

# LES CENTRALES THERMIQUES

## 1- Principe de fonctionnement des centrales thermiques à flamme

Une centrale thermique comprend une ou plusieurs unités thermiques. Chaque unité se compose principalement :

- d'une chaudière ou d'un générateur de vapeur,
- d'une turbine et d'un turboalternateur comme il est montré à la figure (1) et (2).

Le principe de fonctionnement d'une unité thermique se résume comme suit :

Les centrales thermiques classiques, appelées aussi centrales thermiques à flamme, produisent de l'électricité par combustion de :

- charbon,
- fioul,
- gaz naturel
- gaz des hauts fourneaux.

Le fonctionnement d'une centrale thermique se divise en quatre étapes :

- ❖ un combustible est brûlé (1) et fournit de la chaleur dans un générateur de vapeur où de l'eau est vaporisée sous pression (2).
- ❖ La vapeur est alors "détendue" dans une turbine, ce qui signifie qu'elle passe d'une haute pression initiale (environ 165 bars) à une basse pression (environ 50 millibars).
- ❖ La détente de la vapeur provoqué par cette baisse de pression permet d'entraîner la turbine et l'alternateur qui produit l'électricité (3).
- ❖ La vapeur est ensuite liquéfiée dans un condenseur (4) puis recyclée.

## 2- Les combustibles

Les principaux combustibles sont :

- **Charbon** : il est transformé en fines particules dans des broyeurs, mélangé à l'air réchauffé et injecté sous pression dans la chambre de combustion par des brûleurs.
- **Fioul** : il est chauffé à 140°C pour accroître sa fluidité, puis il est injecté dans la chaudière à l'aide de brûleurs appropriés.
- **Gaz** : le gaz utilisé (gaz naturel ou gaz de hauts fourneaux doté d'un pouvoir calorifique moindre) ne nécessite aucun traitement préalable et est directement envoyé dans la chaudière.

## 3- Rendement

- 13 % au début du siècle,
- 38 % après la deuxième guerre mondiale
- 55 % pour les centrales dites à cycle combiné.

Ce progrès est principalement dû à l'augmentation de :

- La température,
- La pression de la vapeur.

Rendues possible par :

- les progrès dans la métallurgie,

Et, dans les cycles combinés, à :

- la récupération des gaz à l'échappement de la turbine, pour la production de vapeur alimentant un second groupe turbo-alternateur.

## 4- Les centrales Thermiques à flamme et la pollution de l'air

Ces centrales entraînent la pollution atmosphérique dû à :

- Émissions de dioxyde de soufre
- Émissions d'oxydes d'azote

## Protection de l'environnement

Pour se conformer aux nouvelles contraintes de protection de l'environnement, les centrales thermiques à flamme doivent s'adapter et diminuer leurs émissions polluantes provenant des fumées de combustion. Pour cela, les centrales peuvent être équipées soit :

- ✚ de dispositifs de désulfuration primaire limitant l'apparition d'oxydes de soufre ( $\text{SO}_2$ ) dans la chaudière,
- ✚ de dispositifs de lavage des fumées, appelé encore désulfuration aval.
- ✚ **L'utilisation du fioul à très basse teneur en soufre** : ce combustible spécialement traité contient moins de 1% de soufre après traitement contre 3 % habituellement. Cette mesure très efficace et coûteuse concerne bien sûr les centrales brûlant du fuel en combustible principal, mais aussi les centrales brûlant du charbon en combustible principal et du fuel au démarrage.

## 5- Caractéristiques d'une unité thermique

Pour une étude dans un contexte économique, la caractéristique la plus importante des unités thermiques est :

- la caractéristique entrée-sortie.

Où :

- L'entrée dans ce cas est le coût du combustible,
- la sortie est la puissance électrique active générée.

Parmi les facteurs qui influent sur les performances de l'unité thermique et sur le coût de production à la sortie de l'unité on peut citer :

- Le rendement de la chaudière qui dépend principalement :
  - Des pertes de chaleur à travers la cheminée.
  - Des pertes de chaleur dans les cendres et les rejets.
  - De la puissance utilisée localement dans l'usine pour les besoins des auxiliaires.
- Le rendement du système turbine-turboalternateur qui dépend principalement :
  - Des pertes thermiques liées au cycle thermique de la turbine-turboalternateur.
  - De la diminution de l'efficacité de la turbine à cause des dépôts solides sur les ailettes et leurs érosions.
  - Des pertes par effet joule, pertes magnétiques, des pertes mécaniques etc.... dans le turboalternateur.
- Le stand-by ou le fonctionnement à vide de l'unité thermique qui est dicté par la gestion globale de la centrale électrique.

Un tel type de caractéristique idéale coût-production est représentée à la figure (3).

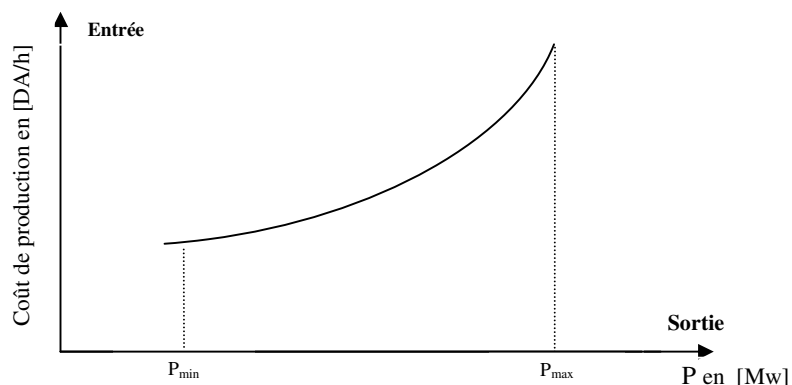


Fig. 3 : Caractéristique entrée-sortie d'une unité thermique.

**N.B. :** La caractéristique réelle est déterminée par des mesures faites au niveau de la centrale thermique en considération.

## 6- Modélisation d'une centrale thermique

Dans le but de déterminer la production électrique optimale de chaque centrale thermique du système dans le contexte économique, on utilise la caractéristique entrée-sortie ou coût-production, qu'on la représente habituellement par le polynôme du second ordre suivant :

$$C_i = A_i + B_i P_i + C_i P_i^2$$

Où :

$C_i$  : Coût de production de la puissance électrique active  $P_i$  de l'unité  $i$  exprimée en DA.

$P_i$  : Puissance électrique produite par la centrale  $i$ , exprimée en MW.

$A_i, B_i, C_i$  : Ce sont des constantes positives déterminées indirectement à partir des mesures faites sur l'unité  $i$ , exprimée respectivement en DA, DA/MW et DA/MW<sup>2</sup>.

- Le coût de production  $C_i$  dépend directement du coût du combustible et du rendement de l'unité thermique.
- Les paramètres  $A_i, B_i, C_i$  sont constants pour un coût donné du combustible.

**N.B. :** Ces paramètres sont sujets à des réajustements instantanés dans le cas où le prix du combustible varie et à des réajustements à long terme à cause de l'affaiblissement du rendement de l'unité thermique causé par le vieillissement des éléments de l'unité thermique.

La gestion d'une manière optimale d'un système de production d'énergie électrique composé de centrales thermiques contribuera à :

- ◆ l'économie d'argent,
- ◆ la réduction de la pollution
- ◆ l'augmentation de la réserve en puissance du système.

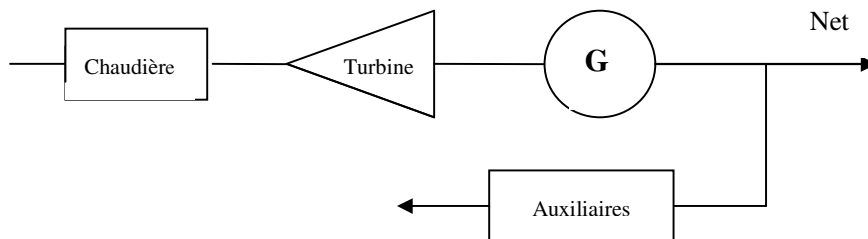


Fig. 4 : Unité thermique

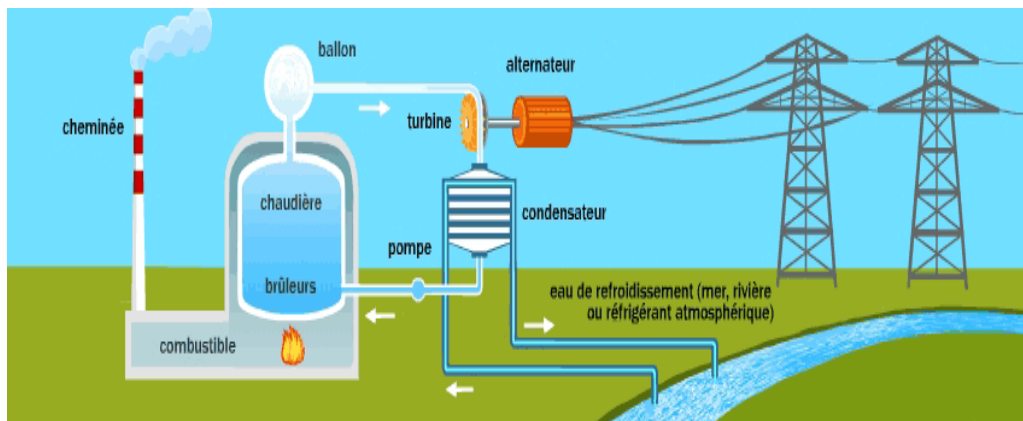


Fig.5 : Schéma simplifié de la génération d'énergie à partir d'une centrale thermique.

# Centrale électrique nucléaire

## I- Introduction

Une centrale électrique nucléaire est une usine de production d'électricité qui utilise de l'uranium. Elle transforme la chaleur libérée par la fission d'un matériau nucléaire, appelé "combustible" en énergie mécanique, puis électrique.

## II- Le combustible nucléaire

L'uranium 235 : lorsque le noyau est percuté par un neutron, se brise en deux noyaux plus petits. Cette fission dégage de la chaleur. En se brisant, l'atome libère deux ou trois neutrons qui iront à leur tour briser d'autres noyaux, et ainsi de suite... C'est ce que l'on appelle la **réaction en chaîne**.

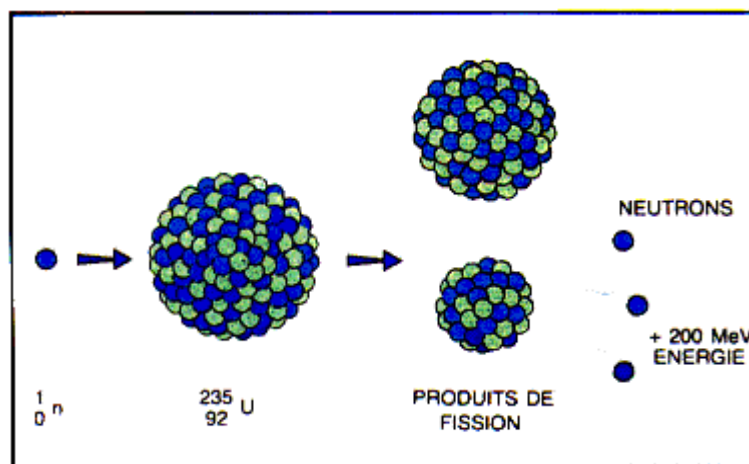


Fig. 1 : Principe de fission.

La valeur de l'énergie libérée par la fission d'un atome est donnée par la formule d'Einstein :

$$E=m.c^2$$

E: énergie libérée en joules

m: diminution de masse en kg

c: vitesse de la lumière  $3.10^8$  m/s

Exemple : Pour une diminution de 1g, on a une énergie de  $9 \cdot 10^{13}$  joules soit l'équivalent de l'énergie libérée par mille (1000) tonnes de charbon.

## III- Principe de fonctionnement

Le principe de production de l'électricité dans une centrale nucléaire est montré à la figure 2. La centrale nucléaire fonctionnant avec des réacteurs à eau sous pressions, comprend donc trois circuits indépendants :

**Le circuit primaire** qui extrait la chaleur produite par la fission des atomes d'uranium à l'intérieur des éléments combustibles, et la transfère, grâce à des échangeurs de chaleur (ou générateur de vapeur), au circuit secondaire. L'eau du circuit primaire n'est jamais en contact avec l'eau secondaire. *Le circuit primaire* comprend la cuve, les générateurs de vapeur et le pressuriseur.

**Le circuit secondaire** : la vapeur créée dans les générateurs de vapeur est collectée par les tuyauteries du circuit secondaire, et alimente la turbine à laquelle est couplé l'alternateur qui génère l'électricité. Après sa poussée sur les ailettes de la turbine, la vapeur détendue est condensée. L'eau recueillie est alors renvoyée aux générateurs de vapeur.

Le groupe turbine-alternateur, qui constitue la partie "classique" d'une centrale nucléaire est aménagé dans un bâtiment attenant appelé *salle des machines*.

**Le circuit de refroidissement** : Pour que le système fonctionne en continu, il faut assurer son refroidissement. C'est le but d'un troisième circuit indépendant des deux autres, le circuit de refroidissement. Sa fonction est de condenser la vapeur sortant de la turbine. Pour cela est aménagé un condenseur, appareil formé de milliers de tubes dans lesquels circule de l'eau froide prélevée à une source extérieure : rivière ou mer. Au contact de ces tubes, la vapeur se condense pour se retransformer en eau.

Quant à l'eau du condenseur, elle est rejetée, légèrement échauffée, à la source d'où elle provient. Si le débit de la rivière est trop faible, ou si l'on veut limiter son échauffement, on utilise des tours de refroidissement, ou aéro-réfrigérants. L'eau échauffée provenant du condenseur, répartie à la base de la tour, est refroidie par le courant d'air qui monte dans la tour. L'essentiel de cette eau retourne vers le condenseur, une petite partie s'évapore dans l'atmosphère, ce qui provoque ces panaches blancs caractéristiques des centrales nucléaires.

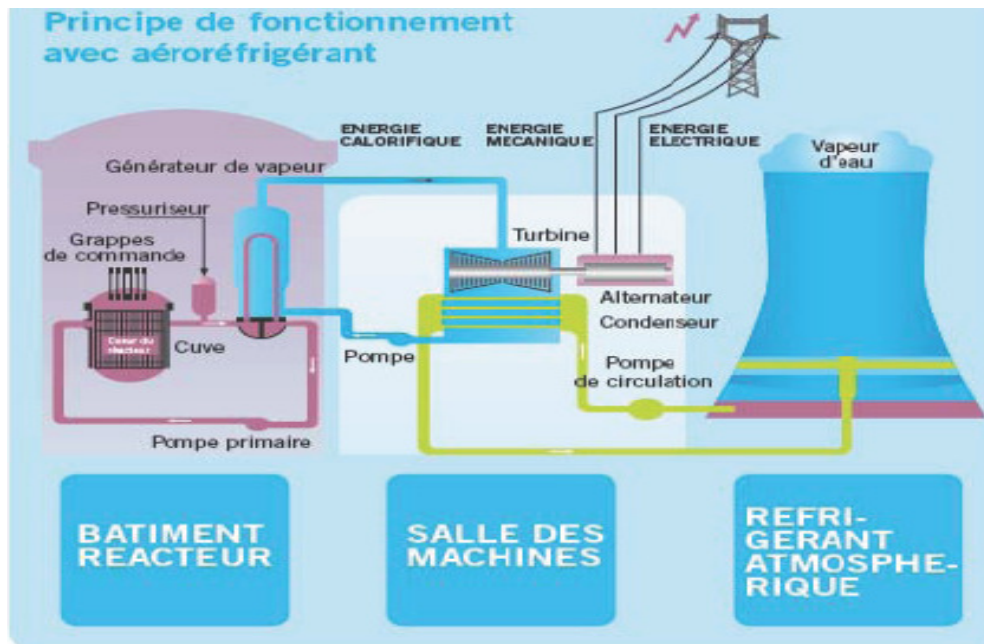


Fig. 2 : Schéma de fonctionnement d'un Réacteur à Eau sous Pression (REP).

### Avantage :

- Parce qu'elle est capable de fournir des quantités massives d'électricité sans polluer l'atmosphère, l'énergie nucléaire apparaît dans ces conditions comme un atout pour :
  - ▲ La préservation de l'environnement.
  - ▲ La préservation de la qualité de l'air.
  - ▲ Contre l'effet de serre et les pluies acides
- Le remplacement d'une centrale à charbon de 1 000 MW par une centrale nucléaire de puissance équivalente permet d'éviter le rejet à l'atmosphère de 7 millions de tonnes de gaz carbonique et de 30 000 tonnes de soufre par an.

### Inconvénients :

- Déchets radioactifs
- L'inquiétude est toujours omniprésente en matière de sûreté et cela malgré la mise en place des indicateurs et des outils de mesure de la sûreté dans les sites.
- Si un accident survient ses répercussions seront très néfastes sur la vie humaine et sur l'environnement qui sont irréparables comme pour le cas de Tchernobyl.

# Centrale électrique à gaz

## I- Introduction

Une centrale au gaz est une centrale électrique consommant un gaz à fort pouvoir calorifique, tel du gaz naturel. Ce type de centrale constitue une part importante de la production d'électricité dans les pays producteurs de gaz.

## Turbine à gaz

Les turbines à gaz en cycle simple sont peu coûteuses à construire, de plus elles ont l'avantage de démarrer très rapidement (contrairement aux chaudières à vapeur qui ont une certaine inertie). Néanmoins, leur rendement faible (35% au mieux) empêche de les utiliser directement pour la production d'électricité sans valoriser leur chaleur résiduelle, sauf en appoint lors des pics de demande ou à toute petite échelle.

## Principe de fonctionnement

La turbine à gaz est un moteur thermique réalisant les différentes phases de son cycle thermodynamique dans une succession d'organes traversés par un fluide moteur gazeux en écoulement continu. C'est une différence fondamentale par rapport aux moteurs à pistons qui réalisent une succession temporelle des phases dans un même organe (généralement un cylindre).

Dans sa forme la plus simple, la turbine à gaz fonctionne selon le cycle dit de Joule comprenant successivement et schématiquement :

- une compression adiabatique qui consomme de l'énergie mécanique,
- un chauffage isobare comme pour un moteur Diesel,
- une détente adiabatique jusqu'à la pression ambiante qui produit de l'énergie mécanique,
- un refroidissement isobare.

## Rendement

Le rendement est le rapport du travail utile (travail de détente – travail de compression) à la chaleur fournie par la source chaude. Le rendement théorique croît avec le taux de compression et la température de combustion. Il est supérieur à celui du cycle Diesel car sa détente n'est pas écourtée.

La turbine à gaz est le plus souvent à cycle ouvert et à combustion interne. Dans ce cas, la phase de refroidissement est extérieure à la machine et se fait par mélange à l'atmosphère. La turbine à gaz peut également être à cycle fermé et à combustion externe. Le chauffage et le refroidissement sont alors assurés par des échangeurs de chaleur. Cette disposition plus complexe permet l'utilisation de gaz particuliers ou de travailler avec une pression basse différente de l'ambiante.

## Amélioration du cycle de fonctionnement

Le cycle de base décrit plus haut peut être amélioré par différents organes complémentaires :

- récupération de chaleur à l'échappement : les gaz détendus en sortie de turbine traversent un échangeur pour préchauffer l'air comprimé avant son admission dans la chambre de combustion,
- compression refroidie : la compression comprend deux étages (ou plus) séparés par un échangeur de chaleur (air/air ou air/eau) refroidissant l'air. La puissance nécessaire à la compression s'en trouve réduite au bénéfice du rendement.
- combustion étagée : la détente comprend deux étages (ou plus) séparés par un ou des réchauffages additionnels. La puissance fournie est accrue d'où amélioration du rendement.

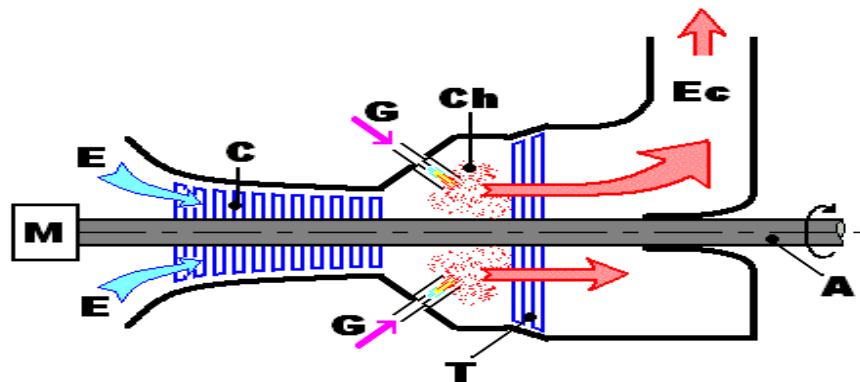
Les deux dernières dispositions visent à tendre vers des transformations isothermes en lieu et place des adiabatiques et se justifient surtout sur les machines à taux de compression élevé. Les trois dispositifs peuvent être réalisés indépendamment ou simultanément. Dans ce cas, on retrouve le cycle dit de Ericsson qui comme le cycle de Stirling présente un rendement théorique égal au rendement maximal du cycle de Carnot. Cette supériorité théorique par rapport aux cycles Otto et Diesel est cependant contrebalancée par l'impossibilité pratique de réaliser les transformations isothermes. Dans tous les



cas, ces dispositifs sont réservés aux installations stationnaires du fait de l'encombrement et du poids des échangeurs gaz/gaz.

Le compresseur (repère C), constitué d'un ensemble de roues munies d'ailettes, comprime l'air extérieur (rep. E), simplement filtré, jusqu'à 10 à 15 bars, voire 30 bars pour certains modèles.

Du gaz (rep. G), ou un combustible liquide atomisé, est injecté dans la chambre de combustion (rep. Ch) où il se mélange à l'air comprimé et s'enflamme. Les gaz chauds se détendent en traversant la turbine (rep. T), où l'énergie thermique des gaz chauds est transformée en énergie mécanique, la dite turbine est constituée d'une ou plusieurs roues également munies d'ailettes et s'échappent par la cheminée (rep. Ec) à travers un diffuseur. Le mouvement de rotation de la turbine est communiqué à l'arbre A qui actionne d'une part le compresseur, d'autre part une charge qui n'est autre qu'un appareil (machine) récepteur (ice) (pompe, alternateur...) accouplé à son extrémité droite. Pour la mise en route, on utilise un moteur de lancement (rep. M) qui joue le rôle de démarreur. Le réglage de la puissance et de la vitesse de rotation est possible en agissant sur le débit de l'air en entrée et sur l'injection du carburant.

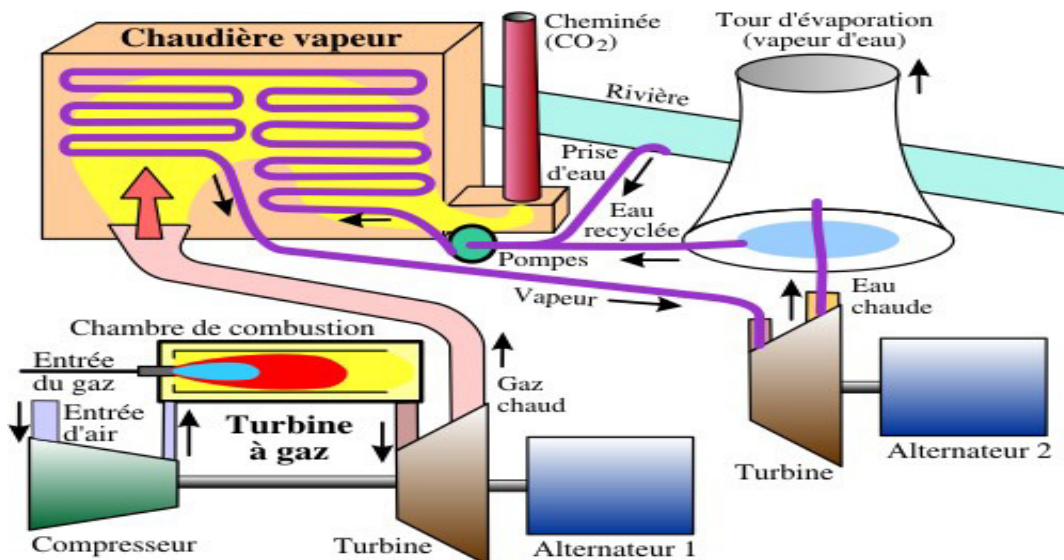


### Principe de fonctionnement d'une centrale à cycle combiné gaz

Les étapes de la production :

- Le gaz brûle et fait tourner une turbine qui produit de l'électricité.
- Les gaz de combustion sont récupérés dans une chaudière qui produit de la vapeur avec l'eau pompée dans l'Oise.
- Cette vapeur fait tourner une deuxième turbine qui produit aussi de l'électricité.
- Une partie de l'eau est rejetée dans l'atmosphère sous forme de vapeur, l'autre partie est rejetée dans la rivière.

Le développement de ce type de centrale vise essentiellement le remplacement des anciennes centrales thermiques, plus polluantes, sur des zones déjà industrialisées. C'est un non-sens de construire une centrale sur un site vierge.



## Production d'électricité

- La turbine à gaz de grande puissance (> 1 MW) est surtout utilisée pour entraîner un alternateur et produire de l'électricité.
- Les infrastructures et le génie civil nécessaires pour une centrale électrique équipée de turbines à gaz sont réduits, ce qui permet d'installer en quelques mois une centrale tout près du lieu d'utilisation de l'électricité (ville, usine) ou de la source de combustible (port, forage, raffinerie...).
- Turbine et alternateur sont acheminés sous formes de modules compacts et complets qu'il suffit d'assembler et de raccorder aux réseaux dans des climats où la température extérieure peut aller de -40 à +50°C.
- Un des avantages des centrales à turbine à gaz est le temps réduit pour la mise en œuvre, le gestionnaire d'un réseau de distribution électrique peut ainsi moduler facilement la capacité de production pour s'adapter aux variations de la consommation.



## LES CENTRALES HYDROÉLECTRIQUES

### INTRODUCTION

Les centrales hydrauliques ont été les premières usines à produire industriellement de l'énergie électrique au début du XX<sup>ème</sup> siècle. Actuellement, un cinquième de l'énergie électrique à travers le monde, provient de l'énergie hydroélectrique qui est associée aux barrages. L'adoption de l'énergie hydroélectrique par rapport aux autres types d'énergies dépend principalement de la disponibilité des ressources hydriques et de l'investissement. Un autre facteur encourage cette adoption est la double utilisation des eaux des barrages. En effet l'eau utilisée pour produire l'énergie électrique sera réutilisée pour d'autres fins telles que l'irrigation et l'alimentation en eau potable après traitement.

L'énergie hydroélectrique utilise la force de l'eau, c'est-à-dire, la combinaison d'un débit et d'une chute afin de produire de l'énergie électrique. Autrement dit, l'énergie potentielle de l'eau retenue dans le réservoir se transforme en énergie cinétique, ce qui entraîne la rotation de la turbine hydraulique. La turbine est couplée à un alternateur qui va produire à son tour de l'électricité.

### Les avantages :

- ✚ L'énergie hydraulique, qui provient de la captation de la variation d'énergie potentielle de l'eau entre deux niveaux, est une énergie renouvelable.
- ✚ C'est une source d'énergie propre et non polluante de l'environnement, économique et fiable.
- ✚ La mise en service est simple et très rapide, en effet, lorsque l'eau est stockée, il suffit d'ouvrir des vannes pour commencer le cycle de production d'électricité.
- ✚ Ces caractéristiques lui permettent d'être très flexible pour la régulation de la charge électrique, elle est avantageusement utilisée lors des pics de consommation, ce qui permet d'éviter la mise en route coûteuse des autres types de centrales électriques reliés au même système.
- ✚ L'hydroélectricité met en valeur une richesse naturelle importante et produit une énergie propre et entièrement renouvelable, sans aucune émission de gaz à effet de serre.
- ✚ En grande quantité, l'électricité n'est pas stockable. En revanche, l'eau peut être emmagasinée dans des réservoirs avant d'être transformée, le moment venu, en courant électrique.

### Les inconvénients :

- ❖ Leur principale désavantage est qu'elles ne sont pas des énergies qui peuvent répondre à des besoins certains, à des moments sûrs, c'est-à-dire, que la production d'énergie électrique est dépendante des conditions météorologiques.

## CLASSIFICATION DES CENTRALES HYDROELECTRIQUES

Les centrales hydroélectriques sont classées en trois grandes catégories selon la hauteur de chute d'eau et par voie de conséquence, selon le débit ; on trouve :

- Les centrales électriques de haute chute ;
- Les centrales électriques de chute moyenne ;
- Les centrales électriques de basse chute.

## PRINCIPE DE BASE D'UNE INSTALLATION HYDRAULIQUE

Pour produire de l'électricité, il faut la combinaison d'un débit d'eau  $u$  [ $m^3/s$ ] et d'une chute  $h$  [ $m$ ] qui est la différence entre un point haut et un point bas de niveau d'eau. Pour réaliser cette combinaison, le complexe hydroélectrique comprend un barrage construit en travers du lit d'un cours d'eau pour en retenir les eaux et pour créer ou aménager une chute en vue d'actionner les turbines de la centrale électrique. La turbine est un élément rotatif qui convertit l'énergie d'un courant d'eau. Il permet de transformer l'énergie potentielle en énergie mécanique puis électrique par l'intermédiaire d'un alternateur.

Une centrale hydroélectrique se compose principalement d'un réservoir, d'une conduite à la turbine, d'une turbine couplée avec une génératrice électrique comme il est illustré à la figure 1.

L'eau est retenue grâce à un réservoir hydroélectrique dans une vallée. Quand l'eau passe dans le canal d'écoulement d'eau en pente aménagé à cet effet dans le barrage, elle actionne une turbine hydraulique. La turbine fait tourner l'alternateur qui fournit alors une tension électrique. L'eau est ensuite libérée au pied du barrage et reprend le cours normal de la rivière.

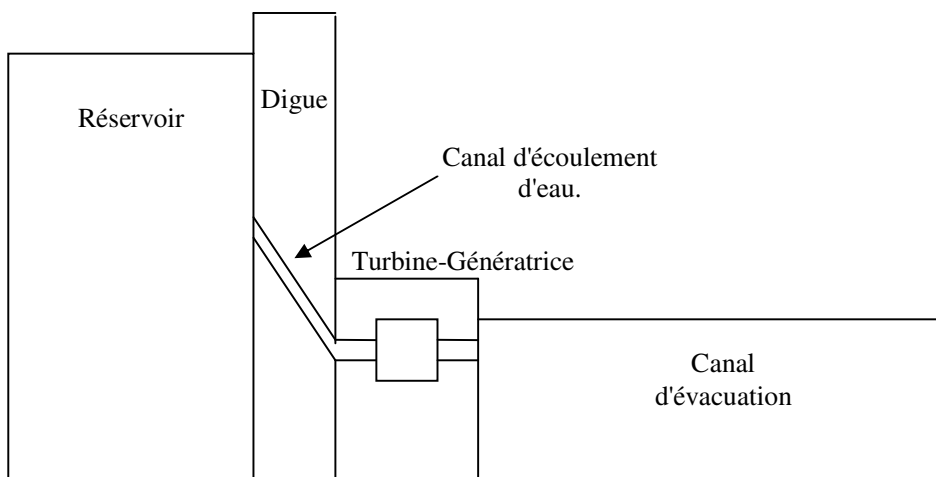


Figure 1 : Centrale hydroélectrique.

En fait, le principe d'une centrale hydroélectrique est basé sur la loi de Bernoulli concernant la conservation de l'énergie, autrement dit, on ne peut pas créer d'énergie mais on peut convertir l'énergie

potentielle de l'eau située au haut de la rivière en énergie de pression ou en énergie de vitesse.

Sachant que sans aménagement, toute l'énergie potentielle de l'eau est convertie en chaleur due à la friction de l'eau sur les parois de la rivière. Le principe d'une centrale hydroélectrique est de réduire la friction et récupérer une partie de l'énergie potentielle sous forme d'énergie de pression ou d'énergie de vitesse dépendant du type de la turbine. Pour une turbine de type Pelton, qui n'est pas émergée, est utilisée pour des hauteurs de chutes très élevées, l'énergie potentielle de l'eau est convertie en énergie de vitesse. Pour une turbine de type Francis, qui est émergée, est utilisée pour des hauteurs chutes moyennes, l'énergie potentielle de l'eau est convertie en énergie de pression.

La puissance électrique disponible tirée de la chute de la masse d'eau est donnée par l'expression suivante :

$$P = \rho g \eta u h \quad (1)$$

Où :

$P$  : La puissance électrique produite en W.

$\rho$  : La masse volumique de l'eau en soit  $1000 \text{ Kg/m}^3$ .

$g$  : L'accélération de la pesanteur en  $\text{m/s}^2$ .

$u$  : Le débit de l'eau turbiné en  $\text{m}^3/\text{s}$ .

$h$  : La hauteur effective de la chute d'eau en m. C'est la différence de niveau entre le bief amont et le bief aval.

$\eta$  : Le rendement de l'installation.

A partir de la relation (1), on déduit d'une part que la puissance électrique produite par la centrale hydroélectrique augmente avec l'augmentation de la hauteur effective de chute. Il faut noter que le canal d'évacuation contribue aussi à augmenter la hauteur de chute. D'autre part, la puissance électrique produite par un même débit et même hauteur de chute, diminue dans le temps à cause de l'affaiblissement du rendement de l'installation causé par le vieillissement.

### **Séquences de production :**

- ❖ Avoir de l'eau en grandes quantités,
- ❖ ouvrir les vannes pour amorcer le cycle de production d'électricité. L'eau s'engouffre alors dans une conduite forcée ou dans une galerie creusée dans la roche suivant l'installation, et se dirige vers la centrale hydraulique située en contrebas.
- ❖ A la sortie de la conduite, la pression ou la vitesse (ou les deux en même temps) entraîne la rotation de la turbine.
- ❖ La rotation de la turbine entraîne celle du rotor de l'alternateur.
- ❖ Un transformateur élève alors la tension du courant produit par l'alternateur pour qu'il puisse être plus facilement transporté dans les lignes à haute et très haute tension.

- ❖ L'eau turbinée qui a perdu son énergie s'échappe par le canal de fuite et rejoint la rivière.

## CARACTÉRISTIQUES D'UNE UNITÉ HYDROÉLECTRIQUE

La caractéristique entrée-sortie d'une unité hydroélectrique dépend principalement du type de la centrale hydroélectrique, c'est-à-dire, si elle est à hauteur de chute constante ou à hauteur chute variable.

### a- Cas d'une centrale à hauteur constante

La caractéristique typique entrée-sortie d'une unité hydroélectrique d'une centrale à hauteur de chute constante est illustrée à la figure (2). La caractéristique montre une linéarité entre le débit d'eau turbinée et la puissance électrique produite. Après cela, le débit d'eau nécessaire pour produire la puissance électrique augmente fortement à cause de l'affaiblissement du rendement de l'unité.

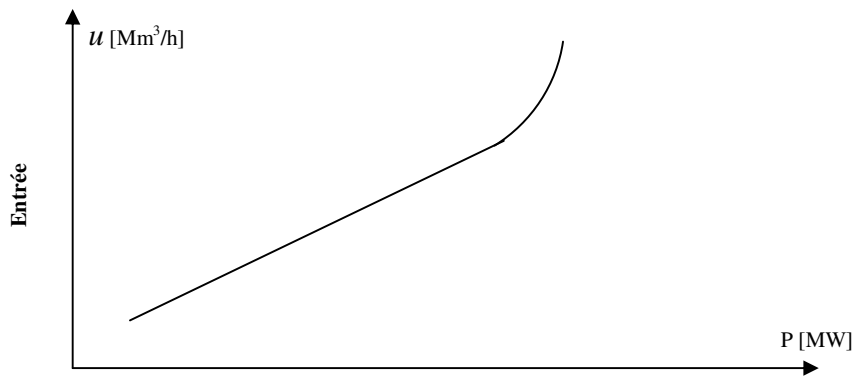


Figure 2 : Caractéristique entrée-sortie d'une unité hydroélectrique à hauteur constante.

Où :

$u$  : Le débit d'eau en  $Mm^3$  nécessaire pour produire la puissance électrique  $P$ .

$P$  : La puissance électrique produite en Mw.

### b- Cas d'une Centrale à hauteur variable

La caractéristique entrée-sortie d'une unité hydroélectrique d'une centrale à hauteur variable est illustrée à la figure (3). Ce type de caractéristique se produit chaque fois qu'il y a des variations dans le stockage du réservoir et/ou si la hauteur du canal d'évacuation représente une partie assez importante de la hauteur nette de chute. En effet, pour une hauteur de chute donnée, la caractéristique est identique à celle d'une unité à hauteur de chute constante, mais si la hauteur de chute varie, la caractéristique entrée-sortie correspondante change d'allure comme il est illustré à la figure (3). Où d'une part, on constate que le volume d'eau nécessaire pour produire une même puissance diminue au fur et à mesure que cette hauteur de chute augmente. D'autre part, la capacité maximale de l'unité varie et qui augmente avec l'augmentation de la hauteur de la chute d'eau.

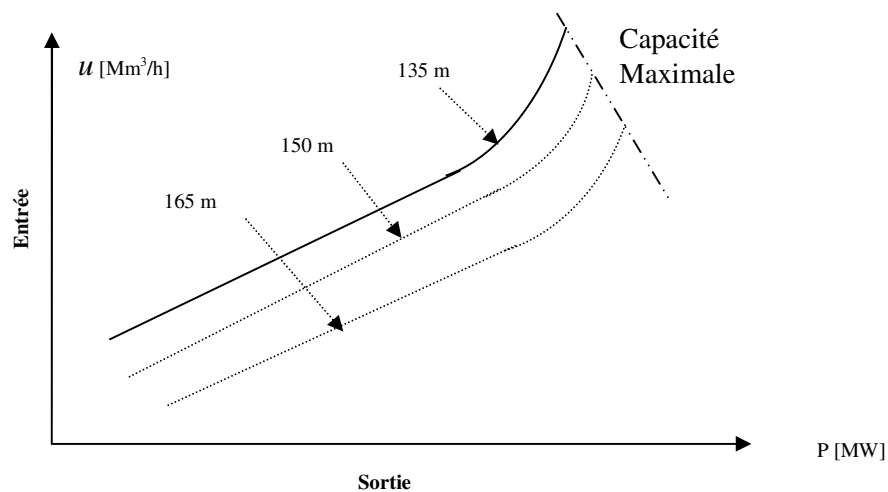


Figure 3 : Caractéristique entrée-sortie d'une unité hydroélectrique à hauteur de chute variable. (135 m, 150 m et 165 m se sont des hauteurs de chutes.)

### COÛT D'EXPLOITATION

En dépit d'un lourd investissement initial nécessaire à la construction des barrages, les aménagements hydrauliques restent à long terme des équipements très rentables. Comparés aux centrales thermiques, ils produisent un kilowatt moins cher. L'exploitation d'une énergie primaire gratuite et renouvelable. De plus, les centrales hydrauliques exigent une maintenance réduite et ont une durée de vie de plusieurs dizaines d'années. Economique et rapidement mobilisable, l'énergie d'origine hydraulique est avantageusement utilisée. Elle permet d'éviter la mise en route coûteuse de centrales thermiques supplémentaires et d'économiser de cette manière le combustible fossile ou nucléaire.

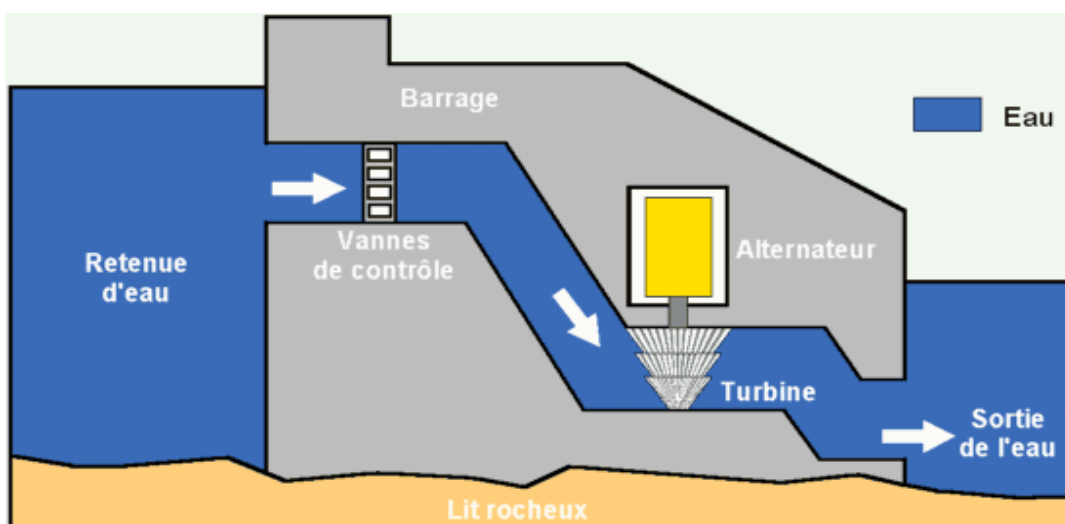


Figure : installation d'une centrale hydroélectrique.

## L'ELECTRICITE PHOTOVOLTAÏQUE

### Introduction

Toutes les énergies renouvelables sont issues directement ou indirectement du soleil, son rayonnement direct peut être utilisé de deux manières :

- ♦ Sa chaleur peut être concentrée pour chauffer de l'eau sanitaire, des immeubles, des séchoirs, ou bien un liquide en circulation afin de produire de l'électricité par l'intermédiaire d'un alternateur ou d'une dynamo. C'est le solaire *thermique*.
- ♦ Sa lumière peut être transformée directement en courant électrique grâce à l'*effet photovoltaïque*

### Principe

Une centrale solaire produit de l'électricité grâce à la lumière du soleil. Des cellules photovoltaïques, éléments de base des panneaux solaires captent la lumière du soleil et la transforment **directement en électricité**.

Une cellule photovoltaïque est un **composant électronique** qui, exposé à la **lumière** (photons), génère une **tension** électrique (volt), cet effet est appelé l'effet photovoltaïque. Le courant obtenu est un **courant continu** et la tension obtenue est de l'ordre de 0,5 V.

### La cellule photovoltaïque

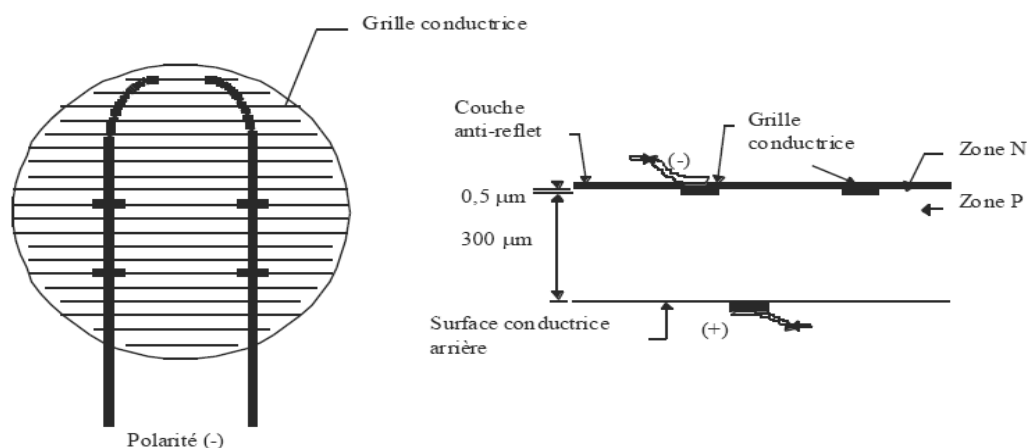
Les photopiles ou cellules photovoltaïques sont des composants optoélectroniques qui transforment directement la lumière solaire en électricité. Elles sont réalisées à l'aide de matériaux semi-conducteurs.

Le matériau de base est dans la plupart des cas le silicium. Selon le procédé de fabrication, on obtiendra des photopiles plus ou moins performantes, sous forme amorphe, polycristalline, ou monocristalline. D'autres matériaux sont utilisables : Arséniure de Gallium (AsGa), Tellure de Cadmium (CdTe).

Le fonctionnement de la photopile est basé sur les propriétés électroniques acquises par le silicium quand des atomes étrangers en petit nombre (des "impuretés") sont substitués à des atomes de silicium dans un réseau cristallin : c'est ce que l'on appelle le dopage;

- ♦ Si l'atome d'impureté contient plus d'électrons que le silicium, le matériau contiendra des électrons libres en excès : il sera dit de type "N" (ex : dopage au phosphore).
- ♦ Si l'atome d'impureté contient moins d'électrons que le Silicium, le matériau sera déficitaire en électrons : il sera dit de type "P" (ex : dopage au bore).

Une cellule solaire sera obtenue en constituant une jonction de deux zones de type opposées (jonction PN). Au voisinage de la jonction, un champ électrique apparaît provoqué par le déséquilibre de charges. Il va contribuer à drainer les électrons qui auront été détachés par l'énergie des photons (« grains de lumière ») incidents.



## L'effet photovoltaïque

C'est le résultat de l'interaction de la lumière avec les atomes de cristal. L'énergie d'un photon dépend de sa longueur d'onde. Un photon d'énergie suffisante (c'est à dire dont la longueur d'onde est comprise entre 0,4 et 1,1  $\mu\text{m}$  ~ spectre visible) qui heurte un atome de silicium peut arracher un électron et lui communiquer une certaine vitesse. L'électron ayant acquis suffisamment d'énergie peut se déplacer vers la jonction PN, où la présence du champ électrique a pour conséquence la collecte de l'électron vers la région N, le champ empêchant la recombinaison de l'électron avec son atome d'origine.

Une tension électrique apparaît entre les deux zones N et P. Le dispositif devient **générateur électrique** sous l'effet de la lumière. La collecte de courant se fait par les contacts métalliques, en forme de grille sur chaque face. Si ces électrodes sont reliées à un circuit extérieur, un courant circule. L'épaisseur nécessaire pour réaliser ce phénomène n'est que de quelques dizaines de microns, mais pour des raisons mécaniques, les cellules atteignent généralement des épaisseurs de 200 à 400 microns ( $10^{-6}$  mètres). Selon la technologie utilisée (amorphe en couche mince, polycristallin, monocristallin), le rendement de conversion s'échelonne de 6 à 20 % actuellement pour le silicium. Cela permet notamment une puissance d'environ 100 Watts-crête/m pour le silicium cristallin (compte tenu des espaces restant entre les cellules) et 60Watts-crête/m pour l'amorphe (à 20°C).

## Systèmes photovoltaïques

### *Module photovoltaïque :*

La cellule individuelle, unité de base d'un système photovoltaïque, ne produit qu'une très faible puissance électrique, typiquement de 1 à 3 W avec une tension de moins d'un volt. Pour produire plus de puissance, les cellules sont assemblées pour former un module (ou panneau). Les connections en série de plusieurs cellules augmentent la tension pour un même courant, tandis que la mise en parallèle accroît le courant en conservant la tension. La plupart des modules commercialisés sont composés de 36 cellules en silicium cristallin, connectées en série pour des applications en 12 V. Le courant de sortie, et donc la puissance, sera proportionnelle à la surface du module.

### *Champ photovoltaïque :*

L'interconnexion de modules entre eux - en série ou en parallèle - pour obtenir une puissance encore plus grande, définit la notion de champ photovoltaïque.

### *Générateur photovoltaïque :*

Le générateur photovoltaïque se compose d'un champ de modules et d'un ensemble de composants qui adapte l'électricité produite par les modules aux spécifications des récepteurs. Cet ensemble, appelé aussi "Balance of System" ou BOS, comprend tous les équipements entre le champ de modules et la charge finale, à savoir la structure rigide (fixe ou mobile) pour poser les modules, le câblage, la batterie en cas de stockage et son régulateur de charge, et l'onduleur lorsque les appareils fonctionnent en courant alternatif. Le système photovoltaïque est alors l'ensemble du générateur photovoltaïque et des équipements de consommation (charge).

## Applications

En dehors des applications spatiales à l'origine du développement des techniques photovoltaïques et des applications en électronique (alimentation de calculette, de montres...), on trouve deux grandes familles d'applications :

- **les générateurs autonomes** pour l'alimentation de sites isolés du réseau de distribution d'électricité (habitat, relais hertzien, pompage, balisage en mer, électrification rurale des pays du sud...) ;
- **les centrales photovoltaïques** connectées au réseau (en très fort développement dans les pays industrialisés);

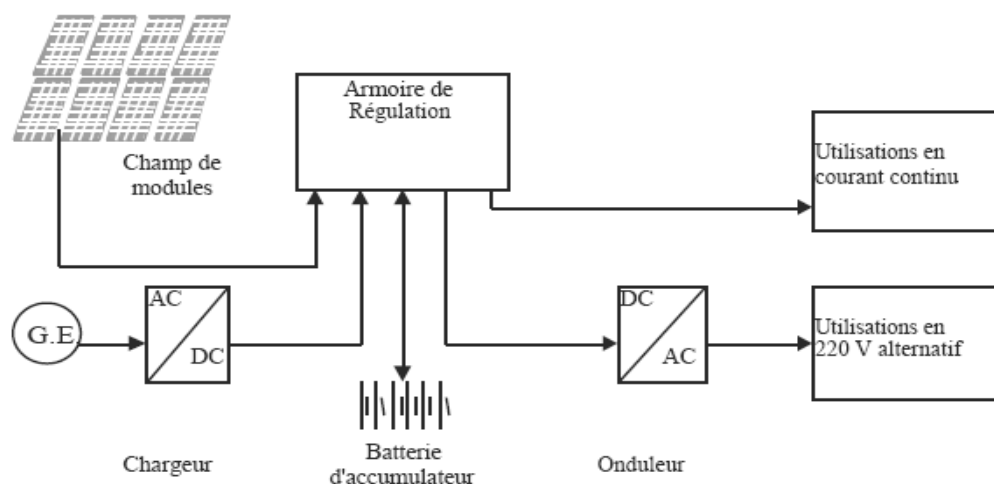
## Le générateur photovoltaïque autonome

Le générateur photovoltaïque autonome comprend 5 sous-ensembles (dont 2 optionnels) :



- le champ de modules : **produit** l'énergie.
- l'armoire de régulation : **gère** le système.
- le parc de batterie : **stocke** l'énergie (absent sur les systèmes au fil du soleil)
- l'onduleur (optionnel) : **transforme** l'énergie
- le chargeur (optionnel) : permet de recharger la batterie à partir d'un groupe électrogène d'appoint en cas de besoins.

Le générateur photovoltaïque fonctionne de façon autonome, soit au **fil du soleil** (pompage), soit avec un **stockage intermédiaire** sur batterie.



*Synoptique d'un générateur photovoltaïque autonome*

### *Le champ de modules*

Le nombre de modules qui constituent le générateur photovoltaïque est déterminé à partir des **besoins** en énergie électrique du futur utilisateur et des caractéristiques climatiques du site : ensoleillement, température...

### *L'armoire électrique*

L'armoire électrique relie entre eux les différents éléments du générateur photovoltaïque autonome. Elle rassemble les protections réglementaires nécessaires à toute installation électrique (respect des normes en vigueur) et accueille le **système de régulation**. La partie « régulation » de l'armoire électrique assure plusieurs fonctions :

- régulation de la charge de la batterie par limitation de la tension pour éviter les surcharges.
- limitation de la décharge de la batterie par délestage de l'utilisation, pour éviter les décharges trop profondes risquant d'endommager la batterie.
- contrôle du fonctionnement du générateur, par voyants et appareils de mesure : ampèremètre, voltmètre, ampère-heure-mètre, enregistreur de données.

### *Le parc batterie*

La batterie d'accumulateurs stocke l'énergie produite par les modules pour assurer l'alimentation des récepteurs en toute période. Elle est constituée d'éléments de 2, 6, ou 12 V. La tension et la capacité désirées s'obtiennent par un couplage série / parallèle des éléments.

La **capacité** est déterminée en fonction des besoins des usagers, du mode de consommation de l'énergie et du nombre de jours d'autonomie souhaité. Pour un habitat dans les Pyrénées Orientales, on prévoira environ 7 jours d'autonomie, dans le Jura ce sera plutôt 15 jours.

La durée de vie des batteries stationnaires au plomb est d'environ 8 à 10 ans (sous réserve d'une bonne gestion, rôle de la régulation).

## L'onduleur et le chargeur

L'onduleur est un appareil permettant de transformer le **courant continu** en **courant alternatif** et d'alimenter les récepteurs en alternatif à partir de l'énergie stockée dans la batterie. Certains onduleurs ont la particularité d'être **réversibles**. C'est à dire qu'ils sont aussi capables de tenir le rôle de chargeur en convertissant le courant alternatif provenant d'une autre source alternative (groupe électrogène, réseau, pico-turbine hydroélectrique, éolienne), en courant continu pour charger la batterie. Si cela n'est pas le cas, on rajoute un chargeur indépendant.

Les dimensions de l'onduleur et du chargeur doivent être adaptées à la puissance des appareils à alimenter et à la capacité du parc de batterie auquel ils sont reliés.

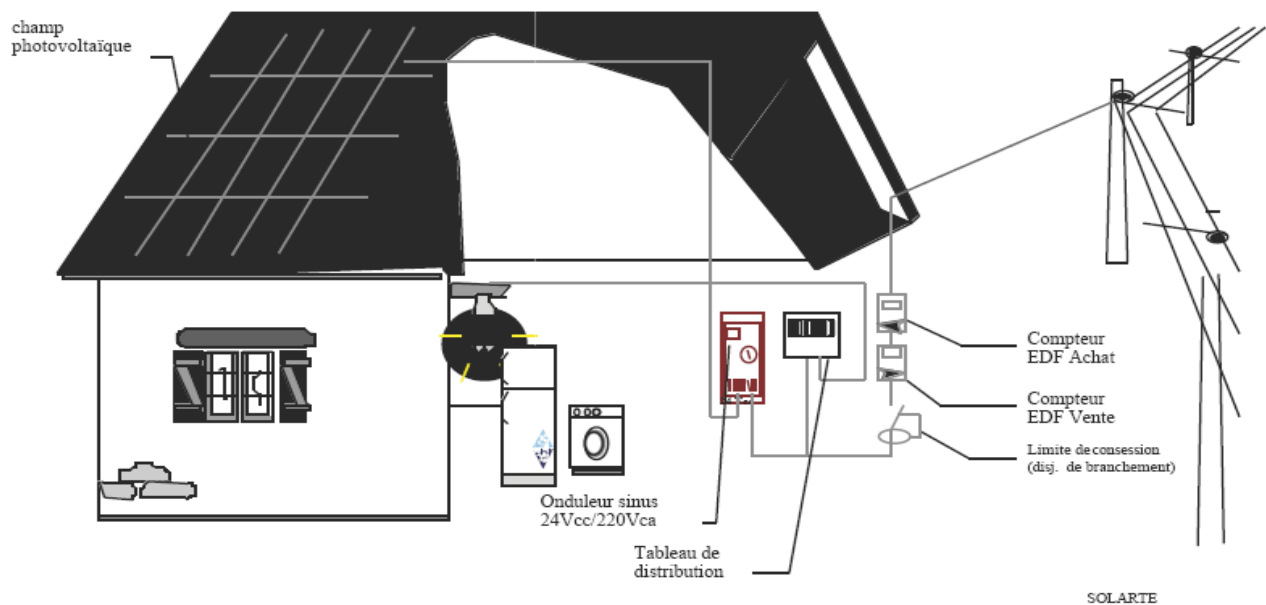
## Exemple d'applications possibles :

Habitat, refuge de montagne, maison forestière, éclairage de monuments, déchetteries, relais hertziens (radio, téléphone, T.V.), pompage, traitement d'eau, balisage en mer, signalisation routière, détection de crue, éclairage citadin (abribus, parc et jardins...), horodateurs, loisir (camping-car, cabanes...), ...

## La centrale solaire photovoltaïque

Il est possible d'utiliser un générateur photovoltaïque de façon non autonome, en le connectant au réseau public de distribution d'électricité. Nous aurons alors une petite **centrale de production** d'électricité dont l'énergie sera soit consommée sur place par le propriétaire, soit revendue sur le réseau. En cas de production excédentaire, le générateur photovoltaïque alimente le réseau et inversement, le réseau alimente la distribution en cas de déficit ou hors production solaire.

L'ensemble est entièrement automatisé et géré par un ou plusieurs onduleurs. Le système est donc beaucoup plus simple. Il n'y a plus de batterie (c'est le réseau qui joue ce rôle), il n'y a plus d'armoire de régulation complexe.



Ces centrales peuvent être installées sur des maisons d'habitations individuelles, des bâtiments publics (ex bibliothèque de Mataró en Catalogne) ou privées. Elles peuvent remplacer la toiture ou être installées en façade.

## Les avantages et les limites du photovoltaïque

Les installations bien conçues sont fiables, même dans des conditions climatiques très rudes. La durée de vie des modules photovoltaïques dépasse 20 ans, celle des batteries atteint 8 à 10 ans.

Les systèmes peuvent être conçus pour des puissances très variables (de 20 Wc pour un système de signalisation routière jusqu'à 1 MWc pour une centrale connectée au réseau).

Le montage est aisé et rapide. Les panneaux sont relativement légers (10 à 15 kg). Les seules contraintes sont **l'orientation, l'inclinaison** et leur disposition par rapport aux **masques** éventuels. Les panneaux doivent être orientés en direction de l'équateur. Leur inclinaison par rapport à l'horizontale doit être adaptée à la saison d'utilisation la plus défavorable pour les systèmes autonomes (elle a moins d'importance sur les systèmes connectés au réseau, c'est pourquoi on peut trouver des capteurs en façade ou en toiture à faible pente). Une attention particulière doit être portée aux éventuels masques. Les cellules étant connectées en série, le masquage, même partiel, d'une seule cellule provoque l'inhibition de toute une série et conduit à une sensible baisse de production du module.

Le coût de fonctionnement est faible. La maintenance est limitée à une ou deux visites annuelles effectuées par un professionnel. Il n'y a pas d'usure mécanique car il n'y a pas de pièce en mouvement, pas de moteur... (à l'exception d'un groupe électrogène d'appoint, qui n'est utilisé que ponctuellement en site isolé).

Les systèmes autonomes nécessitent de prévoir le renouvellement des batteries tous les huit ou dix ans. Ce coût à budgéter avoisine 10 à 15 % du prix total initial du générateur.

Par contre, les investissements sont élevés et le recours à cette technologie impose une analyse très fine des besoins et l'utilisation impérative d'appareils énergétiquement performants.

Enfin, les aspects positifs pour l'environnement ne sont pas négligeables : pas de nuisance sonore ou olfactive, pas de ligne électrique supplémentaire, pas de pollution, peu de déchets.

# L'ENERGIE EOLIENNE

## I- Introduction générale

### I.1- Origine du vent

L'énergie du vent provient de celle du soleil qui chauffe inégalement les masses d'air, provoquant des différences de pression atmosphérique et des mouvements de circulation de l'air entre zones de températures différentes.

### I.2- Energie renouvelable

- L'énergie éolienne est une énergie renouvelable,
- Disponible partout (quoiqu'en quantités différentes)
- Sans rejet polluant dans l'atmosphère.

### I.3- Principe de fonctionnement

Les éoliennes, sont tous systématiquement composés de trois éléments :

- ❖ les ailes (ou pâles) tournent autour d'un axe,
- ❖ le rotor transmet l'énergie mécanique de la rotation à un alternateur, qui transforme cette énergie en énergie électrique.

## II- Types d'éoliennes

Il existe cependant des types très variés d'éoliennes :

- Pour les plus classiques, les pâles sont identiques aux hélices d'un avion, à la différence qu'elles sont orientées pour recevoir et non pas pour créer un flux d'air. Le nombre de pâles varie d'une seule à une dizaine environ. Plus leur nombre est élevé, plus l'hélice tourne lentement (mais avec une plus grande force). Or, pour produire de l'électricité, c'est la vitesse de rotation qui compte.
- La plupart des modèles actuels, possèdent deux ou trois pâles. Il en existe même à une seule pôle, équilibrée par un contrepoids.
- Il existe des éoliennes dont les pâles sont placées à l'horizontale et animent un axe de rotation vertical. Cette technique théoriquement avantageuse (ces éoliennes n'ont pas besoin d'être orientées face au vent pour fonctionner, elles tournent quelle que soit la direction du vent), n'a guère connu de développement pratique.

### II.1- Les contraintes

- ❖ Les alternateurs actuels nécessitent une vitesse de rotation élevée pour fonctionner correctement. Les vitesses obtenues n'étant pas toujours suffisantes, on interpose un multiplicateur de vitesse entre le rotor et l'alternateur.
- ❖ La nécessité de maintenir une vitesse de rotation constante. Or, la vitesse du vent est par nature variable. On utilise donc des hélices dont l'orientation par rapport à

l'axe de rotation peut varier de manière à ce qu'elles "prennent" plus ou moins le vent.

- ❖ Dans le cas des petites applications séparées du réseau, une autre conséquence de cette versatilité du vent est qu'il faut des accumulateurs pour stocker l'énergie et pouvoir la consommer au moment souhaité. Dans le cas, plus général, d'une utilisation raccordée au réseau, il n'est plus nécessaire d'accumuler l'énergie.
- ❖ Pour pouvoir transporter le courant dans les lignes à haute tension, il faut que l'éolienne fournisse une puissance élevée. Or, l'énergie produite croît avec la surface des pâles... On augmente donc la taille des éoliennes. Certaines vont jusqu'à devenir gigantesques. Elle ne peut pourtant pas être augmentée indéfiniment. En effet, plus l'hélice est lourde, moins elle tourne vite. Heureusement, d'importants gains de poids ont été réalisés ces derniers temps grâce des techniques provenant du secteur spatial.

### **III- Installation d'une éolienne**

#### **III.1- Structure d'une éolienne**

La structure générale d'une éolienne liée au réseau électrique est montrée à la figure 1.

#### **III.2- Choix de l'altitude**

##### **Exigences :**

- ❖ vitesse
- ❖ puissance

##### **Choix des endroits les plus favorables aux installations :**

- ❖ Gisement éolien.
- ❖ L'hélice est placée en hauteur, à quelques dizaines de mètres au dessus du sol pour les grosses machines actuelles, parce que la vitesse du vent augmente avec l'altitude.

##### **Inconvénients :**

- ❖ problèmes d'esthétique en modifiant le paysage.
- ❖ Les grands systèmes sont également réputés bruyants, mais le bruit est en fait très modeste : quelques dizaines de décibels.

#### **III.1.1- Relation entre la vitesse et la hauteur**

La vitesse du vent augmente avec l'altitude. Cette dépendance s'exprime par une relation empirique :

$$V_1/V_2 = (h_1/h_2)^n$$

Où :

$V_1, V_2$  : Les vitesses aux hauteurs respectives  $h_1$  et  $h_2$ .

n : exposant qui dépend de la configuration du terrain et varie entre 0,1 et 0,4 (pour terrain accidenté, n prend les valeurs de la limite supérieure).

### III.2- Choix du site

- ❖ Dépend de la répartition annuelle des vitesses moyennes sur un site pour une période donnée.
- ❖ La plupart des éoliennes démarrent à une vitesse de vent inférieure à 3 m/s, on remarque de la figure 2 que l'exploitation de l'énergie éolienne est favorable pour le site, car les moyennes mensuelles du vent restent supérieures à 5 m/s.
- ❖ La vitesse du vent est plus importante en hiver que pendant les mois d'été, ce qui constitue un facteur favorable, les besoins énergétiques étant plus importants pendant cette saison.

### IV- Choix du générateur électrique

La solution adoptée pour le choix du générateur électrique, dépend d'une série de facteurs parmi lesquels on trouve :

- ❖ la puissance nominale,
- ❖ les modalités d'utilisation de l'aérogénérateur (en site isolé, connecté en réseau de puissance infinie, etc.),
- ❖ la nature de la charge et les paramètres de l'énergie électrique à fournir.

Les principaux types de générateurs électriques utilisés sont :

- les générateurs à courant continu,
- les alternateurs à aimants permanents,
- les générateurs synchrones,
- les générateurs asynchrones classiques.

Le choix du type du générateur dépend des modes d'utilisation suivant :

- ♦ Les deux premiers générateurs sont utilisés pour des faibles puissances. Ils sont connectés à un circuit électronique de puissance qui réalise dans certains cas l'optimisation de la conversion de l'énergie éolienne en énergie électrique et qui adapte la forme du courant transmis aux exigences de la charge. Par exemple, il faut produire du courant continu pour permettre le stockage dans des batteries d'accumulateurs.
- ♦ Pour débiter sur un réseau alternatif, on utilise des générateurs synchrones ou asynchrones. Le fonctionnement de l'aérogénérateur est alors analysé par rapport à deux paramètres : la vitesse de rotation de la turbine et la fréquence du réseau électrique. Plusieurs cas sont à distinguer :
  - Vitesse constante, fréquence constante : la vitesse de la turbine est contrôlée par la modification de l'angle de calage ; on utilise des générateurs synchrones classiques qui fonctionnent dans un régime de régulation automatique de la tension. Ils sont utilisés généralement dans des installations de grandes puissances.

- Vitesse presque constante, fréquence constante : grâce à une régulation sur l'angle de calage on emploie un générateur asynchrone à cage dont le glissement varie entre 1% et 5%.
- Vitesse variable, fréquence variable : comme les récepteurs ne sont pas sensibles à la variation de la fréquence, dans ce cas ce sont les générateurs asynchrones qui s'imposent. Pour un rendement élevé de la conversion, on peut utiliser des générateurs à nombre de pôles réglable.
- Vitesse variable, fréquence constante : c'est le cas le plus étudié et pour lequel l'apport de l'électronique de puissance est essentiel. Des nombreuses recherches ont été effectuées sur les cascades électroniques comprenant un redresseur et un onduleur. Ces cascades sont associées à des générateurs synchrones ou à des générateurs asynchrones, ce qui rend possible d'une part l'optimisation de la conversion de l'énergie éolienne et d'autre part la simplification de la construction mécanique de l'éolienne car on peut éventuellement se passer d'une régulation de l'angle de calage. Les solutions les plus modernes emploient des alternateurs en haute fréquence avec modulation du courant de l'excitation, ou des générateurs asynchrones bobinés, à double alimentation, associés à des cascades électroniques.

## **V- Composition d'une installation éolienne**

Les installations utilisant l'énergie éolienne comportent classiquement cinq parties :

- Une turbine éolienne, avec ses annexes mécaniques (régulation, sécurité, réduction), qui, lorsqu'elle est exposée à un vent de vitesse  $v$ , tourne à la vitesse  $\Omega$  et fournit sur son arbre un couple de moment  $\Gamma$ ,
- Un générateur électrique, qui transforme l'énergie éolienne en énergie électrique alternative ou continue,
- Une charge, ou utilisation, qui reçoit cette énergie électrique. Cela peut être une résistance (chauffage électrique), un moteur, une pompe, un réseau de distribution d'énergie électrique. Selon la nature de cette charge les exigences sur le conditionnement de l'énergie électrique utilisée sont très différentes,
- Un convertisseur qui est en général placé entre le générateur électrique et la charge et qui adapte la forme de l'énergie électrique fournie par le générateur à ce qu'exige la charge.
- Un système de commande et de régulation qui assure la conversion optimale en régime stationnaire et, éventuellement en régime dynamique.

La plus simple structure de conversion de l'énergie éolienne est présentée dans la figure 3, où :

T : est la turbine,

M : le multiplicateur de vitesse,

GE : le générateur électrique

EP : le circuit électronique de puissance.



On considère que le système alimente une charge électrique isolée.

## VI- Régularisation de l'énergie

Le caractère aléatoire du vent pose le problème de la régularisation de l'énergie fournie aux consommateurs par les aérogénérateurs. Il est possible que, dans certains intervalles de temps, la demande d'énergie soit plus grande que l'énergie pouvant être fournie par l'aérogénérateur. C'est pourquoi on prévoit des solutions de régularisation par :

- ⌚ Des sources alternatives d'énergie (réseau, diesel-générateurs, piles solaires),
- ⌚ L'utilisation de l'énergie stockée pendant les périodes de surproduction de l'aérogénérateur (systèmes de pompage, accumulateurs).

On propose un schéma général de conversion de l'énergie éolienne dans lequel on reflète le bilan des puissances dans le réseau d'un utilisateur local (figure 4).

### VI.1- Bilan de puissance dans le réseau local

Les puissances qui entrent dans le réseau local sont :

- $P_a$ , puissance fournie par l'aérogénérateur,
- $P_{esa}$ , puissance fournie par les sources alternatives,
- $P_{er}$ , puissance fournie par le réseau national,
- $P_{ess}$ , puissance fournie par le système de stockage.

Les puissances qui sortent de réseau local sont :

- $P_{ul}$ , puissance consommée par l'utilisateur local,
- $P_{sss}$ , puissance transmise au système de stockage d'énergie,
- $P_{sr}$ , puissance transmise au réseau national.

### Cas particuliers

Naturellement, dans une configuration énergétique réelle, avec aérogénérateur, seulement une partie des flux mentionnés dans la figure 3 existe. Présentons quelques situations particulières :

1.  $P_a = 0$  ;  $P_{ul} = 0$ , Les autres puissances sont nulles; c'est le cas d'une éolienne autonome, sans sources alternatives et sans systèmes de stockage.
2.  $P_a = 0$  ;  $P_{esa} = 0$  ;  $P_{ess} = 0$  ;  $P_{ul} = 0$  ;  $P_{sss} = 0$  ;  $P_{er} = P_{sr} = 0$  ; c'est le cas d'une éolienne utilisée dans un site isolé, avec sources alternatives et systèmes de stockage.
3.  $P_a = 0$  ;  $P_{sr} = 0$ , C'est le cas des aérogénérateurs de grande puissance qui débitent dans un réseau énergétique national ; le réseau local est le réseau de raccord au système énergétique national.
4.  $P_a = 0$  ;  $P_{er} = 0$  ;  $P_{ul} = 0$  ; ( $P_{sr} = 0$ ), les autres puissances sont nulles. C'est le cas d'un aérogénérateur qui alimente un utilisateur, la source alternative étant le réseau de puissance national.

Dans toutes les situations, il est souhaitable que l'aérogénérateur assure une conversion optimale de l'énergie éolienne disponible sur l'instant, de manière que la consommation sur des sources alternatives soit minimale. Il est évident que le système de commande pour l'optimisation en temps réel du système énergétique local est important, par rapport au critère du rendement de la conversion de l'énergie éolienne.

## VII- Puissance individuelle d'une turbine

La puissance  $P$  (en Watts) extraite du vent est donnée par la formule approximative suivante :

$$P = 29,63 \cdot 10^{-2} D^2 u^3$$

Où :

Le sens du vent est montré à la figure 5.

$D$  : est le diamètre de la lame ou pôle (en mètre).

$u$  : la vitesse du vent en mètre/seconde.

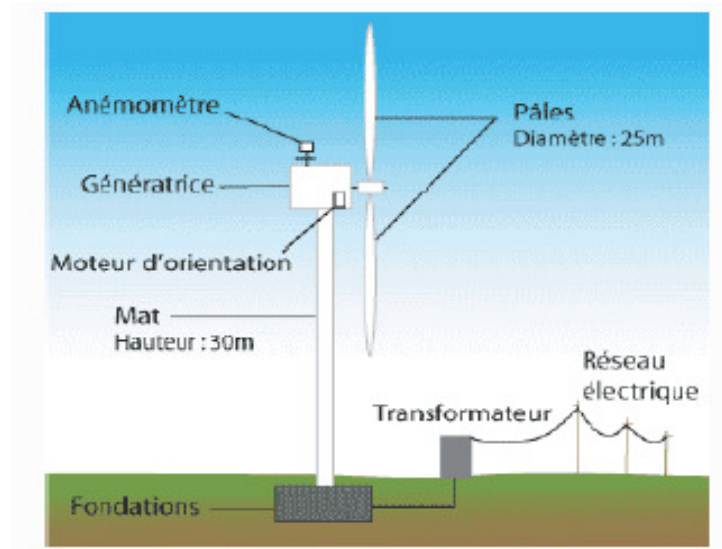


Fig. 1 : structure d'une centrale éolienne.

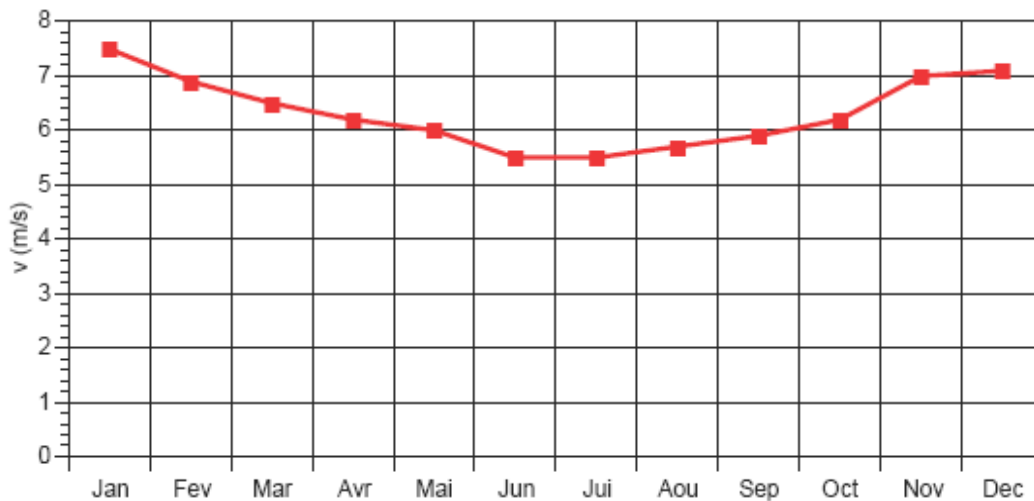


Fig. 2 : répartition annuelle des vitesses moyennes sur un site pour une période donnée.

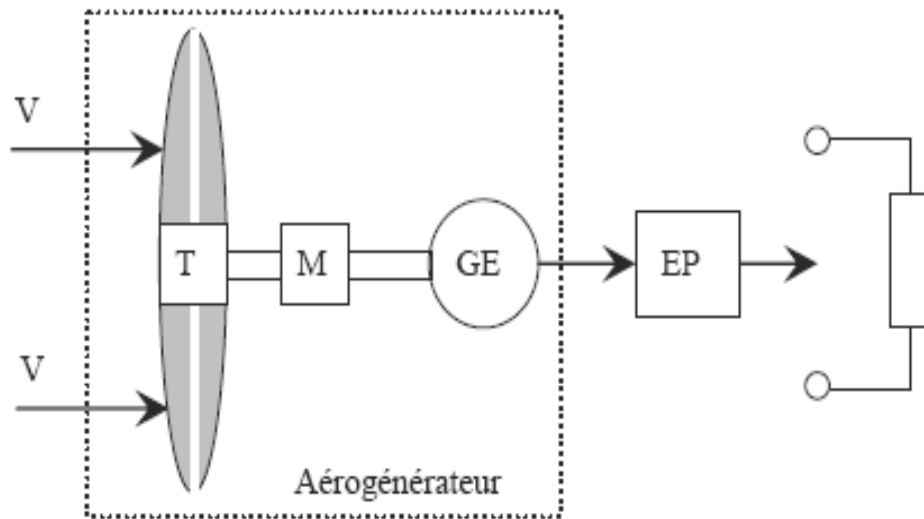


Fig. 3 : Structure de conversion de l'énergie éolienne.

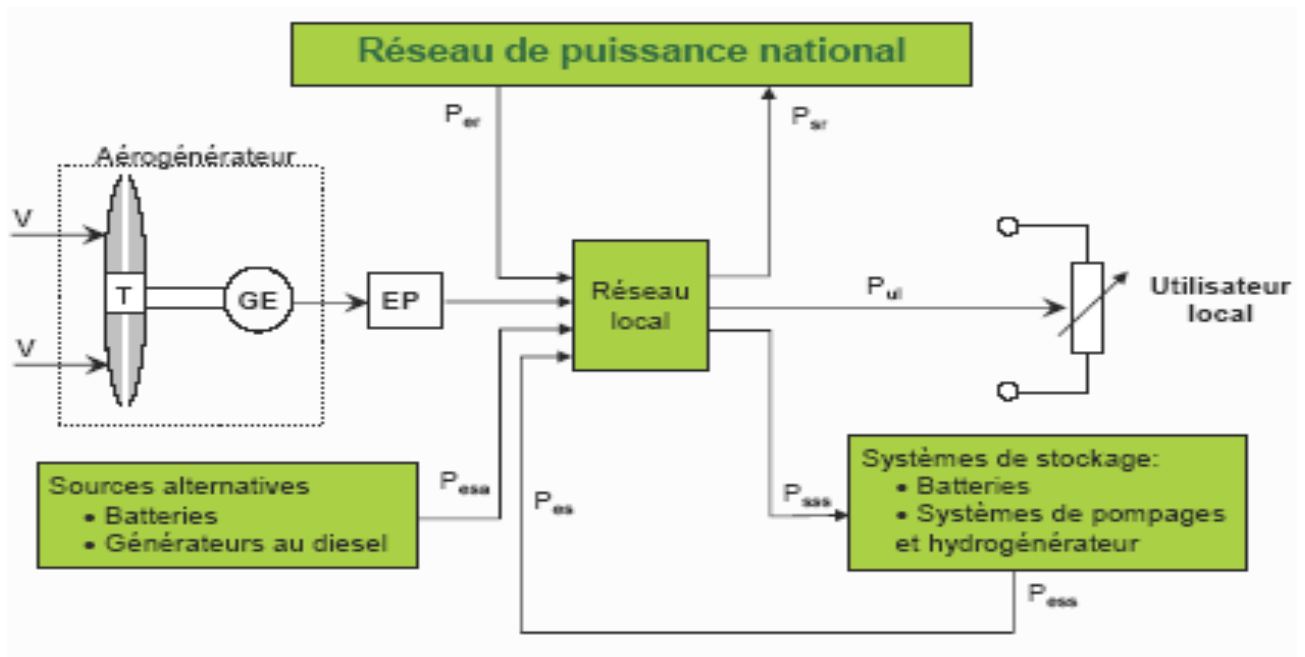


Fig.4 : Schéma général de conversion de l'énergie éolienne

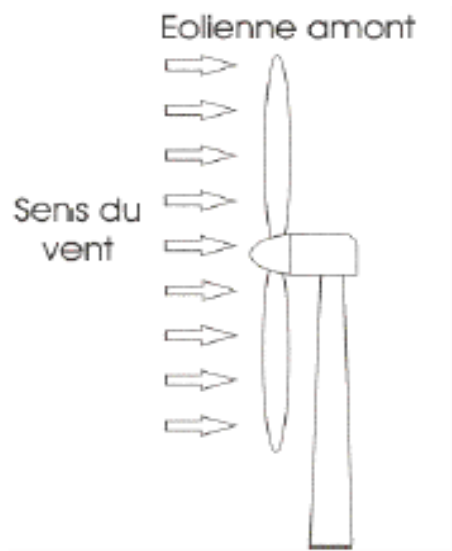


Fig.5 : Sens du vent par rapport aux pâles.

