

**Introduction :**

Au début de l'utilisation de l'énergie électrique, les installations étaient de faible puissance : elles se limitaient à un immeuble ou à un groupe d'immeubles.

La production de l'énergie était assurée par de petites génératrices qui fournissaient directement la tension utilisable.

Les pertes de charge importantes interdisaient le transport à grande distance et les usines génératrices étaient implantées au centre géographique des réseaux à alimenter : on leur donna le nom de centrales électriques.

Le développement rapide des multiples applications de l'électricité (force motrice, éclairage, etc.) provoqua un accroissement considérable des demandes en provenance d'utilisateurs de plus en plus nombreux, entraînant ainsi une augmentation importante de la production d'énergie électrique.

Dans le but d'améliorer le rendement énergétique, les anciennes sources locales furent remplacées progressivement par des usines électriques utilisant des matériels importants : le transport et la distribution de l'énergie électrique s'en trouvèrent complètement transformés.

L'énergie électrique est actuellement produite par des alternateurs accouplés à des moteurs dont le fonctionnement fait appel principalement à l'énergie thermique (emploi d'un combustible) ou à l'énergie hydraulique (emploi de la houille blanche).

La figure 1 schématise les trois aspects successifs sous lesquels se présente la fourniture de l'énergie électrique : production, transport distribution.

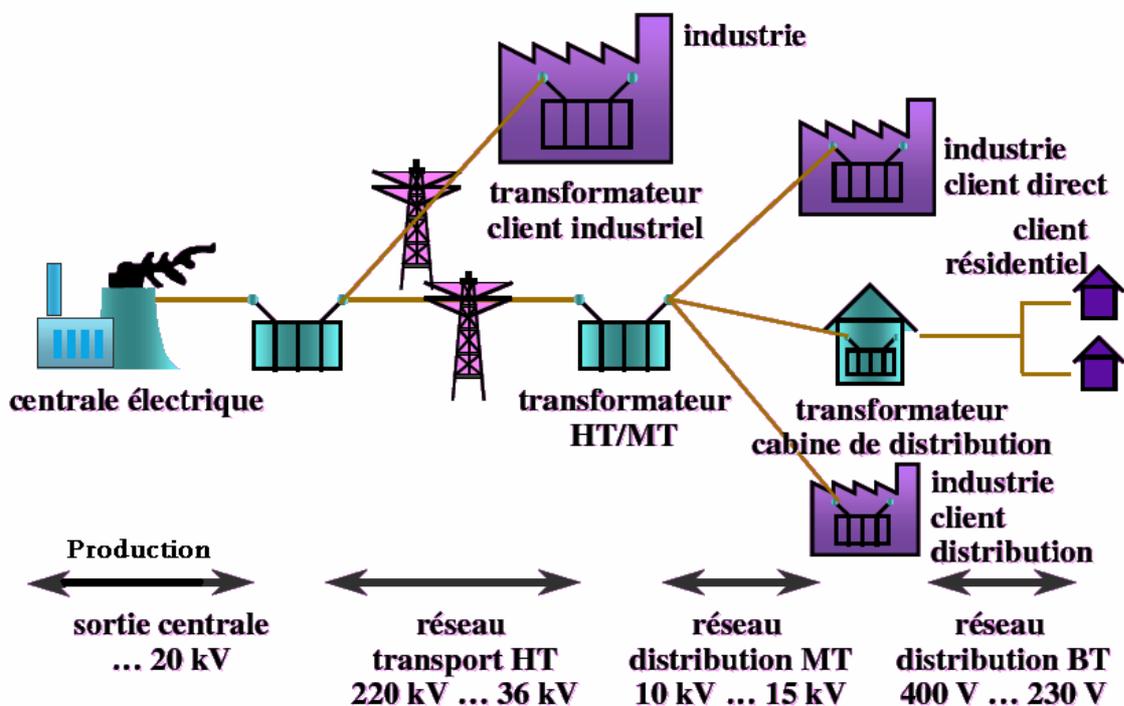


Figure 1 Fourniture de l'énergie électrique

### Appel de puissance d'un réseau :

La puissance demandée par l'ensemble des clients d'un réseau subit de grandes fluctuations selon l'heure de la journée et selon les saisons. Le graphique de la figure 2 montre des variations quotidiennes et saisonnières typiques pour un réseau. On constate sur ce graphique que l'appel de puissance maximale pendant l'hiver (15GW) peut être plus du double de l'appel minimal pendant l'été (6GW)

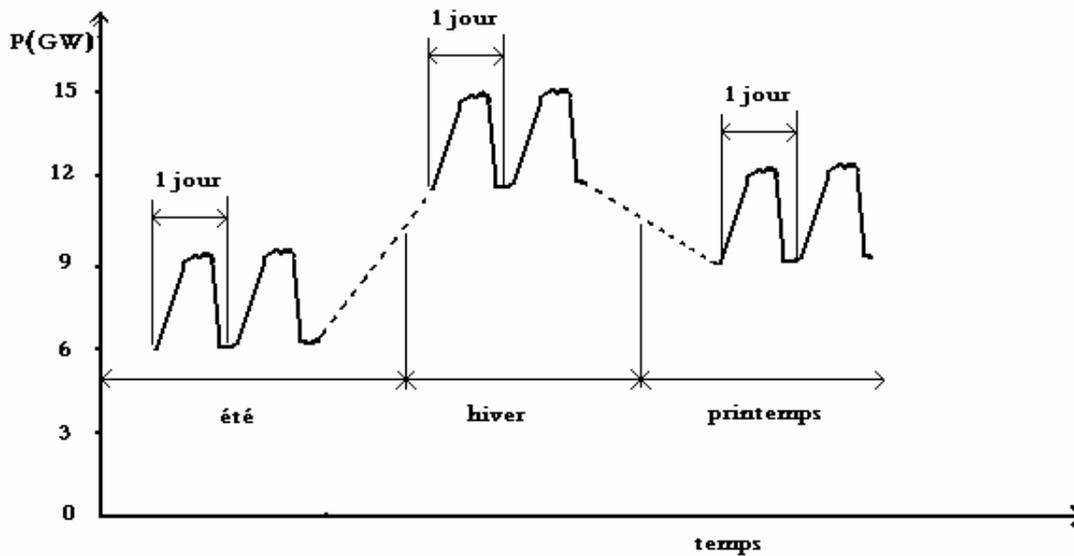


Figure 2 Fluctuations typiques de l'appel de puissance durant une année.

La figure 3 montre, pour le même réseau, la variation horaire de l'appel de puissance pour une journée d'hiver et pour une journée d'été. On remarque dans cet exemple que la pointe de 15GW en hiver se produit vers 17h, car c'est à ce moment que les lumières sont allumées dans toutes les maisons et que plusieurs usines sont encore en marche. Par contre, le creux de la demande arrive aux petites heures du matin.

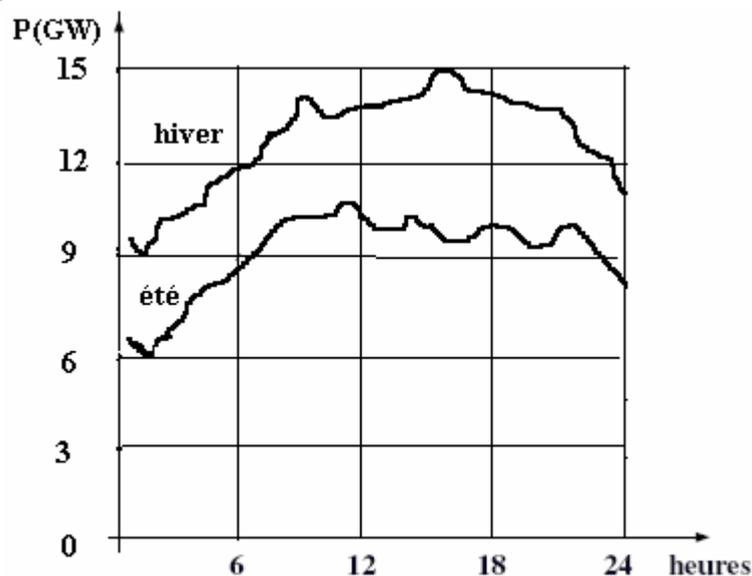


Figure 3 Fluctuation de l'appel de puissance durant une journée.

Si l'on ramène les appels de puissance journaliers à une base annuelle, on obtient le graphique de la figure 4. Par exemple, cette figure indique qu'un appel de puissance de 9GW existe pendant 70% du temps, tandis qu'un appel de 12GW ne se produit que 15% du temps. On s'aperçoit qu'une puissance de base de 6GW est requise en tout temps, qu'une puissance intermédiaire de 6GW est requise pendant au moins 15% du temps et qu'une puissance de pointe de 3GW n'est requise que pendant une courte période. Ces fluctuations de l'appel de puissance obligent les compagnies d'électricité à prévoir trois classes de centrales de génération :

- 1) les centrales de base de grande puissance qui débitent leur pleine capacité en tout temps. Les centrales nucléaires sont particulièrement aptes à remplir ce rôle.
- 2) Les centrales intermédiaires de puissance moyenne qui réagissent rapidement aux fluctuations de la demande. C'est le cas des centrales hydrauliques dont le débit est facilement contrôlable.
- 3) Les centrales de pointe de puissance moyenne qui ne débitent leur pleine capacité que pendant de courtes périodes.

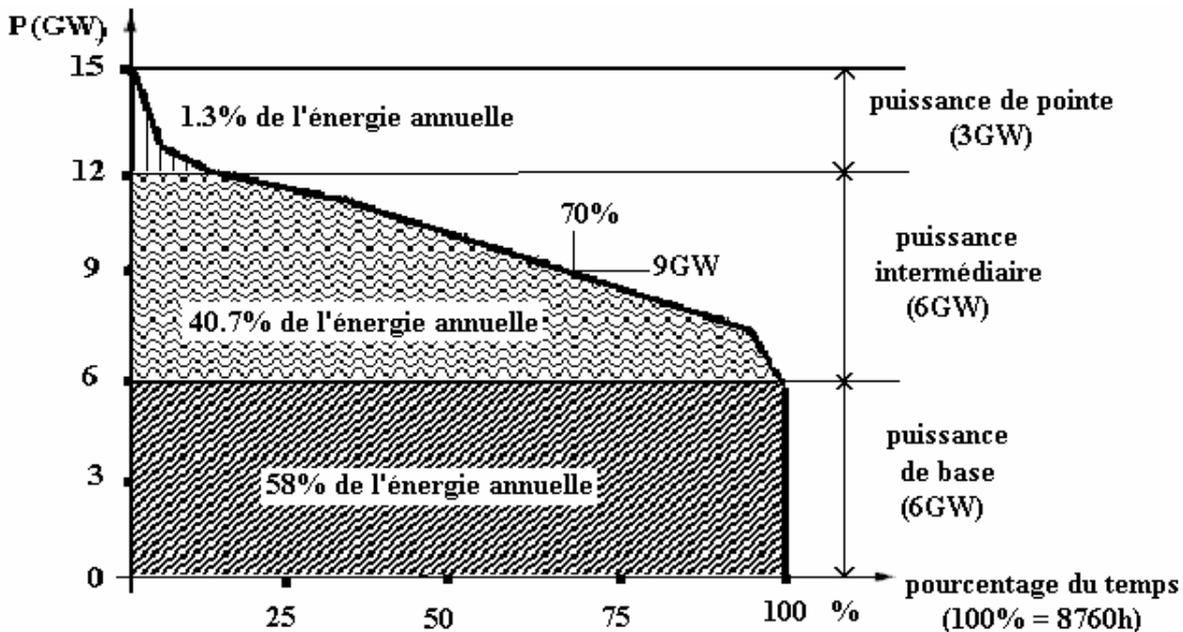


Figure 4 Appel de puissance en fonction de son temps d'utilisation annuel.

Les centrales de pointe doivent être mises en marche dans un délai très court ; elles utilisent donc des moteurs diesel, des turbines à gaz, des moteurs à air comprimé ou des turbines hydrauliques à réserve pompée. Remarquons que la période d'amorçage est de quatre à huit heures pour les centrales thermiques et de quelques jours pour les centrales nucléaires. Il n'est donc pas économique d'utiliser ces centrales pour fournir la puissance de pointe.

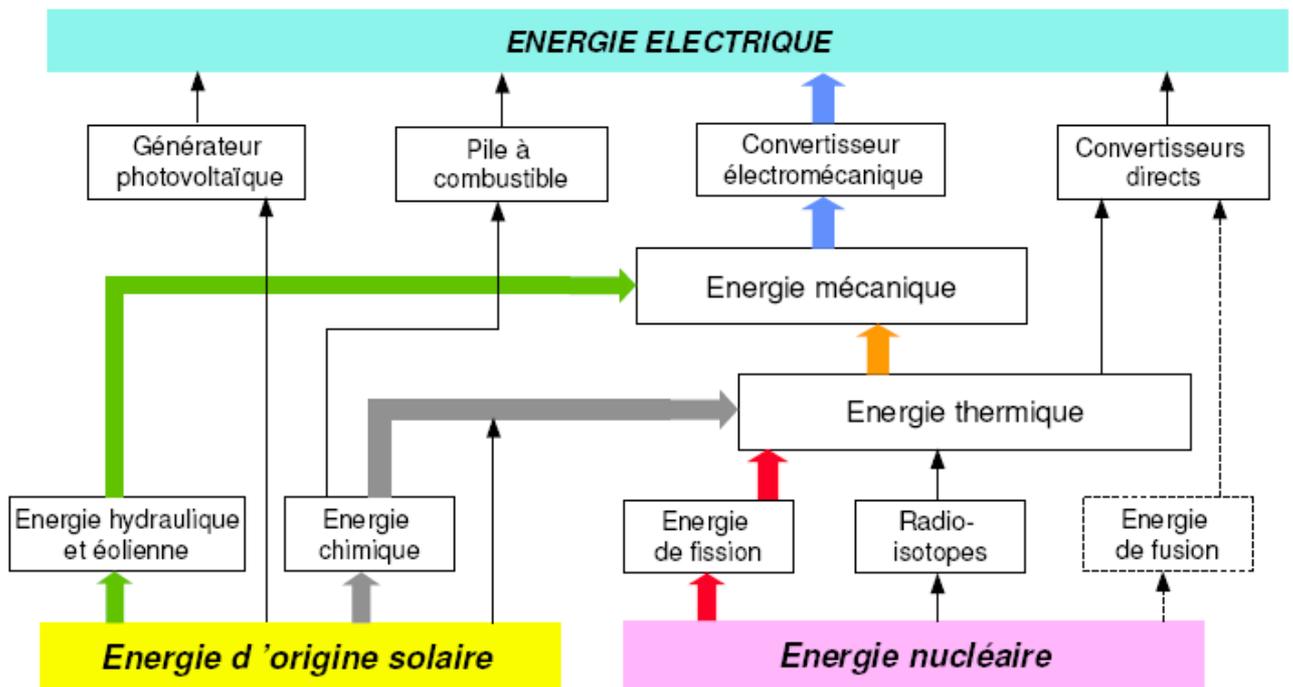
Quand aux considérations énergétiques, la figure 4 révèle que les centrales de base de 6GW fournissent 58% de l'énergie annuelle du réseau. Par contre, les centrales de pointe de 3GW donnent seulement 1.3% de l'énergie totale. L'énergie provenant des centrales de pointe coûte donc beaucoup plus cher que celle des centrales de base, c'est pourquoi les compagnies d'électricité encouragent les usagers à limiter leur charge de pointe.

**Types de centrales :**

Il existe trois principaux types de centrales pour produire de l'énergie électrique :

- a) les centrales hydrauliques
- b) les centrales thermiques
- c) les centrales nucléaires.

Bien qu'on puisse exploiter le vent, les marées et l'énergie rayonnante du soleil, ces sources d'énergie ne représentent, pour les années à venir, qu'une petite partie de l'énergie totale dont nous aurons besoin. Tout semble indiquer qu'au niveau mondial nous continuerons à exploiter les ressources fossiles (charbon, gaz naturel) et nucléaires.



**Figure 5** Filières de production d'énergie électrique

Donc on peut représenter la production d'énergie électrique en quatre filières :

- Filière Hydraulique
  - Types d'installations hydrauliques
  - Centrales de pompage
- Filière thermique à combustibles fossiles
  - Thermique classique
  - Combinaison Turbine à Gaz, Vapeur
- Filière nucléaire
- Filières nouvelles
  - Convertisseurs éoliens
  - Piles à combustible
  - Convertisseurs photovoltaïques

**Emplacement des centrales:**

L'emplacement des centrales de génération, des lignes de transport et des postes de transformation demande toujours une analyse détaillée pour arriver à une solution acceptable et économique.

Parfois, on peut placer une centrale à côté de la source d'énergie primaire et utiliser des lignes pour transporter l'énergie électrique.

Quand cela n'est pas pratique ou économique, on doit transporter la matière première (charbon, mazout, gaz naturel, etc.) par bateau, train, pipeline, etc., jusqu'à la centrale. Les centrales peuvent donc être plus ou moins éloignées de l'utilisateur.

## CENTRALES HYDRAULIQUES:

Les centrales hydroélectriques convertissent l'énergie de l'eau en mouvement en énergie électrique. L'énergie provenant de la chute d'une masse d'eau est tout d'abord transformée dans une turbine hydraulique en énergie mécanique. Cette turbine entraîne un alternateur dans lequel l'énergie mécanique est transformée en énergie électrique.

### 1- Puissance disponible:

D'une façon générale, la puissance que l'on peut tirer d'une chute dépend non seulement de la hauteur de la chute, mais aussi du débit du cours d'eau. Le choix de l'emplacement d'une centrale hydro-électrique dépend donc de ces deux facteurs.

La puissance disponible est donnée par l'équation:

$$P = 9.8 q h$$

P = puissance hydraulique, en [kW]

q = débit en mètres cubes par seconde [m<sup>3</sup>/s]

9.8 = coefficient tenant compte des unités.

A cause des pertes, la puissance mécanique que l'on peut recueillir sur l'arbre de la turbine est inférieure à la puissance fournie par l'eau. Cependant, le rendement des turbines hydraulique est élevé: de l'ordre de 80 à 94% pour les grosses unités. Dans les alternateurs, la transformation de la puissance se fait à un rendement de 97 à 98.5%.

### 2- Types des centrales hydrauliques:

Suivant la hauteur de chute, on distingue:

- 1) *les centrales de haute chute* ont des hauteurs de chute supérieures à 300m; elles utilisent des turbines Pelton. Ces centrales se trouvent dans les Alpes et dans d'autres régions très montagneuses. La capacité du réservoir est relativement faible.

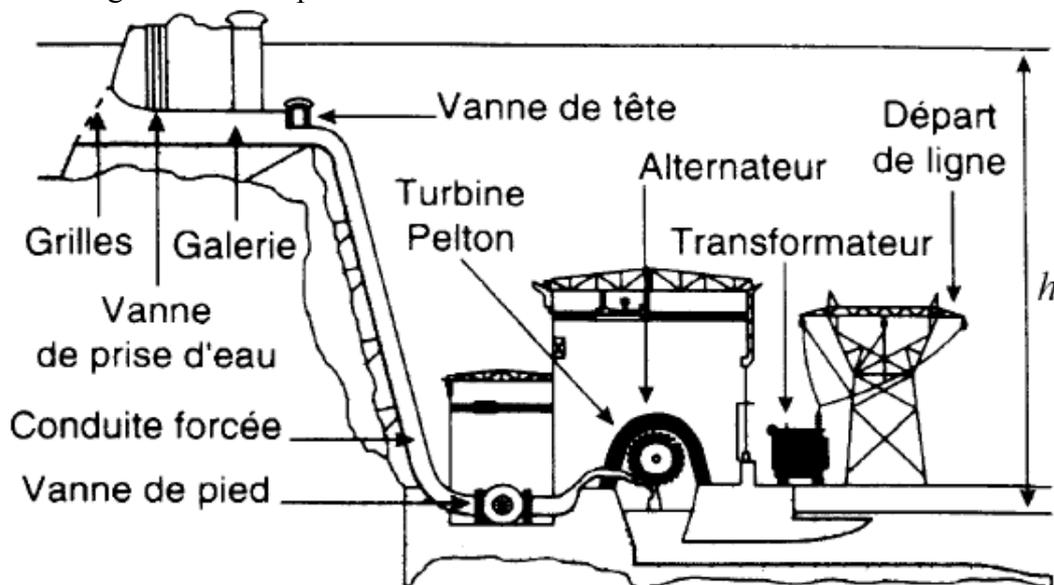


Figure 6 Centrale hydraulique de haute chute

- 2) *les centrales de moyenne chute* ont des hauteurs comprises entre 30m et 300m; elles utilisent des turbines Francis. Ces centrales sont alimentées par l'eau retenue derrière un barrage construit dans le lit d'une rivière de région montagneuse. Elles comportent un réservoir de grande capacité.

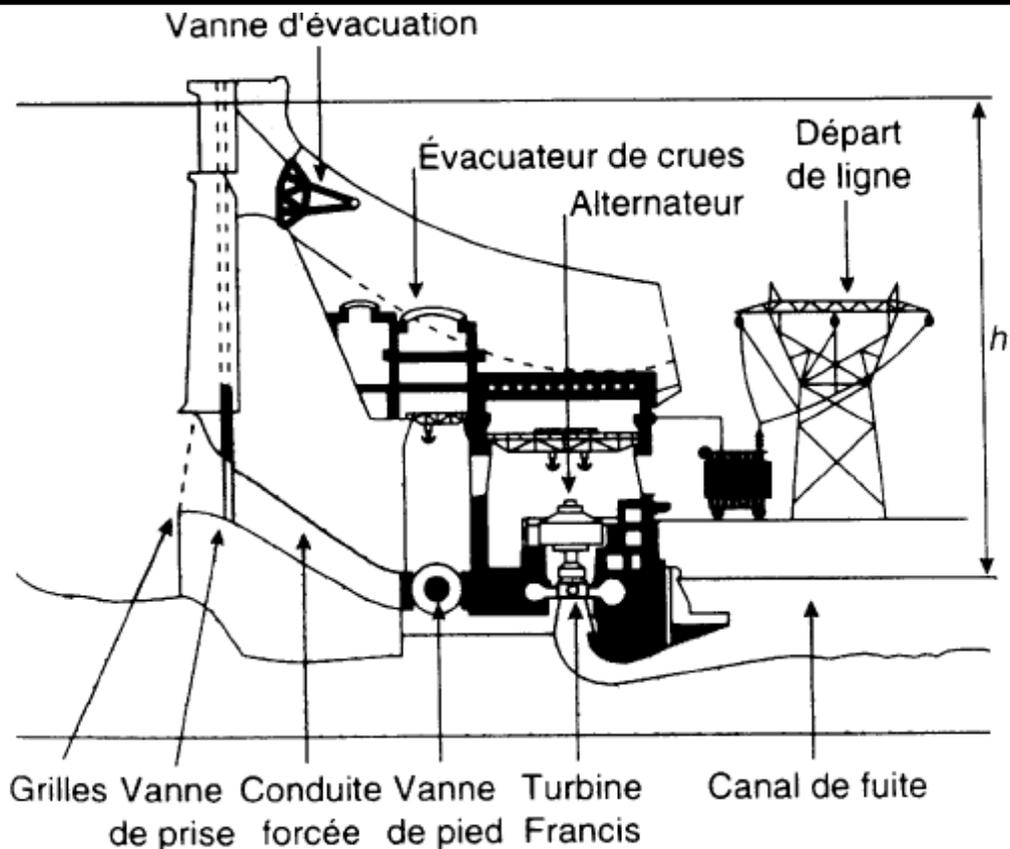


Figure 7 Centrale hydraulique de moyenne chute

- 3) *les centrales de basse chute*, ou centrales au fil de l'eau, ont des hauteurs de chute inférieures à 30m; elles utilisent des turbines Kaplan ou Francis. Ces centrales sont établies sur les fleuves ou les rivières à fort débit.

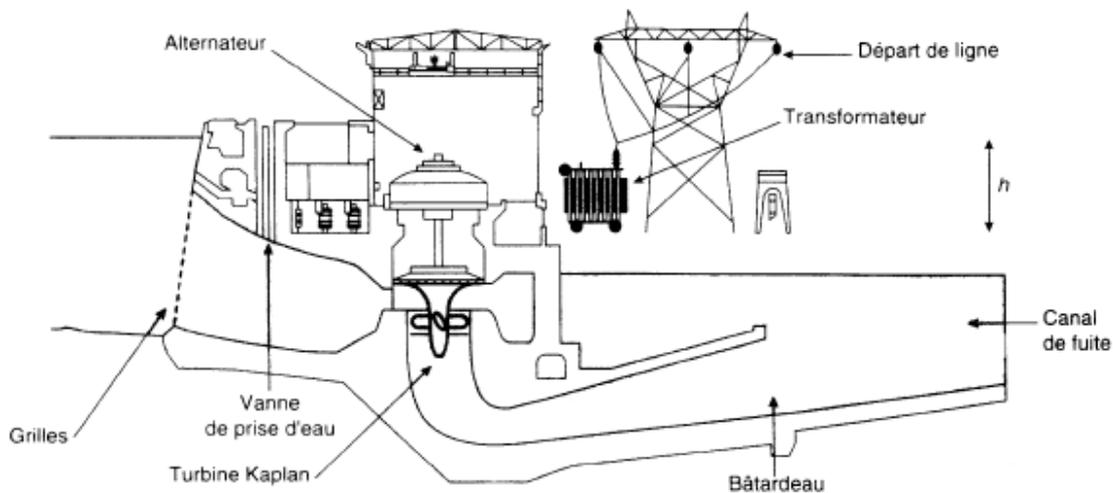


Figure 8 Centrale hydraulique de basse chute

Les ouvrages d'aménagement, la vitesse et le type des turbines et des alternateurs varient suivant la hauteur de chute et le débit du cours d'eau.

#### 4- Parties principales d'une centrale hydraulique:

Une centrale hydro-électrique comporte essentiellement:

- 1- *le barrage*: les barrages de retenue sont établis en travers du lit des rivières; ils servent à concentrer les chutes près des usines et à former des réservoirs d'emmagasinement. On peut

ainsi, créer des réserves d'eau pour compenser l'insuffisance de débit pendant les périodes des sécheresses et assurer à l'usine une alimentation en eau plus uniforme. Les barrages peuvent être en béton, en enrochement ou en terre. Les barrages du type poids sont les plus utilisés; ils s'opposent à la poussée des eaux par leur masse même.

- 2- **le déversoir (évacuateur de crue):** installés près des barrages sont destinés à laisser passer l'eau lorsque son niveau dépasse une certaine hauteur. Ils permettent d'évacuer sans dégâts les débits considérables résultant de la fonte des neiges ou provoqués par des pluies de longue durée.
- 3- **la conduite d'aménée:** la conduite d'aménée conduit l'eau du barrage jusqu'aux turbines. A l'extérieur de l'usine, elle est constituée par un canal, un tunnel ou un tuyau. La partie intérieure, appelée conduite forcée, est en béton, en acier ou en fonte. On dispose, à l'entrée de la conduite forcée, des vannes qui permettent de contrôler l'admission de l'eau. A la sortie de la conduite forcée des aménagements à moyenne et à basse chute, l'eau arrive dans la chambre de mise en charge d'où elle est distribuée aux différentes turbines. Une couronne fixe entoure chaque turbine et assure une répartition uniforme de l'eau sur son pourtour. Une série de portes, ou vannes mobiles, disposées autour de la turbine permettent de régler l'admission de l'eau dans celle-ci. Ces vannes sont commandées par le régulateur de vitesse.
- 4- **la conduite d'échappement:** après être passée dans les turbines, l'eau retourne dans la rivière par la conduite d'échappement. La conduite d'échappement comporte une cheminée de succion et un canal de fuite qui peut être le lit même de la rivière.
- 5- **Salle de commande:** les appareils de commande et de contrôle sont groupés ensemble dans une salle d'où le personnel peut surveiller la marche des groupes générateurs. Les appareils de signalisation et les appareils de commandes à distance de l'excitatrice, du régulateur de vitesse et du disjoncteur de chaque groupe générateur sont montés sur un pupitre. Les instruments de signalisation, indicateurs et enregistreurs, les régulateurs de tension ainsi que les relais de protection et les différents systèmes d'alarmes sont réunis sur des panneaux.

### 5- Centrales à réserve pompée:

On a vu que la variation de l'appel de puissance d'un réseau nécessite l'installation de centrales de pointe. Considérons un réseau simple dont l'appel de puissance varie entre 100MW et 160MW selon la courbe de la figure 4. on pourrait installer une centrale de base de 100MW et une centrale de pointe de 60MW, celle-ci utilisant une turbine à gaz.

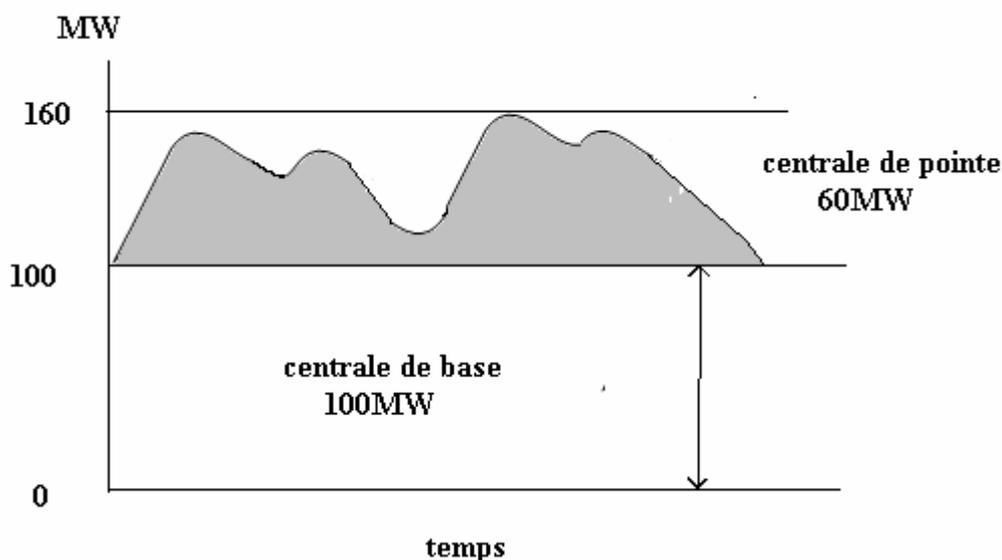


Figure 9 Centrale de base et centrale de pointe conventionnelle alimentant une charge maximale de 160MW

Cependant, on peut envisager une deuxième solution: elle consiste à installer une centrale de base de 130MW et une centrale de pointe spéciale de 30MW. Cette centrale de pointe aura la propriété, non seulement de débiter de l'énergie électrique, mais aussi d'en recevoir. Pendant les périodes creuses la centrale de pointe reçoit et emmagasine de l'énergie de la centrale de base. Ensuite, lors des heures de pointe, elle restitue au réseau l'énergie qu'elle avait emmagasinée.

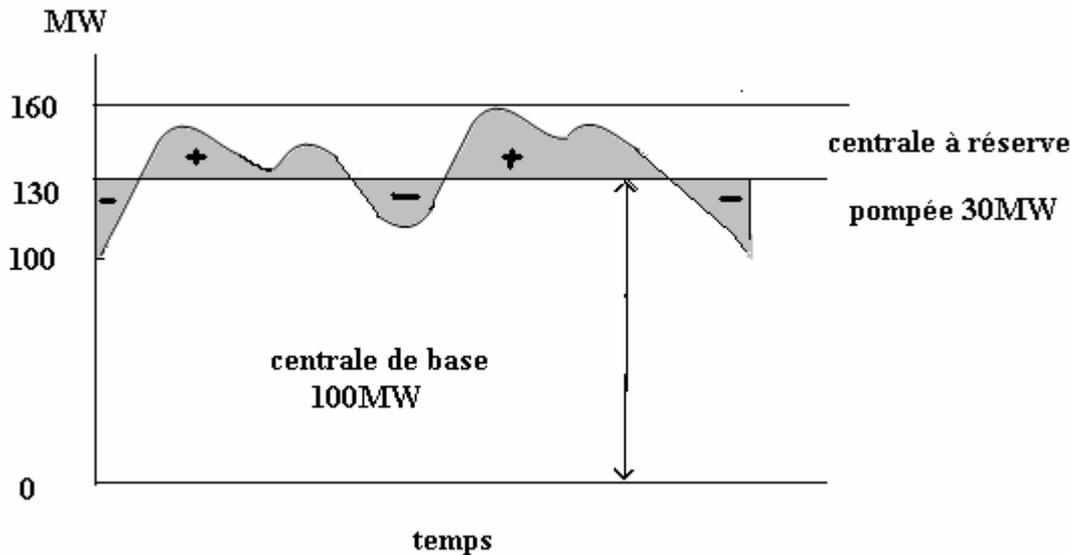


Figure 10 Centrale de base et centrale à réserve pompée alimentant une charge maximale de 160MW

Ce système possède plusieurs avantages:

- 1)- on peut utiliser une plus grande centrale de base, ce qui augmente le rendement.
- 2)- la capacité de la centrale de pointe est réduite, ce qui diminue son coût.

Ces quantités énormes d'énergie ne peuvent être emmagasinées que par des méthodes mécaniques. C'est ainsi qu'on emploie des centrales à réserve pompée. Pendant les heures de pointe; ces centrales fonctionnent comme des centrales hydrauliques classiques, utilisant l'énergie de l'eau qui s'écoule d'un réservoir supérieur dans un réservoir inférieur. Pendant les périodes creuses, les alternateurs fonctionnent comme des moteurs synchrones et entraînent les turbines qui deviennent d'énormes pompes prenant l'eau dans le réservoir inférieur pour la renvoyer dans le réservoir supérieur.

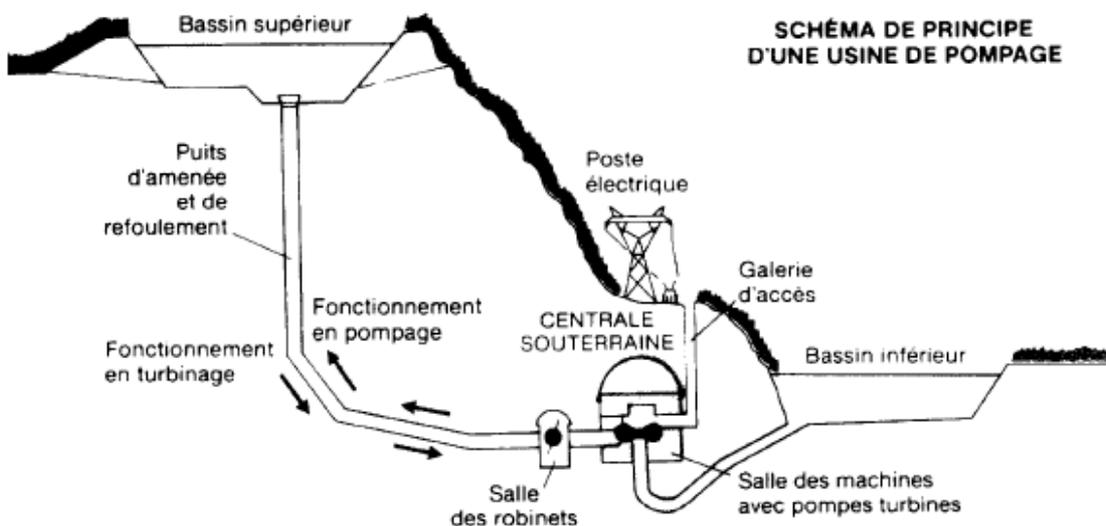


Figure 11 Centrale à réserve pompée

Le cycle se répète une ou deux fois par jour, selon la nature du réseau et de la charge. Les machines ont une puissance comprise entre 50MW et 500MW et elles doivent être réversibles. Car on doit changer le sens de rotation lorsque la turbine fonctionne comme pompe. Le démarrage de ces gros moteurs synchrones impose une forte charge sur la ligne d'alimentation et l'on utilise parfois des méthodes spéciales pour éviter une surcharge excessive.

Les centrales à réserve pompée complètent bien les centrales nucléaires qui atteignent leur rendement maximal lorsqu'elles fonctionnent à débit constant.

## **CENTRALES THERMIQUES**

Les centrales thermiques produisent l'électricité à partir de la chaleur qui se dégage de la combustion du charbon, du mazout ou du gaz naturel. La plupart ont une capacité comprise entre 200MW et 2000MW afin de réaliser les économies d'une grosse installation.

Donc, les centrales thermiques font usage de l'énergie calorifique contenue dans les combustibles. Celle-ci peut être utilisée de différentes manières :

- ✓ Dans les centrales à vapeur, le combustible de produit fossiles (pétrole, charbon, gaz naturel,...) est brûlé dans les chaudières qui fournissent de la vapeur aux groupes générateurs à turbines.
- ✓ Dans les centrales à moteur à gaz, on utilise directement dans les machines à piston les gaz de récupération des hauts fourneaux ou des fours à coke.
- ✓ On réalise généralement, dans les centrales à moteur diesel, une utilisation directe de l'énergie de combustible (mazout).
- ✓ La turbine à gaz prend actuellement de l'extension principalement comme source d'énergie point de vue réserve. Une variante récente fait usage de turboréacteurs issus de l'aviation à réaction pour produire les gaz chauds assurant l'action de la turbine.
- ✓ Sous le même type de centrales thermiques, on peut introduire les centrales nucléaires, où l'énergie primaire se présente sous la forme d'un dégagement de chaleur causé par la combustion de produits fissiles (uranium, plutonium).

### **1- Combustibles :**

Les combustibles industriels utilisés dans les centrales thermiques doivent pouvoir produire une grande quantité de chaleur à haute température, être d'allumage facile et entretenir eux-mêmes leur inflammation. En outre, on doit pouvoir les trouver en abondance dans la nature et leur prix de revient doit être faible. Ils se présentent, soit sous leur forme naturelle, soit sous une forme artificielle.

#### **1-1- La combustion :**

Certaines réaction chimiques, notamment celles impliquant des atomes d'oxygène, produisent non seulement une nouvelle substance, mais dégagent, en même temps, de l'énergie sous forme de chaleur. Dans certaines réactions, la chaleur dégagée est tellement grande que l'augmentation de température qui en résulte porte les éléments à l'incandescence et produit ce qu'on appelle un feu. Ce type de réaction est une réaction de combustion.

L'oxygène de l'air réagit vivement avec les atomes de carbone (C), d'hydrogène (H), de soufre (S) et toutes les substances contenant ces atomes.

### 1-2- Les éléments combustibles :

L'union des atomes d'oxygène avec les atomes de carbone, d'hydrogène, de soufre, etc., se fait dans des proportions précises et connues. La chaleur dégagée et les nouvelles substances créées peuvent donc être déterminées d'avance lorsque l'on connaît la nature du combustible. Le tableau 1 en donne les détails.

**Tableau 1-** combustibles et produits de combustion

Type	Masse (kg)	Masse d'oxygène requise (kg)	Chaleur dégagée (MJ)	Produits de la combustion	Masse d'air requise (kg)	Volume d'air requis à 20°C et 101kPa (m <sup>3</sup> )
Carbone	1	2.67	33.8	CO <sub>2</sub>	11.5	9.6
Hydrogène	1	8	120	H <sub>2</sub> O	34.5	28.8
Soufre	1	1	9.3	SO <sub>2</sub>	4.3	3.6
Méthane CH <sub>4</sub>	1	4	50	CO <sub>2</sub> + H <sub>2</sub> O	17.2	14.3
Ethane C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	1	3.73	47.5	CO <sub>2</sub> + H <sub>2</sub> O	16.1	13.4
Propane C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	1	3.64	46.5	CO <sub>2</sub> + H <sub>2</sub> O	15.6	13

**NB :** comme l'air sec contient 23.2% d'oxygène par unité de masse, il faut multiplier la masse d'oxygène par 4.3 pour obtenir la masse d'air requise pour la combustion complète.

A partir des valeurs données dans le tableau 1, on peut calculer la valeur calorifique de n'importe quel combustible dont on connaît leur composition.

Par exemple, lorsqu'on prend le charbon dont la composition est 55% carbone, 2% hydrogène, 1% soufre et 42% autre élément, donc :

$$\text{Energie de 1kg de charbon} = 55\% \times 33.8 + 2\% \times 120 + 1\% \times 9.3 + 42\% \times 0 = 21\text{MJ}$$

### 1-3- Produits de la combustion :

Le gaz carbonique CO<sub>2</sub> et l'eau n'ont pas d'effet néfaste sur l'environnement, mais le dioxyde de soufre SO<sub>2</sub> crée des substances qui irritent les voies respiratoires. Les particules poussiéreuses sont une autre source de pollution qu'on essaie d'enrayer. La combustion de gaz naturel produit

seulement de l'eau et de CO<sub>2</sub>, c'est pourquoi on utilise ce gaz lorsqu'il faut à tout prix éviter la pollution.

#### 1-4- Types de combustibles :

Les différents types de combustibles utilisés dans les chaudières sont les suivants :

- ❖ **Combustibles solides** : lignite, charbon ou déchets de charbon. C'est le charbon qui est le plus employé. L'utilisation de brûleurs dans les centrales modernes exige que le combustible soit finement broyé pour permettre sa pulvérisation.
- ❖ **Combustibles liquides** : gas-oil, fuel-oil (mazout). Ces combustibles sont très avantageux au point de vue stockage, commodité d'emploi et rendement. Plusieurs centrales sont équipées pour fonctionner au mazout. On utilise également les combustibles liquides pour l'allumage des chaudières qui fonctionnent au charbon pulvérisé.
- ❖ **Combustibles gazeux** : gaz de haut fourneau et gaz naturel. Le gisement de gaz naturel est utilisé pour alimenter quelques centrales thermiques.

#### 2- Choix de l'emplacement :

Les facteurs ci-après doivent être pris en considération dans le choix de l'emplacement d'une centrale thermique :

- 1- Elle doit être suffisamment rapprochée du réseau à desservir.
- 2- La proximité de la source d'énergie primaire (mine, port,...) est importante car elle influence sur le prix du transport du combustible.
- 3- Il faut disposer d'une superficie qui permette des extensions futures, ce dans des conditions économiques favorables.
- 4- Il est indispensable de disposer d'une quantité d'eau suffisante pour assurer les besoins de la condensation. L'obligation de recourir à des réfrigérants majorerait, d'une manière non négligeable, le prix de revient de l'énergie.
- 5- La possibilité d'un raccordement au réseau général de transport est étudiée, car l'installation d'une nouvelle centrale pose le problème de l'évacuation de l'énergie. Elle peut rendre nécessaire la création de nouvelles lignes ou de nouveaux postes d'interconnexion si le réseau est localement saturé.
- 6- La centrale doit être desservie par une voie ferrée ou une voie navigable, et de préférence par les deux, ce pour assurer son alimentation en combustible avec le maximum de sécurité et le minimum de frais de transport.

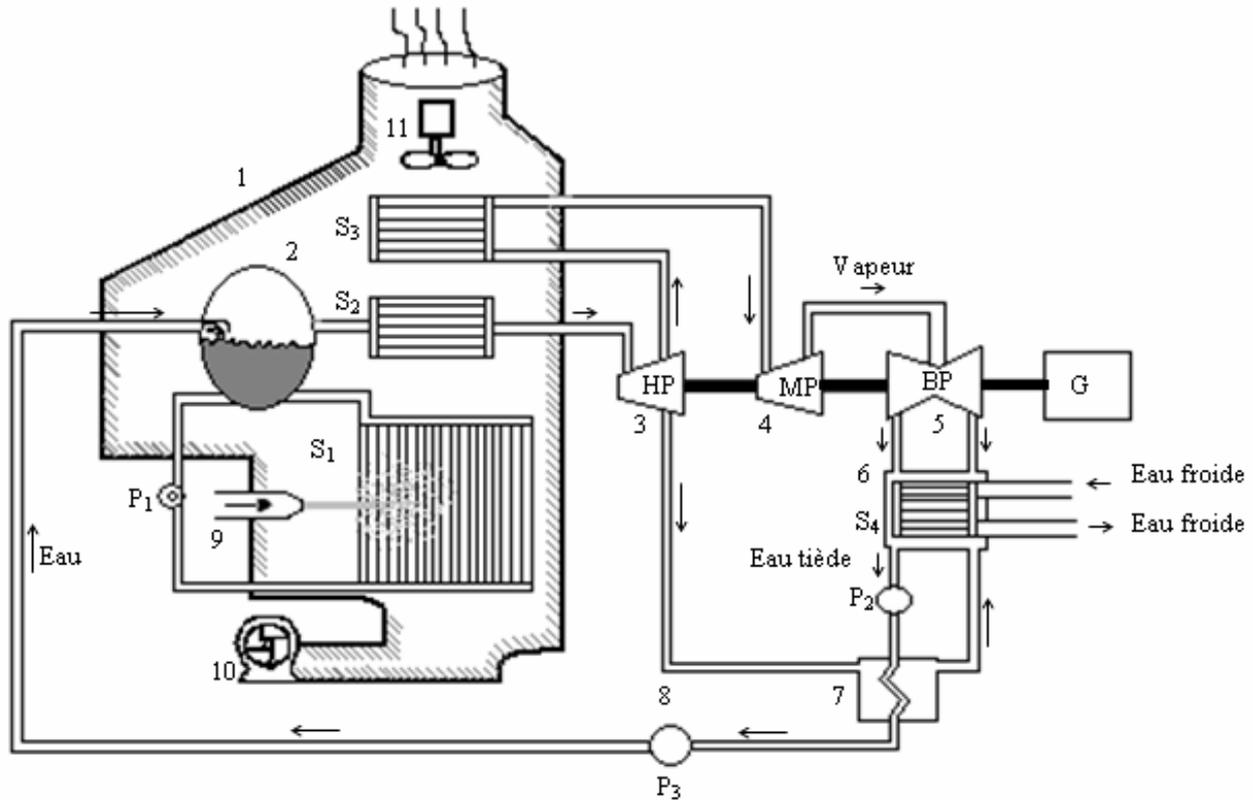
### 3- Organisation d'une centrale thermique :

La figure 1 montre les parties principales d'une centrale thermique identifiées comme suit :

1. Immense **chaudière** construite en hauteur dans laquelle on brûle le combustible. La chaleur est absorbée par l'eau circulant dans une série de tubes  $S_1$  qui entourent les flammes. La circulation est forcée par la pompe  $P_1$ .
2. **Ballon**, ou **réservoir**, contenant de l'eau et de la vapeur à haute pression. Il constitue à la fois le point de départ de la vapeur vers les turbines et le récepteur de l'eau d'alimentation de retour. La vapeur se dirige vers la turbine haute pression (HP) en passant par un surchauffeur  $S_2$ . ce dernier, formé d'une série de tubes entourant le feu, provoque une forte augmentation de la température de la vapeur (200°C environ). Cela assure une vapeur qui est absolument sèche et donne un meilleur rendement thermique.
3. **Turbine haute pression** (HP) qui permet une première expansion de la vapeur durant laquelle une partie de l'énergie thermique est convertie en énergie mécanique. La pression et la température à la sortie de la turbine HP sont donc plus basses qu'à l'entrée. Afin d'augmenter le rendement thermique et pour éviter une condensation prématurée de la vapeur, on la fait passer par un **réchauffeur**  $S_3$  composé d'une troisième série de tubes.
4. **Turbine moyenne pression** (MP) semblable à la turbine HP sauf qu'elle est plus grosse pour permettre à la vapeur de se détendre davantage.
5. **Turbine basse pression** (BP) à double carter qui enlève le reste de l'énergie thermique disponible dans la vapeur, permettant à cette dernière de se détendre dans un vide presque complet à l'intérieur du condenseur.
6. **Condenseur** qui provoque la condensation de la vapeur, grâce à la circulation d'eau froide venant de l'extérieur et circulant dans des tubes  $S_4$ . Une pompe d'extraction  $P_2$  enlève l'eau tiède condensée et la pousse à travers le réchauffeur (7) vers la pompe  $P_3$  alimentant la chaudière.
7. **Réchauffeur**. Dans cet échangeur de chaleur, une partie de la vapeur qui est passée par la turbine HP réchauffe l'eau d'alimentation, après quoi, la vapeur se condense aussi dans le condenseur. Les analyses thermodynamiques prouvent que le rendement ainsi obtenu est meilleur que si la vapeur dérivée dans le réchauffeur allait aux turbines MP et BP en passant par le réchauffeur  $S_3$ .
8. **Pompe d'alimentation**  $P_3$  qui refoule l'eau d'alimentation contre la forte pression régnant à l'intérieur du ballon (2) et complète ainsi le cycle thermique.
9. **Brûleurs** provoquant la combustion du gaz, du mazout ou du charbon pulvérisé projeté à l'intérieur de la chaudière. Avant d'être projeté dans la chaudière, le charbon est réduit en

poudre. De la même façon, l'huile lourde est préchauffée et soufflée en jet vaporisé afin d'augmenter sa surface de contact avec l'air environnant.

10. **Ventilateur** soufflant l'air requis pour la combustion.
11. **Ventilateur** aspirant les gaz brûlés qui s'échappent par la cheminée.



**Figure 12** Eléments d'une centrale thermique

**Tours de refroidissement** : si la centrale est située dans une région aride ou éloignée d'un lac ou d'une rivière, on doit quand même trouver un moyen pour refroidir le condenseur. On utilise alors le phénomène d'évaporation pour obtenir le refroidissement requis.

Comment peut-on provoquer l'évaporation ? il suffit de présenter une surface d'eau aussi grande que possible à l'air environnant. La meilleure façon de le faire est de fractionner la masse d'eau en gouttelettes (au moyen d'un arrosoir) et de souffler de l'air à travers la pluie ainsi créée.

Dans les centrales, l'évaporation de l'eau est assurée par d'énormes tours de refroidissement. Elles évaporent environ 2% de l'eau de refroidissement requise, si bien que cette perte doit être compensée par une source souterraine, un ruisseau ou un petit lac.

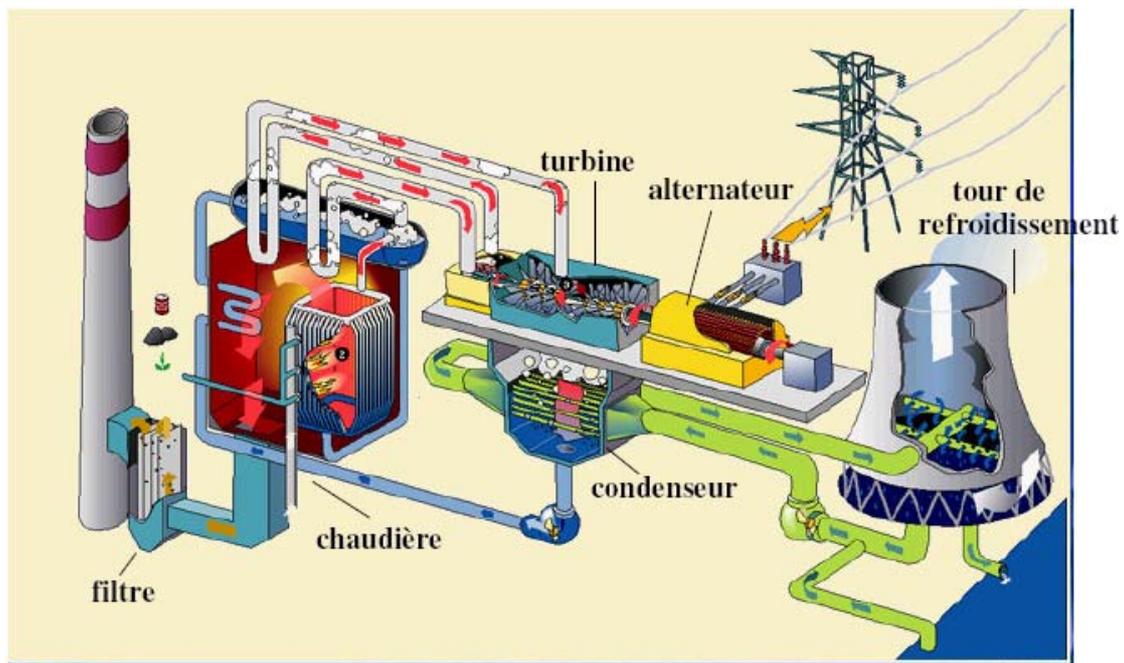


Figure 13 Groupe thermique classique

#### 4- Diagramme énergétique d'une centrale thermique :

Les centrales thermiques modernes se ressemblent beaucoup et la plupart fonctionnent à une température de 550°C et une pression de 16.5MPa ; elles donnent un rendement global de l'ordre de 40%. Les quantités d'énergie, les débits de vapeur, etc., ne changent pas beaucoup, même pour des températures et des pressions différentes. Cela nous a permis de tracer le schéma de répartition de l'énergie pour un modèle réduit ayant une puissance calorifique de 30MW et un débit électrique de 12MW, soit un rendement global de 40% (figure 3).

Par exemple, une centrale de 480MW (40 fois plus puissante que notre modèle) aurait les caractéristiques approximatives suivantes :

- Puissance électriques 480MW ;
- Consommation de charbon 40kg/s ;
- Consommation d'air 400kg/s ;
- Puissance de la chaudière 1200MW ;
- Débit de vapeur 320kg/s ;
- Eau de refroidissement 14400kg/s ;
- (avec  $\Delta T=10^{\circ}\text{C}$ ) ou  $14.4\text{m}^3/\text{s}$ .

Si l'on doit installer une tour de refroidissement, elle doit évaporer une quantité d'eau égale à :

$$2\% \times 14.4 = 0.288 \text{ m}^3/\text{s}$$

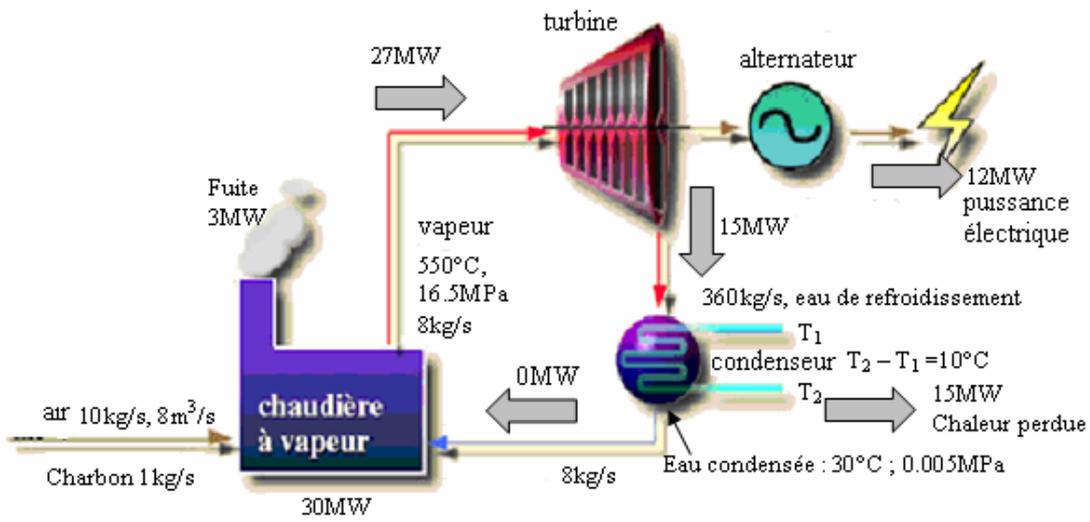


Figure 14 Modèle réduit d'une centrale thermique de 12MW

## CENTRALES NUCLEAIRES

Les centrales nucléaires produisent l'électricité à partir de la chaleur libérée par une réaction nucléaire. Ce phénomène est provoqué par la division du noyau d'un atome, procédé qu'on appelle *fission nucléaire*. Remarquons qu'une réaction chimique telle que la combustion du charbon produit un simple regroupement des atomes sans que leurs noyaux soient affectés.

Une centrale nucléaire est identique à une centrale thermique, sauf que la chaudière brûlant le combustible fossile est remplacé par un réacteur contenant le combustible nucléaire en fission. Une telle centrale comprend donc une turbine à vapeur, un alternateur, un condenseur, etc., comme dans une centrale thermique conventionnelle. Le rendement global est semblable (entre 30 % et 40 %) et l'on doit encore prévoir un système de refroidissement important, ce qui nécessite un emplacement près d'un cours d'eau ou la construction d'une tour de refroidissement. A cause de ces similitudes, nous nous limiterons à l'étude du principe de fonctionnement et des caractéristiques du réacteur lui-même.

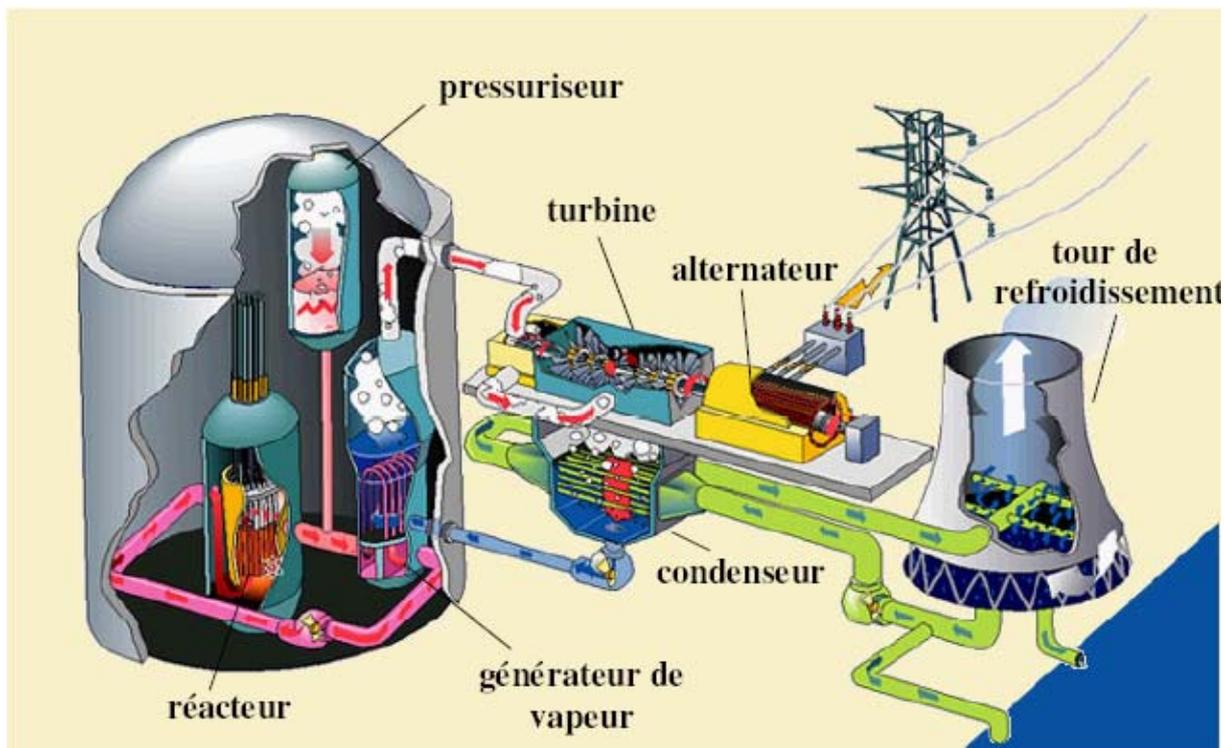


Figure 6 Centrale nucléaire

### 1- Composition du noyau atomique

Le noyau d'un atome est composé de protons et de neutrons. Il existe des éléments qui, à tout point de vue, sont identiques, sauf qu'ils contiennent un ou quelques neutrons en surplus, par rapport au nombre habituel. Le tableau 1 donne la composition atomique de quelques-uns de ces éléments, appelés isotopes.

On s'aperçoit qu'il existe trois sortes d'atomes d'hydrogène qui se distinguent par la composition de leurs noyaux. Il y a d'abord l'hydrogène ordinaire dont le noyau contient 1 proton et 0 neutrons. Ensuite, il y a deux isotopes rares: le deutérium et le tritium dont les noyaux contiennent respectivement 1 et 2 neutrons, en plus du proton habituel.

Lorsque deux atomes d'hydrogène s'unissent à un atome d'oxygène, on obtient de l'eau ordinaire (H<sub>2</sub>O), appelée eau légère. D'autre part, lorsque deux atomes de deutérium s'unissent à un atome d'oxygène, On obtient une molécule d'eau lourde (<sup>2</sup>H<sub>2</sub>O). L'eau de mer contient de l'eau lourde dans une proportion de 1 kg d'eau lourde pour 7000 kg d'eau légère.

**Tableau 1** : composition atomique de quelques éléments.

Elément	symbole	protons	électrons	neutrons
Hydrogène	H	1	1	0
Deutérium	<sup>2</sup> H	1	1	1
Tritium	<sup>3</sup> H	1	1	2
Eau légère	H <sub>2</sub> O	10	10	8
Eau lourde	<sup>2</sup> H <sub>2</sub> O	10	10	10
Uranium 235	<sup>235</sup> U	92	92	143
Uranium 238	<sup>238</sup> U	92	92	146

De la même façon, Il existe deux sortes d'atomes d'uranium, <sup>238</sup>U et <sup>235</sup>U, contenant chacun 92 protons (et 92 électrons), mais un nombre différent de neutrons. L'uranium 238 est très répandu alors que l'uranium 235 est rare. En effet, les gisements naturels d'uranium (U<sub>3</sub>O<sub>8</sub>) contiennent 99,3 % d'atomes <sup>238</sup>U comparativement à 0,7 % de l'isotope <sup>235</sup>U.

L'uranium 235 et l'eau lourde méritent notre attention, car ils sont tous deux essentiels au fonctionnement de certains réacteurs que nous décrirons plus loin.

## 2- Energie libérée par la fission atomique

Lorsque le noyau d'un atome subit la fission, il se scinde en deux. La masse totale des deux atomes ainsi formés est habituellement différente de celle de l'atome original. S'il y a une diminution de la masse, une quantité d'énergie est libérée. Sa valeur est donnée par la formule d'Einstein:

$$E = m \times c^2$$

Où

$E$  : énergie libérée, en joules [J]

$m$  : diminution de masse, en kilogrammes [kg]

$c$  : vitesse de la lumière [ $3 \times 10^8$  m/s]

La quantité d'énergie libérée est énorme, car une diminution de 1 g seulement donne une énergie de  $9 \times 10^{13}$  joules, soit l'équivalent énergétique d'environ trois mille tonnes de charbon.

Lors de la fission de l'atome d'uranium  $^{235}\text{U}$ , il se produit précisément une légère diminution de masse. Par ailleurs, comme l'uranium 235 est fissile alors que l'uranium 238 ne l'est pas, on a construit de grandes usines pour augmenter la proportion d'uranium 235 dans le combustible (fuel enrichi) utilisé dans certains réacteurs.

### 3- Source de l'uranium

L'uranium utilisé dans les réacteurs nucléaires trouve son origine dans les mines d'uranium. Le minerai brut confie la substance  $\text{U}_3\text{O}_8$  (3 atomes d'uranium, 8 atomes d'oxygène) contenant à son tour des atomes  $^{238}\text{U}$  et  $^{235}\text{U}$  dans le rapport de 1398 à 10. Pour usage dans un réacteur nucléaire, on doit transformer cette substance en dioxyde d'uranium ( $\text{UO}_2$ ). Celui-ci est composé de molécules  $^{238}\text{UO}_2$  et  $^{235}\text{UO}_2$  encore dans le rapport de 1398 à 10. On l'appelle dioxyde d'uranium naturel parce que le rapport des molécules fissiles est le même que celui du minerai original.

Certains réacteurs sont conçus pour utiliser un mélange enrichi où le rapport de  $^{238}\text{UO}_2$  sur  $^{235}\text{UO}_2$  est plutôt de 1398 à 50 au lieu du rapport naturel de 1398 à 10. Au cours du processus d'enrichissement, de grandes quantités de  $^{238}\text{UO}_2$  sont dérivées comme produit secondaire que l'on doit entreposer. Nous verrons que ce produit trouve une application dans les réacteurs surrégénérateurs. La figure 2 montre, de façon très simplifiée le procédé d'enrichissement.

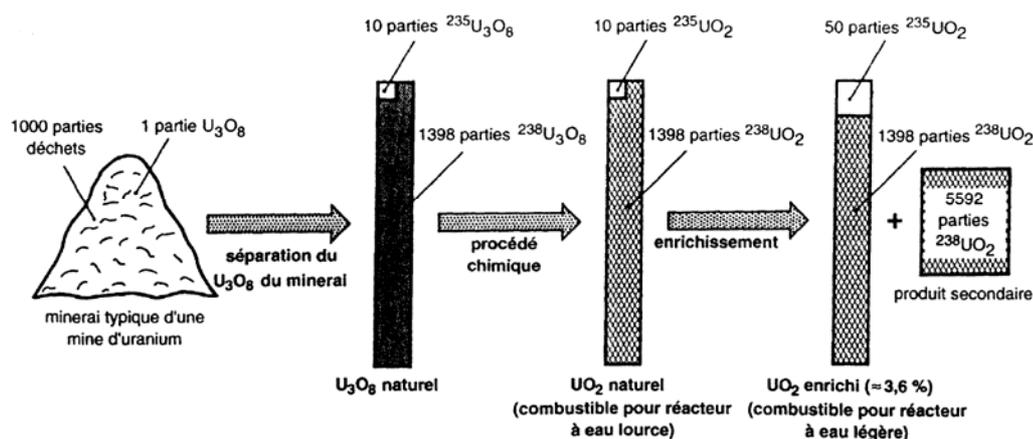


Figure 7 Le processus d'enrichissement

### 4- Réaction en chaîne

Comment provoque-t-on la fission d'un atome d'uranium? Une méthode consiste à bombarder son noyau avec des neutrons en mouvement. Le neutron est un excellent projectile car il ne subit aucune force de répulsion à mesure qu'il s'approche du noyau et, si sa vitesse n'est pas trop grande,

les chances d'une collision sont excellentes. Si l'impact est suffisamment intense, le noyau se scinde en deux et la diminution de masse qui en résulte libère de l'énergie. Ainsi, la fission d'un atome  $^{235}\text{U}$  dégage une énergie de 218 MeV, principalement sous forme de chaleur. La fission (qui est une réaction très violente) s'accompagne d'un autre phénomène important: l'éjection, à haute vitesse, de 2 ou 3 neutrons. Ces neutrons, à leur tour, peuvent entrer en collision avec d'autres noyaux voisins, de sorte qu'il produit une réaction en chaîne pouvant provoquer un énorme dégagement de chaleur.

C'est d'après ce principe qu'explorent les bombes atomiques. Il suffit d'une sphère de  $\text{UO}_2$  type  $^{235}\text{U}$  ne pesant que 300g (masse critique) pour produire une réaction en chaîne explosive. Bien que les gisements naturels de  $\text{UO}_2$  (type  $^{238}\text{U}$ ) libèrent aussi des neutrons occasionnels, leur vitesse est trop élevée pour amorcer une réaction en chaîne, et la concentration de la matière fissile est trop faible.

Dans un réacteur nucléaire, on doit ralentir les neutrons afin d'augmenter leurs chances de frapper les noyaux d'uranium. À cette fin, on répartit les masses d'oxyde d'uranium à l'intérieur d'un modérateur. Le modérateur peut être de l'eau ordinaire, de l'eau lourde, du graphite, ou toute autre substance ayant la propriété de ralentir les neutrons sans pour autant les absorber. En choisissant une distribution et une géométrie appropriées, on réussit à freiner ces neutrons de façon à ce qu'ils aient la vitesse requise pour produire d'autres fissions. C'est alors que la réaction en chaîne s'amorce: on dit que le réacteur a atteint le seuil critique.

Dès que la réaction en chaîne est amorcée, la température de l'uranium monte en flèche et, afin de la maintenir à une valeur acceptable, on doit faire circuler un liquide ou un gaz à travers le réacteur pour en extraire la chaleur. Ce caloporteur peut être de l'eau lourde, de l'eau ordinaire, du sodium liquide (Na) ou un gaz comme l'hélium ou le gaz carbonique. La chaleur est alors transportée à un échangeur de chaleur qui transfère l'énergie thermique à une chaudière à vapeur alimentant les turbines.

La Figure 3 montre les parties principales d'une centrale nucléaire.

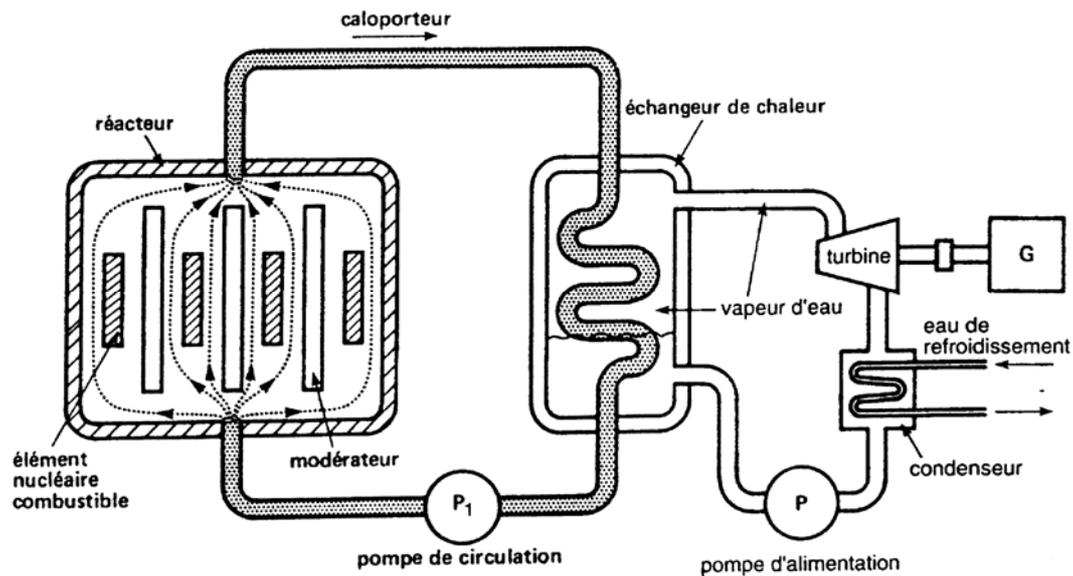


Figure 8 Parties principales d'une centrale nucléaire

## 5-Types de réacteurs

Il existe plusieurs types de réacteurs; en voici les principaux:

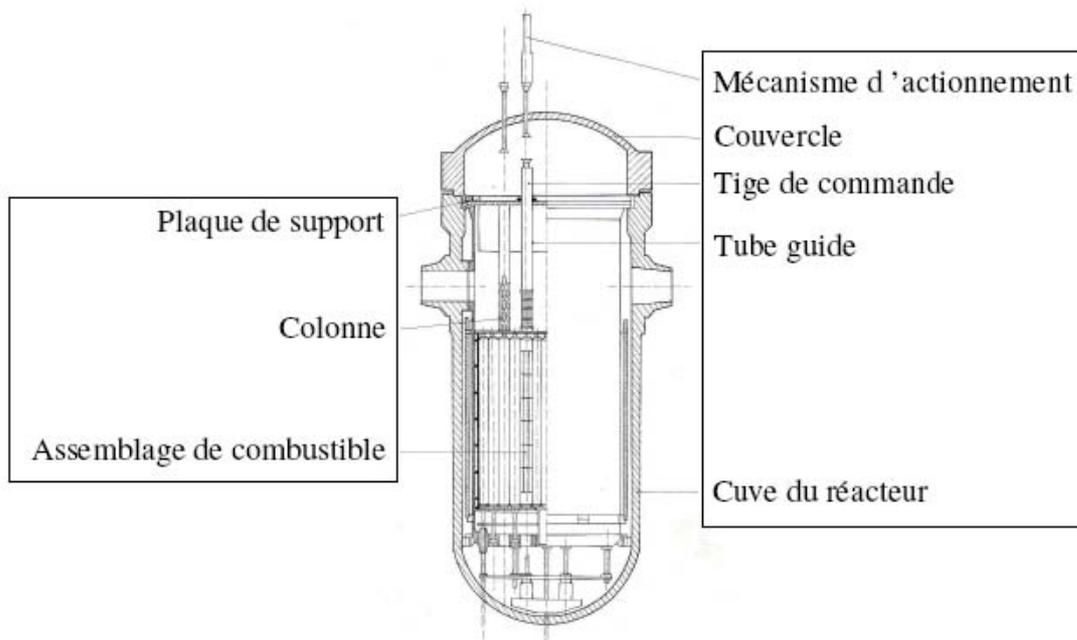
**1. Réacteur à eau pressurisée.** («Pressure Water Reactor»). Dans ces réacteurs, le caloporteur est de l'eau gardée à haute pression afin de l'empêcher de bouillir. On peut utiliser soit de l'eau ordinaire, Comme dans les réacteurs à eau légère, soit de l'eau lourde . . . :

**2. Réacteur à eau bouillante.** («Boiling Water Reactor»). Dans ces réacteurs, le caloporteur est de l'eau ordinaire en ébullition. On élimine ainsi l'échangeur de chaleur: la vapeur créée fait tourner directement les turbines. Cependant, comme dans tout réacteur à eau légère, on doit utiliser de l'oxyde d'uranium enrichi ayant une concentration d'environ 3 % en  $^{235}\text{U}$ .

**3. Réacteur à gaz à haute température.** («High Temperature Gas Reactor»). Dans ces réacteurs, on utilise un gaz inerte, tel que l'hélium, comme caloporteur. Comme la température est très élevée (750 °C), on utilise le graphite comme modérateur. La vapeur créée dans l'échangeur de chaleur est aussi chaude que celle provenant d'une centrale thermique conventionnelle de sorte qu'on atteint, avec ces réacteurs, des rendements globaux de l'ordre de 40 %.

**4. Réacteur surrégénérateur.** («Fast Breeder Reactor»). Dans ces réacteurs, on élimine le modérateur, ce qui permet aux neutrons de bombarder à haute vitesse un combustible tel que le dioxyde d'uranium  $^{238}\text{UO}_2$ . Il se produit alors un dégagement de chaleur et, de plus, une transformation de l'uranium.

L'uranium transformé peut à son tour agir comme combustible. Ce genre de réacteur est donc très intéressant, car les réacteurs traditionnels ne récupèrent que 2 % de l'énergie disponible dans le dioxyde d'uranium.



**Figure 9** Réacteur nucléaire

## 6- Principe du réacteur surrégénérateur

Le réacteur surrégénérateur diffère des autres réacteurs parce qu'il peut extraire davantage d'énergie du combustible nucléaire. Il est composé d'un noyau central contenant du plutonium fissile  $^{239}\text{Pu}$ . Ce noyau est entouré d'une enveloppe de substances contenant de l'uranium non fissile  $^{238}\text{U}$ . Il n'y a pas de modérateur; par conséquent, les neutrons à haute vitesse générés par le  $^{239}\text{Pu}$  dans le noyau viennent bombarder les atomes d'uranium  $^{238}\text{U}$ . Cela produit deux effets importants:

- a) La chaleur intense dégagée par le noyau sert à créer de la vapeur pour entraîner une turbine à vapeur
- b) Dans l'enveloppe, quelques-uns des atomes de  $^{238}\text{U}$  captent les neutrons éjectés du noyau, ce qui transforme ces atomes en plutonium fissile  $^{239}\text{Pu}$ . En d'autres mots, les atomes passifs d'uranium 238 sont transformés en atomes fissiles de plutonium 239

Il en résulte que l'enveloppe de  $^{238}\text{U}$  non fissile est graduellement transformée en  $^{239}\text{Pu}$  fissile et en déchets. Les matériaux de l'enveloppe sont enlevés périodiquement, et raffinés dans des usines spéciales pour recouvrer les substances contenant le  $^{239}\text{Pu}$ . Ce fuel nucléaire est alors placé dans le noyau central du réacteur pour générer de la chaleur et pour créer encore d'autre combustible dans une enveloppe renouvelée, contenant de l'uranium 238.

Il est possible de répéter ce procédé jusqu'à ce qu'environ 80 % de l'énergie contenue dans l'uranium soit utilisée. Cela représente une grande amélioration sur les réacteurs conventionnels qui réussissent à extraire seulement 2% de l'énergie disponible.

Le réacteur surrégénérateur est bien adapté comme complément aux réacteurs à eau légère. En effet, de grandes quantités de  $^{238}\text{U}$  sont obtenues lors du procédé d'enrichissement. Ce matériau improductif (présentement stocké en lieu sûr) peut alors être utilisé dans l'enveloppe d'un réacteur surrégénérateur. En captant les neutrons rapides, ce matériau est transformé comme on l'a vu précédemment, jusqu'à épuisement quasi total de l'énergie atomique qu'il contient.

Notons que les réacteurs surrégénérateurs utilisent le sodium liquide comme caloporteur.

## **7- Réaction nucléaire par fusion**

Tout comme la fission d'un noyau lourd provoque une diminution de masse, la fusion de deux noyaux légers pour former un seul noyau occasionne une diminution semblable. Ainsi, une grande quantité d'énergie est libérée lorsqu'un atome de deutérium  $^2\text{H}$  fusionne avec un atome de tritium  $^3\text{H}$ . Cependant, à cause de la forte répulsion électrique qui s'exerce entre ces deux noyaux (de même polarité), on réussit à provoquer leur fusion seulement lorsqu'ils s'approchent à des vitesses énormes, correspondant à une température de plusieurs millions de degrés. Si la concentration d'atomes est suffisante et si leur vitesse est assez élevée, il se produit une réaction en chaîne. Mentionnons, en passant, que le soleil produit son énergie par un processus semblable.

On réussit ainsi à produire des explosions et c'est sur ce principe que repose la bombe à hydrogène (bombe H). Cependant, on se heurte à de grandes difficultés pour contrôler cette réaction de fusion et l'exploiter dans un réacteur nucléaire commercial. En effet, il n'a pas encore réussi à cerner des particules qui se déplacent à vitesses effarantes sans, en même temps, leur faire perdre leur énergie. Des recherches intensives poursuivent pour résoudre ce problème, car si l'on réussit à domestiquer la fusion nucléaire, ce pourrait bien être la fin des problèmes de sources d'énergie. L'hydrogène est en effet la matière première la plus répandue sur terre.