

1.1 Introduction

L'électricité est une forme d'énergie 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, éolienne ou solaire (figure 1). Le pourcentage relatif dépend des sources énergétiques du pays considéré.

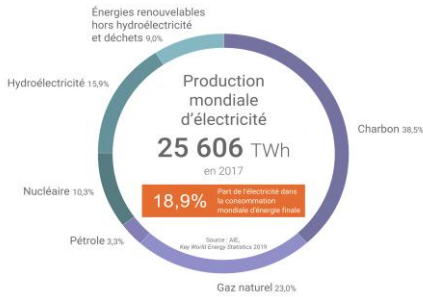


Figure1 : Production mondiale de l'électricité

I-2 : Centrales hydroélectriques

L'hydroélectricité, première des énergies renouvelables au monde, est produite dans les 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 N / kg) à une hauteur $h(m)$:

$$P(W) = m.g.h / t \tag{1}$$

- 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 $Q (\text{m}^3/\text{s})$:

$$P (\text{kW}) = 9,8 . Q . h \tag{2}$$

Lorsque l'eau est stockée, il suffit d'ouvrir des vannes pour démarrer le cycle de production d'électricité. Suivant l'installation, l'eau entre 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 (figure 2). Cette turbine entraîne un 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.

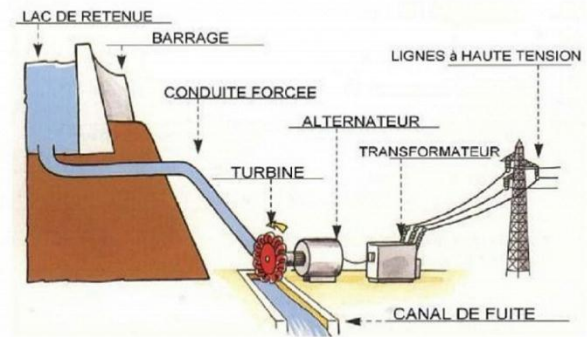


Figure2 : principe d'une centrale hydraulique.

On trouve trois sortes d'installations hydroélectriques selon le type du cours d'eau, ou de la hauteur de la chute.

- 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 (figure 3).

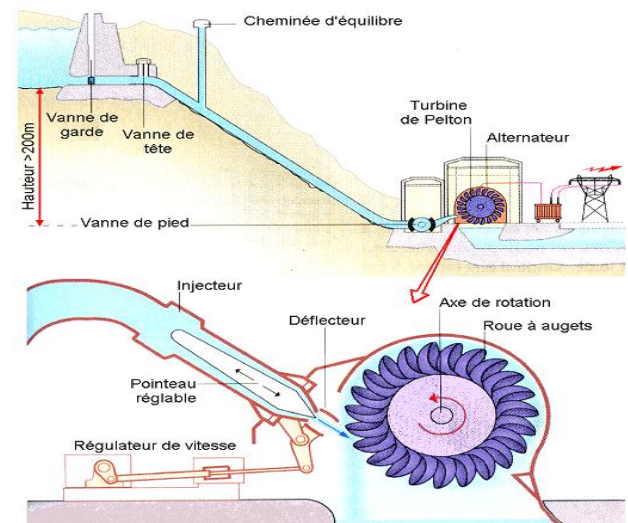


Figure 3 : turbine de Pelton (Hauteur chute d'eau >200m)

- b) Les centrales électriques de moyenne chute (30-200m) sont construites sur le barrage (figure 4). 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).

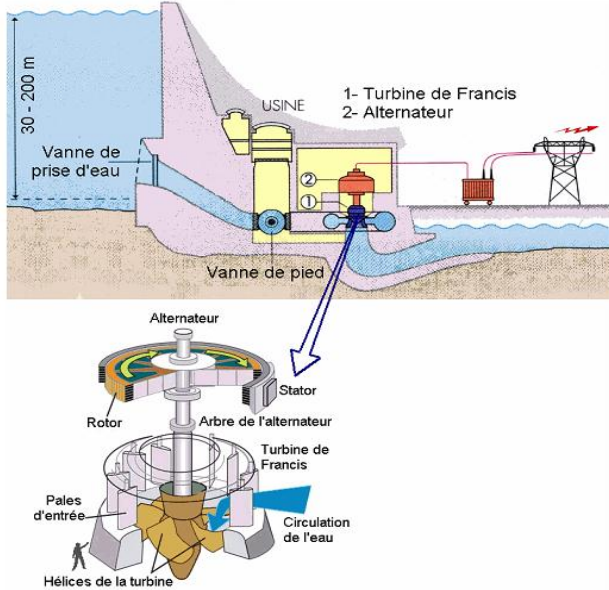


Figure 4 : turbine de Francis, chute d'eau moyenne (30-200m)

- 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-6). 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.

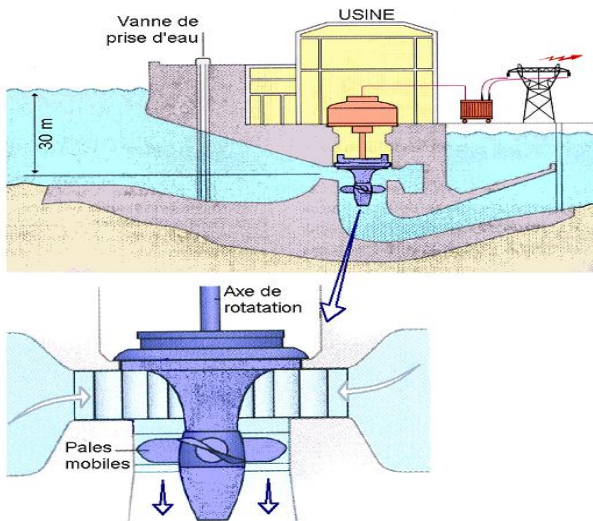


Figure 5 : Turbine de Kaplan (Centrales sur les fleuves)

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 surcoûts 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 météorologiques exceptionnelles.

Performances de quelques centrales hydroélectriques :

Centrale du Mont Cenis (Frontière Franco-Italienne)

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

Centrale de Serre-Ponçon

- Capacité de la retenue : $1270 \times 10^6 \text{ m}^3$.
- Hauteur de chute entre 128 m et 65 m.
- Débit : $1200 \text{ m}^3/\text{s}$.
- Quatre ensembles turbine alternateur de puissance 90 000kVA-214tr/min.

Centrale de Rhinau sur le Rhin

- Hauteur de chute de 5 à 15 m.
- Débit maxi d'évacuation : $5000 \text{ m}^3/\text{s}$;
par groupe : $350 \text{ m}^3/\text{s}$.
- 4 groupes turbine Kaplan alternateur de 42 000 kVA chacun, vitesse 75 tr/min.

I-3 : 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 (figure-6).

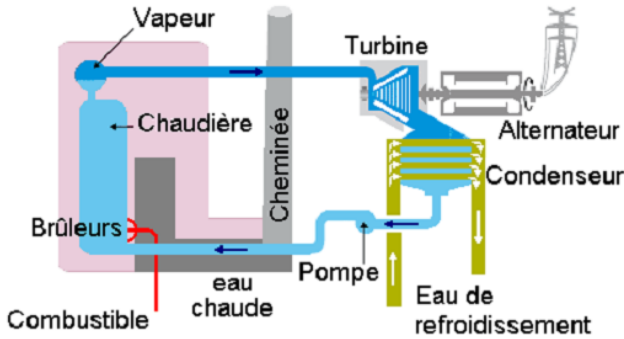


Figure 6 : Principe d'une centrale thermique

La chaudière qui peut mesurer 90 mètres de haut et peser plus de 9000 tonnes, est tapissée de tubes, à l'intérieur des quels 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 recircule dans la chaudière. Un autre cycle peut commencer. L'eau utilisée pour le refroidissement est quant à elle soit restituée à son milieu naturel, soit renvoyée au condenseur (figure-7).

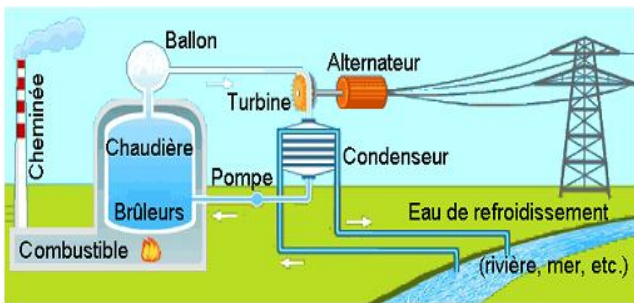


Figure 7 : Eau dans une centrale thermique

Les centrales thermiques comprennent plusieurs dispositifs indispensables à son fonctionnement et qui consomment de l'énergie. De plus, le principe de Carnot fait qu'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 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 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 (figure 8).

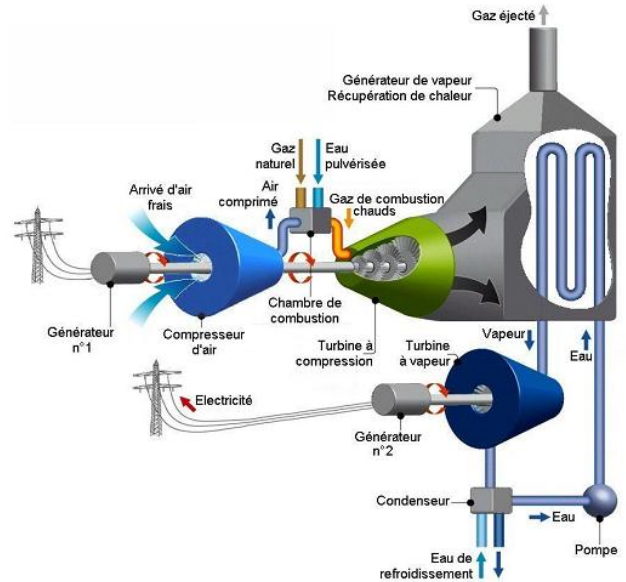


Figure 8 : Principe d'une turbine à combustion

Le principe de fonctionnement de la turbine à combustion peut être résumé comme suit :

- 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 :

<p>Générateur de vapeur :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Capacité de production 1800 t/h de vapeur. - Surchauffeur température de sortie : 565 °C. - Pression de sortie : 163 bars. <p>La turbine comprend sur une même ligne d'arbre ;</p> <ul style="list-style-type: none"> - un corps haute pression (HP) ; - un corps moyenne pression (MP) ; - un corps basse pression. <p>Alternateur :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Puissance : 600 MW ; - tension 20 kV triphasée. - Vitesse : 3 000 tr/min - courant nominal : 19 000 A

I.4 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.

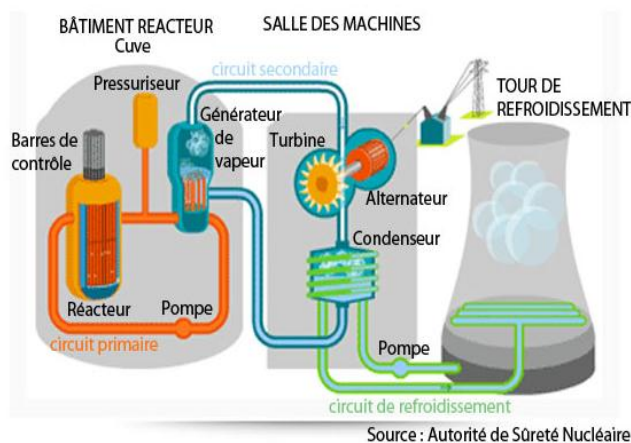


Figure 9 : Centrale nucléaires

Le bâtiment réacteur est une enceinte en béton étanche (figure 9). 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 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.

Performances typiques d'une centrale nucléaire :

<p>Réacteur :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Puissance thermique nominale : 3 800 MW. • Pression nominale : 155 bars. • Débit nominal : 93 000 m³/h. • Température entrée/sortie de cuve : 293/328 °C. <p>Générateur de vapeur :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Puissance nominale : 1 354 MW. • Température entrée eau alimentation : 230 °C. • Température sortie vapeur : 287 °C. • Pression de vapeur : 71 bars <p>Turbines :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Vitesse de rotation : 1 500 tr/min. <p>Alternateur :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Puissance nominale : 1 300 MW. • Tension de sortie : 20 kV.
--

I-5: 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. Il existe deux principaux types d'éoliennes qui diffèrent selon la disposition de la turbine par rapport au sol. On distingue les éoliennes à axe vertical et celles à axe horizontal.

L'éolienne à axe horizontal se compose d'un mât de quelques dizaines de mètres de haut sur lequel une nacelle est installée (figure-10). La nacelle renferme la génératrice électrique qui est entraînée par un rotor de 2 ou 3 pales en fibres de verre, qui tournent sous l'effet du vent (figure-11).

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.

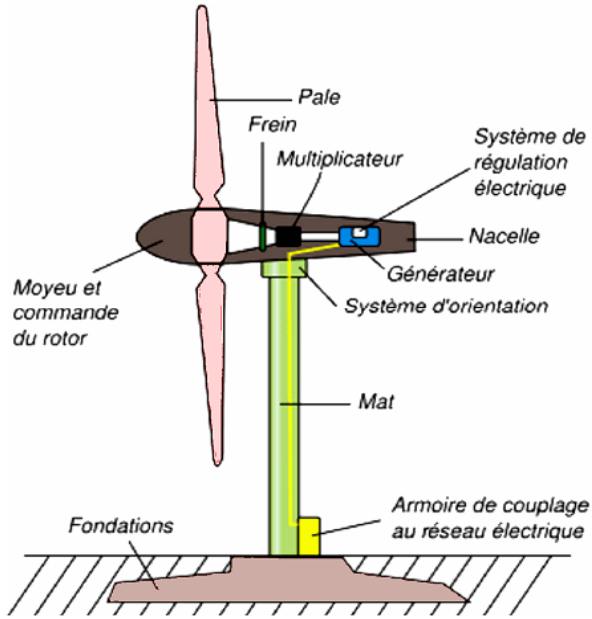


Figure 10 : Production d'électricité par énergie éolienne

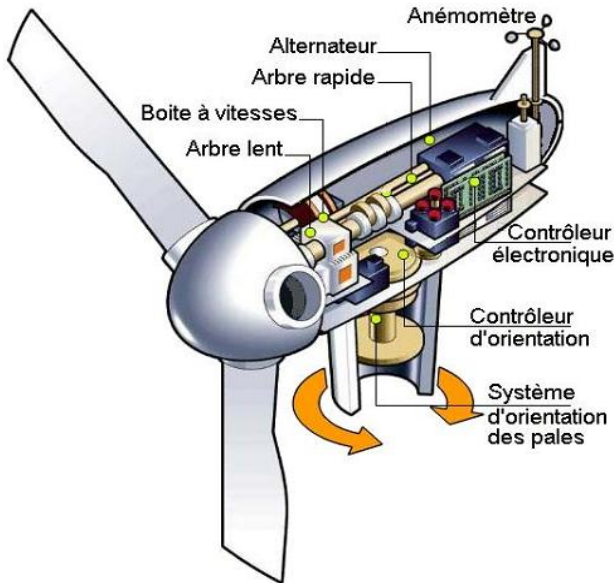


Figure 11 : Structure de la nacelle

Trois zones de fonctionnement peuvent être distinguées (figure-12). La zone A correspond aux vitesses très faibles du vent insuffisant pour entraîner l'éolienne et produire de la puissance. La zone B correspond aux vitesses moyennes dont le système de contrôle de l'aérogénérateur peut intervenir pour contrôler la puissance électrique à générer. La zone C correspond aux vitesses très élevées du vent pour lesquelles la vitesse de rotation de l'éolienne est limitée à une valeur maximale pour éviter des dégâts sur la

structure. Par conséquent, la puissance électrique produite est maintenue constante et égale à sa valeur nominale.

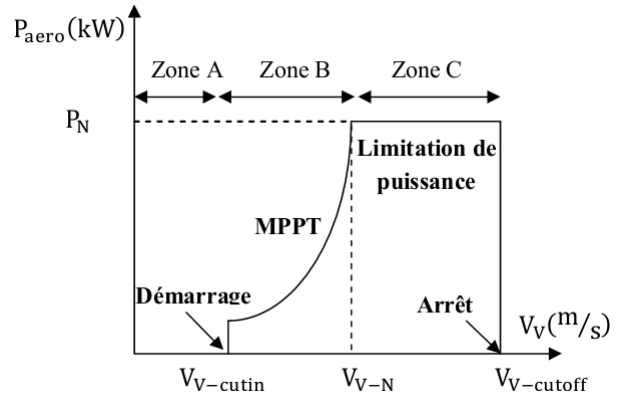
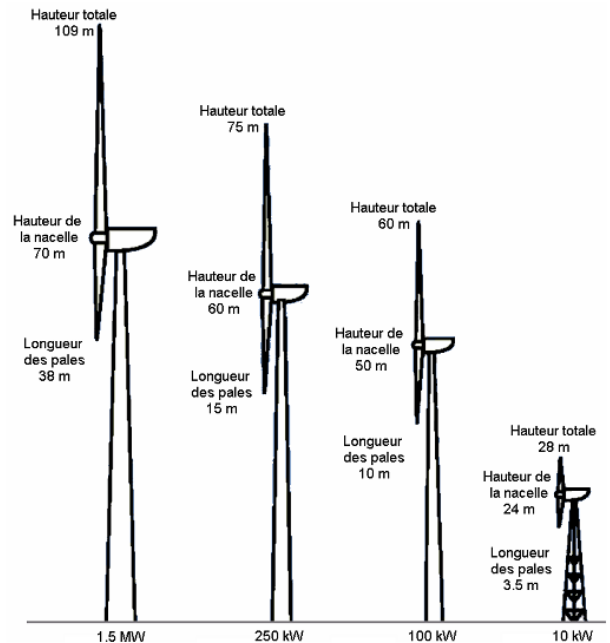


Figure 12 : Zones de fonctionnement de l'aérogénérateur

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 3.5 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.



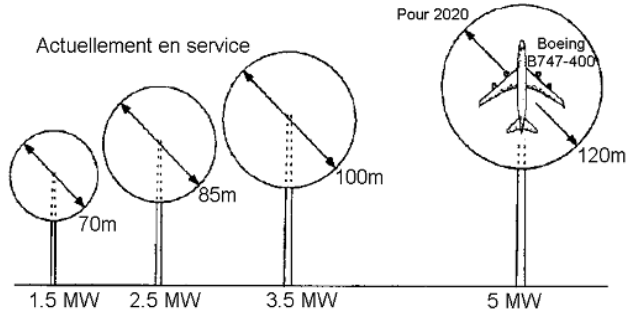


Figure 13 : Dimension des grandes éoliennes

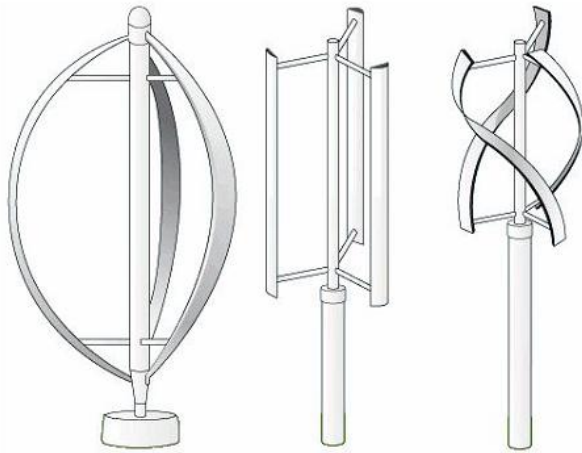


Figure 14 : éolienne à axe vertical

Les éoliennes à axe vertical (figure-14) ne nécessitent pas de système d'orientation par rapport à la direction du vent. Elles sont plus petites que les éoliennes à axe horizontal et donc plus économique pour un usage individuel. Elles sont efficaces par vent variable, et bien adaptées au milieu urbain. L'encombrement total est plus faible, et dans certains cas, le moteur se trouve à la base du mât qui supporte ce type d'éoliennes.

En Algérie (figure-15) les vitesses moyennes annuelles varient de 2 à 7 m/s, soit 7 à 25 km/h. On remarque sur la planche de cartographie des vents que la majorité du territoire se trouve classé dans les gammes de vitesses allant de 3 à 5 m/s, soit entre 10 et 18 km/h.

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. L'Asie est restée le plus grand marché au monde pour la septième année consécutive, sous le leadership de

la Chine, et a dépassé l'Europe en termes de capacité totale.

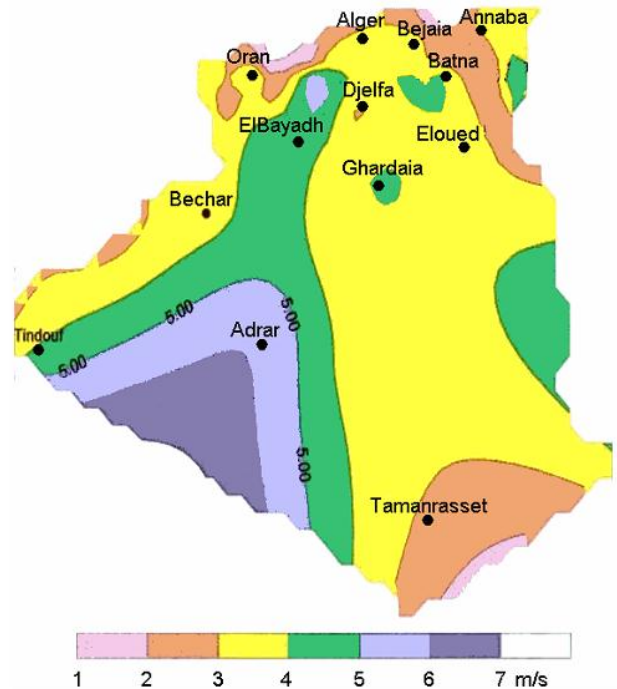


Figure 15 : Cartographie des vents en Algérie

I-6 : Production solaire de l'électricité

L'énergie solaire est la ressource énergétique la plus abondante sur Terre où l'on reçoit une énergie de 1 kW/m² par surface exposée en plein soleil. On distingue l'énergie solaire photovoltaïque de l'énergie solaire thermique. La première utilise la lumière du soleil pour la transformer directement en électricité au moyen de cellules à base de silicium. La seconde transforme le rayonnement solaire en chaleur.

Conversion photovoltaïque

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. Lorsque la lumière du spectre visible arrive à la surface d'une cellule solaire, ses photons transmettent leur énergie aux électrons de la cellule qui en se déplaçant créent un courant électrique continu (figure-16).

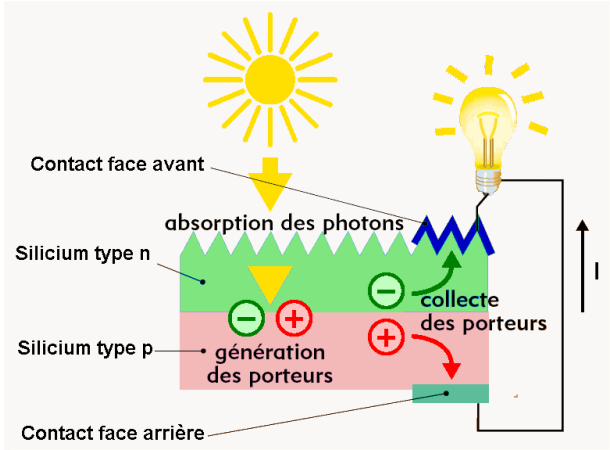


Figure 16 : Schéma de coupe d'une cellule solaire

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 à partir du silicium, matériau de base de toute l'industrie électronique. Ces cellules sont utilisées pour alimenter de petits dispositifs (calculettes, montres, gadgets) en remplacement des piles dont l'énergie est bien plus chère pour l'utilisateur. Les cellules solaires sont recouvertes d'une couche anti-reflet sur la face exposée à la lumière sur la face ce qui leur donne un aspect mat et une couleur bleuâtre (figure 17).



Figure 17 : Cellule solaire au silicium

Une seule cellule photovoltaïque ne produit qu'une très faible puissance électrique (~2W) avec une tension <1V, et elle n'est jamais utilisée isolément. On assemble les cellules solaires dans des modules (figure 16) 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. Le champ photovoltaïque est l'ensemble des panneaux d'une installation. Le solaire photovoltaïque, en tant que moyen de production d'électricité raccordé au réseau, reste pénalisé par son coût de production encore très élevé.

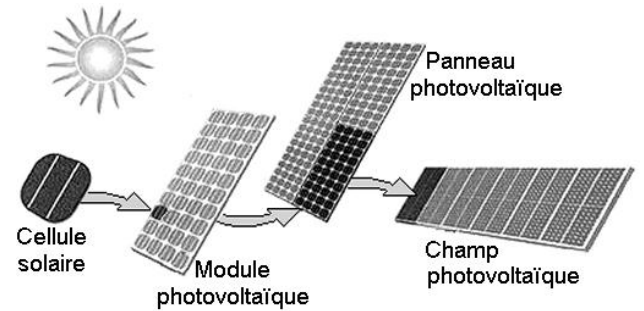


Figure 18 : Cellule, module et panneau photovoltaïques

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/m², 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 (figure 18). Un Module photovoltaïque délivre un courant continu, qu'il faut transformer en courant alternatif, par le biais d'un onduleur, pour pouvoir le réinjecter sur le réseau de distribution électrique.

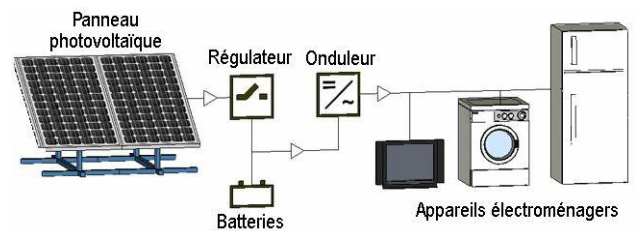


Figure 19 : Utilisation domestique de l'énergie photovoltaïque

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, en l'absence de soleil, la luminosité ambiante 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). Selon le PENREE (Programme de développement des énergies renouvelables et d'efficacité énergétique), l'Algérie vise pour 2030 une puissance installée d'origine solaire de 22 000 MW. Chaque miroir cylindro-parabolique est constitué d'une plaque rectangulaire métallique bien polie, courbée en forme de cylindre parabolique et, complété par un tube à double enveloppe sous vide (tube absorbeur) qui court sur toute sa longueur le long de la droite focale. Les rayons solaires sont réfléchés par le miroir pour converger sur le tube absorbeur comme montré sur la figure 19.

Conversion thermique

L'énergie solaire thermique utilise des capteurs par concentration. Il s'agit de réflecteurs en demi-cylindre qui renvoient et concentrent l'énergie solaire sur un tuyau où circule un fluide caloporteur. Cette concentration entraîne une augmentation de l'intensité, et les températures obtenues sur le récepteur peuvent atteindre plusieurs centaines de degrés Celsius.

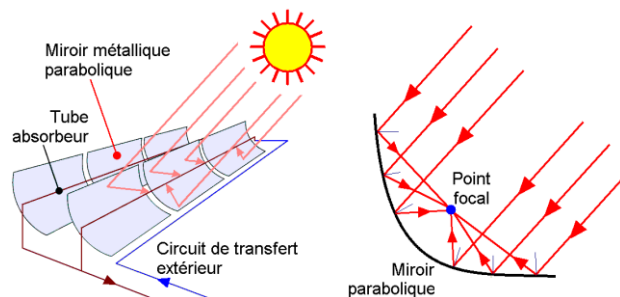


Figure 20 : Capteur par concentration

Le fluide caloporteur qui accumule l'énergie captée au niveau du tube absorbeur est une variété d'huile. Lors de l'écoulement dans le circuit de transfert extérieur, la chaleur de ce fluide qui dépasse 400°C et réchauffe la vapeur d'un générateur à turbine standard comme montré sur la figure 21. Le procédé est très économique et le rendement thermique dans le tube absorbeur est de l'ordre de 80 %. Pendant la nuit, cette centrale électrique hybride utilise du gaz naturel pour chauffer de l'eau et produire de la vapeur surchauffée à

560°C sous 165 bar. Cette vapeur après avoir fait tourner la turbine arrive à 0.3 bar au niveau du condenseur et retourne dans le serpentin de la salle de combustion.

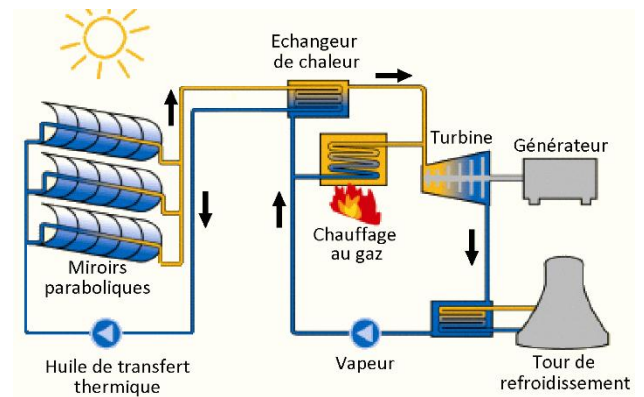


Figure 21 : Capteur par concentration

La première centrale électrique hybride qui intègre la technologie solaire thermique dans une centrale conventionnelle au gaz naturel est la centrale électrique de Hassi R'mel, inaugurée le 15 juillet 2011. Elle combine une matrice de miroirs paraboliques concentrant la puissance solaire de 30MW, sur un terrain de 18 hectares, en conjonction avec une centrale à turbines à gaz de 120MW, réduisant ainsi les émissions de CO2, comparé à des centrales électriques traditionnelles. D'autres centrales de même type doivent être construites à Meghaïr (W. El Oued) et à Naâma (W. El-Bayad).