

## Production et distribution de l'électricité

### I- Production d'électricité industrielle

- I-1: Centrales hydroélectriques
- I-2: Centrales à carburants fossiles
- I-3: Centrales nucléaires
- I-4: Centrales éoliennes
- I-5: Autres moyens de production d'électricité

### II- Réseau électrique

- II-1 : Le triphasé
- II-2 : Transport de l'énergie électrique
- II-3 : Les postes électriques
- II-4 : Les lignes électriques
- III- Electricité domestique

### I- Production d'électricité industrielle

L'énergie peut prendre différentes formes (Fig-1). Dans un système donné, l'énergie totale reste constante. La conversion d'une forme en une autre est réalisée par différents processus naturels ou artificiels. Tous les processus de conversion d'énergie ont un rendement limité : c'est à dire que seule une partie de l'énergie fournie est convertie en énergie utile, la différence étant dissipée sous forme de chaleur, (énergie thermique).

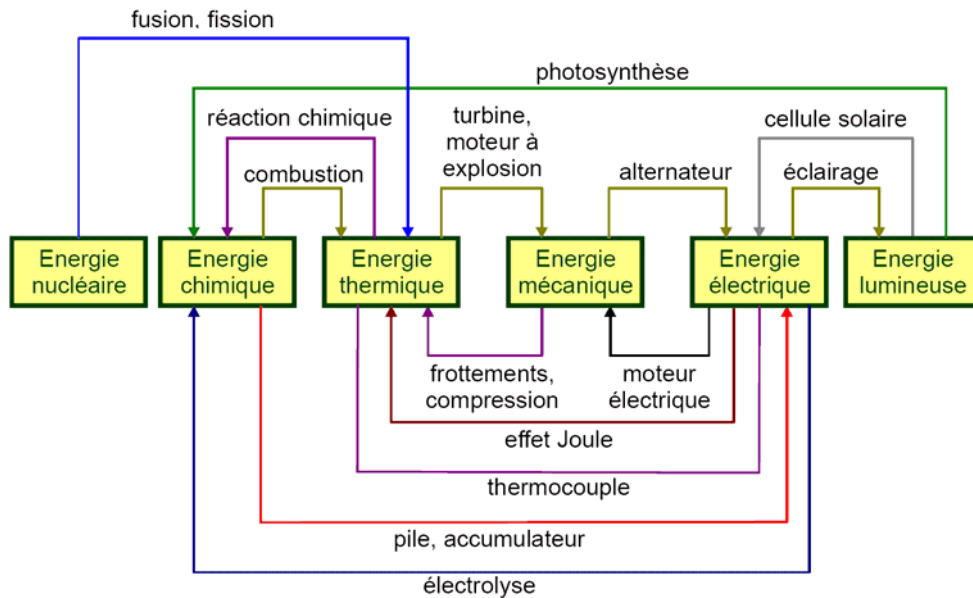


Fig-1 : Principe de la conservation de l'énergie

L'électricité représente une forme intermédiaire d'énergie très intéressante par sa facilité de transport et de distribution, ceci aussi bien à l'échelle d'un continent qu'à l'intérieur des appareils. Elle est produite à ~100% dans des centrales (hydraulique, thermique, nucléaire ou éolienne). Le pourcentage relatif (fig-2) dépend des ressources énergétiques du pays considéré.

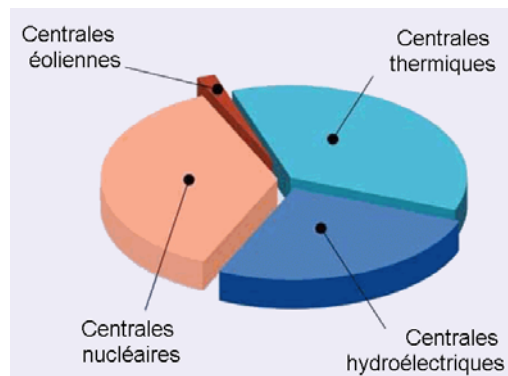


Fig-2 : Origine de l'électricité industrielle produite

## I-1 : Centrales hydroélectriques

L'hydroélectricité, première des énergies renouvelables au monde, est produite dans des usines appelées centrales hydrauliques, qui fonctionnent le plus souvent en association avec un barrage ou un fleuve, en dérivant l'écoulement naturel de l'eau. La force motrice de l'eau (énergie potentielle) est d'autant plus grande que la hauteur de chute et le débit de l'eau seront importants.

La puissance générée vaut  $P = E_p / t$  où  $t$  est le temps (s) et  $E_p$  l'énergie potentielle de l'eau de poids  $m.g$  (la constante  $g$  vaut  $9.8 \text{ N / kg}$ ) à une hauteur  $h(m)$  :

$$P(W) = m.g.h / t$$

- La masse  $m$  est reliée au volume  $V$  par :  $m = \rho.V$
- Le débit  $Q$  (volume qui passe par unité de temps) =  $V / t$
- La masse volumique de l'eau vaut  $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$

Ainsi  $P$  résulte de la conjonction de 2 facteurs: la hauteur de la chute  $h(m)$  et le débit de l'eau  $Q(m^3/s)$  :

$$P \text{ (kW)} = 9,8 \cdot Q \cdot h$$

Lorsque l'eau est stockée, il suffit d'ouvrir des vannes pour amorcer le cycle de production d'électricité. Suivant l'installation, l'eau s'engouffre alors dans une conduite forcée ou dans une galerie creusée dans la roche, et se dirige vers la centrale hydraulique en contrebas.

A la sortie de la conduite, la force de l'eau entraîne la rotation de la turbine (Fig-3). La turbine entraîne l'alternateur qui produit de l'électricité puis rejoint la rivière par le canal de fuite. Un transformateur élève alors la tension du courant produit par l'alternateur pour qu'il puisse être plus facilement transporté sur les lignes à haute et très haute tension.

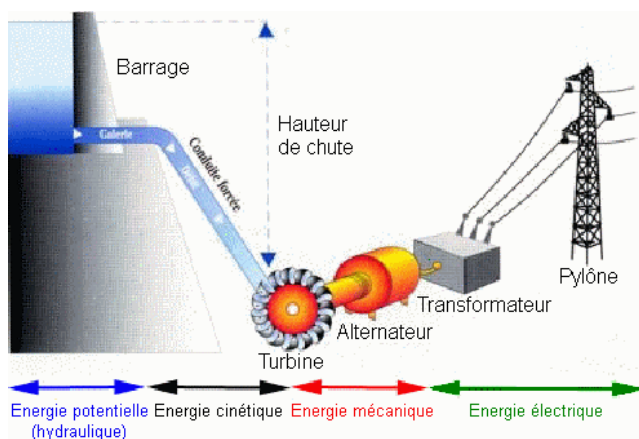


Fig-3 : Principe d'une centrale hydroélectrique

La figure 4 schématise le principe d'un alternateur constitué d'une bobine de surface  $S$  comportant  $N$  spires de tournant à l'intérieur d'un champ magnétique. La loi de Faraday permet d'écrire que :

$$E_{emf} = -N \frac{d\Phi}{dt}$$

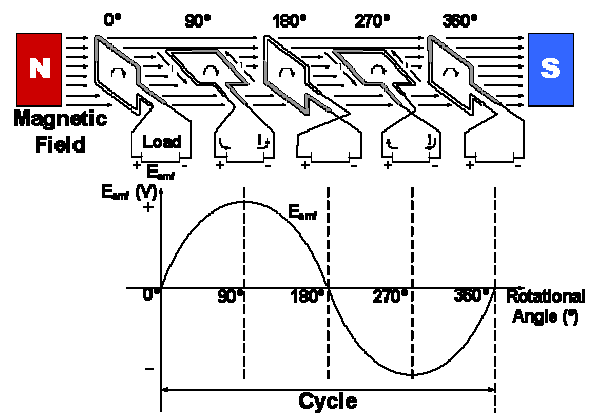
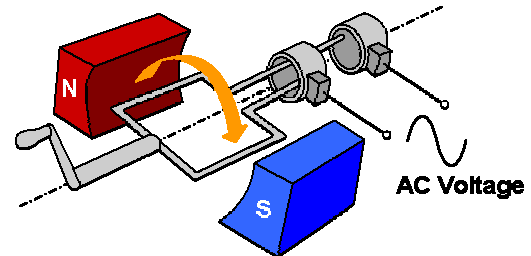


Fig-4 : Conversion d'énergie mécanique en électricité alternative dans un alternateur

Il existe 3 grands types d'aménagements hydroélectriques selon le type du cours d'eau, ou de la hauteur de la chute.

- a- Pour les chutes d'eau importantes, les centrales sont implantées loin du barrage. Elles utilisent une turbine de Pelton équipée d'une roue à augets qui tourne à l'air libre sous la force d'un jet à très grande énergie dirigé par un injecteur. Un pointeau de réglage permet de maintenir constante la vitesse de rotation de la turbine (Fig-5).

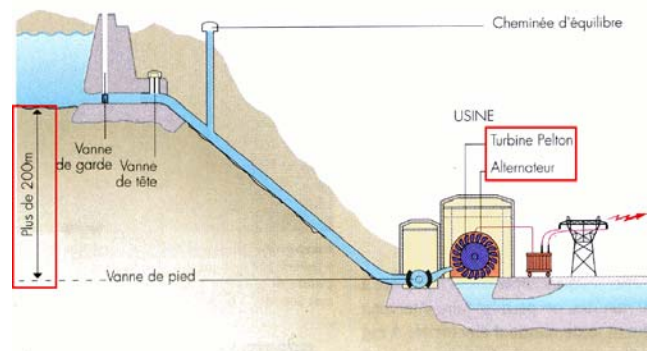


Fig-5a : Chute d'eau importante >200m de hauteur

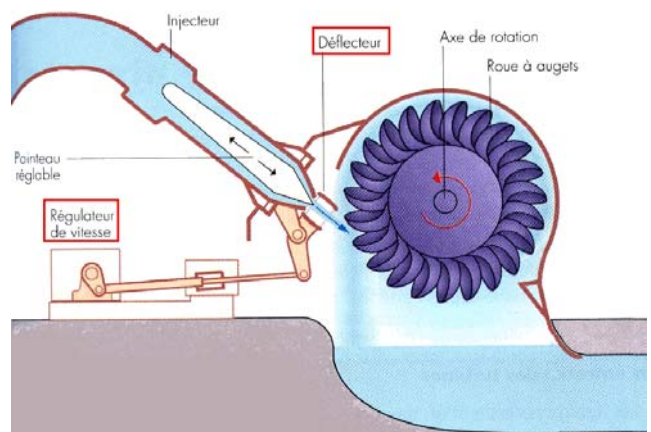


Fig-5b : Principe de la turbine de Pelton

- b- Les centrales électriques de moyenne chute (30-200m) sont construites sur le barrage (Fig-6). Elles utilisent des turbines de Francis qui tournent dans l'eau sous l'effet de l'eau qui arrive sous pression (par la périphérie) et ressort détendue (par le centre).

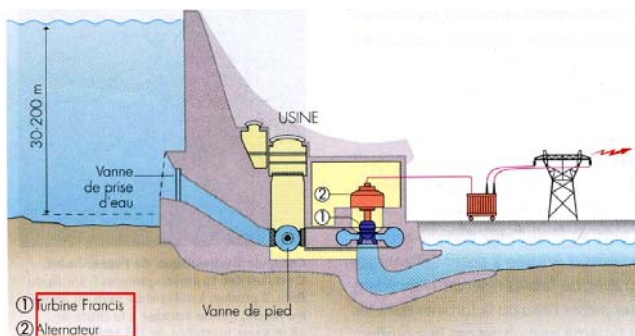


Fig-6a : Chute d'eau modérée [30m-200m]

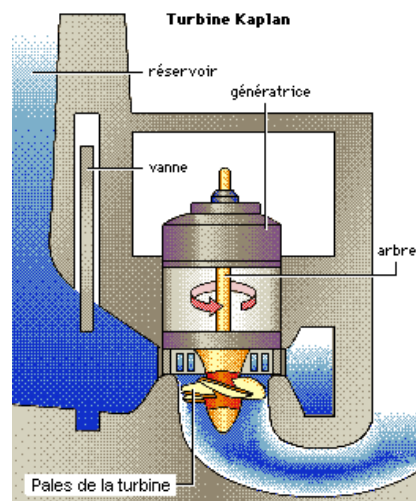


Fig-7b : Schéma de la turbine Kaplan

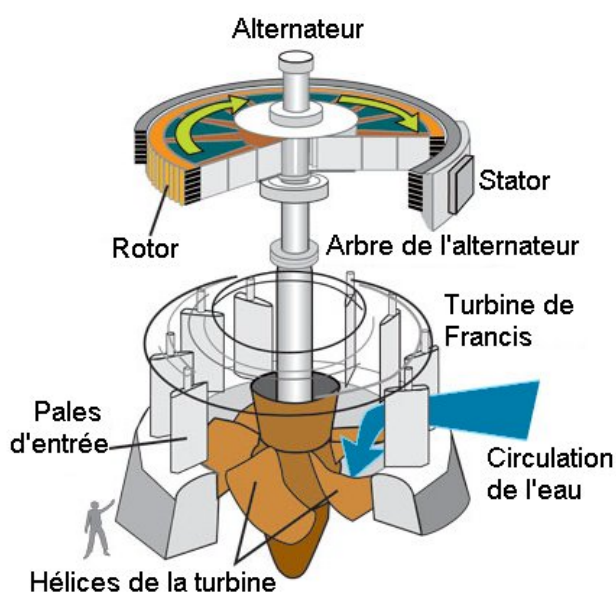


Fig-6b : Principe de la turbine de Francis

- c- Les centrales électriques au fil de l'eau (chute <30m) sont construites sur un canal de dérivation ou sur le lit d'une rivière ou d'un fleuve. Elles utilisent des turbines de Kaplan en forme d'hélice (Fig-7). Les pales mobiles de cette hélice ont une inclinaison que l'on ajuste en fonction du débit et du niveau de la rivière (fonctions des saisons) pour améliorer le rendement de la centrale.

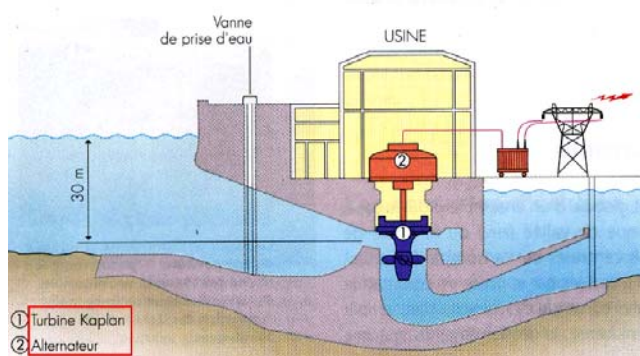


Fig-7a : Centrales au fil de l'eau (sur les fleuves)

Les centrales hydroélectriques présentent l'avantage d'utiliser une énergie renouvelable. Elles ont un excellent rendement (~90%) et ne produisent pas de déchets.

Leur inconvénient principal est que les sites potentiels sont en nombre limité et se situent généralement en montagne entraînant des sur coûts importants de construction, et impose parfois de noyer des vallées entières de terre cultivable, où les hommes vivent bien souvent depuis des générations.

Par ailleurs, on ne peut jamais garantir le risque zéro de rupture des barrages, surtout lors de conditions météorologique exceptionnelles.

Performances de quelques centrales hydroélectriques :

**Centrale du Mont Cenis (Frontière France Italie)**

- Capacité de la retenue :  $270 \times 10^6 \text{ m}^3$ .
- Hauteur de chute : 882 m.
- Débit :  $51 \text{ m}^3/\text{s}$ .
- Deux groupes turbine Pelton alternateur de 200 MVA.

**Centrale de Serre-Ponçon**

- Capacité de la retenue :  $1\,270 \times 10^6 \text{ m}^3$ .
- Hauteur de chute entre 128 m et 65 m.
- Débit :  $1\,200 \text{ m}^3/\text{s}$ .
- Quatre ensembles turbine alternateur de puissance 90 000 kVA - 214 tr/min.

**Centrale de Rhinau sur le Rhin**

- Hauteur de chute de 5 à 15 m.
- Débit maxi d'évacuation :  $5\,000 \text{ m}^3/\text{s}$  ;  
par groupe :  $350 \text{ m}^3/\text{s}$ .
- Quatre groupes turbine Kaplan alternateur de 42 000 kVA chacun, vitesse 75 tr/min.

## I-2: Centrales à carburants fossiles

Charbon, mazout et gaz sont des carburants fossiles qui servent de combustible 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 : gaz naturel pour les cycles combinés gaz soit gaz sidérurgiques.

Ces carburants fossiles sont brûlés dans une chaudière. La chaleur dégagée (plus de 560°C) transforme de l'eau chimiquement pure en vapeur. Cette vapeur sous pression (~160 bars) entraîne une turbine couplée à un alternateur générant l'électricité. A la sortie de la turbine, la vapeur à pression beaucoup plus basse se condense et se retrouve à l'état liquide en traversant le condenseur. Cette eau est injectée de réservoir du générateur de vapeur et le cycle recommence toujours avec la même eau (fig-8).

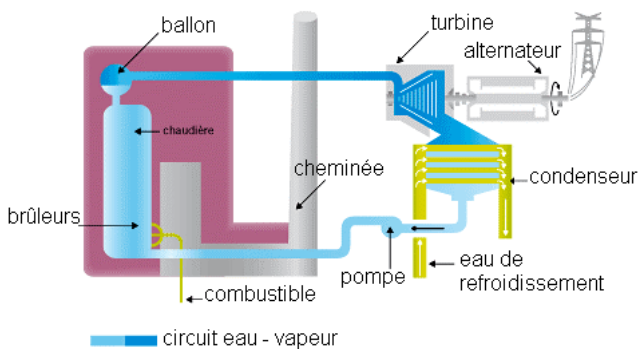


Fig-8 : Principe d'une centrale thermique

La chaudière qui peut mesurer 90 mètres de haut et peser plus de 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 qui est couplé à la turbine, tourne à 3.000 tours par minute et génère l'électricité, à une tension de 20.000 Volts. L'énergie électrique est ensuite injectée sur le réseau, après avoir été portée à 225.000 ou 400.000 Volts à l'aide d'un transformateur de puissance.

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 re-circule dans la chaudière. Un autre cycle peut commencer. L'eau utilisée pour le refroidissement est quand à elle soit restituée à son milieu naturel, soit renvoyée au condenseur (fig-9).

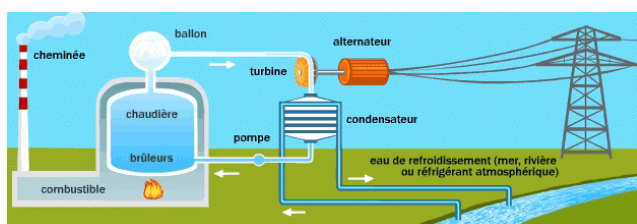


Fig-9 : Eau dans une centrale thermique

Les centrales thermiques comprennent 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 ~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 CO<sub>2</sub>), 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 production «d'extrême pointe». Elle fonctionne en moyenne quelques dizaines d'heures par an et peut être démarrée très vite, et avec une grande fiabilité (Fig-10).

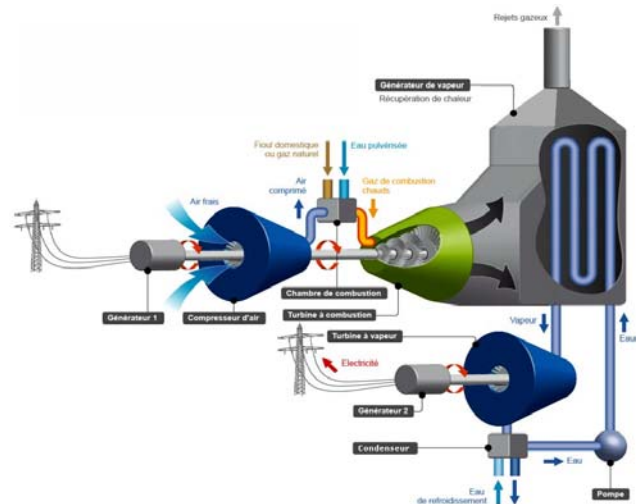


Fig-10 : Principe d'une turbine à combustion

- 1 - l'air est fortement comprimé
- 2 - dans la chambre de combustion, du mazout ou du gaz est injecté à l'air comprimé, en s'enflammant, il produit l'énergie nécessaire pour faire tourner la turbine.
- 3 - la turbine entraîne l'alternateur qui produit l'électricité.

Performances typiques d'une centrale thermique :

Générateur de vapeur :

- Capacité de production 1 800 t/h de vapeur.
- 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) ;
- un corps moyenne pression (MP) ;
- un corps basse pression.

Alternateur :

- Puissance : 600 MW ; tension 20 kV triphasée.
- Vitesse : 3 000 tr/min : courant nominal : 19 000 A.

### I-3: Centrales nucléaires

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 par un réacteur nucléaire.

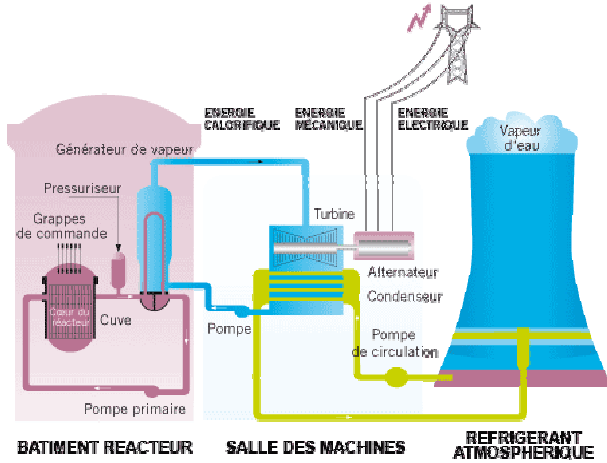


Fig-11 : Centrale nucléaire

Le bâtiment réacteur est une enceinte en béton étanche (fig-11). Il contient le cœur du réacteur qui est constitué par une cuve en acier contenant les assemblages combustibles et l'eau du circuit primaire. C'est là, à l'intérieur de la cuve que se passe la fission de l'uranium 235 qui produit une grande quantité de chaleur. 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.

L'uranium a 17 isotopes, tous radioactifs, dont 3 seulement sont présents à l'état naturel :  $^{238}\text{U}$  ;  $^{235}\text{U}$  et  $^{234}\text{U}$ . Quelles que soit la teneur en uranium d'un matériau, les proportions entre les trois isotopes formant l'uranium naturel sont toujours les mêmes : 99,28 % ( $^{238}\text{U}$ ), 0,71 % ( $^{235}\text{U}$ ) et 0,0054 % ( $^{234}\text{U}$ ). On trouve donc dans une tonne d'uranium naturel pur 7,1 kg d'uranium 235 et 54 g d'uranium 234, le reste étant de l'uranium 238. Dans les réacteurs nucléaires, on utilise comme combustible 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  $\text{U}^{235}$ , celui-ci se divise en 2 atomes plus légers appelés produits de fission, tout en éjectant 2 à 3 neutrons et en dégageant de l'énergie thermique. Après ralentissement par des modérateurs, chaque neutron peut faire éclater un autre atome  $\text{U}^{235}$ , ce qui crée une réaction en chaîne (fig-12).

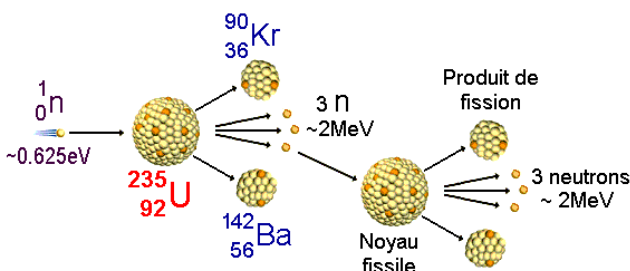


Fig-12 : Fission de l'uranium 235

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.

Remarques :

a-La fission d'un atome d'uranium 235 (cf. réaction nucléaire fig-12) libère de l'ordre de 200MeV. Cette valeur est à comparer avec celle de la combustion de carburants fossiles, qui libèrent de l'ordre de  $\sim 5\text{eV}$  par molécule de  $\text{CO}_2$  produit. L'ordre de grandeur de l'énergie libérée par les combustibles nucléaires est alors 40 millions de fois plus importante que celle des énergies fossiles chimiques.

b-A cause des radiations et des normes de sécurité, la température de la vapeur produite dans une telle centrale ne peut être aussi élevée que dans une centrale thermique conventionnelle. Pour cette raison, leur rendement actuel ne dépasse pas  $\sim 33\%$ .

c-A première vue, les centrales peuvent sembler idéales: 1 kilogramme d'uranium naturel permet la production de  $\sim 500.000\text{MJ}$  dans un réacteur conventionnel. C'est incomparable avec les 25MJ produits par kg de charbon, les 39 MJ par kg de gaz ou les 45 MJ par kg de pétrole. Avec quelques tonnes d'uranium on peut assurer la production électrique pendant une année.

d-La matière première ne souffre pas des mêmes aléas d'approvisionnement que le pétrole ou le gaz naturel, et son utilisation ne produit aucun gaz à effet de serre. Mais les centrales nucléaires produisent des déchets radioactifs à très longue durée de vie, dangereux et impossibles à éliminer. Les dégâts causés par une panne majeure peuvent s'étendre à l'échelle de tout un continent (accident de Tchernobyl 1986) et coûter la vie de milliers de personnes.

Performances typiques d'une centrale nucléaire :

#### Réacteur :

- Puissance thermique nominale : 3 800 MW.
- Pression nominale : 155 bars.
- Débit nominal : 93 000  $\text{m}^3/\text{h}$ .
- Température entrée/sortie de cuve : 293/328 °C.

#### Générateur de vapeur :

- Puissance nominale : 1 354 MW.
- Température entrée eau alimentation : 230 °C.
- Température sortie vapeur : 287 °C.
- Pression de vapeur : 71 bars

#### Turbines :

- Vitesse de rotation : 1 500 tr/min.

#### Alternateur :

- Puissance nominale : 1 300 MW.
- Tension de sortie : 20 kV.

## I-4: Centrales éoliennes

Une éolienne utilise la force du vent pour actionner les pales d'un rotor. L'énergie mécanique produite par la rotation des pales est transformée en énergie électrique grâce à un générateur. Une éolienne se compose d'un mât de quelques dizaines de mètres de haut sur lequel une nacelle est installée (fig-13).



Fig-13 : Production d'électricité par énergie éolienne

La nacelle renferme la génératrice électrique qui est entraînée par un rotor de 2 ou 3 pales en fibres de verre, qui mesurent entre 5 et 10 m de diamètre, et tournent sous l'effet du vent (Fig-14).

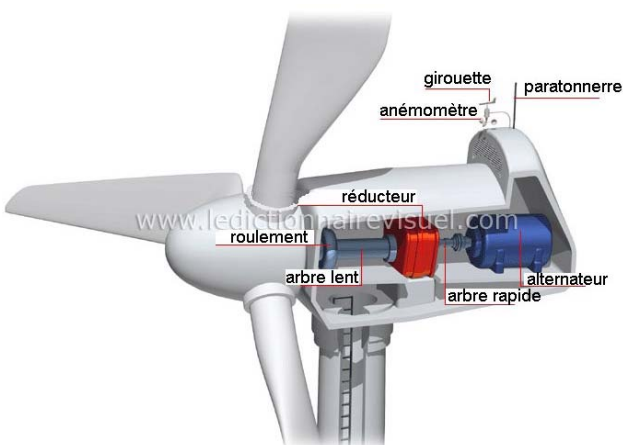


Fig-14 : Structure de la nacelle

La girouette placée à l'extérieur de la nacelle sert à détecter la direction du vent pour commander le moteur d'orientation en vue d'aligner convenablement l'éolienne. Les pales de l'éolienne sont solidaires d'un arbre (rotor) qui est relié à un réducteur mécanique (boîte à vitesse). Un anémomètre disposé à l'extérieur de la nacelle, mesure la vitesse du vent et contrôle la boîte à vitesse pour fixer le rapport de réduction adapté à la force du vent. L'arbre à la sortie du réducteur est relié à un alternateur qui converti alors l'énergie du vent en énergie électrique. Une éolienne tourne lorsque la vitesse du vent s'établit entre 15 et 90 km/h, vitesse au-delà de laquelle l'éolienne s'arrête automatiquement pour des raisons de sécurité. L'électricité ainsi produite est acheminée par un câble électrique souterrain jusqu'au poste de distribution électrique où elle s'intègre au réseau (fig-15).

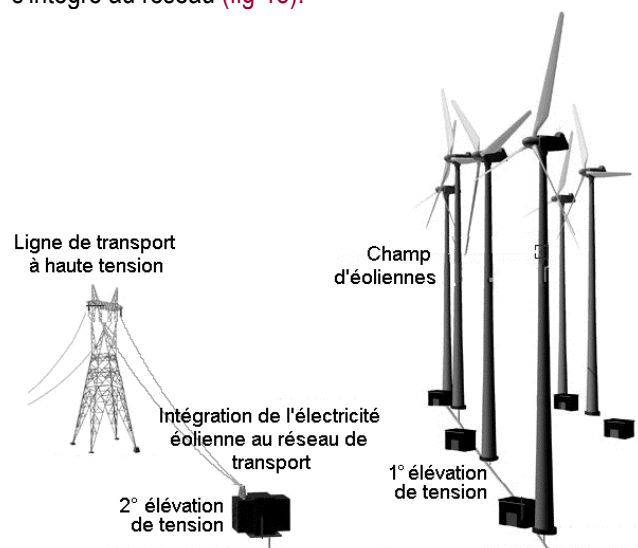


Fig-15 : Intégration de l'électricité éolienne au réseau de transport électrique

Le rendement de ce type d'éolienne est bon, mais la puissance fournie est relativement faible : la puissance d'une éolienne terrestre est de l'ordre du MW. Il faut environ 1000 éoliennes pour produire autant d'électricité qu'une centrale nucléaire de 1000 MW. Les éoliennes en mer (en off-shore) profitent de vents plus réguliers et peuvent produire jusqu'à 5 MW. Au niveau du paysage, leur impact visuel moins gênant, mais l'environnement marin pose un problème de corrosion lié au sel, ce qui diminue la durée de vie des installations.

Comme pour l'exploitation de l'énergie hydraulique, la matière première ne coûte rien du tout, et ces équipements ne produisent aucun déchet. Le principal inconvénient d'une éolienne est que son fonctionnement dépend du vent, or celui-ci ne souffle pas toujours, ni partout. La quasi-totalité de la puissance électrique produite dans le monde par énergie éolienne se fait au Danemark et en l'Allemagne. Ces pays très fortement engagés dans ce type d'énergie produisent ~25.000 MW d'électricité éolienne, soit l'équivalent de l'énergie produite par une vingtaine de centrales nucléaires.

## I-5 : Autres moyens de production d'électricité

La transformation de l'énergie lumineuse en énergie électrique se fait directement à l'aide de cellules solaires, sans passer par la forme mécanique de l'énergie. Ces générateurs de signal continu sont des diodes à jonction p-n recouvertes d'une couche anti-reflet sur la face exposée à la lumière sur la face (fig-16). Au niveau de la zone de charge d'espace, les porteurs générés par la lumière font apparaître un courant d'origine lumineuse (photo-courant) qui circule en sens inverse à travers la jonction p-n et peut être utilisé pour alimenter en continu un appareil placé à l'extérieur.

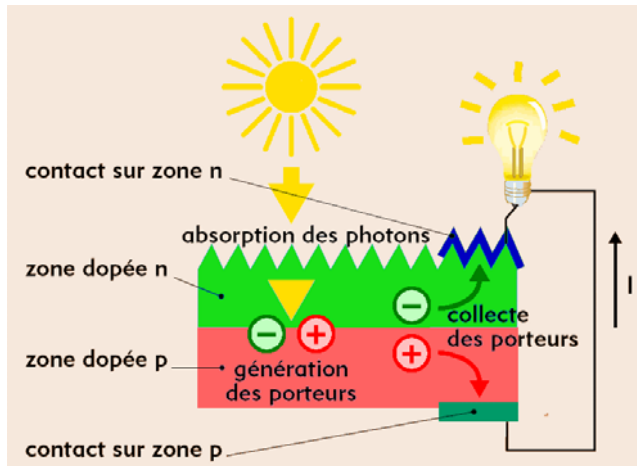


Fig.16- Schéma de coupe d'une cellule solaire

Sur terre, l'énergie solaire reçue par 1 m<sup>2</sup> en plein soleil est de 1 kW. Le rendement des cellules solaires est actuellement faible (<25%), ce qui fait qu'une grande partie de l'énergie lumineuse est transformée en énergie thermique. Ce n'est pas gênant sur le plan écologique car, en l'absence de cellule, l'énergie lumineuse est absorbée intégralement par le sol. Le fait d'intercaler une cellule diminue légèrement l'énergie thermique reçue par le sol, la différence étant fournie sous forme d'énergie électrique.

On fabrique les cellules solaires au silicium à partir d'un matériau monocristallin (comme pour les circuits intégrés) ou à partir d'un matériau multi-cristallin (fig-17). Ces cellules sont utilisées pour alimenter de petits dispositifs (calculatrices, montres, gadgets) en remplacement des piles dont l'énergie est bien plus chère pour l'utilisateur.

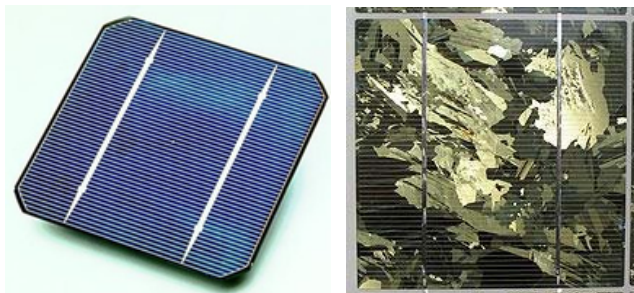


Fig-17 : Cellule solaire au silicium monocristallin (à gauche) et cellule au silicium multicristallin (à droite)

Les cellules solaires au silicium monocristallin possèdent un meilleur rendement de conversion (20%) mais coûtent plus cher que les cellules en multi-cristallins (rendement ~15%) qui présentent le meilleur rapport qualité/prix et sont actuellement les plus utilisées pour la production électrique.

Une seule cellule photovoltaïque ne produit qu'une très faible puissance électrique (~2W) avec une tension <1V, et elles ne sont jamais utilisées isolément. On assemble les cellules solaires dans des modules (Fig-18) conçus pour les protéger contre les intempéries et garantir une durée de vie de l'ordre de 25 ans. En assemblant plusieurs modules dans un même plan, on réalise un panneau photovoltaïque.

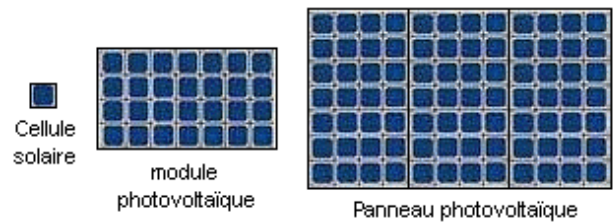


Fig-18: Cellule, module et panneau photovoltaïques

Les modules commerciaux délivrent typiquement 12 V en sortie. Leur principale caractéristique est la puissance nominale (puissance crête) qui correspond à des conditions normalisées (rayonnement solaire = 1000W/m<sup>2</sup>, température interne des cellules = 25°C). Ces modules sont utilisés pour alimenter des satellites en orbite, pour des équipements électriques dans des sites isolés, des habitations ou des bateaux (Fig-19).

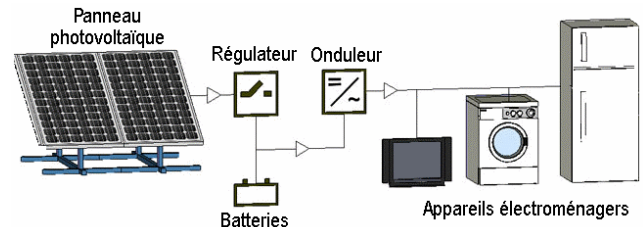


Fig-19: Utilisation domestique de l'énergie photovoltaïque

Puisque la terre tourne sans arrêt et que l'inclinaison du soleil par rapport au panneau évolue en permanence, un panneau solaire n'est qu'exceptionnellement orienté exactement face au soleil. Au cours d'une journée sans nuage la production électrique du panneau varie également en permanence en fonction de la position du soleil et n'est jamais à son maximum sauf au bref passage du plein midi. La production en fin de journée est donc une somme de productions partielles.

Par temps couvert, donc en l'absence de soleil, la luminosité ambiante, alors que le soleil est caché, permet quand même une toute petite production électrique, et ces petites productions additionnées finissent par faire des kWh. L'agence internationale de l'énergie a annoncé qu'en 2008, on a produit dans le monde plus de 12.000 MW, les 3 premiers producteurs d'électricité solaire étant l'Allemagne (5000 MW), le Japon (2000 MW) et les États-Unis (1000 MW) à égalité avec l'Espagne (1000 MW).

La biomasse désigne tous les types de matières d'origine organique (végétale ou animale) dont on peut extraire de l'énergie (Fig-20). L'être humain l'utilise depuis des millénaires, depuis qu'il brûle du bois pour la cuisson des aliments, pour le chauffage ou la forge des métaux.

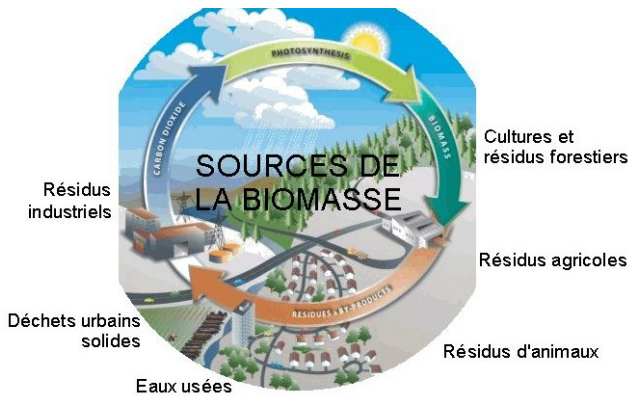


Fig-20: Les sources de la biomasse

Aujourd'hui que les combustibles fossiles sont la principale source d'énergie polluante, la biomasse apparaît comme une source d'énergie renouvelable propre. Elle est de plus en plus utilisée pour l'alimentation des véhicules, pour la production de l'électricité ainsi que de la chaleur pour les procédés industriels. Il y a 3 façons d'utiliser la biomasse: en la brûlant, en la laissant se décomposer, en la transformant chimiquement.

Combustion de la biomasse: La matière combustible (Fig-21) (biomasse ligneuse) est obtenue à partir des déchets de bois, de déchets ménagers de déchets industriels ou de résidus agricoles comme la paille et les fibres de canne à sucre.

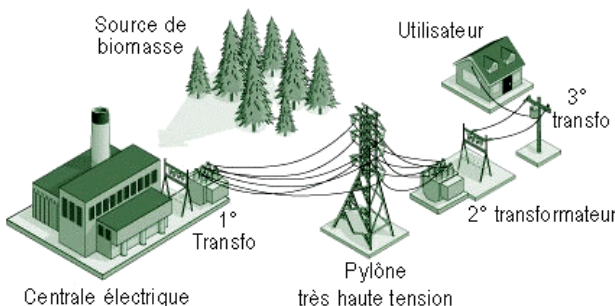


Fig-21 : Combustion directe de la biomasse

Conversion biologique (biomasse fermentescible). La fermentation en l'absence d'oxygène de matières organiques provenant d'ordures ménagères et de résidus liquides récupérés après les centrales d'épuration produit un biogaz. Cette fermentation de la biomasse se produit naturellement dans les marais, ou spontanément dans les décharges. Elle peut être provoquée artificiellement dans un digesteur pour traiter les boues d'épuration et les déchets organiques industriels ou agricoles. Le compostage est la décomposition naturelle de la matière organique (résidus de jardin, résidus de cuisine et restes de table) sous l'action des micro-organismes.

Le biogaz, qui se compose principalement de méthane et de gaz carbonique, est voisin du gaz naturel fossile. Il est brûlé dans des groupes électrogènes adaptés servant à produire de la vapeur et de l'électricité (fig-22).

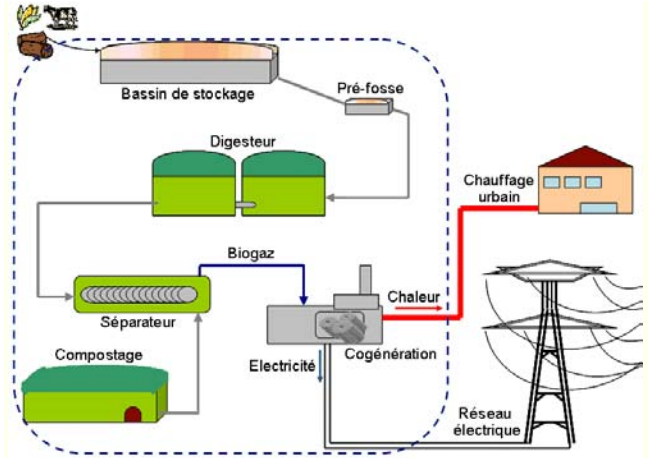


Fig-22 : Biogaz par fermentation de la biomasse

Une station moderne produit à partir d'une tonne de déchets organiques environ 90m<sup>3</sup> de biogaz. Cela équivaut à 190 kWh d'électricité et 270 kWh de chaleur (Fig-23).

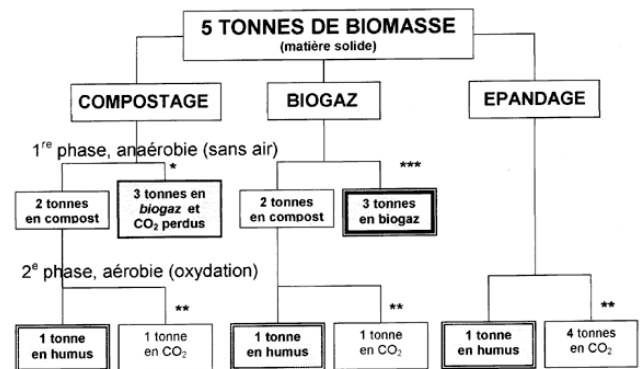


Fig-23 : Capacité de production de biogaz

Transformation chimique : production de biocarburants (à partir de matériaux organiques non-fossiles). On distingue le biodiesel (Fig-24) (biocarburant à partir d'huiles végétales) et le bioalcool (éthanol produit à partir de blé et de betterave).

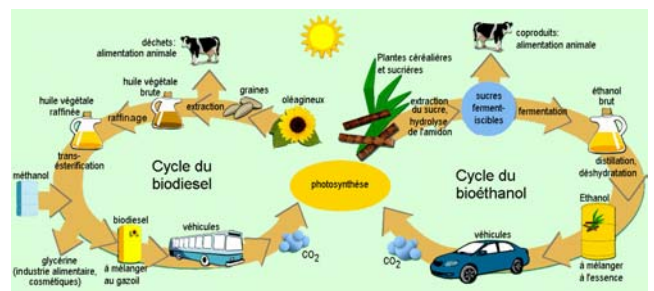


Fig-24 : Production de biocarburants

Remarques : La récupération du biogaz produit par les décharges est intéressante car le méthane (CH<sub>4</sub>) est un gaz à effet de serre plus puissant que le gaz carbonique (CO<sub>2</sub>) produit par sa combustion: son effet de réchauffant climatique est 30 fois plus grand.

Les avantages de l'énergie de la biomasse, sont que le méthane est récupéré au lieu d'être rejeté dans l'air, et que les biocarburants rejettent moins d'hydrocarbures imbrûlés et d'oxyde de soufre. Les inconvénients actuels sont que la valorisation de la bouse de vache risque de cautionner l'agriculture intensive et polluante par manque d'engrais naturels. Par ailleurs, les cultures de betterave et de colza poussent à l'utilisation d'engrais chimiques et de pesticides.



## II- Le réseau électrique

L'électricité est une énergie qui voyage (de la centrale qui la produit à l'endroit où on l'utilise) à travers des réseaux électriques constitués de lignes électriques exploitées à différents niveaux de tension, connectées entre elles dans des postes électriques.

Historiquement, les réseaux électriques sont apparus vers la fin XIXe siècle avec Thomas Edison qui a réalisé un réseau de distribution en courant continu. Lucien Gaulard et John Gibbs ont mis au point en 1884 un transformateur de forte puissance utilisant du courant alternatif triphasé, permettant de changer facilement le niveau de tension. George Westinghouse, ingénieur et entrepreneur américain, a acheté en 1887 les brevets du transformateur de Gaulard et embauché Nikola Tesla qui inventa l'alternateur triphasé en 1891.

A cette période, aux États-Unis, un conflit a opposé Thomas Edison à Nikola Tesla. Edison a développé des systèmes en courant continu à 110 V qu'il estimait être plus sûr que l'alternatif. Tesla, défenseur du courant alternatif, a préféré la tension de 240 V, meilleur pour le transport sur de longues distances. Il a aussi estimé que la fréquence de 60 Hz était celle qui permettait d'obtenir le meilleur rendement pour les générateurs de courant alternatif. En Europe, la compagnie allemande AEG qui a mis en place le premier service de production d'électricité a opté pour le 50 Hz. Bénéficiant du monopole, elle a diffusé ce standard sur tout continent. Et jusqu'à la deuxième guerre mondiale on utilisait le 110 V en Europe, au Japon et aux États-Unis.

Depuis les années 1960, les pays européens utilisent le 220V sous 50Hz, alors qu'aux États-Unis, c'est toujours le 110V à 60Hz qui est en service. Ainsi, il apparaît que les valeurs de la tension et de la fréquence de distribution de l'électricité sont dues davantage à la tradition qu'à des considérations techniques.

### II-1 : Le triphasé

En ce qui concerne le transport de l'énergie électrique, depuis la mise en service en 1896 de la première ligne industrielle aux USA, on utilise partout dans le monde le courant alternatif sinusoïdal triphasé (et non pas en monophasé). En effet, du point de vue théorique, il est possible de réaliser un réseau en courant monophasé. Le problème est que, à chaque oscillation, lorsque la tension ou l'intensité passe par zéro, la puissance instantanée du système monophasé s'annule, et de manière plus large, cette puissance instantanée est variable (fluctuante). La turbine qui met en rotation l'alternateur, du fait de son inertie, tourne avec une vitesse mécanique constante, et donc à chaque instant elle fournit une puissance identique. Ces différences de puissance se traduisent par des oscillations de couples qui sont, en majeure partie, absorbées par l'élasticité de l'arbre de transmission et finissent par provoquer sa destruction.

Au contraire, dans les systèmes triphasés équilibrés on a une puissance instantanée constante, c'est-à-dire "sans à coup", ce qui est important en électromécanique.

Le triphasé est un système de trois tensions sinusoïdales de même fréquence et généralement de même amplitude qui sont déphasées entre elles de  $120^\circ$  dans le cas idéal (fig-25). Le système est équilibré quand les 3 conducteurs sont parcourus par des courants de même valeur efficace.

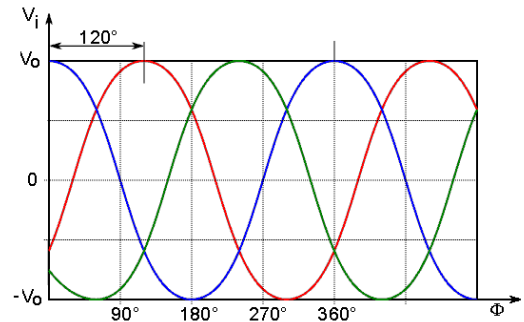


Fig-25: Evolution des signaux d'un système triphasé

On montre que le triphasé délivre une puissance instantanée sans composante pulsée. De plus, il offre un meilleur rendement dans les alternateurs (fig-26): sa puissance est supérieure de 50% à celle d'un alternateur monophasé de même volume et de même prix. Par ailleurs, la même énergie est transportée avec 3 fils, alors qu'il en faudrait 6 identiques en monophasé.

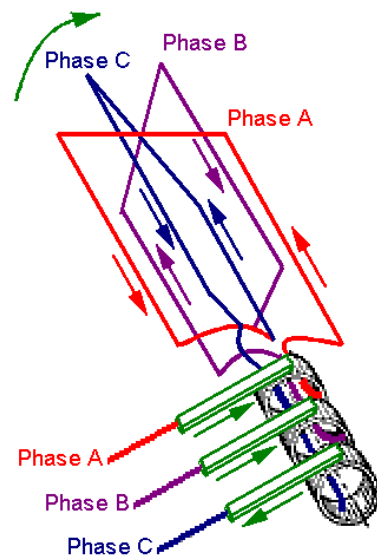
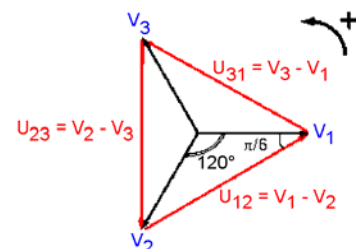


Fig-26: Alternateur triphasé à 3 sorties



$$V1N = V2N = V3N = \text{tensions simples} = 220V$$

$$U12 = U23 = U13 = \text{tensions composées} = 380V$$

$$\text{Relation entre } U \text{ et } V : U = 3^{1/2} \cdot V$$

Lorsqu'on cite une tension triphasée, il s'agit toujours de la tension composée; par exemple: 380 V pour le système 380/220 V

## II-2 : Transport de l'énergie électrique

La puissance transportée par une ligne électrique est proportionnelle au courant électrique et à la tension :

$$P = U \cdot I$$

Les producteurs d'électricité comme Sonelgaz doivent transporter le maximum de puissance dans une ligne électrique pour ne pas multiplier les infrastructures. Ils peuvent choisir entre des lignes à haut courant ou des lignes à haute tension. Pour alimenter 100 000 foyers (soit 200MW), il faudrait :

A moyenne tension : 200 MW = 6700 A x 30 kV.

A haute tension : 200 MW = 526 A x 380 kV.

Mais les lignes s'échauffent sous l'action du courant et de la résistance. La puissance de la chaleur  $P_j$  produite par effet Joule vaut :

$$P_j = R \cdot I^2$$

Les câbles de cuivre ou d'aluminium utilisés dans les lignes haute tension ont une résistance d'environ 0.05 Ohms/km, soit 5 Ohm pour 100 km. La puissance dissipée sous forme de chaleur au bout de 100 km serait donc :

à moyenne tension :  $5 \times 6700^2 = 224$  MW

à haute tension :  $5 \times 526^2 = 1,4$  MW

Dans un transport à haut courant, toute l'énergie électrique a été transformée en chaleur avant même d'atteindre les 90km et, sous l'action de cette chaleur, les fils auraient fondu depuis longtemps! Sur les lignes haute tension utilisées par Sonelgaz, on perd 1,4 MW au bout de 100 km, soit près de 1% de l'énergie totale (et la température des câbles peut s'élever jusqu'à 80°C). Pour cela, on a installé des lignes à très haute tension (400.000 Volts) qui sont toutes reliées entre elles et qui forment un réseau couvrant tout le pays. Comme on ne peut pas utiliser directement du courant à THT dans les usines ou les maisons, on abaisse de façon progressive la tension tout au long du trajet à travers des transformateurs répartis sur le réseau (fig-28).

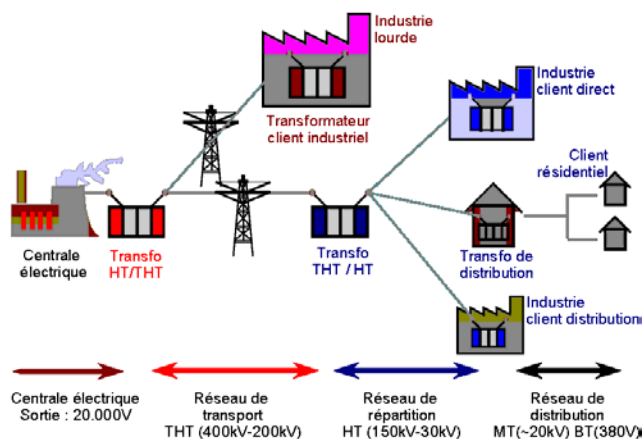


Fig-28 : Transport et distribution de l'électricité

Les valeurs des THT utilisées pour le transport de l'électricité varient d'un pays à l'autre. Au Canada, on utilise du 800 kV, en Chine 1100 kV et en Inde 1200 kV. En Russie, des essais de transport en «Ultra Haute Tension» ont été effectués en 1 500 kV (mais cela n'a pas été mis en service pour des questions de rentabilité).

On distingue le réseau national de transport à (400kV-200kV), des réseaux de répartition régionaux (150kV-30kV) et des réseaux de distribution de l'énergie aux clients.

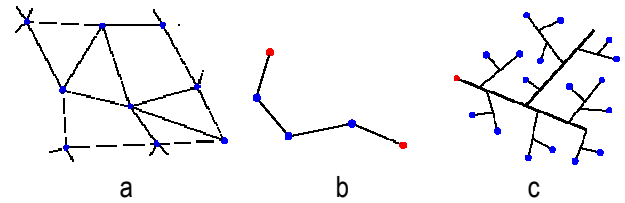


Fig-29 : Principaux types de réseaux

a- Réseau de transport de l'électricité

b- Réseau de répartition de l'électricité

c- Réseau de distribution de l'électricité

Le réseau de transport permet d'acheminer à l'échelle nationale des quantités importantes d'énergie sur des grandes distances. Il est basé sur une structure maillée (fig-29a) qui garantit une très bonne sécurité d'alimentation: la perte de n'importe quel élément qu'il soit ligne électrique, transformateur ou groupe de production, n'entraîne aucune coupure d'électricité.

Les réseaux de répartition assurent à l'échelle régionale la fourniture d'électricité, soit à partir du réseau de transport via des transformateurs, soit à partir de centrales électriques de moyennes puissances (<100 MW). Ils ont distribués de manière assez homogène sur le territoire d'une région et ont une structure bouclée (Fig-29b).

Les réseaux de distribution servent à alimenter les clients. Pour la consommation industrielle, on a un réseau MT (moyenne tension : 3 à 33 kV) et pour la consommation domestique on a un réseau à basse tension (220V). Ces réseaux ont une structure arborescente (Fig-29c): à partir d'un poste source (alimenté par le réseau de répartition), l'électricité parcourt une artère sur laquelle sont reliées des branches de dérivation qui conduisent aux postes MT/BT de distribution publique, qui alimentent les réseaux basse tension sur lesquels sont raccordés les plus petits consommateurs. La structure arborescente de ces réseaux implique qu'un défaut sur une ligne électrique MT entraîne la coupure des clients alimentés par cette ligne, même si des possibilités de secours plus ou moins rapides existent.

Les réseaux BT résultant de la structure des réseaux MT, pour la distribution du 220V dans les foyers, on ces réseaux utilisent souvent une distribution triphasée avec neutre: 3 câbles de phase et 1 câble de neutre (fig-30).



Fig-30 : Réseau de distribution vers les foyers

## II-3 : Les postes électriques

Un poste électrique est un élément du réseau électrique servant à la fois à la transmission et à la distribution d'électricité. Il permet d'élever la tension électrique pour sa transmission, puis de la redescendre en vue de sa consommation par les utilisateurs. Les postes électriques se trouvent aux extrémités des lignes de transmission ou de distribution. On trouve 5 types de postes électriques :

- Les postes de sortie de centrale (P1, fig-31). Ils servent à raccorder la centrale de production électrique au réseau.
- Les postes d'interconnexion (P-2 de la fig-31). Leur fonction est d'interconnecter plusieurs lignes électriques.
- Les postes élévateurs (P-3 de la fig-31). Leur but est de monter le niveau de tension, à l'aide d'un transformateur
- Les postes de répartition (P-4) et les postes de distribution (P-5). Leur rôle est d'abaisser le niveau de tension pour distribuer l'énergie électrique aux clients résidentiels ou industriels.

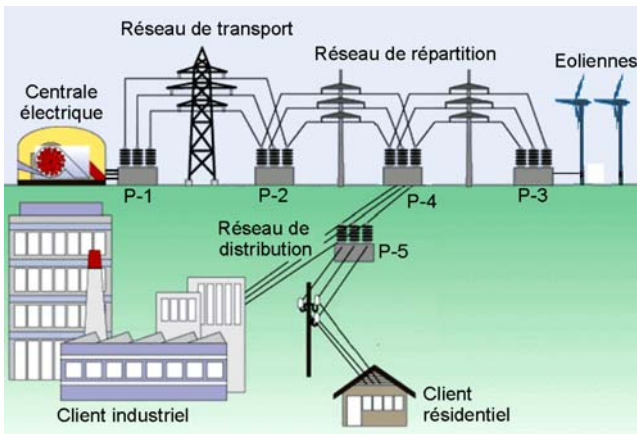


Fig-31 : Les différents postes électriques

L'aspect des postes électriques varie fortement suivant leurs fonctions. Les postes peuvent être en surface à l'intérieur d'une enceinte, souterrains, dans des bâtiments qu'ils desservent, ou sur des poteaux.

Dans un poste électrique, pour élever ou abaisser la tension on utilise un transformateur. Cet élément comporte deux parties : le circuit magnétique (fig-32: empilement de tôles en forme de E de et I) et les enroulements (sous forme concentrique: fig-33).

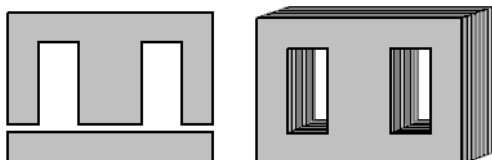


Fig-32: Circuit magnétique d'un transformateur

Le cuivre est le matériau conducteur utilisé. Les fils électriques de chaque tour sont isolés les uns des autres afin que le courant circule dans chaque tour. Pour des petites puissances, l'isolation se fait par une couche de vernis; pour des puissances plus fortes on entoure les conducteurs de papier imprégné d'huile minérale.

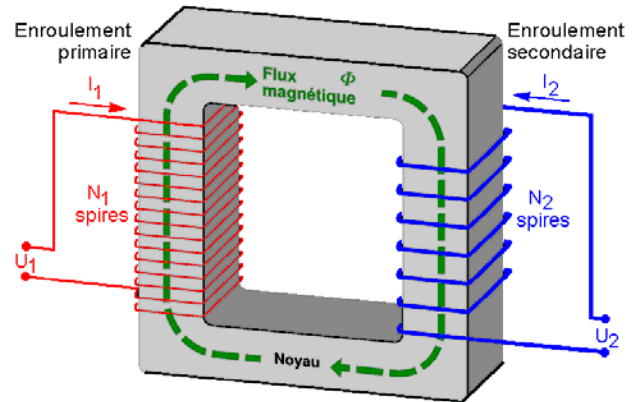


Fig-33: Transformateur monophasé idéal

Dans le cas où on néglige les pertes et les fuites de flux, le rapport du nombre de spires primaires sur le nombre de spires secondaires détermine totalement le rapport de transformation du transformateur.

$$\frac{U_2}{U_1} = \frac{N_2}{N_1}$$

Comme on néglige les pertes, la puissance est transmise intégralement, l'intensité du courant dans le secondaire sera dans le rapport inverse :

$$\frac{U_2}{U_1} = \frac{I_1}{I_2}$$

Dans les réseaux électriques triphasés, on pourrait envisager d'utiliser 3 transformateurs, un par phase. Dans la pratique, on utilise des transformateurs triphasés (un seul appareil regroupe les 3 phases) : cette solution permet la conception de transformateurs moins coûteux, avec une économie au niveau du circuit magnétique (Fig-34a).



Fig-34. a : Enroulements dans un transformateur triphasé  
b : Vue en coupe d'un transfo triphasé.

## II-4 : Les lignes électriques

Les lignes électriques assurent la fonction "transport de l'énergie" sur les longues distances. Elles peuvent être aériennes ou souterraines. L'enfouissement permet de protéger les lignes des effets du climat (tempêtes ou chutes de neige) et de respecter l'environnement. Le parcours d'une ligne électrique aérienne suit rarement une ligne droite car il tient compte des paramètres environnementaux (forêts, chotts, dunes, habitations...).

Une ligne électrique aérienne est constituée de un ou plusieurs ternes (un terna est un ensemble de 3 câbles transportant chacun une phase électrique). La ligne représentée sur la **figure 35** comporte 2 ternes (1 et 2) qui transportent chacun les phases A, B et C. Dans certains pays comme le Japon ou l'Allemagne, les pylônes électriques supportent jusqu'à 8 ternes. Sur la fig-35, les pylônes qui supportent la ligne ont un 7<sup>e</sup> câble : le câble de garde G attaché directement au pylône. Ce câble qui relié à la terre, ne transporte pas de courant et est situé au-dessus des conducteurs. C'est une sorte de paratonnerre qui sert à attirer la foudre quand elle tombe pour qu'elle ne frappe pas les 3 phases de la ligne. De même, pour éviter les accidents aériens, des dispositifs lumineux sont placés sur les lignes pour les signaler aux pilotes d'avions ou d'hélicoptères.

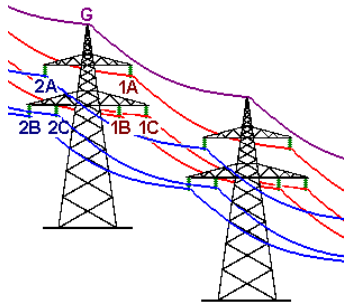


Figure 35 : Ligne à 2 ternes.

Les pylônes sont réalisés en treillis d'acier (**fig-36**). Ils servent à supporter et à maintenir les conducteurs à une distance suffisante du sol et des obstacles : ceci permet de garantir la sécurité et l'isolement par rapport à la terre.

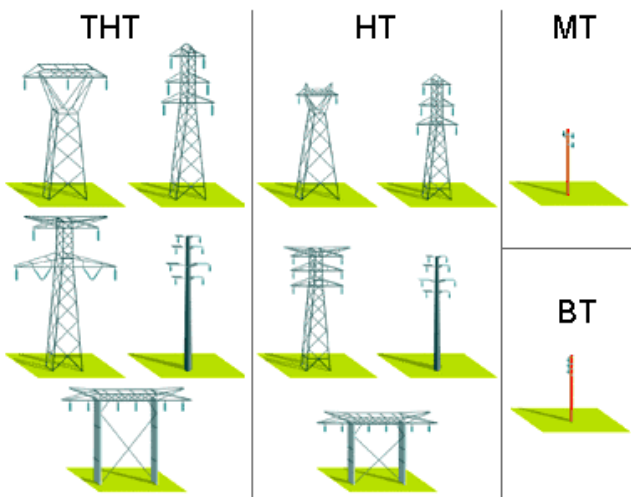


Figure 36 : Aspect des pylônes pour différentes lignes.

Des isolateurs en verre, en céramique ou en matériau synthétique résistant aux tensions élevées, permettent de relier les câbles conducteurs aux pylônes. Les isolateurs sont munis d'éclateurs constitués de 2 pointes métalliques se faisant face à une distance suffisante pour garantir la tenue de tension en régime normal. Si la foudre frappe la ligne électrique : un arc électrique va s'établir au niveau de l'éclateur et contourner l'isolateur. Sans l'éclateur, la surtension entre le pylône et la ligne électrique foudroyée détruirait l'isolateur. Les isolateurs qui ont la forme d'une assiette, sont associés pour former des chaînes d'isolateurs (**fig-37**). Plus la tension de la ligne est élevée, plus le nombre d'isolateurs dans la chaîne est important. Sur une ligne 400kV, les chaînes d'isolateurs comportent 19 assiettes. En regardant une ligne, on peut estimer la tension qu'elle transporte en multipliant le nombre d'isolateurs par ~20kV.

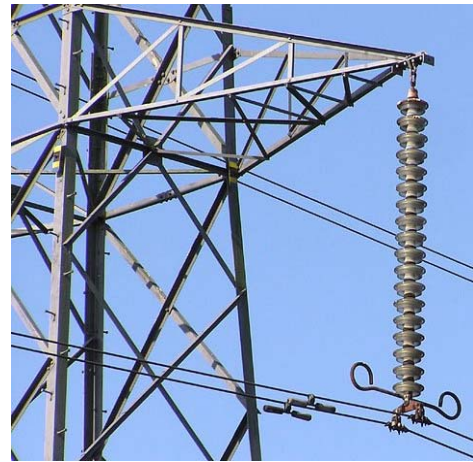


Figure 37 : Chaîne d'isolateurs sur un pylône de THT.

Un câble conducteur peut être constituée d'un ensemble de 1 à 4 faisceaux comportant chacun plusieurs conducteurs. Le câble schématisé sur la **fig-38** comporte 3 faisceaux électriques séparés de quelques centimètres par un isolant pour limiter l'effet couronne (qui génère des pertes en lignes).

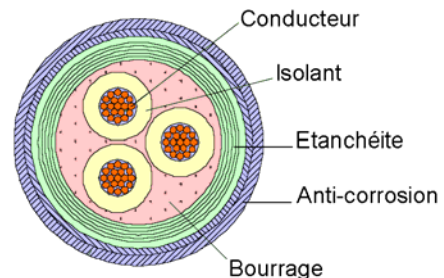


Fig-38 : Vue en coupe d'un câble à 3 faisceaux

Sur les lignes actuelles, l'alliage d'aluminium a remplacé le cuivre pour 3 raisons principales :

- du point de vue économique, il est plus disponible et coûte moins cher que le cuivre.
- du point de vue mécanique, il est 3 fois plus léger que le cuivre et sa résistance mécanique est meilleure.
- du point de vue chimique, il résiste mieux à la corrosion que le cuivre.