



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
جامعة الشهيد حمه لخضر - الوادي



كلية التكنولوجيا
قسم الهندسة الكهربائية

Deuxième année Licence Électrotechnique

Cours:

**PRODUCTION D'ENERGIE
ÉLECTRIQUE**

Préparer par :

Dr: MIDA Dris

Année Universitaire 2019/2020



Sommaire

Sommaire

Chapitre I: Historique de la production d'électricité

I.1.Introduction.....	1
I.2. Chronologie de la Découverte de l'Electricité[1]:.....	1
I.3. Inventions Majeures ou lois ont Conduit à la Production d'Electricité:.....	2
I.4.-L'électricité industrielle[2]:	4

Chapitre II: La réglementation et L'évolution de la production de l'énergie Électrique en Algérie

II.1.Introduction:.....	6
II.2. Création de La société nationale d'électricité et de gaz(Sonelgaz).....	6
II.3.Parc de Production National:.....	7
II.3.1.Puissance installée de production d'électricité:.....	7
II.3.2.Evolution de la puissance installée 1980- 2017 par producteur (MW):.....	8
II.3.3.Evolution de l'Energie Produite(1980- 2017) par type d'équipement (GWh):.....	9
II.3.4. Evolution de la puissance maximale appelée (PMA).....	9
II.3.5. Énergie solaire en Algerie[5]:.....	10
II.3.6. Énergie éolienne:.....	10

Chapitre III: Appel de Puissance d'un Réseau Electrique

III .1. L'énergie :	12
III .2- Système: Production Transport Distribution et Utilisation « PTDU ».....	13
III .3-: Appel de Puissance d'un Réseau Electrique:	14
III .3.1-: Introduction :	14
III .3.2-: Variation de la demande d'énergie :	15
III .3.3- Ajustement de la production :	17
III .3.4- Les dispatchings[7]:	18

Chapitre IV: Les sources d'énergie électrique

IV.1 - Introduction :.....	20
IV.2 - Centrales thermique à carburants fossiles :.....	20
IV.3 - Centrales nucléaires à Eau Pressurisée:.....	22
IV.4. Centrale à Turbine à Gaz[10]:.....	28
IV.5. Centrale à Cycle Combiné:.....	29
IV.6. Centrale Hydraulique[11]:.....	30
IV.7.Energie solaire photovoltaïque :.....	34
IV.8. l'énergie éolienne :.....	39
IV.9. Centrale à Biomasse[20]:.....	44
IV.10. Énergie géothermique[20]:.....	45
Bibliographies.....	47

Chapitre I :

Historique de la production d'électricité

I.1 Introduction

L'électricité est tellement présente dans notre vie quotidienne que nous avons souvent tendance à la considérer comme une nécessité d'ordre naturel, au même titre que l'eau courante. Étudiée dès la fin du 16^{ème} siècle, l'électricité est longtemps restée, pour le grand public, un objet de curiosité, avant que les progrès accomplis au cours du siècle dernier ne démontrent son utilité pratique. La prodigieuse pénétration qu'elle a opérée depuis dans toutes les branches de l'activité humaine, notamment par le biais de l'électronique, n'est pas étrangère à l'effcience que nos contemporains attribuent à la science.

I.2. Chronologie de la Découverte de l'Electricité[1]:

- ✚ **Thalès** (-625/-547) soit le 7^{ème} siècle av JC, philosophe grec découvre que l'ambre attire la paille par un fluide);
- ✚ **Chinois** au 4^{ème} siècle av JC, découvre l'aimant;
- ✚ On croyait que la foudre était le résultat d'exhalaisons sulfureuses qui s'enflammaient;
- ✚ **Pieter van musschenbroek** (1692 à 1761) est un hollandais qui capture le fluide de Thalès dans une bouteille : « bouteille de Leyde »;
- ✚ **Abbé Jean Antoine Nollet** (1700 – 1770) fit découvrir au roi Louis XV la « bouteille de Leyde » en électrocutant 200 gardes et moines chartreux;
- ✚ En 1720 ce fluide est appelé « électricité »;
- ✚ **Franklin Benjamin** (1706 -1790) inventeur américain donne une explication sur la foudre qui est une décharge électrique et invente le paratonnerre;
- ✚ **Luigi Galvani** (1737 -1798) physicien italien croit connaître le secret de l'électricité en supposant qu'elle provient des animaux en observant le mouvement des cuisses d'une grenouille attachées à des barreaux de fer;
- ✚ **Alessandro Volta** (1745 – 1827) physicien italien démontra que Galvani c'était trompé en créant la première pile. Dites « pile Volta »;
- ✚ **Hans Christian Oersted** (1777 -1852) physicien danois, découvre l'interaction entre l'électricité et le magnétisme. L'aiguille d'une boussole perd le nord;
- ✚ **André-Marie Ampère** (1775 – 1836) physicien français, donna les première lois de l'électromagnétisme et découvrit le solénoïde (bobine), le télégraphe et l'électroaimant avec le concours de **François Arago**;
- ✚ **François Arago** (1786 -1853) physicien français, découvre qu'un fil électrique dans lequel passe un courant attire la limaille de fer;

- + **Michael Faraday** (1791 – 1867) physicien britannique, découvrit qu'on pouvait produire de l'électricité à partir d'un aimant et d'une bobine en faisant des allés-retours;
- + **Moritz Hermann von Jacobi** (1801 – 1874) ingénieur prussien, créa le premier bateau à pile en 1838 et découvrit la galvanoplastie permettant par l'électrolyse de recouvrir un métal par un autre et le protéger;
- + **Zénobe Gramme** (1826 – 1901) électricien belge, découvrit la dynamo premier générateur électrique;
- + 12 ans plus tard la **société Ganz** inventa le premier transformateur haute tension, ce qui permit le transport de l'électricité.

I.3. Inventions Majeures ou lois ont Conduit à la Production d'Electricité:

- ✓ La bouteille de Leyde qui est l'ancêtre du condensateur avec une armature métallique extérieure et une armature métallique intérieure tous deux séparées par du verre. On peut la voir ici



FIG. 142. — Bouteille de Leyde. — A, armature intérieure; B, armature extérieure.

Figure I.1: bouteille de Leyde

- ✓ Le paratonnerre est un dispositif inventé en 1752 par Benjamin Franklin. Il était conçu à l'origine afin d'« écouler à la terre le fluide électrique contenu dans le nuage orageux et de le guider vers le sol ».



Figure I.2: Le paratonnerre

- ✓ La pile volta est la première pile électrique. La pile voltaïque comporte un empilement alternatif de ronds de drap, de cuivre (ou d'argent), et de zinc, groupe répété plusieurs fois et imprégné d'eau de préférence salée.



Figure I.3: La pile volta

- ✓ Electroaimant produit un champ magnétique lorsqu'il est alimenté par un courant électrique ce qui permet d'attirer des éléments métalliques. Il est constitué d'un noyau en ferrite et d'un fil électrique enroulé autour appelé bobinage.

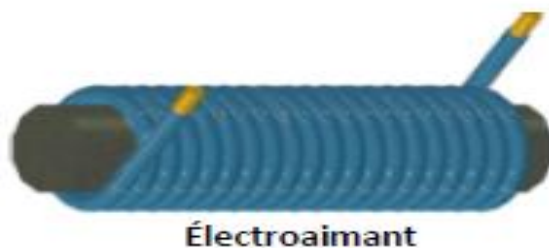


Figure I.4: Electroaimant

- ✓ La dynamo est une machine à courant continu fonctionnant comme un générateur électrique et qui convertit l'énergie mécanique en énergie électrique en utilisant l'induction électromagnétique. Elle fait tourner une bobine dans le champ magnétique d'un aimant (ou inversement), ce qui produit un courant électrique dans les fils de la bobine.

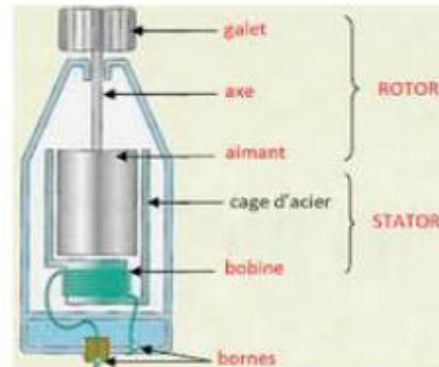


Figure I.5: La dynamo

I.4.-L'électricité industrielle[2]:

La seconde moitié du 19^{ème} siècle fut marquée par un développement spectaculaire de l'électricité industrielle, ou électrotechnique. La pile de Volta fut bientôt supplantée par des piles plus performantes, comme la pile Daniell (1836), la pile Bunsen (1841) ou la pile Leclanché (1864). En 1859, Gaston Planté mit au point la première pile rechargeable, ou accumulateur. Les générateurs connurent un essor analogue : l'invention de la dynamo dans les années 1870 par Zénobe Gramme préfigura l'apparition des premiers générateurs de courants alternatifs, ou alternateurs, notamment grâce aux travaux de l'ingénieur croate Nikola Tesla (qui laissa son nom à l'unité internationale du champ magnétique). Ces dispositifs, entraînés par les turbines immenses des centrales électriques (qu'elles soient thermiques, hydroélectriques ou nucléaires) constituent l'élément central de la production d'énergie électrique. Le développement des générateurs accompagna assez naturellement celui des dispositifs inverses, à savoir les moteurs électriques. Ces progrès contribuèrent au développement des applications de l'électricité tout au long du siècle dernier. Dès 1839 apparaissait en Angleterre le premier instrument de télécommunication fonctionnant à l'aide de signaux électriques transmis le long d'un fil, le télégraphe, mis au point par les ingénieurs William Cooke et Charles Wheatstone. En 1876, des signaux électriques furent pour la première fois utilisés par l'Américain Graham Bell pour transporter à distance la voix humaine : le téléphone était né. Bientôt, ce fut au tour des moyens de transport d'être électrifiés : le premier tramway électrique des ingénieurs allemands Werner von Siemens et Johann Halske date de 1879 ; le premier train électrique, inventé par Thomas Edison, date de 1880. Grâce au développement des transformateurs électriques dans les années 1880 et aux hautes tensions que ces dispositifs permettaient d'obtenir, il devint possible d'étendre la distance de transport de l'électricité depuis son lieu de production jusqu'au cœur des cités (les pertes électriques causées par l'effet Joule le long d'une ligne sont d'autant plus faibles que la tension de la ligne est élevée). La manifestation la plus frappante de cette pénétration fut certainement l'essor de l'éclairage urbain, permis par la mise au point récente par Edison d'un nouveau type de lampe, la lampe à incandescence (reposant sur l'émission d'un intense rayonnement visible par un fil de matériau réfractaire amené à haute température par effet Joule).

Chapitre II :

La réglementation et L'évolution de la production de l'énergie Électrique en Algérie

II.1.Introduction:

Électricité et gaz d'Algérie connue sous l'acronyme EGA est une compagnie publique chargée du monopole de la production et de la distribution du gaz et de l'électricité. Elle est créée par décret le 5 juin 1947 en Algérie (alors sous domination française) et reçoit le 16 août 1947 les actifs des sociétés de production d'électricité activant en Algérie et nationalisées par la loi n° 46-628 du 8 avril 1946. Elle est dissoute le 28 juillet 1969 pour être remplacée par la nouvelle société Sonelgaz qui reprend tous ses actifs [3]:.

Avant 1946, le secteur électrique était des concessions du territoire algérien, réparties en zones, celles-ci étaient gérées par les sociétés anonymes suivantes :

- ✓ Société hydroélectrique de l'Afrique du Nord ;
- ✓ Énergie électrique de l'Ouest algérien ;
- ✓ Société du gaz et de l'électricité de Mostaganem ;
- ✓ Société d'énergie électrique de Lalla-Marnia ;
- ✓ Société de force et d'éclairage électrique de Saïda ;
- ✓ Société algérienne d'éclairage et de force ;
- ✓ Société des forces motrices d'Algérie ;
- ✓ Union électrique et gazière de l'Afrique du Nord ;
- ✓ Compagnie du gaz et de l'électricité pour la France et l'Algérie ;
- ✓ Société constantinoise d'énergie électrique ;
- ✓ Société d'intérêt collectif agricole d'électrification de la Plaine de Bône ;
- ✓ Compagnie centrale d'éclairage par le gaz Lebon et Cie ;
- ✓ Union hydroélectrique de l'Ouest constantinois ;
- ✓ Compagnie du Bourbonnais ;
- ✓ Union électrique coloniale.

II.2. Création de La société nationale d'électricité et de gaz(Sonelgaz)

Sonelgaz est créée le 28 juillet 1969, en remplacement de l'entité précédente Électricité et gaz d'Algérie (EGA), et on lui a donné un monopole de la distribution et de la vente de gaz naturel dans le pays, de même pour la production, la distribution, l'importation, et l'exportation d'électricité.

En 2002, le décret présidentiel n° 02-195, la convertit en une société par actions SPA entièrement détenue par l'État. La promulgation de la loi n° 02-01 du 05 février 2002 a permis la réorganisation de Sonelgaz, avec la création de la société holding « Sonelgaz » ainsi qu'une quarantaine de filiales (métiers, travaux et services) et de sociétés en participation. Cette loi a également créé la commission de régulation de l'électricité et du gaz « CREG » installée en 2005, qui encadre et régule les activités du secteur de l'électricité et gaz.

II.3.Parc de Production National:

Les impératifs de préservation de l'environnement ont imposé l'utilisation du gaz naturel comme énergie primaire pour la production d'électricité, et exigent aussi de développer d'autres énergies dites propres et renouvelables comme l'énergie solaire et éolienne, dont les gisements sont disponibles et abondants dans l'Algérie. Aussi, pour répondre au besoin en électricité, sans cesse croissant, un programme ambitieux a été engagé pour le dédoublement des capacités de production conventionnelle.

Les programmes indicatifs décennaux des besoins en moyens de production de l'électricité, élaborés par la CREG chaque deux ans, prévoient les capacités de production à mettre en place sur une période décennale par région (Est, Ouest, Centre et Sud) et par filières selon deux scénarios d'évolution de la demande (moyen et fort).

Le parc de production national est constitué des centrales électriques de la Société Algérienne de Production de l'Électricité (SPE), et de Shariket Kahraba wa Taket Moutadjadida (SKTM), qui sont une filiale de Sonelgaz, ainsi que des sociétés en partenariat avec Sonelgaz, à savoir :

- ✓ Kahrama Arzew entrée en service en 2005 ;
- ✓ Shariket Kahraba Skikda « SKS » entrée en service en 2006 ;
- ✓ Shariket Kahraba Berrouaghia « SKB » (Médéa) entrée en service en 2007 ;
- ✓ Shariket Kahraba Hadjret Ennouss « SKH » entrée en service en 2009 ;
- ✓ SPP1 entrée en service en 2010 ;
- ✓ Shariket Kahraba Terga « SKT » entrée en service en 2012 ;
- ✓ Shariket Kahraba de Koudiet Edraouch « SKD » entrée en service en 2013.

II.3.1.Puissance installée de production d'électricité:

Le renforcement des capacités de production, par Sonelgaz et ses sociétés filiales, a connu ces dernières années, une évolution conséquente de la puissance de production d'électricité installée, qui a atteint 19 586 MW en 2017.

La répartition de la puissance installée par producteur et par type d'équipement pour l'année 2017 est illustrée dans les graphiques ci-après :

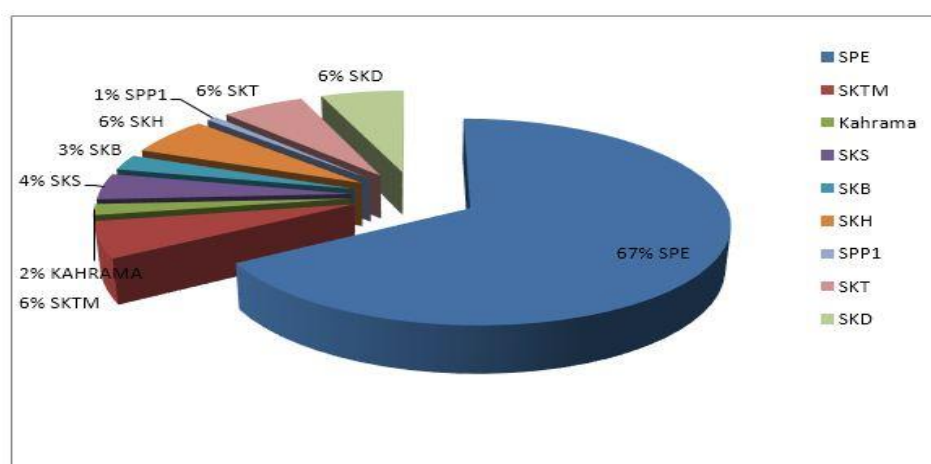


Figure II.1: Puissance installée par producteur à fin 2017[4]:

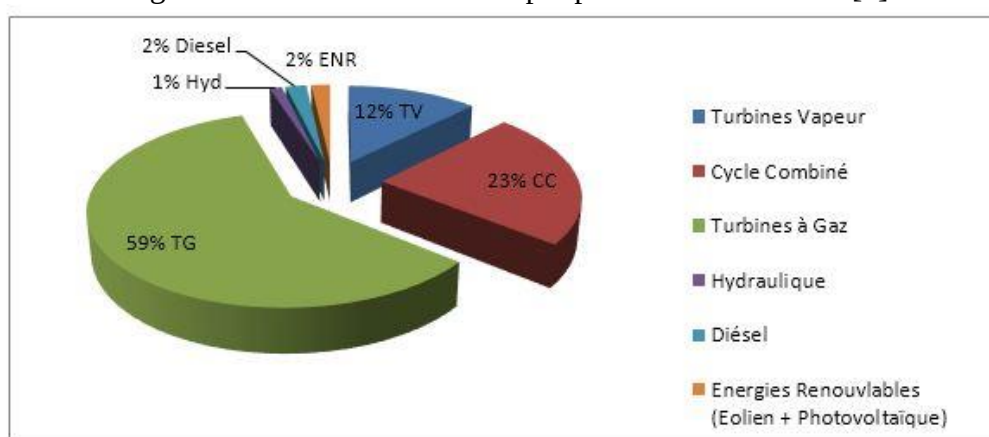


Figure II.2: Puissance installée par type d'équipement à fin 2017

II.3.2. Evolution de la puissance installée 1980- 2017 par producteur (MW):

La production totale d'électricité durant l'année 2017 a atteint 71 470 GWh.

	1980	1990	2006	2010	2016	2017
SPE	1837	4686	6736	8446	12702	13039
SKTM	-	-	-	-	1007	1133
Autres producteurs	-	-	1170	3036	5412	5414
Total	1837	4686	7906	11482	19121	19586

Tableau II.1 : Evolution de la P.I (1980- 2017) par producteur (MW)

II.3.3. Evolution de l'Energie Produite(1980- 2017) par type d'équipement (GWh):

La production totale d'électricité durant l'année 2017 a atteint 71 470 GWh.

Type d'équipement	1980	1990	2000	2006	2010	2016	2017
Thermique vapeur	3 621	8 397	15 757	14 558	9 692	11 512	10 074
Thermique gaz	2 223	6 704	8 830	16 463	19 564	24 441	31 009
Cycle combiné	-	-	-	3 419	15 341	28 899	29 508
Hydraulique	251	135	54	218	173	72	71
Diesel	125	216	368	264	403	281	286
Eolien	-	-	-	-	-	19	21
Photovoltaïque	-	-	-	-	-	205	500
Total	6 220	15 452	25 008	34 922	45 174	66 263 (*)	71 470(*)

Tableau II.2 : Evolution de l'énergie produite 1980- 2017 (GWh), par type d'équipement.
(*) Y compris les injections des tiers (29,607 GWh)

II.3.4. Evolution de la puissance maximale appelée (PMA)**II.3.4.1. Réseau Interconnecté National « RIN »**

Le RIN s'étale sur le nord du pays et couvre aussi les régions de Béchar, Hassi Messaoud, Hassi R'Mel et Ghardaïa, il est alimenté par une quarantaine de centrales de production d'électricité, reliées entre elles à travers un réseau de transport en 220 kV et 400 kV, permettant le transfert d'énergie des sites de production vers les centres de consommation.

La puissance maximale appelée du réseau interconnecté national a atteint 14 182 MW en 2017 (enregistrée en date du 31/07/2017).

	1980	1990	2006	2010	2016	2017
PMA Enregistrée (MW)	1088	2 742	6 057	7 718	12 839	14 182

Tableau II.3 : Evolution de la P.M.A sur le RIN 1980-2017

II.3.4.2. Pôle In Salah-Adrar- Timimoune « PIAT »:

Ce pôle est alimenté par les centrales Turbines à Gaz d'Adrar, In Salah, Zaouit Kounta, Timimoun, la ferme éolienne de Kabertene, et les 7 centrales PV, interconnectées à travers un réseau 220 kV.

Les sources renouvelables contribuent avec une puissance installée globale de 53 MW.

	2008	2010	2016	2017
PMA Enregistrée (MW)	106	149	302	313

Tableau II.4 : Evolution de la P.M.A sur le PIAT 2008- 2017

II.3.4.3. Les Réseaux Isolés du Sud « RIS »

Il s'agit de 32 sites (29 sites conventionnels et 3 sites PV) du grand sud, alimentées par des réseaux locaux à travers des groupes diesel, des TG ou des centrales TV, et ce compte tenu des distances mises en jeu et des niveaux de consommation relativement faibles. La puissance installée du RIS a atteint 1 133 MW, en 2017.

	2011	2012	2016	2017
PMA Enregistrée (MW)	139.7	167	285	271

Tableau II.5 : Evolution la P.M.A sur le RIS 2011- 2017

Pour faire face à l'évolution importante de la demande électrique des localités isolées du sud, plusieurs centrales turbines à gaz et groupes diesel ont été installés entre 2012 et 2017. Ces projets ont grandement contribué à la sécurisation de l'alimentation de l'énergie électrique de ces régions, le développement local et l'amélioration des conditions de vie de ces régions enclavées.

II.3.5. Énergie solaire en Algérie[5]:

L'Algérie comptait, en mai 2018, 24 centrales photovoltaïques d'une puissance totale de 344 MW. Afin de préserver les réserves énergétiques actuelles (pétrole et gaz), le pays a opté pour le développement et l'exploitation de l'énergie solaire. Sonelgaz a été chargée de construire la centrale électrique mixte de Hassi R'Mel, mise en service en 2011 à Tilghemt dans la wilaya de laghouat dans le sud du pays, d'une capacité de 150 mégawatts (30 MW solaire thermodynamique + 120 MW gaz). C'est la société New Energy Algeria (NEA), qui est chargée du secteur des énergies nouvelles et renouvelables.

II.3.6. Énergie éolienne:

Un autre domaine des énergies renouvelables est à développer et promouvoir en Algérie, c'est l'énergie éolienne. Une filiale du groupe Sonelgaz, a pris l'installation du premier parc éolien à Adrar au sud-ouest du pays. Ce complexe éolien aura une puissance de 10 MW et devrait être mis en service courant 2012. Mais après plus d'une année et demi de retard pour le lancement de cette ferme éolienne, elle n'a été mise en service que le 03 juillet 2014, alors que d'autres projets programmés dans le plan du gouvernement sont en attente de concrétisation.

Chapitre III :

Appel de Puissance d'un Réseau Electrique

III .1. L'énergie :

L'énergie est une des grandeurs physiques. Elle se mesure en joules, en kilowatt-heures et encore dans d'autres unités.

L'énergie est la capacité à produire des actions comme fournir de la chaleur, de la lumière, ou mettre en mouvement un objet. Lorsque c'est une mise en mouvement et en physique, on l'appelle un travail. Dans le cas d'une voiture, la source d'énergie est la combustion de l'essence.

L'énergie peut être électrique qui sert dans notre vie actuelle à cuire, nous chauffer, nous éclairer, à faire marcher les ordinateurs etc..

L'énergie électrique est l'énergie transférée ou stockée grâce à l'électricité . Cette énergie est transférée d'un système à un autre par un mouvement de charges. Les systèmes susceptibles de fournir de l'énergie par transfert électrique sont les alternateurs ou des systèmes chimiques comme les piles notamment. Les systèmes susceptibles de transformer l'énergie issue de l'électricité sont par exemple les résistances électriques qui la transforment en chaleur, les moteurs qui la transfèrent par un travail mécanique, les lampes qui la transforment en rayonnement et en chaleur, et d'autres systèmes électrotechniques ou électroniques. Le transport d'énergie électrique se fait au moyen d'un conducteur électrique. L'énergie électrique ne peut pas être stockée en grande quantité (seules de petites quantités de charges électriques peuvent être stockées sous forme d'énergie dite électrostatique, par exemple dans les condensateurs).

L'apport d'énergie électrique est proportionnel à la tension électrique :

$$E=Q.U$$

où : E:est l'énergie en joules; Q: est la charge électrique en coulombs; U: est la tension électrique aux bornes de l'appareil en volts.

Avec $Q=I \Delta t$ donc $E=UIt = Pt$

P: est la puissance électrique échangée en watts

$$1 \text{ kWh} = 10^3 \cdot 3600 \text{ J} = 3,6 \cdot 10^6 \text{ J} = 3,6 \text{ MJ}$$

sachant que :

$$1 \text{ J} = 1 \text{ W} \cdot 1 \text{ s}.$$

On peut citer **La nature est donc la source de toute énergie**, quelle que soit la forme sous laquelle se trouve l'énergie comme suit :

- L'énergie musculaire (les muscles)
- L'énergie hydroélectrique (l'eau)
- L'énergie thermique (les combustibles fossiles)
- L'énergie nucléaire (le minerai d'uranium)
- L'énergie éolienne (le vent)

- L'énergie marémotrice (la marée)
- L'énergie géothermique (le sous-sol)
- L'énergie solaire (le soleil)
- L'énergie chimique (la matière)etc.

L'énergie peut être transférée d'un type à un autre de trois façons différentes sous la forme: **de chaleur, de travail et de rayonnement.**

III .2- Système: Production Transport Distribution et Utilisation « PTDU »

Un schéma de principe d'un système **PTDU** est représenté à la Figure sous-dessous.

Composants du système :

✓ **Production :**



Réglage: fréquence ; tension et $\cos \varphi$.

✓ **Transport :**

Transformateurs élévateurs (*mais pas pour des petites centrales*),

Lignes,

Transformateurs abaisseurs (*mais pas pour des petites centrales*).

✓ **Distribution :**

Sous-station et/ou Système de distribution aux consommateurs.

✓ **Utilisateurs**

Résistances pures ($\cos \varphi = 1$): Éclairage, cuisson, chauffage

Résistances + inductances ($\cos \varphi < 1$): Moteurs, transformateurs....

A tous les niveaux du système PTDU, il faut que les personnes et le matériel soient protégés.

✓ **Protections contre :**

Surcharges ; court-circuit et mises à terre accidentelles.

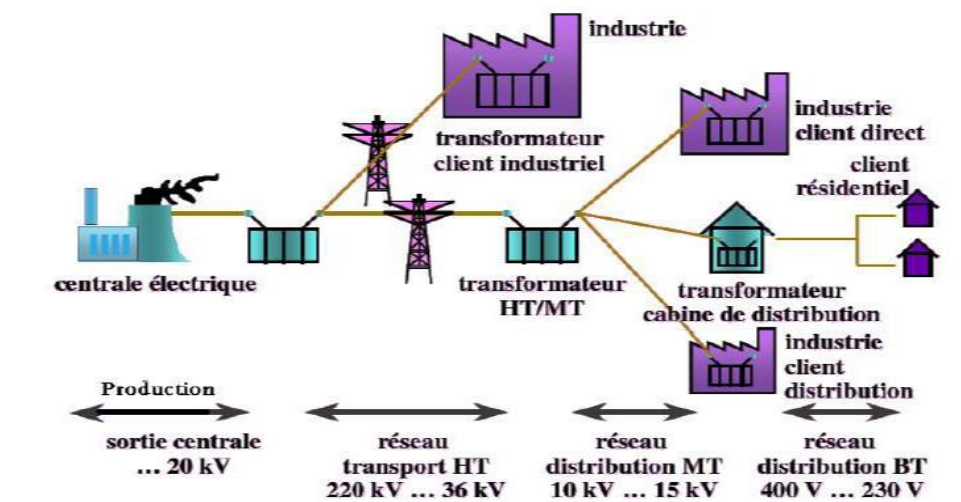


Figure III.1: Schéma de principe d'un système PTDU.

III .3:- Appel de Puissance d'un Réseau Electrique:

III .3.1:- Introduction :

L'énergie peut prendre différentes formes (figure sous-citées). 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, seule une partie de l'énergie fournie est convertie en énergie utile. La différence étant dissipée sous forme de chaleur, (énergie thermique).

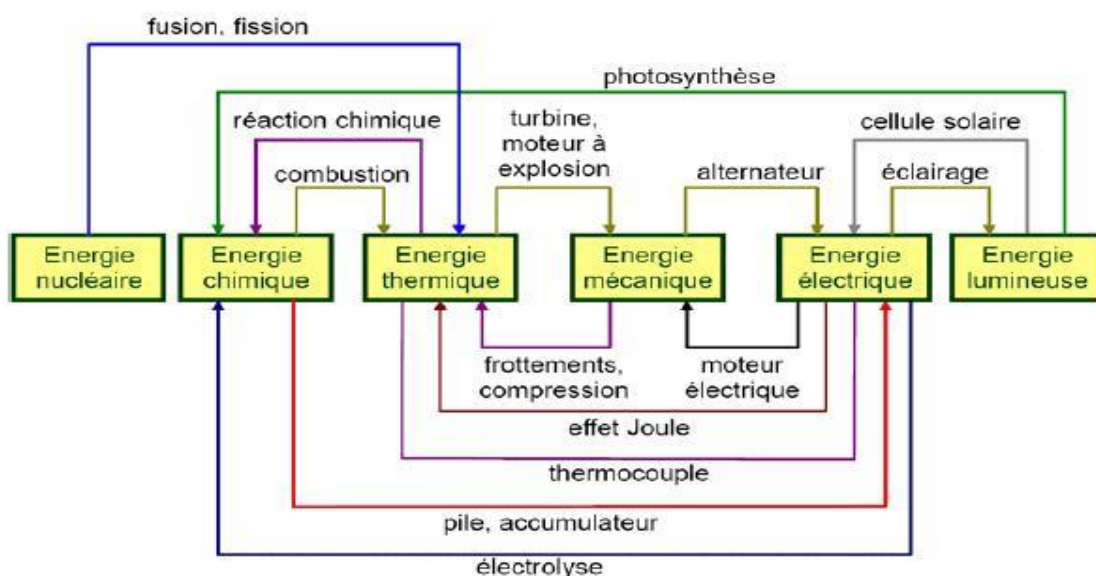


Figure III.2: Principe de la conservation de l'énergie.

- ✓ ***Pour produire de l'électricité, il faut transformer une source d'énergie fournie par la nature.***

Cette opération est réalisée par différents moyens de production, en fonction des quantités produites mais aussi du mode de production et de consommation énergétique actuel vers des solutions avec bas carbone, pour lutter contre le changement climatique.

L'électricité représente une forme intermédiaire d'énergie très intéressante par : sa facilité de transport et de distribution, à tous les niveaux. Elle est produite totalement dans des centrales (hydraulique, thermique, nucléaire, éolienne, solaire ...etc.) soit industrielles soit individuelles.

III .3.1.1:-Niveaux Industriels :

L'électricité est produite de façon centralisée, sur l'ensemble du territoire et en grandes quantités, par des centrales électriques utilisant différentes sources d'énergie primaires (fossiles, fissiles et renouvelables) et permettant d'alimenter des consommateurs grâce à un réseau de transport et de distribution.

III .3.1.2:- Niveaux Individuels :

L'électricité est produite de façon décentralisée, directement chez les consommateurs et en petites quantités, par des équipements utilisant des sources d'énergies renouvelables, pour une autoconsommation immédiate.

Pour répondre à la demande en électricité des consommateurs de différentes natures (particuliers, industriels, tertiaires, collectivités) et répartis sur l'ensemble d'un territoire, il faut utiliser des moyens de production industriels permettant de produire de l'électricité en grandes quantités.

Cette opération est réalisée dans des centrales électriques par la mise en rotation, grâce à la force:

- a- du vent,
- b- de l'eau ou
- c- de la vapeur d'eau, d'une turbine qui entraîne un alternateur.

Il existe différents types de centrales suivant l'énergie utilisée :

- 1- Thermique** : L'électricité est produite à partir de *sources d'énergies (fossiles ou combustibles fossiles)*, des éléments contenus dans le sous-sol de la terre : le charbon, le fioul (issu du pétrole) et le gaz. (**Fossile** : *conservé dans des dépôts sédimentaires* ; **Combustible fissile** : *substance dont on peut casser les atomes pour libérer de l'énergie et de la chaleur.*)
- 2- Nucléaire** : L'électricité est produite à partir d'une source d'énergie fissile : l'uranium, un minéral contenu dans le sous-sol de la Terre. (**Fissile** : *qui se fragmente facilement.*)
- 3- Renouvelables** : L'électricité est produite à partir de sources d'énergies renouvelables, que la nature renouvelle en permanence : l'eau, le vent, le soleil, la chaleur du sous-sol, la matière organique (bois, déchets, ...), les énergies marines.

III .3.2:- Variation de la demande d'énergie :

La puissance demandée par l'ensemble des clients d'un réseau subit de grandes fluctuations selon l'heure de la journée et selon les saisons.

Le graphique de la figure suivante montre des variations quotidiennes et saisonnières typiques pour un réseau. On constate sur ce graphique que l'appel de puissance maximale pendant l'hiver (15 GW) peut être plus du double de l'appel minimal pendant l'été (6 GW)

Les variations de la demande sont surtout fonction :

- ✓ Des heures de la journée : Mini à 4h, Maxi à 10 h - 11 h.
- ✓ Des jours de la semaine : vendredi, samedi et le mardi.
- ✓ Des saisons : Maxi en Janvier, mini en Août.

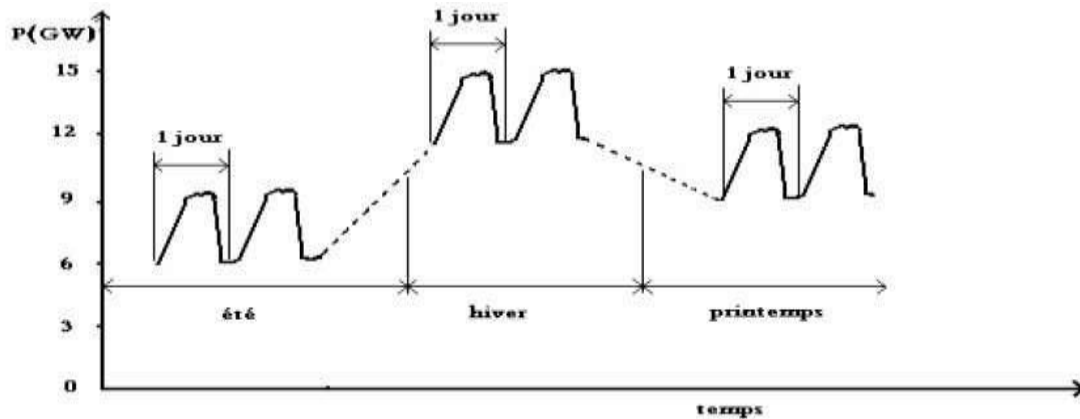


Figure III.3: Fluctuations typiques de l'appel de puissance durant une année[6]:

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

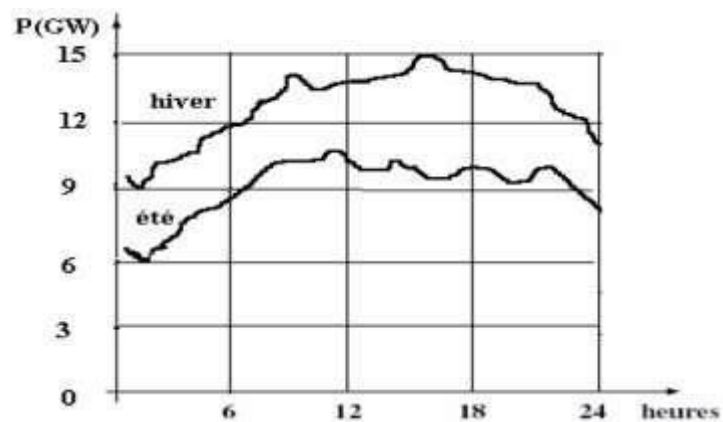


Figure III.4:: Fluctuation de l'appel de puissance durant une journée.

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

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

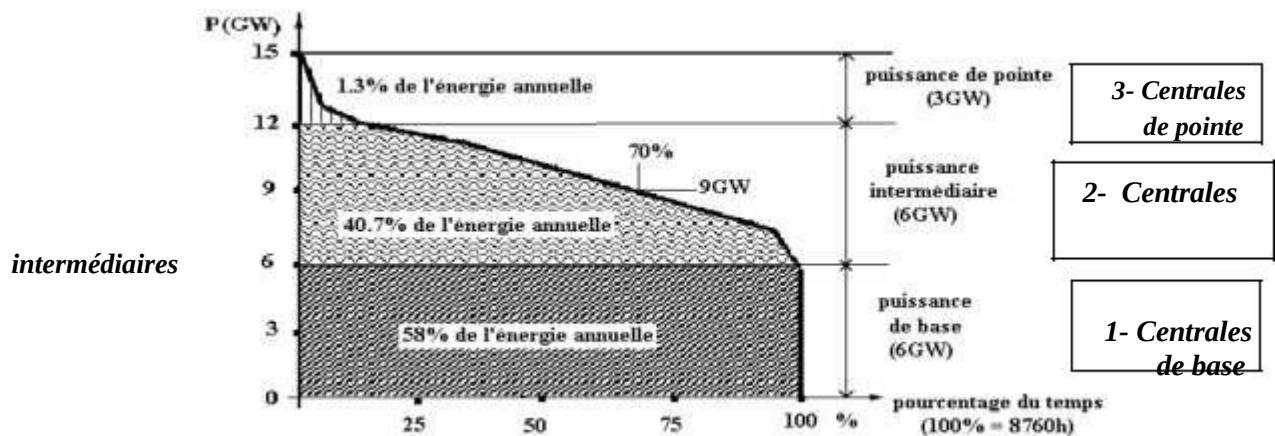


Figure III.5: Appel de puissance en fonction de son temps d'utilisation annuel.

III .3.3:- Ajustement de la production :

L'emploi des moyens de production est directement lié au coût du Kilowattheure produit et à la disponibilité de l'énergie, donc on utilise dans l'ordre :

- ☒ Les centrales hydrauliques au fil d'eau : Utilisation optimale de l'énergie, ces centrales n'ont pas de réserve.
- ☒ Les centrales thermiques nucléaires, elles sont utilisées à 90% de leur capacité : Prix du kWh faible, peu de souplesse pour les variations de charge (ils fournissent une puissance presque constante).
- ☒ Les centrales hydrauliques de montagnes selon leur disponibilité en réserve d'eau.
- ☒ Les centrales de pompage et les turbines à gaz (ils sont surtout utilisés aux heures de pointes.).

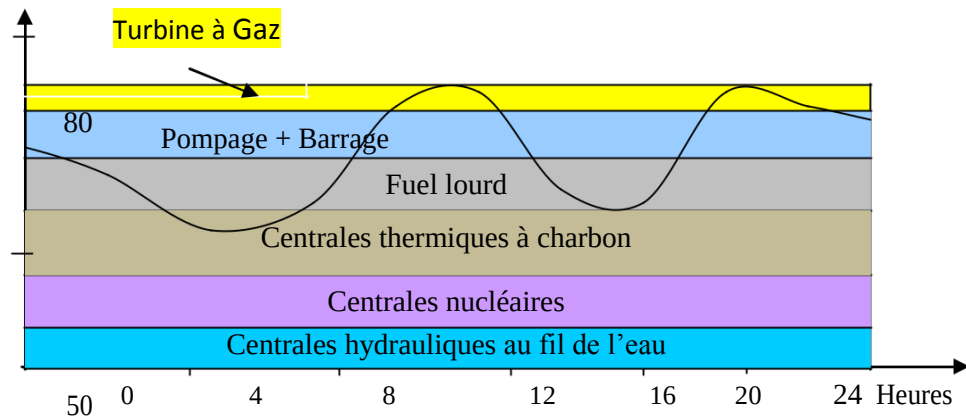


Figure III.6: Utilisation des centrales pour l'ajustement de production.

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

III .3.4:- Les dispatchings[7]: :

Ce sont des centres de coordination et d'exploitation. Les mouvements d'énergie sont réglés 24 h / 24 h par un centre national de coordination installé à Alger et autres centres régionaux. Ils assurent les fonctions suivantes :

- ❖ Établissement des programmes de production des centrales.
- ❖ Contrôle des échanges avec les autres fournisseurs d'énergie (s'ils existent).
- ❖ Surveillance et commandement de fonctionnement du réseau dans les limites géographiques de leur responsabilité.
- ❖ Transmission des informations de démarrage ou d'arrêt des centrales.

Les dispatchings travaillent sur des prévisions annuelles, hebdomadaires et journalières. Ils établissent, à partir des consommations de l'année précédente, la courbe des charges prévisionnelles, heure par heure, pour le lendemain.

Cette gestion d'énergie est effectuée par un ordinateur central qui communique avec des terminaux régionaux afin d'optimiser en permanence l'exploitation du réseau national.



Figure III.7: Vue générale d'une salle de dispatching

Chapitre IV :

Les sources d'énergie Electrique

IV.1 - Introduction :

Comme l'énergie électrique n'est pas stockable, 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 fabriquer de l'électricité dans les centrales thermiques à flamme (centrales thermiques classiques), grâce à la chaleur dégagée par la **combustion** de ces éléments.

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

IV.2 - Centrales thermique à carburants fossiles :

Le charbon, le mazout et le 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 : soit gaz naturel pour les cycles combinés soit gaz sidérurgiques.

Les 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 retrouve l'état liquide en traversant le condenseur. Cette eau est injectée au réservoir du générateur de vapeur et le cycle recommence toujours avec la même eau (figure IV. 1).

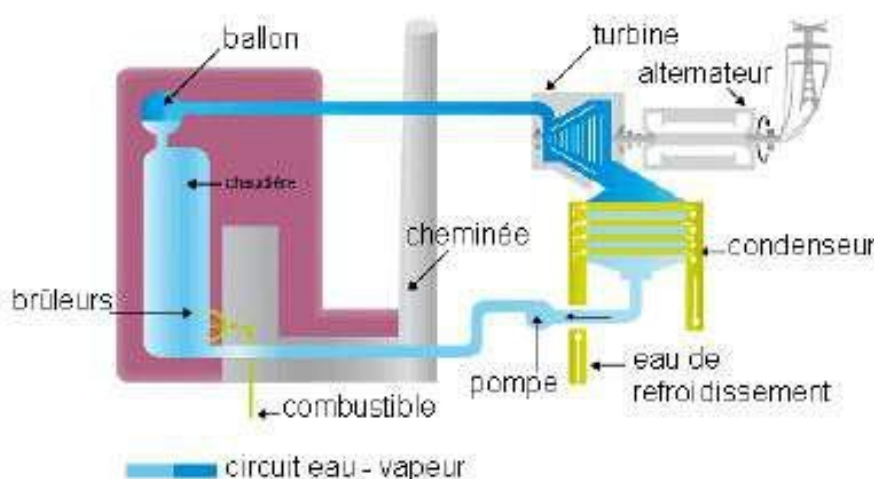


Figure IV.1 : Principe d'une centrale thermique[7]:

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 recircule 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.

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 ~ 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, pendant quelques dizaines d'heures par an et peut être démarrée très vite, et avec une grande fiabilité.

IV.2.1 - Constitution :

Une centrale thermique à flamme est composée de 3 parties (figure IV.2):

- .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.

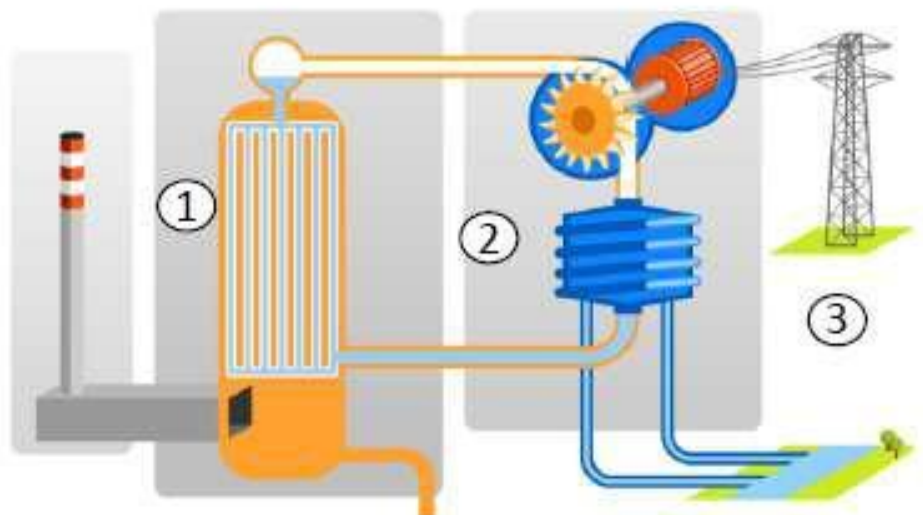


Figure IV.2 : composition d'une centrale thermique.

IV.2.2 - Principe de fonctionnement

Dans une centrale thermique il faut :

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

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

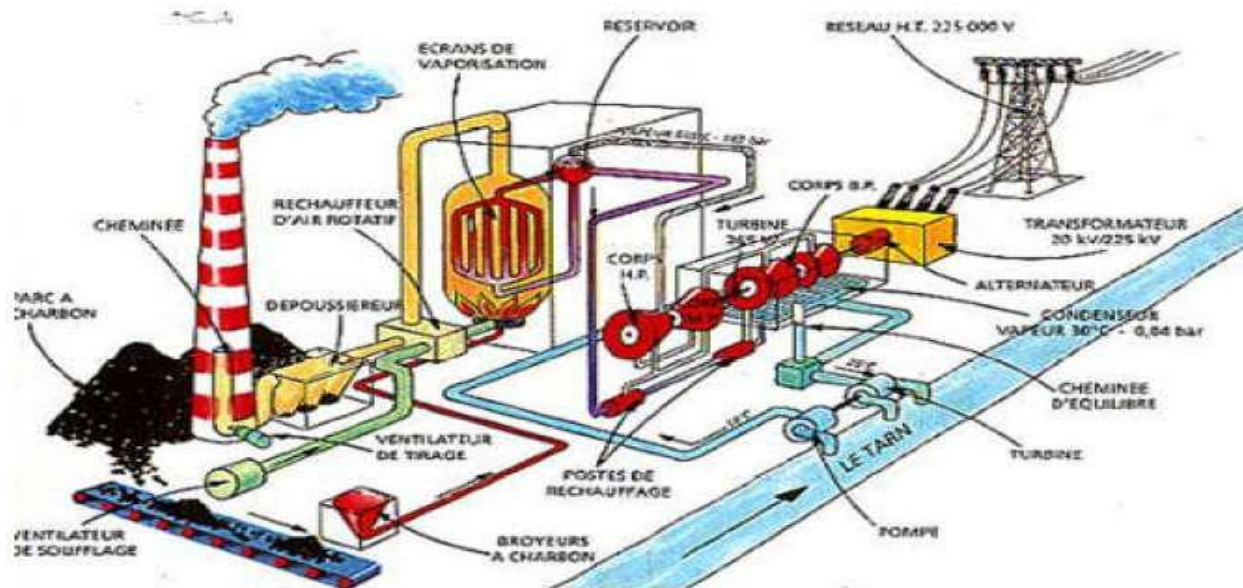


Figure IV.3 : Principe de fonctionnement d'une centrale thermique (turbine à vapeur).

IV.3 - Centrales nucléaires à Eau Pressurisée:

Les centrales nucléaires produisent l'électricité à partir de la chaleur libérée par une réaction nucléaire. Ce phénomène est provoqué par la division du noyau d'un atome, procédé qu'on appelle fission nucléaire. Remarquons qu'une réaction chimique telle que la combustion du charbon produit un simple regroupement des atomes sans que leurs noyaux soient affectés. Une centrale nucléaire est identique à une centrale thermique, sauf que la chaudière brûlant le combustible fossile est remplacé par un réacteur contenant le combustible nucléaire en fission. Une telle centrale comprend donc une turbine à vapeur, un alternateur, un condenseur, etc., comme dans une centrale thermique conventionnelle. Le rendement global est semblable (entre 30 % et 40 %) et l'on doit encore prévoir un système de refroidissement important, ce qui

nécessite in emplacement près d'un cours d'eau ou la construction d'une tour de refroidissement. A cause de ces similitudes, nous nous limiterons à l'étude du principe de fonctionnement et des caractéristiques du réacteur lui-même.

Dans les centrales nucléaires, le fluide thermodynamique peut être chauffé soit directement dans le réacteur (filiale Boiling Water Reactor (BWR)), soit par un fluide caloporteur intermédiaire qui lui transmet la chaleur du cœur du réacteur nucléaire (filiale Réacteur à Eau Pressurisée (REP) ou Pressurized Water Reactor (PWR)).

Dans les centrales nucléaires Réacteur à Eau Pressurisée (REP) actuelles, la pression dans le générateur est voisine de 60 bars, et la température de la vapeur ne dépasse guère 275 °C. Le schéma de principe d'un REP est donné figure ci-dessous. Sur la partie gauche du schéma se trouve l'enceinte de confinement comprenant trois organes principaux :

- ✓ le réacteur, avec son système de régulation (mécanisme de commande des grappes) ;
- ✓ le générateur de vapeur ;
- ✓ le pressuriseur.

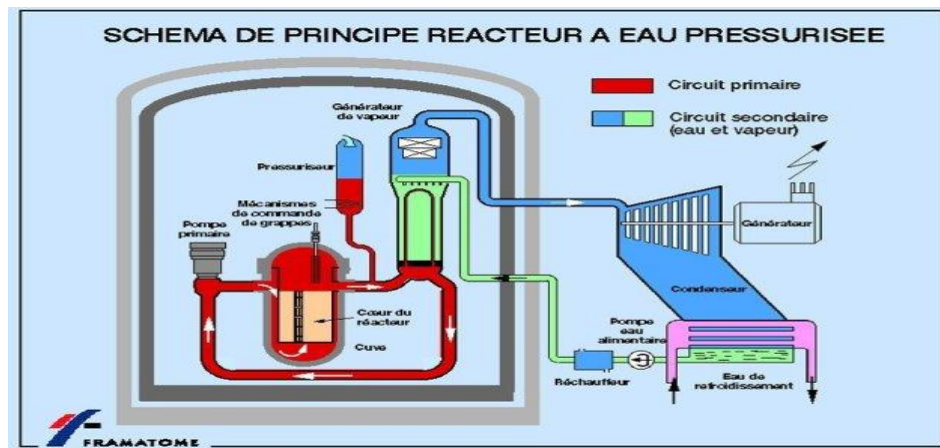


Figure IV.4: Schéma d'un réacteur REP[8]:

Ces trois organes sont reliés par le circuit primaire, comprenant des tuyauteries de liaison et les pompes primaires, qui font circuler le fluide de refroidissement suivant le sens des flèches. Le générateur de vapeur est quant à lui relié au circuit secondaire situé à l'extérieur de l'enceinte de confinement, qui correspond au cycle thermodynamique suivi par la vapeur, symbolisé sur le schéma par une turbine, un condenseur, une pompe alimentaire et un réchauffeur.

IV.3.1 - Circuit Primaire :

Dans un réacteur REP, l'extraction de la chaleur depuis le cœur nucléaire met en jeu deux circuits pour des raisons de sécurité : le fluide de refroidissement (de l'eau sous pression), en contact avec le cœur du réacteur, est radioactif, du fait des produits de fission qui migrent à travers les gainages, et des produits dissous dans l'eau (surtout dus à la corrosion), qui captent des neutrons. Pour éviter que cette eau contaminée ne soit en contact avec l'extérieur et ne traverse les composants du cycle de production d'électricité, le fluide thermodynamique est distinct du fluide caloporteur.

Le choix de ce fluide est basé sur les qualités de l'eau comme caloporteur (capacité thermique massique élevée), et sur le plan environnemental et d'usage (stabilité, innocuité, disponibilité). Il impose cependant une forte contrainte : la nécessité de garantir que l'eau reste à l'état liquide dans la cuve du réacteur, pour éviter des surchauffes locales du combustible nucléaire dues à la présence de vapeur induisant des coefficients d'échange thermiques faibles.

Pour cela, l'eau doit être maintenue sous une pression supérieure à la pression de saturation à sa température maximale dans le cœur du réacteur. L'ensemble du circuit primaire doit donc résister à cette pression maximale, ce qui se traduit par des contraintes mécaniques sévères. On dimensionne l'ensemble de ce circuit en conséquence, et on règle la pression du circuit avec une grande précision pour éviter soit une surpression qui pourrait engendrer des fuites ou des ruptures du circuit, soit une baisse de pression, compte tenu du risque d'ébullition dans le cœur et de fusion du combustible. Le pressuriseur a précisément pour rôle d'assurer cette fonction.

Un compromis doit donc être trouvé entre les contraintes de sûreté, les performances thermodynamiques du cycle et le coût de l'installation. Dans les centrales actuelles, la température maximale du cycle thermodynamique est fixée à environ 280 °C, et celle du circuit primaire à environ 330 °C. Plus précisément, la température du circuit primaire évolue entre environ 290 °C (à puissance nulle) et 325 °C (à puissance maximale).

Afin de garantir la non-ébullition de l'eau primaire, la pression du circuit primaire est fixée à 155 bars, ce qui correspond à une température de saturation de 345 °C, et donne une petite marge de sécurité. Une telle pression est déjà très élevée et impose de fortes contraintes technologiques à tous les niveaux.

IV.3.2 - Générateur de Vapeur:

Le générateur de vapeur (GV) doit pouvoir transférer la puissance totale du réacteur au circuit secondaire, avec un écart de température très faible, car les performances du cycle thermodynamique sont d'autant plus élevées que sa température l'est.

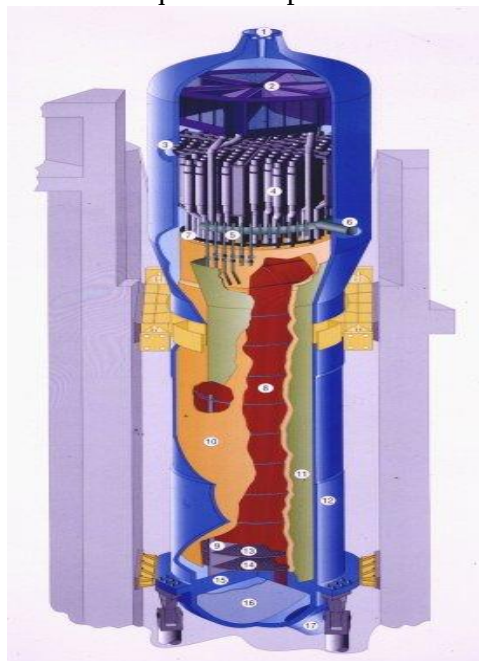


Figure IV.5: Générateur de vapeur d'un réacteur REP

Nous avons vu que la température de l'eau primaire varie entre 290 et 325 °C. La présence de réchauffeurs dans le circuit secondaire (voir plus loin), fait que l'eau secondaire entre dans le générateur à la température d'environ 220 °C.

Les performances actuelles des GV utilisés dans les réacteurs REP conduisent à une température maximale de sortie voisine de 275 °C. Compte tenu des faibles écarts de température entre les circuits primaire et secondaire, la nécessité de transférer une puissance importante interdit en pratique de réaliser toute surchauffe dans le GV, car les coefficients d'échange entre le liquide primaire et la vapeur surchauffée seraient trop faibles.

IV.3.3 - Circuit Secondaire:

Une particularité des GV des centrales nucléaires REP est, nous l'avons vu, l'absence de surchauffe initiale. Une détente complète de la vapeur à partir de cet état conduirait à un titre en vapeur trop faible, ce qui serait à la fois pénalisant sur le plan des performances, et fatal pour la tenue mécanique des aubages des turbines. La solution retenue consiste, en utilisant un organe particulier appelé séparateur-surchauffeur, à fractionner la détente en prévoyant une resurchauffe à une pression d'environ 11 bars, ce qui permet d'augmenter le rendement et de respecter la contrainte de titre de fin de détente.

Un séparateur-surchauffeur (figure ci-dessous) reçoit de la vapeur partiellement détendue de titre voisin de 0,87, dont la phase liquide est séparée et dirigée vers des réchauffeurs, tandis que la phase vapeur passe dans un échangeur parcouru intérieurement par un faible débit de vapeur saturée à haute pression (et donc plus haute température), qui se condense. Sur l'écorché de la figure, la vapeur vive entre en 1 et sort condensée en 2, tandis que la vapeur à surchauffer entre en 3 et sort en 4, des purges étant faites en 5. Pour une tranche de 1 500 MW, deux sécheurs-surchauffeurs de 370 t chacun sont nécessaires. Longs de 24,8 m, leur hauteur est égale à 6 m et leur largeur à 5,3 m.

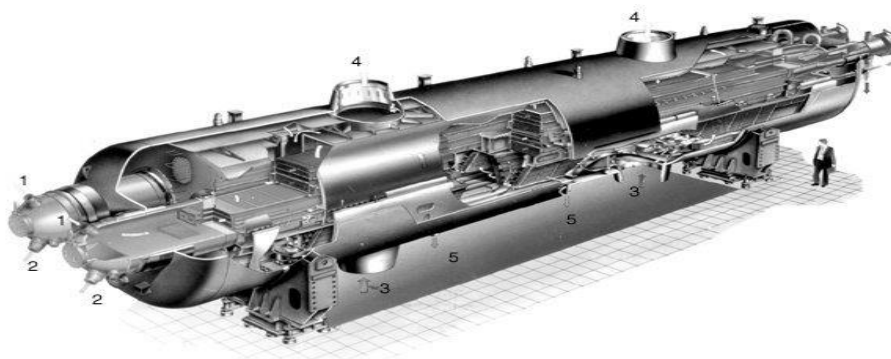


Figure IV.6: Sécheur – surchauffeur

La figure ci-dessous représente une centrale nucléaire. Le modèle du séparateur-surchauffeur est donné dans la partie supérieure droite de la figure. Il comprend un séparateur (nommé sécheur sur le schéma) et un échangeur entre la phase vapeur à pression moyenne et le prélèvement de vapeur saturée à haute pression (nommé surchauffeur sur le schéma).

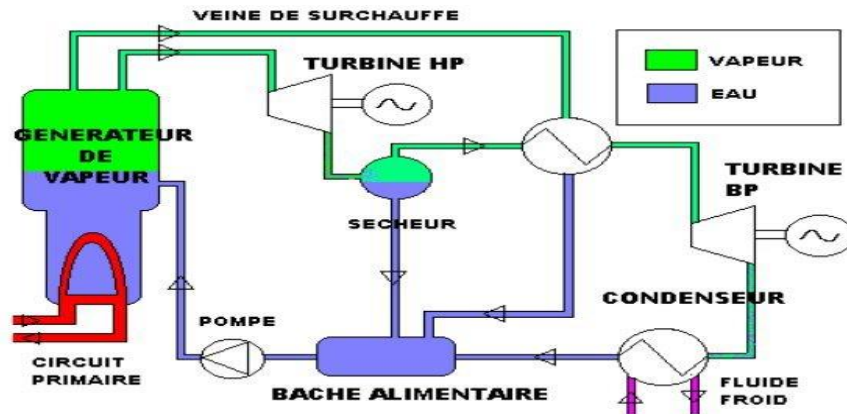


Figure IV.7: Schéma d'une centrale nucléaire (rendement 32%).

IV.3.4 - Composition du noyau atomique:

Le noyau d'un atome est composé de protons et de neutrons. Il existe des éléments qui, à tout point de vue, sont identiques, sauf qu'ils contiennent un ou quelques neutrons en surplus, par rapport au nombre habituel.

Il existe deux sortes d'atomes d'uranium, ^{238}U et ^{235}U , contenant chacun 92 protons (et 92 électrons), mais un nombre différent de neutrons. L'uranium 238 est très répandu alors que l'uranium 235 est rare. En effet, les gisements naturels d'uranium (U_3O_8) contiennent 99,3% d'atomes ^{238}U comparativement à 0,7 % de l'isotope ^{235}U .

IV.3.4.1 - Energie libérée par la fission atomique

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

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

Où

E : énergie libérée, en joules [J]

m : diminution de masse, en kilogrammes [kg]

c : vitesse de la lumière [3×10^8 m/s]

La quantité d'énergie libérée est énorme, car une diminution de 1 g seulement donne une énergie de 9×10^{13} joules, soit l'équivalent énergétique d'environ trois mille tonnes de charbon. Lors de la fission de l'atome d'uranium ^{235}U , il se produit précisément une légère diminution de masse. Par ailleurs, comme l'uranium 235 est fissile alors que l'uranium 238 ne l'est pas, on a construit de grandes usines pour augmenter la proportion d'uranium 235 dans le combustible (fuel enrichi) utilisé dans certains réacteurs.

IV.3.4.2 - Source de l'uranium

L'uranium utilisé dans les réacteurs nucléaires trouve son origine dans les mines d'uranium. Le minerai brut confie la substance U_3O_8 (3 atomes d'uranium, 8 atomes d'oxygène) contenant à son tour des atomes ^{238}U et ^{235}U dans le rapport de 1398 à 10. Pour usage dans un réacteur nucléaire, on doit transformer cette substance en dioxyde d'uranium (UO_2). Celui-ci est composé de molécules $^{238}\text{UO}_2$ et $^{235}\text{UO}_2$ encore dans le rapport de 1398 à 10. On l'appelle dioxyde d'uranium naturel parce que le rapport des molécules fissiles est le même que celui du minerai original.

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

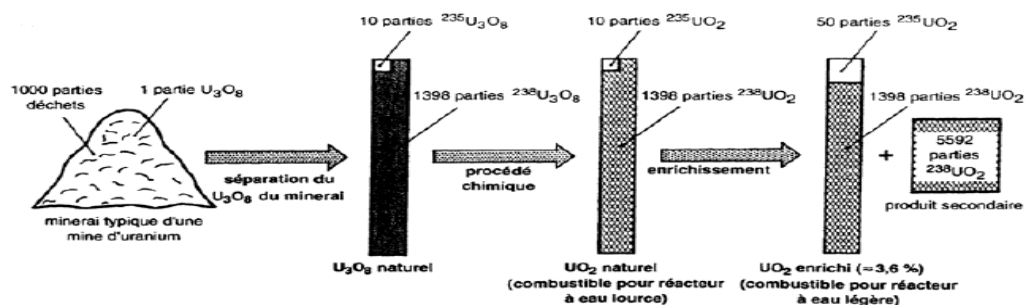


Figure IV.8: Le processus d'enrichissement[9]:

IV.3.5 –Autres Types de réacteurs

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

IV.3.5.1. Réacteur à eau bouillante. («Boiling Water Reactor»). Dans ces réacteurs, le caloporteur est de l'eau ordinaire en ébullition. On élimine ainsi l'échangeur de chaleur: la vapeur créée fait tourner directement les turbines. Cependant, comme dans tout réacteur à eau légère, on doit utiliser de l'oxyde d'uranium enrichi ayant une concentration d'environ 3 % en ^{235}U .

IV.3.5.2. 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 %.

IV.3.5.3. 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.

IV.4. Centrale à Turbine à Gaz[10]::

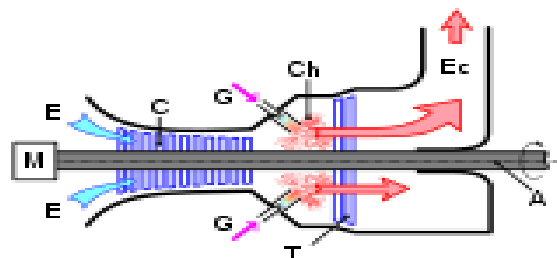


Figure IV.9: Coupe longitudinale d'une turbine à combustion : principaux organes .

Se reporter à l'image ci-dessus.

1. Le compresseur (« C »), constitué d'un ensemble d'ailettes fixes (stator) et mobiles (rotor), comprime l'air extérieur (« E »), simplement filtré, jusqu'à 10 à 15 bars, voire 30 bars pour certains modèles. D'autres types de machines utilisent un compresseur centrifuge et non axial.
2. Du combustible (« G ») (gazeux ou liquide pulvérisé), est injecté dans la (les) chambre(s) de combustion (« Ch ») où il se mélange à l'air comprimé pour entretenir une combustion continue.
3. Les gaz chauds se détendent en traversant la turbine (« T »), où l'énergie thermique et cinétique des gaz chauds est transformée en énergie mécanique. La turbine est constituée d'une ou plusieurs roues également munies d'ailettes précédées d'aubages fixes (directrices). Les gaz de combustion s'échappent par la cheminée (Ec) à travers un diffuseur.
4. Le mouvement de rotation de la turbine est communiqué à l'arbre (« A »), qui actionne d'une part le compresseur, d'autre part une charge qui n'est autre qu'un appareil (machine) récepteur(ice) (pompe, alternateur, compresseur...) accouplé à son extrémité.

Pour la mise en route, on utilise un moteur de lancement (« M ») qui joue le rôle de démarreur ; dans certaines configurations, c'est l'alternateur du groupe lui-même qui est utilisé en moteur pendant la phase de lancement.

Le réglage de la puissance est possible en agissant sur le débit de l'air en entrée et sur l'injection du carburant. Le réglage de la vitesse de rotation n'est possible que si l'organe entraîné le permet. En effet, dans le cas d'un alternateur connecté à un réseau électrique à fréquence fixe (par exemple 50 ou 60 Hz), cette fréquence impose une vitesse également fixe ; le débit de carburant sert à réguler la vitesse en ajustant la puissance produite à l'énergie réclamée.

IV.4.1. Rendement:

Le rendement faible de la turbine à combustion (25 à 35 %) est dû au fait que, comme dans un moteur à pistons, une partie de l'énergie fournie par le combustible est nécessaire pour entraîner le compresseur et une autre perdue sous forme de chaleur dans les gaz d'échappement. Il est possible d'améliorer légèrement le rendement en augmentant la température dans la chambre de combustion (plus de 1 200 °C) mais on se heurte au problème de tenue des matériaux utilisés pour la réalisation de la partie turbine. C'est en récupérant la chaleur des gaz d'échappement que le rendement global de la machine peut dépasser 50 %. On utilise alors la chaleur des gaz d'échappement (plus de 500 °C) pour produire de la vapeur dans une chaudière ou pour le chauffage.

Une autre possibilité d'augmenter le rendement de la turbine est de réchauffer les gaz en sortie des étages de compression (avant les chambres de combustion) en les faisant passer dans un échangeur situé dans le flux des gaz d'échappement. On arrive ainsi à se rapprocher des rendements d'un moteur Diesel semi-rapide[réf. nécessaire]. C'est par exemple le principe de fonctionnement de la turbine WR21 (en) de Rolls-Royce.

La vapeur produite est ensuite utilisée de deux manières :

- ✓ dans une centrale à cycle combiné où une turbine à vapeur complète la turbine à combustion pour actionner un alternateur, le rendement global atteint alors 55 %, voire dépasse 62 % (en 2016, dans la centrale thermique de Bouchain) ;
- ✓ par cogénération, où la vapeur produite est utilisée dans un autre domaine (papeterie...).

IV.5. Centrale à Cycle Combiné:

Une centrale à cycle combiné, généralement appelée CCGT (pour Combined Cycle Gas Turbine), ou TGV (Turbine Gaz-Vapeur), est une centrale thermique qui associe deux types de turbines : la turbine à combustion et la turbine à vapeur. Chacune de ces turbines entraîne une génératrice qui produit de l'électricité (configuration "multi-arbres" ou "multi-shaft") ou les deux types de turbines sont couplées à la même génératrice (configuration "single-shaft"). Les centrales à cycle combiné sont conçues pour un fonctionnement en semi-base (entre 2 000 et 6 000 h/an) et constituent un moyen d'ajustement du parc de production, concourant ainsi au bon fonctionnement du réseau électrique. Dans une centrale à cycle combiné, la turbine à combustion est actionnée par les gaz issus de la combustion à haute température (jusqu'à 1 500 °C). En sortie les fumées produites par la combustion sont encore suffisamment chaudes (entre 400 et 650 °C environ) pour permettre de générer de la vapeur dans une chaudière au moyen d'échangeurs de chaleur. La vapeur ainsi produite entraîne une turbine à vapeur. Il est enfin nécessaire de disposer d'une source froide (eau de rivière - eau de mer - aéroréfrigérant) pour évacuer la chaleur nécessairement produite par le cycle vapeur (second principe de la thermodynamique).

La chaleur restante peut aussi être récupérée pour faire de la cogénération. Différentes configurations de centrale sont possibles car on peut par exemple avoir : - soit une turbine à combustion, une turbine à vapeur et un alternateur sur la même ligne d'arbre (configuration "single-shaft") - soit une turbine à combustion avec son alternateur et une turbine à vapeur avec son alternateur (configuration "multi-shafts") - soit deux turbines à combustion avec chacune son alternateur et une turbine à vapeur avec son alternateur (configuration "multi-shafts") ; les trois alternateurs peuvent alors être identiques. De façon approximative, la turbine à vapeur a une puissance égale à 50 % de celle de la turbine à combustion à laquelle elle est associée. La configuration "multi-arbres" ou "multi-shafts" a l'avantage de permettre le démarrage et la montée en puissance rapides des turbines à combustion, la turbine à vapeur ayant généralement des temps de démarrage et de montée en puissance plus grands. La configuration "single-shaft" diminue le nombre de machines, donc l'encombrement, mais démarre plus lentement.

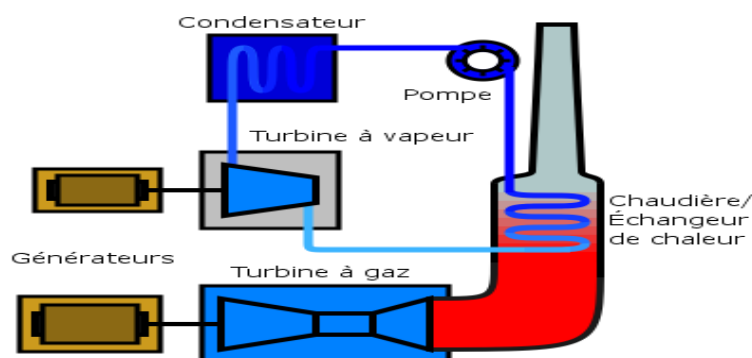


Figure IV.10: Centrale à cycle combiné multi-arbres

IV.6. Centrale Hydraulique[11]:

IV.6.1- Introduction

L'énergie hydroélectrique est renouvelable obtenue par conversion de l'énergie hydraulique, des différents flux d'eau naturels (fleuve, rivière, barrage, mer,...etc.), en électricité. L'énergie cinétique du mouvement d'eau est transformée en énergie mécanique par une turbine, puis en énergie électrique par un alternateur.

L'hydroélectricité 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 :

$$E_p = f(Q,H)$$

IV.6.2- Principe de fonctionnement :

Lorsque l'eau est stockée (barrage), il suffit d'ouvrir des vannes pour démarrer le cycle de production d'électricité. Suivant l'installation, l'eau pénètre 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 assure la rotation de la turbine (figure sus-dessus). La turbine entraîne l'alternateur qui produit de l'électricité. L'eau utilisée rejoint la rivière par le canal de fuite. Un transformateur élève la tension produite par l'alternateur pour qu'il puisse être plus facilement transporté sur les lignes à haute et très haute tension.

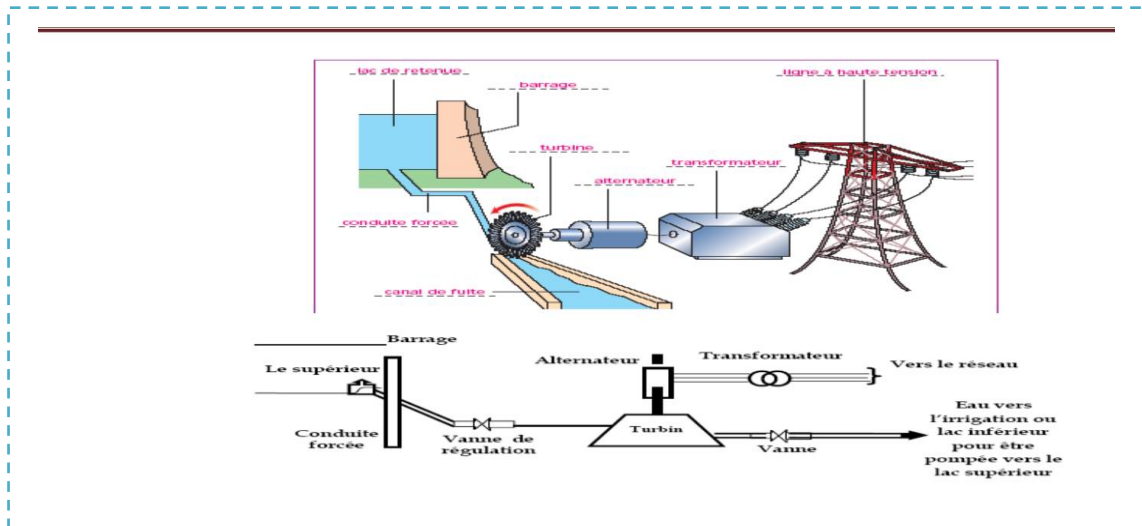


Figure IV.11: Schéma du principe de fonctionnement d'une centrale hydroélectrique.

IV.6.3- Puissance Produite par une Centrale Hydraulique:

La puissance générée vaut : $P(W) = E_p / t$

avec : t [s] est le temps E_p : énergie potentielle de l'eau de poids « $m.g$ » (la constante $g = 9.8 \text{ N/kg}$) à une hauteur h [m] tel que : $E_p = m.g.h$ donc $P[W] = m.g.h / t$

Puisque on a:

- m reliée au volume V par : $m = \rho.V$; La masse volumique de l'eau vaut $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$
 - Le débit Q [m^3/s] (volume qui passe par unité de temps) est reliée au volume V par: $Q = V/t$
- Donc P dépend de 2 facteurs principaux: la hauteur de chute d'eau h et le débit de l'eau Q :

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

IV.6.4 -Types d'aménagements hydroélectriques :

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

IV.6.4.1- Centrales de hautes chutes ($H > 200 \text{ m}$), elles sont implantées loin du barrage. Elles utilisent une **turbine 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 (figures sous-dessous).

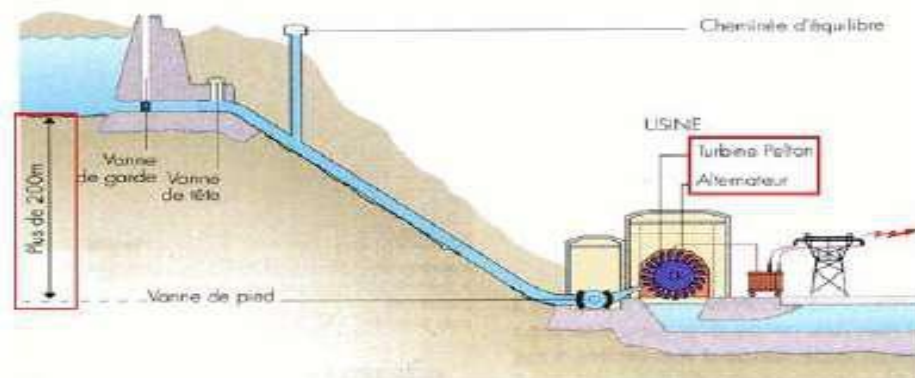


Figure IV.12.a: Chute d'eau importante $h > 200 \text{ m}$.

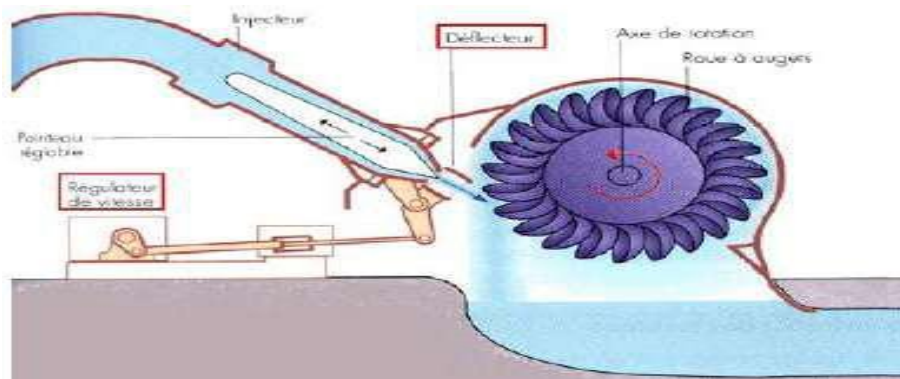


Figure IV.12.b: Principe de la turbine Pelton.

IV.6.4.2- Centrales de moyenne chute (30 à 200 m), elles sont construites sur le barrage (figures sous-dessous). Elles utilisent des **turbines 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).

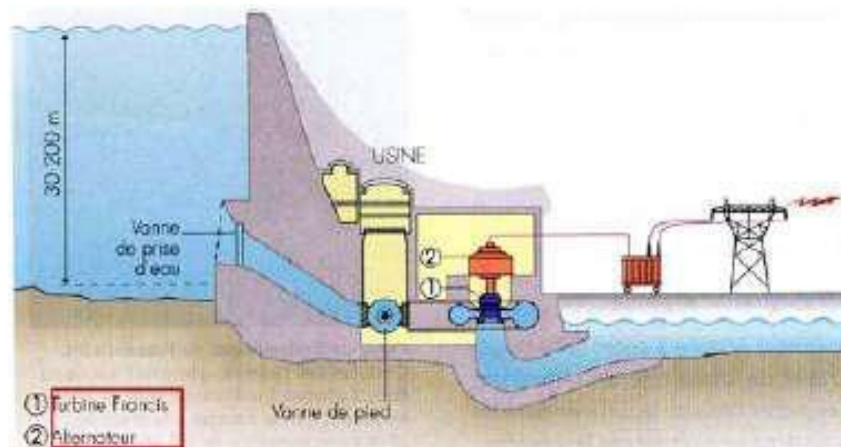


Figure IV.13.a: Chute d'eau modérée $h = [30m...200 m]$

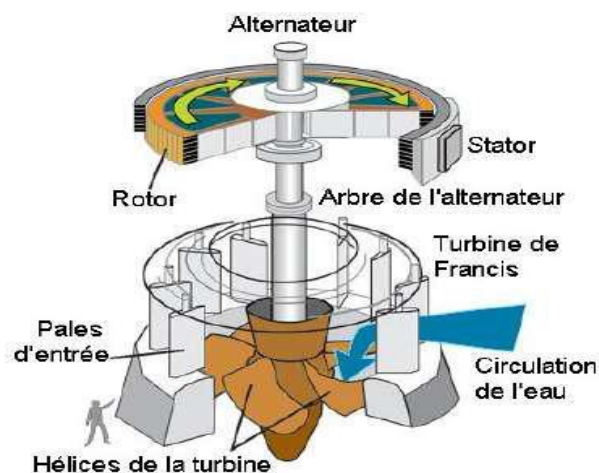


Figure IV.13.b : Principe de la turbine Francis.

IV.6.4.3- Centrales au fil de l'eau (chute < 30m), elles sont construites sur un canal de dérivation ou sur le lit d'une rivière ou d'un fleuve. Elles utilisent des **turbines Kaplan** en forme d'hélice (figures sous-dessous). 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.

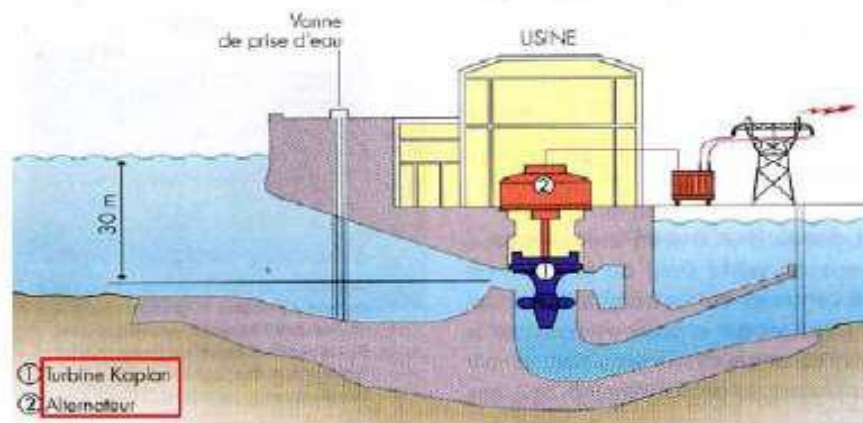


Figure IV.14. a : Centrales au fil de l'eau (sur les fleuves)

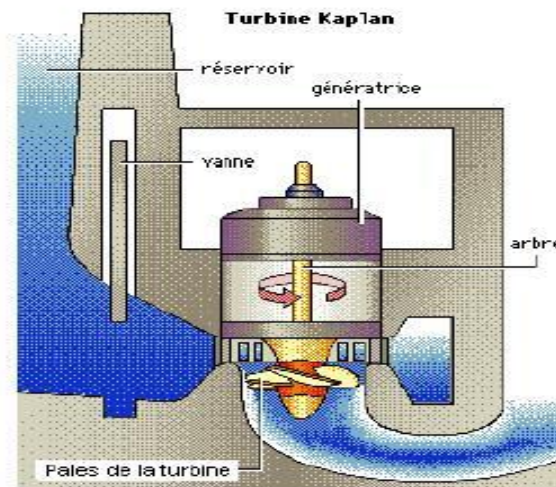


Figure IV.14.b: Schéma de la turbine Kaplan

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 qui sont utilisées depuis des générations.

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

Adaptation de la tension : Un transformateur élève la tension produite par l'alternateur pour qu'il puisse être plus facilement transporté **dans les lignes à très haute et haute tension**.

IV.7.Energie solaire photovoltaïque :

IV.7.1:Définition:

L'énergie solaire photovoltaïque (PV) provient de la conversion directe de l'énergie provenant de photons, compris dans le rayonnement lumineux (solaire ou autre) en énergie électrique. Elle utilise pour ce faire des modules photovoltaïques composés de cellules ou de photopiles fabriqués avec des matériaux sensibles aux longueurs d'ondes du visible qui réalisent cette transformation d'énergie [12]. L'association de plusieurs cellules PV en série/parallèle donne lieu à un générateur photovoltaïque (GPV) qui a une caractéristique statique courant-tension $I(V)$ non linéaire et présentant un point de puissance maximale (PPM). Cette caractéristique dépend du niveau d'éclairement et de la température de la cellule ainsi que du vieillissement de l'ensemble [13].

IV.7.2. Historique :

Les systèmes photovoltaïques sont utilisés long temps.

- ✚ **En 1839:** le physicien français **Edmond Becquerel** à découvrir le processus de l'utilisation de l'ensoleillement pour produire du courant électrique dans un matériau solide. C'est l'effet photovoltaïque.
- ✚ **En 1875: Werner Von Siemens** à exposé devant l'Académie des Sciences de Berlin un article sur l'effet photovoltaïque dans les semi-conducteurs.
- ✚ **En 1954:** trois chercheurs américains, **Chapin, Pearson et Prince**, ont mis au point une cellule photovoltaïque à haut rendement au moment où l'industrie spatiale naissante cherche des solutions nouvelles pour alimenter ses satellites.
- ✚ **En 1958:** une cellule avec un rendement de 9 % est mise au point. Les premiers satellites alimentés par des cellules solaires sont envoyés dans l'espace.
- ✚ **En 1973:** la première maison alimentée par des cellules photovoltaïques est construite à l'Université de Delaware USA (à New York)
- ✚ **En 1983:** la première voiture alimentée par un panneau photovoltaïque parcourt une distance de 400 Km en Australie.

IV.7.3. L'effet photovoltaïque :

L'effet photovoltaïque permet de convertir directement l'énergie lumineuse des rayons solaires (photon) en électricité (Volt), par le biais de la production et du transport dans un matériau semi-conducteur de charges électriques positives et négatives sous l'effet de la lumière. Ce matériau comporte deux parties, l'une présentant un excès d'électrons et l'autre un déficit en électrons, dites respectivement dopée de type n et dopée de type p. Lorsque la première est mise en contact avec la seconde, les électrons en excès dans le matériau n diffusent dans le matériau p. La zone initialement dopée n devient chargée positivement, et la zone initialement dopée p chargée négativement. Il se crée donc entre elles un champ électrique qui tend à repousser les électrons dans la zone n et les trous vers la zone p [14].

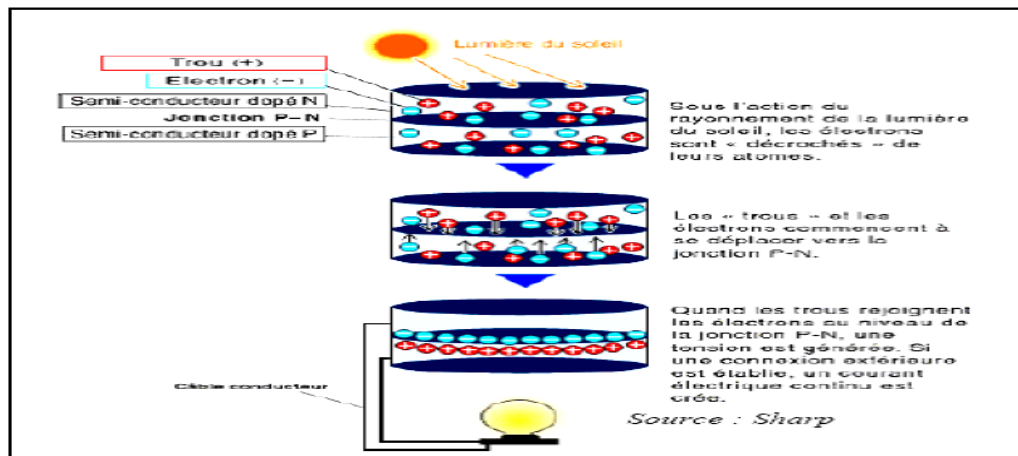


Figure IV.15. Effet photovoltaïque.

Donc ce principe réside en une collision des photons incidents (flux lumineux) avec les électrons libres et les électrons de valence en leur communiquant une énergie ($h\nu$).

✚ Si cette énergie est supérieure ou égale à l'énergie de gap de ce semi-conducteur

$E_g = E_c - E_v$, l'électron passe de la bande de valence à la bande de conduction en laissant un trou derrière lui, d'où l'apparition des paires électron- trou dans différents points de la jonction. Donc toute particule minoritaire près de la jonction a une probabilité très forte pour la traverser et la jonction s'oppose uniquement le passage des porteurs majoritaires .

✚ Si les photons ont une énergie très supérieure à E_g , ils passent de la bande de valence à un niveau instable de la bande de conduction. L'excès d'énergie sera transmis sous forme de photons réseau cristallin puis perdue en chaleur et l'électron prendra un niveau stable dans la bande de conduction.

✚ Si les photons ont une énergie inférieure à E_g , ils ne seront pas absorbés et leurs énergies ne contribuent pas à la conversion photovoltaïque [15].

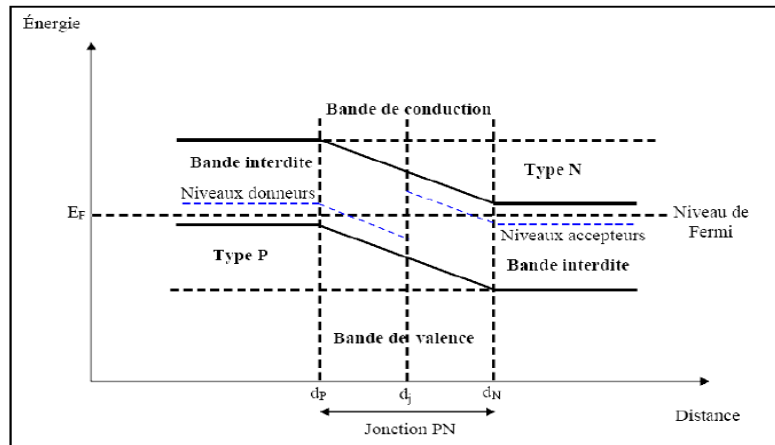


Figure IV.16. Diagrammes de bandes d'énergie au voisinage de la jonction

IV.7.4. Cellule photovoltaïque :

La cellule photovoltaïque est un moyen de conversion de la lumière en énergie électrique par le processus « effet photovoltaïque ». Elle est réalisée à partir de deux couches de silicium, une dopée P (dopée au bore) et l'autre dopée N (dopée au phosphore) créant ainsi une jonction P-N avec une barrière de potentiel. Lorsque les photons sont absorbés par le semi-conducteur, ils transmettent leur énergie aux atomes de la jonction P-N de telle sorte que les électrons de ces atomes se libèrent et créent des électrons (charges N) et des trous (charges P). Ceci crée alors une différence de potentiel entre les deux couches. A travers une charge continue, on peut en plus récolter des porteurs. La tension maximale de la cellule est d'environ 0,6v pour un courant nul. Cette tension est nommée tension de circuit ouvert(V_{oc}). Le courant maximal se produit lorsque les bornes de la cellule sont court-circuitées, il est appelé courant de court-circuit (I_{cc}) et dépend fortement du niveau d'éclairement [16].

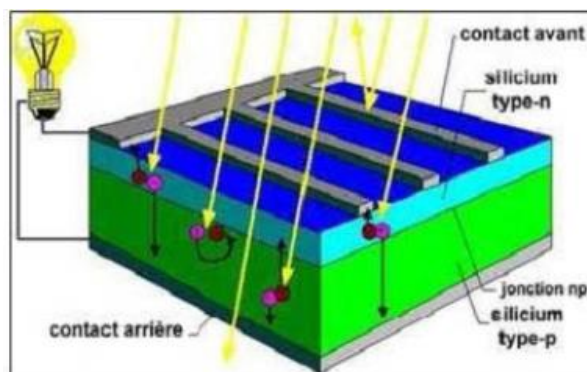


Figure IV.17. Représentation schématique d'une cellule solaire

IV.7.5. Différents types des cellules photovoltaïques :

Il existe différents types de cellules solaires ou cellules photovoltaïques. Chaque type de cellule est caractérisé par a un rendement et un coût qui lui sont propres. Cependant, quel que soit le type, le rendement reste assez faible : entre 8 et 23 % de l'énergie que les cellules reçoivent. Actuellement, il existe trois principaux types de cellules [17]:

IV.7.5.1 Cellules monocristallines :

Les cellules monocristallines sont les photopiles de la première génération, elles sont élaborées à partir d'un bloc de silicium cristallisé en un seul cristal. Son procédé de fabrication est long et exigeant en énergie; plus onéreux, il est cependant plus efficace que le silicium polycristallin. Du silicium à l'état brut est fondu pour créer un barreau. Lorsque le refroidissement du silicium est lent et maîtrisé, on obtient un monocristal. Un Wafer (tranche de silicium) est alors découpé dans le barreau de silicium. Après divers traitements, le Wafer devient cellule. Les cellules sont rondes ou presque carrées et, vues de près, elles ont une couleur uniforme. Elles ont un rendement de 15 à 22 %, mais la méthode de production est laborieuse [18].



Figure IV.18. Cellule photovoltaïque (monocristalline).

IV.7.5.2. Cellules poly-cristallines :

Les cellules polycristallines sont élaborées à partir d'un bloc de silicium cristallisé en forme de cristaux multiples. Vus de près, on peut voir les orientations différentes des cristaux (tonalités différentes). Elles ont un rendement de 11 à 15%, mais leur coût de production est moins élevé que les cellules monocristallines. Ces cellules, grâce à leur potentiel de gain de productivité, se sont aujourd'hui imposées. L'avantage de ces cellules est qu'elles produisent peu de déchets de coupe et qu'elles nécessitent 2 à 3 fois moins d'énergie pour leur fabrication. Le wafer est scié dans un barreau de silicium dont le refroidissement forcé a créé une structure Polycristalline. Durée de vie estimée : 30 ans [18].



Figure IV.19. Cellule PV poly-crystalline.

IV.7.5.3. Cellules amorphes :

Les modules photovoltaïques amorphes ont un coût de production bien plus bas, mais malheureusement leur rendement n'est que 6 à 8% actuellement. Cette technologie permet d'utiliser des couches très minces de silicium qui sont appliquées sur du verre, du plastique souple ou du métal, par un procédé de vaporisation sous vide.

Le rendement de ces panneaux est moins bon que celui des technologies Poly-cristallines ou monocristallines. Cependant, le silicium amorphe permet de produire des panneaux de grandes surfaces à bas coût en utilisant peu de matière première [18].

IV.7.6. Modules (ou Panneaux) PV :

Typiquement une cellule photovoltaïque produit moins de 2 watts sous approximativement 0,5 Volt. Alors Pour produire plus de puissance les cellules sont assemblées pour former un module Une association série de plusieurs cellules donne un module et une association série et/ou parallèle de plusieurs modules permet de réaliser un panneau photovoltaïque [18].

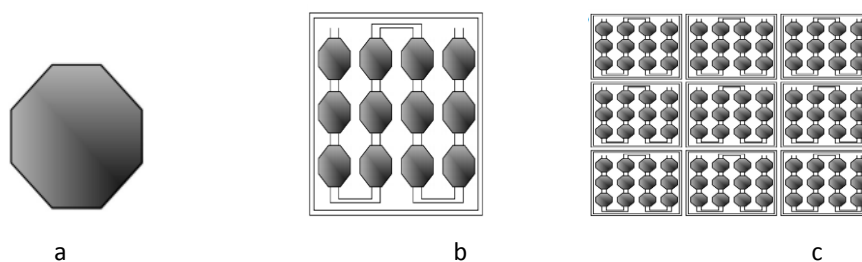


Figure IV.20. Cellule, module et panneau photovoltaïques.

Un module photovoltaïque se compose généralement d'un circuit de 36 cellules en série, protégées de l'humidité par un capsulage de verre et de plastique. L'ensemble est ensuite muni d'un cadre et d'une boîte de jonction électrique .

Le passage d'un module à un panneau se fait par l'ajout de diodes de protection, une en série pour éviter les courants inverses et une en parallèle, dite diode by-pass, qui n'intervient qu'en cas

de déséquilibre d'un ensemble de cellules pour limiter la tension inverse aux bornes de cet ensemble et minimiser la perte de production associée .

Les connections en série de plusieurs cellules augmentent la tension pour un même courant, tandis que la mise en parallèle accroît le courant en conservant la tension. La puissance crête, obtenue sous un éclairage maximal sera proportionnelle à la surface du module. La rigidité de la face avant (vitre) et l'étanchéité sous vide offerte par la face arrière soudée sous vide confèrent à l'ensemble sa durabilité [18].

IV.8. l'énergie éolienne :

L'intérêt d'une éolienne se justifie par la possibilité qu'elle apporte de récupérer l'énergie cinétique présentée dans le vent et la transformée en énergie mécanique de rotation, Cette énergie mécanique peut être exploitée principalement de deux manières [19] :

- ✚ Soit Conservation de l'énergie mécanique : le vent est utilisé pour faire avancer un véhicule (navire à voile ou char à voile), pour pomper de l'eau (moulins de Majorque, éoliennes de pompage pour abreuver le bétail) ou pour faire tourner la meule d'un moulin.
- ✚ Soit Transformation en énergie électrique : l'éolienne est accouplée à un générateur électrique pour fabriquer du courant continu ou alternatif, le générateur est relié à un réseau électrique ou bien il fonctionne de manière autonome avec un générateur d'appoint (par exemple un groupe électrogène) et/ou un parc de batteries ou un autre dispositif de stockage d'énergie [19].

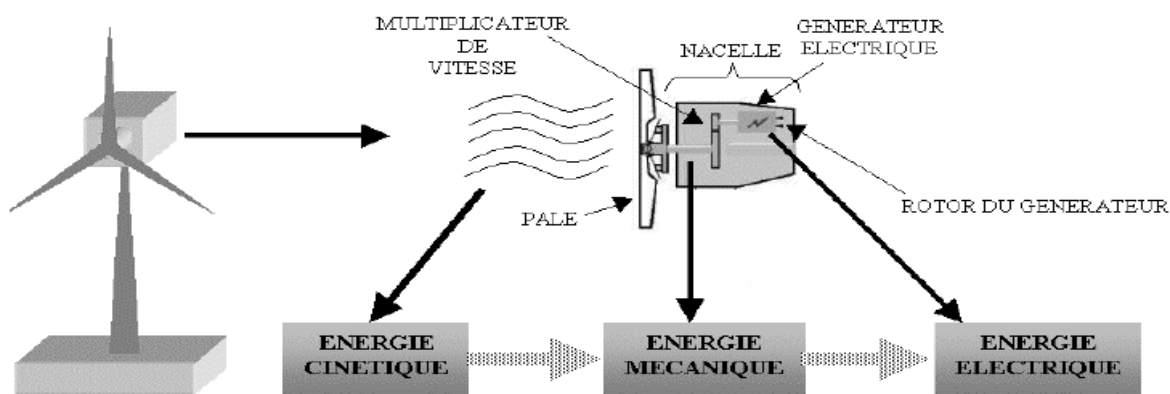


Figure IV.21. Conversion de l'énergie cinétique du vent.

IV.8.1.Architecture d'une éolienne :

On peut considérer trois composants essentiels dans une éolienne, le rotor, la nacelle et la tour.

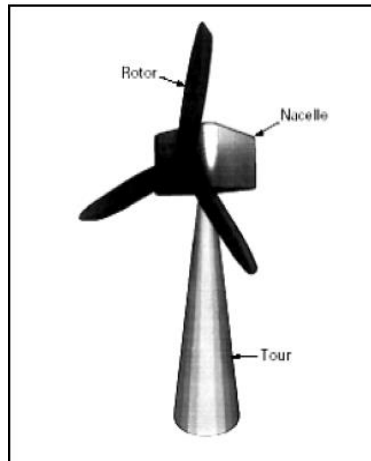


Figure IV.22. Composants d'une éolienne.

IV.8.1.1. Rotor :

C'est le capteur d'énergie qui transforme l'énergie du vent en énergie mécanique. Le rotor est un ensemble constitué de pales et de l'arbre primaire, la liaison entre ces éléments étant assurée par le moyeu.

IV.8.1.2. Nacelle :

Son rôle est d'abriter l'installation de génération de l'énergie électrique ainsi que ses périphériques. Différentes configurations peuvent être rencontrées suivant le type de la machine. La figure (sous-dessous) présente une coupe d'une nacelle avec ses différents composants:

- ✚ Multiplicateur de vitesse : il sert à élever la vitesse de rotation entre l'arbre primaire et l'arbre secondaire qui entraîne la génératrice électrique.
- ✚ L'arbre secondaire comporte généralement un frein mécanique qui permet d'immobiliser le rotor au cours des opérations de maintenance et d'éviter l'emballement de la machine.
- ✚ Génératrice : Différents types de génératrices peuvent être rencontrés.
- ✚ Contrôleur électronique chargé de surveiller le fonctionnement de l'éolienne. Pour mener à bien ces différentes tâches, le contrôleur utilise les données fournies par un anémomètre (vitesse du vent) et une girouette (direction du vent), habituellement situés à l'arrière de la nacelle.

- ✚ Divers dispositifs de refroidissement (génératrice, multiplicateur) par ventilateurs, radiateurs d'eau, ou d'huile.
- ✚ Dispositif d'orientation de la nacelle : Il permet la rotation de la nacelle à l'extrémité supérieure de la tour, autour de l'axe vertical.

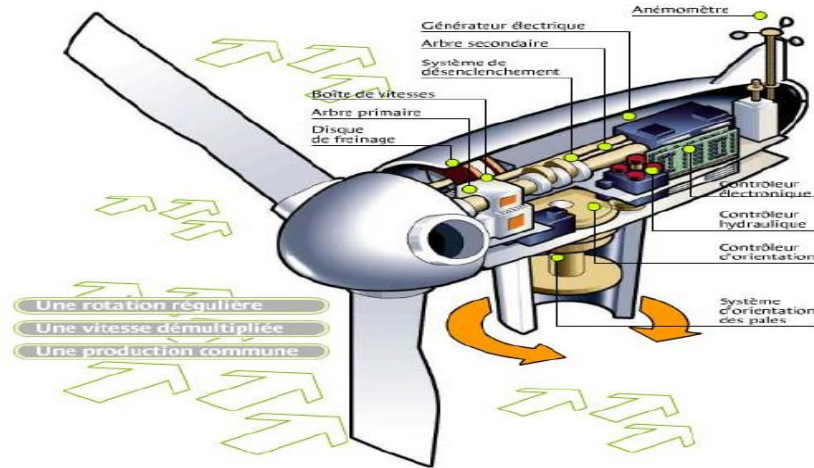
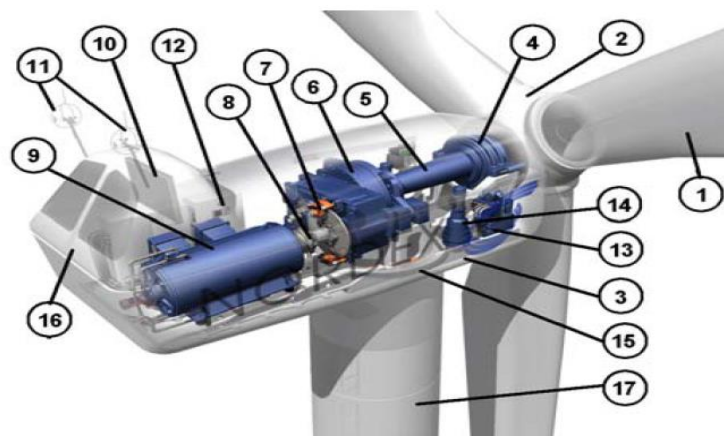


Figure IV.23. Eléments d'une nacelle.

IV.8.1.3. Tour:

Son rôle est d'une part de supporter l'ensemble rotor, nacelle pour éviter que les pales ne touchent le sol, mais aussi de placer le rotor à une hauteur suffisante, de manière à sortir autant que possible le rotor du gradient de vent qui existe à proximité du sol, améliorant ainsi le captage de l'énergie.

IV.8.2. Principe de fonctionnement d'une éolienne :



1: pales, 2: moyeu rotor, 3: nacelle, 4: cardan, 5: transmission, 6: multiplicateur de vitesse, 7: frein à disque, 8: accouplement, 9: génératrice, 10: radiateur de refroidissement, 11: centrale de mesures du vent, 12: contrôle, 13: centrale hydraulique, 14: mécanisme d'orientation face au vent, 15: paliers du système d'orientation équipés d'un frein à disque, 16: capot, 17: mât.

Figure IV.24. Principe de fonctionnement d'une éolienne.

Quand le vent se lève, l'automate (15), grâce au centrale de mesures de vent (11) située à l'arrière de la nacelle commande un mécanisme d'orientation (14) de placer l'éolienne face au vent. Les trois pales (1) sont mises en mouvement par la seule force du vent. Elles entraînent avec elles l'axe lent (5), le multiplicateur (6), l'arbre rapide (8), et la génératrice (9). Lorsque le vent est suffisant (4 m/s soit 14.5 km/h), l'éolienne peut-être couplée au réseau électrique. Le rotor tourne alors à sa vitesse nominale aux environs de 30 tr/min et la génératrice à 1500 tr/min. Ces vitesses de rotation vont rester constantes tout au long de la période de production. Quand le vent atteint 50 km/h, l'éolienne fournit sa puissance nominale. Cette puissance est alors maintenue constante en réduisant progressivement la portance des pales. L'unité hydraulique (13) régule la portance en modifiant l'angle de calage des pales qui pivotent sur leurs roulements (4). Lorsque le vent dépasse 90 km/h, les pales sont mises en drapeau et leur portance devient quasiment nulle, l'éolienne ne produit pas d'électricité. Tant que la vitesse du vent reste supérieure à 90 km/h, le rotor tourne en roue libre et la génératrice est déconnectée du réseau. Dès que la vitesse du vent diminue, l'éolienne se remet en mode de production. Toutes ces opérations sont automatiques et entièrement gérées par ordinateur. En cas d'arrêt d'urgence, un frein à disque (7) placé sur l'axe rapide permet de mettre la machine en sécurité [19].

IV.8.3. Caractéristiques des éoliennes :

On classe les éoliennes suivant la disposition géométrique de l'arbre sur lequel est montée l'hélice. Il existe principalement deux types de turbines éoliennes :

 Eolienne à axe horizontal;

 Eolienne à axe vertical.

IV.8.3.1. Eolienne à axe horizontal :

Les éoliennes à axe horizontal sont basées sur la technologie ancestrale des moulins à vent. Elles sont constituées de plusieurs pales profilées aérodynamiquement à la manière des ailes d'avion. Dans ce cas, la portance n'est pas utilisée pour maintenir un avion en vol mais pour générer un couple moteur entraînant la rotation. Le nombre de pales utilisé pour la production d'électricité varie classiquement entre 1 et 3, le rotor tripale étant le plus utilisé car il constitue un compromis entre le coefficient de puissance, le coût et la vitesse de rotation du capteur éolien [19].



Figure IV.25. Eoliennes à axes horizontal.

IV.8.3.2. Eolienne à axe vertical :

Pour ces capteurs, l'axe de rotation est vertical et perpendiculaire à la direction du vent, et sont les premières structures développées pour produire de l'électricité. Elles possèdent l'avantage d'avoir les organes de commande et le générateur au niveau du sol, donc elles sont facilement accessibles.

Elles sont adaptées à tous les vents et ne nécessitent pas de dispositif d'orientation.

Deux d'entre elles sont particulièrement remarquables : Savonius et Darrieus.

*Éolienne de type Darrieus.**Éolienne de type Savonius.*

Figure IV.26: Eoliennes à axes vertical.

IV.9. Centrale à Biomasse[20]::

Une centrale biomasse produit de l'électricité grâce à la vapeur d'eau dégagée par la combustion de matières végétales ou animales, qui met en mouvement une turbine reliée à un alternateur. La biomasse est brûlée dans une chambre de combustion.

En brûlant, la biomasse dégage de la chaleur qui va chauffer de l'eau dans une chaudière. L'eau se transforme en vapeur, envoyée sous pression vers des turbines. La vapeur fait tourner une turbine qui fait à son tour fonctionner un alternateur. Grâce à l'énergie fournie par la turbine, l'alternateur produit un courant électrique alternatif. Un transformateur élève la tension du courant électrique produit par l'alternateur pour qu'il puisse être plus facilement transporté dans les lignes à moyenne et haute tension.

À la sortie de la turbine, une partie de la vapeur est récupérée pour être utilisée pour le chauffage. C'est ce que l'on appelle la cogénération. Le reste de la vapeur est à nouveau transformée en eau grâce à un condenseur dans lequel circule de l'eau froide en provenance de la mer ou d'un fleuve. L'eau ainsi obtenue est récupérée et re-circule dans la chaudière pour recommencer un autre cycle.

La biomasse est utilisée comme source d'énergie, mais également pour l'alimentation, la fabrication de maisons ou de meubles. En matière d'énergie, on utilise deux types de biomasse.

IV.9.1.La biomasse sèche (solide):

Il s'agit de végétaux dont nous utilisons les sous-produits, principalement les écorces et le bois. Ils sont utilisés comme combustibles. Il est aujourd'hui possible, dans des installations spécifiques, de les transformer en gaz afin d'atteindre un meilleur rendement énergétique.

IV.9.2.La biomasse humide :

Ce sont tous les déchets organiques mouillés. Déchets verts frais, déchets ménagers, effluents d'élevage et déchets de l'industrie agroalimentaire. Ils sont utilisés pour la biométhanisation. Placés dans des digesteurs, les déchets produisent un gaz riche en méthane et à haute valeur énergétique.

IV.10. Énergie géothermique[20]:

L'énergie géothermique provient de l'accroissement de température au fur et à mesure que l'on pénètre plus profondément dans l'écorce terrestre, soit du fait du gradient naturel (3 °C/100 m), soit du fait de singularités géophysiques (réservoirs géothermiques naturels des roches poreuses à haute température).

On a coutume de distinguer trois grandes catégories de réservoirs, en fonction de leurs niveaux de température :

- ✓ la haute température (> 220 °C)
- ✓ la température intermédiaire (100 – 200 °C)
- ✓ la basse température (50 – 100 °C)

Dans le premier cas, le fluide géothermique peut être essentiellement constitué d'eau ou de vapeur, dans les deux autres il s'agit d'eau, éventuellement sous pression. Une des particularités du fluide géothermique est qu'il ne s'agit jamais d'eau pure : il comporte aussi de nombreuses impuretés, des sels corrosifs (la concentration limite pour qu'une exploitation soit possible est égale à 1,5 mol/kg) et des gaz non condensables (GNC) en quantité variable (0,1-10 %). Nous verrons que cette particularité impose des contraintes spécifiques quant aux cycles thermodynamiques qui peuvent être mis en oeuvre.

Pour des raisons environnementales, le fluide géothermique doit généralement être réinjecté dans le réservoir après utilisation, mais ce n'est pas toujours le cas.

IV.10.1. Conversion thermodynamique

La conversion thermodynamique de l'énergie géothermique fait appel à quatre principales techniques :

- ✓ les centrales dites "directes" peuvent être utilisées si le fluide géothermique est de la vapeur surchauffée qui peut être directement détendue dans une turbine. Historiquement, c'est ce type de centrale qui a été le premier mis en oeuvre, à Larderello en Italie dès 1904
- ✓ les centrales à vaporisation par flash permettent d'exploiter les sites où le fluide géothermique se présente sous forme de liquide pressurisé ou de mélange liquide-vapeur. C'est aujourd'hui le type de centrale le plus employé. Le fluide géothermique commence alors par être détendu dans une chambre à pression inférieure à celle du puits, ce qui permet d'en vaporiser une partie, qui est ensuite détendue dans une turbine.
- ✓ les systèmes dits binaires font appel à un fluide thermodynamique secondaire, qui suit un cycle de Rankine fermé, la chaudière étant constituée d'un échangeur de chaleur avec le fluide géothermique.

- ✓ les systèmes à mélange de fluides, du type cycle de Kalina, variante des systèmes binaires où le fluide thermodynamique n'est plus pur mais constitué de deux fluides afin de réaliser un glissement de température lors de la vaporisation.



Figure IV.27: Centrale géothermique d'Imperial County, Californie (Warren Gretz / NREL)

- [1] https://fr.wikipedia.org/wiki/Histoire_d'électricité.
- [2] S. Jean, « Electrotechnique Et Machines Electriques », Editions Eyrolles 61, Boulevard Saint-Germain, Paris, 1977.1976.
- [3] <http://www.sonelgaz.dz/>
- [4] Arnaud Berthonnet, « L'industrie électrique en Algérie — Le rôle des sociétés électriques et plus particulièrement d'EGA à partir de 1947 », Outre-mers, vol. 89, nos 334-335, 2002, p. 331-352
- [5] Jean-Claude Sabonnadière, « Histoire de l'électricité : de Thales à la consommation du 21e siècle » sur Encyclopédie de l'énergie, 8 octobre 2015 (consulté le 28 janvier 2019).
- [6] J. M.Martin-Amouroux, « Perspectives Energétiques Mondiales », Techniques De L'ingénieur, Be 8 515 -2004.
- [7] Article « Réseaux électriques » de l'Encyclopædia Universalis version 10
- [8] « Cahier des charges général – Lignes aériennes HTB – Ouvrages neufs », sur rte-france.com, RTE (consulté le 28 janvier 2015), p. 34-36.
- [9] « Cahier des charges général – Lignes souterraines HTB » [archive] [PDF], sur rte-france.com, RTE (consulté le 28 janvier 2015), p. 29.
- [10] Portail EDF : <http://energie.edf.com/thermique/une-energie-pour-demain/les-cycles-combines-gaz/>.
- [11] Exemple de CCGT à refroidissement par air : <http://www.3cb.fr/environnement-3ca/environnement-3ca>
- [12] Électricité en France : les principaux résultats en 2006, DGEMP / Observatoire de l'énergie.
- [13] Nuclear Energy Institute , « Nuclear Energy, Clean Air Energy to Power the Word », (consulté le 19-09-2017).
- [14] Antoine Pallière, « Les grandes centrales à vapeur et la distribution de l'électricité » , La Houille Blanche, no 5, 1906 [PDF], p. 107-114.
- [15] A.Labouret, M.Villoz, « Energie Solaire Photovoltaïque », Edition Dunod, Paris, 2006.
- [16] O. Gergaud, “ Modélisation Energétique Et Optimisation Economique D'un Système De Production Eolien Et Photovoltaïque Couplé Au Réseau Et Associé A Un Accumulateur’’, Thèse De Doctorat, Ecole Normale Supérieure De Cachan, Décembre 2002.
- [17] « Énergies renouvelables et de récupération » sur Driee Île-de-France, mars 2013.
- [18] « Énergies : Élisabeth Borne invite EDF à envisager un scénario « 100 % renouvelables » », Le Monde.fr, 10 novembre 2019.
- [19] Électricité : les énergies renouvelables sont de plus en plus compétitives, Les Échos, 7 novembre 2019.
- [20] L. Stoyanov «Etude De Différentes Structures De Systèmes Hybrides A Sources D'énergie Renouvelables » Thèse De Doctorat En Energetique, Université Technique De Sofia 2011.