CHAPITRE I
L'ÉNERGIE ET LES VARIABLES ÉNERGÉTIQUES

I.1. Introduction

Le mot « énergie » vient du grec « energeia », qui signifie « travail ou force en action ». L'énergie, c'est la capacité d'un système à produire des actions : générer un mouvement, de la lumière ou de la chaleur ; changer la température ou transformer la matière.

L'énergie est la grandeur qui permet de caractériser un changement d'état dans un système:

- Modification de la température (énergie thermique) ;
- Modification de la vitesse (énergie cinétique) ;
- Modification de la composition chimique (énergie chimique, combustion) ;
- Modification de la composition atomique (énergie nucléaire).

Dans un système clos, l'énergie se conserve en quantité. On ne peut donc pas « produire » de l'énergie, mais juste la transformer. (L'énergie après transformation est égale à celle avant transformation).

I.2 Les Différents Types D'énergies

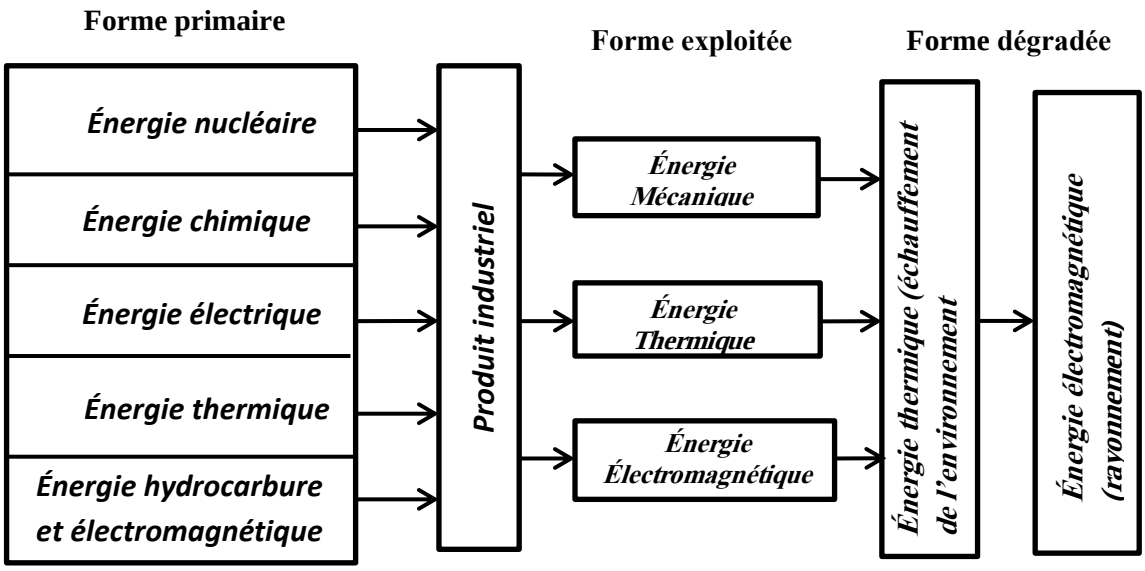
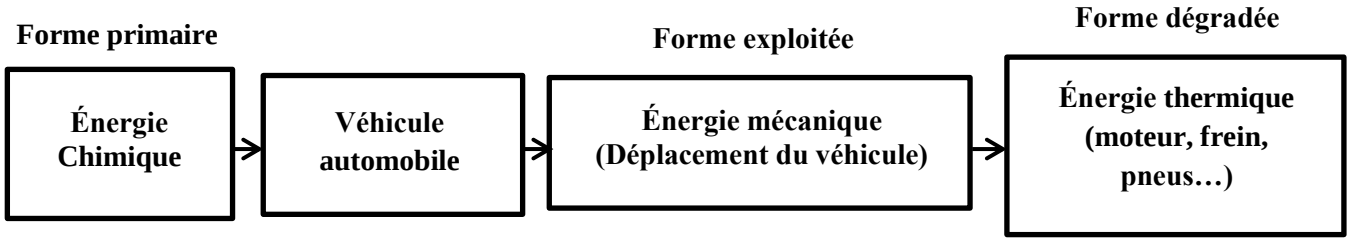


Figure.I.1. l'énergie dans tous ses états

Exemple



Les différentes sources d'énergie peuvent être classées en deux groupes :

I.2.1 Les énergies fossiles (non renouvelables)

L'homme dans sa vie quotidienne à besoin : pour se chauffer, pour stocker la nourriture, pour s'éclairer et pour manger. Cependant, même si la nature à stocker les combustibles fossiles pendant des centaines de millions d'années, ces derniers ne sont pas renouvelables et pollues notre monde. Depuis la révolution industrielle, nous avons utilisé une grande quantité d'énergies fossiles pour assurer notre développement économique. Au rythme où nous les consommons actuellement, il est pertinent de se demander combien de temps dureront ces réserves.

I.2.1.1 Qu'est-ce que les énergies fossiles

Les énergies fossiles, qui comprennent le charbon, le pétrole et le gaz sont issus de la matière vivante, végétale ou animale. Ces énergies contiennent du carbone dont la combustion fournit de l'énergie et génère du gaz carbonique. Elles sont présentes en quantité limitée et non renouvelable. Il existe de nombreuses énergies fossiles, voici quelques exemples:

I.2.1.2 Le pétrole

Le pétrole (L. petroleum, du mot grec petra, roche, et du latin oleum, huile) est une roche liquide carbonée, une huile minérale composée d'hydrocarbures plus ou moins légers et de divers composés organiques piégés dans des formations géologiques particulières. L'exploitation de cette énergie fossile est l'un des piliers de l'économie industrielle contemporaine, car le pétrole fournit la quasi-totalité des carburants liquides — fioul, gazole, kérosène, essence, GPL — tandis que le naphta produit par le raffinage est à la base de la pétrochimie, dont sont issus un très grand nombre de matériaux usuels — plastiques, textiles synthétiques, caoutchoucs synthétiques (élastomères), détergents, adhésifs, engrais, cosmétiques, etc. — et que les fractions les plus lourdes conduisent aux bitumes, paraffines et lubrifiants. Sa formation est un processus complexe et au rendement très faible. Il est formé du plancton qui s'est déposé au fond des mers

I.2.1.3 Le gaz

Tout comme le pétrole, est issu d'un processus complexe. L'utilisation de celui-ci est assez récente et est actuellement en plein développement; La consommation mondiale du gaz en 2000 a été 24,7% de la consommation mondiale d'énergie. Le gaz naturel est l'une des énergies fossiles qui rejette le moins de CO2 dans l'atmosphère. De plus, on remarque même, que si sa combustion était parfaite et totale, il n'y aurait que des rejets d'eau et de dioxyde de carbone.

I.2.1.4 Le charbon

Comme le pétrole et le gaz naturel, le charbon est une énergie fossile. Sa formation a débuté il y a plus de 350 millions d'années, par la transformation profonde de matière organique végétale.

I.2.2 Les Énergies Renouvelables

C'est une source d'énergie primaire inépuisable à très long terme, car c'est une source d'énergie issue directement, ou non, de l'énergie du Soleil, de la Terre ou de la gravitation.

Différentes énergies renouvelables sont : l'énergie solaire, l'énergie éolienne, énergie hydroélectrique, la géothermie, la biomasse.

I.2.2.1 Énergie solaire

- C'est une énergie renouvelable apportée par le rayonnement solaire, et exploitée pour produire de l'électricité ou de la chaleur.
- L'énergie solaire, est une énergie propre et inépuisable qui est exploitée de plusieurs façons : éclairage et chauffage "passif" des logements par le soleil.
- **Conversion thermodynamique de l'énergie solaire en électricité:** En concentrant les rayons du soleil par un disque parabolique, un capteur cylindre-parabolique ou un système de miroirs, il est possible d'atteindre une température suffisamment élevée pour générer de l'électricité via une turbine et un alternateur. Le prix de revient du kWh électrique devient intéressant (environ deux fois moindre que celui du photovoltaïque) pour de grandes installations, ce système est difficilement applicable pour de petites installations et son intégration dans le bâti n'est pas évidente.
- **Conversion photovoltaïque de l'énergie solaire:** L'effet photovoltaïque permet de convertir directement l'énergie lumineuse du soleil en électricité grâce à des semi-conducteurs. Bien que cette filière énergétique soit largement minoritaire dans les bilans énergétiques mondial, européen et français, son taux de croissance (30 à 60% par an) et la chute des coûts de production qui accompagne son développement depuis quelques années présage un potentiel de développement très élevé pour l'avenir.

Figure I.2. Panneaux solaire

I.2.2.2 Énergie éolienne

C'est l'énergie du vent et plus spécifiquement, l'énergie tirée du vent au moyen d'un dispositif aérogénérateur comme une éolienne ou un moulin à vent.

L'énergie éolienne peut être utilisée de deux manières :

- Conservation de l'énergie mécanique: le vent est utilisé pour faire avancer un véhicule, pour pomper de l'eau ou pour faire tourner la meule d'un moulin.
- Transformation en énergie électrique : l'éolienne est couplée à un générateur électrique pour fabriquer du courant continu ou alternatif. Le générateur est relié à un réseau électrique ou bien fonctionne de manière autonome avec un générateur d'appoint et/ou un parc de batteries ou un autre dispositif de stockage d'énergie.

L'énergie éolienne joue un rôle essentiel pour éviter les émissions de gaz à effet de serre et combattre le changement climatique. La capacité installée totale dans le monde atteint aujourd'hui 94 000 MW et permet d'éviter le rejet d'environ 122 millions de tonnes de CO2 dans l'atmosphère, équivalent au fonctionnement de 20 centrales à charbon.

Figure I.3. Schéma de principe de l'énergie éolienne

I.2.2.2 Énergie hydroélectrique

Les barrages hydroélectriques créent et fournissent l'énergie électrique. Ils sont faits de ciment et d'acier. La plupart ont plus de 30 mètres de haut, et certains atteignent même jusqu'à 150 mètres de haut.

Une centrale hydraulique utilise l'énergie fournie par une masse d'eau en mouvement pour produire de l'énergie électrique. Un barrage retient une grande quantité d'eau sous la forme d'un lac de retenue. Pour produire de l'électricité, les vannes du barrage sont ouvertes, de l'eau s'y engouffre dans une conduite forée dans le barrage, sa vitesse augmente. À la sortie de cette conduite, l'eau fait tourner une turbine qui entraîne elle-même un alternateur qui produit une tension alternative sinusoïdale. L'eau est ensuite libérée au pied du barrage et reprend le cours normal de la rivière. Plusieurs variantes des centrales hydrauliques existent. Certaines fonctionnent en exploitant l'énergie fournie par les marées ou par les vagues. Leur nombre reste toutefois très limité. Les centrales hydrauliques ont une puissance qui peut aller de quelques milliers de watts pour une centrale individuelle (destinée à alimenter une seule habitation) à 500 MW (mégawatts) pour un barrage d'importance.

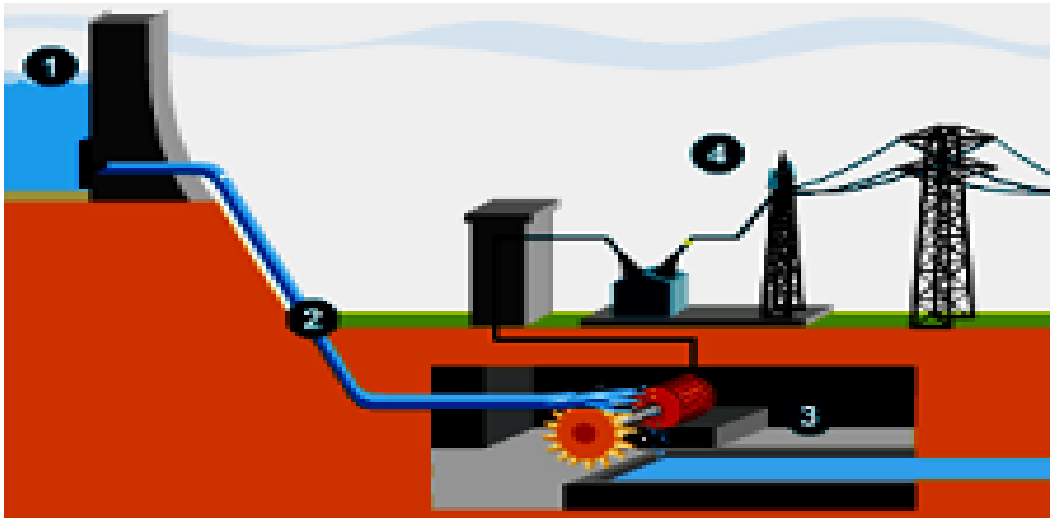


Figure I.4 Schéma de fonctionnement d'une centrale hydraulique

L'eau accumulée derrière un barrage est dirigée vers les turbines par des tuyaux appelés conduites forcées.

I.2.2.3 Énergie Biomasse

Définition : Ce terme désigne tous les matériaux organiques créés directement ou indirectement par photosynthèse, soit l'ensemble du monde vivant: végétaux, animaux et micro-organismes. C'est une forme d'énergie solaire.

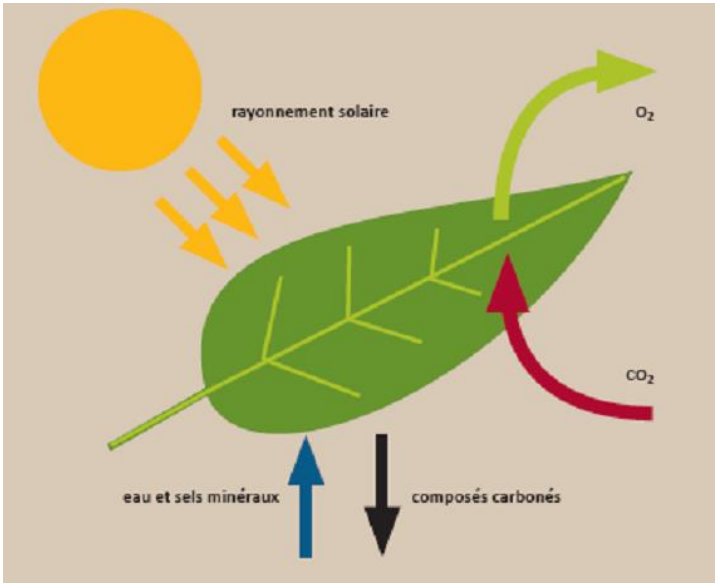


Figure I.5 Principe de la photosynthèse

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. Une partie de la vapeur est aussi récupérée pour être utilisée pour le chauffage. C'est ce que l'on appelle la cogénération. La vapeur fait tourner une turbine qui fait à son tour fonctionné 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, 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 ré-circule dans la chaudière pour recommencer un autre cycle. Les fumées de combustion sont dépoussiérées grâce à des filtres et sont évacuées par des cheminées.

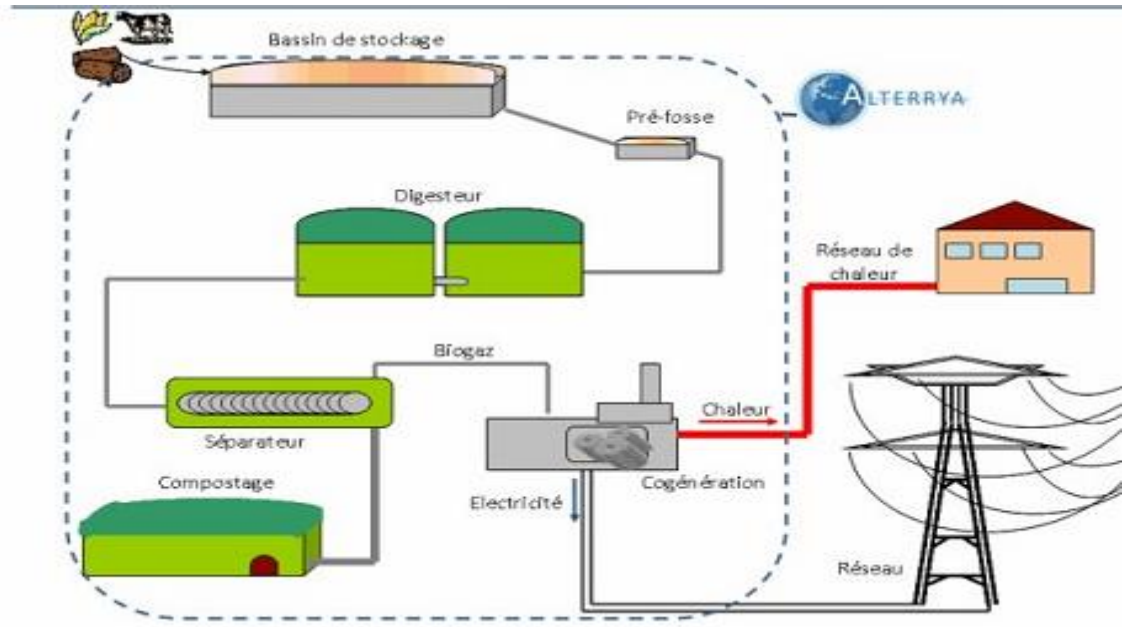
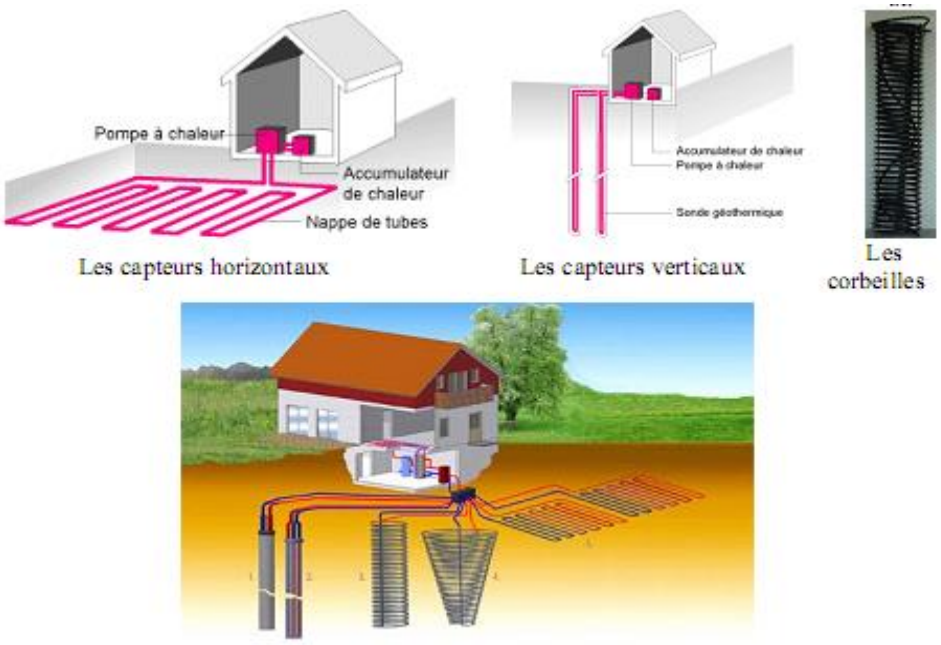


Figure I.6 Schéma de principe d'une usine biomasse

I.2.2.4 Énergie Géothermie

La Terre est un réservoir à fort potentiel énergétique. On observe sur la totalité du globe une élévation de la température au fur et à mesure que l'on fore vers le noyau terrestre, c'est le gradient géothermique. En moyenne il est de l'ordre de 30° par kilomètres de profondeur et le flux géothermique associé (quantité de chaleur transmise par conduction puis dissipée par unité de surface) est de 60 mW/m². Ces valeurs moyennes varient en fonction de la nature du sol et de la proximité d'une zone instable telle qu'une faille géologique, zone volcanique etc.…

L'extraction de l'énergie géothermique peut être divisée en quatre catégories organisées en niveaux de température : la haute température, la moyenne température, la basse température et la très basse température. Seuls les sites à hautes et moyennes températures sont susceptibles de permettre la production d'électricité tandis que les sites aux basses températures qui utilisent des nappes d'eau chaude du sous-sol profond et aux très basses températures qui utilisent des pompes à chaleur permettent la production de chaleur.



(1) Capteurs verticaux (tube en U), (2) Capteurs verticaux (tube en double U), (3,4) corbeilles, (5) capteurs horizontaux.

Figure I.7 Quelques échangeurs thermiques utilisés pour la géothermie à très

I.3 Unités D'énergie et Puissance

L'énergie se note W ou E. Elle s'exprime en Joule (J).

Dans certains cas, on utilise d'autres unités :

- l'électronvolt : 1 eV = $1{,}6.10^{-19}$ J
- la calorie : 1 cal = 4,18 J
- la thermie : 1 Th = 1000000 cal
- la tonne équivalente pétrole : 1 TEP = 42 GJ
- le wattheure : 1 Wh = 3600 J

La variation d'énergie (**ΔE**) d'un système est égale à la chaleur produite (**Q**) et au travail changé avec le milieu extérieur (**W**)

$$\mathbf{\Delta E = Q + W}$$

I.3.1 Énergie mécanique

Le joule correspond au travail (**W**) d'une force de 1 newton se déplaçant (**ΔX**) de 1 mètre dans la direction de la force (**F**). L'énergie est donc le produit d'une force par un déplacement.

$$\mathbf{W = F.\ \Delta X}$$

W : énergie en joules (J)

F : force en newtons (N)

ΔX : longueur du déplacement en mètres (m)

La force est égale à la masse (**m**) par l'accélération (**a**) (**F= m. a**) ou à la masse (**m**) par la gravité (g = 9,8 m/s^2), si on soulève un objet à vitesse constante (**F = m. g**).

I.3.2 Énergie électrique

L'énergie électrique est l'énergie fournie sous forme de courant électrique à un système électrotechnique ou électronique. L'électricité est directement utilisable pour effectuer un travail : déplacer une charge, fournir de la lumière, chauffer,…etc.

I.3.3 Relation entre puissance et énergie électrique

Prenons une seringue, remplissons-la d'eau et appuyons sur le piston pour faire sortir l'eau. Plus on veut faire sortir d'eau en une seconde, plus il faudra appuyer fort sur le piston. Si l'eau représente la quantité d'énergie, la force que l'on va mettre sur le piston est l'image de la puissance. La puissance (**P**) est donc égale à l'énergie dépensée (**E**) (produite, absorbée ou transformée) par rapport au temps écoulé (**t**).

$$\mathbf{P = E/\Delta t}$$

P : puissance en watts (W)

E : énergie en joules (J)

Δt : temps en secondes (s)

Une ampoule de 60 W signifie qu'elle transforme 60 joules d'énergie électrique en énergie lumineuse et en chaleur chaque seconde.

I.3.4 Loi d'Ohm

En électricité, 1 joule est aussi le travail (**W**) fourni par un circuit électrique pour faire circuler un courant (**I**) de 1 ampère à travers une résistance de 1 ohm (**R**) pendant 1 seconde.

$$\mathbf{E = R.\ I^2.t}$$

E : énergie en joules (J)

R : résistance en ohms

I : courant en ampères (A)

t : temps en secondes (s)

Un joule est aussi égal au travail (**W**) fourni par un courant (**I**) de 1 ampère traversant un circuit dont la différence de potentiel (**U**) est de 1 volt aux bornes du circuit, pendant 1 seconde.

$$\mathbf{E = \Delta U.\ I.\ t}$$

E : énergie en joule (J)

ΔU : différence de potentiel en volt (V)

I : courant en ampère (A)

t : temps en seconde (s)

I.4 Magnétostatique

Définition : la magnétostatique est l'étude des phénomènes magnétiques statiques, générés par des courants constants uniquement (courant continu) est des aimants.

Soit un circuit magnétique entouré par un circuit électrique (voir figure 1.5). Le circuit est alimenté par le courant **i(t)** et la tension `a ses bornes est **v(t)**. Dans l'hypothèse d'un matériau magnétique linéaire (en absence de saturation), le flux φ coupé par les spires est proportionnel au courant : $\emptyset(t) = Li(t)$ou **L** est le coefficient d'auto-inductance (ou simplement inductance). En absence de perte, la tension aux bornes du circuit est donnée par la loi de Lenz : $v(t) = \frac{d\emptyset}{dt} = L\frac{di(t)}{dt}$. L'énergie magnétique stockée est $\mathbf{W_m}$. On peut l'écrire comme une fonction du courant : $W_m(i) = \frac{1}{2}Li^2(t)$; ou comme une fonction du flux : $W_m(\emptyset) = \frac{\emptyset^2(t)}{(2L)}$. Ces deux fonctions $W_m(i)\ et\ W_m(\emptyset)$ représentent la même grandeur physique mais différent du point de vue mathématique.

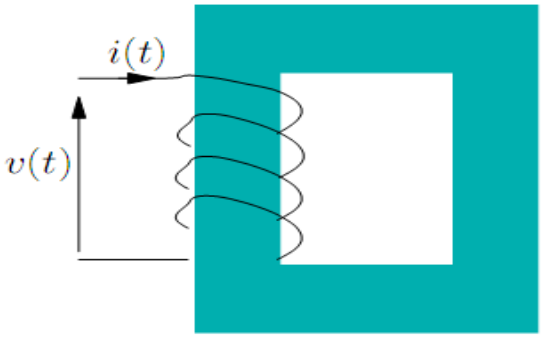


Figure I.8 Bobine d'inductance

I.4.1 Production de couple et de force

I.4.1.1 Production de couple

Soit un système électromécanique comportant un degré de liberté en rotation et comportant un circuit électrique. Le circuit électrique est soumis à la tension **u(t)** et est traverse par le courant **i(t)** en convention récepteur. On note **ϕ** le flux total le traversant. La partie en rotation est à la position angulaire **θ** et applique un couple **C** à une charge mécanique. Le système reçoit de la puissance électrique, fournit de la puissance mécanique et peut stocker de l'énergie magnétique $\mathbf{W_m}$. Le bilan de d'énergie pendant un intervalle de durée **dt** donne :

$$dW_m = u(t)i(t)dt - C\Omega\mathrm{dt}$$

Ou $\Omega = \frac{d\theta}{dt}$. Avec $u = \frac{d\emptyset}{dt}$, on obtient : $dW_m = i(t)d\emptyset - Cd\theta$

Supposons que l'énergie magnétique puisse s'exprimer comme une fonction de **ϕ** et **θ** :

W_m (ϕ, θ) ; cela revient à prendre **ϕ** et **θ** comme variables d'état et à poser que **W_m** est une fonction d'état. La dernière équation implique alors :

$$\frac{\partial W_m(\emptyset,\theta)}{\partial \emptyset} = i(t)\ et\ \frac{\partial W_m(\emptyset,\theta)}{\partial \theta} = -C$$

La première de ces deux équations signifie que l'énergie magnétique est l'intégrale de **d ϕ** à **θ** constant. La seconde montre qu'un couple est produit par le système, correspondant à une variation à flux constant de l'énergie magnétique : $C = -\frac{\partial W_m(\emptyset,\theta)}{\partial \theta}$

Dans le cas du régime linéaire (absence de saturation magnétique), le flux est proportionnel au courant et on peut donc écrire $\emptyset = L(\theta)i(t)$ ou l'inductance **L** dépend ici de la position du rotor. L'énergie magnétique s'écrit$W_m = \frac{1}{2}L(\theta)i^2 = \frac{\emptyset^2}{2L(\theta)}$. Pour calculer le couple, c'est la seconde expression qu'il faut considérer, c'est-à-dire$W_m(\emptyset,\theta) = \frac{\emptyset^2}{2L(\theta)}$. On obtient alors :

$$C = \frac{\emptyset^2}{2L^2(\theta)}\frac{dL(\theta)}{d\theta} = \frac{i^2}{2}\frac{dL(\theta)}{d\theta}$$

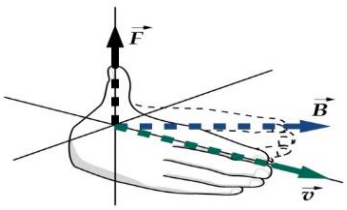
I.4.1.2 Production de Force

I.4.1.2.1 Loi de Lorentz

Une particule de charge **q** et de vitesse **V** se déplaçant dans une région où règne un champ magnétique **B** est soumise à une force dite de Lorentz telle que :

$$\vec{F} = q(\vec{E} + \vec{v} \wedge \vec{B})$$

$$\vec{F} = q\vec{E} + q(\vec{v} \wedge \vec{B}) = \vec{F}_e + \vec{F}_m$$



Avec :

$\vec{F}_e = q\vec{E}$ est force électrique

Si q=0 $\Rightarrow \vec{F}_e = 0$ La force électrique s'annule si la charge est nulle.

$\vec{F}_m = q(\vec{v} \wedge \vec{B})$, est la force magnétique

La force magnétique s'annule si la charge est nulle ou immobile.

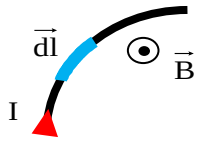
L'induction magnétique n'exerce de force que sur une particule chargée en mouvement (ou un courant) et La force magnétique n'agit que sur une charge en mouvement, ou un conducteur traversé par un courant.

I.4.1.2.2 Loi de Laplace

Un élément de longueur dl orienté dans le sens du courant qui le traverse placé dans le champ B. Soit dQ la charge totale des électrons libres contenus dans dl

La force magnétique totale s'exerçant sur l'ensemble des électrons dans dl

$$\left.\begin{aligned} \overrightarrow{dF} &= dQ.\vec{v} \wedge \vec{B} \\ I &= \frac{dQ}{dt} \end{aligned}\right\} \quad \overrightarrow{dF} = I.dt.\vec{v} \wedge \vec{B} \quad \vec{v} = \frac{\overrightarrow{dl}}{dt}$$



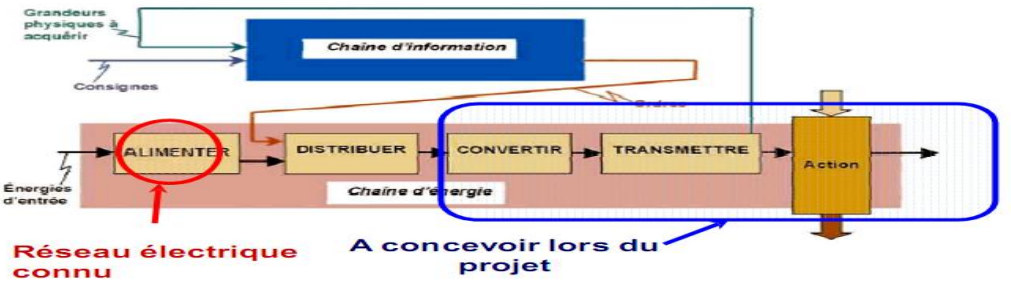
$$\overrightarrow{dF} = I.dt.\frac{\overrightarrow{dl}}{dt} \wedge \vec{B}$$

Force de Laplace s'exerçant sur l'élément de courant dl est : $\overrightarrow{dF} = I.d\vec{l} \wedge \vec{B}$

La force de Laplace est la résultante des forces magnétiques de Lorentz qui s'appliquent aux électrons de conduction qui forment le courant électrique d'intensité I.

I.5 Chaîne De Puissance

On peut décrire un système par ses fonctions génériques, parmi lesquelles se retrouvent « convertir et transmettre la puissance » au cœur de la chaîne de puissance (ou chaîne d'énergie).



On s'intéresse ici uniquement aux fonctions génériques convertir et transmettre la puissance sous l'aspect « puissance »

Voici une description détaillée d'une chaîne de puissance sans la partie « Action ».

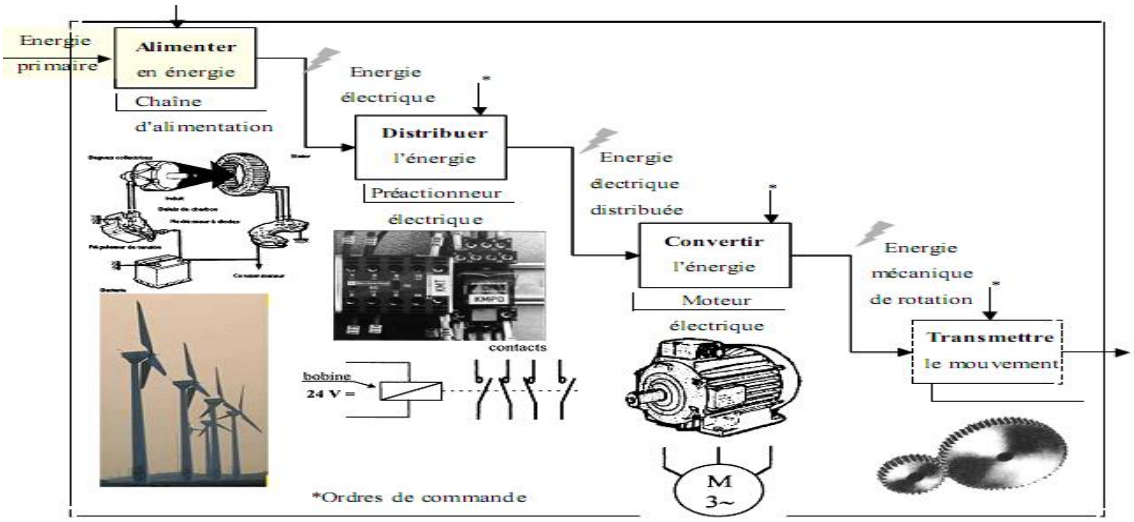


Figure I.9 description détaillée d'une chaîne de puissance

Le plan de puissance est un outil descriptif de la puissance émise, transmise ou reçue par un système électromécanique. Il se présente sous la forme d'un graphique (Action Vitesse) où l'Action est un effort (N) ou un couple (N.m) et la Vitesse est linéaire (m/s) ou de rotation (rad/s). On peut remarquer que le produit (Action x Vitesse) est homogène à une puissance : **Puissance = Action x Vitesse**

La figure ci-dessous représente un schéma bloc d'un système.

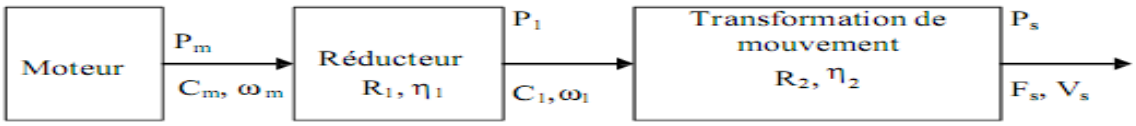


Figure I.10 Exemple d'un schéma bloc d'un système

I.6 Puissances En Régime Sinusoïdal

I.6.1 Régime monophasé

A/ Puissance instantanée

C'est le produit de la tension instantanée aux bornes du dipôle, u(t) et de l'intensité instantanée qui le traverse, i(t) :

$$\boxed{p(t) = u(t).i(t)}$$

Comme u(t)et i(t) dépendent du temps, la puissance instantanée est aussi fluctuante, sa valeur à une instante donnée importante peu, seule sa valeur moyenne à un intérêt.

B/ Puissance active

La puissance active se note **P**. Il s'agit de la valeur moyenne de la puissance instantanée :

P = p(t) = u(t).i(t), Où **u** est la tension aux bornes du dipôle considéré et **i** l'intensité du courant qui le traverse.

Si **u** et **i** sont sinusoïdaux tel que :
$$\begin{cases} i(t) = I.\sqrt{2}\sin\omega t \\ u(t) = U.\sqrt{2}\sin(\omega t+\varphi) \end{cases}$$

Alors la puissance active peut s'écrire sous la forme $\boxed{P = U.\,I.\cos\varphi}$ avec **P** en *Watt (W)*.

Où **U** est la valeur efficace de la tension aux bornes du dipôle, **I** la valeur efficace de l'intensité traversant le dipôle et **φ** le déphasage courant tension du dipôle.

La puissance active est la puissance qui sera transformé sous une autre forme dans l'appareil considéré. C'est elle qui « transporte » l'énergie. C'est elle qui apparaît dans les bilans de puissances.

C/ Puissance apparente

La puissance apparente se note **S**.

$\boxed{S = U.I}$ où **S** s'exprime en *Volt- Ampère (VA)*

La puissance apparente sert au dimensionnement des appareils électriques tels les transformateurs ou les alternateurs, elle n'intervient pas dans le transfert de puissance.

D/ Puissance réactive

La puissance réactive se note **Q**.

$\boxed{Q = U.\ I.\ \sin\varphi}$ où **Q** s'exprime en *Volt-Ampère-réactif (VAR).*

La puissance réactive rend compte de l'aspect inductif (elle est positive) ou capacitif (elle est négative) du composant considéré, elle n'intervient pas dans le bilan de puissance. En général, il est souhaitable qu'elle soit la plus faible possible.

E/ Relations entre les puissances

$\boxed{S^2 = P^2 + Q^2} \Rightarrow \boxed{S = \sqrt{P^2+Q^2}}$

$\boxed{Q = P \tan\varphi}$

Ces relations se retrouvent dans le triangle des puissances (voir Figure I.10).

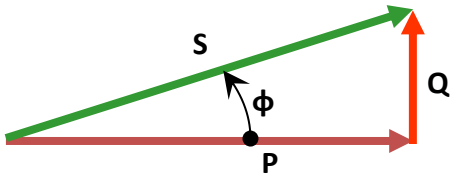


Figure I.11 Triangle des puissances

F/ Facteur de puissance

Le facteur de puissance est défini par : $\boxed{f_p = \frac{P}{S}}$ Il s'agit d'un nombre sans dimension toujours inférieur à **1**. On peut le voir comme le résultat du calcul suivant :

$\boxed{f_p = \frac{utilisation}{investissement}}$ où **P** représente la puissance active effectivement utilisée dans le transfert de puissance et **S**, la puissance apparente qui représente la tension et le courant effectivement investis pour le fonctionnement de l'appareil.

Il est donc souhaitable que le facteur de puissance soit le plus proche de *1* possible. Pour cela, on relèvera éventuellement sa valeur.

Dans le cas particulier des régimes sinusoïdaux : $f_p = \frac{P}{S} = \frac{UI\cos\varphi}{UI} \Rightarrow \boxed{f_p = \cos\ \varphi}$

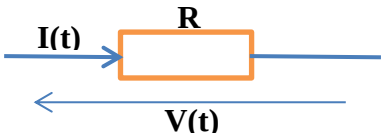
G/ Retour aux dipôles élémentaires

1. La résistance

$\varphi = 0 \Rightarrow$ $\boxed{\cos\varphi = 1}$; $\sin\varphi = 0 \Rightarrow$ $\boxed{P = U.I = S;\ Q = 0}$

Un circuit résistif n'absorbe pas de puissance *réactive*, il n'absorbe que de la puissance *active*. Son facteur de puissance est égal à **1**.

$$\boxed{P = RI^2 = U^2/R}$$

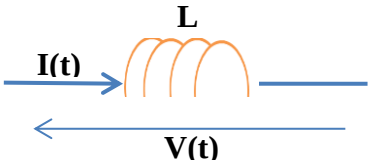


2. L'inductance

$\varphi = \pi/2 \Rightarrow$ $\boxed{\cos\varphi = 0}$; $\sin\varphi = 1 \Rightarrow$ $\boxed{P = 0;\ Q = U.I = S}$

Une inductance n'absorbe pas de puissance *active*, il n'absorbe que de la puissance ré*active*. Son facteur de puissance est égal à **0**.

$$\boxed{Q = L.\omega.I^2 = U^2/(L.\omega)}$$

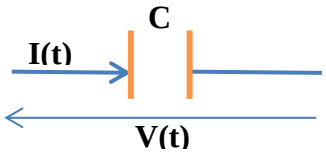


3. Le condensateur

$\varphi = -\pi/2 \Rightarrow$ $\boxed{\cos\varphi = 0}$; $\sin\varphi = -1 \Rightarrow$ $\boxed{P = 0;\ Q = -U.I = -S}$

Un condensateur n'absorbe pas de puissance *active*, il fournit de la puissance ré*active*. Son facteur de puissance est égal à **0**.

$$\boxed{Q = -(1/(C.\omega)).I^2 = -C.\omega.U^2}$$



I.6.2 Régime triphasé

Le régime triphasé est caractérisé par une valeur efficace identique sur les trois phases et un déphasage de **2π/3** entre chacune des phases. Par exemple, en prenant la tension $v_a(t)$ comme référence des phases, on a pour les tensions simples (entre phase et neutre) :

$$\begin{cases} v_a(t) = V\sqrt{2}\cos(\omega t) \\ v_b(t) = V\sqrt{2}\cos(\omega t - \dfrac{2\pi}{3}) \\ v_c(t) = V\sqrt{2}\cos(\omega t - \dfrac{4\pi}{3}) \end{cases}$$

Et pour les courants :

$$\begin{cases} \boldsymbol{i_a(t) = I\sqrt{2}cos(\omega t - \varphi)} \\ \boldsymbol{i_b(t) = I\sqrt{2}cos(\omega t - \varphi - \frac{2\pi}{3})} \\ \boldsymbol{i_c(t) = I\sqrt{2}cos(\omega t - \varphi - \frac{4\pi}{3})} \end{cases}$$

Ou la valeur efficace des tensions composées est : **U =√3 V**

La puissance instantanée est constante identique à la puissance active :

$$\boxed{\boldsymbol{P = p(t) = \sqrt{3}UIcos(\varphi)}}$$

On aussi : $\begin{cases} Q = \sqrt{3}UIsin(\varphi) \\ S = \sqrt{3}UI \\ f_p = \cos(\varphi) \end{cases}$

I.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les différentes sources d'énergies non renouvelables et renouvelables et de leurs modes d'utilisation d'énergie, nous avons ensuite fait la magnétostatique des phénomènes magnétique statique, Ensuit nous terminons ce chapitre par la puissance en régime sinusoïdale.

CHAPITRE II
LA CONVERSION D'ÉNERGIE ÉLECTROMÉCANIQUE

II.1 Introduction

Les systèmes utilisés en Électrotechnique permettent de transformer la nature de l'énergie électrique et de convertir l'énergie électrique en une autre forme d'énergie (mécanique, thermique, chimique, lumineuse, …). L'électronique, l'automatique et l'informatique s'intéressent essentiellement au traitement du signal (ou de l'information).

Les systèmes de l'électrotechnique traditionnelle (machines tournantes, éclairage, chauffage, climatisation, …) permettant la conversion de l'énergie électrique, ne peuvent pas toujours être reliés directement à une source électrique. Il faut alors avoir recours à un dispositif, jouant le rôle d'interface, permettant d'adapter (de transformer) les caractéristiques de la source afin d'assurer le bon fonctionnement (et d'introduire des moyens de réglage de transfert d'énergie). Ce dispositif est un convertisseur électrique.

Lorsque l'interface est réalisée par des moyens purement électroniques (semi-conducteurs), elle est alors appelée convertisseur statique. Ces convertisseurs statiques peuvent se trouver aussi bien discipline technologique associée à ces réalisations est appelée Électronique de Puissance.

II.2 Les Convertisseurs Statiques

Un convertisseur statique est dit réversible lorsque l'énergie, peut transiter (en général, être contrôlée) de manière bidirectionnelle, c'est à dire aussi bien dans un sens que dans l'autre. Les notions d'entrée et de sortie ne sont alors plus évidentes. Un convertisseur non réversible transfère l'énergie d'une source vers une charge utilisatrice.

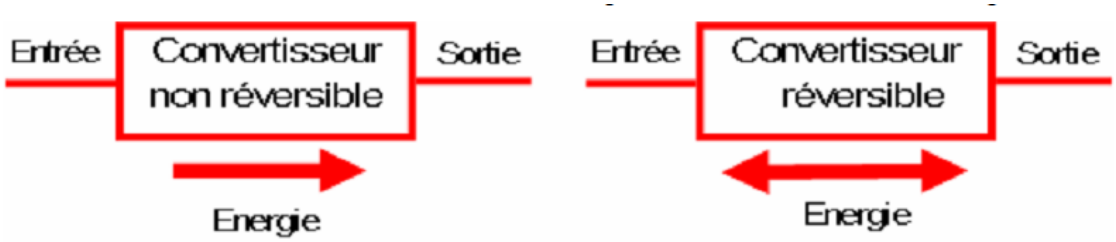


Figure II.1 : Réversibilité (et non réversibilité) des convertisseurs statiques

II.2.1 Conversion continu / continu (DC / DC): est dispositif de l'électronique de puissance mettant en œuvre un ou plusieurs interrupteurs électroniques commandés ce qui permet de modifier la valeur de la tension (moyenne) d'une source de tension continue.

Applications

- alimentation à découpage (ordinateur, mobile …)
- alimentation pour moteur à courant continu

Le hacheur permet de transférer l'énergie d'une source de tension continue (batterie d'accumulateur, alimentation stabilisée, etc.) vers une charge de type source de courant (moteur à courant continu).

Lors des phases de freinage, on peut récupérer une partie de l'énergie cinétique en faisant transiter la puissance de la MCC vers la source (fonctionnement génératrice).

Le convertisseur devra alors être réversible en courant et / ou tension.

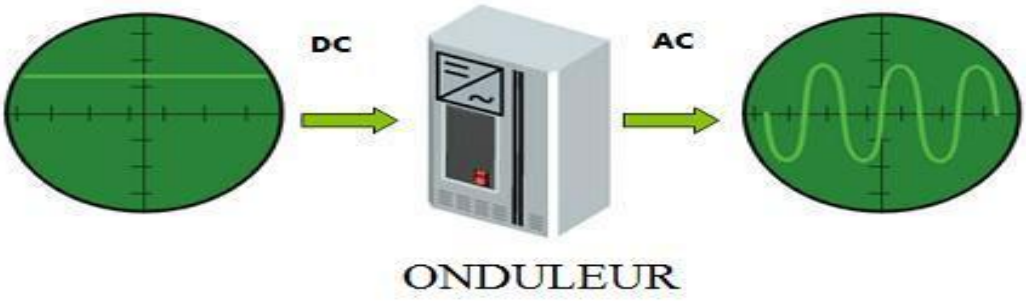
On rencontre ces convertisseurs dans la chaîne d'énergie des produits industriels suivants:

II.2.2 Conversion continu / alternatif (DC / AC):

Le convertisseur jouant le rôle d'interface entre une source continue et une charge alimentées suivant le type de charge, ce convertisseur est appelé onduleur autonome ou assisté. Dans le dernier cas, le convertisseur est composé de thyristors, sa structure est la même que le redresseur réversible (AC-DC / DC-AC).

Applications

- alimentation de secours (+ groupe électrogène)
- variateur de vitesse pour moteur asynchrone ...



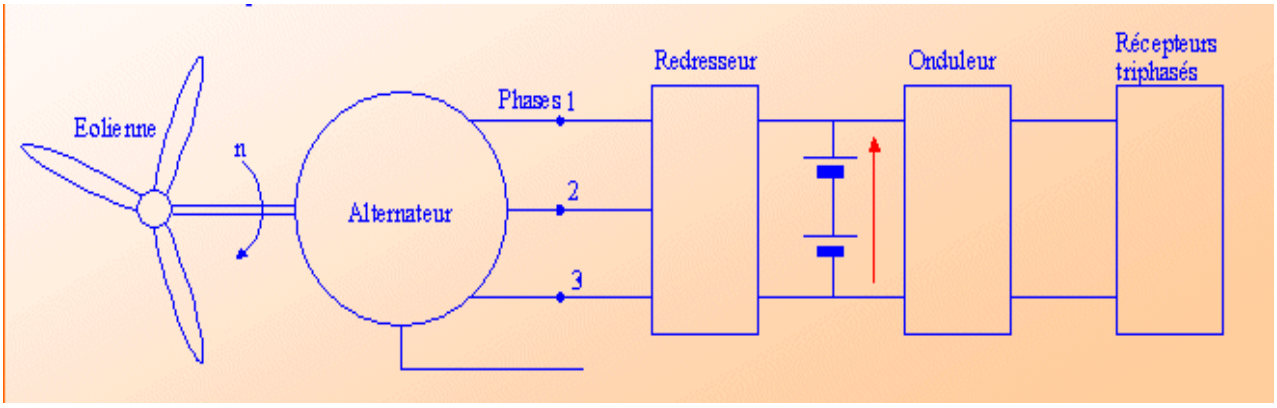
II.2.3 Conversion alternatif / continu (AC / DC) :

Le convertisseur jouant le rôle d'interface entre une source alternative et une charge alimentée en continu, est appelé : Redresseur (Rectifier).

Le plus souvent, il est alimenté par le réseau à fréquence industrielle. La tension (ou le courant) de sortie peut être, ou non, réglable par rapport à la grandeur d'entrée (tension ou courant).

Applications

- alimentation continue (pour circuits électroniques)
- alimentation pour moteur à courant continu
- chargeur de batteries ...



II.2.4 Conversion alternatif / alternatif (AC / AC) :

Ces convertisseurs permettent d'obtenir une tension alternative variable de fréquence constante ou variable, à partir d'une source alternative. Trois types sont possibles:

1. Soit convertir une tension alternative de valeur efficace fixe en une tension alternative variable. C'est le gradateur.

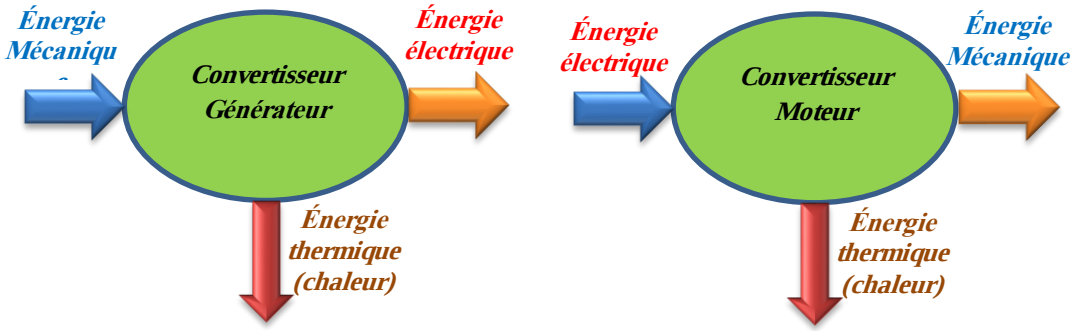
2. Soit convertir une tension alternative de valeur efficace fixe en une tension alternative de valeur efficace variable et de fréquence variable inférieure à la fréquence de la source. C'est le cyclo-convertisseur.
3. Soit convertir une tension alternative de valeur efficace fixe en une tension alternative de valeur efficace variable avec tension et fréquence variable. La fréquence de la tension de sortie peut être supérieure ou inférieure à la fréquence de la source. C'est un convertisseur alternatif-continu-alternatif: un redresseur commandé est utilisé pour obtenir une tension continu variable; et un onduleur est utilisé pour obtenir, à partir la tension continu, une tension de sortie à tension et fréquence variable.

Applications

- variateur de lampe halogène
- variateur de vitesse pour moteur universel ...

II.3 Convertisseurs Électromécaniques (Convertisseurs Tournants)

Un convertisseur électromagnétique ou "machine tournante" effectue une transformation entre l'énergie électrique et l'énergie mécanique. Deux régimes de fonctionnement peuvent alors exister :

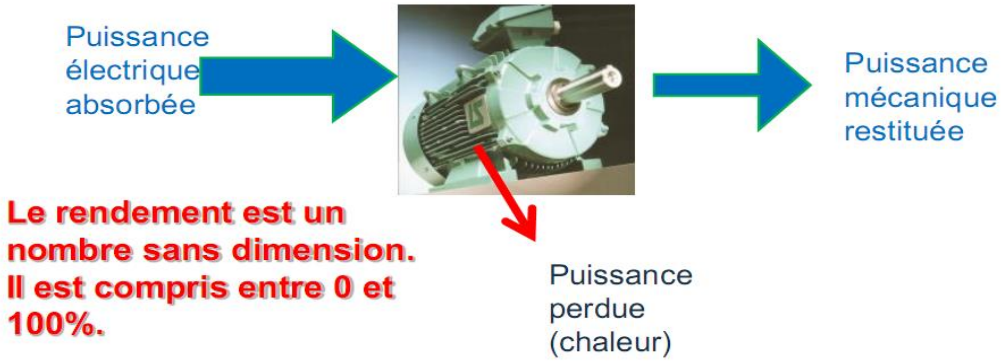


Différents types des convertisseurs tournantes sont:

II.3.1 Convertisseur À Courant Continu (CC)

La machine à courant continu est un convertisseur d'énergie, totalement réversible, elle peut fonctionner soit en moteur, convertissant de l'énergie électrique en énergie mécanique, soit en génératrice, convertisseur de l'énergie mécanique en énergie électrique. Dans les deux cas un

champ magnétique est nécessaire aux différentes conversions. Cette machine est donc un convertisseur électromagnétique.



II.3.1.1 Constitution d'une machine à courant continu

La machine à courant continu est réversible, c'est-à-dire que la constitution d'une génératrice est identique à celle du moteur.

Elle se compose de deux parties :

- **L'inducteur (ou le stator)** : Il s'agit de la partie fixe de la machine. Elle peut être formée d'aimants en ferrite ou de bobines, en général disposées autour de noyaux polaires. Sur ces pièces polaires se trouvent des enroulements qui parcoururent par un courant continu, créent le champ d'induction magnétique. Elle comprend également la carcasse.

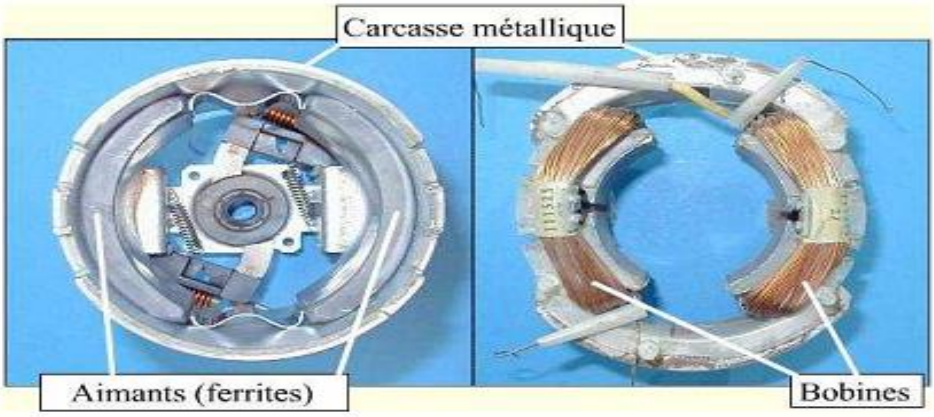


Figure II.1 : Schéma de principe de l'inducteur

- **L'induit (ou le rotor)** : Il s'agit de ma partie mobile ou tournante de la machine. Elle se compose d'un cylindre feuilleté constitué par un empilement de tôles. À la périphérie de ce cylindre, se trouvent des dentures entre lesquelles il y a des encoches à l'intérieur desquelles se trouvent des conducteurs qui constituent l'enroulement de l'induit et qui sont regroupés par des spires dont les extrémités se referment sur un

collecteur. L'induit est donc un circuit électrique obtenu en associant en série des conducteurs logés dans des encoches du rotor.

Le schéma ci-dessous montre la liaison électrique entre un rotor à deux pôles et la source de tension continue:

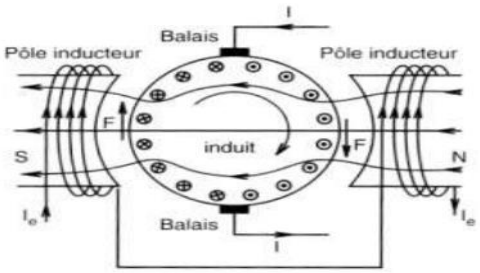
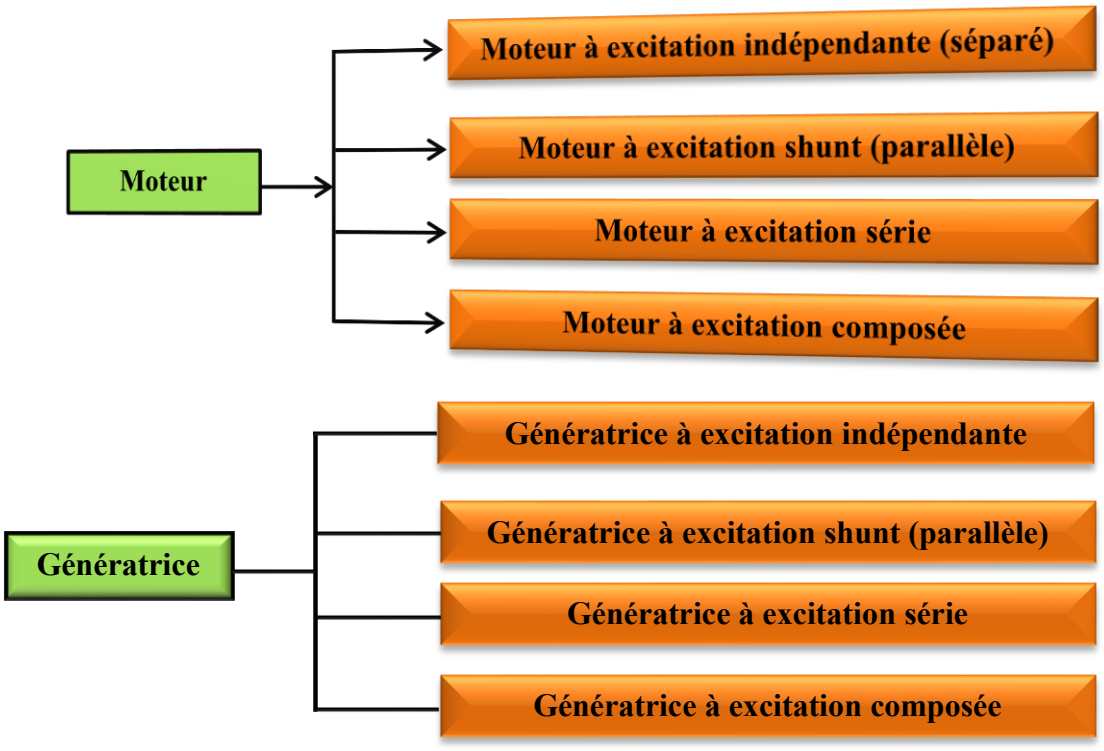


Figure II.2 : Schéma de principe de l'induit

II.3.1.2 Type des convertisseurs à courant continue

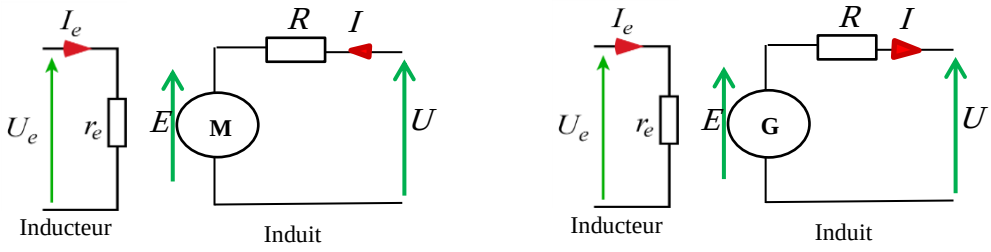
Suivant l'application, le bobinage de l'inducteur et de l'induit la machine à courant continu peuvent être connectée de manière suivante :



II.3.1.3 Modèle équivalent

A/ Excitation indépendante

Ce moteur est appelé **moteur à excitation indépendante** car il n'y a aucun lien électrique en l'induit et l'inducteur.



Avec :

r_e résistance de l'enroulement inducteur (Ω).

U_e Tension d'alimentation de l'inducteur (V).

I_e courant dans l'inducteur (A).

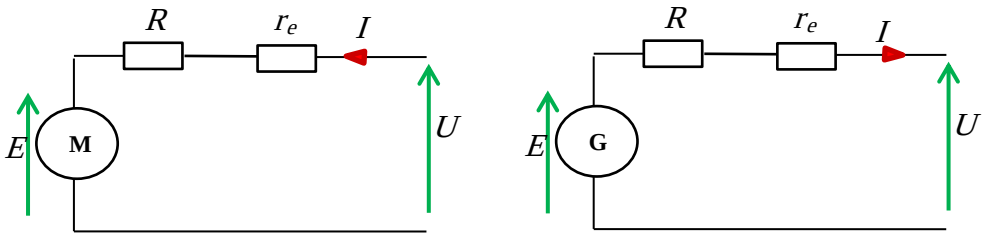
E f.e.m. du à la rotation dans le champ inducteur (V).

R résistance des enroulements induit (Ω).

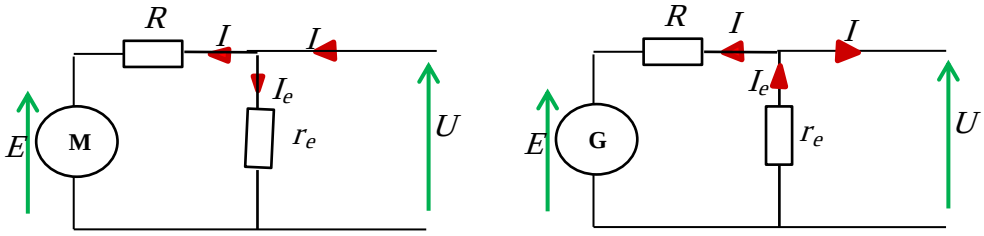
U tension d'alimentation de l'induit (V).

I courant dans l'induit (A).

B/ Excitation série : dans un moteur à excitation série, l'inducteur est parcouru par le même courant que l'induit.



C/ Excitation shunt : On peut utiliser une seule tension d'alimentation pour l'induit et l'inducteur, il suffit de placer le bobinage inducteur en parallèle avec l'induit et les alimentant par une source de tension.



II.3.1.4 Couple et Puissance d'une machine à courant continue

A/ <u>Force électromotrice :</u>

Une bobine (l'induit) en mouvement dans un champ magnétique (l'inducteur) voit apparaître à ses bornes une **force électromotrice** (f.é.m.) donnée par la :

Loi de Faraday $e = -\frac{\partial \varphi}{\partial t}$

Sur ce principe, l'induit de la machine à courant continu est le siège d'une f.é.m. E :

$$E = K\Phi\Omega$$

Avec :

***E*:** f.e.m (volts -V)

***K* :** constante qui dépend des caractéristiques de fabrication du moteur : nombres de spires, nombre de pôles, inclinaison des encoches, …

Φ: flux magnétique maximum traversant les enroulements de l'induit (Webers - Wb).

***Ω* :** vitesse de rotation du rotor (rad.s^{-1}).

B/ <u>Couple électromagnétique :</u>

Un conducteur parcouru par un courant électrique et placé dans un champ magnétique subit la :

$$\text{Force de Laplace } \vec{F} = I.\vec{l} \wedge \vec{B}.$$

Sur ce principe le rotor de la machine possède un couple que l'on nommera **couple électromagnétique**.

$$T_{em} = K\Phi I$$

Avec :

***T_{em}*:** couple électromagnétique (N.m).

***I* :** courant dans l'induit (rotor) (A).

C/ <u>Conversion de puissance</u> :

La **puissance électromagnétique** est la partie de la puissance électrique de la machine, convertie en puissance mécanique.

$$P_{em} = EI = T_{em}\Omega$$

Forme électrique — *Forme mécanique*

D/ <u>Puissance absorbée et Puissance utile :</u>

Il s'agit de puissance électrique :

$$P_a = P_{a\ induit} + P_{a\ inducteur}$$

$$P_a = UI + U_e I_e$$

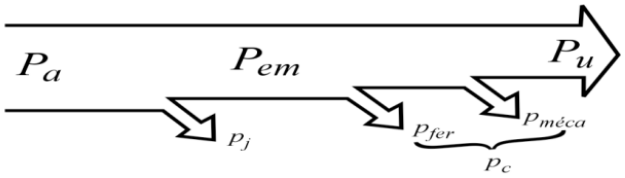
P_a : Puissance absorbée

Et il s'agit d'une puissance mécanique de rotation :

$$P_u = T_u\Omega$$

P_u : Puissance utile et T_u : couple utile

E/ <u>Bilan des puissances :</u>



- Bilan complet : $P_a = P_u + p_j + p_c$
- Bilan intermédiaire : $P_u = P_{em} - p_c$

Avec :

$\boldsymbol{p_C}$: Perte « Constantes » ou « collectives ». C'est-à-dire que si le moteur travaille à vitesse et flux constants, les pertes fer et mécaniques sont approximativement constantes. Elles ne varient pas avec la charge. $p_C = p_{fer} + p_{méca}$

Pertes	**<u>Pertes magnétiques</u>** p_{fer} ou pertes ferromagnétiques ou pertes fer	**<u>Pertes par effet joule</u>** p_J	**<u>Pertes mécaniques</u>** $p_{méca}$
Causes	Elles sont dues à l'hystérésis (champ rémanent) et aux courants de Foucault (courant induit dans le fer) et dépendent de B et de Ω.	Pertes dans l'induit et l'inducteur, dues aux résistances des bobinages.	Elles sont dues aux frottements des diverses pièces en mouvement.
Parades	Utilisation de matériaux à cycles étroits, comme le fer au silicium et le feuilletage de l'induit.	Il faut surtout éviter l'échauffement par ventilation.	Utilisation de roulements et de lubrifiants.

F/ <u>Couples utile :</u>

Si on divise la relation $P_u = P_{em} - p_c$ par la vitesse $\boldsymbol{\omega}$, on obtient : $T_u = T_{em} - T_p$

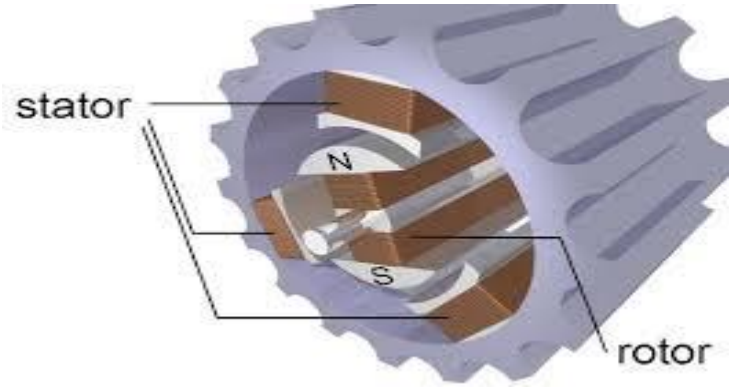
Du fait de ces différentes pertes, le rendement d'une machine à courant continu varie entre 80 et 95 %.

II.3.2 Convertisseur À Courants Alternatifs

Le principe des machines à courants alternatifs réside dans l'utilisation d'un champ tournant produit par des tensions triphasées. On trouve en fait deux principes de fonctionnement utilisant le champ tournant créé par un réseau triphasé :

II.3.2.1 Machines synchrones

La machine synchrone est un convertisseur réversible d'énergie électromagnétique, on peut utiliser en moteur ou en générateur.



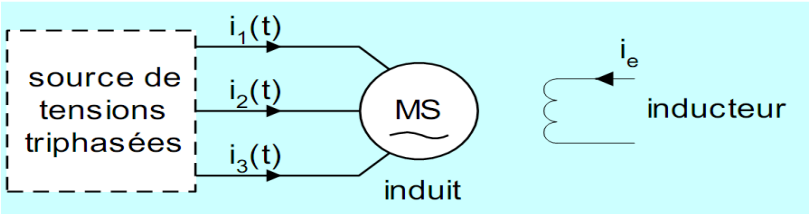
II.3.2.1.1 Constitution et principe de fonctionnement

Comme dans toutes les machines tournantes, on distingue deux parties, partie fixe appelée stator et partie tournante appelée rotor.

- **Stator = inducteur :** Le principe de fonctionnement du moteur synchrone repose sur la création d'un champ magnétique tournant.
- **Rotor = induit :** Le rotor n'est relié à aucune alimentation, va créer un champ continu. Il tourne à la vitesse de rotation de la machine.

Le couplage entre les deux champs nous permettra d'expliquer le fonctionnement du système.

II.3.2.1.2 Symboles



II.3.2.2 Machines asynchrones

Les machines asynchrones sont très utilisées car leur cout est inférieur à celui des autre machines, de plus ces machines sont robustes. Comme les autre machines, la machine asynchrone est réversible.

II.3.2.2.1 Constitution et principe de fonctionnement

Le principe de fonctionnement du moteur asynchrone repose sur la création d'un champ magnétique tournant.

- **Le stator = inducteur :** sera donc identique à celui d'un moteur synchrone. Les bobinages triphasés du stator créent un champ magnétique tournant à la vitesse $\boldsymbol{\Omega_S}$ qui dépend de la pulsation d'alimentation $\boldsymbol{\omega = 2\pi.f}$, mais aussi du nombre de paires de pôles p du stator $\boldsymbol{\Omega_S = \frac{\omega}{P}}$

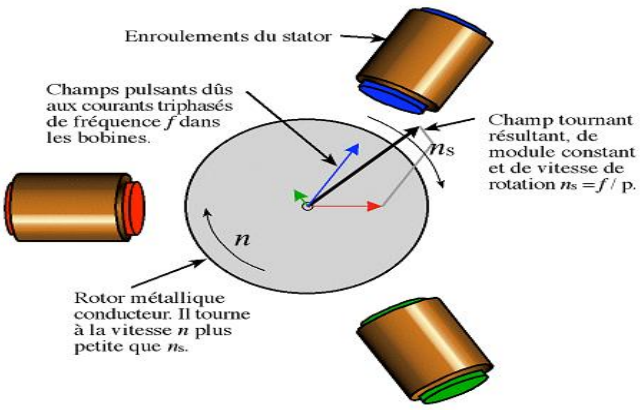


Figure II.3 : Schéma de principe d'un stator

- **Le rotor = induit :** Le rotor n'est lié à aucune source d'alimentation. Il est constitué de bobinages en court-circuit. Le rotor le plus utilisé est à "cage d'écureuil", il s'agit de barres de cuivre ou d'aluminium reliées aux extrémités par deux anneaux conducteurs (court-circuit).

1. **Rotor bobiné :** l'enroulement, semblable à celui du stator, comporte P paire de pole par phase, les trois paires sont reliées à trois bagues.

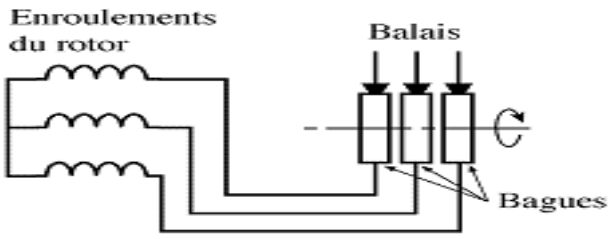


Figure II.4 : Schéma de principe d'un bobinage par l'intermédiaire de trois bagues et trois balais.

2. **Rotor à cage :** le rotor est constitué de barreaux de cuivre ou d'aluminium relies aux deux extrémités par deux couronne conductrice (sans alimentation électrique).

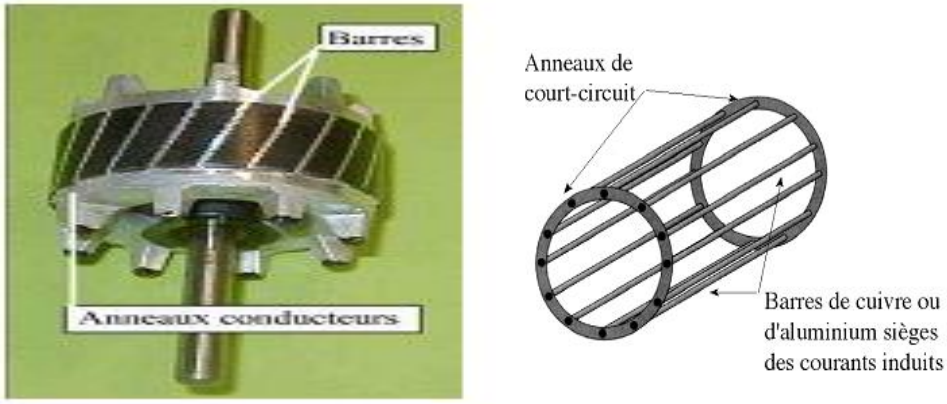
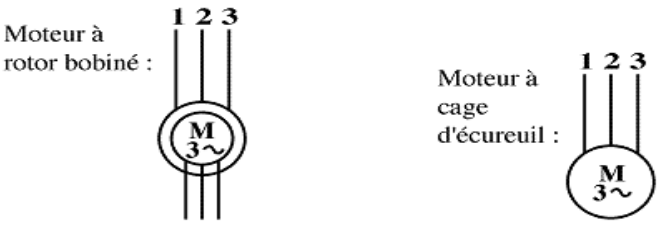


Figure II.5 : Schéma de principe d'un rotor à cage d'écureuil

II.3.2.2.2 Symboles



II.3.2.3 Moteur Pas À Pas

Le moteur pas à pas est un convertisseur électromécanique qui assure la transformation d'un signal électrique impulsionnel en un déplacement mécanique (angulaire ou linaire). Sa structure de base se présente sous la forme de deux pièces séparées mécaniquement, le Stator et le Rotor. L'interaction électromagnétique entre ces deux parties assure la rotation.

II.3.2.3.1 Fonctionnement

La circulation d'un courant électrique dans un bobinage entraine l'apparition d'un champ magnétique, comme le détaille la figure de gauche dans le cas du solénoïde, et donc la présence de pôles Nord et Sud (deux pôles de même nature se repoussent, deux pôles Nord et Sud s'attirent) ; c'est sur ce principe de base que repose le fonctionnement de tout moteur électrique, et, de manière plus générale, de bon nombre de dispositifs électromécaniques : relais, compteurs, galvanomètres, certains hautparleurs ou microphones, gâches électriques de porte, etc….

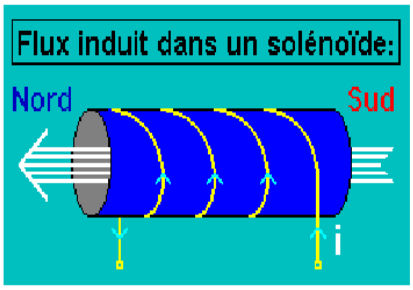


Figure II.6 : flux induit de moteur pas à pas

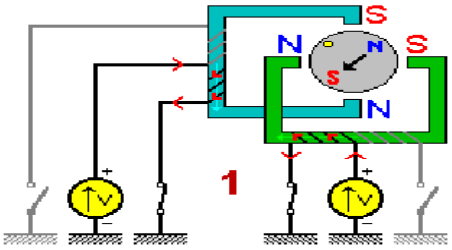


Figure II.7 : position de moteur pas à pas à pas

Le moteur pas à pas, représenté à droite, est constitué d'un rotor aimanté (en gris) avec deux pôles, Nord et Sud, ainsi que d'un double-stator (une partie en bleu, l'autre en vert): à chacune de ces deux parties, est associé un bobinage avec un point milieu et deux phases; en alimentant l'une ou l'autre des phases, on peut ainsi inverser l'aimantation au niveau du stator correspondant.

La flèche noire représente l'aiguille d'une boussole qui serait disposée en place et lieu du rotor; elle indique l'orientation du champ magnétique (elle pointe vers le nord, qui attire donc le pôle Sud du rotor) et se décale alors d'un quart de tour à chaque étape:

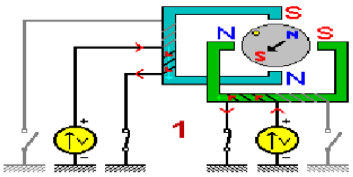
Étape 1, position

• Premier bobinage (stator bleu) :

- Phase 1 (inter gauche) non alimentée ;
- Phase 2 (inter droit) alimentée.

• Second bobinage (stator vert) :

- Phase 1 (inter gauche) alimentée.
- Phase 2 (inter droit) non alimentée.



Position 1

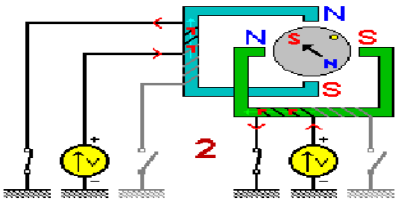
Étape 2, position 2

• Premier bobinage :

- Phase 1 alimentée ;
- Phase 2 non alimentée.

• Second bobinage :

- Phase 1 alimentée ;
- Phase 2 non alimentée.



Position 2

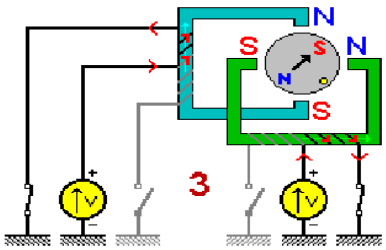
Étape 3, position 3

• Premier bobinage :

- Phase 1 alimentée ;
- Phase 2 non alimentée.

• Second bobinage :

- Phase 1 non alimentée ;
- Phase 2 alimentée.



Position 3

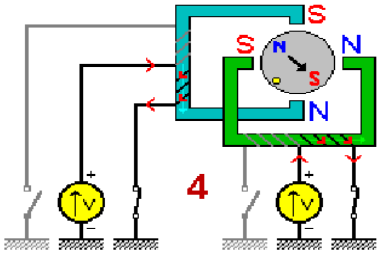
Étape 4, position 4

• Premier bobinage :

- Phase 1 non alimentée;
- Phase 2 alimentée.

• Second bobinage :

- Phase 1 non alimentée;
- Phase 2 alimentée.



Position 4

II.3.2.3.2 Les principaux types de moteur pas-à-pas

A/ à aimant permanent

Le nom de ce type de moteur pas à pas est lié à la conception de son stator : une tôle magnétique découpée et emboutie.

Sur un diamètre intérieur, les tôles composent une série de dents qui symbolise les pôles du stator tout en laissant un espace torique pour une bobine.

Chaque sous-ensemble représente une phase stator.

Le rotor est un barreau aimanté radialement ayant plusieurs paires de pôles N-S.

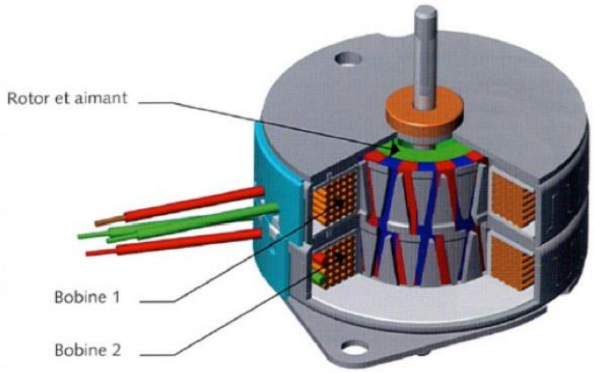


Figure II.8 moteur pas à pas à aimant permanent

B/ Hybride

Le moteur pas à pas « hybride » allie le principe du moteur à réluctance variable à celui du moteur à aimant permanent.

Le rotor du moteur hybride comprend 2 structures régulières de dents.

Ces 2 blocs sont décalés d'une ½ dent l'un par rapport à l'autre et sont fixés de part et d'autre d'un aimant permanent magnétisé axialement.

Le circuit magnétique du stator possède plusieurs pôles constitués de paquets de tôles entourés chacun d'une bobine ; les paquets de tôles se terminant par des dents.

Une phase est constituée de plusieurs dents ; 4 dans la plupart des cas. Tous les pôles de la phase sont décalés de façon à assurer le déphasage de 90° (quadrature).

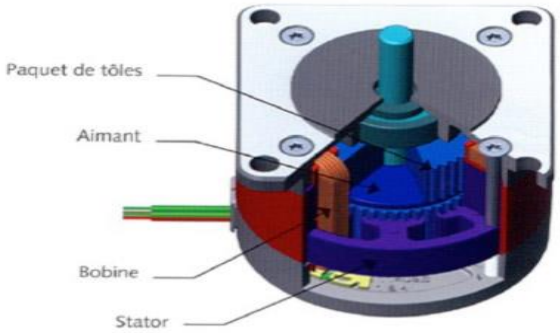


Figure II.9 Vue d'un moteur hybride

C/ Réluctance variable

Le principe de fonctionnement de ce type de moteur pas à pas est proche de celui du moteur hybride, avec une structure dentée au rotor et au stator.

Il n'y a pas d'aimant au rotor pour renforcer l'action du flux et donc pas de couple résiduel sans courant. Ce type de moteur pas à pas n'est presque plus utilisé ni fabriqué.

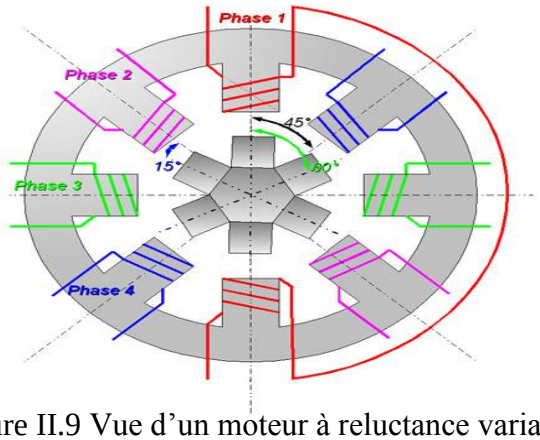


Figure II.9 Vue d'un moteur à reluctance variable

II.3.2.4 Le contacteur

Le contacteur est un appareil mécanique de connexion ayant une seule position de repos et une seule position de travail.

II est capable d'établir, de supporter et d'interrompre des courants dans les conditions normales du circuit, y compris les conditions de surcharges en service.

L'intérêt du contacteur est de pouvoir être commandé à distance.

Il fait partie de la famille des préactionneurs puisqu'il se trouve avant l'actionneur dans la chaîne des énergies.

Un contacteur peut être actionné à partir des éléments du circuit de commande (Bouton poussoir, Capteur, Etc...)

Figure II.10 Visuels de contacteurs

II.3.2.4.1 Constitution et principe de fonctionnement

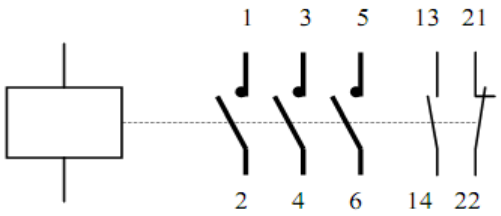
Un contacteur est composé de deux parties:

- Une partie fixe appelée «**armature fixe** »
- Une partie mobile appelée « **armature mobile** ».

Le contacteur réalise les fonctions suivantes :

- Commande des récepteurs, le contacteur est capable de supporter et d'interrompre des courants dans les conditions normales de fonctionnement du récepteur.
- Protège des chutes de tensions et des coupures de courant : le contacteur est un appareil monostable. En cas de coupure de courant ou de tension, le contacteur s'ouvre et seule une commande volontaire permet de le refermer.
- Protège les récepteurs des surcharges : le contacteur associé à un dispositif de détection (relais thermique) est capable de supporter et d'interrompre des courants de surcharges.

II.3.2.4.2 Symbole



x 1, 2 à ouverture

x 3, 4 à fermeture

II.3.2.4.3 Pôles ou contacts principaux

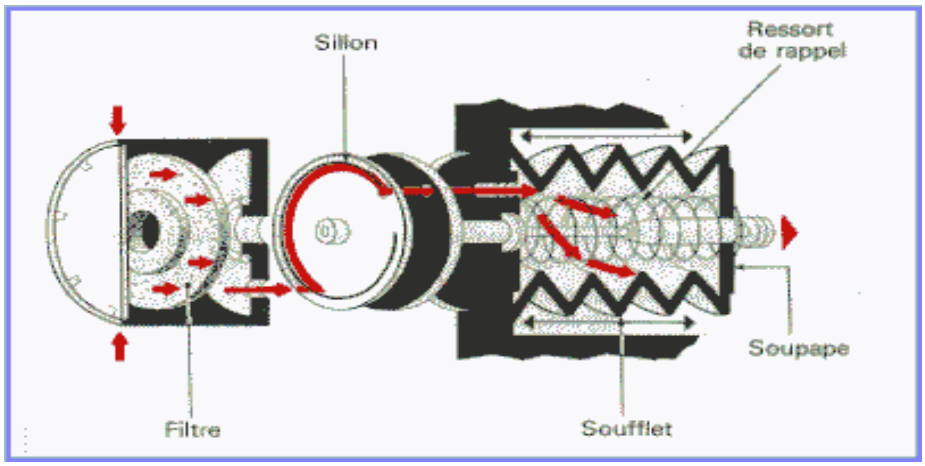
Fonction : Ce sont les éléments qui assurent l'établissement et la coupure du circuit de puissance. Ils se composent de

- Pôles de puissance
- Contacts de puissance
- Éléments de liaison électrique

À chaque contact principal est associé un dispositif d'extinction d'arc

II.3.2.4.3 Contacts auxiliaires

Ces contacts s'insèrent dans le circuit de commande, ils sont destinés à assurer l'auto alimentation, l'asservissement, les verrouillages, la signalisation des contacteurs dans l'équipement. Les contacts auxiliaires sont des contacts à ouverture ou à fermeture (instantanés ou temporisés). Ils sont prévus pour une intensité de 5 à 10A.



II.3.2.4.4 Électroaimant

L'électroaimant est l'élément moteur du contacteur électromagnétique.

A/ Structure de l'électroaimant

Il comprend :

- La bobine
- un circuit magnétique avec une partie fixe (la culasse) et une partie mobile (l'armature).

B/ Technologie de l'électroaimant

Constitution du circuit magnétique

- feuilleté : si la bobine est parcourue par un courant alternatif afin de limiter les pertes par courant de Foucault.
- massif : si la bobine est parcourue par un courant continu

II.4 Couple Et Puissance

A/ <u>Puissance électrique absorbée :</u>

$$P_a = \sqrt{3}UI\cos\varphi$$

U : tension entre deux bornes du moteur

I : courant en ligne

B/ <u>Pertes par effet joule au stator :</u>

$$P_{js} = \frac{3}{2}RI^2$$

R : résistance entre deux bornes du stator

C/ <u>Pertes fer au stator :</u> Elles ne dépendent que de la tension U et de la fréquence f et sont donc constantes si le moteur est couplé au réseau.

D/ <u>Puissance transmise :</u> P_{tr} C'est la puissance que reçoit le rotor

$$P_{tr} = P_a - p_{js} - p_{fs}$$

E/ <u>Couple électromagnétique :</u> Les forces qui s'exercent sur les conducteurs du rotor tournent à la vitesse Ω_S : elles glissent sur le rotor qui, lui, ne tourne qu'à la vitesse Ω.

L'action de l'ensemble des forces électromagnétiques se réduit à un couple électromagnétique résultant de moment Tem.

$$T_{em} = \frac{P_{tr}}{\Omega_s}$$

F/ <u>Puissance mécanique totale :</u> Le couple électromagnétique de moment T_{em} entraîne le rotor à la vitesse Ω. Il lui communique donc la puissance mécanique totale P_M

$$P_M = T_{em}\Omega$$ Soit $$P_M = T_{em}\Omega = P_{tr}\frac{\Omega}{\Omega_s} = P_{tr}(1-g)$$

Cette puissance comprend la puissance utile et les pertes mécaniques.

g : Le glissement est le rapport entre la vitesse du champ et celle du rotor,

$$g = \frac{\Omega_s - \Omega}{\Omega_s}$$

G/ <u>Pertes par effet joule et pertes dans le fer au rotor</u>

Ces pertes représentent la différence entre P_{tr} et P_M. Elles sont dues aux courants induits. Elles ne sont pas mesurables car le rotor est court-circuité. On les calcule.

Donc :

$$p_{jr} + p_{fr} = P_{tr} - P_M = P_{tr} - P_{tr}(1-g) = gP_{tr}$$

$p_{jr} \approx gP_{tr}$ Les pertes fer du rotor sont négligeables.

H/ <u>Pertes mécaniques :</u> La vitesse de rotation variant peu en marche normale, ces pertes sont pratiquement constantes.

$$p_m = P_u - P_M$$

I/ <u>Pertes collectives :</u> Ces pertes ne dépendent que de U, f et n. Comme ces grandeurs sont généralement constantes, les pertes fer au stator et les pertes mécaniques le sont aussi.

$$p_C = p_{fs} + p_m$$

On définit le couple de perte : $T_p = \frac{p_C}{\Omega_s}$

Le couple de perte est une grandeur constante quelle que soit la vitesse et la charge de la machine.

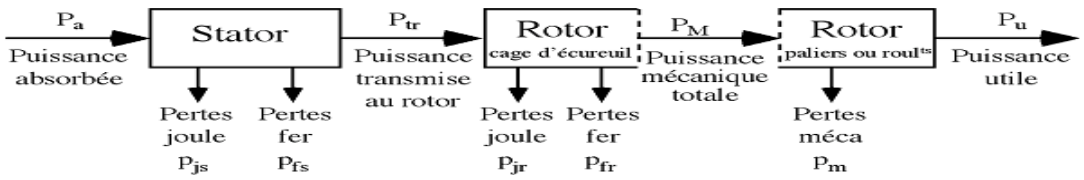
J/ <u>Puissance utile :</u>

Puissance utile : $P_u = P_M - p_m$

Couple utile : $T_u = \frac{P_u}{\Omega}$

Rendement : $\eta = \frac{P_u}{P_a}$

K/ <u>Bilan des puissances :</u>



II.5 Exercices

<u>Exercice 1</u>

1) Un élève passe un aspirateur de puissance 1300 W dans sa chambre, pendant 8 minutes. Calculer, en joules, l'énergie transférée à cet appareil pendant la durée du nettoyage. Exprimer ensuite ce résultat en kWh.

2) Ce même élève révise son chapitre de sciences physiques pour le prochain contrôle pendant 1 heure et 30 minutes. Pour cela, il s'éclaire avec une lampe de bureau de 60 W. Calculer, en kWh, l'énergie transférée à cette lampe pendant cette révision. Exprimer ensuite ce résultat en joules.

<u>Corrigé</u>

1) Un élève passe un aspirateur de puissance 1300 W dans sa chambre, pendant 8 minutes. Calculer, en joules, l'énergie transférée à cet appareil pendant la durée du nettoyage. Exprimer ensuite ce résultat en kWh.

8 minutes = 8 x 60 s = 480 s

E = P. t = 1300 480 = 624 000 J

E = 624 000 / 3,6x106 ≈ 0,17 kWh

2) Ce même élève révise son chapitre de sciences physiques pour le prochain contrôle pendant 1 heure et 30 minutes. Pour cela, il s'éclaire avec une lampe de bureau de 60 W. Calculer, en kWh, l'énergie transférée à cette lampe pendant cette révision. Exprimer ensuite ce résultat en joules.

1h 30 min = 1,5 h

60 W = 0,06 kW

E = P. t = 0,06 kW x 1,5 h = 0,09 kWh

E = 0,09 x 3,6x106 = 324 000 J

Exercice 2

À quelle vitesse tourne un moteur synchrone alimenté en 50 Hz, équipé de 24 pôles ?

Corrigé

Ce moteur a 12 paires de pôles. Il tourne donc 12 fois plus lentement qu'un moteur à 1 paire de pôles, soit à n = 3000 / 12 = 250 r/min.

Exercice 3

Soit un moteur asynchrone de 22 kW, dont la vitesse nominale est de 1420 min^{-1}. Son rendement est de 91%, et son facteur de puissance de 0,85. On l'alimente en triphasé 400 V – 50 Hz.

a) Quel est son glissement à charge nominale ?

b) Quel est son courant nominal ?

Corrigé

a) Ce moteur a certainement 2 paires de pôles. Sa vitesse synchrone est de 1500 min^{-1}. Le glissement à régime nominal

$$g = \frac{\Omega_s - \Omega}{\Omega_s} = \frac{1500 - 1420}{1500} = 5.33\%$$

Nous pouvons aussi exprimer ce glissement en tr/min :

$$g = \Omega_S - \Omega = 1500 - 1420 = 80 tr/min$$

b) La puissance nominale de 22 kW est la puissance disponible à l'arbre. La puissance électrique nominale

$$\boldsymbol{P_{elec-nom} = \frac{P_{nom}}{\eta} = \frac{22000}{0.91} = 24176W}$$

Son courant de phase vaut donc :

$$I_{nom} = \frac{P_{ele-nom}}{\sqrt{3}.U.cos\,\varphi} = \frac{24176}{\sqrt{3}.400.0.85} = 41.05A$$

II.6 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons possède des connaissances générales sur les convertisseurs électromécaniques et nous avons définit la conversion électromécaniques et présentes différents types et fonction électromécanique.

CHAPITRE III

AUTRES FORMES DE CONVERSION

III.1 Introduction

La conversion de l'énergie solaire est une opération qui consiste à transformer en énergie électrique l'énergie des photons provenant du soleil sous forme d'ondes électromagnétiques. Pour obtenir cette opération, il est nécessaire de mettre en œuvre des dispositifs optoélectroniques appropriés appelés « cellules solaires » ou « photopiles solaires ».

Dans ce chapitre nous allons tout d'abord montrer les principales caractéristiques du spectre Solaire, pour présenter ensuite l'idée principale de la conversion photovoltaïque. Pour cela, le principe de la conversion photovoltaïque est rappelé. Ensuite, nous abordons la modélisation électrique d'une cellule photovoltaïque. Puis nous énumérons les différentes technologies de cellules photovoltaïques. Enfin nous terminons ce chapitre par la conversion de l'énergie calorifique (moteur combustion).

III.2 Spectre Solaire

III.2.1 Qu'est-ce que la lumière ?

Un faisceau lumineux est un déplacement de petits corps porteurs d'énergie, ou photons, comme l'a décrit *Einstein* en 1905, pour expliquer l'effet photoélectrique. Depuis l'équivalence onde-corpuscule mise en évidence par *Louis de Broglie* en 1924, la lumière est décrite également comme une onde électromagnétique, comme les rayons **X** ou les ondes radiofréquences. Tout est une question de longueur d'onde, ou de fréquence, pour ces oscillations qui traversent l'espace et parfois la matière. Chaque photon porte une quantité d'énergie directement liée à sa longueur d'onde.

Le Soleil émet un rayonnement de type électromagnétique. La lumière blanche nous parvient en très peu de temps (elle met en moyenne environ 8 minutes et 19 secondes à nous parvenir) car il se déplace à la vitesse de la lumière, soit 299 792 458 m/s.

Le rayonnement solaire peut être considéré comme un ensemble de photons, particules transportant chacune une quantité d'énergie appelée "*quantum d'énergie*" et notée "$\Delta \mathbf{E}$ ".L'énergie d'un photon de fréquence $\boldsymbol{\upsilon}$ (en hertz), dont la longueur d'onde $\boldsymbol{\lambda}$ (en mètre) est égale à la célérité divisée par υ , est exprimée par la relation :

$$\Delta \boldsymbol{E} = \boldsymbol{h} \times \boldsymbol{\upsilon} = \frac{(\mathbf{h} \times \mathbf{c})}{\boldsymbol{\lambda}}$$

$\boldsymbol{h}$ Étant la *constante de Planck* c'est-à-dire $\mathbf{6{,}63 * 10^{-34}}$ Joules par seconde. Ainsi, les photons

composant le rayonnement ultraviolet, du fait de leur longueur d'onde, transportent un quantum d'énergie plus important que les photons composant le rayonnement infrarouge.

III.2.2 Couleur et longueur d'onde

Quoi de plus naturel pour les physiciens du siècle dernier que de nommer «Ultraviolette» la lumière plus bleue que le bleu-violet perceptible par l'œil, et « infrarouge » la lumière moins rouge que celle que notre œil détecte ? En effet, la perception oculaire moyenne de l'homme s'étend du bleu (longueur d'onde 380 nm) au rouge (longueur d'onde 780 nm), en passant par les couleurs que l'arc-en-ciel nous dévoile lorsque les gouttes de pluie décomposent la lumière blanche. On réalise la même décomposition avec un prisme **(figure III-1)**. On appelle spectre, ou répartition spectrale, d'une source de lumière l'ensemble des couleurs, ou longueurs d'onde, qui la constituent.

Une lumière rouge est une portion de lumière blanche, de même qu'une lumière bleue ou orange. Les lampes artificielles les plus courantes, quoique blanches à l'œil, diffèrent par leur spectre.

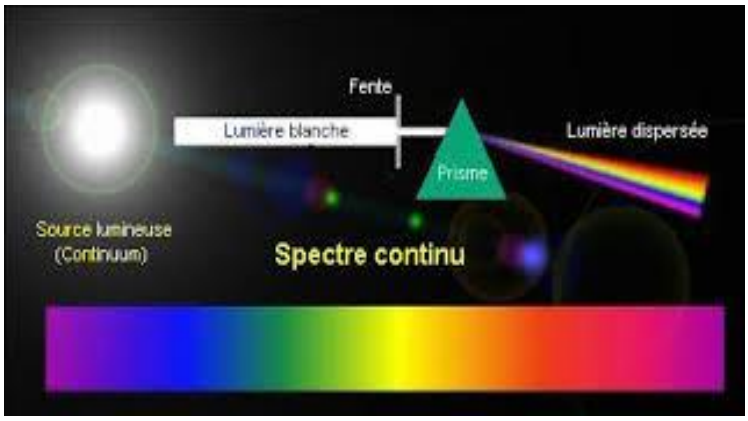


Figure III.1 Décomposition de la lumière blanche par un prisme

III. 3 La Conversion Photovoltaïque

III.3.1 Principe de la conversion Photoélectrique

Le terme « ***photovoltaïque*** » désigne le processus physique qui consiste à transformer l'énergie lumineuse en énergie électrique par le transfert de l'énergie des photons aux électrons d'un matériau. Le préfixe Photo vient du grec « ***phos*** » qui signifie lumière. « ***Volt*** » vient du patronyme d'Alessandro Volta (1745-1827), physicien qui a contribué aux recherches sur l'électricité. Photovoltaïque (PV) signifie donc littéralement électricité lumineuse.

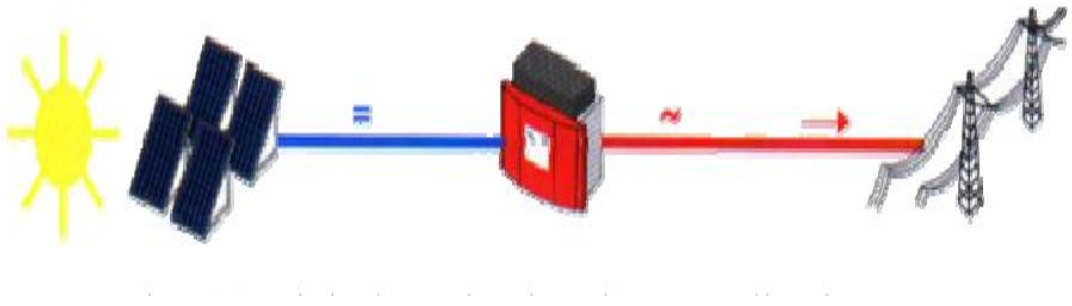
Le scientifique français, *Edmond Becquerel*, fut le premier à découvrir en 1839 l'effet photoélectrique. Il a trouvé que certains matériaux pouvaient produire une petite quantité de courant sous l'effet de la lumière. Par la suite, *Albert Einstein* à découvert, en

travaillant sur l'effet photoélectrique, que la lumière n'avait pas qu'un caractère ondulatoire, mais que son énergie était portée par des particules, les photons. L'énergie d'un photon est donnée par la relation : $\boldsymbol{E = \frac{(h \times c)}{\lambda}}$

Où **h** est la constante de Planck, **c** la vitesse de la lumière et **λ** sa longueur d'onde. Ainsi, plus la longueur d'onde est courte, plus l'énergie du photon est grande. Cette découverte value à Albert Einstein le prix Nobel en 1905.

La conversion photovoltaïque aujourd'hui largement utilisée peut être simplement définie comme la transformation de l'énergie des photons en énergie électrique grâce au processus d'absorption de la lumière par la matière. Lorsqu'un photon est absorbé par le matériau, il passe une partie de son énergie par collision à un électron l'arrachant littéralement de la matière. Ce dernier étant précédemment à un niveau d'énergie inférieur où il était dans un état stable passe alors vers un niveau d'énergie supérieur, créant un déséquilibre électrique au sein de la matière se traduisant par une paire électron-trou, de même énergie électrique. Généralement, la paire électron-trou revient rapidement à l'équilibre en transformant son énergie électrique en énergie thermique.

La différence de potentiel présente aux bornes d'une jonction PN soumise à un éclairement est également mesurable entre les bornes de la cellule PV. Typiquement, la tension maximale d'une cellule (PN) est d'environ 0.5 à 0.8V. Elle peut être directement mesurée à ses bornes sans charge (circuit ouvert). Cette tension est nommée tension de circuit ouvert ($\mathbf{V_{CO}}$). Lorsque les bornes d'une cellule sont court-circuitées, on peut mesurer le courant maximal produit par la cellule PV et on le nomme communément courant de court-circuit ($\mathbf{I_{CC}}$).



Le convertisseur est nécessaire pour convertir le courant continu issu des modules photovoltaïques en courant alternatif pour sa réinjection dans le réseau ou pour les besoins dans un site isolé, quoique ce ne soit pas toujours nécessaire suivant les applications. Celui-ci doit avoir certaines caractéristiques comme suivre le point de transfert maximum de

puissance, avoir un rendement de conversion le plus élevé possible et un coût le plus bas possible.

III.3.2 Modélisation électrique d'une cellule photovoltaïque

Lorsqu'une jonction PN réalisée à partir de matériaux sensibles à la lumière est éclairée, elle présente la particularité de pouvoir fonctionner en générateur d'énergie. Ce comportement en statique peut être décrit par l'équation électrique définissant le comportement d'une diode classique. Ainsi, le régime électrique statique d'une cellule photovoltaïque constituée d'une jonction PN en silicium peut être décrit via l'équation suivante :

$$I_{CELL} = I_{CC} - I_{SAT} = \left[exp\left[\frac{V_{CELL}+(I_{CELL}+R_{serie})}{nV_t}\right] - 1\right] - \frac{V_{CELL}+(I_{CELL}+R_{serie})}{R_{shunt}}$$

Où $V_t = \frac{K \times T}{e}$ représente le potentiel thermodynamique, Isat, le courant de saturation de la jonction, **K**, la constante de Boltzman (1.381 10-23 Joules/Kelvin), **T**, la température de la cellule en Kelvin, **e**, la charge d'un électron, **n**, le facteur de non idéalité de la jonction, I_{CELL}, le courant fourni par la cellule, V_{CELL}, la tension aux bornes de la cellule, I_{CC}, le courant produit par la cellule lorsqu'elle est mise en court-circuit , R_{shunt}, la résistance modélisant les courants de fuites de la jonction, et finalement, R_{serie}, la résistance série caractérisant les diverses résistances de contacts et de connexions. La Figure III-2 représente avec des composants électriques, le comportement électrique équivalent.

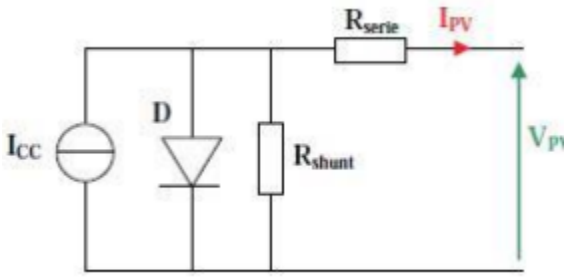


Figure III.2 : électrique équivalent Schéma d'une cellule en silicium

III.4 Principe De L'effet Photovoltaïque

La cellule photovoltaïque, élément de base du capteur, est composée d'un matériau semi-conducteur qui permet de capter l'énergie des photons composant la lumière. Dans un matériau conducteur, la bande de valence et la bande de conduction se confondent, ce qui fait que les électrons peuvent circuler facilement dans le réseau cristallin du matériau conducteur. Dans un matériau isolant, au contraire, la bande de valence et la bande de conduction sont séparées par ce qu'on appelle la bande interdite. Cette bande nécessite beaucoup d'énergie aux électrons pour qu'ils puissent passer dans la bande de conduction, de l'ordre d'une

dizaine d'électronvolt (ou eV). Dans un semi-conducteur, le largueur de la bande interdite est plus faible, de l'ordre de 0,5 à 2 eV, cette énergie de transition d'une bande à l'autre est l'énergie de gap notée **Eg**. L'intérêt est de pouvoir utiliser l'énergie des photons de la lumière du soleil pour faire passer les électrons de la bande de valence à la bande de conduction, ce qui en contrepartie, crée un trou dans la bande de valence.

L'énergie des photons, fonction de la longueur d'onde de la lumière, doit être supérieure ou égal à l'énergie de gap **Eg**.

	Ge	***Si***	***GaAs***	***InP***	***CdS***	***CdTe***
Eg (eV)	***0.67***	***1.12***	***1.43***	***1.29***	***2.42***	***1.44***

Table III.1 : Énergie de gap pour différent semi-conducteur à la température de 300°K (27°C)

Mais les paires d'électrons trous créées par les photons ont tendance à se recombiner très rapidement. Pour ralentir ce phénomène et permettre leur récupération vers les électrodes, un champ électrique est créé par une jonction PN.

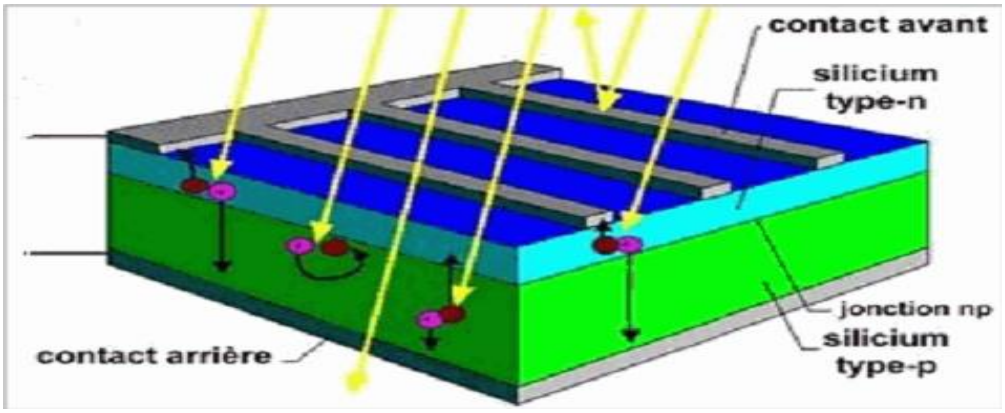


Figure III.3 cellule photovoltaïque

Il s'agit d'introduire des « impuretés » dans le réseau cristallin du semi-conducteur qui est le plus souvent du silicium. Le silicium à 4 électrons dans sa bande de valence, ce qui lui permet par les liaisons de covalence de garder une structure cristalline. L'ajout d'impuretés (quelque ppm) ayant 5 électrons dans la bande de valence (phosphore par exemple) se substituant au silicium, ajoute des électrons faiblement liés dans la structure cristalline, créant un semi-conducteur dopé N. De même, l'ajout d'impuretés ayant 3 électrons dans la bande de valence (bore par exemple) se substituant au silicium enlève des électrons, donc ajoute des « trous » dans la structure cristalline, créant un semi-conducteur dopé N. La juxtaposition de ces deux semi-conducteur dopés N et P crée une jonction PN avec une différence de potentiel aux bornes de laquelle il est possible de récupérer les électrons délogés par des photons ayant

suffisamment d'énergie. Électriquement, la cellule photovoltaïque, ou « photopile », se comporte donc comme une diode de grande dimension.

III.5 Les Différentes Technologies De Cellules Photovoltaïques

Deux grands familles de technologies existent actuellement : la première à base de silicium cristallin comprenant le mono et le multi cristallin, couvre de l'ordre de 85% de la production mondiale. La deuxième famille, celle des couches minces, comprend les cellules au silicium amorphe, polycristallin ou microcristallin ; au tellure de cadmium, au cuivre indium sélénium, et à l'arséniure de gallium. En outre, d'autres technologies sont en cours d'expérimentation comme les cellules organiques, polymères ou à base de fullerènes.

III.5.1 Première génération

La filière silicium représente actuellement 99% du marché des modules photovoltaïques. Il est l'un des éléments les plus abondants sur Terre, parfaitement stable et non toxique. On trouve plusieurs technologies pour le photovoltaïque silicium détaillées ci-après; d'une part les cellules à base de silicium massif (monocristallin. polycristallin. rubans) dites de première génération, et qui constituent à l'heure actuelle l'essentiel des modules photovoltaïques commercialisés et d'autre part la technologie à base de silicium en couche mince.

a) Silicium monocristallin (mono c-Si) :

La technologie mono cristalline est coûteuse car elle nécessite des barres de silicium pur. Son rendement est le plus élevé (14 à 16%). Ce qui a l'avantage de réduire la taille des modules pour une même puissance, chose utile lorsqu'un gain de place est nécessaire.

b) Silicium polycristallin (multicristallin) :

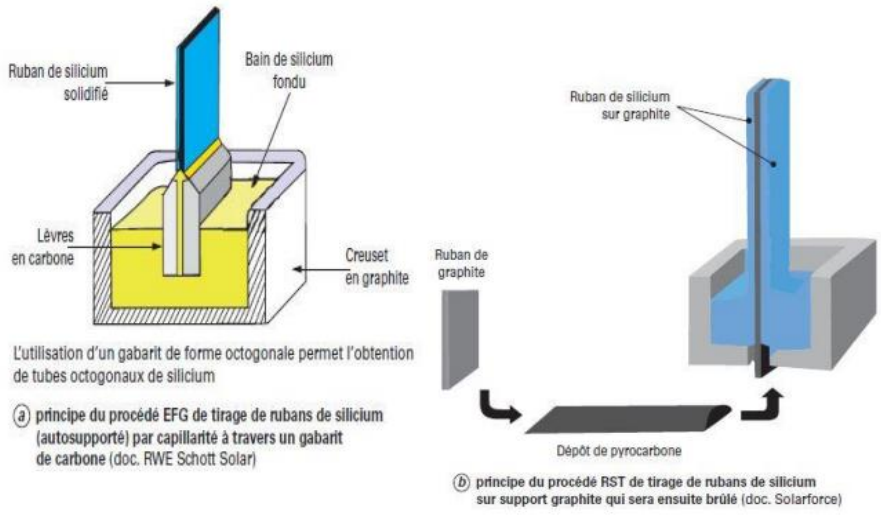
La technologie multi cristalline est obtenue par la refonte de chute de cristaux de silicium de l'industrie électronique et elle nécessite 2 à 3 fois moins d'énergie que la technologie précédente. Son rendement un peu moindre (12 à 14 %) mais son coût est plus avantageux, ce qui permet à cette technologie de dominer actuellement le marché.

c) Silicium en ruban (ribbon) autosupporté :

Les techniques de production de silicium en rubans autosupportés ont été très séduisantes sur le plan technologique. Plusieurs procédés ont été développés. Ces rubans ont connu de nombreux développements au niveau de la recherche et, pour certains d'entre eux, jusqu'à la conception de chaînes de production préindustrielles. La plus connue est basée sur l'effet de la capillarité entre deux lèvres de carbone. Ce procédé, illustré sur la figure III.4(a), a été initié aux USA par Mobil-Tyco dans les années 1975, puis transféré en Allemagne par RWE Schott Solar. D'autres méthodes utilisent des techniques de

croissance de ruban sur un film ou une maille de carbone. C'est le cas de la société SOLARFORCE en France qui utilise comme support de croissance un ruban de graphite (figure III.4(b), procédé RST), et qui permet de déposer des rubans de silicium de part et d'autre du graphite. Le principal avantage de la méthode RST est l'obtention de silicium ruban très mince (< 100 µm), permettant ainsi un gain matière très important.

Cependant, la vitesse de croissance linéaire est lente, généralement de quelques cm/min à quelques dizaines de cm/min. La vitesse optimale est imposée par les critères de solidification qui imposeront la taille des grains, la pureté du matériau par la ségrégation des impuretés, la déformation et les contraintes dans les plaquettes.



FigureIII.4 Procédés de production du silicium en ruban.

III.5.2 Deuxième génération (filière couches minces)

a) Silicium amorphe

Matériau composé de silicium hydrogéné (état non-cristallin) déposé sur un substrat de verre. D'un rendement moins bon que le cristallin (5-7%), le silicium amorphe est souvent appliqué à des appareils de petite puissance (calculatrices, lampes ou horodateurs), mais des firmes comme Solarex, Phototronix, Canon ou Fortum proposent des modules de taille équivalente à celle des modules cristallins. Sanyo a mis au point une technologie de silicium amorphe sur une couche de silicium mono cristallin (technologie HIT) dont les rendements sont supérieurs à celui du silicium mono cristallin (rendement de l'ordre de 19%).

b) Cellules à base de tellurure de cadmium (CdTe)

Les cellules à base de CdTe sont également basées sur la formation de jonction p-n mais cette fois-ci par la mise en contact de deux matériaux différents, on parle alors d'hétérojonction. Composé poly cristallin déposé sur substrat de verre. Les premières

cellules ont été développées en 1972. Il y a quelques années, cette technologie semblait être la plus adaptée pour les couches minces. Mais les problèmes de coût et de toxicité posés par le cadmium ont pesé lourdement sur son développement, utilisation de 7g/m² de cadmium (une batterie NiCd de taille standard en contient 10g).

c) Matériaux à base de séléniure de cuivre indium gallium (CIS ou CIGS)

Matériau composé de séléniure de cuivre et d'indium combiné avec du sulfure de cadmium. Cette technologie de couches minces, qui permet d'atteindre des épaisseurs inférieures au micromètre, est présente aujourd'hui dans de nombreux projets industriels.

III.5.3 Troisième génération

La disponibilité des matériaux peut être un autre facteur limitant, l'un des inconvénients majeurs des cellules CIGS provient du fait que le sélénium, l'indium et le gallium sont des matériaux dont les ressources sont limitées. Cela entraine évidemment des coûts de fabrication plus importants car ces matériaux étant rares, ils sont chers. Ceci a par conséquent conduit à l'émergence d'une troisième génération de cellules solaires, encore au stade de développement mais aux perspectives prometteuses pour l'avenir proche.

a) Les cellules multi jonctions

Utilisant actuellement majoritairement des alliages dérivés de l'arséniure de gallium GaAs. Comme montre la figure III.5:

- une première jonction à grande bande interdite permet de convertir efficacement les photons UV en minimisant les pertes par thermalisation.
- une seconde jonction située immédiatement derrière possède un gap plus petit et convertit alors de façon optimale les photons visibles qui traversent la première jonction.
- une troisième jonction à petit gap convertit les photons infrarouges

.

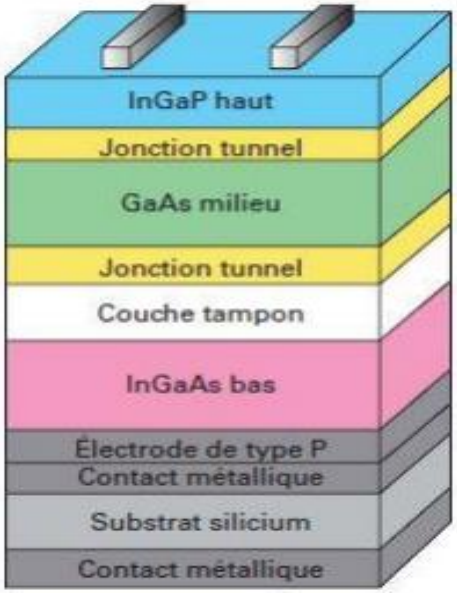


Figure III.5 : vue schématique de la composition de la cellule à multi jonction.

b) Les cellules nanocristallines à colorant ou cellules de Grätzel

Pour les cellules à colorants, il s'agit d'une matrice poreuse inorganique, fonctionnalisée par le greffage de colorants photoactifs à l'échelle de la monocouche moléculaire et imprégnée par un électrolyte liquide contenant un couple oxydoréducteur permettant de communiquer « électriquement » avec la molécule de colorant.

Le système de référence est constitué d'une couche d'oxyde de titane (TiO2) frittée dont les particules sont de taille nanométrique, une molécule de colorant à base de ruthénium et un électrolyte non aqueux (acétonitrile) contenant le couple redox iode-iodure.

c) Cellules organiques

Ces cellules inventées en 1991 par le chimiste suisse Michael Graeztel sont composées d'une poudre de cristaux TiO2 associée à un électrolyte et à un colorant qui absorbe la lumière. Cette technologie en est encore au stade expérimental. Le rendement est moyen et la stabilité à long terme est mauvaise, mais sa fabrication est en théorie plus facile que les autres cellules, et la matière première est bon marché. La recherche améliore d'années en année les technologies existantes, par exemple :

- réduction de l'épaisseur de la coupe des lingots de silicium
- amélioration du rendement d'un lingot par traitement de surface
- technologie CIS avec des matériaux moins nobles, mais travaille aussi sur de nouveaux semi-conducteurs, des cellules à 2 ou 3 jonctions, des systèmes à concentrateur …

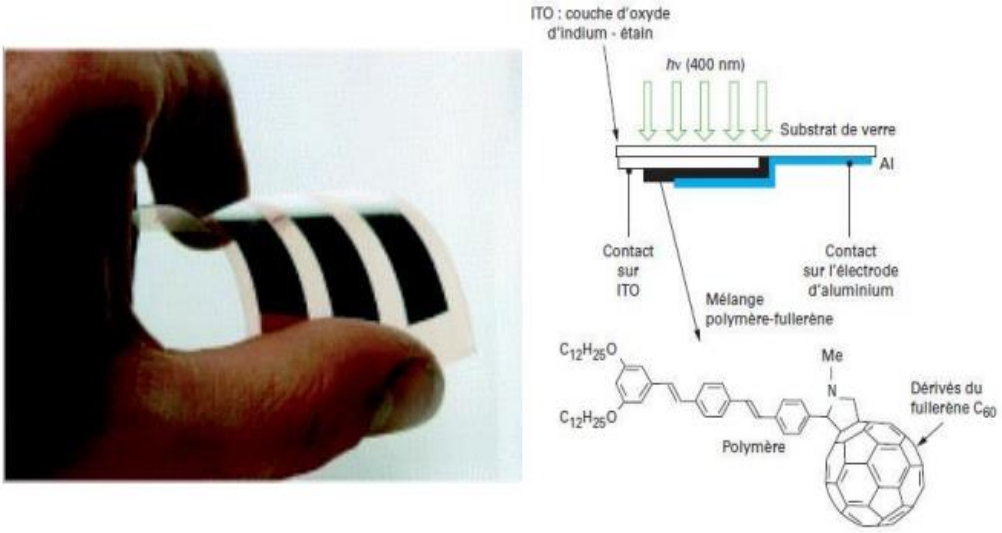


Figure III.6 : Cellule souple à base de matériaux organiques

On peut résumer les rendements des cellules au tableau suivant

Type	Rendement cellule (en labo)	Module (en labo)	Module (commercial)	Niveau de développement
		1ère génération		
Silicium monocristallin	24,70%	22,70%	12-20%	Production industrielle
Silicium polycristallin	20,30%	16,20%	11-15%	Production industrielle
		2ème génération		
Silicium amorphe	13,40%	10,40%	5-9%	Production industrielle
Silicium cristallin en couche mince		9,40%	7%	Production industrielle
CIS	19,30%	13,50%	9-11 %	Production industrielle
CdTe	16,70%		6-9%	Prêt pour la production
		3ème génération		
Cellule organique	5,70%			Au stade de la
Cellule de Grätzel	11%	8,40%		Au stade de la
Cellules multi-jonctions	39%	25-30%		Au stade de la recherche, production

Aspect technologique

Le panneau solaire photovoltaïque transforme l'énergie lumineuse du soleil en électricité

- Panneaux solaires photovoltaïques
- Onduleur
- Compteur consommation et compteur production

Pourquoi choisir le photovoltaïque ?

L'électricité solaire photovoltaïque est remarquable par sa fiabilité, son autonomie.

Aucune pollution | **Énergie 100% verte** | **Énergie gratuite**

Gain financier | **Énergie du soleil est inépuisable**

III.6 Énergie Calorifique

À l'échelle atomique, la chaleur se traduit par un mouvement désordonné et plus ou moins rapide des molécules. À notre échelle, elle constitue la forme d'énergie mise en jeu lorsque la température varie ou lorsqu'un matériau change d'état (fusion de la glace, évaporation de l'eau). Elle peut se transférer de proche en proche sans se transformer en une autre forme d'énergie (conduction calorifique). Elle peut aussi se convertir en énergie mécanique, dans une turbine, une machine à vapeur, ou un réacteur d'avion, mais nous verrons que cette conversion ne peut être que partielle.

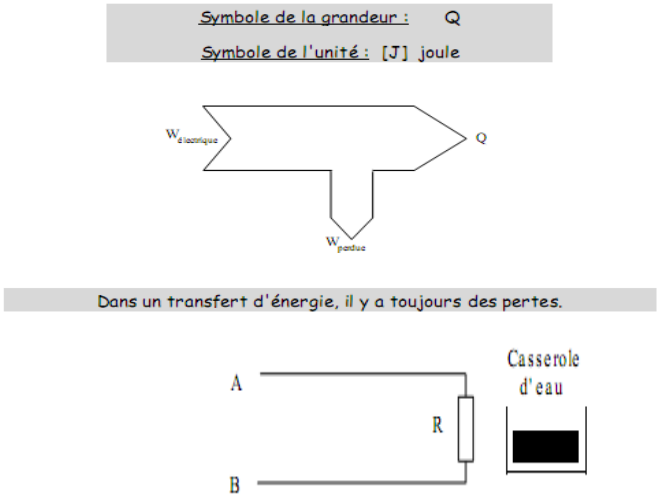
III.6.1 Conversion D'énergie Calorifique

La transformation d'énergie électrique $\mathbf{W_{él}}$ en une énergie calorifique $\mathbf{W_{cal}}$ est couramment utilisée. Dans les installations électriques, nous trouvons une quantité impressionnante d'appareils domestiques réalisant cette transformation. Par exemples :

- cuisinières
- fours
- radiateurs pour le chauffage des locaux

- ❖ chaudière pour le chauffage d'un liquide
- ❖ chauffe-eau pour l'eau sanitaire
- ❖ lampe à incandescence

L'énergie transformée en énergie calorifique est symbolisée de la façon suivante:



Une cuisinière électrique doit chauffer de l'eau dans une casserole. Le but est de pouvoir calculer l'énergie nécessaire pour faire bouillir cette eau.

Phase 1 : La tension électrique U appliquée aux bornes de la résistance R provoque le passage d'un courant électrique I. $\mathbf{U = R \cdot I}$

Phase 2 : Ce circuit provoque une puissance électrique P, $\mathbf{P = U \cdot I}$

Phase 3 : Qui, appliquée pendant un certain temps, engendre une énergie électrique $W_{él}$**.**

$$\mathbf{W_{él} = P \cdot t}$$

Phase 4 : Mais ce transfert d'énergie se réalise avec un certain rendement η dû aux pertes par effet Joule (conducteurs).

$$\mathbf{W_{él} - W_{joules} = Q}$$

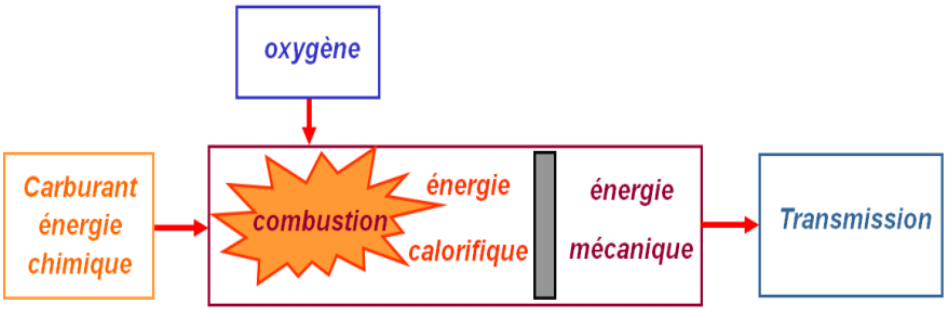
Phase 5 : Cette énergie calorifique Q doit être transmise à l'élément à chauffer qui peut être soit un liquide, soit un solide.

Ce transfert se fait avec un certain rendement η.

$$\mathbf{Q_{absorbée} \cdot \eta = Q_{utile}}$$

La transformation de l'énergie dans le carburant en énergie mécanique. Pour libérer l'énergie chimique potentielle, il est nécessaire d'effectuer une transformation appelée « combustion ».

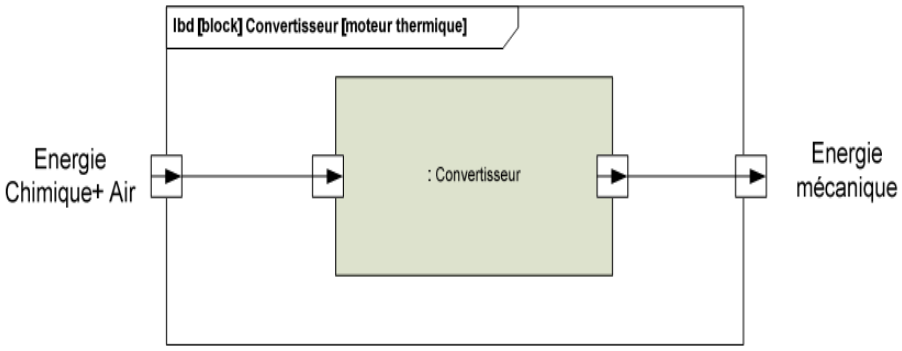
Par la combustion, le carburant est transformé en énergie calorifique puis en énergie mécanique qui est ensuite appliquée aux roues motrices par l'intermédiaire de la transmission.



III.6.2 Moteur À Combustion (Moteurs Thermique)

Les moteurs thermiques ont pour rôle de transformer l'énergie thermique à l'énergie mécanique. Ils sont encore appelés les moteurs à combustion qui sont généralement distingués en deux types :

- Les moteurs à combustion interne où le système est renouvelé à chaque cycle. Le système est en contact avec une seule source de chaleur (I' atmosphère).
- Les moteurs à combustion externe où le système (air) est recyclé, sans renouvellement, ce qui nécessite alors 2 sources de chaleur, entrent par exemple dans cette dernière catégorie : les machines à vapeur, le moteur Stirling...



III.6.2.1 Moteurs à combustion interne

A/ Moteurs alternatifs

La chaleur est produite par une combustion dans une chambre à volume variable et elle est utilisée pour augmenter la pression au sein d'un gaz qui remplit cette chambre (ce gaz est d'ailleurs initialement composé du combustible et du comburant : air). Cette augmentation de pression se traduit par une force exercée sur un piston, force qui transforme le mouvement de translation du piston en mouvement de rotation d'arbre (vilebrequin).

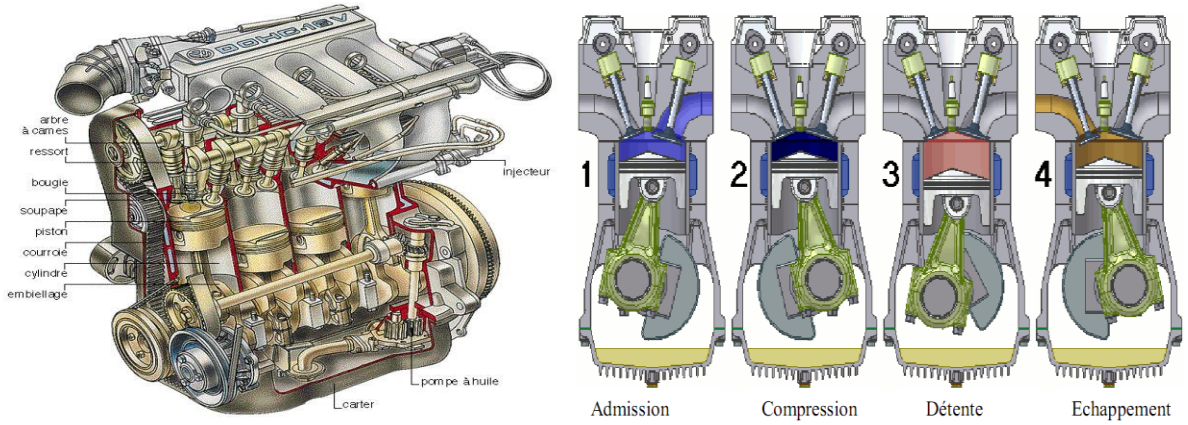


Figure III.7 moteur à combustion interne

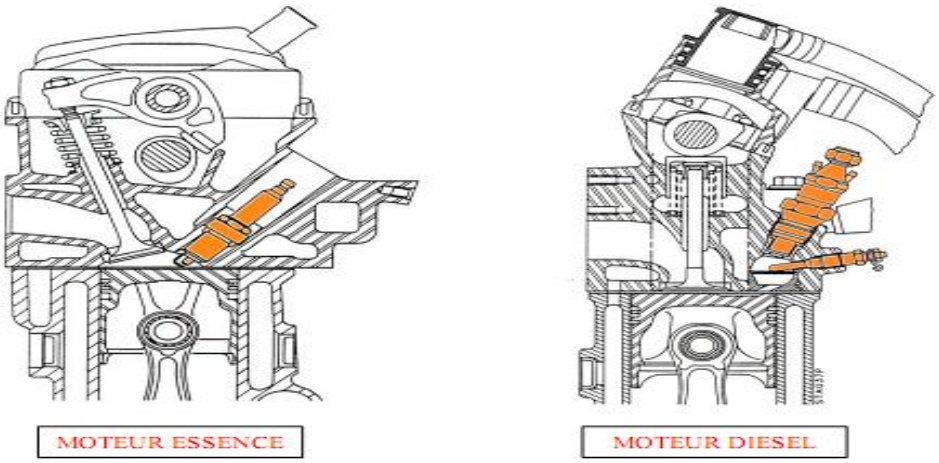
Les moteurs sont classés en deux catégories suivant la technique d'inflammation du mélange carburant-air :

- les moteurs à allumage commandé (moteur à essence)
- les moteurs à allumage par compression (moteur Diesel)

Les moteurs à essence dans lesquels la combustion de l'essence est amorcée par l'étincelle d'une bougie, ils possèdent un système d'allumage commandé, le mélange d'air et d'essence pouvant se faire

- ❖ Soit par injection.
- ❖ Soit par carburateur (depuis le 01/01/93, tous les véhicules neufs vendus en Europe sont équipés d'un système d'injection).

Les moteurs Diesel, dont la combustion est déclenchée par l'injection de gazole sous pression dans de l'air fortement comprimé (T° élevée) ; il se produit alors une auto-inflammation, ce qui signifie que le mélange s'enflamme spontanément.



B/ Turbomachines (turbine à gaz)

Contrairement aux moteurs précédents, les turbomachines sont des machines à écoulement continu. Dans ces dernières machines, les évolutions des fluides moteurs ont lieu dans des enceintes successives et juxtaposées, contrairement aux moteurs alternatifs où ces transformations s'opèrent dans le même espace, le cylindre.

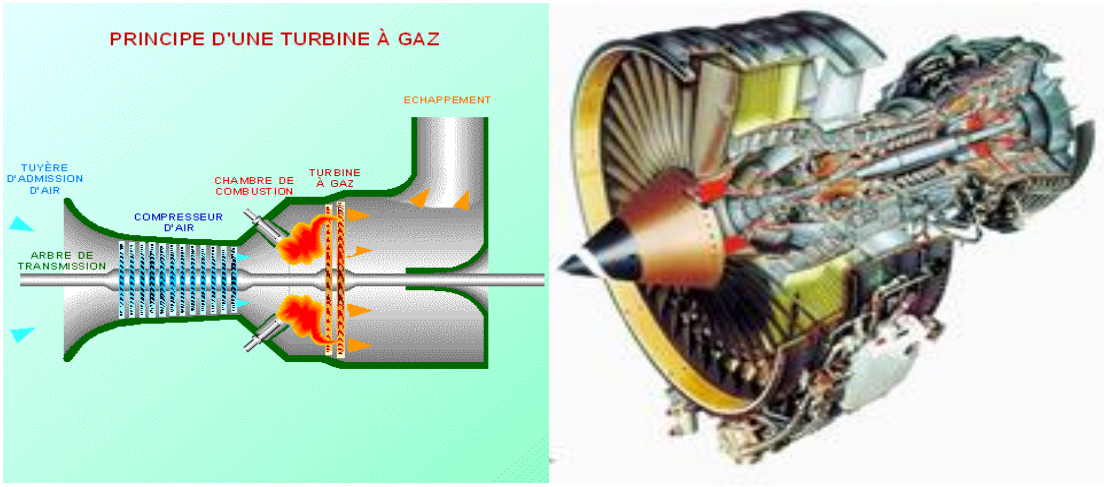


Figure III.8 Turbomachine

La chaleur est produite par une combustion dans une chambre de combustion d'un combustible généralement liquide (kérosène par exemple). Cette combustion augment la pression du gaz (air + combustible). Ce gaz sous pression traverse une chambre de détente à volume constant constituée d'un arbre moteur doté d'ailettes (turbine de détente). De l'énergie est alors fournie à cet arbre sous forme d'un couple moteur qui sera utilisé d'une part vers les consommateurs, d'autre part vers un compresseur (turbine de compression) qui permet la puissance fournie. En effet la pression de l'air augmentant, la masse d'air aspirée augmente, on peut brûler davantage de kérosène, et la puissance disponible est donc augmentée (par rapport à une turbine qui ne disposerait pas d'étage compresseur en entrée).

C/ Moteur WANKEL à piston rotatif

Le moteur rotatif WANKEL est le résultat d'une importante d'étude menée de 1945 à 1954 par l'ingénieur WANKEL sur les différentes solutions de moteur rotatif. En conclusion, il estima que la meilleure était de faire travailler en moteur, le compresseur rotatif réalisé par Bernard Maillard en 1943.

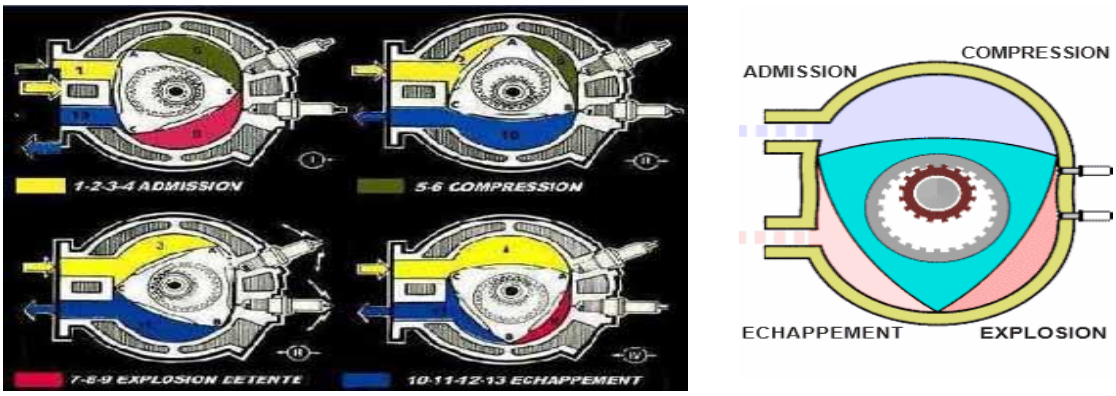


Figure III.9 Moteur WANKEL

III.6.2.2 Moteurs à combustion externe

A/ Machines à vapeur

La chaleur est produite dans une chambre de combustion (chaudière) séparée de la chambre de détente. Cette chaleur est utilisée pour vaporiser de l'eau. La vapeur d'eau obtenue par cette vaporisation est alors envoyée dans la chambre de détente (cylindre) où elle actionne un piston. Un système bielle manivelle permet alors de récupérer l'énergie mécanique ainsi produite en l'adaptant aux besoins.

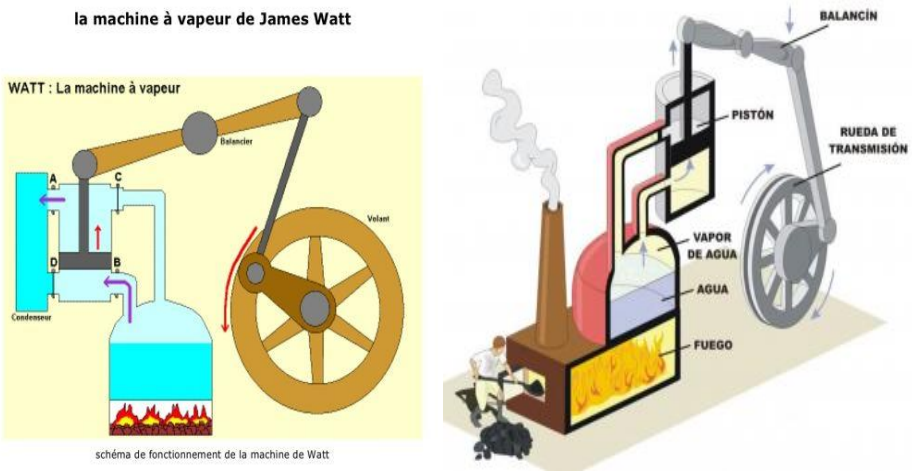


Figure III.10 Machine à vapeur

L'eau qui est fournie à l'évaporateur est transformée en vapeur d'eau par apport de chaleur. Ce gaz (vapeur d'eau sous pression) est distribué vers le piston où il fournit du travail qui sera utilisé par le système bielle manivelle (non représenté ici). Les distributeurs permettent de mettre chaque face du piston alternativement à l'admission ou à l'échappement.

B/ Moteurs Stirling

Le moteur Stirling, appelé parfois moteur à combustion externe ou moteur à air chaud est inventé en 1816 dont on reparle de plus en plus aujourd'hui. Le moteur comprendre deux pistons A et B et un régénérateur qui absorbe et restitue de la chaleur au cours du cycle. Il existe plusieurs types de moteur Stirling, pour l'illustration, on ne donne que le schéma d'un moteur alpha (Figure III.11).

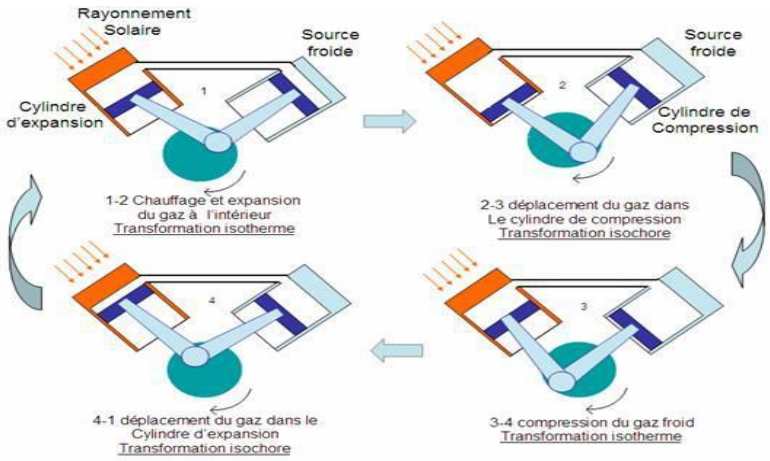


Figure III.11 moteur Stirling

III.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons démontré le mode de fonctionnement de la cellule solaire à partir de son absorption du spectre solaire jusqu'à la production d'électricité. Nous avons décrit dans ce chapitre les composants du spectre solaire et le principe de fonctionnement de la cellule solaire, nous avons ensuite fait une modélisation de la cellule et nous avons fini ce chapitre par la conversion de l'énergie calorifique: moteur combustion.