir.



Fig. 12. Turbine Francis.
Aménagement hydroélectrique du lac de Lungen (salle des machines).



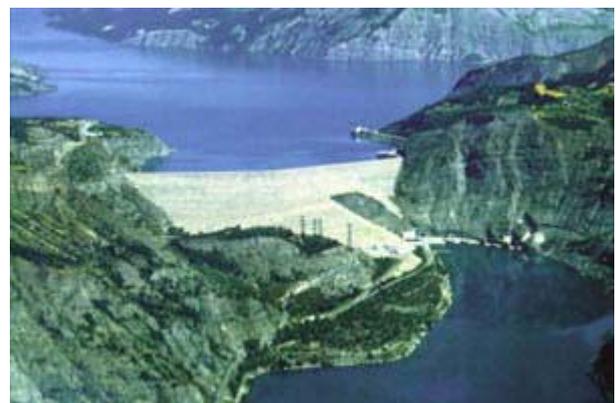
Comme les précédentes, **ces centrales ne fonctionnent pas en permanence** mais seulement lorsque la demande énergétique est élevée.

b) **Exemple** : *usine de Serre-Ponçon sur la Durance*
Un barrage *de terre* retient, dans la vallée de la Haute-Durance un immense lac artificiel ;

- hauteur de chute : 120 m ;
- débit moyen : 75 m³/s.

L'usine comporte 4 groupes de 90 MVA tournant à 214 tr/min ; les turbines sont du type FRANCIS.

Fig. 13. Barrage de Serre-Ponçon.



2.4. - Les centrales de basse chute (ou au fil de l'eau)

a) Elles sont installées le long des fleuves ne présentant qu'une faible pente mais un débit très élevé. Un *canal d'amenée* capte l'eau à une *prise d'eau* (sorte de mur barrant le fleuve), longe le fleuve durant plusieurs kilomètres puis alimente les turbines de la centrale ; le *canal de fuite* restitue ensuite l'eau au fleuve.

Les hauteurs de chute sont de l'ordre de la dizaine de mètres et les débits moyens de plusieurs centaines de m^3/s .

Les centrales furent d'abord équipées de turbines de type KAPLAN, à axe vertical (sorte de grosse hélice semblable à celle d'un navire) ; maintenant on utilise des **groupes bulbes** : l'alternateur et sa turbine constituent un même ensemble complètement immergé (fig. 14.).

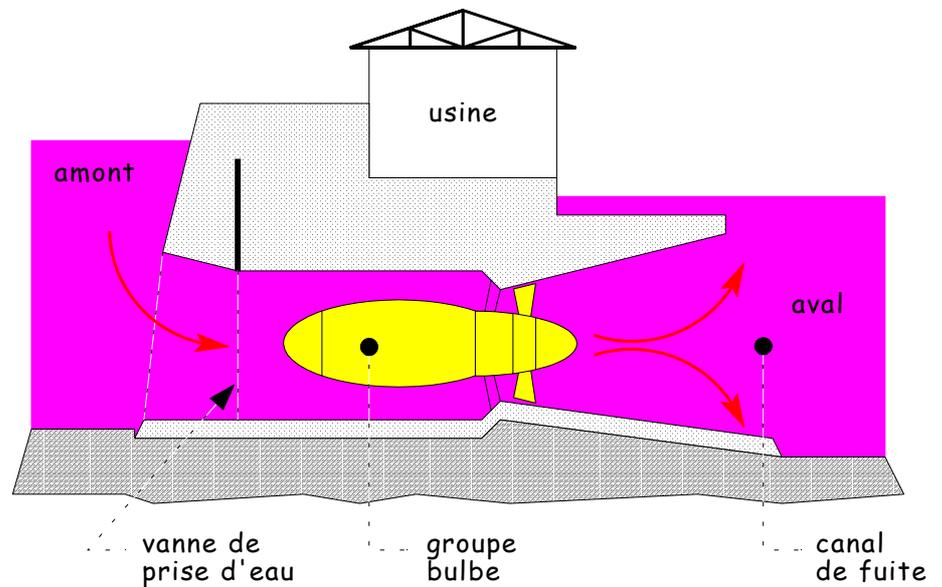


Fig. 14.

Les centrales au *fil de l'eau* n'ont pas de barrage, donc pas de retenue : comme l'eau du fleuve doit obligatoirement s'écouler, **elles fonctionnent en permanence.**

La figure 15 ci-contre représente la turbine d'un groupe bulbe.

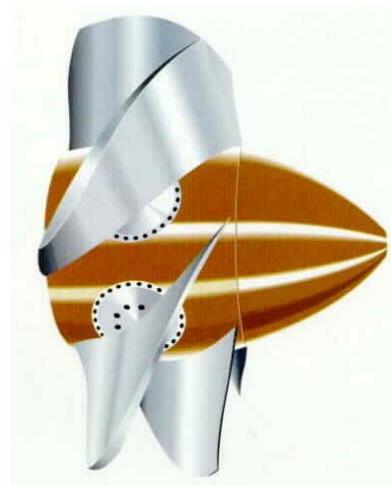


Fig. 15.

b) Les centrales de basse chute se situent, en France, le long du Rhin, du Rhône et de la Durance. Leur aménagement est très coûteux **mais leur but est généralement double** : en plus de la production de l'énergie électrique, on recherche :

- soit à *rendre le fleuve navigable* (cas du Rhône) ;
- soit à *irriguer la vallée* (cas de la Durance).

c) **Exemple 1** : usine de Donzère-Mondragon sur le Rhône

- hauteur de chute : 26 m ;
- débit moyen : 255 m^3/s .

L'usine comporte 6 groupes de 51 MVA.

d) Exemple 2 : usine de Petit Saut (Guyane)

- hauteur de chute : 30,80 m ;
- débit moyen : 180 m³/s.

L'usine comporte 4 groupes identiques (turbines de type KAPLAN à roue à 5 pales ; alternateurs de 35 MVA fournissant une tension de sortie de 5,65 kV).

La productibilité annuelle est de 560 GWh pour 4 groupes.

Fig. 16. Barrage d'Itaipú (Paraguay).

Sur le cours supérieur du fleuve Paraná (Paraguay) a été construit le gigantesque barrage d'Itaipú, qui constitue la plus grande centrale hydroélectrique du monde, d'une capacité annuelle de 12 600 MVA.



e) L'usine marée motrice de la Rance, centrale hydroélectrique marée motrice située sur l'estuaire de la Rance, en Bretagne ; première usine de ce type au monde. Les travaux commencèrent au début de 1961. L'usine fut inaugurée le 26 novembre 1966 par le général de Gaulle et fut mise en service en 1967. L'usine de la Rance est située dans l'estuaire de Saint-Malo, en Bretagne, entre la pointe de la Briantais, sur la rive droite, et la pointe de la Brebis, sur la rive gauche. La centrale utilise l'énergie des marées pour produire de l'électricité. Un barrage d'une longueur de 750 m coupe l'estuaire, isolant un bassin de la mer. À cet endroit, la dénivellation entre la marée basse et la marée haute est de 13,5 m. Le bassin a une superficie de 22 km² ; son volume utile (entre 0,00 et + 13,5 m) est de 184 millions de m³ ; le débit de pointe correspondant est de 15 000 m³/s à la mi-marée. La marée actionne des turbines spécifiques, les 24 groupes bulbes, d'une puissance de 10 MVA chacun. Ils sont constitués d'un alternateur et d'une turbine Kaplan tournant à 94 tr/min. Ils turbinent et pompent dans les deux sens : pendant la phase de remplissage du bassin lors de la marée montante, et en sens inverse pendant la phase de vidage, à marée basse. Une écluse est implantée dans la pointe sur la rive gauche (longueur du sas, 65 m ; largeur, 13 m ; radier à la cote, + 200). La centrale produit 544 millions de kWh/an.

Fig. 17. Usine marée motrice de La Rance.



3. - LES CENTRALES THERMIQUES

a) Une centrale thermique classique, appelée aussi centrale à flamme comprend (fig. 18) :

1° un ou plusieurs **générateurs de vapeur**,

2° une **turbine** à vapeur comportant

- un corps haute pression (HP),
- plusieurs corps (par exemple 3) basse pression (BP),

3° un **condenseur** dans lequel la vapeur redevient de l'eau liquide,

4° un **alternateur** en bout d'arbre de la turbine.

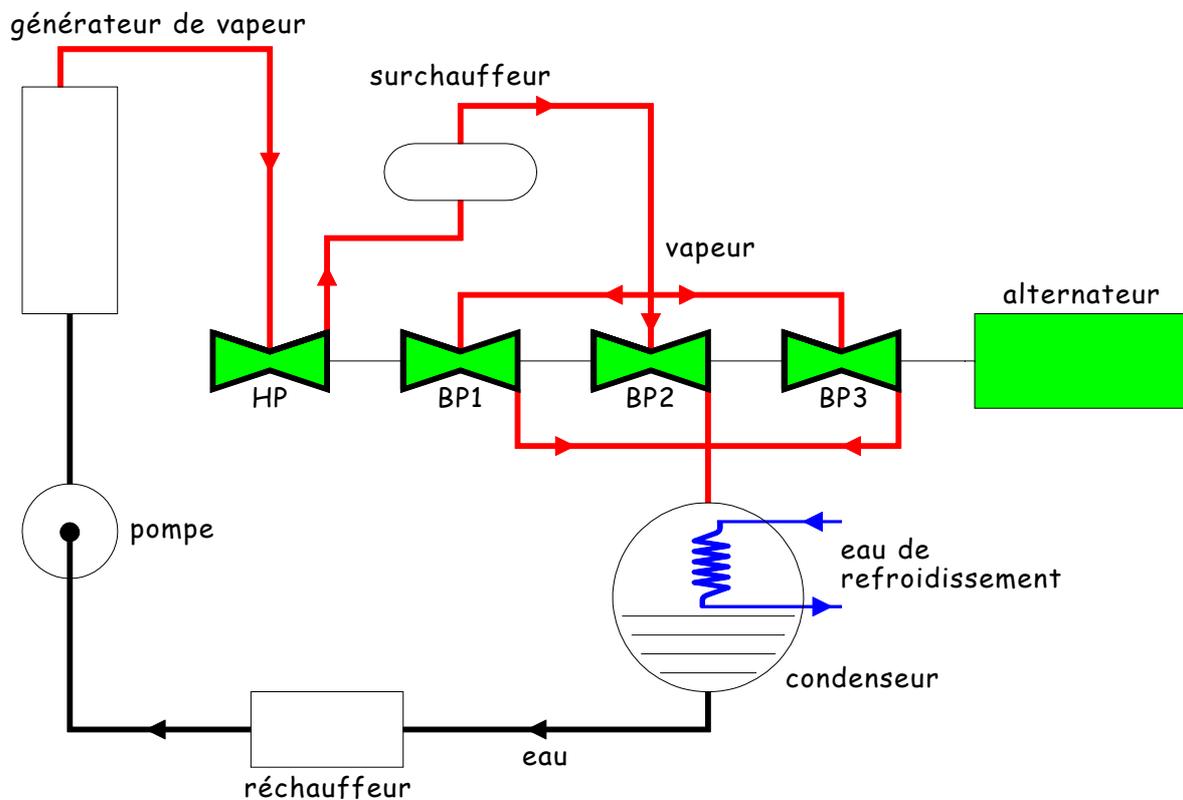


Fig. 18.

Pour améliorer le rendement :

- la vapeur passe dans un surchauffeur à la sortie du corps HP de la turbine (avant de se détendre dans les corps BP) ;
- l'eau traverse un réchauffeur entre le condenseur et le générateur de vapeur.

La chaleur nécessaire au générateur de vapeur pour transformer l'eau liquide réchauffée en vapeur peut provenir :

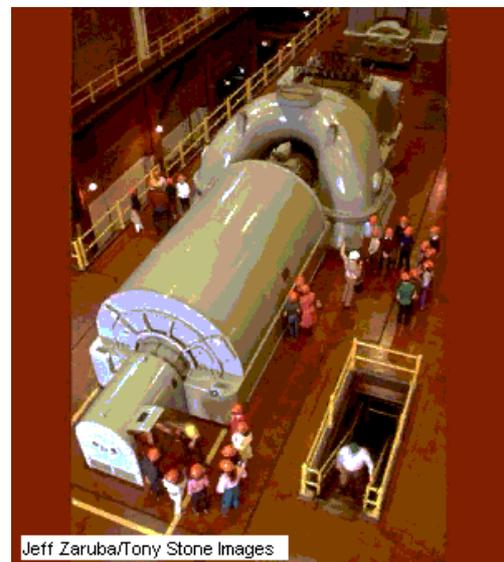
- soit de la combustion du charbon ou du fuel (combustible provenant de la distillation du pétrole brut) ;
- soit d'un réacteur nucléaire.

Fig. 19. Centrale thermique à flamme.



Fig. 20. Turbine à vapeur.

La turbine à vapeur transforme l'énergie cinétique d'un flux de vapeur d'eau en énergie mécanique.



b) Jusqu'en 1973 les centrales installées en France, à part quelques exceptions, étaient au charbon et surtout au fuel. Par suite de la demande croissante d'énergie ainsi que des progrès technologiques (dans la construction des générateurs de vapeur, des turbines et des alternateurs), E.D.F. augmenta progressivement la puissance de ses unités de production :

- 1955 : 125 MVA ;
- 1961 : 250 MVA ;
- 1968 : 600 MVA.

Cette dernière puissance n'a pas été dépassée pour les centrales *thermiques classiques* (au charbon et au fuel) ; il est vrai qu'après 1973 :

- aucune centrale au fuel ne fut mise en chantier ;
- seulement deux centrales au charbon, de 600 MVA, furent construites afin d'exploiter au mieux les ressources minières nationales.

c) Caractéristiques d'une unité de 600 MVA

Générateur de vapeur

- capacité de production : 1 800 t/h de vapeur ;
- chambre de combustion à circulation naturelle ;
- surchauffeur température de sortie : 565 °C ;
- pression de sortie : 163 bars.

Turbine

Elle comprend sur une même ligne d'arbre :

- un corps haute pression (HP) : pression d'admission, 163 bars ; température, 565 °C ;
- un corps moyenne pression (MP) : pression d'admission, 36 bars ; température, 565 °C ;
- un corps basse pression (BP). Il s'agit en effet de 3 corps de 12 étages, chacun présente une section d'échappement de 50 m².

Alternateur

- puissance : 600 MVA (20 kV, $\cos \varphi = 0,9$) ;
- vitesse : 3 000 tr /min ; courant nominal : 19 000 A ;
- refroidissement par hydrogène à la pression de 4 bars.

4. - LES CENTRALES NUCLEAIRES

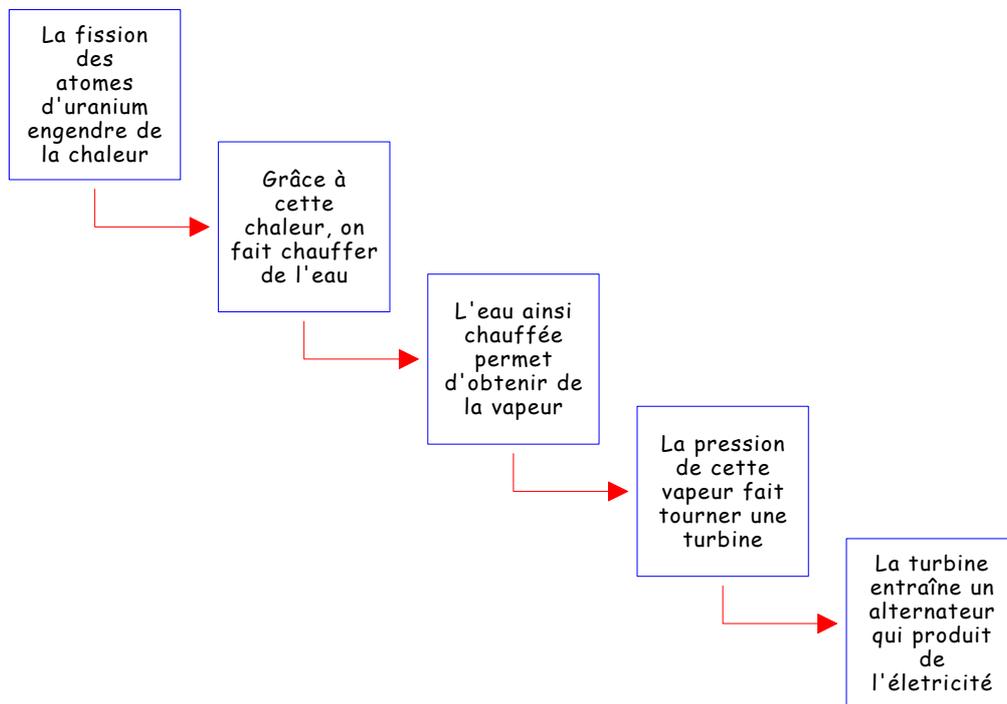
4.1. - Comment fonctionne une centrale nucléaire

Une centrale nucléaire est une usine de production d'électricité. Elle utilise pour cela la chaleur libérée par l'uranium qui constitue le "combustible nucléaire". L'objectif est de faire chauffer de l'eau afin d'obtenir de la vapeur. La pression de la vapeur permet de faire tourner à grande vitesse une turbine, laquelle entraîne un alternateur qui produit de l'électricité.

Ce principe de fonctionnement est le même que celui qui est utilisé dans les centrales thermiques classiques fonctionnant avec du charbon, du pétrole ou du gaz... à cette différence que le combustible utilisé comme source de chaleur est constitué par l'uranium.

a) Principe de production de l'électricité dans une centrale nucléaire

Il peut être schématisé comme suit :



b) Processus de production d'électricité dans une centrale nucléaire à eau sous pression

Dans les centrales nucléaires françaises, relevant de la filière à eau sous pression, la production d'électricité, ainsi que le refroidissement et l'évacuation de la chaleur, s'effectuent selon le processus suivant :

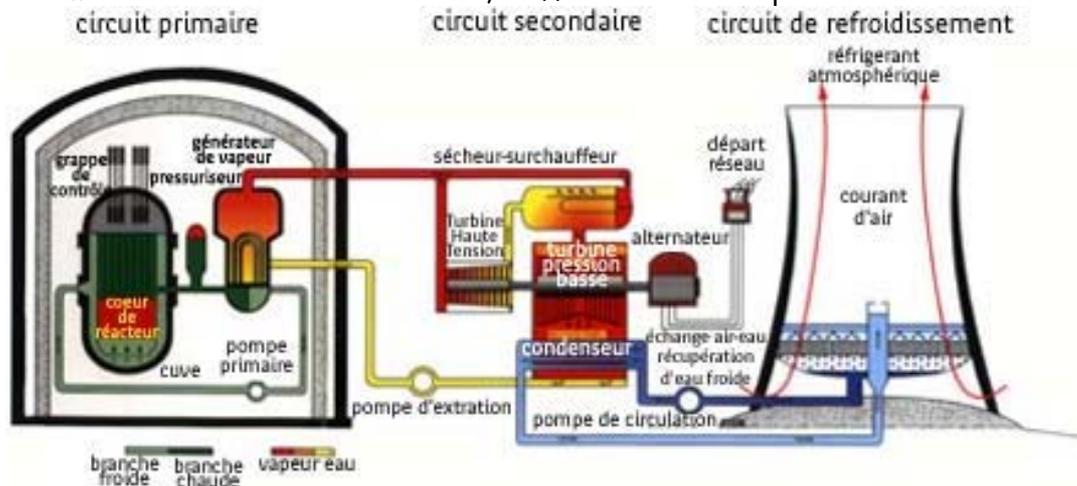


Fig. 21. Schéma de fonctionnement d'un Réacteur à Eau sous Pression (REP).

- **Circuit primaire** : pour extraire la chaleur
- **Circuit secondaire** : pour produire la vapeur
L'eau du circuit primaire transmet sa chaleur à l'eau circulant dans un autre circuit fermé : le circuit secondaire. Cet échange de chaleur s'effectue par l'intermédiaire d'un générateur de vapeur. Au contact des tubes parcourus par l'eau du circuit primaire, l'eau du circuit secondaire s'échauffe à son tour et se transforme en vapeur. Cette vapeur fait tourner la turbine entraînant l'alternateur qui produit l'électricité. Après son passage dans la turbine, la vapeur est refroidie, retransformée en eau et renvoyée vers le générateur de vapeur pour un nouveau cycle.
- **Circuit de refroidissement** : pour condenser la vapeur et évacuer la chaleur
Pour que le système fonctionne en continu, il faut assurer son refroidissement. C'est le but d'un troisième circuit indépendant des deux autres, le circuit de refroidissement. Sa fonction est de condenser la vapeur sortant de la turbine. Pour cela est aménagé un condenseur, appareil formé de milliers de tubes dans lesquels circule de l'eau froide prélevée à une source extérieure : rivière ou mer. Au contact de ces tubes, la vapeur se condense pour se transformer en eau. Quant à l'eau du condenseur, elle est rejetée, légèrement échauffée, à la source d'où elle provient. Si le débit de la rivière est trop faible, ou si l'on veut limiter son échauffement, on utilise des tours de refroidissement, ou aéroréfrigérants. L'eau échauffée provenant du condenseur, répartie à la base de la tour, est refroidie par le courant d'air qui monte dans la tour. L'essentiel de cette eau retourne vers le condenseur, une petite partie s'évapore dans l'atmosphère, ce qui provoque ces panaches blancs caractéristiques des centrales nucléaires.

Fig. 22. Le panache blanc des centrales nucléaires...

... est constitué par l'évaporation de l'eau utilisée pour refroidir la centrale. Ce n'est pas de la "fumée" résultant d'une combustion mais de l'air humide.



4.2. Le pilotage d'une tranche nucléaire

Une "tranche" nucléaire est l'ensemble constitué du réacteur et du système de production d'électricité qui lui est associé : la turbine et l'alternateur. Dans presque tous les cas, une centrale comporte plusieurs tranches. Toutes les fonctions importantes d'une tranche nucléaire sont commandées et surveillées depuis la salle de commande. Les opérateurs, ou "pilotes", veillent au bon fonctionnement de l'installation et ajustent la puissance du réacteur à la demande du réseau électrique.

Fig. 23. Salle de commande de la centrale de Chooz (EDF - Photo : G. LARVOR).



a) La salle de commande

C'est le "cerveau" d'une tranche nucléaire. C'est dans la salle de commande que sont centralisées les principales données relatives au fonctionnement de la tranche. C'est de là que partent les "ordres" transmis par les opérateurs aux différents composants et systèmes. Ce "pilotage" télécommandé fait largement appel à l'automatisation et à l'informatique. Il s'agit là d'aides indispensables pour les opérateurs. Mais ce sont eux qui restent les responsables à part entière du pilotage de la tranche et qui prennent les décisions prévues par les procédures.

b) L'équipe d'exploitation

L'exploitation d'une centrale nucléaire met en œuvre des technologies avancées et demande un personnel spécialement formé et entraîné. L'équipe d'exploitation compte plusieurs centaines de personnes, parfois plus de mille selon le nombre de tranches que comporte la centrale. Les agents se relaient 24 heures sur 24 pour assurer la conduite et la surveillance des installations. Il se répartissent en plusieurs catégories de métiers assurant les différentes missions de l'exploitation :

- **Les agents de conduite** pilotent les tranches de la centrale, se relayant jour et nuit par quarts de huit heures ;
- **Les agents de sûreté et de radioprotection** veillent à la sûreté de fonctionnement des équipements et à la sécurité radiologique du personnel ;
- **Les agents de sécurité** assurent la protection du site ;
- **Les agents de maintenance** surveillent et entretiennent les différents composants et matériels de la tranche ;
- **Les agents de la chimie et de l'environnement** analysent les fluides et gaz utilisés ou rejetés par la centrale et effectuent les contrôles de l'environnement sur le site et dans le voisinage de l'installation ;
- **Les agents de la gestion et de l'administration** gèrent le budget et assurent les tâches administratives, commerciales, de relations extérieures, de communication... liées au fonctionnement de la centrale.

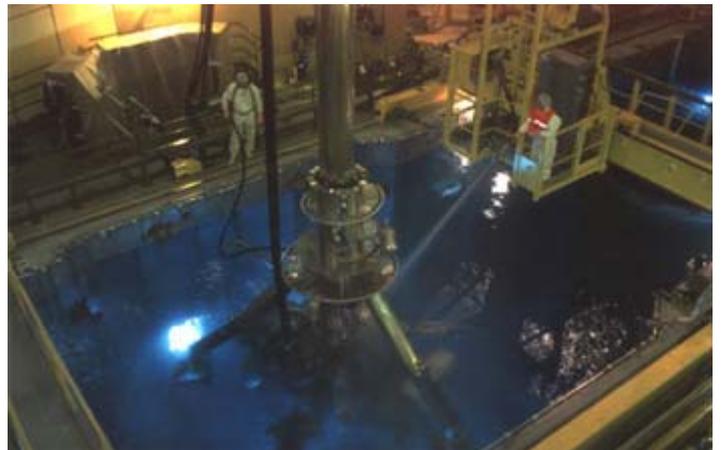
4.3. La maintenance

Une centrale nucléaire rassemble et relie entre eux, selon une organisation complexe, des milliers de composants : réservoirs, tuyauteries, vannes, pompes, filtres, câbles électriques, instruments de mesure, circuits informatiques, etc. Cet ensemble doit impérativement être maintenu en état de bon fonctionnement. C'est la condition pour garantir la sécurité du personnel, la sûreté et la performance de l'installation. Dans les centrales françaises, cette maintenance est organisée à trois niveaux complémentaires :

- **Maintenance quotidienne** : les agents de maintenance surveillent de façon continue l'état des équipements et effectuent les ajustements ou réparations nécessaires.

Fig. 24. Inspection par robot MIS de la cuve du réacteur de la tranche 1 de la centrale de Nogent sur Seine

(EDF - Photo : Stephan ZAUBITZER).



- **Maintenance annuelle programmée** : tous les ans, chacune des tranches de la centrale est arrêtée durant 5 à 6 semaines pour un rechargement en combustible et pour des opérations d'entretien de grande ampleur. A cette occasion, des techniciens et ouvriers venus d'entreprises extérieures apportent leur concours aux agents d'EDF pour ce travail de révision.

- **Visite décennale** : tous les dix ans, une inspection complète et détaillée de la tranche est effectuée. Les principaux composants : cuve, circuit primaire, générateurs de vapeur, enceinte de confinement... font l'objet d'examen et tests approfondis.

4.4. Les principaux composants d'une tranche nucléaire

(Les dimensions des différents composants, données ici à titre d'exemple, se rapportent à la centrale nucléaire de Civaux, dans la Vienne, équipée de deux réacteurs de 1450 mégawatts électriques de puissance).

a) Bâtiment réacteur : constitué d'une double enceinte en béton, hauteur 60 m, diamètre 50 m, abrite la cuve du réacteur et les principaux composants nucléaires de la tranche.



Fig. 25. Bâtiment réacteur de la centrale de Flamanville (EDF - Photo : Pierre BERENGER).

b) Cuve du réacteur : hauteur 13,66 m, diamètre 4,95 m, épaisseur 23 cm, en acier spécialement traité ; elle abrite le cœur du réacteur formé par les assemblages combustibles contenant l'uranium.



Fig. 26. Cuve de réacteur.

c) Pressuriseur : maintient la pression à environ 155 bar, ce qui empêche l'eau du circuit primaire de bouillir.

d) Générateur de vapeur : reçoit l'eau chaude du circuit primaire (dans des tubes en forme de U), ce qui permet de chauffer l'eau du circuit secondaire et de la transformer en vapeur. On compte dans la plupart des cas trois générateurs de vapeur par tranche.



Fig. 27. Générateur de vapeur 900 MW à l'usine Framatome ANP de Chalon-Saint-Marcel.

e) **Le groupe turbo-alternateur** : composé des différents corps de turbine et de l'alternateur, il est mis en mouvement par la pression de la vapeur et produit le courant électrique. Il est situé dans la salle des machines, un hall de 106 m de longueur et 47 m de hauteur.



Fig. 28. Les groupes turbo-alternateurs de la centrale de Gravelines (tranches 1 à 4), (Photo : EDF).

f) **Le poste électrique** : reçoit l'électricité produite par les tranches de la centrale et l'évacue vers le réseau à très haute tension.

g) **Le réfrigérant atmosphérique (également appelé tour de refroidissement ou aéroréfrigérant)** : c'est, pour chaque tranche, le point d'aboutissement du circuit de refroidissement dans lequel l'eau réchauffée sortant du condenseur est refroidie par un courant d'air frais ascendant. Hauteur : 178 m ; diamètre à la base : 155 m. Une partie de l'eau s'évapore dans l'atmosphère ; l'autre partie retourne, refroidie, vers le condenseur. (Certaines centrales nucléaires ne possèdent pas de réfrigérant atmosphérique. Elles sont refroidies uniquement par l'eau venant de la rivière ou de la mer).



Fig. 29. Réfrigérants atmosphériques de la tranche 2 de la centrale de Civaux (EDF - Photo : Claude PAUQUET).

4.5. Les différentes filières de centrales nucléaires

Il existe différents modèles ou "filières" de centrales nucléaires, se caractérisant par trois principaux éléments et leur association :

- le combustible : uranium naturel, uranium enrichi, plutonium ;
- le modérateur (substance utilisée pour favoriser le développement de la réaction en chaîne) : eau ordinaire, eau lourde, graphite ;
- la caloporteur (fluide d'extraction de la chaleur produite par le combustible nucléaire) : eau ordinaire sous pression ou bouillante, eau lourde, gaz carbonique, sodium, hélium.

Les centrales nucléaires françaises appartiennent à la filière à eau sous pression. Combustible : uranium légèrement enrichi ; modérateur et caloporteur : eau ordinaire sous pression. Cette filière REP (Réacteur à Eau sous Pression) est la plus répandue dans le monde. Les centrales françaises sont réalisées par séries standardisées correspondant à différents paliers de puissance électrique des réacteurs : 900, 1300, 1450 mégawatts.

4.6. Localisation des centrales nucléaires en France

Le parc français compte aujourd'hui 58 réacteurs à eau sous pression (voir figure 30). Fessenheim, qui a démarré en Alsace en 1977, a été la première des 34 unités du palier de 900 mégawatts. La dernière des 4 unités du palier 1450 mégawatts a été mise en service fin 1999 à Civaux. En vingt ans d'exploitation, le parc nucléaire a donné les preuves de sa fiabilité.

Le nucléaire a libéré la France de la dépendance pétrolière tout en limitant les rejets de polluants (gaz carbonique, oxydes d'azote, dioxyde de soufre) dans l'atmosphère. Sa part dans la production d'électricité en France est passée de 8 % en 1974 à 75 % aujourd'hui.

Fig. 30.



5. - AUTRES SOURCES D'ENERGIE

5.1. - Energie éolienne

a) **Éolienne, énergie**, énergie cinétique du vent, utilisée après conversion en énergie mécanique ou électrique. Cette **énergie** résulte de la **force** exercée par le vent sur les pales d'une hélice montée sur un arbre rotatif, lui-même relié soit à des systèmes mécaniques qui servent à moudre le grain ou à pomper l'eau, soit à un aérogénérateur qui transforme l'énergie mécanique en énergie électrique. Lorsque l'arbre est connecté à une charge, par exemple à une **pompe**, la machine est appelée roue éolienne ; lorsque celle-ci est utilisée pour produire de l'électricité, il s'agit d'une turbine éolienne ou d'un aérogénérateur.

Fig. 31. Éolienne traditionnelle.

Cette éolienne traditionnelle est utilisée en agriculture pour le pompage de l'eau.



b) Aérogénérateurs

La fonction privilégiée des éoliennes est le pompage de l'eau, cette dernière pouvant être stockée et utilisée selon les besoins. L'emploi des éoliennes, sous le nom d'aérogénérateurs, pour la production d'électricité est plus limité. En effet, la production d'énergie éolienne est variable dans le temps. Ainsi, les petites installations autonomes d'aérogénérateurs doivent stocker l'énergie dans des accumulateurs onéreux pour pourvoir à la demande. En revanche, les installations reliées à un grand réseau électrique sont relayées, pendant leurs périodes improductives, par d'autres sources d'énergie. Les États-Unis, les Pays-Bas, le Danemark, l'Allemagne et l'Ukraine expérimentent des éoliennes qui, par groupes de cent, pourraient fournir de l'électricité à un prix compétitif.

Fig. 32. Aérogénérateurs regroupés en Californie.



On estime que, vers le milieu du XXI^e siècle, près de 10 p. 100 de l'électricité mondiale pourrait être fournie par des générateurs éoliens, ou aérogénérateurs. Dans un aérogénérateur, un rotor convertit l'énergie cinétique du vent en énergie cinétique de rotation (pour l'arbre). Un train d'engrenages permet d'augmenter ou de réduire la vitesse. Un générateur convertit l'énergie de rotation de l'arbre en énergie électrique. Sur certaines machines à axe horizontal, le pas des ailes peut être en outre ajusté de manière à régler la vitesse pendant le fonctionnement, voire à couper totalement le système lorsque le vent atteint des vitesses trop élevées. D'autres machines utilisent le décrochage, un phénomène aérodynamique qui limite naturellement la puissance sous des vents forts. Les aérogénérateurs actuels commencent en général à tourner lorsque la vitesse du vent est d'environ 19 km/h, ils atteignent leur puissance de croisière pour des vitesses du vent comprises entre 40 et 50 km/h et s'arrêtent sous des vents soufflant à plus de 100 km/h. Les meilleurs sites pour implanter des aérogénérateurs sont ceux où la vitesse moyenne du vent est d'au moins 20 km/h.

L'énergie éolienne, dont la production ne s'accompagne pas d'émission de gaz à **effet de serre**, est une solution intéressante pour remplacer les combustibles fossiles tels que le pétrole. Les aérogénérateurs les plus rentables pour une production électrique à grande échelle sont de taille moyenne (rotors mesurant entre 15 et 30 m de diamètre, avec des puissances comprises entre 100 et 400 kW). Ces aérogénérateurs sont parfois regroupés, notamment en Californie, où des groupes d'éoliennes peuvent produire jusqu'à 1 200 MW. Les coûts de production de ces aérogénérateurs sont largement compétitifs par rapport à d'autres générateurs.

Le Danemark produit actuellement plus de 2 p. 100 de son électricité grâce à des turbines éoliennes. Celles-ci sont également utilisées pour accroître l'alimentation en électricité dans les communautés vivant sur des îles ou sur d'autres sites isolés. La France est l'un des rares pays européens à ne pas avoir développé de programme en matière d'énergie éolienne.

5.2. - Energie solaire

a) Solaire, énergie, énergie produite par le Soleil à la suite de réactions de fusions nucléaires, source de la plupart des énergies disponibles sur Terre et exploitable pour la production d'électricité. Elle se propage dans l'espace sous la forme de « grains », ou quanta d'énergie, les photons ; elle est sans cesse renouvelée.

La centrale de Warner-Spring aux USA est composée de systèmes contenant chacun 24 miroirs paraboliques disposés en coupelles (les héliostats) : la puissance électrique maximale du site atteint 25 mégawatts (MW).



Fig. 33. Centrale photovoltaïque de Warner Springs de 25 MW électrique de puissance installée.