

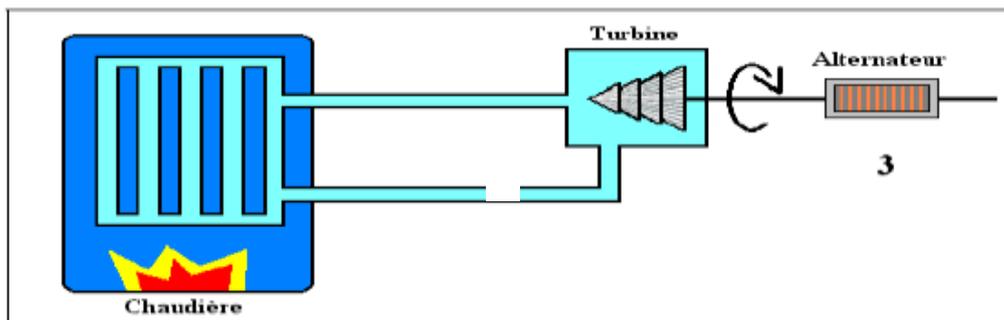
CH I : TECHNIQUES GENERALES DE PRODUCTION DE L'ELECTRICITE (suite)

I.6- Centrales électriques classiques

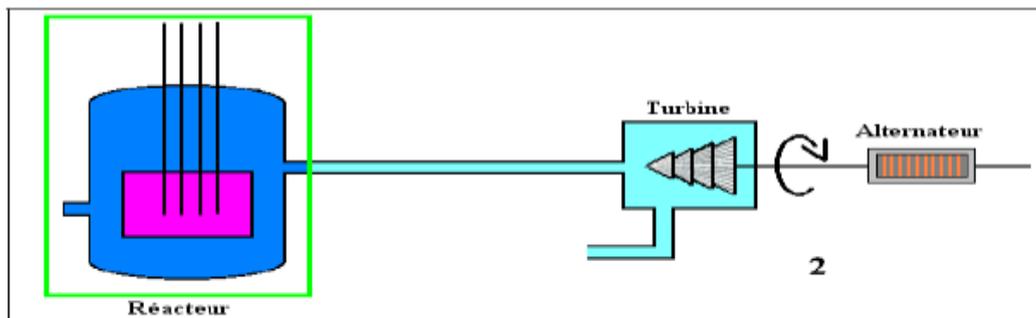
I.6.1 - Types de centrales de production :

Il existe cinq principaux types de centrales électriques (figures 8-1 ... 8-5) :

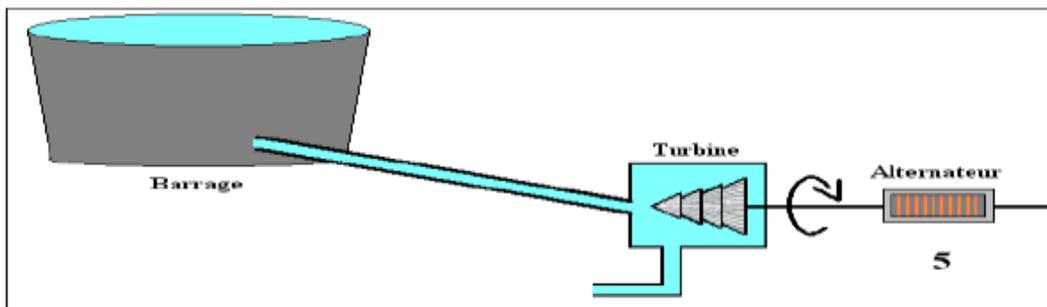
- .1) Les centrales à combustibles fossiles (charbon, pétrole et gaz naturel) dites centrales thermiques classiques,
- .2) Les centrales hydroélectriques,
- .3) Les centrales nucléaires qui sont également des centrales que l'on peut qualifier de thermiques,
- .4) Les centrales solaires ou photovoltaïques,
- .5) Les centrales éoliennes.



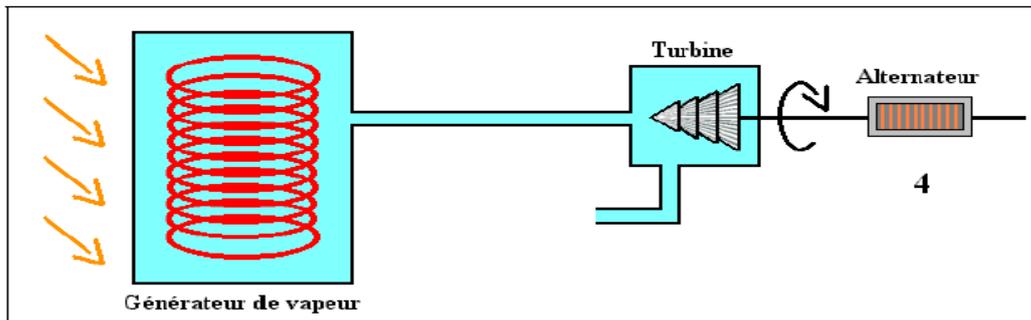
8-1: Centrale thermique à combustible fossile



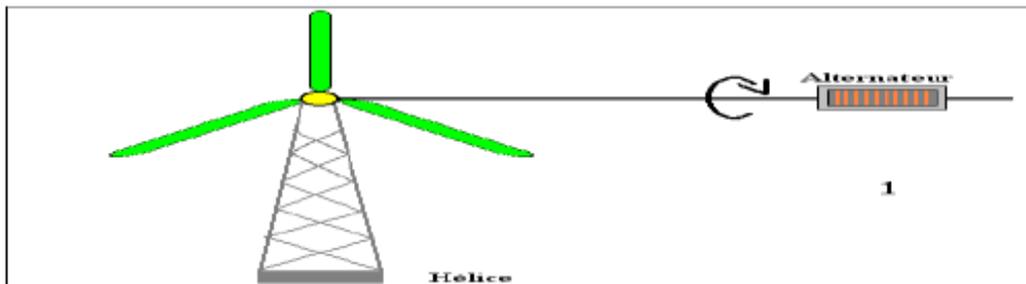
8-2: Centrale nucléaire.



8-3: Centrale hydroélectrique.



8-4: Centrale Solaire.



8-5: Centrale éolienne.

Et il existe d'autres manières efficaces de produire de l'électricité (figure 8-6 ... 8-9) :

- .6) Les panneaux solaires : qui transforment la lumière du soleil en électricité.
- .7) Les usines marémotrices : qui utilisent la force des marées,
- .8) La géothermie : qui exploite les gisements d'eau chaude stockés dans le sous-sol terrestre,
- .9) Les usines à biomasse qui utilisent les déchets comme source d'énergie.



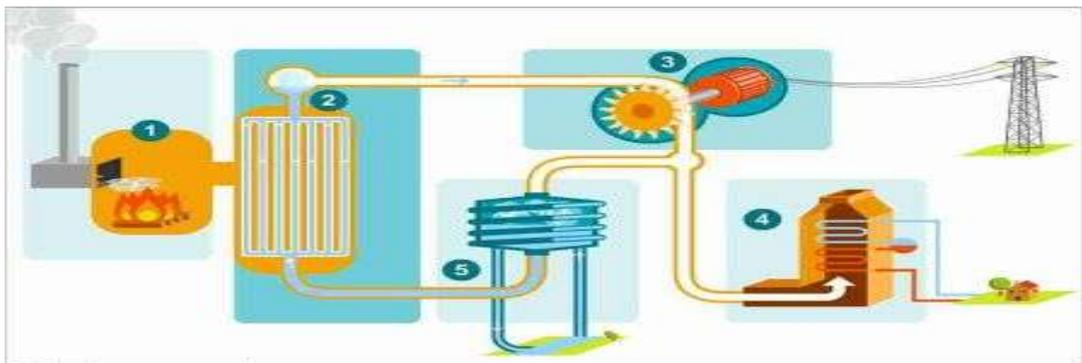
8-6 : Panneau solaire (installation solaire).



8-7 : usine marémotrice



8-8 : Géothermie



8-9 : usine à biomasse

Figure 8-(6 ... 9) : Types de centrales électriques.

1.6.2 - Emplacement des centrales électriques

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.

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.

1.6.3 - Constitution des centrales de production

Les éléments indispensables à la production de courant électrique sont (figure 9.1):

- **une turbine** en mouvement,
- **un alternateur** entraîné par la turbine.

Dans l'ensemble [turbine-alternateur](#), on transforme :

L'énergie mécanique « mouvement » **en** énergie électrique « électricité ».

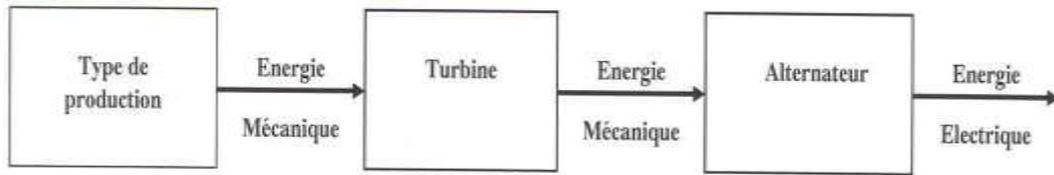


Figure 9.1 : Constitution d'une centrale de production électrique

La production d'électricité est tout simplement une conversion, une transformation d'énergie mécanique (liée au mouvement) en énergie électrique.

Les centrales électriques peuvent être comparées à une dynamo de vélo. Dans les centrales, l'énergie mécanique est convertie en énergie électrique mais à plus grande échelle. On peut convertir également de l'énergie thermique, hydraulique ou encore éolienne en énergie électrique.

Dans le cas d'une centrale au charbon, la figure 9.2 schématise « L'électricité, du producteur au consommateur... » :

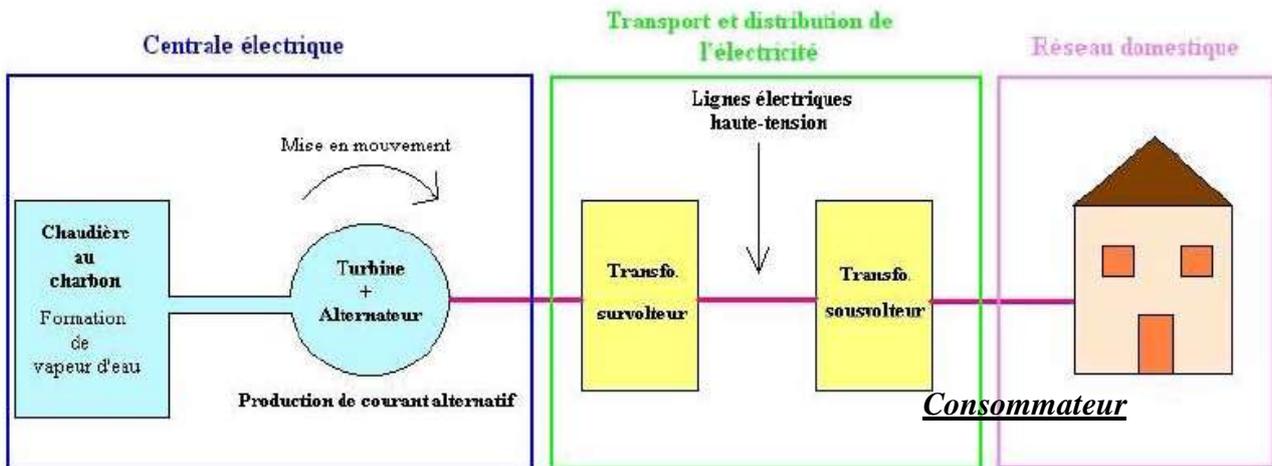


Figure 9.2 : Constitution d'une centrale de production électrique.

1.6.4 - Centrales thermiques ([Voir document Centrales thermiques](#))

-1) Introduction :

Comme l'électricité ne se stocke pas, sa production est le résultat d'une combinaison des différents moyens de production complémentaires ayant chacun un rôle dans la courbe de consommation.

L'énergie thermique à flamme est une source qui dépend de **combustibles fossiles** (charbon, gaz ou pétrole), des éléments contenus dans le sous-sol de la Terre.

Elle permet de produire de l'électricité dans les centrales thermiques à flamme (dites aussi centrales à flamme ou **centrales thermiques classiques**), grâce à la chaleur dégagée par la **combustion** de ces éléments.

Def. : Combustion : processus au cours duquel un matériau se consomme sous l'action du feu.

-2) Centrales à carburants fossiles :

Le charbon, le mazout et le gaz sont des carburants fossiles qui servent de combustibles aux centrales thermiques.

- Dans les centrales à charbon, le combustible est broyé et pulvérisé en poudre.
- Dans les centrales au mazout, le combustible est injecté en très fines gouttelettes par les brûleurs dans la chambre de combustion.
- Quant au gaz, il est de 2 sortes : soit gaz naturel pour les cycles combinés soit gaz sidérurgiques.

Les carburants fossiles sont brûlés dans une chaudière. La chaleur dégagée ($> 560\text{ °C}$) transforme de l'eau chimiquement pure en vapeur. Cette vapeur sous pression (~ 160 bars) entraîne une turbine couplée à l'alternateur. A la sortie de la turbine, la vapeur à pression beaucoup plus basse se condense et retrouve l'état liquide en traversant le condenseur. Cette eau est injectée au réservoir du générateur de vapeur et le cycle recommence avec la même eau (figure 10).

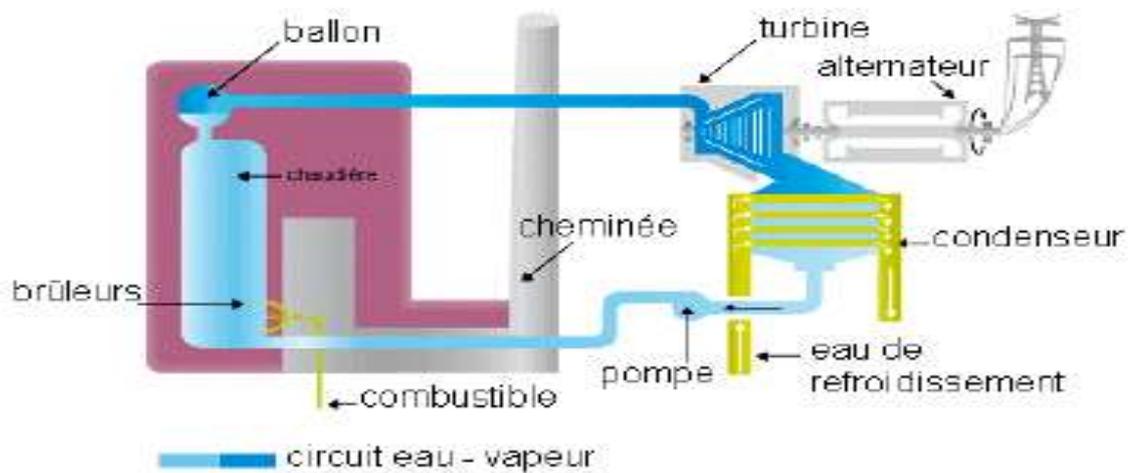


Figure 10 : Principe d'une centrale thermique.

La chaudière (hauteur $<$ ou $=$ à 90 m) et poids $>$ 9000 tonnes, est tapissée de tubes, à l'intérieur desquels circule l'eau à chauffer. Sous l'effet de la chaleur, l'eau se transforme en vapeur qui est ensuite envoyée sous pression vers les turbines. L'alternateur (couplé à la turbine) tourne à 3.000 tr /mn et génère l'électricité, à une tension de 20 000 V. L'énergie électrique est ensuite injectée sur le réseau, après son élévation à 225 ou 400 kV à l'aide d'un transformateur élévateur.

La vapeur turbinée est envoyée vers le condenseur, dans lequel circule de l'eau froide. La réaction est immédiate : la vapeur reprend sa forme liquide. L'eau ainsi obtenue est récupérée et recircule dans la chaudière. Un autre cycle peut commencer. L'eau utilisée pour le refroidissement est soit restituée à son milieu naturel, soit renvoyée au condenseur.

La centrale thermique comprend plusieurs dispositifs indispensables à son fonctionnement et qui consomment de l'énergie. De plus, le principe de Carnot fait que une partie seulement de l'énergie thermique est convertie en énergie mécanique, le reste étant dissipé dans l'atmosphère à travers la tour de refroidissement. Pour ces raisons, le rendement des centrales thermiques se trouve limité à $\sim 40\%$.

Ces centrales produisent la majeure partie de l'électricité en Algérie. Leur technologie est bien maîtrisée, et présente peu de risques. La combustion des produits pétroliers dégage beaucoup de gaz à effet de serre (CO et CO₂), et le charbon dégage encore plus de gaz nocifs.

Il existe un autre type de turbine à combustion qui fonctionne sur le principe d'un réacteur d'avion, auquel on aurait ajouté un alternateur. Cette turbine est capable de démarrer en quelques minutes pour répondre aux besoins de la production «d'extrêmes pointes». Elle fonctionne, en moyenne, pendant quelques dizaines d'heures par an et peut être démarrée très vite, et avec une grande fiabilité.

-3) Constitution :

Une centrale thermique à flamme est composée de 3 parties principales (figure 11):

- .1 - la chaudière dans laquelle est brûlé le combustible ;
- .2 - la salle des machines où est produite l'électricité ;
- .3 - les lignes électriques qui évacuent et transportent l'électricité.

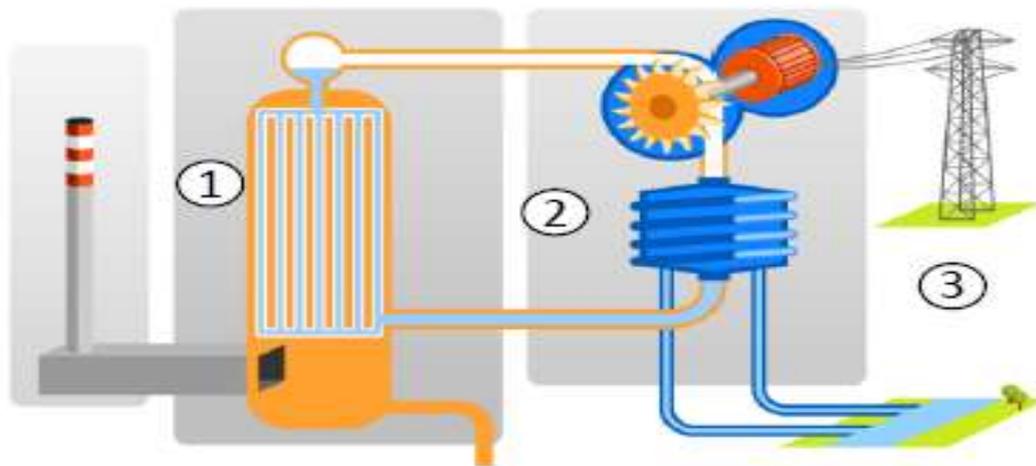


Figure 11 : composition d'une centrale thermique.

Dans une centrale thermique il faut :

- Produire de la chaleur par combustion d'un combustible (fossile ou fissile) ;
- Produire de la vapeur à Haute Température (HT) et à Haute Pression (HP) ;
- Faire détendre cette vapeur dans une turbine à vapeur pour produire un travail mécanique ;
- Récupérer la vapeur par condensation et la renvoyer à la chaudière ;
- Transmettre l'énergie mécanique, disponible sur l'arbre de la turbine, à un alternateur pour produire l'énergie électrique ;
- Et injecter l'énergie électrique dans le réseau de transport.

-4) Principe de fonctionnement

Une centrale thermique à vapeur (ou à flamme) produit de l'électricité à partir de la vapeur d'eau produite grâce à la chaleur dégagée par la combustion d'un combustible solide (charbon), liquide (fioul) ou gazeux (gaz) qui met en mouvement une turbine reliée à un alternateur.

La figure suivante explique le principe de fonctionnement de la centrale thermique.

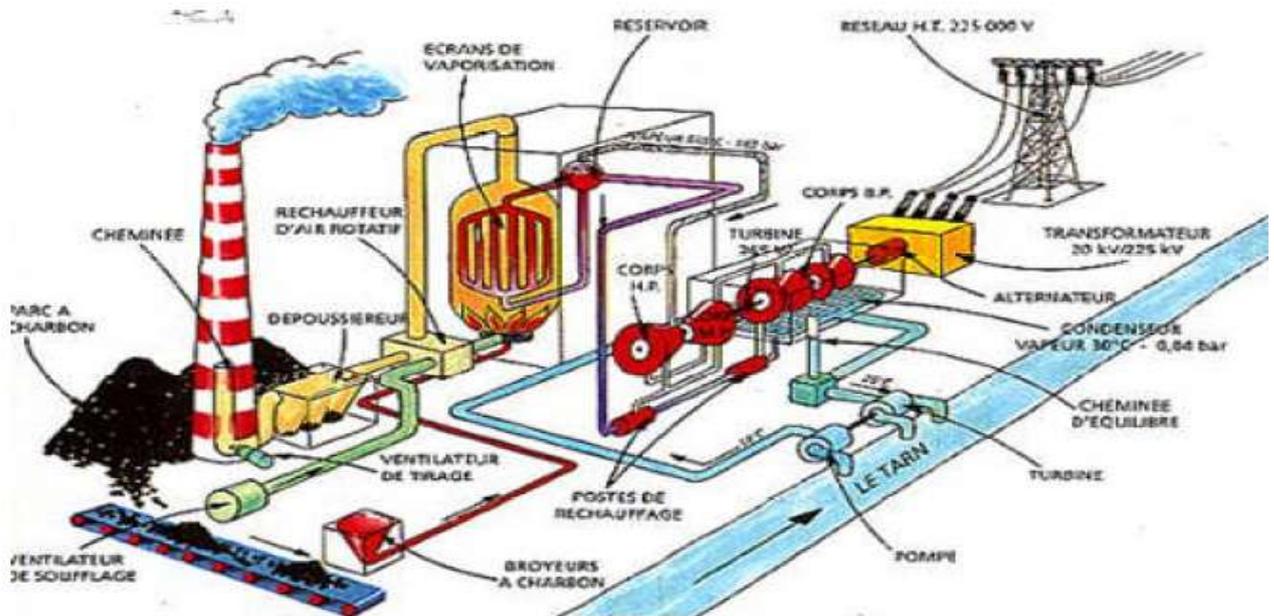


Figure 12 : [Principe de fonctionnement](#) d'une centrale thermique.

Cette production suit plusieurs étapes :

.1 - La combustion : Un combustible est brûlé dans les brûleurs d'une chaudière.

Nota : avant d'être brûlés dans la chaudière, 02 des 03 combustibles subissent une préparation particulière.

- Le charbon est broyé en poudre.
- Le fioul est chauffé pour le rendre liquide puis vaporisé en fines gouttelettes.
- Alors que le gaz est injecté directement sans traitement préparatoire.

.2 - Production de vapeur : La chaudière est recouverte de tubes dans lesquels circule de l'eau. Le combustible, en brûlant, dégage de la chaleur qui va chauffer l'eau et la transformer en vapeur qui sera envoyée à haute température HT et sous pression HP vers les turbines.

.3 - La production d'électricité : La vapeur d'eau obtenue, par la détente, fait tourner une turbine qui entraîne à son tour un alternateur. L'alternateur produit un courant électrique alternatif.

.4 - Le recyclage : La vapeur d'eau sortant des turbines est de nouveau « liquéfiée » par un condenseur dans lequel circule de l'eau froide (eau de mer ou de fleuve). L'eau ainsi obtenue est récupérée et **recircule dans la chaudière** pour recommencer un autre cycle.

L'eau utilisée pour le refroidissement est restituée à son milieu naturel ou renvoyée dans le condenseur.

Les fumées de combustion sont dépoussiérées grâce à des filtres et sont évacuées par des cheminées.

Ces centrales ont été utilisées comme moyen de production de base de l'électricité. Avec le développement de l'énergie nucléaire, elles sont aujourd'hui utilisées comme moyen pour répondre aux pics de consommation aux heures de pointe ou lors de périodes de froid.

NOTA : *Le parc thermique à flamme, géré par SONEGAS (filiale Turbines à Vapeur (TV)), constitué de 20 groupes totalisant une puissance installée de 2740 MW répartis dans **7 centrales de production**, exploitées en base.*

L'énergie thermique à flamme est **la plus utilisée dans le monde** car le charbon est abondant, mais elle émet beaucoup de gaz à effet de serre (*inconvenient*).

.5 - Dans quels cas met-on en route les centrales thermiques ?

La production d'électricité doit être, à chaque instant, identique à la demande des consommateurs. Cela implique donc une grande flexibilité des moyens de production, car toute modification de la consommation doit être automatiquement et instantanément répercutée sur tout le système électrique.

Ainsi, en cas de pic de consommation, les centrales thermiques sont mises en route et leur rôle est de réguler la production d'électricité, afin de pallier à une demande croissante à laquelle les centrales nucléaires seules ne peuvent répondre.

Les centrales thermiques ont donc un rôle d'ajustement, afin qu'il y ait toujours équilibre entre offre et demande d'électricité.

C'est le gestionnaire des dispatchings qui est chargé de prévoir les évolutions de la consommation, et ce afin de réguler la production d'électricité.

Rappel : Les rôles des dispatchings sont multiples :

- gérer les infrastructures du réseau,
- gérer également les flux d'électricité (pour équilibrer le couple offre/demande),
- veiller à la sécurité des approvisionnements,
- et veiller à la sûreté du fonctionnement du réseau.

Les centrales thermiques sont donc rallumées pour produire l'électricité non prévue.

-5) Impact environnemental des centrales thermiques

Sur le site d'une centrale thermique, les émissions de poussières et de gaz nocifs polluent directement l'air. Dans un second temps, ces poussières et la plupart de ces gaz nocifs rejetés dans l'atmosphère retombent au sol avec les précipitations atmosphériques (pluie, neige) ou sous forme de particules sèches, ce qui provoque la pollution des eaux et des sols et nuit à l'environnement (faune et flore).

Faune : *Ensemble des espèces animales vivant dans un espace géographique ou un habitat déterminé.*¹

Flore : *Botanique. Ensemble des espèces végétales croissant dans une région, un milieu donné.*²

.1 - Impact sur l'air

Selon le combustible utilisé et le mode de combustion, les gaz de combustion émis contiennent différentes quantités de polluants.

Les principaux responsables de l'effet de serre sont, par ordre d'importance :

1. le dioxyde de carbone (CO₂),

¹(c) Larousse.

²(c) Larousse.

2. le méthane (CH₄),
3. les chlorofluorocarbures (CFC),
4. l'ozone troposphérique (O₃),
5. et l'oxyde de diazote (N₂O).

Les mesures visant à limiter les émissions de CO₂ consistent, avant tout, à utiliser des centrales thermiques à haut rendement, comme par exemple **celles à cycles mixtes gaz-vapeur** ou **les centrales produisant à la fois de l'électricité et de la chaleur**.

D'autres mesures telles le **recours aux énergies renouvelables**, notamment les usines hydroélectriques visent le même objectif de réduction de CO₂.

Nota : Certaines centrales thermiques classiques réalisent un effort afin de limiter les pollutions aériennes : elles développent ainsi des systèmes de désulfuration et de dénitrification des fumées.

.2 - Impact sur l'eau

Une centrale thermique a besoin d'eau à des fins de réfrigération. Cette eau, une fois réchauffée, est généralement rejetée à faible distance du point de prélèvement.

Si la centrale ne produit que de l'électricité, on estime que 60 à 80 % de l'énergie apportée par le combustible sont rejetés sous forme de calories évacuées avec l'eau de refroidissement de la centrale.

Si la centrale produit de l'électricité mais également de la chaleur (centrale à haut rendement), la quantité d'eau rejetée est plus faible. Selon les conditions locales, les calories ainsi évacuées peuvent entraîner une pollution thermique des eaux de surface, par suite d'une élévation de la température de l'eau.

Nota : Pour éviter un trop grand échauffement du cours d'eau, un réfrigérant atmosphérique peut être utilisé (réfrigération en circuit ouvert ou fermé) pour y refroidir l'eau avant son rejet dans la rivière.

Ces eaux usées, dont les quantités varient énormément selon la nature du combustible et les conditions d'exploitation de la centrale, peuvent également contenir des matières en suspension (métaux lourds, acides, produits alcalins, ammoniac, huile...).

.3 - Impact pour l'homme et son environnement

Pour l'être humain, les effets néfastes des centrales thermiques peuvent s'exercer soit directement sous l'action des gaz nocifs sur l'organisme (affection des voies respiratoires...), soit indirectement par le biais de la chaîne alimentaire ou des dégradations du cadre de vie.

Les retombées de polluants peuvent également avoir des effets néfastes sur les forêts, les lacs et les fleuves, susceptibles de conduire à long terme à d'importantes dégradations du paysage.

La dégradation des paysages est également une conséquence néfaste des centrales thermiques (construction des voies de transport pour acheminer les combustibles et évacuer les résidus...).

I.6.5 - Production nucléaire

-1) Introduction

Les progrès réalisés dans la connaissance de la structure de la matière, la demande importante en énergie et la faiblesse des ressources en énergie primaire ont contribué au développement de l'énergie nucléaire.

Les centrales nucléaires fonctionnent selon le même principe que les centrales thermiques à énergie fossile, sauf que la chaleur n'est pas produite par la combustion de carburants fossiles, mais dans un réacteur nucléaire. Donc **une centrale nucléaire est identique à une centrale thermique**, sauf que la chaudière est remplacée par un réacteur contenant le combustible nucléaire en fission.

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**.

Remarque : une réaction chimique, telle que la combustion du charbon, produit un simple regroupement des atomes sans que leurs noyaux soient affectés.

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.

-2) Le combustible 'Uranium 235 ^{235}U ' :

L'uranium est un métal radioactif présent dans le sous-sol de la Terre. Avant de pouvoir l'utiliser comme combustible dans les réacteurs des centrales nucléaires, il faut l'extraire et le transformer.

a) L'extraction

L'uranium est contenu dans des **minerais**, qui sont extraits de gisements à ciel ouvert ou en galeries souterraines.

Ces gisements se trouvent essentiellement en Australie, aux États-Unis, au Canada, en Afrique du Sud et en Russie.

En Algérie, il existe en faible quantité.

b) Le traitement

Le minerai est réduit en petits morceaux, finement broyé et soumis à des opérations chimiques pour en extraire l'uranium. On obtient **un uranium très concentré**, sous forme d'une poudre jaune appelée **yellow cake**. 1 000 t de minerai donnent de (1,5 à 10) tonnes de **yellow cake**, contenant 75 % d'uranium. Le **yellow cake** est ensuite **raffiné** pour le débarrasser de ses impuretés et obtenir un uranium complètement pur.

c) L'enrichissement

- L'uranium naturel : 1 kg est composé de **993 g d'uranium ^{238}U** et de **7 g d'uranium ^{235}U** .
- **Seul l'uranium ^{235}U est fissile** mais il n'est pas en proportion suffisante pour être utilisable dans les réacteurs des centrales.

L'uranium doit donc être enrichi en uranium ^{235}U , pour qu'il comporte entre **30 et 50 g**. La figure suivante montre, de façon très simplifiée le procédé d'enrichissement.

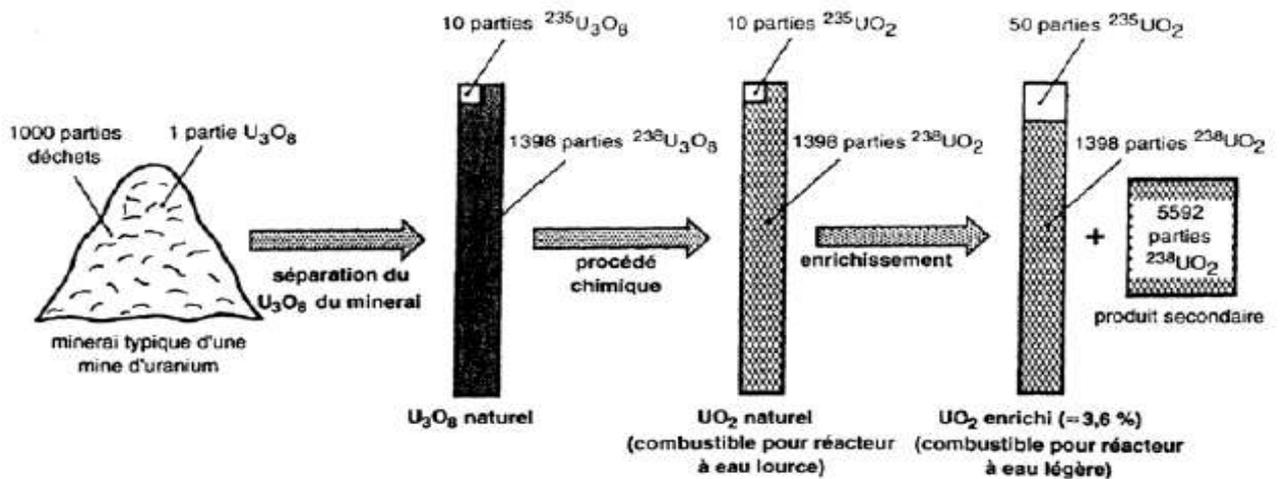


Figure 13 : Le processus d'enrichissement

d) La fabrication du combustible

Une fois enrichi, l'uranium est transformé en poudre noire.

Elle est comprimée et cuite au four, elle donne des petits cylindres d'environ 7 g et de 1 cm de long, appelés **pastilles** (figure 14). Chaque pastille peut libérer autant d'énergie qu'1 t de charbon.

Figure 14 : Pastilles d'uranium cuites à très haute température dans l'usine de production du combustible nucléaire (Melox à Marcoule (Gard) France).



Les pastilles sont enfilées dans des **tubes en métal** de 4 m de long dont les extrémités sont bouchées, pour constituer ce que l'on appelle des **crayons**. Ces **crayons** sont regroupés par lots dans des **assemblages combustibles** (figure 15). Ces assemblages sont placés dans le cœur du réacteur pour le faire fonctionner.

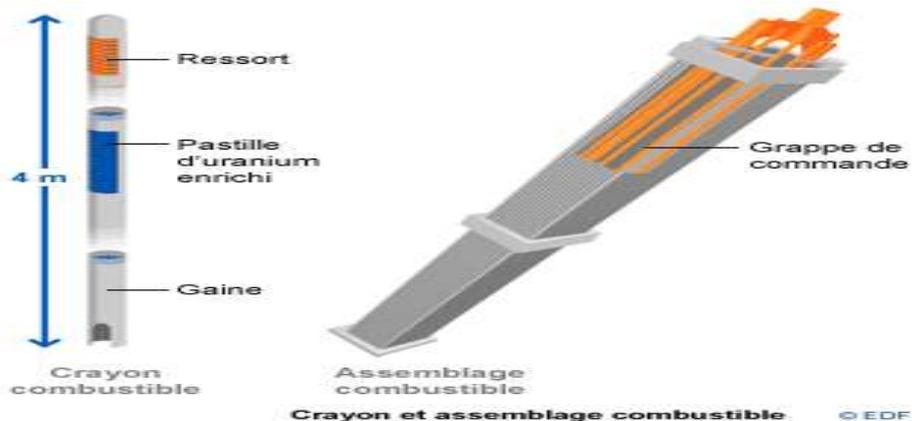


Figure 15 : Assemblages combustibles (plusieurs Crayons).

e) La consommation

Les pastilles resteront entre 4 et 5 ans dans le réacteur et subissent des réactions de fission nucléaire. Au fil du temps, elles vont s'épuiser en uranium 235 et devront être remplacées. Cette opération s'effectue dans l'eau car elle permet de piéger les rayonnements radioactifs. Le combustible utilisé reste ensuite pendant (3) trois ans en piscine de refroidissement, le temps de perdre peu à peu une partie de sa radioactivité.

f) Le retraitement

Dans la plupart des pays, le combustible utilisé est mis dans des conteneurs d'acier et transporté vers une usine de retraitement. Le retraitement consiste à séparer les différents éléments du combustible par des traitements mécaniques et chimiques de façon à les réutiliser et également à séparer les déchets. Ainsi, l'uranium est à nouveau enrichi pour produire du combustible nucléaire.

A savoir : 96 % du combustible utilisé est réutilisé.

La partie du combustible utilisé qui ne peut pas être réutilisée, appelée **déchets ultimes**, est coulée dans du verre en fusion et entreposée pendant 30 à 40 ans à l'usine.

-3) Energie nucléaire

Les combustibles fossiles se consomment plus vite que la nature ne les produit. L'énergie de fission nucléaire est un cas particulier : les gisements exploitables connus seront épuisés dans, suivant les estimations et le développement de la consommation des pays orientaux, **50 ans à un siècle**, ce qui classe cette énergie dans la catégorie "**non renouvelable**".

Les réacteurs actuellement en fonctionnement sont à 81 % des réacteurs à eau légère de 2^{ème} génération, qui utilisent de l'uranium enrichi. Leur approvisionnement en combustible ne pose aucune difficulté, de même que celui des réacteurs de Génération III, comme le **REP (Réacteur à Eau Pressurisée)**, qui pourraient les remplacer à partir des années 2020. Les réserves classiques connues d'uranium représentent en **effet 70 années de consommation actuelle et les réserves probables supplémentaires, 100 années de plus**, ce qui permettrait d'engager la croissance du parc électronucléaire mondial avec le même type de réacteurs.

.1 - Le côté positif du nucléaire :

Quelques chiffres (source ETSU) concernant l'effet de serre :

1 kWh " nucléaire " = 4 g de CO₂

1 kWh " gaz " = 446 g de CO₂

1 kWh " pétrole " = 818 g de CO₂

1 kWh " charbon " = 955 g de CO₂

.2 - Le côté négatif du nucléaire :

Concernant les déchets nucléaires, cette énergie « propre » pose de nombreux problèmes. Par ailleurs **il ne peut encore faire état d'aucune solution satisfaisante pour l'élimination des déchets**. Il faut simplement savoir que si aucune solution n'est mise en place, cela ne signifie pas forcément qu'aucune solution n'existe. Il a été montré qu'un **accélérateur de particules à protons (atomes d'hydrogène ionisé) pouvait transmuter des déchets nucléaires à haute activité** (tels que des pastilles de combustibles irradiés issues de centrales nucléaires).

-4) **Choix du site (Emplacement) :**

Même procédure de choix que pour une centrale thermique (peu de différences).

-5) **Constitution :**

Une centrale nucléaire se compose de 4 parties principales :

- 1- le **bâtiment** contenant le réacteur dans lequel a lieu la fission ;
- 2- la **salle des machines** où est produite l'électricité ;
- 3- les **départs de lignes électriques** qui évacuent et transportent l'électricité ;
- 4- des **tours de refroidissement** uniquement en bord de rivière. Identique à celle d'une centrale thermique conventionnelle (figure 16).

Une centrale nucléaire est constituée d'un ou plusieurs réacteurs nucléaires (**jusqu'à 7**), dont la **puissance** électrique varie de **40 MW à plus de 1450 MW**.

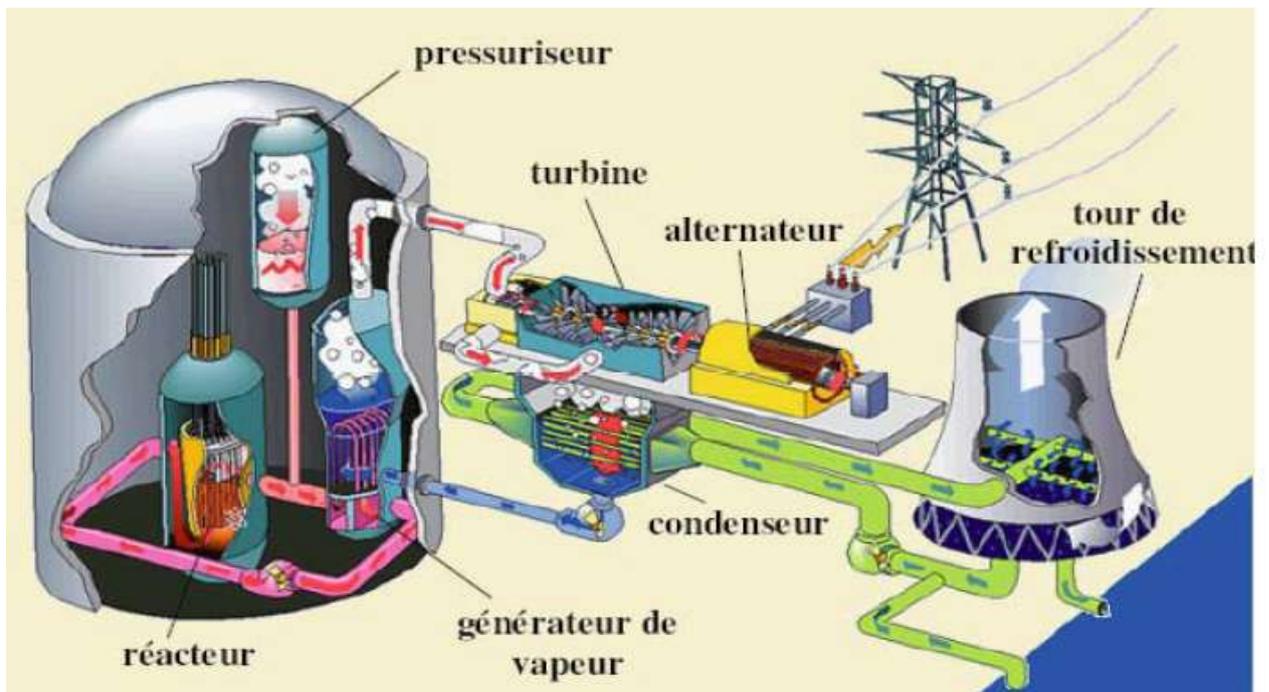


Figure 16 : Constituants et principe de la centrale nucléaire.

L'uranium a 17 isotopes, tous radioactifs, dont (3) trois seulement sont présents à l'état naturel : ^{238}U ; ^{235}U et ^{234}U . Quelles que soit la teneur en uranium d'un matériau, les proportions entre les trois isotopes formant l'uranium naturel sont toujours les mêmes : **0,71 % (^{235}U) ; 0,0054 % (^{234}U). 99,28 % (^{238}U)**,

On a approximativement :

1tonne (uranium naturel pur) = **7,1 kg (^{235}U) + 54 g (^{234}U) + reste (^{238}U)**.

Dans les réacteurs nucléaires, on utilise de l'uranium enrichi en isotope 235, car c'est le seul nucléide naturel qui soit fissile c'est à dire que lorsqu'un neutron frappe un atome ^{235}U , celui-ci se divise en deux atomes plus légers appelés produits de fission, tout en éjectant deux à trois neutrons et en dégageant de l'énergie thermique. Après ralentissement par des modérateurs, chaque neutron peut faire éclater un autre atome ^{235}U , ce qui crée une réaction en chaîne (figure 17, suivante).

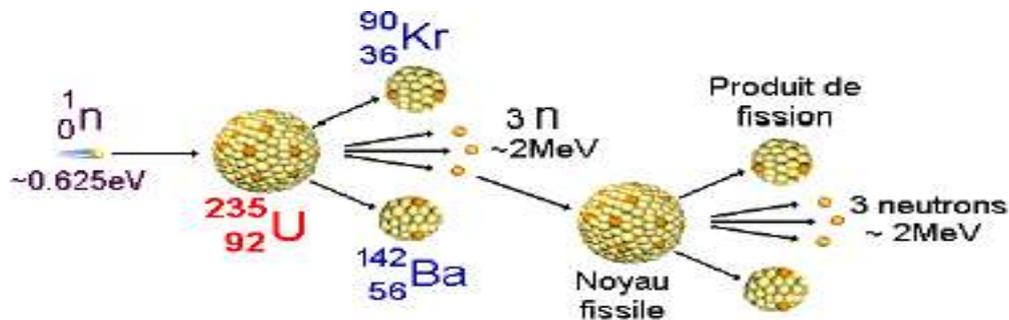


Figure 17 : Fission de l'uranium ^{235}U .

Kr : Krypton (Tableau : L(4)*C(18) **gaz rare**) ; L(i) * C(i) : ligne (i) * colonne (i)
Ba : Baryum (Tableau : L(6)*C(2) **Solide**).

Dans la salle de commande, pour augmenter ou diminuer la production d'électricité, les opérateurs agissent sur l'intensité de la réaction en chaîne, au moyen de grappes de commande ou de bore, qui absorbe les neutrons. En enfonçant plus ou moins ces grappes dans le réacteur, la puissance peut être ajustée ou arrêtée. En cas de situation anormale les grappes de commande tombent de manière automatique et arrêtent le réacteur en 2 secondes.

-6) Fonctionnement :

Le bâtiment réacteur est une enceinte en béton étanche. Il contient le cœur du réacteur qui est constitué par une cuve en acier contenant les assemblages combustible et l'eau du circuit primaire. C'est à l'intérieur de la cuve que se passe la fission de l' ^{235}U qui produit une $Q \gg \gg$. Cette chaleur est évacuée en permanence hors du réacteur vers un échangeur de chaleur, par l'intermédiaire d'un **fluide caloporteur pressurisé** à 155 bars pour l'empêcher de bouillir. Le générateur de vapeur permet l'échange de chaleur entre l'eau du circuit primaire et l'eau du circuit secondaire. Les pompes assurent la circulation de l'eau.

La fission des noyaux des atomes produit une énergie calorifique énorme, chauffe de l'eau sous pression dans l'enceinte de confinement. Le chauffage de cette eau produit de la vapeur. Cette vapeur va entraîner une turbine. Cette turbine entraîne en rotation un alternateur, qui va générer l'énergie électrique.

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 18 montre les parties principales d'une centrale nucléaire.

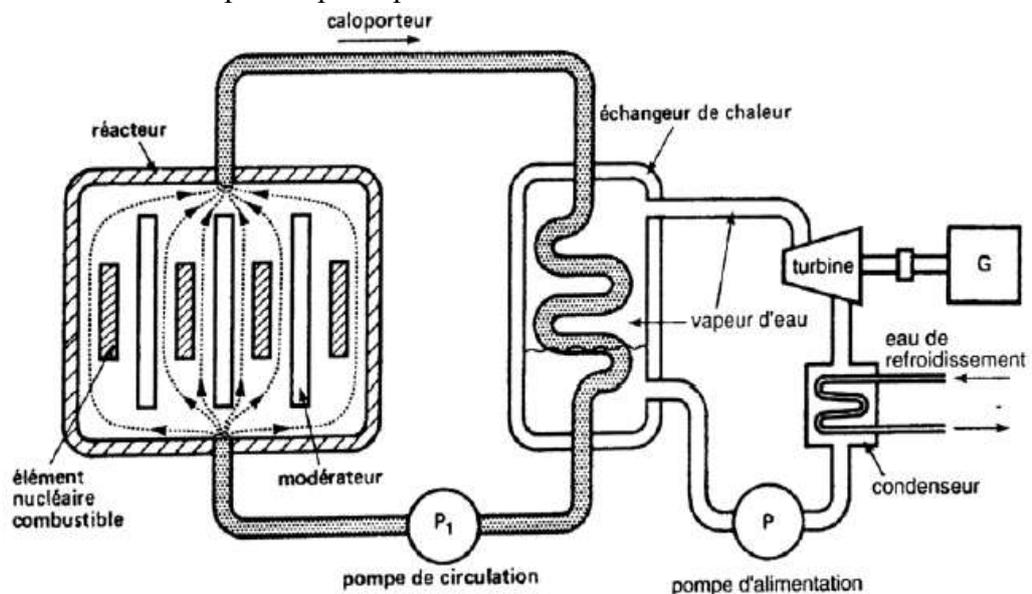


Figure 18 : Parties principales d'une centrale nucléaire

-7) Types de réacteurs

Il existe plusieurs types de réacteurs; les principaux sont:

.7-1. 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.

.7-2. 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 utilise de l'oxyde d'uranium enrichi ayant une concentration d'environ 3 % en ^{235}U .

.7-3. 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 %.

.7-4. 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.

a) 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 (^{239}Pu). Ce noyau est entouré d'une enveloppe de substances contenant de l'uranium non fissile 238 (^{238}U). Il n'y a pas de modérateur; par conséquent, les neutrons à haute vitesse générés par le ^{239}Pu dans le noyau viennent bombarder les atomes d'uranium ^{238}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}U captent les neutrons éjectés du noyau, ce qui transforme ces atomes en plutonium fissile ^{239}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}U non fissile est graduellement transformée en ^{239}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}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.

Le réacteur surrégénérateur est bien adapté comme complément aux réacteurs à eau légère. En effet, de grandes quantités de ^{238}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. Notons que les réacteurs surrégénérateurs utilisent le **sodium liquide comme caloporteur**.

-8) 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 ^2H fusionne avec un atome de tritium ^3H . 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 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.

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.

I.7- Emplacement des centrales électriques (cas générale)

Plusieurs critères interviennent dans le choix du site de l'emplacement de la future centrale :

- Présence ou non de ressources énergétiques propres au pays ;
- Concentration d'unités industrielles et de zones urbaines importantes ;
- Ressources en eau de refroidissement.

L'emplacement des centrales de production, des lignes de transport et des postes de transformation demande toujours une analyse et étude détaillées pour aboutir à une solution acceptable et économique. Parfois, on peut placer une centrale près de la source d'énergie primaire et utiliser des lignes pour transporter l'énergie électrique aux clients. Quand cela n'est ni pratique ni économique, on doit transporter l'énergie primaire par des moyens convenables et économiques (bateau, train, pipe-line ...etc.) jusqu'à la centrale. Les centrales peuvent être donc plus au moins éloignées des usagers. Le tableau B-1 montre quelques obstacles et contraintes qui empêchent la construction des lignes par le chemin le plus court. A cause de ses obstacles, les lignes de transport doivent se faufiler à travers le paysage pour relier les centrales aux usagers.

| Energie Primaire | Transport | Centrales | Obstacles | Usagers |
|----------------------------|-------------------------------------|-------------|---|---|
| - Charbon | Train | Thermique | Montagnes, terrains coûteux, lacs, restrictions pollution, zones résidentielles, atmosphère salée villes, régions aride | Centre ville, grosses industries, villes, banlieue |
| - Pétrole | Pipe-line Bateau pétrolier | | | |
| - Gaz Naturel | Pipe-line Bateau Gaz liquéfié | | | |
| - Chute ou Fil de l'eau | Conduites | Hydraulique | | |
| - Uranium | Routier | Nucléaire | | |

Tableau B-1 : Obstacles et contraintes de construction de lignes électriques.

1.7.1- Emplacement des centrales thermiques :

Le choix du site (lieu) pour l'implantation d'une centrale thermique dépend de plusieurs considérations tel que :

- La proximité de la source d'énergie primaire (mines, raffineries, complexes sidérurgiques, port, ...etc.) qui est importante car elle influe sur le prix de transport du combustible.
- Les moyens de communication (routes, voies ferrées ou navigables) qui influent sur l'acheminement du matériel pour la construction de la centrale.
- La possibilité de raccordement au réseau général de transport de l'énergie (évacuation de l'énergie produite). Une nouvelle centrale peut entraîner la construction de nouvelles lignes et ou de nouveaux postes d'interconnexion si le réseau est localement saturé.
- La présence de la source froide (condensation de la vapeur) est une considération principale. En effet, le bilan du cycle thermique indique que 4200 à 4400 kJ doivent être libérés pour chaque kWh produit. Si on choisit la réfrigération par l'eau, cela exige un fort débit dans le condenseur (les centrales de grandes puissances sont construites en bordure de mer ou des rivières de fort débit).
- La pollution de l'atmosphère (environnement) doit être minimisée voir même nulle.
- Dans les zones urbaines il faut tenir compte du prix du terrain de l'implantation de la centrale (réservation du terrain 10 ans avant.)

1.7.2- Emplacement des centrales nucléaires :

Les problèmes posés par le choix du site pour l'implantation d'une centrale nucléaire diffèrent peu de ceux d'une centrale thermique.

- En effet le combustible nucléaire, de faible quantité et de renouvellement rare, exige un transport qui n'a, pratiquement, pas d'influences sur la localisation de la centrale.
- La possibilité de raccordement au réseau général est le point très important.
- Le besoin d'un débit suffisant d'eau de refroidissement est encore plus difficile à satisfaire pour ces centrales.
- Avec les techniques nucléaires actuelles, les températures obtenues sont beaucoup plus basses et conduisent à un cycle thermodynamique tel, qu'à puissances égales, il faut rejeter à la source froide une quantité de chaleur environ 1,5 à 2 fois plus grande que pour une centrale thermique. Le débit d'eau doit donc augmenter dans le même rapport.
- Bien que les centrales nucléaires n'entraînent pas de pollution atmosphérique et que toutes les dispositions, sévères, sont prises pour la sécurité de l'environnement, pour des raisons psychologiques, on n'installe pas les centrales nucléaires près des grands centres urbains.

1.7.3- Emplacement des autres types de centrales :

- **Centrales solaires:** lieu = f(heure d'ensoleillement h/an ou /saison)
- **Centrales éoliennes :** lieu = f(vitesse moyenne du vent m/s/an ou par saison)
- **Centrales marée motrice et hydroéolienne :** lieu = f(force des vagues)
- **Centrales Géothermiques :** lieu = f(puissance thermique moyenne °/j)

Bien qu'on peu 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, vu l'expérience et la maîtrise de la technologie, qu'au niveau

mondial l'industrie continuera à exploiter les ressources fossiles (charbon, gaz naturel), nucléaires et hydrauliques au détriment de l'environnement.

I.8- Services systèmes

Les services systèmes sont nécessaires pour garantir un fonctionnement sûr et fiable du système électrique. Ils sont gérés par les gestionnaires de réseaux sur la base de contributions fournies par les producteurs raccordés. Parmi les services systèmes, on peut citer:

Le réglage de la tension, le réglage de la fréquence, et la reconstitution de réseau.

La variabilité, la non-contrôlabilité des énergies éolienne et photovoltaïque, et la nature des technologies utilisées limitent grandement la capacité de ces énergies à fournir des services systèmes. La capacité du système à garder un niveau de services systèmes suffisant malgré l'intégration des énergies renouvelables sera une des principales limites à l'insertion de ces dernières si elles ne sont pas en mesure de fournir ces services.

I.9- Réglage de tension et compensation de puissance réactive

Toutes les unités de production, y compris les groupes de production d'énergie renouvelable, doivent pouvoir fonctionner dans un domaine de fonctionnement déterminé par le gestionnaire de réseau.

Les unités de production doivent assurer un contrôle de la tension et/ou de la puissance réactive au point de livraison. Trois types de réglage primaire sont possibles :

Type 1 : réglage à puissance réactive constante au point de livraison.

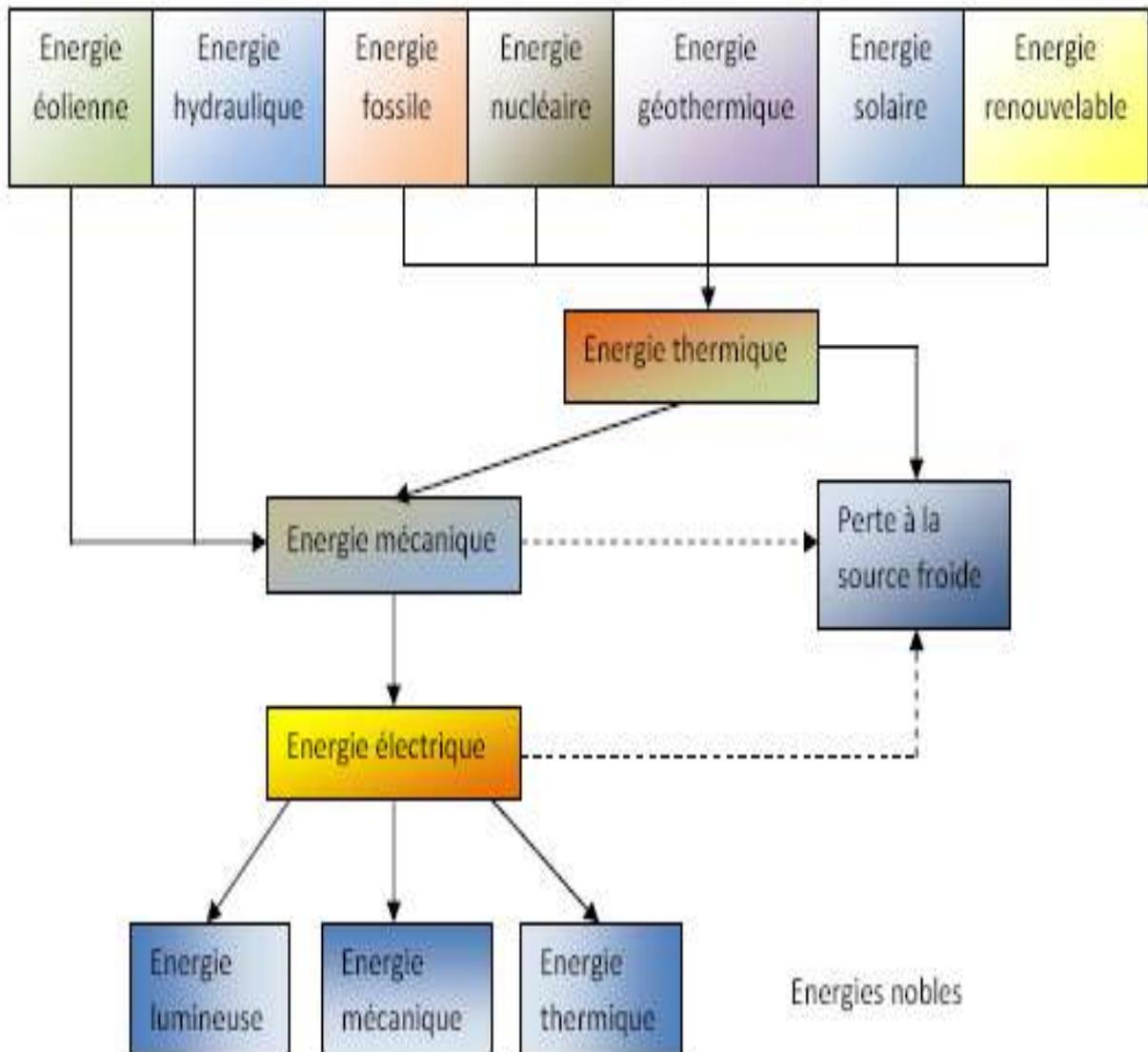
Type 2 : réglage de la tension au point de livraison à une valeur variant linéairement en fonction de la puissance réactive avec une pente ajustable.

Type 3 : réglage de la tension aux bornes de l'installation selon une consigne asservie aux ordres provenant du réglage secondaire de la tension.

I.10- Réglage de la fréquence

Les installations à base d'énergie fatale (dont font partie l'éolien et le photovoltaïque) sont dispensées de réglage de fréquence.

L'intégration importante des énergies renouvelables dans les systèmes électriques entraîne la mutation de ces derniers d'une structure verticale vers une structure horizontale (avec des injections de puissances à tous les niveaux de tension, notamment dans les réseaux de distribution. L'arrivée des énergies renouvelables pose aux gestionnaires de réseaux de nouveaux défis techniques notamment à cause de la variabilité de la production et aussi de leurs faibles capacités à fournir les services systèmes. En vue de leurs effets sur le système électrique, leur raccordement fait l'objet d'études afin de vérifier si elles respectent les conditions techniques des différents gestionnaires de réseaux.



Différentes formes de l'énergie.