

# **SYSTEMES ENERGETIQUES ET ENVIRONNEMENT**

## **I- Objectif du cours**

- Amener les apprenants à prendre conscience des problèmes liés à la production, à la conversion et à l'utilisation de l'énergie sur l'environnement
- Donner les notions nécessaires sur les procédés de prévention et de traitement de la production énergétique.

## **II- Plan à suivre**

**Chapitre I** : Généralités sur l'énergie et les systèmes énergétiques.

**Chapitre II** : Généralités sur la pollution environnementale

**Chapitre III** : Interaction Energie - Environnement

**Chapitre IV** : Méthode de prévention et de traitement de la pollution

**Chapitre V** : Etude de cas

## **III- Bibliographie**

- Energie et environnement BLANCHARD édition CAST
- Energie - Ecologie et Economie Pillet et Georges
- Elément d'écologie F. Ramadé éd Mc Ga-hill

## **Revues**

ADEME (France)

CM3E (France)

Dr VODOUNNOU Edmond Claude

Enseignant-Chercheur à l'EPAC, département du Génie Mécanique et Energétique

# **CHAPITRE I : GENERALITES SUR L'ENERGIE ET LES SYSTEMES ENERGETIQUES.**

## **Introduction**

L'énergie est une base essentielle pour le développement social et économique. Le mot «énergie», d'usage très répandu, vient du mot grec « energia » qui signifie « force en action ». Elle existe sous plusieurs formes telle que, l'énergie mécanique, l'énergie chimique, l'énergie électrique, l'énergie rayonnante, l'énergie éolienne, l'énergie nucléaire, etc.

D'une manière générale, un système possède l'énergie, s'il est capable de produire une transformation de son énergie « exemple : l'énergie chimique de nos cellules est transformée dans nos muscles en énergie mécanique qui produit un mouvement » ou d'échanger de l'énergie « exemple : chaleur transmise par un radiateur ».

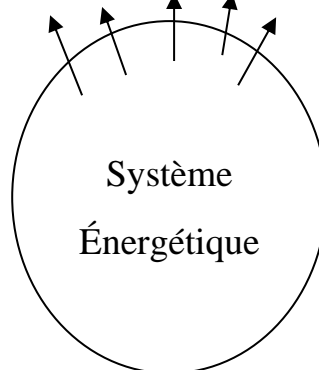
La mesure de l'énergie se fait ainsi à travers ses effets et ses variations. L'unité utilisée par les physiciens pour mesurer l'énergie est le joule (J). Les économistes utilisent plutôt la tonne d'équivalent pétrole (tep), les médecins nutritionnistes la calorie (cal). En électricité nous utilisons le wattheure (Wh) ou le kilowattheure (kWh).

On distingue deux types d'énergie : Energies primaires qui nécessitent une transformation (conversion) avant utilisation et les énergies finies (terminales) qui sont issues de la transformation des énergies premières et qui peuvent être utilisées dans l'état.

### **Energies primaires**

Pétroles  
Gaz  
Charbon  
Houille  
Bois  
Déchets agricoles  
Energie nucléaires  
Energie renouvelable

Déchets (pollution)



### **Energies Finale**

Electrique  
Thermique ou calorique  
Mécanique

On appellera système énergétique tout support qui permet la conversion de l'énergie primaire en énergie finale.

**Ex :** Fourreaux, capteur, les éoliennes

### **Relation entre la puissance et l'énergie**

La puissance n'est pas un synonyme de l'énergie, la relation entre l'énergie et la puissance se ressemble à la relation entre la distance et la vitesse. La différence entre la distance et la vitesse est que la vitesse est divisée par le temps. Lors des échanges d'énergies, on mesure la quantité d'énergie transférée ou transformée ainsi que la durée de son processus. Par contre, la puissance d'un système nous renseigne sur la rapidité avec laquelle l'énergie a été produite ou consommée.

### Exemple

1) Vingt litres d'essence contiennent une quantité d'énergie de 250 kWh.

- Quelle est la puissance développée, si ces 20 litres sont consommés en 5 heures par une voiture ?
- Quelle est la puissance dégagée, s'ils sont brûlés en 10 secondes ?

2) Quelle est l'énergie, consommée, qui augmente la facture d'électricité, par une ampoule de 100W allumée pendant 30 jours ?

### Solution

1)

$$\text{➤ } P = \frac{KWh}{5h}; P = \quad kW$$

$$\text{➤ } P = \frac{250KWh}{0.0028h}; P \approx \quad MW$$

$$2) \quad E = W * h * \quad = Wh$$

## II- Généralités sur l'énergie.

On distingue 2 types d'énergies

Les énergies dites fossiles (EF) qui sont non renouvelables et les énergies nouvelles et renouvelables (ENR)

### 1-DEFINITION DES ENERGIES NON RENOUVELABLES ou Energies Fossiles

Une ressource énergétique non renouvelable est une ressource qui détruite lors de son utilisation et/ou qui se renouvelle plus lentement que la vitesse avec laquelle on l'utilise. Le terme « énergie fossile » désigne l'énergie produite à partir des matières premières que l'on trouve sous terre comme le pétrole, le charbon, le gaz naturel. Ces matières premières sont issues de la décomposition de matières organiques « végétaux et organismes vivants ». Les énergies fossiles représentent aujourd'hui plus des trois quarts de la consommation mondiale d'énergie « transport, industries, chauffage, ...etc. ».

La seule manière d'utiliser l'énergie contenue dans les énergies fossiles c'est la combustion (réaction d'oxydation entre un combustible et le dioxygène, qui dégage une quantité d'énergie thermique ou calorifique utilisable directement et un mélange gazeux contenant principalement de CO<sub>2</sub>, du NO<sub>2</sub>, NO<sub>3</sub>, SO<sub>3</sub>,..... Etc. Leur formule chimique est sous la forme C<sub>x</sub>H<sub>y</sub>O<sub>z</sub>N<sub>r</sub>S<sub>t</sub>. Le contenu énergétique d'une énergie fossile est donné par son pouvoir calorifique appelé (PC). Le PC est la quantité de chaleur dégagée par une unité de masse de combustible lorsqu'il subit une combustion complète. Il s'exprime en joules/Kg dans le SI. Il y a 2 types de PC : le PC inférieur appelé PCI et le PC supérieur appelé PCS.

### **Relation entre les deux PC**

$PCS = PCI + \text{chaleur de condensation de l'eau (énergie que donne la condensation de l'eau)}$ .  
Dans beaucoup de cas, quand on parle de PC, c'est PCI.

### **Charbon**

Le charbon est un terme générique qui désigne des roches sédimentaires d'origine biochimique et riches en carbone. Ces roches sont des combustibles fossiles qui se sont formées au Carbonifère, par lente transformation d'organismes morts sédimentés, sous l'action de la pression et de la température au cours des temps géologiques. Peu à peu, la tourbe constituée par les organismes morts se transforme ainsi en charbon, d'abord sous la forme de houille, puis de lignite et enfin d'antracite.

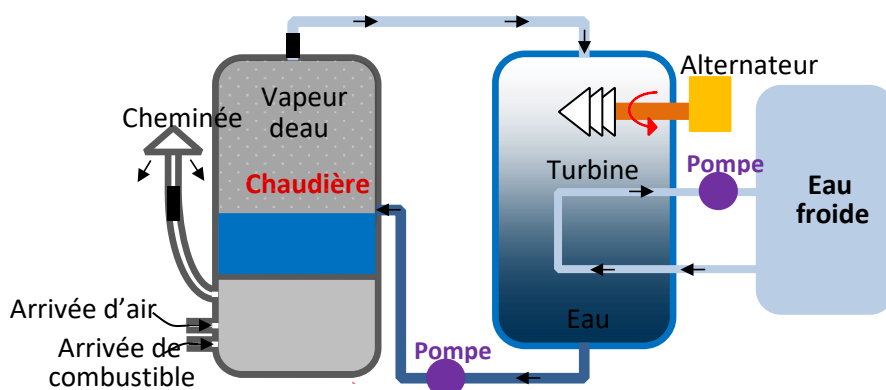
#### **➤ Production d'électricité par le charbon**

Le charbon fut la source d'énergie de la révolution industrielle du 18<sup>ème</sup> siècle et ne fut supplanté comme source d'énergie principale en Occident qu'au 20<sup>ème</sup> siècle, avec l'essor du pétrole.



**Fig 1** : Centrale à charbon

Le charbon est une source d'énergie fiable, exploitée dans de nombreux pays dans la production de l'électricité, à travers des centrales thermiques. Le principe de fonctionnement de ces centrales est simple : l'électricité est produite par transformation de l'énergie générée par la combustion du charbon.



**Fig 2 :** Principe de fonctionnement d'une centrale thermique

### ➤ Principe de fonctionnement d'une centrale thermique

La chaleur produite dans la chaudière par la combustion du charbon, gaz ou autre, vaporise de l'eau. Cette vapeur d'eau est alors transportée sous haute pression et sous haute température vers une turbine. Sous la pression, les pales de la turbine se mettent à tourner. L'énergie thermique est donc transformée en énergie mécanique. Celle-ci sera, par la suite, transformée à son tour en énergie électrique via un alternateur. A la sortie de la turbine, la vapeur est retransformée en eau « condensation » au contact de parois froides pour être renvoyée dans la chaudière où le cycle recommence.

### Carburants issus du pétrole

Le pétrole brut, est une huile minérale foncée et visqueuse qui vient du sous-sol, et qui provient des restes d'animaux et de végétaux morts, le pétrole est donc une source d'énergie fossile non renouvelable. Le raffinage permet d'isoler ses divers constituants et d'obtenir, après épuration, des carburants. La combustion de ce carburant crée de l'énergie.

La distillation du pétrole brut est réalisée en deux étapes complémentaires. Une première distillation dite atmosphérique permet de séparer les gaz, les essences et le naphta « coupes légères », le kérosène et le gazole « coupes moyennes) et les coupes lourdes. Les résidus des coupes lourdes subissent ensuite une distillation dite sous vide afin de séparer certains produits moyens.

L'essence contient des métaux comme le plomb, rejetés dans l'air en même temps que les gaz d'échappement. Les rejets de plomb sont nocifs pour la santé et l'environnement.

Le gazole est le carburant utilisé dans les moteurs diesel. Le rendement énergétique du moteur Diesel est bien supérieur à celui du moteur à essence, il émet 14 fois plus de particules et il contient du soufre responsable de la formation de dioxyde de soufre  $SO_2$ . Ces particules sont responsables de la pollution de l'air.

Le pétrole peut devenir aussi après transformation, du kérosène, ce carburant est un peu plus lourd que l'essence mais plus léger que le gazole, il est utilisé pour les avions.

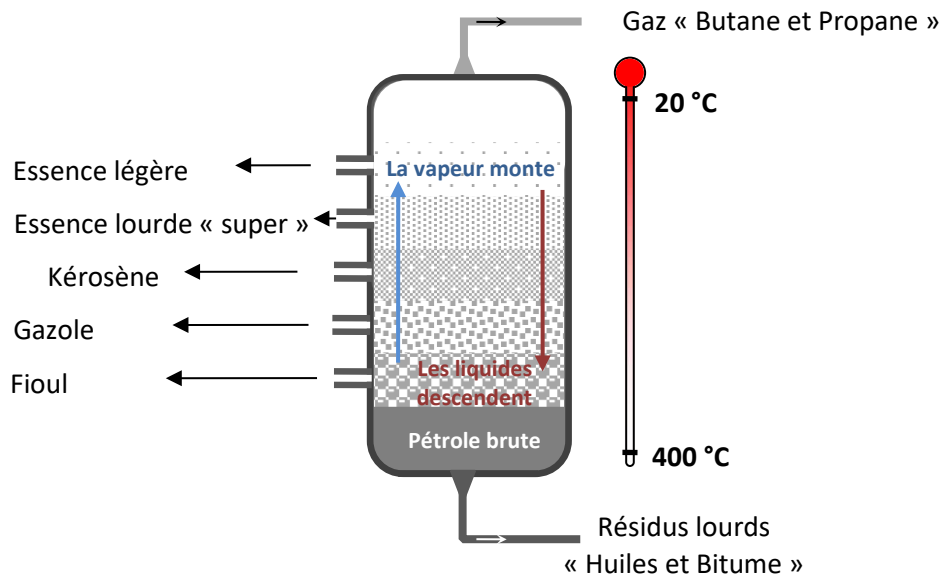


Fig 3 : Raffinage pétrolier

Le tableau 1 montre les opérations principales utilisées pour transformer le pétrole brut en produits finis, suivant des processus rigoureux.

**Tab 1 : Opérations principales de transformation du pétrole brut en produits finis**

	1-Distillation	2-Unité de raffinage	3-Fabrication des produits
Produits légers	<b>Gaz (1%)</b>	Gaz combustible propane butane	Four de raffinerie Propane commercial Butane commercial
	<b>Essence (22%)</b>	Essence léger Essence lourd	Ethérification, Isomérisation, Alkylolation Reformage et craquage catalytique Carburant auto
Produits moyens	<b>Kérosène (9%)</b>		Adoucissement hydrotraitement ou <b>Kérosène</b> Adouci (Avion)
	<b>Gazole (27%)</b>	Gazole léger Gazole lourd	Hydrodésulfuration Gazole (moteur fuel, domestique)

Produits lourds	Coupes lourds (41%)	Distillats	craquage catalytique	Fuels lourds (usine, bateaux)
		Résidus sousvide « fond du baril »	Viscoréduction	Fuels lourds et bitumes (pavage des routes)

### Gaz naturel

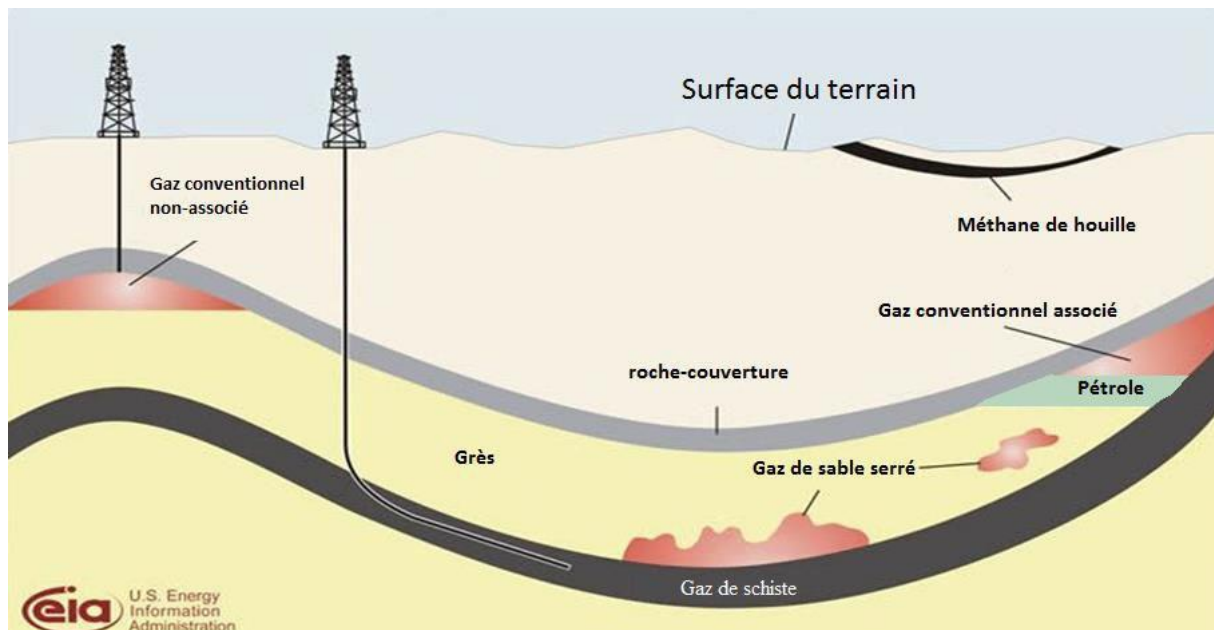
Il y a des millions d'années des organismes vivants microscopiques ont été enfouis dans le sol et se sont transformés en gaz naturel sous l'action d'une température élevée, d'une forte pression et de l'absence de contact avec l'air.

Le gaz est un très bon combustible qu'on utilise pour faire la cuisine, chauffer l'eau des maisons, produire du chauffage,... et. il se trouve dans des poches à des profondeurs entre 3 000 et 4 000 mètres sous la surface de la Terre.

Le gaz de schiste est un gaz naturel retenu à grande profondeur dans certains schistes des bassins sédimentaires. Il n'est donc pas retenu sous une couche imperméable, comme c'est le cas pour les gisements dits « conventionnels » de gaz ou de pétrole, mais emprisonné dans la roche elle-même. Pour l'en extraire, il faut opérer une fracturation de cette roche, obtenue par injection d'eau sous pression, mélangée à quelques additifs « on parle d'hydro-fracturation ».

L'exploitation de gaz de schiste est coûteuse par rapport au gaz conventionnel et présente des risques pour l'environnement, dans le sous-sol, dans les nappes phréatiques et en surface. La concentration en gaz est plus faible que dans les gisements conventionnels mais les zones concernées sont plus étendues. La potentialité de ces gisements, qui sont exploités depuis plusieurs années, surtout aux États-Unis, est énorme.

Le gaz naturel est utilisé dans certaines voitures en Algérie, elles sont appelées voitures au GPL « Gaz de propane liquéfié » et dans certains bus en Europe, appelés bus au GNV « Gaz naturel pour véhicule ».



**Fig 4 :** Schématisation géologique des gisements d'hydrocarbures

Source : <https://www.eia.gov/>.

## Energies fossiles

L'énergie nucléaire est l'énergie de liaison entre les constituants du noyau d'atome. Ce noyau est un assemblage de protons, de charge positive, et de neutrons sans charge très fortement liés malgré la répulsion électrique entre protons. Le noyau est extrêmement compact «  $10^{-12}$  mm », 100 000 fois plus petit que l'atome lui-même.

**Dans les atomes lourds ;** le noyau contient beaucoup de protons qui se repoussent. Certains de ces noyaux « par exemple d'uranium ou de thorium » peuvent devenir instables et se rompre en libérant une partie de leur énergie de liaison. C'est **la fission** de l'atome.

**Dans les atomes très légers ;** deux noyaux peuvent se fondre pour former un atome plus lourd mais plus stable en dégageant une énergie considérable. C'est **la fusion**, par exemple de noyaux d'hydrogène en noyaux d'hélium. Les projets actuels pour ce type d'énergie sont des réacteurs de recherche, d'évaluateurs et de prototypes, étalés dans le temps, pourraient aboutir à la réalisation de réacteurs destinés à la production commerciale d'électricité vers 2100.

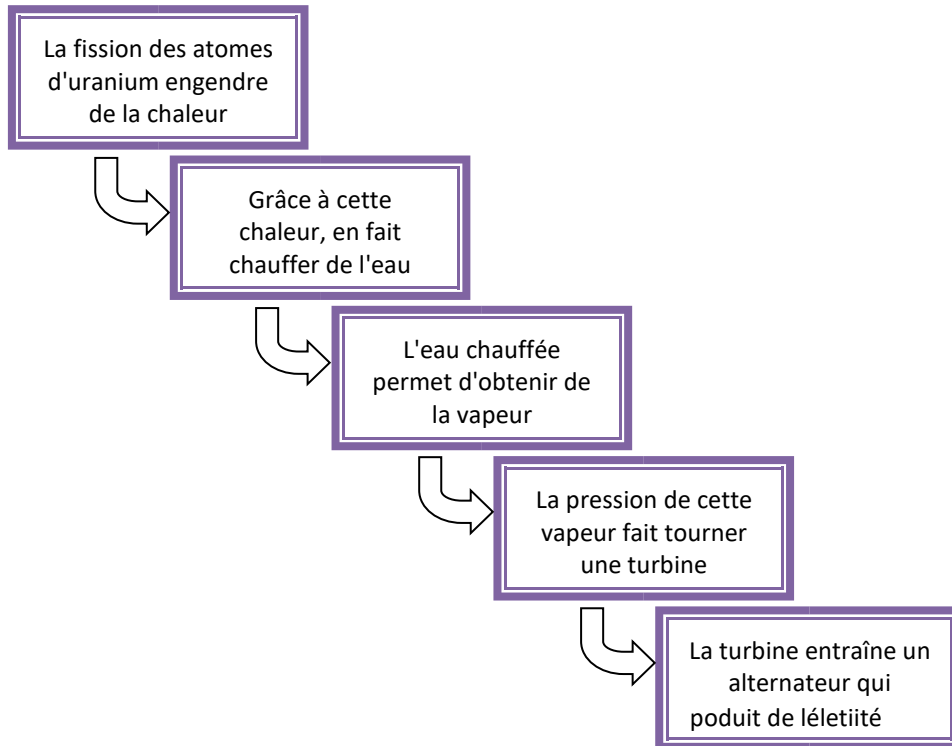
Une centrale nucléaire de production d'électricité utilise la chaleur libérée par l'uranium qui constitue le « combustible nucléaire ». L'objectif est de faire chauffer de l'eau afin d'obtenir de la vapeur. La pression de la vapeur permet de faire tourner à grande vitesse une turbine, laquelle entraîne un alternateur qui produit de l'électricité.

Ce principe de fonctionnement est le même que celui qui est utilisé dans les centrales thermiques classiques fonctionnant avec du charbon voire la figure 2, du pétrole ou du



gaz... à cette différence que le combustible utilisé comme source de chaleur est constitué par l'uranium.

Le principe de production de l'électricité dans une centrale nucléaire peut donc être schématisé comme suit :



**Fig 5** : schéma de principe de production de l'électricité dans une centrale nucléaire

## 2- LES ENERGIES NOUVELLES ET RENOUEVELABLE (ENR).

Toutes ces énergies existent sous plusieurs formes :

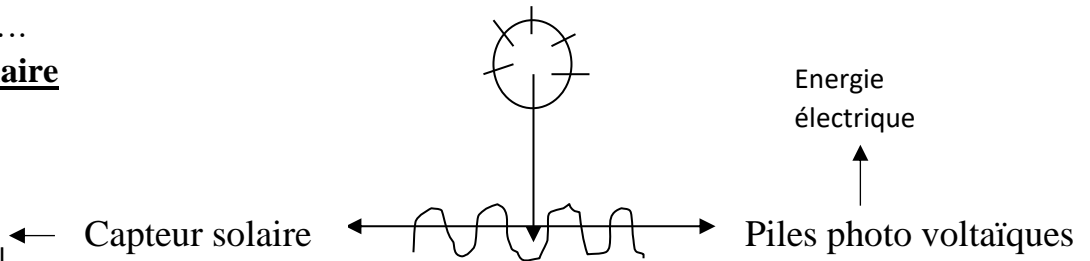
- l'Energie solaire
- l'Energie bio massique
- l'Energie des fluides
- .....

### a) Energie solaire

Four solaire

Curseur solaire

Chauffe-eau sol



L'énergie solaire vient du soleil et a pour origine la fusion nucléaire qui se déroule au niveau de la surface de l'astre solaire. La température à la surface est de l'ordre de 6500K. En traversant l'atmosphère le rayonnement solaire est absorbé et environ une puissance de 1KW/m<sup>2</sup> arrive à la surface de la Terre : c'est la constante solaire  $I_0 = 1KW/m^2$ . Nous avons trois modes de conversion possible :

- la conversion thermique qui utilise comme système énergétique les capteurs solaires et qui est à la base de four solaire, curseur solaire, chauffe-eau solaire.
- la conversion électrique par l'utilisation des piles photovoltaïque et ça produit de l'énergie électrique. Le photovoltaïque est le fond d'objet des nouveaux développements pour améliorer leurs performances et leur compétitivité économique.
- la conversion thermodynamique qui utilise les concentrateurs de chaleur intense qui tournent une turbine afin de produire de l'électricité.

Energie solaire		
thermique	thermodynamique	photovoltaïque
capteur (plan, tubulaire) chauffe-eau solaire	concentrateurs → chaleur intense → tourner une turbine	cellules solaires
chaleur	électricité	électricité

Les avantages de l'énergie solaire : c'est une source gratuite, une source inépuisable et qui a très peu de répercussion sur notre environnement.

Les inconvénients de l'énergie solaire : c'est une énergie répartie et aléatoire et qui nécessite de gros investissements.

### - **Énergie solaire thermique**

L'énergie solaire thermique tire profit du rayonnement du soleil, à travers des capteurs solaires thermiques, afin de le convertir en chaleur. Cette chaleur est principalement utilisée pour le chauffage de l'eau chaude sanitaire « **4 m<sup>2</sup>** pour une famille **4** personnes » et le chauffage des locaux « **20 à 40 m<sup>2</sup>**».

L'installation des panneaux solaires thermiques permet d'assurer une partie des besoins en eau chaude sanitaire et en chauffage, et permet aussi, de réaliser des économies conséquentes, avec des frais de maintenance et de fonctionnement relativement faibles. Cette technique est inépuisable, non polluante, propre et ne dégage pas de gaz à effet de serre. Mais le coût d'investissement d'une installation solaire thermique est relativement élevé et nécessite un chauffage d'appoint pour les périodes climatiques les plus défavorables.

### - **Électricité solaire thermodynamique**

L'énergie solaire thermodynamique est l'un des modes d'utilisation directe de l'énergie solaire. Cette technique désigne à transformer l'énergie du rayonnement solaire en chaleur, à travers des collecteurs « capteurs paraboliques ou cylindro-paraboliques », dont le rôle est la concentration du rayonnement solaire sur un seul foyer « centrale dite à tour », pour chauffer un fluide « huile ou sels fondus de 250 à 1000°C » et produire de l'électricité au moyen d'un cycle thermodynamique. Ce fluide vaporise de l'eau, qui entraîne un turboalternateur, comme dans les centrales thermiques conventionnelles.

**Note :** la filière solaire thermodynamique demeure toutefois réservée aux pays sans nuage. L'espace sahélien de l'Algérie, est l'un des meilleurs au monde à permettre la mise en œuvre d'une telle solution pour la production de l'électricité.

Le plus grand développement commercial a été réalisé par la société **Luz Corp**, qui a construit trois centrales totalisant une puissance électrique nominale de **354 MW** à Los Angeles. Ces centrales témoignent de la relative maturité de cette filière. Les recherches sur cette technique sont menées conjointement par les États-Unis, l'entité sioniste, l'Allemagne et l'Espagne. L'avenir de la solaire thermodynamique est remis en cause par le développement de la filière photovoltaïque (plus simple et fiable), même si cette dernière reste plus coûteuse.

### - **Énergie photovoltaïque**

L'énergie photovoltaïque se base sur l'effet photoélectrique « découvert en **1839** par **Edmond Becquerel** », pour créer un courant électrique continu à partir d'un rayonnement. La première cellule photovoltaïque est apparue en **1954**. Elle emploie pour ce faire des panneaux photovoltaïques, composés de cellules solaires qui réalisent

la transformation d'énergie lumineuse en énergie électrique. La conversion photovoltaïque est basée sur l'absorption de photons dans un matériau semi-conducteur qui fournit des charges électriques, donc du courant, dans un circuit extérieur.

#### - **Système photovoltaïque**

Tout système photovoltaïque peut se composer en trois parties, la figure 12 représente les parties d'un système photovoltaïque :

**Partie de production d'énergie** : elle est composée d'un ou de plusieurs modules photovoltaïques, qui réalisent la conversion d'énergie solaire en électricité. Ce module se compose de petites cellules, qui produisent une très faible puissance électrique « **1 à 3 W** » avec une tension continue de moins de **1 V**. Ces cellules sont disposées en série pour former un module permettant de produire une puissance plus élevée.

**Partie de contrôle d'énergie** : elle est composée d'un système de stockage d'énergie « **batteries** » et de régulation « **Adaptation d'impédance** ».

**Stockage d'énergie** qui permet satisfaire les besoins malgré le caractère aléatoire de l'énergie solaire reçue, les batteries destinées aux installations photovoltaïques doivent avoir les qualités :

- ✓ posséder une grande **réserve** et avoir un **bon rendement** de charge et de décharge ;
- ✓ avoir un taux **d autodécharge faible** et une **durée de vie** importante;
- ✓ avoir une **faible résistance** interne ;
- ✓ avoir une **maintenance réduite** ;

**Adaptation d'impédance** : qui permet d'utiliser le champ photovoltaïque dans la zone de fonctionnement optimale.

**Partie d'utilisation de l'énergie produite** : se compose de plusieurs récepteurs « **utilisateurs par exemple : éclairage, pompage, ...etc.** ».

On peut ajouter encore des moyens d'entretien du système photovoltaïque comme les outils de nettoyage des modules

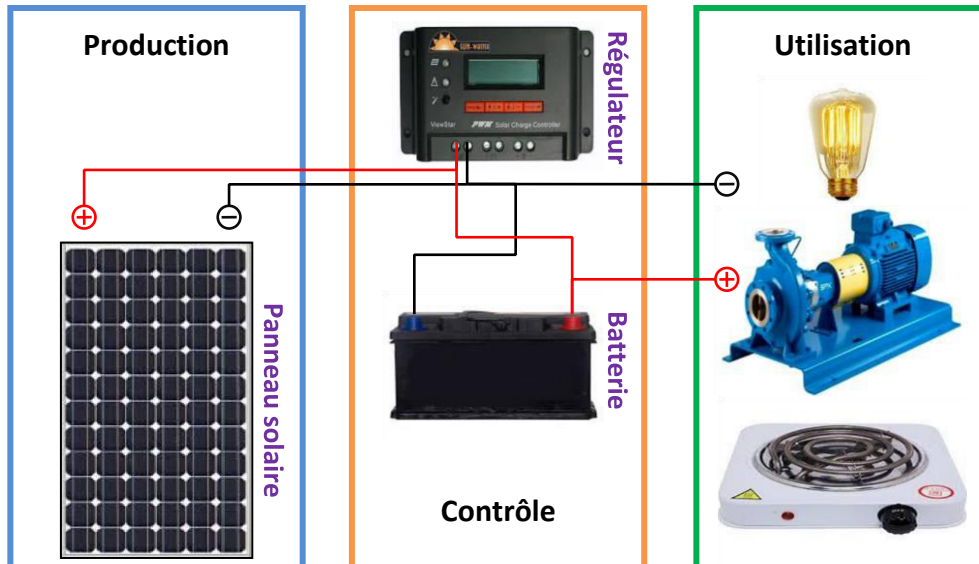


Fig.12 : Composants du système photovoltaïque

### Paramètre des cellules photovoltaïques

Une cellule photovoltaïque est constituée par une jonction **PN**, cette cellule contient des charges électriques du fait du dopage « des électrons dans la zone **N** et des trous dans la zone **P** », ces charges créent un champ électrique au niveau de la jonction. Lorsque la surface de la cellule est éclairée, les photons, d'énergies supérieures à l'énergie de gap **E<sub>g</sub>**, excitent les paires électron-trou et créent des charges positives et négatives dans les régions quasi neutres **P** et **N**, figure 13. Les charges sont mises en mouvement « traversent la zone de transition » par le champ électrique créé par la jonction, si on relie les côtés de cette jonction à une charge **R<sub>c</sub>** un courant électrique **I** se produit et une différence de potentiel apparaît.

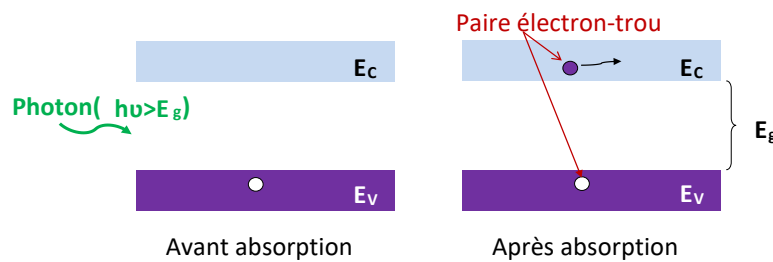


Fig 13 : création d'une paire électron-trou par photo-excitation

### Caractéristique courant tension et schéma équivalent

Un panneau photovoltaïque débite un courant sous une différence de potentiel ; la caractéristique **I(V)** décrit la relation courant-tension, figure 14 (a) :

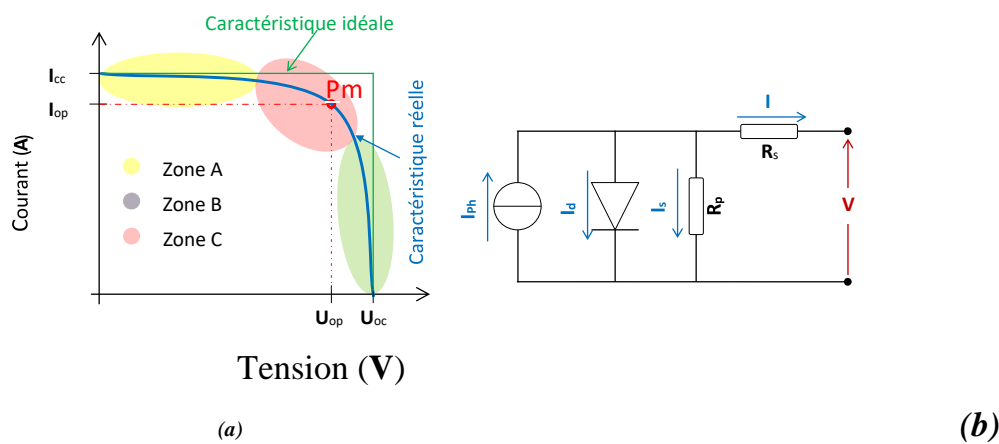
$$I = I_{Ph} - I_d (V) \quad (14)$$

Avec :  $I_{ph}$  est le photo-courant et  $I_d(V)$  est le courant d'obscurité de la diode

Le panneau photovoltaïque est considéré comme une source de puissance ; car il est difficile, sur toute l'étendue de la caractéristique courant tension, de donner un caractère source de courant ou de tension à un panneau photovoltaïque.

L'utilisation optimale d'une cellule photovoltaïque consiste à alimenter une charge sous la tension maximale et à un courant maximal «  $P_m = U_{op} \times I_{op}$  ». Dans ce contexte, le rôle des régulateurs solaires est la réalisation d'une adaptation de l'impédance pour qu'à chaque instant on se trouve proche de ce point de puissance maximale.

Le schéma équivalent de la cellule est représenté sur la figure 14 (b). Les valeurs des divers éléments du schéma équivalent déterminent les performances de la cellule.



**Fig 14 :** (a) Caractéristique d'une cellule photovoltaïque (b) schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque

Le schéma équivalent de la cellule solaire tient compte les résistances série  $R_s$  et parallèle  $R_p$  et le courant de saturation de la diode  $I_s$ .

La caractéristique de la cellule photovoltaïque se divise selon son comportement en trois parties :

**La zone (a)** où la cellule se comporte comme un générateur de courant  $I_{cc}$ ,

**La zone (b)** où la cellule se comporte comme un générateur de tension  $V_{co}$ ,

**La zone (c)** où l'impédance interne du générateur varie rapidement.

La relation entre  $I$ ,  $I_{ph}$  et  $I_d(V)$  représente la caractéristique courant tension, permettant de déterminer les quatre grandeurs principales du fonctionnement de la cellule solaire :

- **Courant de court-circuit  $I_{cc}$**

Il s'agit du courant généré par une cellule éclairée raccordée à elle-même, en court-circuitant les bornes de la cellule, «  $V = 0$  dans le schéma équivalent ».

➤ **Tension à circuit ouvert « tension à vide »  $V_{oc}$**

Il s'agit de la tension générée par une cellule éclairée non raccordée. Autrement dit, la tension obtenue quand le courant qui traverse la cellule est nul.

$$V_{co} = \frac{kT}{e} \ln \frac{I_{cc}}{I_s} + 1 \quad (15)$$

Avec :  $k$  est la constante de Boltzmann,  $T$  est la température en Kelvin et  $e$  est la charge d'électron.

➤ **Facteur de forme  $ff$**

La puissance fournie au circuit extérieur par une cellule photovoltaïque sous éclairage dépend de la résistance de charge « résistance externe placée aux bornes de la cellule ». Cette puissance est maximale pour un point de fonctionnement  $P_m$ , Figure 15 (a). Ce point est obtenu en modifiant la valeur de la résistance externe et il est défini par la relation suivante :

$$ff = \frac{P_m}{V_{oc}I_{cc}} = \frac{U_{op}I_{op}}{V_{oc}I_{cc}} \quad (16)$$

**Note :** selon le théorème de **Transfert maximum de puissance** la puissance maximale est transférée d'un générateur à une charge lorsque **l'impédance de la charge** est égale à **l'impédance interne du générateur**.

➤ **Rendement de conversion  $\eta$**

Le rendement de conversion en puissance des cellules photovoltaïque  $\eta$  est le rapport entre la puissance maximale délivrée par la cellule et la puissance lumineuse incidente  $P_{in}$ .

$$\eta = \frac{P_m}{P_{in}} = \frac{ff \times V_{oc} \times I_{cc}}{P_{in}} \quad (17)$$

La densité de puissance incidente égale à  $P_{in} / A$ . «  $A$  est la section de la cellule ».

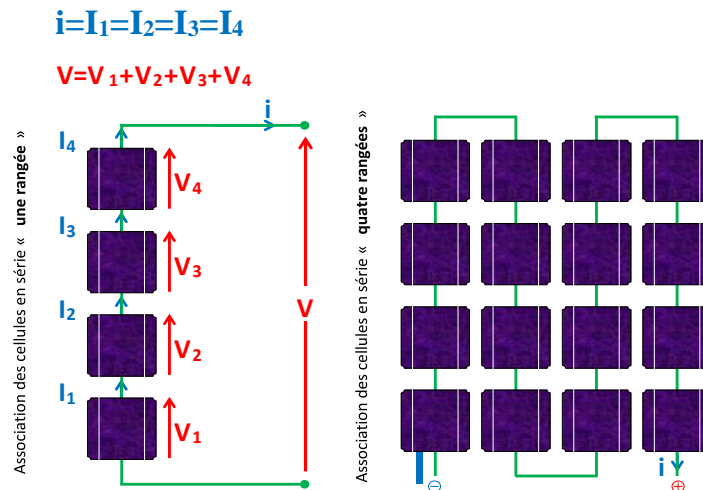
**Note :** la température a un effet négative sur le rendement de la cellule. Plus la température de la cellule augmente, plus la puissance de celle-ci diminue, est le rendement de la cellule égal le rapport entre la puissance de la cellule et la puissance incidente du soleil. Le rendement peut être amélioré en augmentant le facteur de forme, le courant de court-circuit et la tension à circuit ouvert.

## Association de cellules

Les cellules solaires sont commercialisées sous la forme de modules photovoltaïques associant ces cellules, généralement en série « pour élever la tension ». Suivant les besoins de l'utilisation « la tension et le courant désirés », ces modules sont ensuite associés en réseau série-parallèle.

### Association de cellules en série

Les cellules montées en série sont traversées par le même courant et leur caractéristique résultante est obtenue par l'addition des tensions à courant donné.



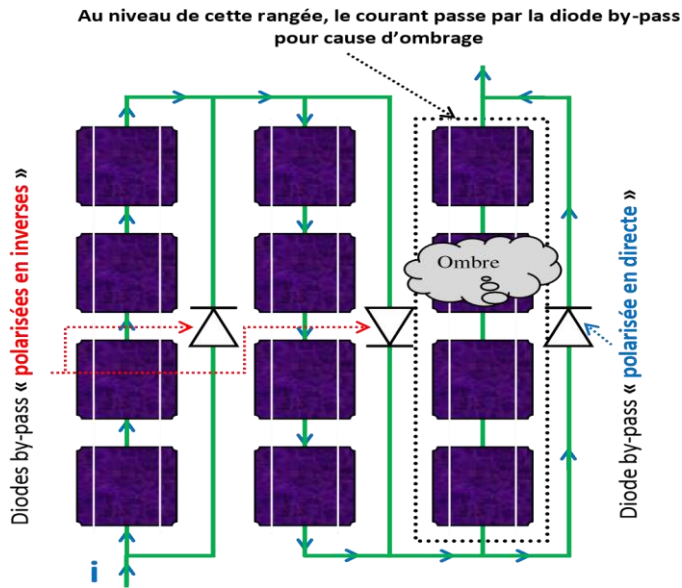
**Fig 15 :** Association des cellules en série

La mise en série des cellules pose un problème, lorsqu'une cellule se retrouve à l'ombre « elle va s'échauffer et risque de se détruire ». Cette cellule "masquée" bloque la circulation de l'intensité du courant produite par les autres cellules. La tension aux bornes de cette cellule augmente « apparition d'une surchauffe ». C'est l'effet d'auto-polarisation inverse appelé « point chaud » en anglais "**Hot spot**". Pour protéger la cellule masquée et supprimer ce problème, on place des diodes « **by pass** » en antiparallèles sur 18 ou 24 cellules de façon à court-circuiter les cellules ombrées. Un panneau solaire dispose d'une à trois diodes by-pass, en fonction de son nombre de cellules « en moyenne 36 cellules pour 3 diodes by pass ».

En cas de masque :

- ✓ pour un panneau solaire avec une diode, toutes les cellules du panneau sont en by-pass,
- ✓ pour un panneau solaire avec deux diodes, 50 % des cellules du panneau sont en by-pass,
- ✓ pour un panneau solaire avec trois diodes, 33 % des cellules du panneau sont en by-pass.





**Fig 16 :** Placement des diodes by-pass

### Association de cellules en parallèle

Les cellules montées en parallèle sont soumises à la même tension et leur caractéristique résultante est obtenue par addition des courants à tension donnée.

#### *Exemple*

1) Un panneau solaire délivre une puissance  $P = 25 \text{ W}$  lorsqu'il reçoit une puissance lumineuse maximale  $P_L = 1000 \text{ W/m}^2$ . Il est constitué de cellules photovoltaïques branchées à la fois en série et en dérivation. Dans chaque branche les cellules sont associées en série, et les différentes branches sont montées en dérivation. La tension aux bornes du panneau vaut  $10 \text{ V}$  ; chaque cellule délivre une tension de  $0.5 \text{ V}$  et un courant de  $500 \text{ mA}$ .

- Quelle est l'intensité du courant  $I_T$  débitée par le panneau ?
- Quelle est le nombre total de cellules  $N$  du panneau ?
- Quelle est le rendement énergétique  $\eta$  du panneau, si sa surface est  $800 \text{ cm}^2$  ?

### **b- Energie bio massique**

- déchets de bois (sciure)
- déchets agricoles
- déchets industriels

La bio masse a pour origine la photosynthèse c'est-à-dire la réaction à partir de laquelle une plante secrète ses constituants sous l'effet du soleil à parti du CO<sub>2</sub> et de l'eau. A partir de la bio masse, on peut obtenir toutes les formes d'énergie fossile :

- le charbon par la carbonisation de la bio masse (pyrolyse)
- le gaz par la digestion de la bio masse (bio gaz)
- le pétrole par la liquéfaction de la bio masse
- combustible gazeux par la gazéification

La biomasse est la 2<sup>ème</sup> énergie renouvelable dans le monde. Il s'agit d'énergie solaire stockée sous forme organique grâce à la photosynthèse. Elle permet de produire de l'électricité, de la chaleur via la combustion de déchets et de résidus de matières organiques végétales ou animales.

Le terme de biomasse recouvre un champ très large de matières : bois, déchets des industries de transformation du bois, déchets agricoles « (pailles, lisiers, ...etc. », fraction fermentescible des déchets ménagers et des industries agro-alimentaires, biogaz de décharge ou produits de méthanisation « lisiers, boues d'épuration, décharges, ... etc.».

Comprend trois familles principales :

A) **Bois énergie « biomasse solide »** : cette technique est utilisée dans les centrales électriques, dont le principe de fonctionnement est le même que celui utilisé dans les centrales thermiques classiques fonctionnant avec du charbon voire figure 2, du pétrole ou du gaz... à cette différence que le combustible utilisé comme source de chaleur est constitué par la biomasse solide. Mais elle peut être aussi utilisée par la chaudière d'une maison individuelle

B) **Biogaz « biomasse humide »** : ce sont les gaz qui se dégagent des matières organiques lorsqu'elles se décomposent (par la fermentation). Les centrales de biomasse humide sont des usines « des grandes installations appelées **digesteurs** », équipées de grandes cuves qui ne laissent pas entrer l'air, pour favoriser la fermentation. Ces biogaz sont utilisés pour le chauffage et pour produire de l'électricité.

**Note** : Les digesteurs sont généralement placés dans des zones agricoles, ils valorisent le fumier et les autres déchets issus de l'agriculture. Ensuite, ce qui ne s'est pas transformé en gaz et qui reste au fond des cuves sera utilisé comme engrais pour fertiliser les champs.

C) **Biocarburants** : un biocarburant est un carburant végétal ou agro-carburant assimilé à une source d'énergie renouvelable, avec une combustion ne produit que du CO<sub>2</sub> et de la vapeur d'eau et pas ou peu d'oxydes d'azote et de soufre « NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub> », il est créé à partir de la transformation de matériaux organiques non fossiles comme les

matières végétales produites par l'agriculture « betterave, blé, maïs, colza, tournesol, pomme de terre, ...etc. ».

On distingue trois générations de biocarburants :

➤ **Biocarburants de première génération** : les biocarburants de la première génération « la seule génération produite à l'échelle industrielle » sont principalement de deux types :

- ✓ **le bioéthanol** : Alcool, utilisé dans le moteur essence, produit à base de plantes riches en sucre ou en amidon « canne à sucre, céréales et betterave sucrière ».
- ✓ **le biodiesel** : un dérivé d'acides gras, utilisé dans le moteur diesel, produit à base de plantes riches en huile « fleurs de colza, tournesol, soja, cacahuètes, ...et. ».

➤ **Biocarburants de deuxième et de troisième génération** : des technologies sont actuellement mises au point pour exploiter à partir de matières premières non alimentaires **cellulosiques**, comme la paille, le bois ou les algues pour les biocarburants de deuxième génération et à partir de microorganismes comme les micro-algues pour les biocarburants de troisième génération. Présentant des bilans énergétiques plus favorables, elles permettent également de limiter les problèmes d'usage extensif des sols agricoles et de concurrence avec les débouchés alimentaires.

Avantages : Matières renouvelables

Inconvénients : Collecte et le traitement.

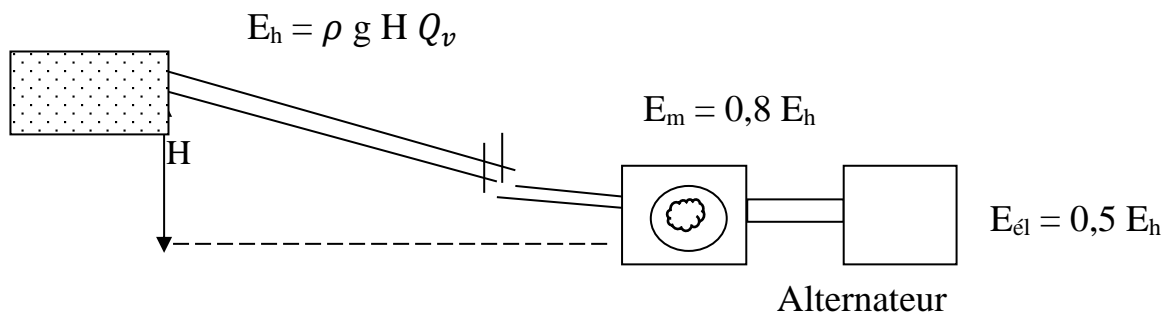
### **c- Energie des fluides**

L'énergie hydraulique, première des énergies renouvelables au monde, elle représente près de 90% de la production d'électricité d'origine renouvelable dans le monde. L'énergie hydraulique permet de produire de l'électricité en utilisant la force motrice des cours d'eau. L'eau en altitude possède une énergie potentielle de pesanteur ; cette énergie est captée et transformée dans des barrages hydroélectriques. Lorsque l'eau est stockée, il suffit d'ouvrir les vannes pour amorcer le cycle de production de l'électricité. L'eau s'engouffre dans une conduite se dirige vers la centrale hydraulique située en contrebas.

avantages	inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> <li>□ C'est une énergie propre « renouvelable » sans émission de fumées et pollution.</li> <li>□ la gestion des cours d'eau permet le contrôle des crues : <ul style="list-style-type: none"> <li>✓ en période de sécheresse, on lâche de l'eau ;</li> <li>✓ en période d'inondation, on retient le surplus d'eau</li> </ul> </li> <li>□ Il existe également un apport économique : le tourisme grâce aux lacs et aux stations balnéaires.</li> </ul> <p>renouvelable, stockable</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ coût des aménagements.</li> <li>➤ risques de rupture du barrage.</li> <li>➤ perturbation de l'écosystème.</li> <li>➤ □ exigences géologiques et géographiques : <ul style="list-style-type: none"> <li>✓ réservoir : zone large et dégagée</li> <li>✓ barrage : zone étroite</li> </ul> </li> <li>□ modification de l'aspect naturel du site.</li> </ul>

- Hydraulique : énergie de l'eau (barrage hydro-électrique)

L'énergie hydraulique a pour origine le cycle de l'eau caractérisé par une évaporation du soleil suivie d'une précipitation (pluie)



On peut faire des micros barrages hydro électriques

#### d- Energie éolienne :

Le mot « éolien » vient du grec Eole, le dieu des vents. Le terme signifie également « rapide », « vif » ou « inconstant ». L'énergie éolienne est une forme indirecte de l'énergie solaire. L'absorption du rayonnement solaire dans l'atmosphère engendre des différences de température et de pression qui mettent les masses d'air en mouvement, et créent le vent.

Le vent a été une des premières ressources naturelles à avoir été utilisée, avec l'eau et le bois, pour faciliter la vie de l'homme. En maîtrisant la force du vent, l'homme a pu

naviguer et découvrir de nouvelles terres ou encore moudre les grains avec des moulins à vent.

Aujourd'hui, l'énergie éolienne, dite aussi aérogénérateur, permet de produire de l'électricité. L'éolienne, est une machine qui permet de transformer l'énergie du vent en mouvement mécanique, puis le plus souvent en électricité.

**Note :** Lorsque l'on ne produit qu'une énergie mécanique, on parlera seulement d'éolienne de pompage d'eau.

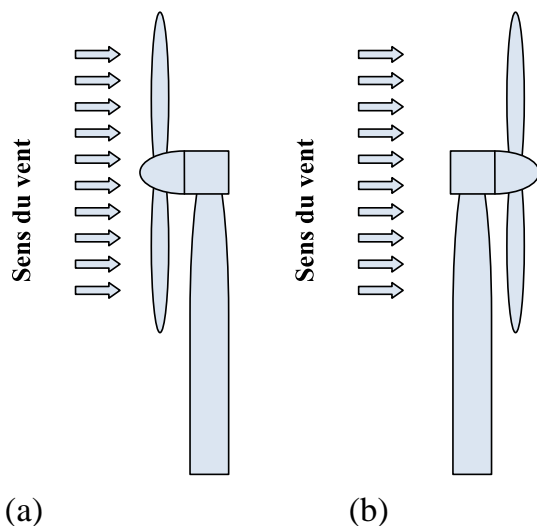
### Différents types des éoliennes

Il existe deux grands types d'éoliennes, caractérisées par la position de leurs axes de rotation par rapport à la direction du vent :

**Les éoliennes à axe horizontal :** Elles sont actuellement les plus répandues à travers le monde, du fait de leur meilleur rendement, elles sont orientables mais manquent de couple au démarrage. Elles sont constituées d'une à trois pales, plus souvent trois pales, car trois pales constituent un bon compromis entre le coefficient de puissance, le cout et la vitesse de rotation du capteur éolien. Il existe deux catégories d'éolienne à axe horizontal :

**Amont:** le vent souffle sur le devant des pales en direction de la nacelle, figure 6 (a).

**Aval:** le vent souffle sur l'arrière des pales en partant de la nacelle figure 6 (b).



**Fig 6 :** Eolienne à axe horizontal (a) amont (b) aval

**Note :** l'éolienne à axe horizontal est plus en avance, car sa technologie est utilisée dans l'industrie aéronautique « dans la fabrication des hélices du rotor d'hélicoptère » et leur rendement aérodynamique est supérieur à celui de l'éolienne à axe vertical.

## Eolienne horizontale

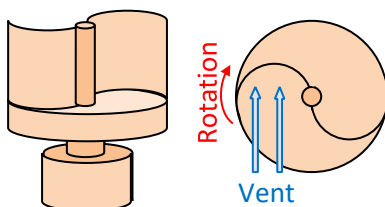
Avantages	inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> <li>□ elle s'oriente d'elle-même pour s'adapter à la direction du vent.</li> <li>□ facilité pour trouver un vendeur/installateur.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ moins résistante aux vents forts.</li> <li>➤ nécessité d'être renforcée recours à des mâts haubanés, installation d'un frein au niveau du rotor.</li> </ul>

**Les éoliennes à axe vertical :** Les pales de ces éoliennes tournent autour d'une tige positionnée verticalement. Elles ont une conception plus simple, un rendement plus faible, plus volumineuses, plus fragiles mécaniquement et d'un entretien plus difficile. Leur principal avantage est sa capacité à capter des vents faibles, elle n'a donc pas besoin de vents puissants, pour fonctionner, car elle n'a pas besoin de s'orienter par rapport au vent. De plus, elle demande moins d'espace qu'une éolienne horizontale et peut fonctionner quel que soit le sens du vent. Cependant l'éolienne verticale démarre moins vite car le poids des rotors pèse sur l'axe, et provoque des frottements. Il existe deux types d'éoliennes à axe vertical :

**Darrius :** A pales verticales, paraboliques ou hélicoïdales, les éoliennes de ce type utilisent la force de portance du vent, comme les éoliennes classiques.

**Fig 7 :** Eolienne verticale « **Darrius** », (a) H, (b) delta, (c) Y et (d) diamant

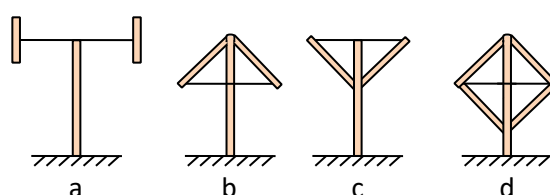
**Savonius :** formées de moitié de barils disposés en S, pivotant autour d'un axe vertical et démarrant facilement lors des vents faibles, ne supportant pas des vents violents.



**Fig 8 :** Eolienne verticale **savonius**

## Eoliennes verticale

Avantages	inconvénients
<b>Darrius</b>	
- émet moins d encombrement qu'une éolienne horizontale	



<ul style="list-style-type: none"> <li>- occupe moins de place.</li> <li>- Intégrable au bâtiment.</li> <li>- génératrice pouvant placée au sol (selon les modèles) Ainsi plus accessible, il peut être vérifié et entretenu plus facilement.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- démarrage difficile dû au poids du rotor sur le stator</li> <li>- faible rendement.</li> </ul>
<b>Savonius</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>- esthétique et la possibilité de l'installer sur une toiture</li> <li>- fonctionne même avec un vent faible (contrairement au système Darrieus), quelle que soit sa direction</li> <li>- émet peu de bruit</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- le faible rendement. - la masse non négligeable.</li> <li>le couple non constant au cours de la rotation.</li> </ul>

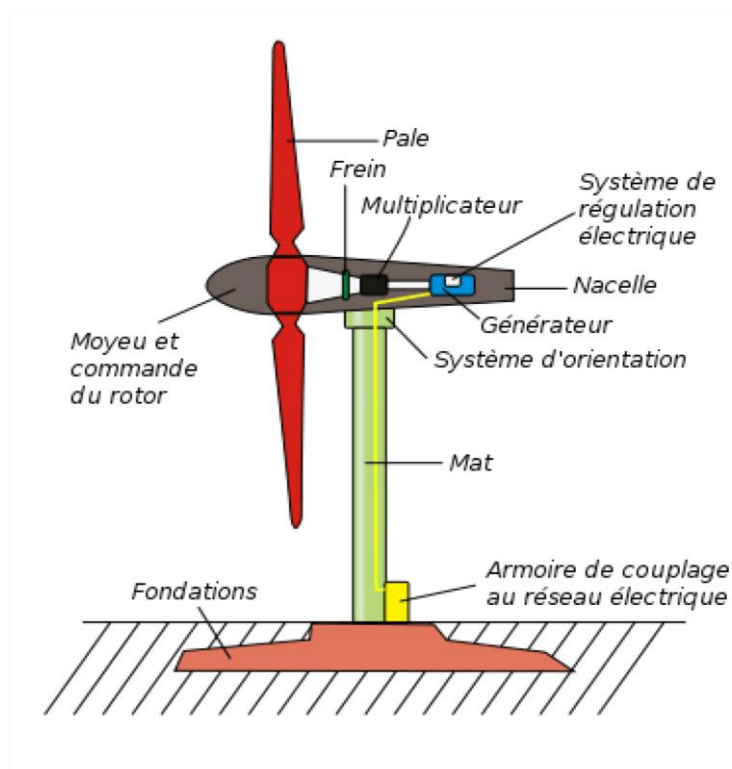
### Chiffres clés

- ✓ une éolienne terrestre peut produire une puissance de quelques **kW à 3 MW**
- ✓ une éolienne en mer « offshore » peut produire une puissance de **3 à 6 MW**
- ✓ Une éolienne moderne nécessite un vent d'au moins **5m/s (18 km/h)**
- ✓ Une éolienne nécessite un vent à une vitesse minimale de **11 m/s (40 km/h)** pour avoir une puissance produite convenable.
- ✓ A partir de **25 m/s (90 km/h)**, l'éolienne doit être arrêtée car elle risquerait d'être endommagée

**Note :** Un parc éolien, composé de quatre à six éoliennes, de puissance **12 MW**, couvre les besoins de près de 12 000 personnes en consommation d'électricité et chauffage.

### Fonctionnement d'une éolienne

Une éolienne ressemble à une hélice, elle est, généralement, constituée de 2 ou 3 pales. Elle se compose d'un mât « la tour sert à soutenir le rotor », d'un rotor « tourne sous la force du vent », d'une nacelle « contient les éléments pour transformer l'énergie cinétique du vent en énergie électrique » et une boîte d'engrenages ainsi qu'une génératrice.



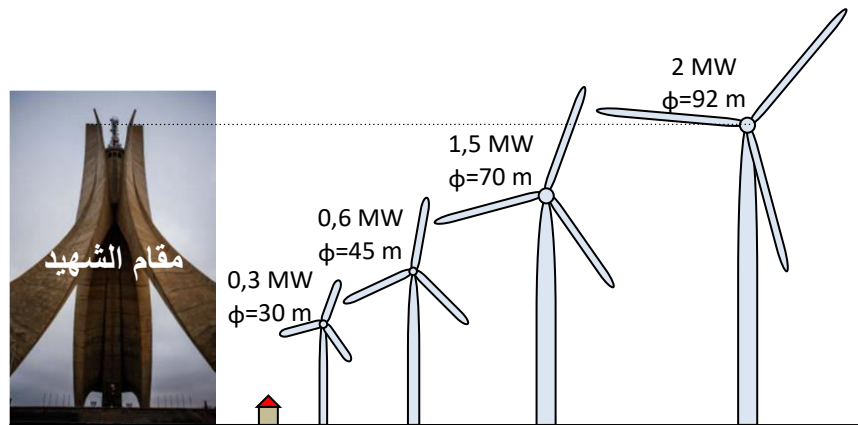
**Fig 9** : Schéma d'une éolienne

La fabrication d'électricité par une éolienne est réalisée par la transformation de l'énergie cinétique du vent en énergie électrique, selon plusieurs étapes:

- **transformation de l'énergie par les pales** : les pales fonctionnent sur le principe d'une aile d'avion. La différence de pression entre les deux faces de la pale crée une force aérodynamique, mettant en mouvement le rotor par la transformation de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique.
- **accélération du mouvement de rotation grâce au multiplicateur** : les pales tournent à une vitesse relativement lente, de l'ordre de 5 à 15 tours par minute, d'autant plus lente que l'éolienne est grande. La plupart des générateurs ont besoin de tourner à très grande vitesse (de 1 000 à 2 000 tours par minute) pour produire de l'électricité. C'est pourquoi le mouvement lent du rotor est accéléré par un multiplicateur.
- **production d'électricité par le générateur** : l'énergie mécanique transmise par le multiplicateur est transformée en énergie électrique par le générateur. En tournant à grande vitesse, le générateur produit de l'électricité à une tension d'environ 690 volts.
- **traitement de l'électricité par le convertisseur et le transformateur** : l'électricité produite ne peut pas être utilisée directement. Elle est traitée grâce à un convertisseur, puis sa tension est élevée à 20 000 volts par un transformateur. L'électricité est alors acheminée à travers un câble enterré jusqu'à un poste de transformation pour être injectée sur le réseau électrique.

**Note** : Plus on augmente la taille des pales de l'éolienne, plus sa puissance augmente.





**Fig 10** : Relation entre le diamètre du rotor de l'éolienne et sa puissance

**Note :**

- La théorie prévoit qu'en augmentant le nombre de pales, on augmente le rendement de l'éolienne. Mais en prenant en compte de critères supplémentaires « rigidité, esthétique, ...etc. », on arrive à un optimum pour 3 pales.
- Il est important sur un site donné, d'aller chercher le vent là où la vitesse sera la plus élevée, et donc de s'éloigner du sol. En effet, le sol ralentit le vent, d'où l'image classique de ces installations de pales en hauteur portées par un mât.

- **Placement des éoliennes**

Les éoliennes peuvent être placées sur terre « **éolien terrestre** ». Mais elles peuvent aussi être placées en mer. On parle alors d'éolien maritime ou « **offshore** ».

La première étape, avant l'installation d'un parc éolien, est de faire une synthèse sur le site, où les éoliennes doivent être placées, y compris la hauteur optimale, les préoccupations environnementales et les coûts. Il est donc très important que notre site doit en particulier :

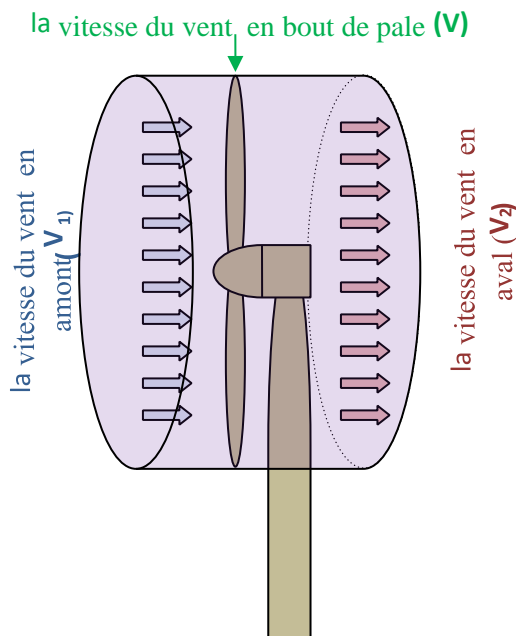
- ✓ être suffisamment venté. Dans l'idéal, les vents doivent être réguliers et suffisamment forts, sans trop de turbulences, tout au long de l'année. Des études de vent sur le site sont donc indispensables ;
- ✓ être facile à relier au réseau électrique de haute ou moyenne tension;
- ✓ être facile d'accès;
- ✓ ne pas être soumis à certaines contraintes « aéronautiques, radars,... etc. »;
- ✓ prendre en compte le patrimoine naturel, en particulier l'avifaune « faune animale des oiseaux » et la faune marine pour l'éolien maritime et éviter les zones protégées « telles que les réserves » ;
- ✓ ne pas prendre place dans des secteurs architecturaux ou paysagers sensibles « sites inscrits et classés, paysages remarquables...etc. ;
- ✓ être d'une taille suffisante pour accueillir le projet.

Cependant, il n'est pas interdit d'installer une éolienne hors de ces zones. Mais ces éoliennes ne seront pas forcément reliées au réseau électrique. Elles serviront par exemple à fournir de l'électricité à une exploitation agricole.

Les éoliennes en mer doivent être installées à moins de 30 m de profondeur et à plus de 30 km des côtes. Elles bénéficient de vents plus réguliers et plus forts.

### - Conversion de l'énergie du vent

Une éolienne permet de capturer et de convertir une partie de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique « rotor qui tourne ». Pour pouvoir estimer la puissance électrique produite par une éolienne, il est nécessaire de connaître quelle est la puissance du vent, et quelle part de celle-ci sera récupérable par l'éolienne. Supposons une veine de vent passant à travers une éolienne.



**Fig 11** : Une veine de vent passant à travers une éolienne

Considérons une masse d'air  $m$  se déplaçant à la vitesse  $v$ . L'énergie cinétique  $E_C$  (en joules) de la masse d'air  $m$  (en kg) qui se déplaçant à la vitesse instantanée du vent  $V$  (en m/s) est égale à :

$$E_c = \frac{1}{2} mV^2 \quad (1)$$

En supposant que la vitesse est constante, la puissance récupérable  $P$  (en Watt) a comme expression :

$$P = \frac{dE_c}{dt} = \frac{1}{2} \frac{dm}{dt} V^2 \quad (2)$$

Avec  $dm/dt$  est le débit massique, est peut s'exprimer comme :

$$\frac{dm}{dt} = \frac{d(\rho V_{air})}{dt} = \frac{d(\rho SL)}{dt} = \rho S \frac{dL}{dt} = \rho SV \quad (3)$$

Avec  $m$  la masse du volume d'air (en kg), la masse volumique (en kg/m<sup>3</sup>),  $V_{air}$  le volume d'air occupé (en m<sup>3</sup>),  $S$  la surface traversée par la veine de vent (m<sup>2</sup>) et  $L$  la distance parcourue (m) par le vent pendant le temps ( $dt$ ). En combinant les équations (2) et (3), on obtient :

$$P = \frac{1}{2} \rho SV^3 \quad (4)$$

**Note :** L'énergie est proportionnelle au cube de la vitesse du vent et au carré de la longueur de la pale de l'éolienne.

Cependant on ne peut pas récupérer, par une éolienne, la totalité de l'énergie cinétique du vent en énergie cinétique de rotation. Si vrais, pas de moindre souffle de vent ne passerait entre les pales du rotor. La vitesse du vent derrière ce dernier serait donc nulle. Cela signifierait que le vent stopperait sa trajectoire et qu'aucune autre quantité de vent ne circulerait à travers le rotor : l'éolienne aurait alors l'effet d'un mur. L'ingénieur allemand **Albert Betz** en 1919 a montré qu'il existait un rendement maximal théorique, pour un fluide incompressible.

### Autres formes d'énergies :

#### **- Énergie mécanique**

L'énergie mécanique est due aux mouvements « énergie cinétique ; par exemple, l'énergie d'une feuille tombant d'un arbre ou d'une voiture qui provient de la combustion du fuel dans le moteur » ou due aussi à la position « énergie potentielle ; par exemple, l'énergie potentielle de l'eau dans un barrage ».

#### **- Énergie chimique**

La création ou la rupture de liaisons chimiques se traduit par une libération d'énergie, généralement sous forme de chaleur. A titre d'exemple l'énergie chimique dérivée par le processus de respiration qui alimente le corps humain ou l'énergie dérivée de l'essence.

#### **- Énergie nucléaire**

L'énergie nucléaire est une énergie libérée par des réactions nucléaires impliquant le noyau de certains atomes « d'un matériau radioactif », soit par fission ou fusion des noyaux. Par exemple l'énergie du soleil est produite à partir d'une réaction de fusion nucléaire dans laquelle les noyaux d'hydrogène fusionnent pour former des noyaux d'hélium.

## - Énergie thermique

L'énergie thermique est due aux mouvements des atomes ou molécules d'un corps, on l'obtient de plusieurs sources : soleil, combustion du bois et des fossiles «charbon, pétrole, gaz » ou électricité « effet Joule ».

### - Énergie radiative « rayonnante ou lumineuse »

L'énergie radiative est très fréquente dans notre quotidien ; le soleil nous éclaire, un radiateur nous chauffe ou encore un four à micro-onde réchauffe nos aliments. Le soleil est une source importante de radiation reçue sur Terre. L'énergie radiative est la seule énergie qui peut se propager dans le vide, en l'absence de matière.

### Énergie géothermique ou aérothermique

La géothermie utilise la température la plus élevée du sous-sol de la Terre pour produire de la chaleur ou de l'électricité. La géothermie à basse température est utilisée pour le chauffage de bâtiments tels que les serres ou d'habitations. La géothermie à haute température permet de produire de l'électricité.

On distingue trois types d'exploitation de la géothermie :

- **la géothermie très basse température** : utilisée pour le chauffage et la climatisation, grâce à une pompe à chaleur exploite des réservoirs, situés à moins de 100 m et dont les eaux ont une température inférieure à 30°C.
- **la géothermie basse énergie** : utilisée pour le chauffage urbain ou dans le cadre de procédés industriels, elle utilise des aquifères à des températures comprises entre 30°C et 100°C.

**La géothermie moyenne et haute énergie « jusqu'à 250°C »** : est utilisées pour produire de l'électricité via des turbines.

## II- Sciences de l'énergie

La principale science de l'énergie c'est la thermodynamique ; c'est la science de l'énergie et de ses différentes transformations. Elle permet de connaître la meilleure manière de convertir de l'énergie et elle permet de calculer le rendement de conversion. La thermodynamique avec ses deux principes, contrôle toute conversion d'énergie.

- le 1<sup>er</sup> principe ou principe de la conservation de l'énergie  $dU = SW + SQ$  où

$$\text{Energie interne} \rightarrow \Delta U = \overset{\substack{\downarrow \\ \text{Travail}}}{W} + Q \longleftarrow \text{chaleur (énergie thermique)}$$

Le 2<sup>ème</sup> principe : quant à lui introduit le principe de la conservation mais aussi de l'évolution des systèmes énergétiques. Ce principe précise que pour tout système thermique énergétique, de la chaleur doit être rejetée vers le milieu extérieur pour assurer l'évolution du système. Ce 2<sup>ème</sup> principe doit introduire la notion d'entropie.

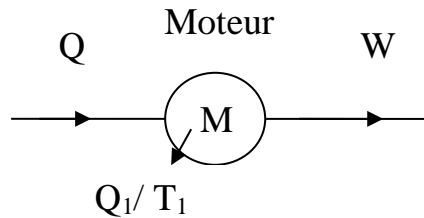
$$\text{Entropie} \rightarrow ds = \frac{dQ}{T}$$

Chaleur ↙  
Température ↙

(Entropie = perte d'énergie)

L'entropie qui exprime une perte d'énergie doit être le plus petit possible afin d'avoir un bon rendement pour le système énergétique.

**Moteur :**



$$Rdt = \frac{-W}{Q}$$

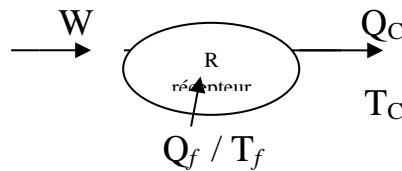
Bilan énergétique :  $Q + W + Q_1 = 0$

$$W = -(Q + Q_1)$$

$$Rdt = \frac{Q+Q_1}{Q} = 1 + \frac{Q_1}{Q} < 1$$

↑  
Rendement carnot

**Récepteur**



$$Rdt = \frac{Q_f}{W} \text{ or } W + Q_f + Q_c = 0$$

$$\text{Donc } W = -Q_f + Q_c$$

$$Rdt = \frac{Q_f}{Q_f+Q_c}$$

↑  
Rendement de Carnot

Si  $Q_c < 0 \nearrow, Rdt \searrow$

Plus le rendement du système énergétique est grand, moins celui-ci a un impact négatif sur l'environnement (moins de CO<sub>2</sub>, de NO<sub>2</sub>...etc)

3<sup>ème</sup> principe : Exergie

$$E_d = E_{\text{vraie}} - T ds$$

Aujourd'hui on parle du 3<sup>e</sup> principe en termes de l'exergie

$$E_d = E_{\text{vraie}} - T ds \quad \leftarrow \text{(entropie)}$$

Pour un système (qui n'échange par d'échange)  $dS = \frac{dQ}{T}$

Pour un système ouvert (qui change d'énergie et autre chose), on parle d'enthalpie  $dh = dw + du$

$$H = pV + U$$

### **III-TECHNIQUES DE L'ENERGIE**

L'élément central d'un système énergétique est le fluide thermodynamique qui subit des évolutions cycliques. Le rendement de ce système est fonction du cycle et est toujours inférieur au rendement de Carnot. Dans le cas des systèmes énergétiques nous avons deux types de systèmes

- ❖ Les moteurs
- ❖ Les générateurs ou récepteurs

Parmi les moteurs on note deux types de moteurs :

⇒ Les moteurs alternatifs (moteur essence ou moteur à explosion) et les moteurs diesels

⇒ Les moteurs à flux continu (les turbines à gaz et les générateurs de vapeur)

Les générateurs et les récepteurs concernent souvent les appareils de froids industriels ou les machines frigorifiques et les pompes à chaleur

Energie primaire → Système énergétique → Energie finale

$$\text{Rendement } R_{at} = \frac{\text{Energie finale}}{\text{Energie primaire}}$$

**Moteur** → - Moteurs alternatifs  
- Moteur à flux continu

**Générateur** → - froid industriel  
**(Récepteur)** - pompe à chaleur

### **IV- BILAN ENERGETIQUE AU BENIN**

Au niveau du Bénin la consommation totale d'énergie 2005 s'élevé à 2256 Kteq (kilotonne équivalent pétrole) soit 0.2tep /hbt

La structure de la consommation est la suivante :

- ♣ Biomasse : 60%
- ♣ Produits pétroliers : 38%
- ♣ Electricité : 2%

La consommation par secteur d'activités est la suivante :

- Le ménage 63%
- Les transports environ 23%
- Les services 10%
- Industrie 4%

Ces chiffres sont produits par DGE (2005) et ça se produit tous les 5ans.

## **CHAPITRE II : GENERALITES SUR L'ENVIRONNEMENT**

### **Introduction**

Les problèmes relatifs à l'environnement couvrent un éventail large de polluants de dangers et de dégradation des écosystèmes dans les secteurs de plus en plus vastes de l'échelon local, régional et mondial

#### **I. Définitions**

L'écologie est théoriquement l'étude de l'habitat des êtres vivants. C'est la science qui étudie les relations des êtres vivants avec leur milieu. Ce milieu est aussi appelé écosphère. L'écosphère comprend différents compartiments à savoir : l'atmosphère (gazeuse), l'hydrosphère (liquide), la lithosphère (solide) et la biosphère (matière vivante)

L'air atmosphérique est un mélange de O<sub>2</sub>, de N<sub>2</sub>, de CO<sub>2</sub>, de H<sub>2</sub>, de SO<sub>2</sub> et de vapeur d'eau ainsi qu'une petite quantité de gaz rares

La pollution atmosphérique est donc définie par le rejet dans l'atmosphère de tout nouveau gaz ou anciens dont les proportions dépasseraient les normes.

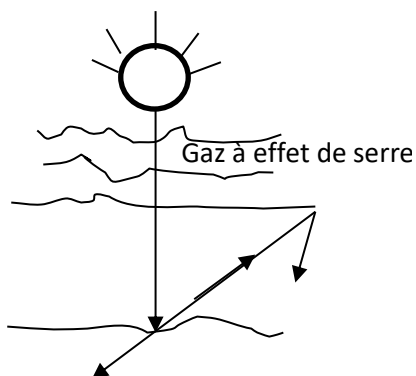
N <sub>2</sub>	75.14%
O <sub>2</sub>	23.19%
CO <sub>2</sub>	0.04%
H <sub>2</sub>	Trace
H <sub>2</sub> O Vapeur	Trace
Gaz rares	1.3% (He, Xe, Ne...)

#### **II. Différents Types De phénomènes environnementaux**

On distingue quatre grandes catégories de phénomènes environnementaux :

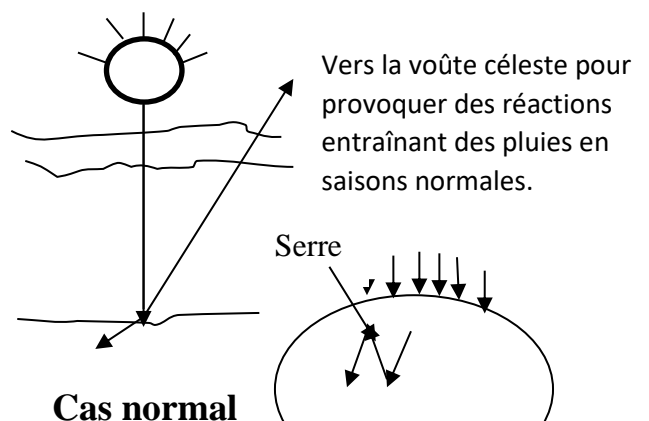
- ❖ L'effet de serre
- ❖ L'ozone
- ❖ Les pluies acides
- ❖ Le SMOG (brouillard)

##### **1- L'EFFET DE SERRE**



**Cas anormal**

Cette énergie est absorbée par les gaz et pour leur équilibre ils les renvoient sur Terre : c'est l'effet de serre.



**Cas normal**

Le rayonnement solaire qui arrive sur la Terre est en partie absorbée par celle-ci et une autre partie est réfléchiée et renvoyée dans la voûte céleste.

La partie réfléchiée est ensuite absorbée par des gaz de l'atmosphère et renvoyée vers la Terre entraînant ainsi une augmentation de la température de la Terre. C'est ce qui est à l'origine de l'élévation anormale de la chaleur à la surface de la Terre entraînant beaucoup de conséquences.

PES= Pouvoir d'Effets de Serre

CO <sub>2</sub>	1
CO	5
CH <sub>4</sub>	63
NO <sub>x</sub>	150
N <sub>2</sub> O	270

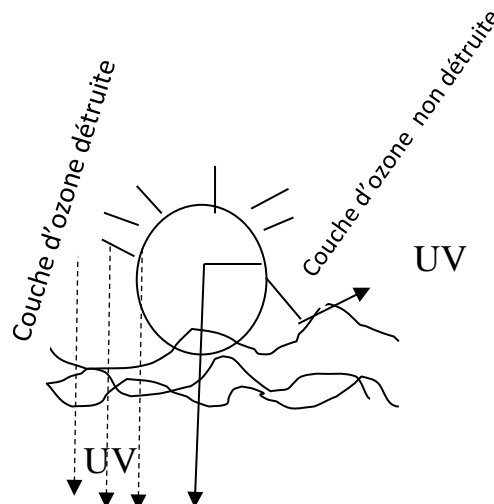
On note plus d'une dizaine de gaz responsables de l'effet de serre. Certains existent naturellement dans l'atmosphère. Mais d'autres sont dus aux activités humaines. Chaque gaz est caractérisé par son pouvoir d'effet de serre noté PES qui est le pouvoir d'absorption et de réflexion de gaz.

Le tableau ci-joint récapitule pour quelques gaz leur pouvoir d'effet de serre. L'élévation de la température entraîne les conséquences ci-après :

- L'inondation due à l'élévation du niveau des mers et des océans ;
- La modification de l'ampleur et du comportement des pluies ;
- L'accroissement de l'intensité et de la fréquence des phénomènes extrêmes (tornado, cyclone) ;
- Modification des rendements agricoles ;
- Recrudescence de différentes maladies (paludisme, cholera,.....).

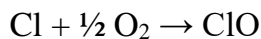
## **2- L'ozone**

L'ozone est un gaz découvert en 1783 de forme moléculaire O<sub>3</sub> et qui représente moins d'un millionième des gaz de l'atmosphère ( $\frac{1}{10^6}$  des gaz de l'atmosphère). C'est un gaz qui absorbe les rayonnements ultraviolets (UV) provenant du soleil empêchant ceux-ci d'arriver sur la Terre. La destruction de cette couche d'ozone par certains gaz produits par les activités humaines entraîne de grandes conséquences sur l'environnement.





rayonnement



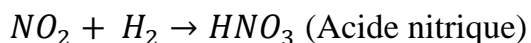
O<sub>3</sub> est donc transformé en O<sub>2</sub> et ClO

Les gaz responsables de la destruction de la couche d'ozone sont les CFC (Chloro-Fluoro-Carbone) qui sont les gaz qui alimentent les réfrigérateurs, les climatiseurs (tout ce qui a rapport au froid). Ces gaz sont améliorés de nos jours.

Les molécules de CFC subissent l'action des puissants rayonnements UV qui leur arrache l'atome de chlore et celui-ci va catalyser la destruction de l'ozone. Les conséquences sur l'environnement sont des troubles graves sur la physiologie humaine (cancer de la peau, cataracte) et des déficiences humanitaires (pas de défense dans l'organisme) et les troubles d'ordre génétique.

### **3- Les pluies acides**

Les pluies acides sont dues aux émissions de SO<sub>2</sub> et de NO<sub>2</sub>. Elles provoquent des dépôts acides ayant pour conséquences l'appauvrissement de la couche arable (couche fertile) des sols, la destruction des poissons, la décimation des forêts (les forêts sont décimées en Europe centrale).  $\text{SO}_2 + \text{H}_2 \rightarrow \text{H}_2 \text{SO}_4$  (Acide sulfurique)



### **4- SMOG (Brouillard)**

On distingue deux types de SMOG :

Le SMOG d'été ou SMOG de Los Angeles qui est caractérisé par une forte concentration de l'ozone aux niveaux du sol (300ug/m<sup>3</sup> le taux normal) et qui donne des troubles de vision (picotement dans les yeux). Son origine est par principe, le rejet de NO<sub>2</sub> dû aux transports.

Le SMOG d'hivers ou SMOG de Londres qui résulte dans la présence de l'atmosphère d'une forte concentration de SO<sub>2</sub> (rejets dû aux transports) pouvant donner naissance à de l'acide sulfurique suite à une réaction avec la vapeur d'eau et qui donc provoque les mêmes troubles que le SMOG d'été.

### **Impacts environnementaux**

Toute activité provoquant un dysfonctionnement des cycles de l'écosystème peut être considéré comme une activité polluante. On distingue trois types d'impact environnemental

- L'Impact esthétique : la structure du paysage, l'odeur, la couleur etc.
- L'impact écologique qui affecte la nature des choses sans pour autant être toxique (ex : effet de serre)
- L'impact toxique qui affecte la physiologie humaine.

### **IV- Effets physiologiques des émissions gazeuses**

Les polluants atmosphériques qui sont dus aux rejets dans l'atmosphère des substances nocives sont les suivants :

- Les poussières

- NO<sub>2</sub>; NO
- SO<sub>2</sub>
- CO et CO<sub>2</sub>
- Les composés organiques
- Les métaux lourds Pb...

**Les poussières** qui proviennent pour la plupart des transports, pénètrent dans les poumons et provoquent de différentes maladies (silicose).

Le SO<sub>2</sub> provoque des difficultés respiratoires et la décomposition de la chlorophylle dans le monde végétal.

Les NO et NO<sub>2</sub> provoquent l'irritation et la destruction des poumons et à une certaine dose ils peuvent amener à la mort par pneumonie.

Le CO est toxique pour le règne animal en agissant sur le système nerveux central ainsi que sur l'appareil circulaire (le sang humain assimile facilement le CO). Enfin le CO<sub>2</sub> n'a aucun rôle dévastateur sur l'organisme humain, au contraire pour le monde végétal, une teneur élevée joue un rôle d'accélérateur de la croissance.

## CHAPITRE III- INTERRATIONS ENERGIE-ENVIRONNEMENT

### Introduction

Tous les polluants ont la plupart pour origine les activités humaines et notamment celles liées au secteur de l'énergie.

Un nombre élevé des problèmes relatifs à l'environnement est lié à la production, à la transformation et à l'utilisation finale de l'énergie.

Dans onze grands domaines préoccupants pour l'environnement, l'énergie joue un rôle important dans le cas des **ACCIDENTS ENVIRONNEMENTAUX** et dans le cas de la **POLLUTION ATMOSPHERIQUE**.

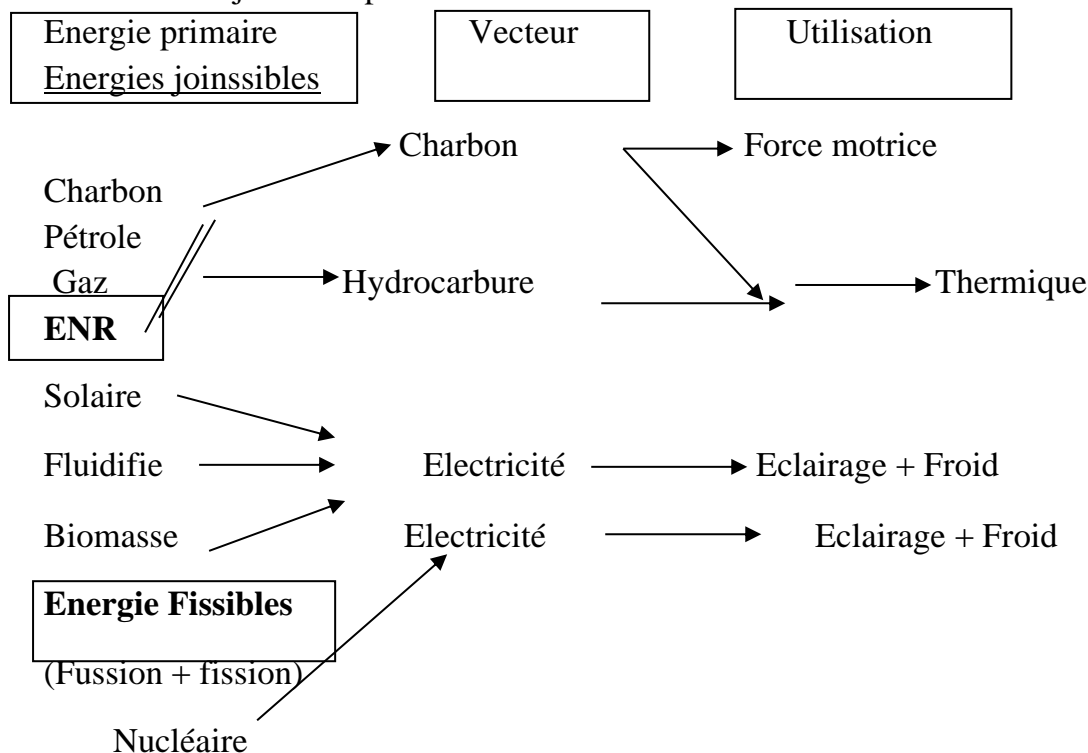
**LES ACCIDENTS ENVIRONNEMENTAUX** concernent les éruptions, les explosions et les incendies, la rupture des barrages hydro électriques, la combustion spontanée du méthane dans les décharges d'ordures.

LA POLLUTION ATMOSPHERIQUE concerne tous les gaz cités précédemment.

#### **I- Filières énergétiques**

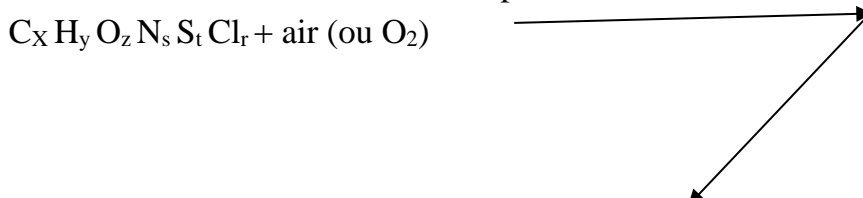
Une filière énergétique peut être définie comme une ligne qui joint les sources primaires d'énergie à l'usage.

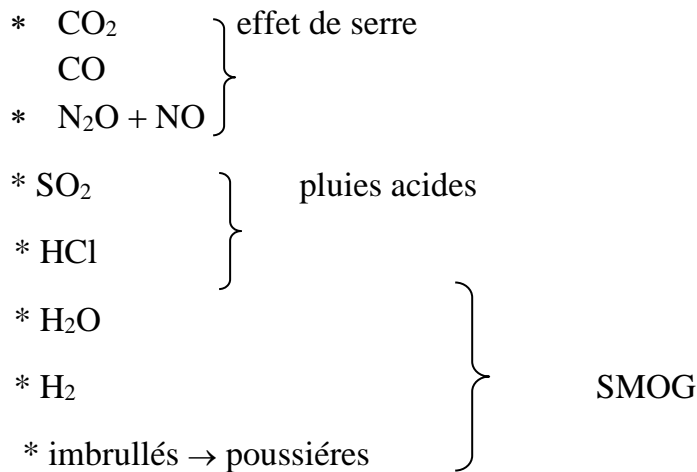
Le tableau ci-joint récapitule :



#### **II- Energie et pollution de l'air**

La pollution atmosphérique est essentiellement due à la combustion de combustible selon le schéma de combustion ci-après.

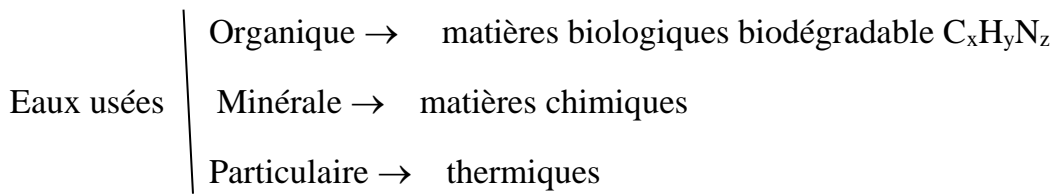




La composition des gaz émis est strictement liée à la composition de combustible

### **III- ENERGIE ET POLLUTION LIQUIDE**

Les eaux usées proviennent pour la plupart des industries. Elles sont d'origine organique, minérale et particulaire.



La pollution organique concerne les matières biodégradables qui sont rapidement décomposées en éléments simples par des microorganismes en présence d'oxygène ; et les produits difficilement biodégradables pour lesquels il faut procéder à une équation artificielle ; puis les polluants organiques comme les pesticides, insecticides etc.....

La pollution minérale concerne les minéraux qui sont directement toxiques (produits de métallurgie chimique....)

Et enfin la pollution particulière qui est pollution thermique caractérisé par l'élévation de la température du milieu récepteur. Seule cette pollution est imputable à l'énergie du fait des eaux chaudes de chaudière et des eaux de refroidissement des centrales thermiques.

### **IV- Energie et pollution solide**

Les solides de l'environnement proviennent des activités industrielles et des consommations humaines. L'homme génère de par sa consommation environ 150kg/hbt / an d'ordures ménagères pour les pays en voies de développement (PED), et 350kg/hbt / an d'ordures ménagères pour les pays développés (PD).

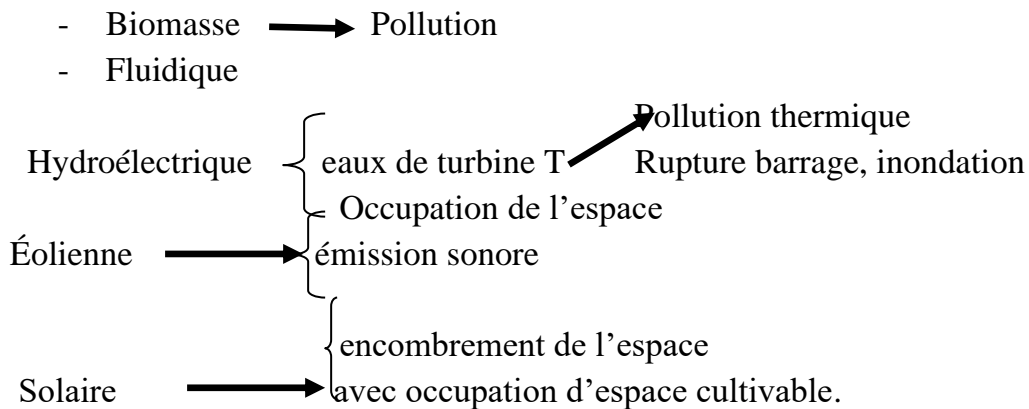
La meilleure manière de gérer les ordures ménagères (OM) est donc la mise en décharge contrôlée avec récupération de méthane, le compostage pour produire des engrais et fertilisants, et enfin l'incinération qui permet de récupérer de la chaleur et qui par contre provoque des émissions de gaz à effet de serre.

## **V- Cas particulier d'impact environnemental**

On note des pollutions particulières dues à l'utilisation des énergies nouvelles et renouvelables, les énergies fluidiques et notamment l'énergie hydroélectrique, peuvent provoquer l'élévation de la température de l'eau par le rejet des eaux de turbine, peuvent être à l'origine de la rupture des barrages entraînant ainsi une inondation

L'énergie éolienne provoque pour sa part, une nuisance sonore et un encombrement important de l'espace. Le seul impact imputable à l'énergie solaire est le problème de surface.

### **ENR**



## **CHAPITRE IV : METHODES DE PREVENTION ET DE TRAITEMENT DE LA POLLUTION ENERGETIQUE**

### **Introduction**

Afin de réduire et de prévenir les émissions de polluants, on peut agir dans trois différentes directions :

- Action sur le combustible ;
- Action sur la combustion et sur le foyer de combustion ;
- Traitement des rejets gazeux.

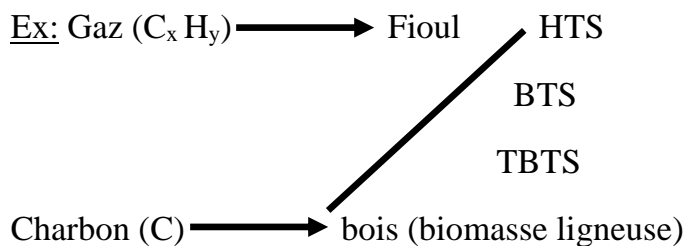
### **I- Cadre de référence**

Les différentes étapes de prise de décision en matière d'énergie et d'environnement sont récapitulées dans la figure 1 ci-après.

### **II- Substitution de combustion**

On n'entend par substitution, les changements de qualité et de composition des combustibles.

En effet, le mélange gazeux rejeté dans l'atmosphère, dépend intimement de la composition de combustible



### **III- Techniques de lutte Anti-pollution**

L'ensemble des techniques de lutte anti-pollution fait appel à des dispositifs complémentaires. Ces techniques peuvent être très efficaces dans la réduction des émissions rejetées, qu'elles soient utilisées isolément ou combinées.

#### **3-1 Action sur le combustible**

Elle consiste généralement à réduire la teneur en composés polluants comme le soufre et l'azote. Cependant, seule la **réaction de DESULFIRATION** est possible.

C'est une réaction qui se déroule en présence d'hydrogène et qui entraîne la formation de l'hydrogène sulfureux.

**Réaction chimique :**



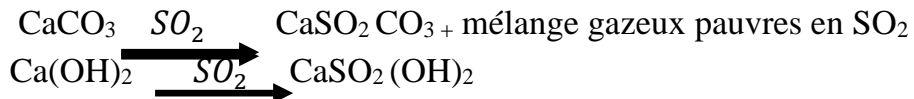
Le rendement de désulfuration atteint parfois l'ordre de 50%.

La désulfuration n'induit pas une autre forme de pollution, car l'hydrogène sulfureux  $\text{H}_2\text{S}$  produit est rejeté vers les couches supérieures de l'atmosphère.

### 3-2 Action sur la combustion et le foyer de combustion

L'objectif dans ce cas est de réduire la qualité de dioxyde de soufre  $SO_2$  rejeté.

Cette technique consiste à introduire dans le foyer de combustion, un additif qui peut être soit le carbonate de calcium  $CaCO_3$  ou soit la chaux  $Ca(OH)_2$  qui va faire des réactions complexes avec le  $SO_2$  lors de la combustion (complexes préférentiels)



Le taux de séparation du  $SO_2$  atteint 50 à 60%

Un avantage de la combustion en lit fluidisé est aussi la basse teneur en  $NO_2$  rejeté.

### 3-3 Action sur les rejets de gaz

Les gaz rejetés peuvent passer aussi dans des dispositifs qui permettent de réduire leur teneur en polluants. Ainsi, on peut capter les poussières entraînées par les gaz brûlés par les cyclones et des électro filtres. On peut aussi réduire la teneur en  $SO_2$  de ces gaz par différents procédés en utilisant principalement des additifs comme le  $Ca(OH)_2$  ou du charbon actif.

Le taux de rétention peut atteindre 90%.

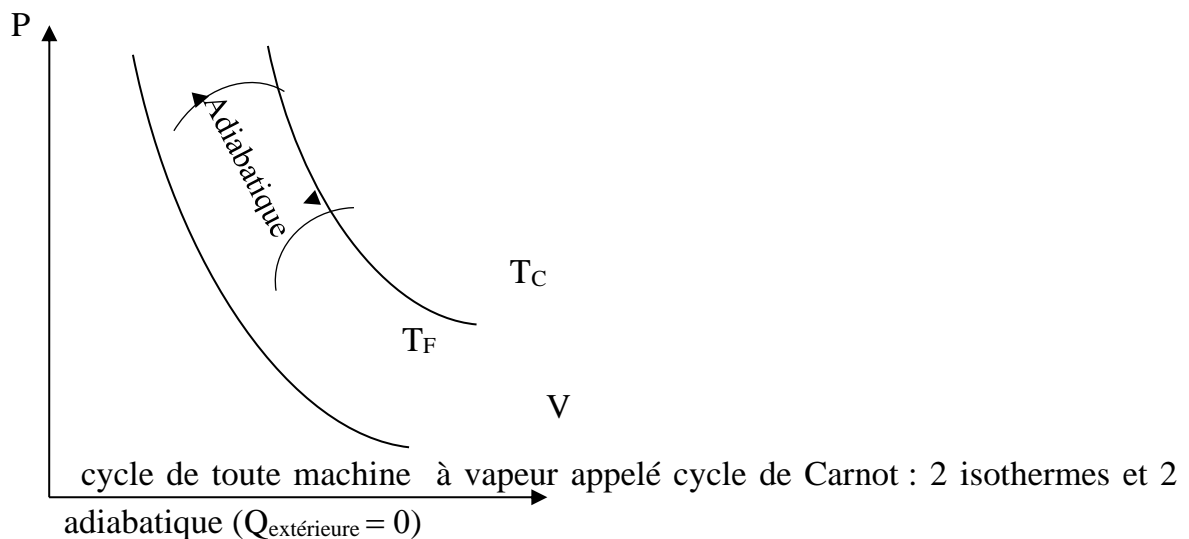
## IV- Amélioration du rendement énergétique

L'amélioration du rendement énergétique du procédé passe nécessairement par l'amélioration du rendement d'un système énergétique. Les connaissances de l'expression de ce rendement (rendement des systèmes énergétiques) va nous permettre de savoir les paramètres sur lesquels, il faut agir pour optimiser le rendement

### 1- Rendement d'une machine à vapeur

Cette machine à vapeur est une machine qui produit de la vapeur par la chaleur dégagée lors de la combustion d'un combustible donné.

Toute machine à vapeur suit le cycle de Carnot qui est de deux isothermes et de deux adiabatiques ( $Q = 0$  pas d'échange de chaleur)



Le rendement de ce cycle est sous la forme

$$\eta = \frac{T_C - T_F}{T_C} = 1 - \frac{T_F}{T_C}$$

$T_C$  = température de combustion

$T_F$  = température de fumée rejetée (C'est le rendement de tout système à vapeur).

L'amélioration du rendement de tout système à vapeur par la réduction de la température froide  $T_F$  (température des fumées)

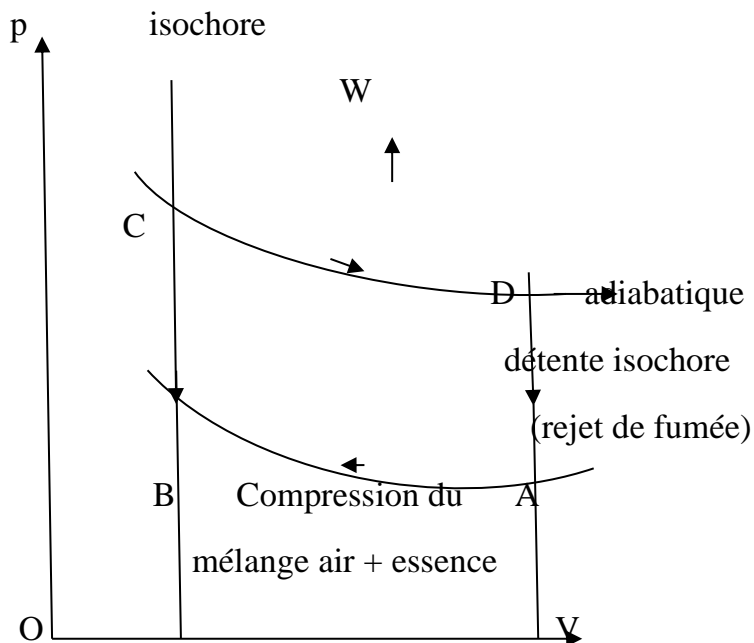
## 2- Moteurs thermiques

Un moteur thermique est un système énergétique qui emprunte de la chaleur du numéro extérieur et qui fournit un travail vers ce numéro extérieur.

### a- Moteur à combustion interne (essence) (Moteur automobile)

Le moteur à combustion interne à essence suit un cycle appelé cycle de OTTO ou cycle de Beau de Rochas.

Ce cycle est composé de deux adiabatiques et de deux isochores



A à B : Compression du mélange air + essence

B à C : Combustion enflammées par les étincelles de bougie

C à D : Détente (temps moteur) : fournit le travail au milieu extérieur

D à A : Détente isochore : rejet de fumée

$$\eta = 1 - \frac{1}{r^{\gamma-1}}$$

Volume atteint de la composition ou taux de



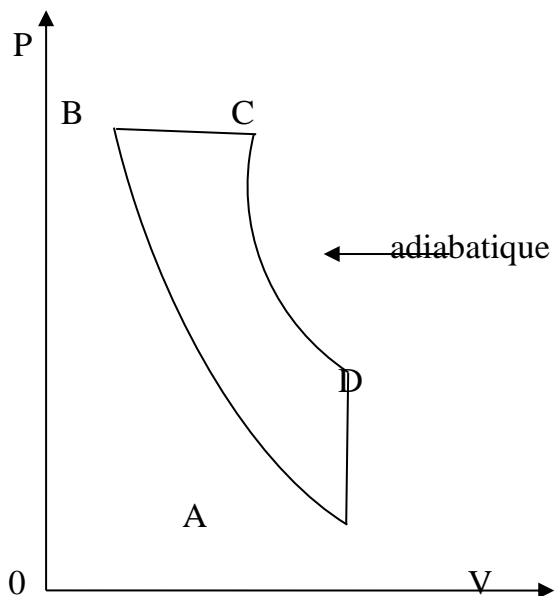
$$r = \frac{V_A}{V_B} \text{ (volume cylindre) et } \gamma = \frac{C_P}{C_V} = \text{Constante de l'adiabatique}$$

Ce rendement est le rendement de tout moteur à combustion interne utilisant de l'essence pour son fonctionnement.

L'amélioration de ce rendement passe par un meilleur taux de compression volumétrique ( $r = \frac{V_A}{V_B}$ )

### **b- Cas du moteur Diesel (moteur à explosion)**

Le moteur Diesel est un système énergétique qui suit un cycle appelé cycle de Diesel représenté sur le diagramme ci-après :



A à B : Compression d'air adiabatique

B à C : Combustion isobare (on injecte du diesel dans l'air chaud comprimé)

C à D : Détente (le temps moteur fournit le travail au milieu extérieur)

D à A : Détente isochore (rejet de fumée)

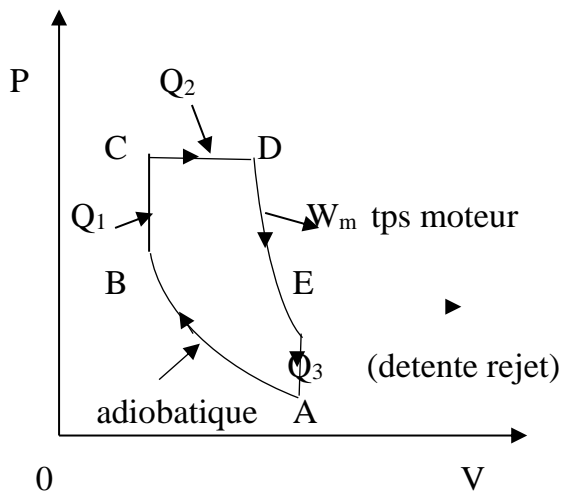
$$\eta = 1 - \frac{\beta^\gamma - 1}{(\beta - 1)r^{\gamma-1}\gamma}$$

$$\beta = \frac{V_C}{V_B} \text{ et } r = \frac{V_A}{V_B} \text{ (taux de compression volumétrique) } \gamma = \frac{C_P}{C_V}$$

Ce rendement est le rendement de tout moteur Diesel lent.

### C- Cas du Diesel rapide ( ou mixte)

Son cycle est un cycle mixte



$$\eta = \frac{w_m}{Q_1 + Q_2}$$

Les diesels actuels ou rapides suivent le cycle appelé le cycle mixte représenté sur le diagramme ci-dessus.

Le rendement est sous la forme :

$$\eta = 1 - \frac{k \beta^{\gamma} - 1}{(k-1) + \gamma k(\beta-1) r^{\gamma-1}}$$

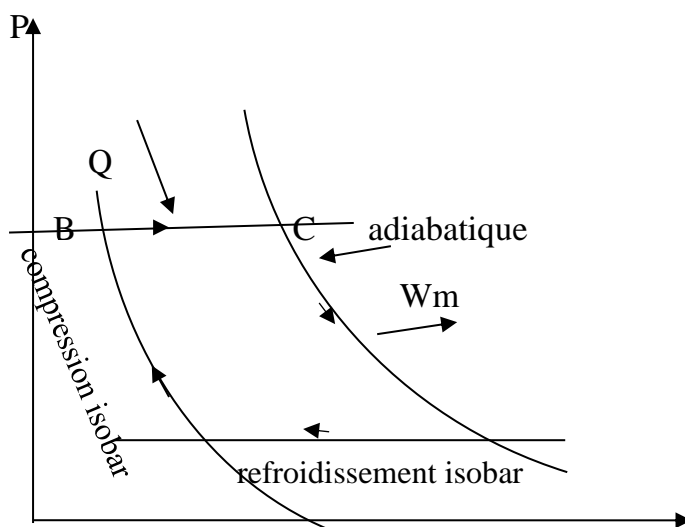
$$r = \frac{V_A}{V_B}; \beta = \frac{V_A}{V_D}; k = \frac{P_C}{P_B}$$

$$\gamma = C_p / C_v \text{ (Si } k = 1, P_C = P_B)$$

Si  $k = 1$  on a  $P_C = P_B$  et ça rejoint le cas de l'autre diesel (diesel lent).

### 3- Turbines

Les turbines a gaz qui équipe actuellement les avions quelques centrales thermiques suivent le cycle appelé de Joule.



A

D

$$\eta = 1 - \tau^{\frac{1-\gamma}{\gamma}}$$

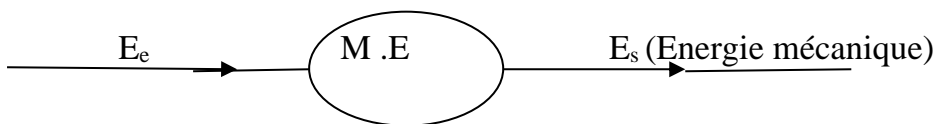
$$\tau = \frac{P_B}{P_A} \text{ (Taux de compression)}$$

$$\gamma = \frac{c_p}{c_v}$$

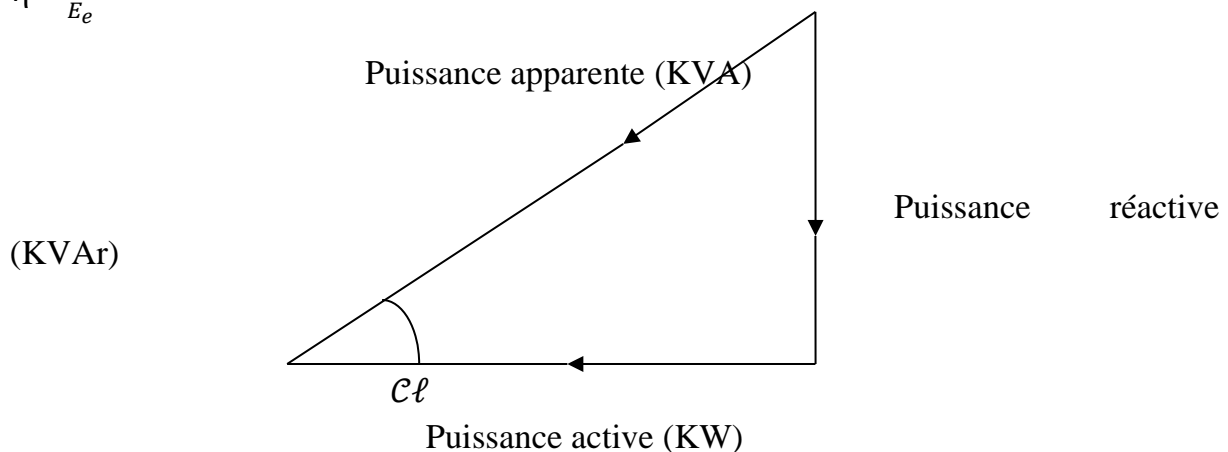
Si le taux de compression augmente ( $\tau \nearrow$ ), le rendement augmente et on consomme moins d'énergie.

#### 4- Moteurs électriques (ME)

Un moteur électrique est un moteur qui à pour source l'énergie électrique.



$$\eta = \frac{E_s}{E_e}$$



$$\cos \varphi = \frac{P_a}{P_{app}}$$

On distingue 3 types de puissance :

- Puissance active exprimé en KW qui représente la puissance donnée par le moteur c'est-à-dire qui sort du moteur ;
- La puissance réactive qui est due à la présence du champ magnétique dans le moteur qui s'exprime en KVAr
- La puissance apparente qui est réellement consommée par le moteur exprimée en KVA. Le facteur de puissance est le rapport de la puissance active sur la puissance apparente :

$$\cos \varphi = \frac{P_a}{P_{app}}$$

Pour améliorer le rendement du moteur dans le cadre, il faudra au minimumiser la puissance réactive ou améliorer le facteur de puissance  $\cos\phi$ .

Dans ce cas, on procède à la pose de condensateur sur le moteur, les condensateurs ayant pour fonction d'aborder les puissances réactives.

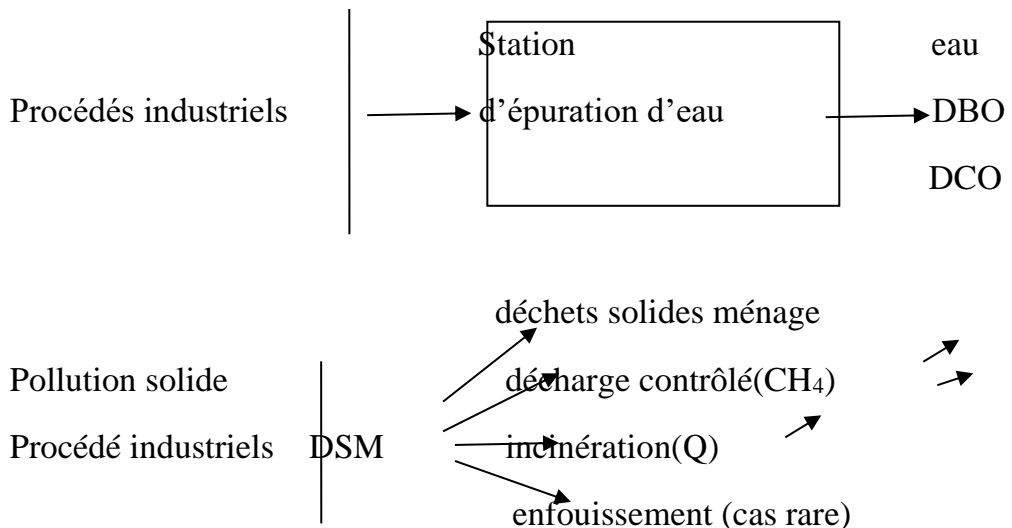
Le rendement du moteur électrique sera un rendement optimum proportionnel à sa charge.

Pour améliorer le rendement, il faut nécessairement faire fonctionner un moteur tout au moins à 70% de sa charge nominale.

### V- Pollution liquide et solide

Pour la pollution liquide, l'énergie n'est responsable que de la pollution thermique. Le traitement de cette pollution réside dans le refroidissement dans des bacs de stockage approprié ou dans le recyclage de ces eaux (ces eaux sont retournées dans les chaudières pour utiliser la chaleur qu'elles contiennent).

La principale pollution liquide est due au procédé industriel qui génère des eaux usées dont le traitement est effectué dans des stations d'épuration d'eau polluée.



L'énergie n'est pas responsable. Dans le cas des pollutions solides, ils proviennent aussi des procédés industriels. Le traitement fait de trois manières différentes.

- Décharge contrôlée avec combustion du méthane
- Incinération avec récupération de la chaleur
- L'enfouissement reste la dernière solution.

## **CHAPITRE V : EVALUATION DES GEZ A EFFET DE SERRE AU BENIN**

### **I- Résultats**

Différents secteurs

ENERGIE

PROCEDE INDISTRUEL

AGRICULTURE

FORESTERIE

DECHETS

Différents gaz évalués :

CO<sub>2</sub>

CH<sub>4</sub>

N<sub>2</sub> O

NO<sub>x</sub>

SO<sub>2</sub>

imbrulés C<sub>x</sub> H<sub>y</sub>

Evaluer les différents gaz au niveau des différents secteurs

#### **GES :**

#### **Contribution de chaque GES**

Agriculture : 70,5%

Foresterie : 26,93%

Energie : 1,84%

Déchets : 0,55%

Procédé Industriel : 0,18%

CH<sub>4</sub> ← Déchets, Agriculture

CO<sub>2</sub> ← Agroforesterie

$C_{H_4} = 70,77\%$

$CO_2 = 27,78\%$

$N_2 O = 1,45\%$

## II- METHODOLOGIE D'EVALUATION

(Quantité de polluants par quantité de matière)

- 1- Comment évaluer la teneur en CO<sub>2</sub> ?
- 2- Comment évaluer le taux de CH<sub>4</sub> et N<sub>2</sub> O ?

$$\frac{n_e = n_{CO_2}}{M_C} = \frac{m_{CO_2}}{M_{CO_2}}$$