

# La conversion d'énergie électromécanique

## II.1 Introduction

La conversion d'énergie est l'art de produire de l'énergie sous une forme donnée à partir d'une énergie se présentant sous une autre forme. Il peut s'agir de produire de l'électricité à partir du vent ou à partir de panneaux photovoltaïques ; ou encore de produire de la chaleur, du mouvement, de la lumière, des rayons X, de l'électricité... à partir d'électricité.

## II.2 Les Diverses sources d'Énergie

Toutes les sources d'énergie dont les hommes disposent proviennent du Soleil et de la Terre, Une source d'énergie est dite primaire si on la trouve telle quelle dans la nature.

### II.2.1 Sources d'énergie Non Renouvelables

Ces sources disparaîtront un jour car leurs stocks sur la Terre sont limités

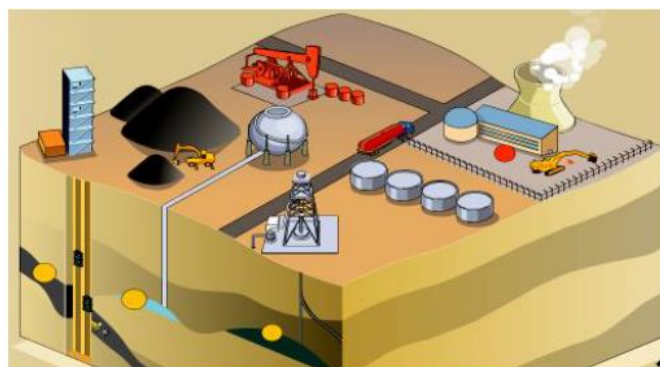
#### II.2.1.1 Les Sources Fossiles

Les sources fossiles (charbon, pétrole, gaz) sont les matières premières que l'on trouve sous terre. Elles sont issues de la décomposition de matières organiques il y a des millions d'années (voir figure)

**II.2.1.2 Le charbon** : il fait fonctionner beaucoup de centrales électriques.

**II.2.1.3 Le gaz** : on le trouve souvent dans les gisements de pétrole. Il est utilisé comme carburant, comme combustible dans certaines centrales électriques.

**II.2.1.4 Le pétrole** : il est transformé en carburant (essence, kérosène), en fioul ... dans les raffineries de pétrole. Il est aussi utilisé pour la fabrication de matières plastiques. Il sert à faire fonctionner des centrales électriques.



**Figure II.1** : Sources d'énergie Non Renouvelables

## II.2.2 Les Sources Fissiles

La fission de minéraux radioactifs (formés **d'atomes que l'on peut « casser »** : fission), de l'énergie peut être libérée sous forme de chaleur.

**L'uranium** : cet élément sert de combustible aux réacteurs des centrales nucléaires de fission.

### II.2.2.1 Sources d'énergie Renouvelables

Elles dépendent d'éléments que la nature renouvelle en permanence. Elles sont inépuisables à notre échelle (plusieurs milliers d'années). Tant que la Terre existera, il y aura toujours du vent, du soleil, du bois, de l'eau, de la chaleur terrestre

II.2.2.2 **Le vent** : il fait tourner des éoliennes.

II.2.2.3 **Le soleil** : Il chauffe l'eau grâce à des capteurs solaires ou fournit de l'électricité grâce à des photopiles ou des centrales solaires.

II.2.2.4 **La biomasse** : le bois sert traditionnellement de combustible. Les déchets d'êtres vivants (plantes, animaux, ...) servent à obtenir des gaz.

II.2.2.5 **L'eau** : elle fait tourner les turbines des centrales hydroélectriques (barrages).

II.2.2.6 **La géothermie** : elle utilise la chaleur du sous-sol pour chauffer directement de l'eau ou fournir de l'électricité.

## II.3 Chaînes de Puissance Electromécanique

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).

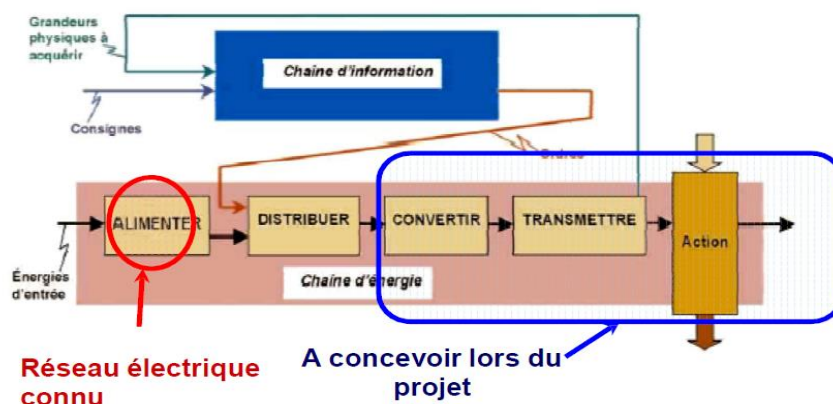


Figure II.2 : La chaîne de puissance

### II.3.1 Notion de puissance :

La puissance définit la quantité de travail effectué par unité de temps (par seconde) ou autrement dit le débit d'énergie. **1 Watt = 1 Joule / 1 seconde = 1 J/s ou J . s<sup>-1</sup>**

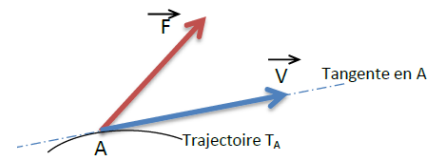
Autre unité usuelle : le cheval (cv) W 736cv 1W

### II.3.2 Puissance développée par une force :

La puissance instantanée  $P$  développée par une force dont le point d'application  $A$  se déplace à la vitesse sur sa trajectoire  $TA$  est égale au produit scalaire de  $\vec{F}$  par  $\vec{V}$ .

$$P = \vec{F} \cdot \vec{V} = F \times V \times \cos\theta$$

$$P \text{ en [Watt] ; } F \text{ en [N] ; } V \text{ en [m.s}^{-1}\text{]}$$



### II.3.3 Puissance développée par un couple :

La puissance développée par un couple  $C$  se déplaçant à la vitesse angulaire  $\omega$  est égale au produit de  $C$  par  $\omega$

$$P = C \times \omega$$

$P$  : puissance en [W] ;  $C$  : couple en [Nm] ;  $\omega$  : vitesse de rotation en [rad.s<sup>-1</sup>]

La fréquence de rotation  $N$  est souvent exprimée en tour par minute. Il faut la convertir en radian par seconde pour la rendre exploitable dans les calculs grâce à la relation suivante :

$$\omega = (2\pi / 60) \times N$$

### II.3.4 Notion de rendement :

Le rendement ( $\eta$ ) d'une machine est égal au rapport de l'énergie restituée sur l'énergie fournie ou reçue.

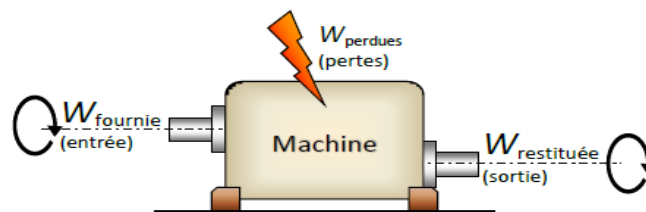


Figure II.3 : Représentation des énergies d'une machines

**Remarque :** l'énergie perdue peut l'être sous forme de chaleur, de frottement, etc

$$\eta = \frac{W_s}{W_e} = \frac{W_e - W_p}{W_e} = 1 - \frac{W_p}{W_e}$$

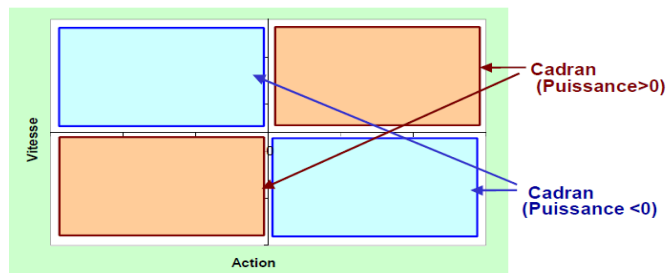
$$\eta = \frac{P_s}{P_e} = \frac{P_e - P_p}{P_e} = 1 - \frac{P_p}{P_e}$$

Cela marche aussi avec les puissances :

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 :

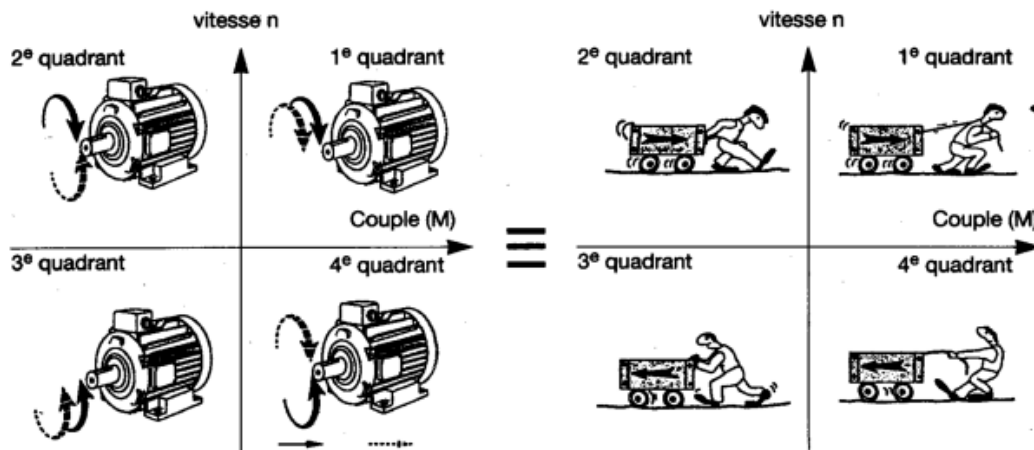
**Puissance = Action x Vitesse**

La figure ci-dessous représente un plan de puissance type. On remarque sur ce graphique que pour deux combinaisons du couple (Action, Vitesse) le système est moteur (Puissance>0), et que pour deux autres combinaisons le système joue le rôle de frein (Puissance <0).



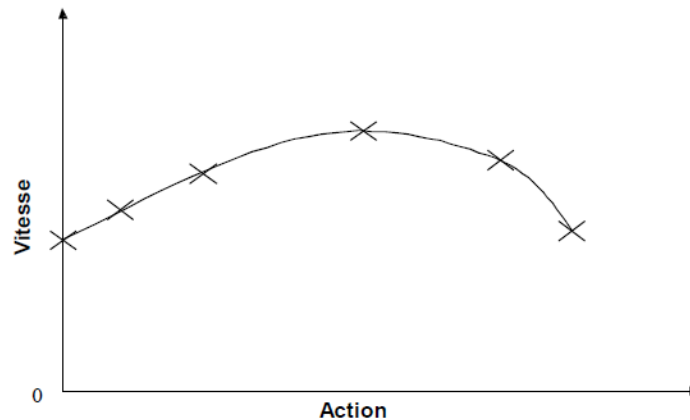
**Figure II.4 :** Représente les combinaisons du couple d'un moteur

De façon plus imagière, voici les modes de fonctionnement en fonction des cadrans :



**Figure II.5 :** Les modes de fonctionnements d'une machine

Il est donc possible de tracer des courbes de puissance d'un système dans son plan de puissance (d'où son nom bien sûr !). Dans la suite du cours, nous nous placerons dans le 1er cadran.



**Figure II.5** : courbe de puissance d'un système

Durant l'utilisation d'un mécanisme, il existe plusieurs temps appelés **points de fonctionnement**. Chaque point de fonctionnement est défini par une valeur en Action et une valeur en Vitesse. Chaque point de fonctionnement possède ainsi sa valeur de puissance. Sur la Figure 2, ces points sont représentés par des croix. L'ensemble des points de fonctionnement forme une courbe de fonctionnement.

Il existe généralement au minimum 3 points de fonctionnement qui correspondent :

- Au démarrage du système : vitesse nulle
- Pendant le fonctionnement normal
- Quand le système fonctionne à vide (sans la charge) : vitesse maximale

Pour un moteur, on appelle charge, le dispositif mécanique qui **impose** les caractéristiques 'Vitesse, Action'. (Exemple. Pour un ascenseur, c'est la vitesse de déplacement souhaitée qui impose la fréquence de rotation, et la masse à déplacer qui impose le couple).

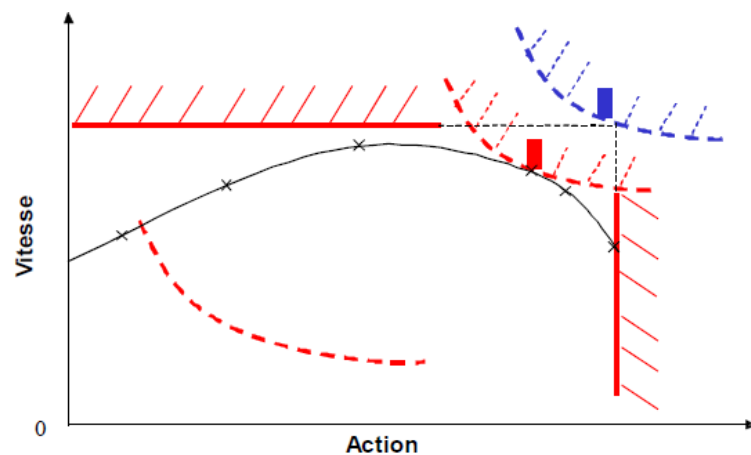
### 1.5 Caractéristiques du plan de puissance

Pour une puissance donnée, il existe un ensemble de points de puissance identique mais en différentes positions dans le plan puissance, ces points forment des courbes d'isopuissance.

Leur équation est donc  $Vitesse = Puissance/Action$ . Ces courbes sont représentées en pointillés sur la figure suivante.

Il existe sur un plan de puissance quelques valeurs remarquables représentées sur la Figure suivante :

- la vitesse maximale : le trait horizontal,
- L'action maximale : le trait vertical,
- La courbe de puissance maximale : tangente au point de fonctionnement maximum,
- La courbe de puissance apparente : tangente au point virtuel de coordonnées (Action maximale, Vitesse maximale).



**Figure II.6 :** Caractéristique du plan de puissance

Le plan de puissance est un outil de vérification. Il permet de valider graphiquement qu'un organe ne demande pas plus d'énergie que le système peut en apporter, ou trouver la puissance nécessaire en fonction de la charge.

Ainsi, pour valider le choix d'un moteur, il est possible d'exprimer la puissance de sortie en fonction de la puissance en entrée du mécanisme, grâce au travail précédent autour du schéma bloc (cf Figure II.6). Le plan de puissance obtenu peut alors être comparé à celui du moteur donné par le constructeur. L'étape finale consiste alors à choisir un moteur dont les capacités (sa courbe caractéristique dans son plan puissance) sont suffisantes pour couvrir les points de fonctionnement exigés par la puissance de sortie.

### La production d'énergie électrique

L'énergie électrique est un cas particulier car c'est une source d'énergie secondaire. Elle est transportée par les lignes électriques du lieu de production au lieu de consommation.











Source primaire d'énergie	Exemple d'utilisation	Principe de fonctionnement	Énergie permettant de produire l'électricité	
<b>Charbon, gaz, pétrole</b> 	<b>Centrales thermiques classiques</b> 	La combustion du charbon, du gaz ou du pétrole transforme l'eau en vapeur sous pression envoyée vers la turbine.	<b>ENERGIE THERMIQUE CLASSIQUE</b>	
			<u>avantages</u>	<u>inconvénients</u>
			Réponse rapide à une demande importante.	Produit des gaz à effet de serre.
<b>Uranium</b> 	<b>Centrales thermiques nucléaires</b> 	L'énergie libérée par les atomes d'uranium permet la transformation de l'eau en vapeur qui entraîne la turbine.	<b>ENERGIE NUCLEAIRE</b>	
			<u>avantages</u>	<u>inconvénients</u>
			Pas de gaz à effet de serre. Compétitif (= faible coût de production).	Gestion des déchets. Risque technologique. Coût de construction important.
<b>Soleil</b> 	<b>Panneaux solaires</b> 	L'énergie renouvelable photovoltaïque permet de produire de l'électricité par transformation d'une partie du rayonnement solaire grâce à des cellules photovoltaïques.	<b>ENERGIE SOLAIRE</b>	
			<u>avantages</u>	<u>inconvénients</u>
			Energie gratuite. Energie renouvelable. Energie préservant l'environnement.	Investissement de départ. Nécessite l'appoint d'une autre source d'énergie. Performances irrégulières qui dépendent de l'environnement.
<b>Eau</b> 	<b>Centrales hydrauliques</b> 	L'eau accumulée derrière un barrage est dirigée vers les turbines par des tuyaux appelés conduites forcées.	<b>ENERGIE HYDRAULIQUE</b>	
			<u>avantages</u>	<u>inconvénients</u>
			Pas de gaz à effet de serre. Utilisable rapidement.	Tous les sites rentables sont déjà exploités.
<b>Vent</b> 	<b>Centrales éoliennes</b> 	Le vent fait tourner les pales, correctement orientées, de l'éolienne.	<b>ENERGIE EOLIENNE</b>	
			<u>avantages</u>	<u>inconvénients</u>
			Pas de gaz à effet de serre.	Pas toujours disponible.

Tableau II.1 : les formes d'énergies

Les formes d'énergie peuvent se transformer l'une en l'autre. La chaîne énergétique désigne l'ensemble des conversions d'énergie qui ont lieu. Une partie de l'énergie est utilisée, une autre partie est dissipée (énergie thermique perdue sous forme de chaleur).



**Exemples :**

- **Un feu de bois** consiste en la conversion par combustion d'une source d'énergie primaire : la biomasse en énergie lumineuse et en énergie thermique.
- **Un moteur électrique** convertit de l'énergie électrique en énergie mécanique (mouvement) et thermique.
- **Une éolienne** convertit l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique (mouvement) puis en énergie électrique.
- **Les panneaux photovoltaïques** convertissent l'énergie solaire en énergie électrique.

**Centrale électrique**

Une centrale électrique est un site industriel destiné à la production d'électricité. Les centrales électriques alimentent en électricité, au moyen du réseau électrique, les consommateurs, particuliers ou industriels éloignés de la centrale. La production d'électricité y est assurée par la conversion en énergie électrique d'une énergie primaire qui peut être soit mécanique (force du vent, force de l'eau des rivières, des marées...), soit chimique (réactions d'oxydoréduction avec des combustibles, fossiles ou non tels que la biomasse), soit nucléaire, soit solaire...

Ces énergies primaires peuvent être renouvelables (biomasse) ou quasiment inépuisables (énergie solaire) ou au contraire peuvent constituer des ressources dont la disponibilité est limitée dans le temps (combustibles fossiles).

**Historique**

En 1878, en Europe, une centrale hydraulique de 7 kW est construite à Saint-Moritz<sup>1</sup>.

La première centrale électrique des États-Unis, la Pearl Street Station, a été mise en service le 4 septembre 1882 par Thomas Edison<sup>2</sup> dans le bas-Manhattan, ce qui a permis de faire fonctionner l'éclairage électrique des bureaux du New York Times et d'autres bâtiments aux alentours de Wall Street. La centrale ne délivrant que du courant continu ne pouvait alimenter efficacement qu'un petit secteur géographique. Le premier générateur, baptisé « Jumbo », était bien moins efficace que ceux d'aujourd'hui : il avait un rendement de 3 à 4 % de l'énergie du charbon utilisé. Quelques années plus tard, Edison a cependant vu l'intérêt de la cogénération en utilisant l'excédent de chaleur produit par le générateur électrique pour chauffer les bâtiments.

Début XIX<sup>e</sup> siècle toutes les centrales thermiques modernes emploient des machines à surchauffe à multiple expansions, compound en général et d'une puissance de 1 000 à 10 000 chevaux. A partir de 1 500 ou 2 000 HP (horsepower), on emploie dans un assez grand nombre de cas la triple expansion, quelquefois la quadruple expansion. L'emplacement des centrales est décidé par la proximité des combustibles (voie ferrée) et par la proximité du cours d'eau nécessaires à l'alimentation des chaudières et aux travaux de refroidissement du condenseur. L'encombrement des machines, et le poids élevé de leurs divers organes, deviennent un véritable gêne pour les grosses centrales, situées dans des emplacements souvent réduits et où le terrain est cher. C'est ce qui a amené peu à l'emploi des turbines à vapeur. Dans un premier temps les deux systèmes coexistent<sup>3</sup>.

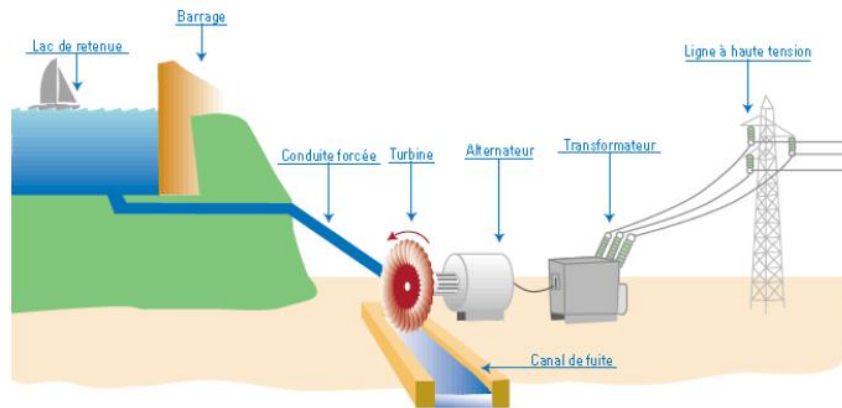
L'invention de la turbine à vapeur moderne en 1884 par Sir Charles Parsons rend possible l'électricité bon marché et abondante, et a révolutionné le transport maritime et la marine de guerre. Elle prend le pas sur la machine à vapeur qui est détrônée. Le premier modèle était relié à une dynamo qui générait 7,5 kW (10 ch) d'électricité<sup>4</sup>. La démonstration complète de l'efficacité de la turbine est réalisée à Erbfeld en Allemagne, des unités de 1 000 kW. Sa licence est brevetée et sa turbine est améliorée peu de temps après par George Westinghouse. La puissance des turbines Parsons s'est également avérée être extensible à grande échelle. Parsons a eu la satisfaction de voir son invention adoptée par toutes les grandes centrales de ce monde, et la taille des génératrices a augmenté depuis la première de 7,5 kW jusqu'à des unités de 50 000 kW de capacité. Pendant la vie de Parson, la capacité de production d'une unité a été multipliée par environ 10 000<sup>5</sup>. La base théorique et scientifique déjà très élaborée explique l'évolution de la turbine, contrairement à ce qui s'était passé pour la machine à vapeur<sup>6</sup>.

## Energie hydroélectrique

### Introduction

Le soleil évapore chaque année en moyenne **980 litres** d'eau de chaque mètre carré de la surface terrestre, au total **500,000 km<sup>3</sup>**. (Voir schéma ci-dessous qui représente le cycle d'eau dans la nature). Environ **22%** de l'énergie solaire de radiation arrivant à la terre est nécessaire pour assurer le cycle d'eau. Presque **20%** de l'eau évaporée pleut sur la terre, où la majorité s'évapore encore. A peu près **40,000 km<sup>3</sup>** s'écoule de nouveau vers les océans par le biais des rivières et eaux souterraines. Ceci est égal à plus de 1 milliard de litres par seconde. Techniquement, l'énergie de ce flux peut être utilisée.

Près de  $160 \text{ EJ} = 160 \times 10^{18} \text{ J}$  est stockées dans les rivières et les mers, ce qui est équivalent à environ **40%** du besoin globale de l'énergie. Environ  $\frac{1}{4}$  de cette énergie pourrait être techniquement exploité, de sorte qu'à peu près **10%** du besoin globale de l'énergie pourrait être fourni sans émissions de dioxyde de carbone par l'énergie hydroélectrique.



**Figure II.7 :** Centrale Hydroélectrique

L'énergie hydraulique est l'énergie mise en jeu lors du déplacement ou de l'accumulation d'un fluide incompressible telle que l'eau douce ou l'eau de mer. Ce déplacement va produire un travail mécanique qui est utilisé directement (par exemple avec un moulin à eau) ou converti sous forme d'électricité (avec une centrale hydroélectrique).

### **Fonctionnement d'une centrale hydroélectrique : De l'eau à l'électricité**

L'énergie hydroélectrique, ou hydroélectricité, est une énergie électrique obtenue par conversion de l'énergie hydraulique des différents flux d'eau (fleuves, rivières, chutes d'eau, courants marins ...). L'énergie cinétique du courant d'eau est transformée en énergie mécanique par une turbine, puis en énergie électrique par un alternateur. On note que :

La puissance disponible résulte de la réunion de deux facteurs : la hauteur de la chute et le débit. (Voir schéma suivant)

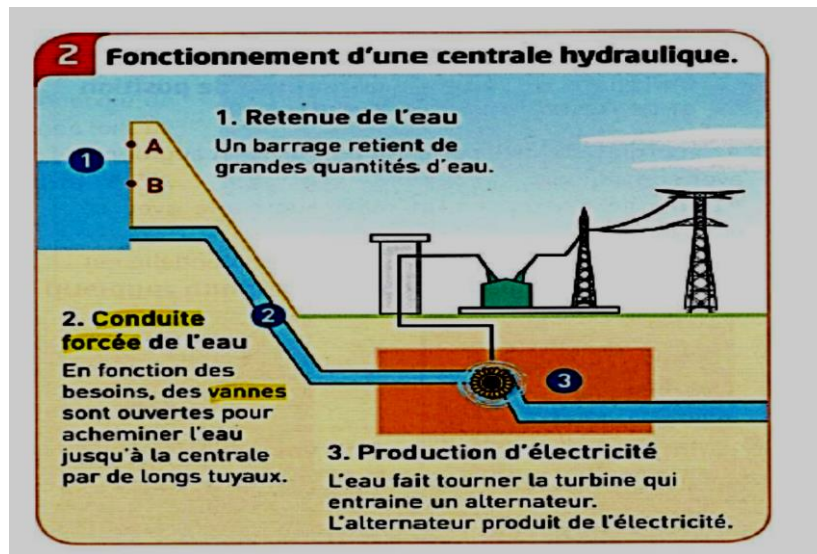


Figure II.8 : fonctionnement d'une centrale hydraulique

### Les différents types d'aménagements hydrauliques

Il existe une grande diversité d'aménagements hydroélectriques en fonction de leur situation géographique, du type de cours d'eau, de la hauteur de la chute, de la nature du barrage et de sa situation par rapport à l'usine de production électrique. On distingue **plusieurs techniques** :

#### 1- Centrale de lac

Elle est surtout présente dans les sites de haute montagne. Elle est caractérisée par un débit faible et un dénivelé (pente) très fort avec une chute supérieure à 300 m.

#### 2- Centrale d'écluse ou de moyenne chute

Elle est surtout installée en moyenne montagne et dans les régions de bas-relief. Elle est caractérisée par un débit moyen et un dénivelé assez fort avec une chute comprise entre 30 et 300 m.

#### 3- Centrale au fil de l'eau ou de basse chute

Elle est implantée sur le cours de grands fleuves ou des rivières. Elle est caractérisée par un débit très fort et pente faible avec une chute de moins de 30 m. Dans ce cas, il n'y a pas de retenue d'eau et l'électricité est produite en temps réel.

#### 4- La Station de Transfert d'Energie par Pompage (STEP)

Elle fonctionne en circuit fermé à partir de deux réservoirs à des altitudes différentes : *Aux heures de forte consommation*, l'eau du bassin supérieur situé en amont est turbinée puis recueillie dans une retenue en aval. *Aux heures de faible consommation*, l'eau est pompée et remontée dans la retenue en amont.

#### 5- La centrale marémotrice

Elle fonctionne de la même manière qu'une centrale de basse chute mais en utilisant la force du courant créée par l'amplitude des marées.

### Energie Eolien

#### Introduction

L'utilisation de la force du vent pour remplacer l'énergie humaine ou animale n'est pas nouvelle. Les premières éoliennes remontent à la Perse ancienne. Certains pays européens, depuis le Moyen Âge, ont largement fait usage de ce type d'énergie par le biais des moulins à vent (**moulins hollandais**) ou des **éoliennes dites américaines** que ce soit pour broyaient les céréales pour les transformer en farine ou pomper l'eau.

#### Définition

L'énergie éolienne est une forme indirecte de l'énergie solaire, puisque ce sont les différences de températures et de pressions induites dans l'atmosphère par l'absorption du rayonnement solaire qui mettent les vents en mouvement. Une hélice entraînée en rotation par la force du vent permet la production d'énergie mécanique ou électrique en tout lieu suffisamment venté.

**L'éolienne**, aussi nommée aérogénérateur, est une machine qui permet de transformer l'énergie du vent en mouvement mécanique, puis le plus souvent en électricité. Lorsque l'on ne produit qu'une énergie mécanique, on parlera seulement d'éolienne de pompage d'eau.



**Figure II.9** : Présentation d'un aérogénérateur

### **Différents types d'éoliennes**

On peut classer les éoliennes en deux grandes familles par leur axe de rotation : l'axe horizontal ou l'axe vertical.

#### **Axe horizontal :**

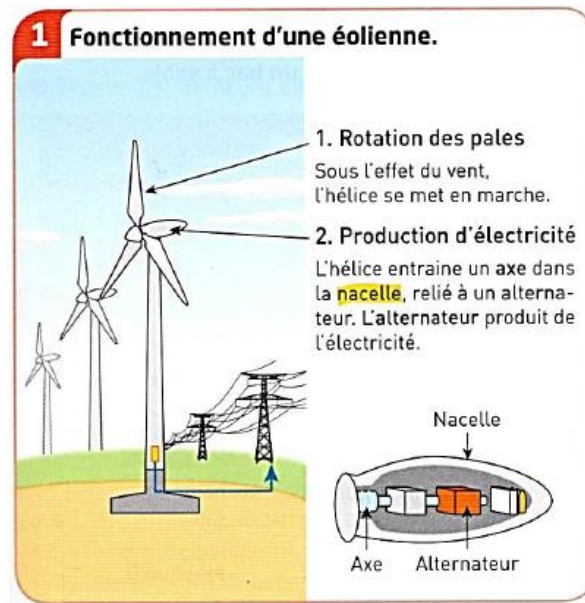
Elles sont constituées d'une à trois pales profilées aérodynamiquement. Le plus souvent le rotor de ces éoliennes est tripale, car trois pales constituent un bon compromis entre le coefficient de puissance, le coût et la vitesse de rotation du capteur éolien

#### **Axe vertical :**

Les principaux capteurs à axe vertical sont le rotor de Savonius, le rotor de Darrieus et le capteur à ailes battantes. Il existe également les machines à traîner différentielle comme le moulinet, les machines à écran et les machines à clapets battants.

### **Fonctionnement des éoliennes**

Les principaux éléments constitutifs d'une éolienne à axe horizontal sont : le mât ou tour, le rotor, la nacelle et le générateur. **Un mât** permet de placer le rotor à une hauteur suffisante pour : permettre son mouvement (nécessaire pour les éoliennes à axe horizontal) et/ou placer ce rotor à une hauteur lui permettant d'être entraîné par un vent plus fort et régulier qu'au niveau du sol. Le mât abrite généralement une partie des composants électriques et électroniques (modulateur, commande, multiplicateur, générateur, etc.).



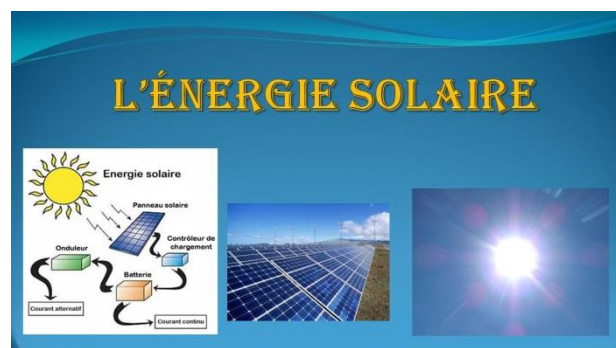
**Figure II.10** : Fonctionnement d'une éolienne

## Énergie Solaire

### Introduction

L'énergie solaire est l'énergie transmise par le Soleil sous la forme de lumière et de chaleur. Cette énergie est virtuellement inépuisable à l'échelle des temps humains, ce qui lui vaut d'être classée parmi les énergies renouvelables (même si le Soleil disparaîtra un jour).

L'énergie solaire peut être utilisée directement par l'Homme pour s'éclairer (fenêtres, puits de lumière), se chauffer et cuisiner (chauffe-eau solaire, four solaire) ou pour produire de l'électricité par l'intermédiaire de panneaux photovoltaïques.



**Figure II.11** : représentation de l'énergie solaire

L'énergie solaire reçue par la Terre représente 10000 fois la consommation énergétique mondiale. Elle pourrait répondre à tous les besoins en énergie, mais demande de gros

investissements. L'énergie émise par le Soleil l'est d'abord sous la forme de rayonnements électromagnétiques dont l'ensemble forme le rayonnement solaire, qui constitue la seule source externe notable d'énergie pour l'atmosphère.

Le rayonnement solaire se propage à la vitesse de la lumière  $C$  ; il lui faut donc, en moyenne, 499 secondes, soit 8 minutes et 19 secondes, pour atteindre notre atmosphère. La plus grande partie de l'énergie solaire est cependant rayonnée dans les domaines ultraviolet, visible et proche de l'infrarouge

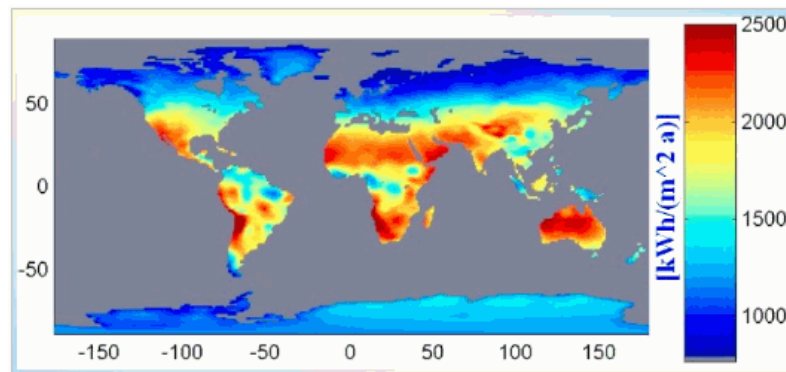


Figure 20

### Principe de fonctionnement

Un panneau solaire thermique a pour but de transmettre la chaleur émise par le soleil à notre système de chauffage solaire. Les rayons du soleil traversent la vitre, à l'intérieur une plaque absorbante qui a pour but de capter les rayons infrarouges. Derrière cette plaque chaude passe un liquide qui récupère cette chaleur.

Il existe 2 Types de chauffage solaire : le plancher direct et le système à accumulation.

- ✚ **Le plancher direct** : le liquide passe et se chauffe dans les capteurs et ensuite circule directement dans le plancher chauffant basse température.
- ✚ **Système à accumulation** : l'eau chaude de chauffage est stockée dans un ballon puis renvoyée sur le réseau de radiateurs.

**Remarque :** Ces deux systèmes permettent également la production d'eau chaude.

Le schéma suivant illustre le principe de fonctionnement du chauffage solaire



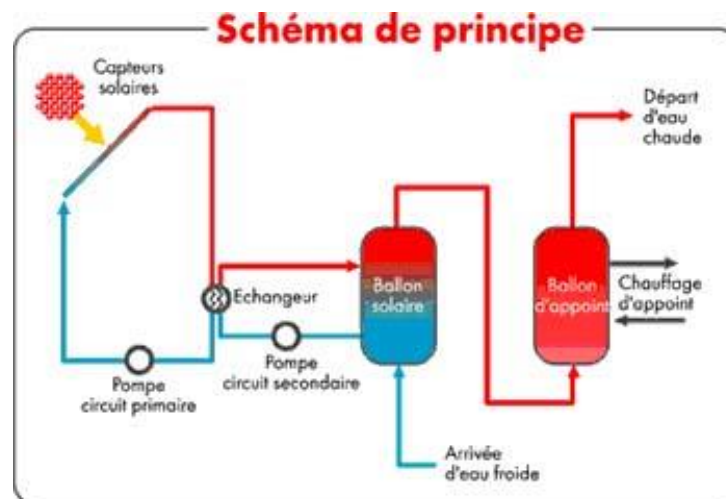


Figure 21

Les centrales solaires utilisent le **rayonnement solaire** pour produire de l'électricité. Il existe différents types de centrales solaires mais toutes sont basées sur le même principe. Elles concentrent les rayons du soleil pour chauffer à très haute température un liquide particulier non vaporisable. Ce liquide chauffe à son tour l'eau d'une chaudière à vapeur, elle-même reliée à une turbine et à un alternateur pour produire de l'électricité. La vapeur d'eau est alors condensée (retourne à l'état liquide) grâce à une tour de refroidissement.

### Les centrales solaires:

Les centrales solaires utilisent le rayonnement solaire pour produire de l'électricité. Il existe différents types de centrales solaires mais toutes sont basées sur le même principe. Elles concentrent les rayons du soleil pour chauffer à très haute température un liquide particulier non vaporisable.

Ce liquide chauffe à son tour l'eau d'une chaudière à vapeur, elle-même reliée à une turbine et à un alternateur pour produire de l'électricité. La vapeur d'eau est alors condensée (retourne à l'état liquide) grâce à une tour de refroidissement.

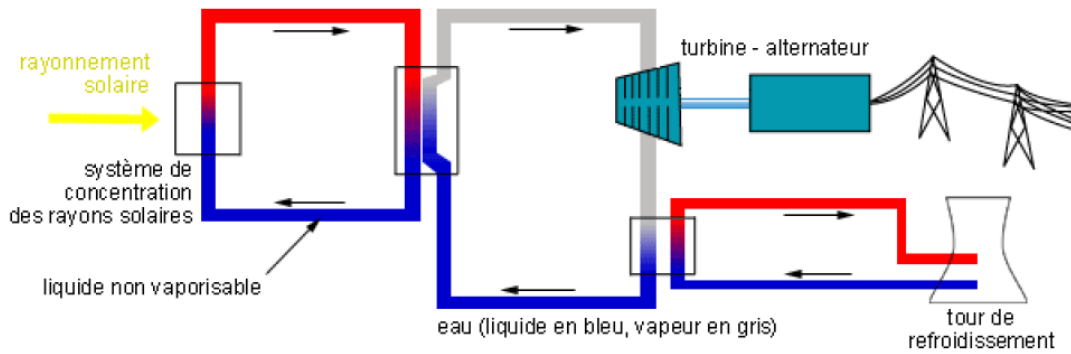
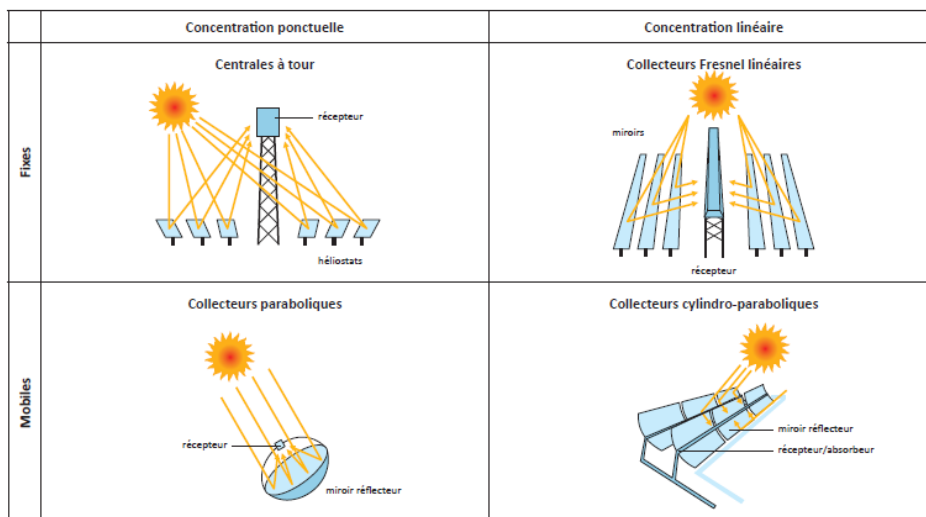


Figure 21

La production d'électricité à partir du rayonnement solaire est un processus direct. L'énergie solaire étant peu dense, il est nécessaire de la concentrer pour obtenir des températures exploitables pour la production d'électricité. Le rayonnement est concentré en un point ou en une ligne, où l'énergie thermique est transmise au fluide caloporteur. L'intensité de la concentration est définie par le facteur de concentration. Plus celui-ci est élevé, plus la température atteinte sera importante.

La figure 22 montre les 4 principaux systèmes de concentration. Les systèmes à concentration en ligne ont généralement un facteur de concentration inférieur à ceux des concentrateurs ponctuels.



source : AIE

Figure 22

## Energie Nucléaire

### Historique

L'Humanité maîtrise l'énergie nucléaire depuis moins de 100 ans. Mais les recherches sur la radioactivité ont commencé à la fin du 19e siècle. Tu as sans doute entendu parler de Pierre et Marie Curie. Et aussi, d'Albert Einstein. Ces grands scientifiques ont permis de mieux comprendre le phénomène de la radioactivité. L'énergie nucléaire a d'abord été utilisée dans le cadre militaire. En 1945, les États-Unis mettent fin à la Seconde Guerre mondiale en lâchant deux bombes atomiques sur les villes japonaises d'Hiroshima et Nagasaki : une tragédie humaine sans précédent. A partir des années 1950, l'énergie nucléaire est utilisée pour produire de l'électricité. En 1986, un très grave accident se produit dans la centrale nucléaire de Tchernobyl, en Ukraine (ex- URSS). Le grand public réalise alors le danger potentiel que représente cette énergie. En 2011, l'accident qui touche la centrale de Fukushima, au Japon, marque aussi les esprits.

### Introduction

Selon le contexte d'usage, le terme d'**énergie nucléaire** recouvre plusieurs sens différents :

- Dans le langage courant, l'énergie nucléaire correspond aux usages civils et militaires de l'énergie libérée lors des réactions de fission nucléaire des noyaux atomiques au sein d'un réacteur nucléaire ou lors d'une explosion atomique (dans le cas d'une bombe thermonucléaire il existe aussi des réactions de fusion nucléaire).
- Dans le domaine des sciences de la Terre et de l'Univers, l'énergie nucléaire est l'énergie libérée par les réactions de fusion nucléaire au sein des étoiles - par exemple le Soleil - ainsi qu'à la radioactivité naturelle, la principale source d'énergie du volcanisme de la Terre<sup>1,2</sup>.
- En physique des particules, l'énergie nucléaire est l'énergie associée à la force de cohésion des nucléons, la force nucléaire forte (protons et neutrons) au sein du noyau des atomes. Les transformations du noyau libérant cette énergie sont appelées réactions nucléaires. La force nucléaire faible régit les réactions entre particules et neutrinos.

## 7. UTILISATION ET INSTALLATIONS

### 7.1 LES MINES D'URANIUM

Les roches qui contiennent du minerai d'uranium sont extraites du sous-sol terrestre dans des mines d'uranium. Mais pour pouvoir être utilisé comme source d'énergie, l'uranium doit d'abord être transformé en usine, pour en faire une sorte de concentré appelé "yellowcake" ("gâteau jaune" en anglais).

### 7.2 LES CENTRALES NUCLÉAIRES

Ce concentré d'uranium, le « yellowcake », est acheminé dans les centrales. Il est alors enfermé, de manière hermétique, dans le réacteur nucléaire. C'est celui-ci qui va provoquer la désintégration des noyaux atomiques d'uranium. Ce processus dégage une formidable énergie sous forme de chaleur, qui sert à faire bouillir de l'eau. La vapeur fait tourner une turbine qui produit de l'électricité.



D'ailleurs, la fumée que l'on voit s'élever au-dessus des grandes cheminées rondes des centrales... ce n'est pas du CO<sub>2</sub> ou de la pollution, mais justement de la vapeur d'eau. La seule atteinte directe à l'environnement, c'est que l'eau qui sert à refroidir les installations retourne chaude dans la nature. Cela peut perturber les végétaux et les animaux.

Aujourd'hui, il existe 440 centrales nucléaires réparties dans 30 pays. Ensemble, elles produisent environ 10% de l'énergie consommée dans le monde. Les pays qui produisent le plus d'énergie nucléaire sont les États-Unis, avec 99 réacteurs, et la France, qui en compte 58. En Chine, 25 centrales nucléaires sont en cours de construction. Notons au passage que, depuis sa découverte,

le principe de la radioactivité a trouvé des applications très utile dans la médecine ! Les rayons X, par exemple, permettent de faire des photographies des parties dures à l'intérieur du corps.

### **7.3 Le fonctionnement d'une centrale nucléaire**

La fission des atomes d'uranium produit de la chaleur, chaleur qui transforme alors de l'eau en vapeur et met en mouvement une turbine reliée à un alternateur qui produit de l'électricité.

#### **1. Le circuit primaire**

Dans le réacteur, la fission des atomes d'uranium produit une grande quantité de chaleur. Cette chaleur fait augmenter la température de l'eau qui circule autour du réacteur, à 320 °C. L'eau est maintenue sous pression pour l'empêcher de bouillir. Ce circuit fermé est appelé circuit primaire.

#### **2. Le circuit secondaire**

Le circuit primaire communique avec un deuxième circuit fermé, appelé circuit secondaire par l'intermédiaire d'un générateur de vapeur. Dans ce générateur de vapeur, l'eau chaude du circuit primaire chauffe l'eau du circuit secondaire qui se transforme en vapeur. La pression de cette vapeur fait tourner une turbine qui entraîne à son tour 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 très haute tension.

#### **3. Le circuit de refroidissement**

À la sortie de la turbine, la vapeur du circuit secondaire 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. Ce troisième circuit est appelé circuit de refroidissement. En bord de rivière, l'eau de ce 3<sup>e</sup> circuit peut alors être refroidie au contact de l'air circulant dans de grandes tours, appelées aéroréfrigérants.

## La production d'énergie électrique par géothermie

La production d'énergie mécanique ou électrique s'obtient en faisant passer la vapeur issue du sous-sol au travers d'une turbine à vapeur. Ces applications concernent essentiellement les champs géothermiques moyenne et haute énergie, c'est-à-dire les contextes géologiques où la température est comprise entre 90 °C et 250 °C.

- ✚ Centrale de production électrique conventionnelle de Bouillante
  
- ✚ Centrale pilote de production électrique non-conventionnelle de type EGS de Soultz-Sous-Fôrets



À l'intérieur du réservoir géothermal, il y a de l'eau sous forme liquide ou vapeur ou encore un mélange de ces deux phases. Un forage géothermique pourra produire de la vapeur seule (dite vapeur sèche) ou un mélange des deux phases liquide et vapeur (on parle alors de vapeur humide).

L'état du fluide dans le réservoir dépend de la pression et de la température. Leur valeur déterminera également son potentiel énergétique (enthalpie). Selon la nature et les propriétés du fluide arrivant en surface, on utilise **différents systèmes** pour produire de l'électricité.

- Cycle indirect à condensation
- Cycle direct à contre-pression
- Cycle direct à condensation
- Cycle à vaporisation
- Cycle à fluide binaire – cycle de Rankine (*ORC*)

### Cycle indirect à condensation

La vapeur en provenance du sous-sol n'est pas envoyée directement dans la turbine, mais cède sa chaleur à de l'eau douce par l'intermédiaire d'un échangeur. Le caractère corrosif du fluide nécessite la mise en place de deux circuits.

### Cycle direct à contre-pression

La vapeur, directement ou après séparation d'avec la phase liquide, entraîne une turbine. À sa sortie la vapeur est, soit envoyée à l'atmosphère, soit dirigée vers un utilisateur de chaleur situé à proximité. Dans le deuxième cas, il s'agit de production combinée de chaleur et d'électricité désignée sous le vocable de **cogénération**.

### Cycle direct à condensation

Dans ce cycle, la vapeur à la sortie de la turbine est condensée et évacuée sous forme liquide. Le rendement mécanique ou électrique est ainsi amélioré.

### Cycle à vaporisation

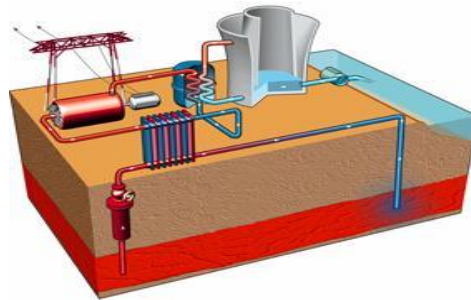
Le fluide extrait, constitué de vapeur et d'eau passe par un séparateur de phase. La vapeur est dirigée vers l'étage haute pression de la turbine. L'eau est vaporisée par abaissement de sa pression puis dirigée vers la turbine à un étage inférieur.

### Cycle à fluide binaire – cycle de Rankine (ORC)

Contrairement aux cycles précédents, le fluide géothermal est **maintenu sous pression à l'état liquide** au moyen d'une pompe placée dans le(s) puits.

En surface, le fluide géothermal est amené dans un échangeur de chaleur où il cède une partie de son énergie à un fluide volatil (alcane, HCFC...), appelé **fluide de travail**, présentant la propriété de se vaporiser à basse température. Le fluide de travail ainsi vaporisé est ensuite détendu dans une turbine couplée à un alternateur, puis condensé au contact du circuit d'eau de refroidissement d'un condenseur. Le liquide obtenu est alors renvoyé à l'échangeur de chaleur, au moyen d'une pompe, pour effectuer un nouveau cycle (vaporisation, détente, condensation, pressurisation). Le fluide de travail évolue donc en circuit fermé.

Le fluide géothermique est, quant à lui, rejeté en surface ou réinjecté dans sa formation d'origine après son passage dans l'échangeur de chaleur et épuisement de son contenu énergétique.



Figure

**Cette technologie est commercialement développée depuis le début des années 1980 et tend à se développer.**

Elle concerne des fluides géothermiques dont la température se situe entre 90 °C et 150 °C. Elle est limitée à de petites puissances (de l'ordre de quelques centaines de kW à quelques MW) et est particulièrement adaptée à l'alimentation en électricité de zones isolées éloignées des réseaux de distribution d'énergie électrique telles que les zones insulaires ou les zones de montagne.

## Pile à combustible

### Introduction

L'énergie abondante et non polluante, capable de faire rouler les véhicules et faire fonctionner tout appareil électrique, est certainement représentée de nos jours par l'hydrogène et son vecteur: la pile à combustible. Ce dossier présente l'évolution de la technologie de la pile à combustible, les enjeux, son principe de fonctionnement et ses utilisations possibles, allant de la batterie de téléphone portable jusqu'au prototype automobile Nacar4.

Une pile à combustible (PAC) permet de convertir directement de l'énergie chimique de combustion (oxydo-réduction) en énergie électrique, en chaleur et en eau.



Le cœur d'une PAC est constitué de trois éléments, dont deux électrodes : une anode oxydante (émettrice d'électrons); une cathode réductrice (collectrice d'électrons) séparées par un électrolyte.

L'électrolyte a la propriété de conduire directement d'une électrode à l'autre des molécules ionisées et de faire barrage aux électrons en les obligeant à passer par le circuit extérieur de la pile ou leur énergie électromotrice peut être exploitée.

L'alimentation d'une PAC se fait par injection continue de combustible à l'anode, généralement de l'hydrogène, et à la cathode, généralement le dioxygène (oxygène dans le langage courant) de l'air ou l'air lui-même. Une énergie électrique continue est alors disponible aux bornes de la pile.

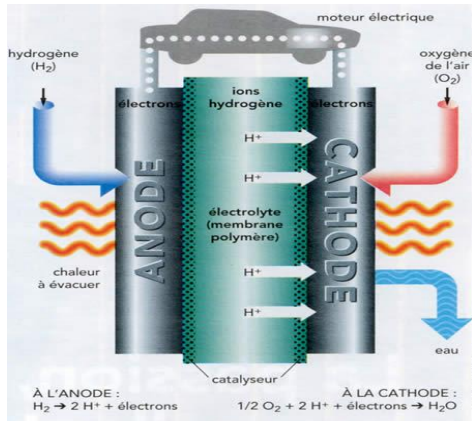
Dans le langage courant, les piles à combustible utilisant généralement l'hydrogène ou un combustible hydrogéné sont appelées « piles à hydrogène ».

Les piles à combustible se différencient d'abord par la nature de leur électrolyte, soit acide conduisant les ions positifs (protons  $H^+$ ) de l'anode à la cathode, soit basique (anions  $OH^-$ ,  $O^{2-}$ ,  $CO_3^{2-}$ ) en sens contraire.

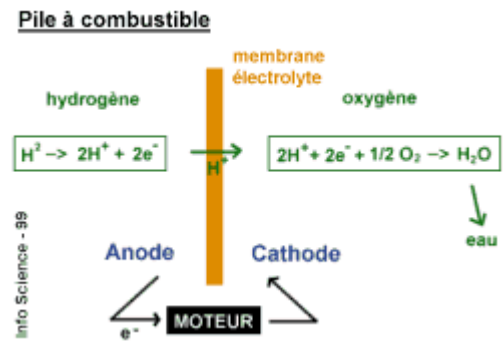
### **Principe de fonctionnement**

La pile à combustible fonctionne sur le monde inverse de l'électrolyse de l'eau. Ici, on supprime la source de tension, on alimente en hydrogène et oxygène et on constate l'apparition d'une tension électrique entre les deux électrodes : le dispositif est devenu un générateur électrique qui fonctionnera aussi longtemps qu'il sera alimenté. Pour cela elle est constituée de deux électrodes (anode et cathode) séparées par un électrolyte, matériau qui bloque le passage des électrons mais laisse circuler les ions. (Voir le schéma) Le combustible à base d'hydrogène  $H_2$  est amené sur l'anode.  $H_2$  va se transformer en ions  $H^+$  et libérer des électrons qui sont captés par l'anode. Les ions  $H^+$  arrivent sur la cathode où ils se combinent aux ions  $O_2$  constitués à partir de l'oxygène de l'air, pour former de l'eau. C'est le transfert des ions  $H^+$  et des électrons vers la cathode qui va produire un courant électrique continu à partir de l'hydrogène. Cependant cette tension ne dépasse pas 0,7 V par cellule ; il faut donc utiliser un grand nombre de cellules en série pour obtenir la tension requise. Le courant électrique produit par la pile est continu ; il est donc souvent nécessaire de placer en aval de la

pile un onduleur permettant la transformation du courant continu en un courant alternatif, notamment lorsque l'installation est utilisée pour fournir du courant domestique.



Figure



figure

La réaction est déclenchée à l'aide d'un catalyseur. Il s'agit en général d'une fine couche de platine disposée sur les électrodes(anode et cathode) Un des points critique, relatif à la construction de la pile, est de pouvoir contrôler de manière optimale l'approvisionnement et l'évacuation des composés alimentant chaque cellule (généralement de l'hydrogène et de l'air), ou devant être évacués (généralement de l'eau).

### Une pile, un système

Comme un moteur, une pile à combustible a besoin d'être entourée de composants et de sous-systèmes pour se transformer en générateur d'électricité.

Il lui faut:

- un réservoir
- un compresseur d'air
- un sous-système de refroidissement
- un convertisseur
- un contrôle commande avec ses capteurs, vannes...

Toutefois le fonctionnement reste très silencieux.

## Le combustible & et son stockage

Le **combustible** le plus simple à utiliser est l'hydrogène. C'est également lui qui permet d'obtenir les densités de courant les plus élevées. Sa combustion ne produit que de l'eau (sous forme liquide ou de vapeur). C'est un carburant réactif et il est abondant. Cependant il est inflammable dans l'air ou en présence d'oxygène. De plus, incolore et inodore, c'est un gaz à manipuler avec précaution. Autre inconvénient: il occupe beaucoup de place, ce qui s'avère problématique dans le cas de piles équipant des véhicules.

Les recherches sur la pile portent donc également sur les réservoirs de stockage d'hydrogène que l'on veut plus sûrs, plus légers et plus compacts. Une des solutions consiste donc à utiliser un **hydrocarbure** ou un alcool comme le **méthanol**. Dans le domaine du stockage les avancées technologiques progressent de jours en jours.

## Le rendement

Le rendement d'une pile à combustible varie selon le type de pile et peut être supérieur à 50%. A titre de comparaison, le rendement d'un moteur à combustion interne est en moyenne de 15%. De plus, l'énergie non convertie en énergie électrique est émise sous forme de vapeur d'eau (donc de chaleur) qui est utilisée à des fins de cogénération: chauffage, eau chaude...

## Classification des convertisseurs électromécaniques

### 1. Introduction:

Bien que de nouvelles solutions émergent (piézo-électriques, magnétostrictives, voire électrostatiques dans les très faibles dimensions), les actionneurs électromagnétiques occupent toujours, et probablement encore pour longtemps, une place prépondérante dans la conversion – réversible – électromécanique d'énergie.

Au-delà des actionneurs dits conventionnels, bénéficiant d'une maturité technologique et d'une diffusion scientifique importante (machines à courant continu à collecteur, synchrones à rotor bobiné, asynchrones à cage d'écureuil...), une très grande diversité d'actionneurs, dits non conventionnels, coexistent et se développent toujours. Ils répondent généralement à des exigences particulières et ne sont pas standardisés. Leur fonctionnement est également souvent méconnu et leur potentiel encore plus mystérieux. On les trouve notamment dans les applications de très grande diffusion (souvent de faible puissance : inférieure au kilowatt) telles

que l'électroménager grand public, la domotique, l'automobile ou les jouets et dans celles exigeant de hautes performances.

Leur évolution a été accélérée grâce aux formidables développements de l'électronique de Puissance (notamment ses possibilités de « haute fréquence ») et de l'électronique micro programmable.

Une classification de ces différents actionneurs paraît, au premier abord, risquée, sinon impossible, d'autant que leurs topologies sont très nombreuses et très variées. Néanmoins, après une analyse approfondie de différents actionneurs existants ou faisant l'objet de travaux de recherche, la mise en avant de critères fondamentaux topologiques, liés notamment au type de bobinage de puissance (d'alimentation), au mode d'alimentation, au mouvement généré, s'est révélée possible.

Bien sûr, tous les mouvements, linéaires ou autres, seront considérés ici

## 1.2 Critères simples:

Un actionneur électromagnétique est un système capable de convertir de l'énergie électrique en énergie mécanique via une étape intermédiaire magnétique. Cette particularité lui confère un caractère réversible fondamental, à l'inverse de certains actionneurs thermodynamiques ou hydrauliques.

*Nota : cette définition exclut les freins à courant de Foucault qui convertissent de l'énergie mécanique en énergie magnétique puis thermique mais qui sont dissipatifs et non réversibles.*

Dans un actionneur électrique, la conversion d'énergie est fondée, d'une façon générale, sur l'interaction d'au moins deux sources de champ magnétique : un bobinage de puissance, car obtenu

partir d'un circuit électrique, véhiculant l'énergie électrique destinée à la conversion, et une source magnétique d'excitation qui, si toutefois elle est alimentée, n'absorbe que ses propres pertes.

D'autre part, la conversion électromécanique nécessite d'avoir au moins deux parties en mouvement relatif entre lesquelles la zone d'interface est appelée entrefer. L'une des deux, fixe par rapport au référentiel choisi, est dite le stator, l'autre est dite le rotor ou le mobile suivant le type de déplacement généré.

*Nota : dans le cas particulier des actionneurs magnétohydrodynamiques (MHD), l'une des deux parties est fluide. On se situe ici à la limite de la notion d'actionneur électromécanique.*

*Cependant, l'analogie de comportement avec les actionneurs, à partie mobile solide, nous amène à les citer.*

À chaque stade de la conversion, des pertes apparaissent : pertes électriques, pertes magnétiques et pertes mécaniques. La conversion électromécanique du point de vue énergétique est schématisée sur la figure 1. Les critères fondamentaux de classification (figure 2) peuvent se définir à partir de la figure 1. Ces critères sont liés aux sources magnétiques (de création de champ magnétique), à l'architecture mécanique et, enfin, à l'alimentation électrique. Nous dégagerons également des critères composés correspondant à des combinaisons des critères fondamentaux.

### Sources d'excitation

Rappelons que la source d'excitation magnétique est le système qui permet de créer une variation du flux dans le bobinage de puissance en fonction de la position mécanique. On peut en dégager les différentes caractéristiques

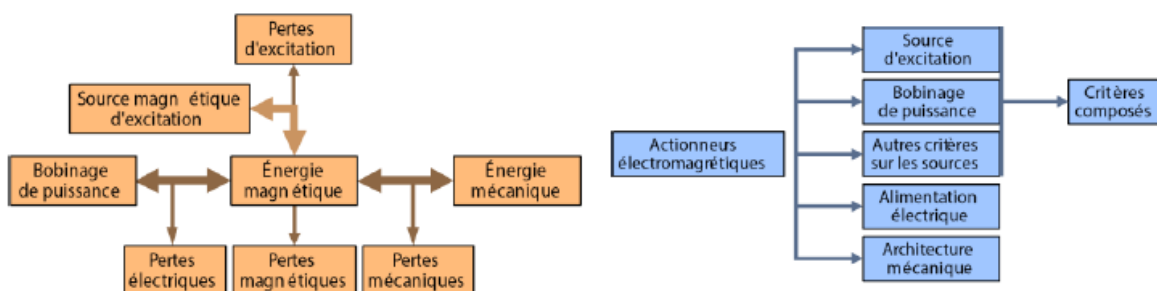


Figure Conversion d'énergie dans les actionnaires

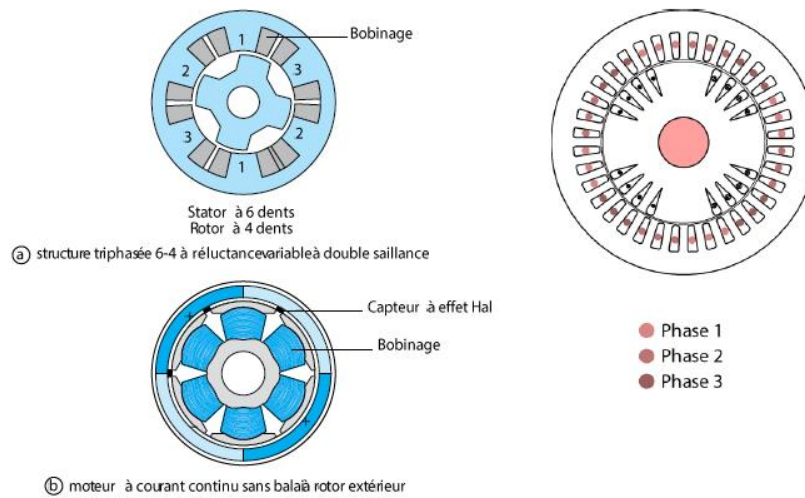


Fig. 3. Structures à couplage polaire à pôles saillants

Fig. 4. Coupe d'une machine synchrone triphasée à

rotor lisse bobiné (4 pôles, 3 encoches par pôle et par phase)

**Courant** : le champ magnétique d'excitation est de type courant lorsqu'il utilise les courants électriques. Les excitations de type courant regroupent les excitations bobinées classiques (figure 4), les excitations par supraconducteurs, les excitations par courants induits (dans un bobinage en court-circuit ou dans un matériau massif conducteur, figure 5).

#### Nature dissipative de l'excitation:

On peut également ajouter un critère supplémentaire quant à la nature fondamentalement dissipative ou non de la source d'excitation.

- Excitation non dissipative : une source non dissipative est une source pouvant fonctionner sans créer de pertes. On trouve de telles excitations dans les machines à aimants permanents (figure 3b), les machines à réluctance variable (figure 3a) et les machines supraconductrices.
- Excitation dissipative : une source dissipative se trouve dans les machines à excitation bobinée (figure 4) non supraconductrice, ainsi que dans les machines à hystérésis.

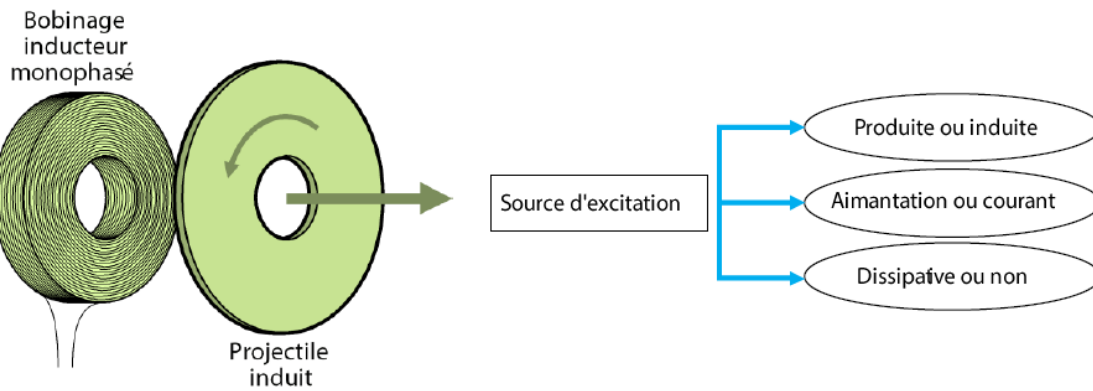
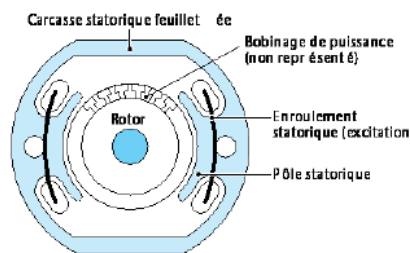


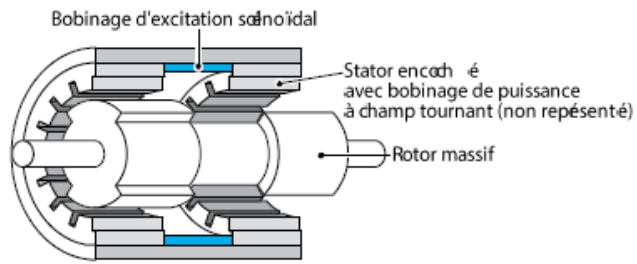
Figure 5. Lanceur électromagnétique à induction

Fig. 6. Types de sources magnétiques d'excitation

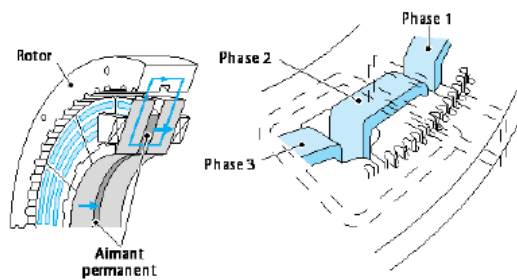
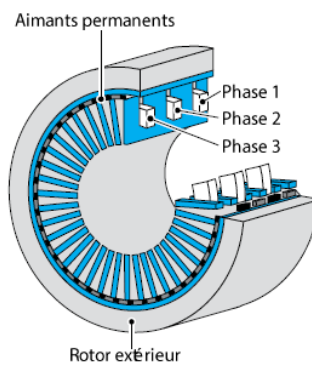
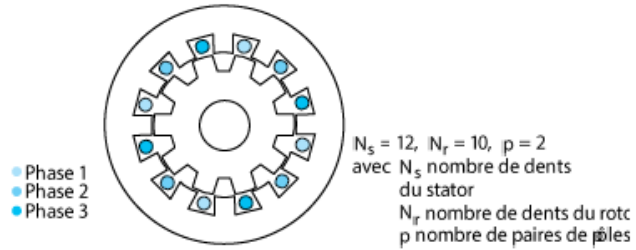
**Cycle de conversion lié au bobinage monophasé:**

On peut définir pour un bobinage de puissance un rapport caractérisant le nombre de cycles de conversion effectués pour réaliser un déplacement rotatif ou linéaire dans un sens donné. Ce rapport est donné par  $te/tm$  où  $te$  est la période électrique fondamentale d'alimentation liée aux sources électriques et  $tm$  est la période mécanique, c'est-à-dire le temps entre deux changements de sens de déplacement rotatif ou linéaire. On distingue ainsi les bobinages non cycliques des bobinages dits cycliques.





(a) moteur synchrone à excitation homopolaire

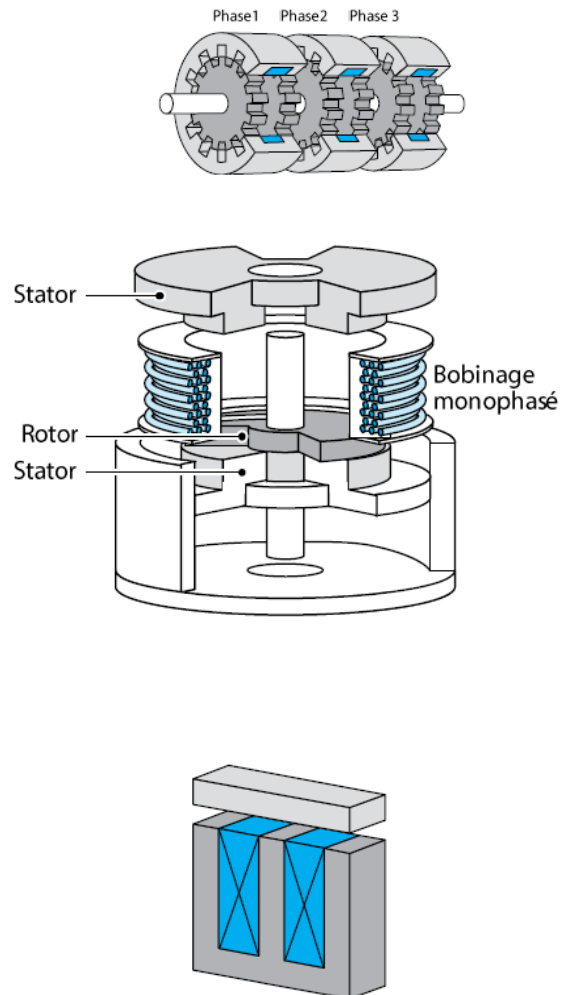


**Bobinages non cycliques :** ce sont des bobinages de puissance dont le rapport  $t_e / t_m$  est proche de 1.

La période électrique est à peu près égale à la période mécanique.



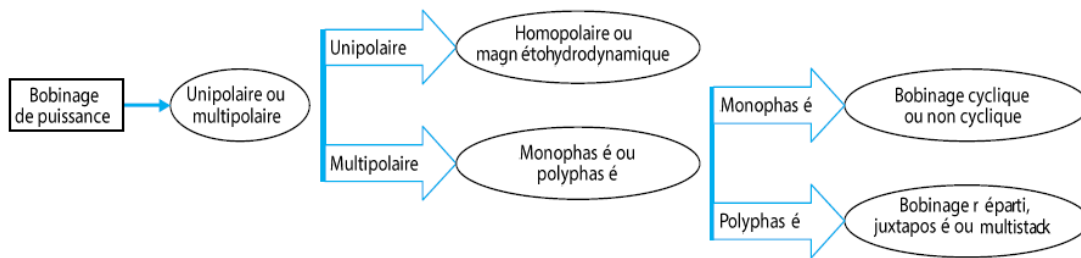
Il n'y a dans cette catégorie que les actionneurs monophasés à débattement limité : vibreurs (figure 10), haut-parleurs (figure 9), électroaimants (figure 19) entre autres.



**Bobinages dits cycliques** : dans ce type de bobinage, la période électrique est largement inférieure à la période mécanique. Le rapport caractéristique est donc:  $t_e/t_m \ll 1$ .

On retrouve ici tous les moteurs monophasés à débattement illimité, comme le moteur rotatif monophasé à aimant (figure 11). La figure 20 montre un exemple d'actionneur monophasé à réluctance variable à bobinage cyclique dont le fonctionnement est normalement à débattement limité mais qui peut être également rotatif continu à condition d'entraîner une charge inertielle sans frottement sec.

On peut synthétiser les critères sur le bobinage de puissance comme sur la figure 21.



Nous citerons dans ce qui suit **d'autres critères** sur les sources de puissances et d'excitation comme:

- La localisation de la source
- Polarité du champ magnétique d'entrefer
- Trajet du flux d'entrefer
- Source fixe ou mobile