

---

## Partie II : Notions de base sur les énergies renouvelables

### CENTRALES HYDRAULIQUES

Les centrales hydroélectriques convertissent l'énergie de l'eau en mouvement en énergie électrique. L'énergie provenant de la chute d'une masse d'eau est tout d'abord transformée dans une turbine hydraulique en énergie mécanique. Cette turbine entraîne un alternateur dans lequel l'énergie mécanique est transformée en énergie électrique.

#### 1- Puissance disponible:

D'une façon générale, la puissance que l'on peut tirer d'une chute dépend non seulement de la **hauteur de la chute**, mais aussi du **débit** du cours d'eau. Le choix de l'emplacement d'une centrale hydro-électrique dépend donc de ces deux facteurs.

La puissance disponible est donnée par l'équation:

$$P = 9.8 q h$$

$P$  = puissance hydraulique, en [kW]

$q$  = débit en mètres cubes par seconde [m<sup>3</sup>/s]

9.8 = coefficient tenant compte des unités.

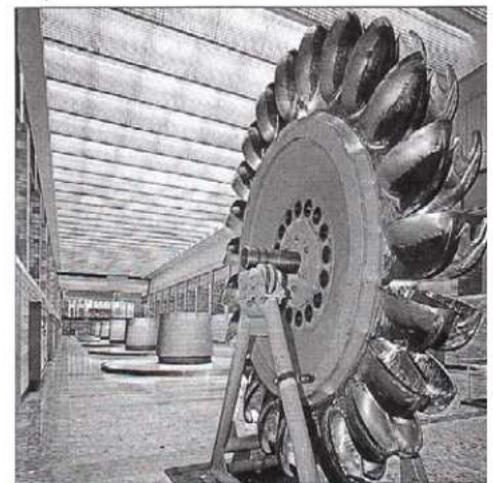
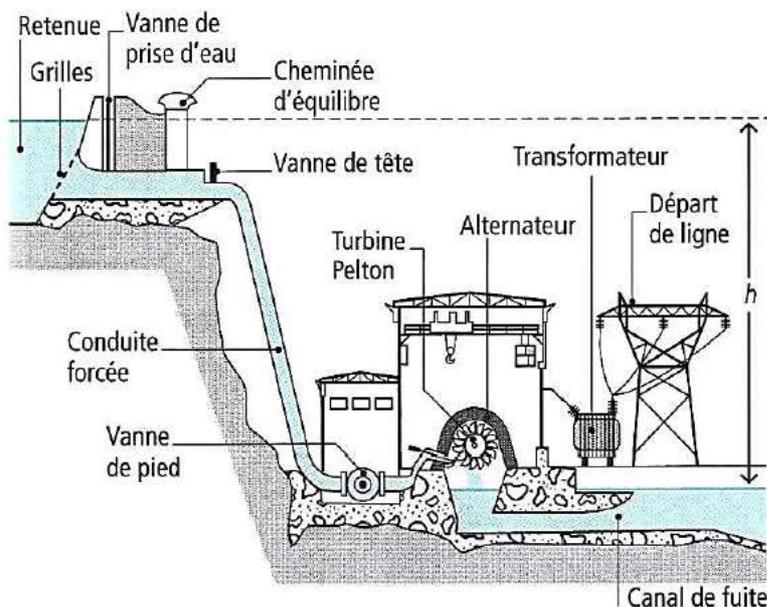
A cause des pertes, la puissance mécanique que l'on peut recueillir sur l'arbre de la turbine est inférieure à la puissance fournie par l'eau. Cependant, le rendement des turbines hydraulique est élevé: de l'ordre de 80 à 94% pour les grosses unités. Dans les alternateurs, la transformation de la puissance se fait à un rendement de 97 à 98.5%.

#### 2- Types des centrales hydrauliques

Centrale	Hauteur de chute	Turbine	Situation de la Centrale
Haute chute	$h > 300 \text{ m}$	<b>Pelton</b>	à quelques km de la prise d'eau
Moyenne chute	$30 \text{ m} < h < 300 \text{ m}$	<b>Francis</b>	implantée dans le barrage
Basse chute ou fil de l'eau	$h < 30 \text{ m}$	<b>Kaplan</b>	implantée au fil de l'eau

### a) LES CENTRALES DE HAUTES CHUTES : $h > 300\text{M}$ :

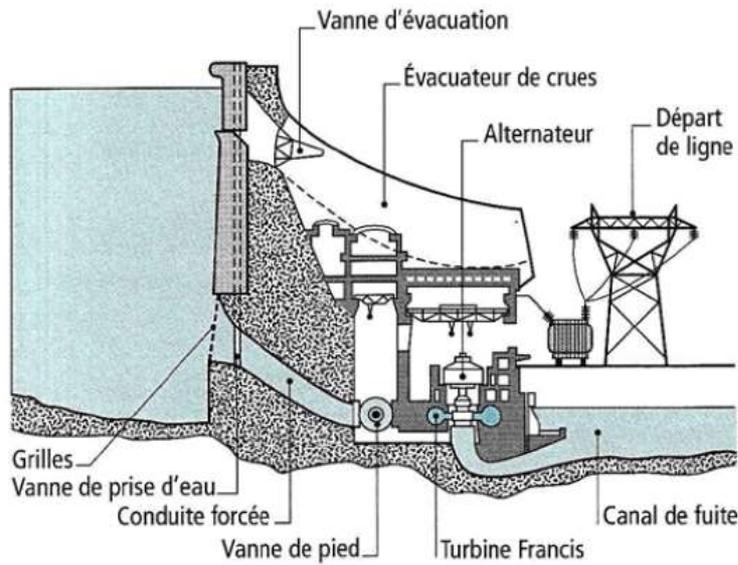
Elles sont situées en montagne. L'alimentation en eau des turbines s'effectue grâce à une conduite forcée. L'énergie produite par ces centrales sert généralement aux heures de pointe, du fait de la rapidité de sa mise en production. Les turbines utilisées sont de type Pelton.



**Turbine Pelton**

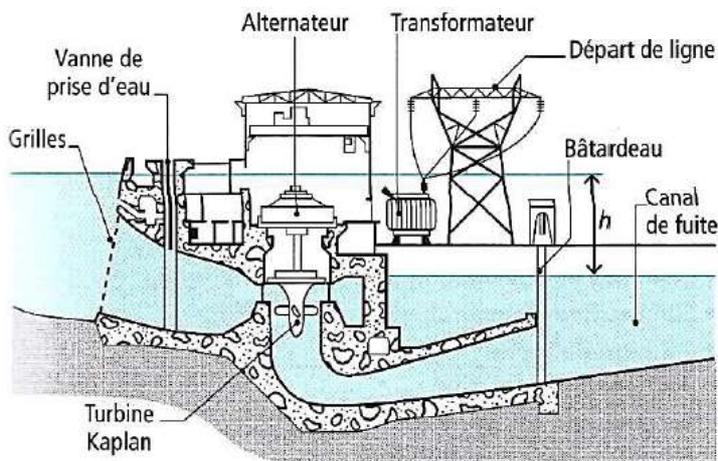
### b) LES CENTRALES DE MOYENNES CHUTES : $30\text{M} < h < 300\text{M}$

Ces centrales sont alimentées par l'eau retenue derrière un barrage construit dans le lit d'une rivière de région montagneuse. Elles comportent un réservoir de grande capacité. L'énergie produite par ces centrales sert à la régulation quotidienne ou hebdomadaire de la production. Elle utilise des turbines de types Francis.

*Turbine Francis*

### c) LES CENTRALES DE BASSES CHUTES : $h < 30M$

On les appelle aussi **centrales au fil de l'eau**. Elles sont caractérisées par une faible chute, et un débit important. Ces centrales fournissent de l'énergie en permanence. Ces centrales sont établies sur les fleuves ou les rivières à fort débit. Elles utilisent des turbines de type Kaplan.

*Turbine Kaplan*

## **Parties principales d'une centrale hydraulique:**

Une centrale hydro-électrique comporte essentiellement:

### **1. BARRAGE**

Les barrages de retenue sont établis en travers du lit des rivières ils servent à concentrer les chutes près des usines et à former des réservoirs d'emmagasinement. On peut ainsi créer des réserves d'eau pour compenser l'insuffisance de débit pendant les périodes de sécheresse et assurer à l'usine une alimentation en eau plus uniforme.

Les barrages peuvent être en béton, en enrochement ou en terre. Les barrages du type poids sont les plus utilisés, ils s'opposent à la poussée des eaux par leur masse même.

### **2. CONDUITE D'AMENEE**

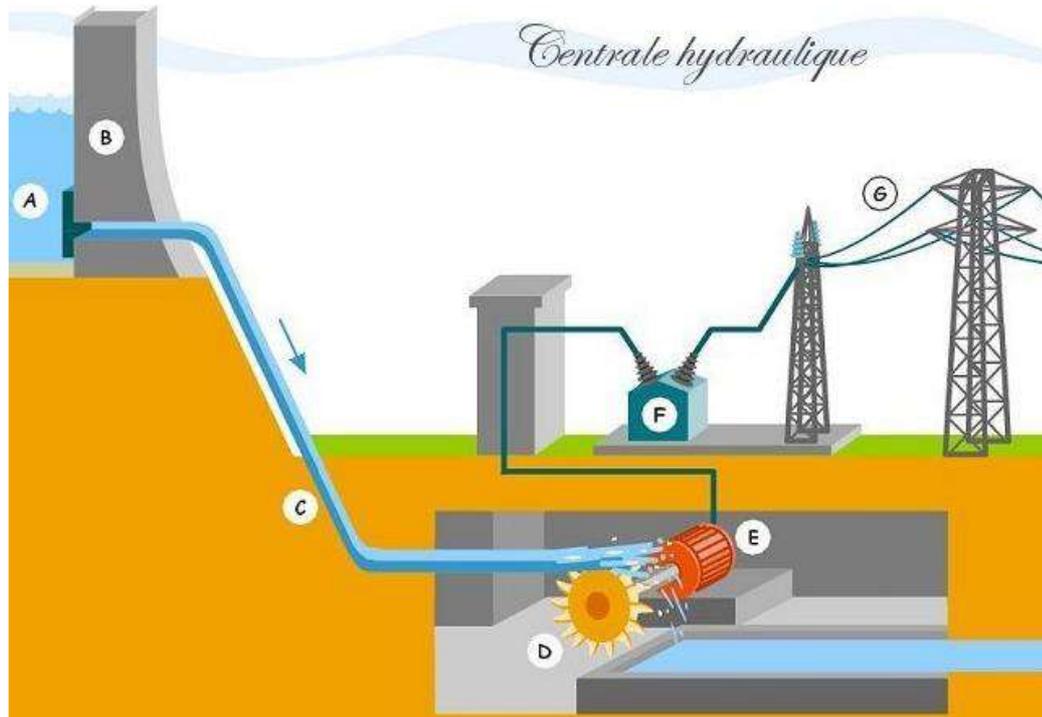
Elle conduit l'eau du barrage jusqu'au turbines. A l'extérieur de l'usine, elle est constituée par un canal, un tunnel ou un tuyau, la partie intérieure appelée conduite forcée est en béton, en acier ou en fonte. On dispose à l'entrée de la conduite forcée, des vannes qui permettent de contrôler l'admission de l'eau. Ces vannes sont commandées par le régulateur de vitesse.

### **3. CONDUITE D'ECHAPPEMENT**

Après être passée dans les turbines, l'eau retourne dans la rivière par la conduite d'échappement. Cette dernière comporte une cheminée de succion et un canal de fuite qui peut être le lit même de la rivière.

### **4. SALLE DE COMMANDE**

Les appareils de commande et de contrôle sont groupés ensemble dans une salle d'où le personnel peut surveiller la marche des groupes générateurs.



**A** : Retenue d'eau

**B** : Vanne (ouverture / Fermeture)

**C** : Conduite forcée (conduite d'amène)

**D** : Turbine

**E** : Alternateur

**F** : Transformateur

**G** : Lignes à Haute Tension

## AVANTAGES ET INCONVENIENTS

### ➤ AVANTAGES

- ✓ Usage de ressources renouvelables, sans émission de gaz à effet de serre pour la production d'électricité
- ✓ Forte réactivité (Démarrage en quelques secondes)
- ✓ Longue durée de vie (plus de 50 ans)
- ✓ Coût de production d'électricité faible

### ➤ INCONVENIENTS

- ✓ Raréfaction des sites exploitables (contraintes géographiques)

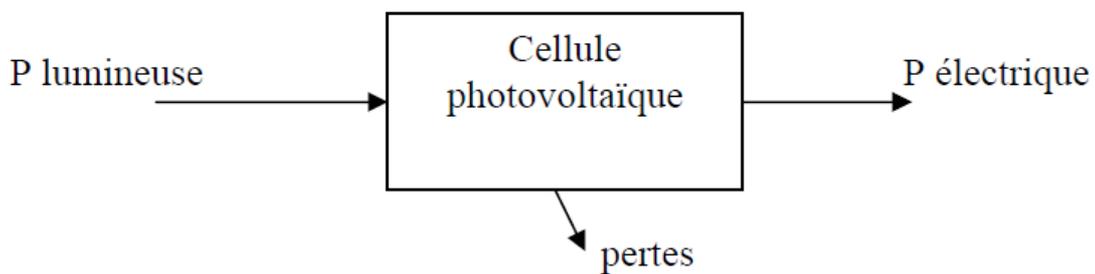
- ✓ Acceptabilité sociale potentiellement complexe (impact sur la continuité écologique des cours d'eau)
- ✓ Production d'électricité fatale pour les centrales sans stock

---

## CENTRALES PHOTOVOLTAÏQUES

### Principe

L'énergie solaire photovoltaïque est une forme d'énergie renouvelable. Elle permet de produire de l'électricité par transformation d'une partie du rayonnement solaire grâce à une **cellule photovoltaïque**.



### Définitions

#### 1- Cellules, panneaux et champs photovoltaïques

La **cellule photovoltaïque** est l'unité de base qui permet de convertir l'énergie lumineuse en énergie électrique.

Un **panneau photovoltaïque** est formé d'un assemblage de cellules photovoltaïques. Parfois, les panneaux sont aussi appelés **modules photovoltaïques**.

Lorsqu'on regroupe plusieurs panneaux sur un même site, on obtient un **champ photovoltaïque**.



cellule



panneau



champ

## 2- Puissance lumineuse et éclairage

L'**éclairage** caractérise la puissance lumineuse reçue par unité de surface. Il s'exprime en  $W/m^2$ . La grandeur associée à l'éclairage est notée **G**

Parfois, cette grandeur est aussi appelée **irradiance**.

Signalons que l'irradiation solaire dépend de:

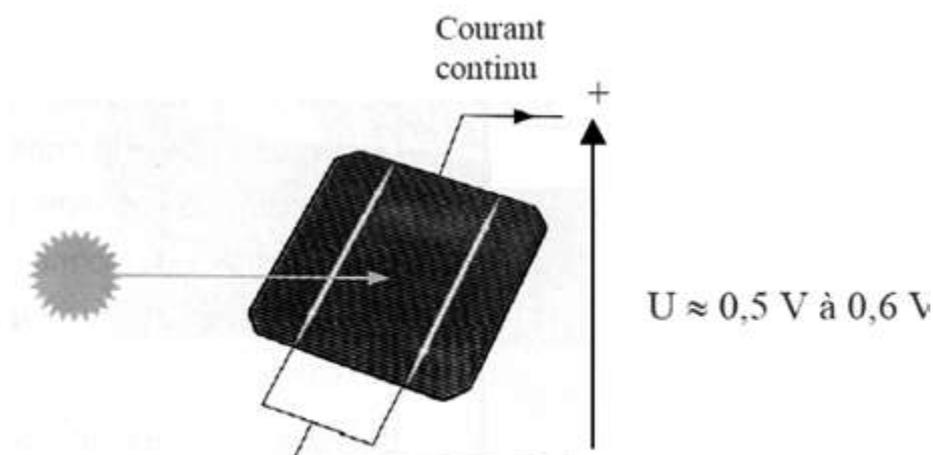
- ✓ l'orientation et l'inclinaison de la surface,
- ✓ la latitude du lieu et son degré de pollution,
- ✓ la période de l'année,
- ✓ l'instant considéré dans la journée,
- ✓ la nature des couches nuageuses.

### Principe d'une cellule photovoltaïque

L'effet photovoltaïque est la création d'une force électromotrice liée à l'absorption d'énergie lumineuse dans un solide.

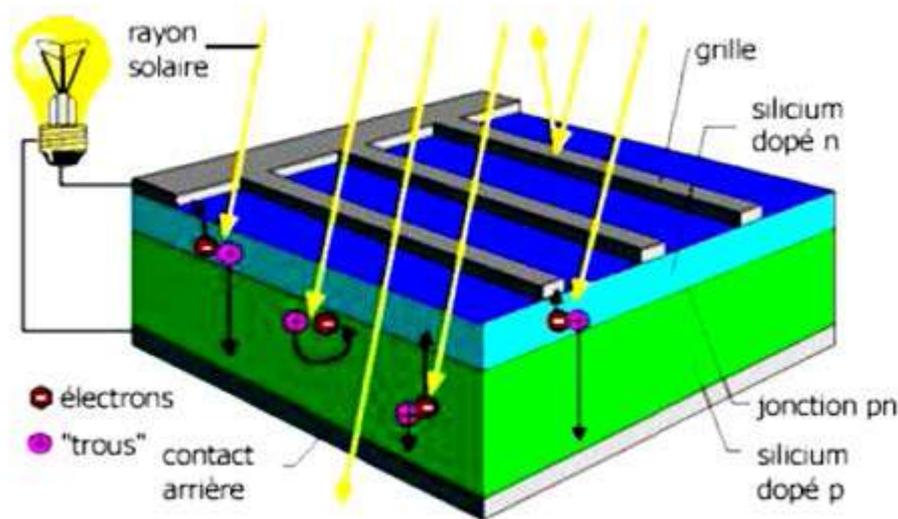
C'est le seul moyen connu actuellement pour convertir directement la lumière en électricité.

La cellule photovoltaïque constitue l'élément de base des panneaux solaires photovoltaïques, il s'agit d'un dispositif semi-conducteur à base de silicium délivrant une tension de l'ordre de 0,5 à 0,6 V.



La cellule photovoltaïque est fabriquée à partir de deux couches de silicium (matériau semi-conducteur):

- ✓ Une couche dopée avec du bore qui possède moins d'électrons que le silicium, (05 é dont 03 CP), cette zone est donc dopée positivement (zone P),
- ✓ Une couche dopée avec du phosphore qui possède plus d'électrons que le silicium (15 é dont 05 CP), cette zone est donc dopée négativement (zone N).



Lorsqu'un photon de la lumière arrive, son énergie crée une rupture entre un atome de silicium et un électron, modifiant les charges électriques. Les atomes, chargés positivement, vont alors dans la zone P et les électrons, chargés négativement, dans la zone N. Une différence de potentiel électrique, c'est-à-dire une tension électrique, est ainsi créée. C'est ce qu'on appelle l'effet photovoltaïque

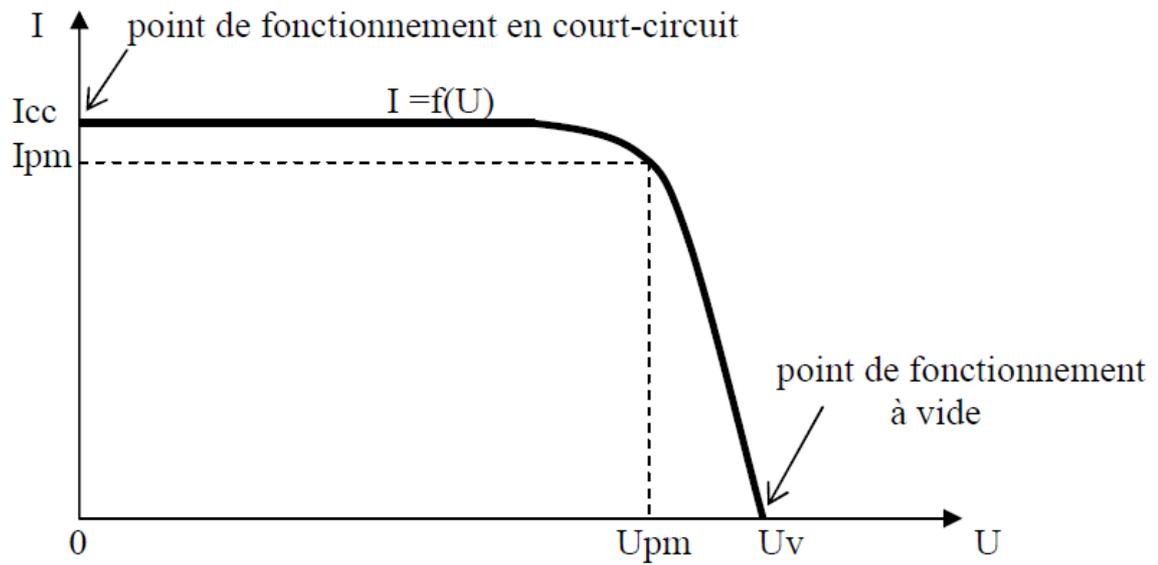
A la surface, le contact électrique (électrode négative) est établi par la grille afin de permettre à la lumière du soleil de passer à travers les contacts et de pénétrer dans le silicium.

Les cellules solaires sont recouvertes d'une couche antireflet qui protège la cellule et réduit les pertes par réflexion. C'est une couche qui donne aux cellules solaires leur aspect bleu foncé.

## Caractéristiques électriques d'une cellule

### 1- Caractéristiques courant / tension

A température et éclairement fixés, la caractéristique courant / tension d'une cellule a l'allure suivante :



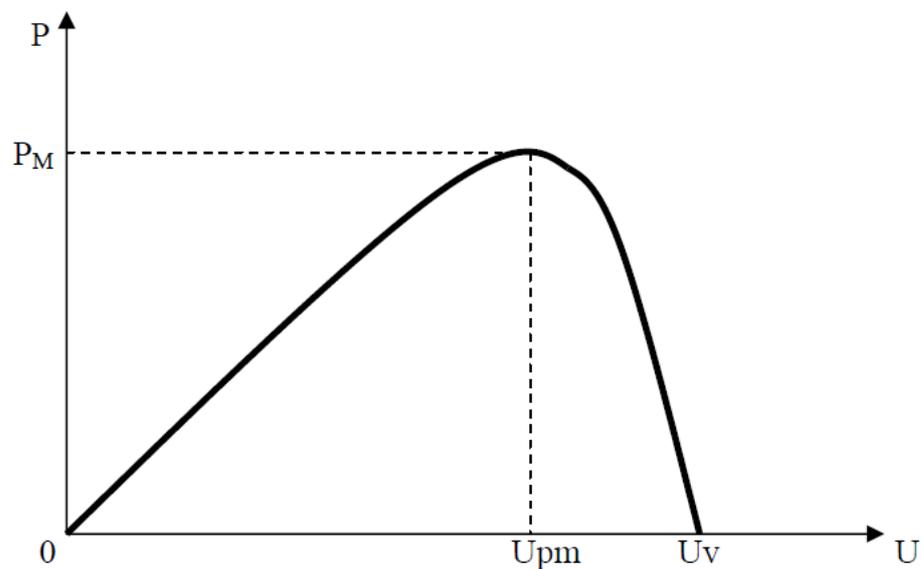
Sur cette courbe, on repère :

- ✓ le point de fonctionnement à vide :  $U_v$  pour  $I = 0A$
- ✓ le point de fonctionnement en court-circuit :  $I_{cc}$  pour  $U = 0V$

## 2- Caractéristiques puissance / tension

La puissance délivrée par la cellule a pour expression  $P = U.I$ . Pour chaque point de la courbe précédente, on peut calculer la puissance  $P$  et tracer la courbe  $P = f(U)$ .

Cette courbe a l'allure suivante :

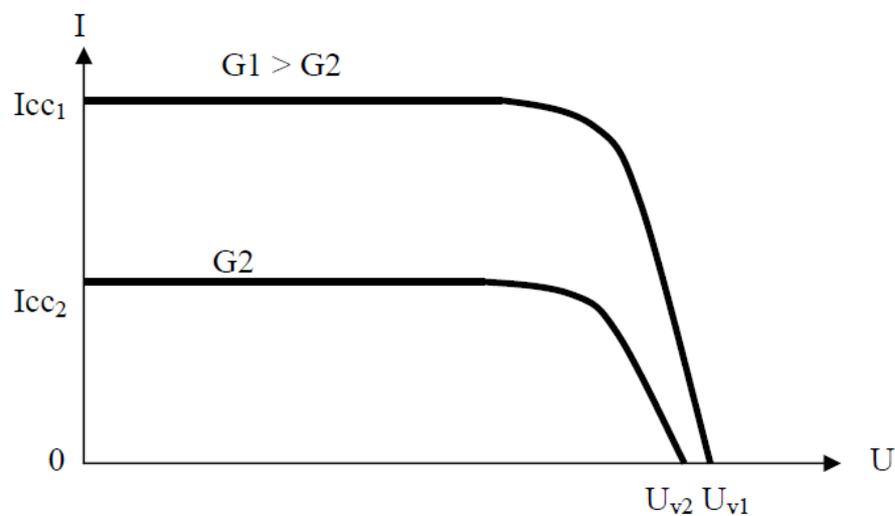


Cette courbe passe par un maximum de puissance (PM).

A cette puissance correspond, une tension  $U_{pm}$  et un courant  $I_{pm}$  que l'on peut aussi repérer sur la courbe  $I = f(U)$ .

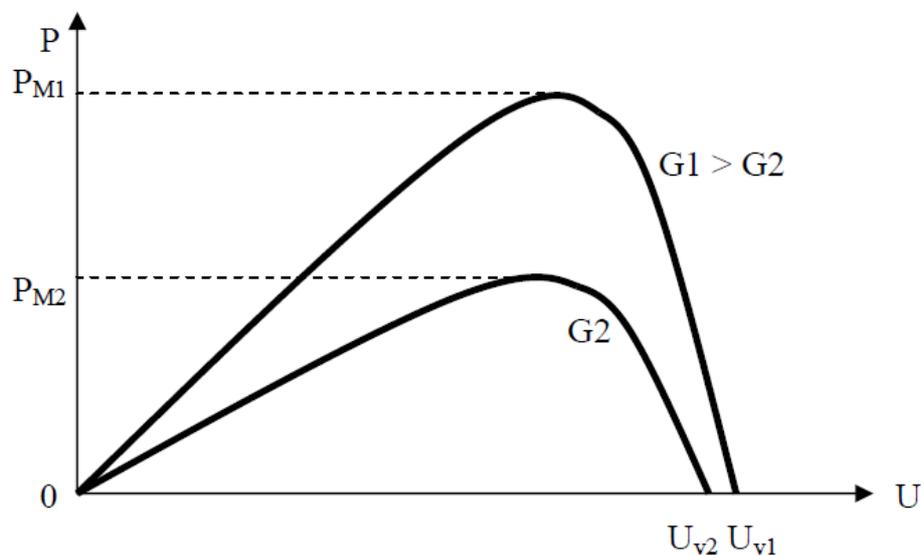
### 3- Influence de l'éclairement

A température constante, la caractéristique  $I = f(U)$  dépend fortement de l'éclairement :



Sur cette courbe, on remarque que le courant de court-circuit augmente avec l'éclairement alors que la tension à vide varie peu.

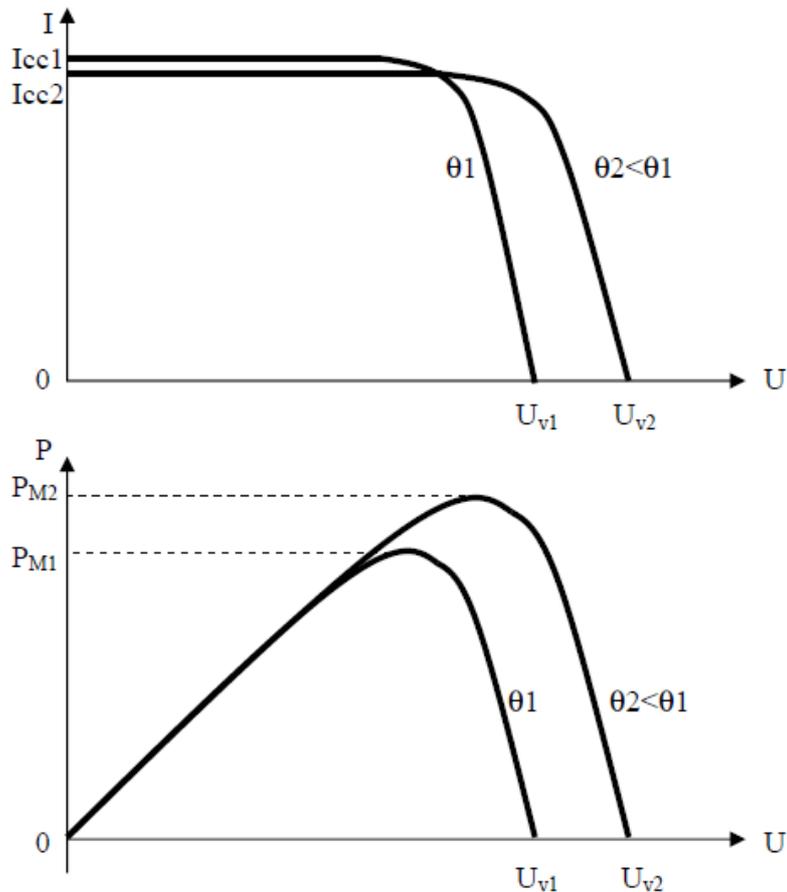
A partir de ces courbes, on peut tracer les courbes de puissance  $P = f(U)$  :



Sur ces courbes, on remarque que la puissance maximum délivrée par la cellule augmente avec l'éclairement.

#### 4- Influence e la température

Pour un éclairement fixé, les caractéristiques  $I = f(U)$  et  $P = f(U)$  varient avec la température de la cellule photovoltaïque :



Sur ces courbes, on remarque que la tension à vide et la puissance maximum diminuent lorsque la température augmente.

#### 5- Définition de la puissance de crête

La puissance crête d'une installation photovoltaïque est la puissance maximale délivrée par un module dans les conditions optimales (orientation, inclinaison, ensoleillement,...). Elle s'exprime en Watt crête (Wc).

En première approximation, on estime qu'un module de 1 mP2P produit 100 Wc.

## Groupements De Cellules (Module Solaire Ou Photovoltaïque)

### 1- Principe

On peut grouper les cellules en série ou en parallèle.

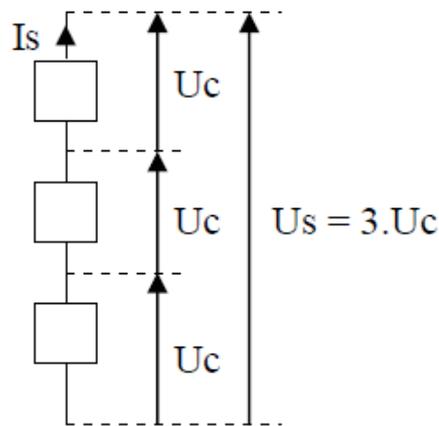
✓ Le **groupement série** permet d'augmenter la tension de sortie. Pour un groupement de n cellules montées en série la tension de sortie  $U_s$  a pour expression générale :

$$U_s = n \cdot U_c$$

Avec ;  $U_c$  : tension fournie par une cellule

Pour ce groupement, le courant est commun à toutes les cellules.

Exemple : groupement e 3 cellules en série



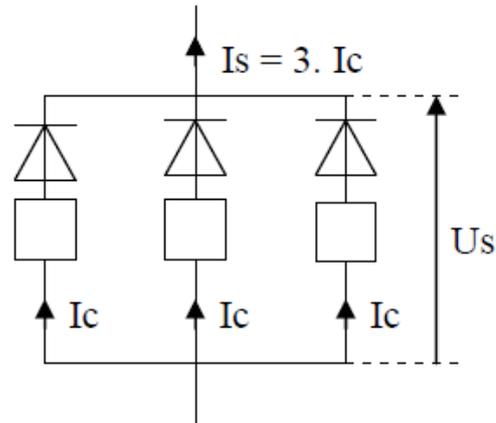
✓ Le **groupement en parallèle** permet d'augmenter le courant de sortie. Pour un groupement de n cellules montées en parallèle, le courant de sortie  $I_s$  a pour expression générale :

$$I_s = n \cdot I$$

Avec ;  $I$  : courant fourni par une cellule

Pour ce groupement, la tension est commune à toutes les cellules.

Exemple : groupement de 3 cellules en parallèle

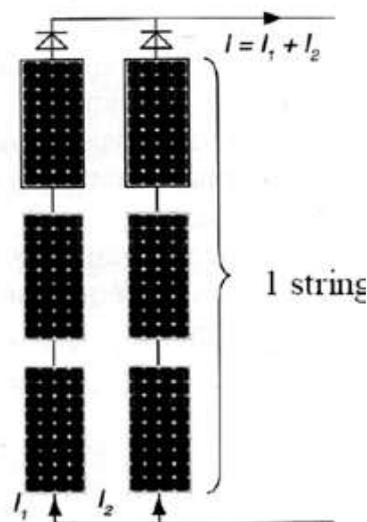


Pour éviter que les cellules ne débitent les unes sur les autres, on ajoute des diodes anti-retour.

### Constitution D'un Champ Photovoltaïque

Afin d'obtenir la tension nécessaire à l'onduleur, les panneaux sont connectés en série. Ils forment alors une chaîne de modules ou string.

Les chaînes sont ensuite associées en parallèle et forment un champ photovoltaïque (champ PV).



Il faut également installer des diodes ou des fusibles en série sur chaque chaîne de modules.

## Les Différentes Installations Photovoltaïques

### 1. Les Installations Sur Site Isolé

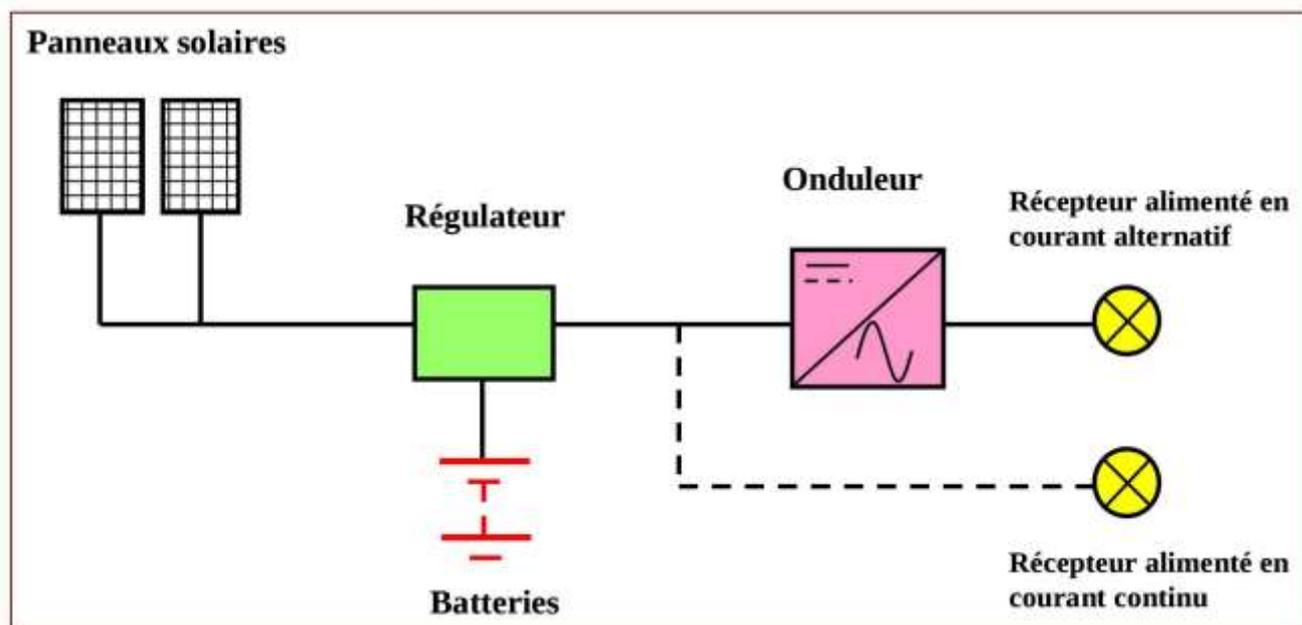
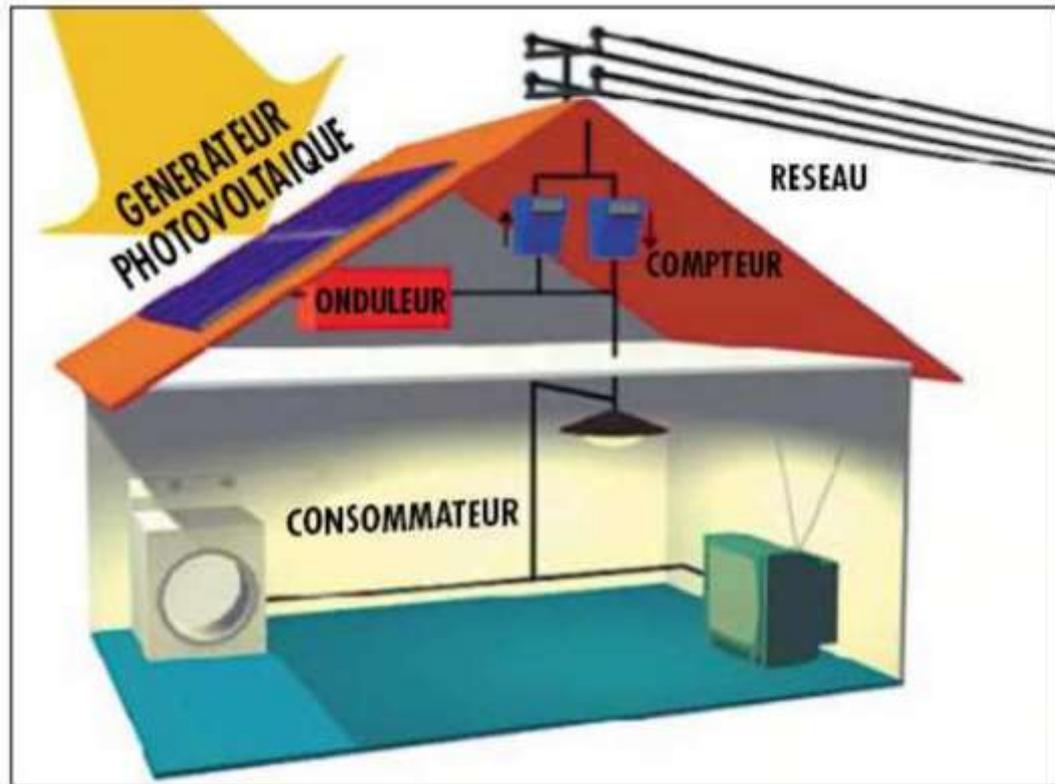


Schéma de principe

L'énergie produite doit être directement consommée et/ou stockée dans des accumulateurs pour permettre de répondre à la totalité des besoins.

- ✓ *Les panneaux photovoltaïques* produisent un courant électrique continu.
- ✓ *Le régulateur* optimise la charge et la décharge de la batterie suivant sa capacité et assure sa protection.
- ✓ *L'onduleur* transforme le courant continu en alternatif pour alimenter les récepteur AC.
- ✓ *Les batteries* sont chargées de jour pour pouvoir alimenter la nuit ou les jours de mauvais temps.
- ✓ *Des récepteurs DC* spécifiques sont utilisables. Ces appareils sont particulièrement économes.

## 2. les Installations Raccordée au Réseau de Distribution public



Pour ce type de site, le champ photovoltaïque est connecté au réseau par l'intermédiaire d'un onduleur. Le particulier peut revendre tout ou partie de l'électricité qu'il produit. Dans ce cas, il n'est pas nécessaire d'installer de batteries de stockage de l'énergie produite.

### ➤ *Solution avec injection totale*

Toute l'énergie électrique produite par les capteurs photovoltaïques est envoyée pour être revendue sur le réseau de distribution.

### ➤ *Solution avec injection de surplus*

Cette solution est réalisée avec le raccordement au réseau public en un point : l'utilisateur consomme l'énergie qu'il produit avec le système solaire et l'excédent est injecté dans le réseau.

Quand la production photovoltaïque est insuffisante, le réseau fournit l'énergie nécessaire.

---

## Avantages Et Inconvénients

### 1. Avantages

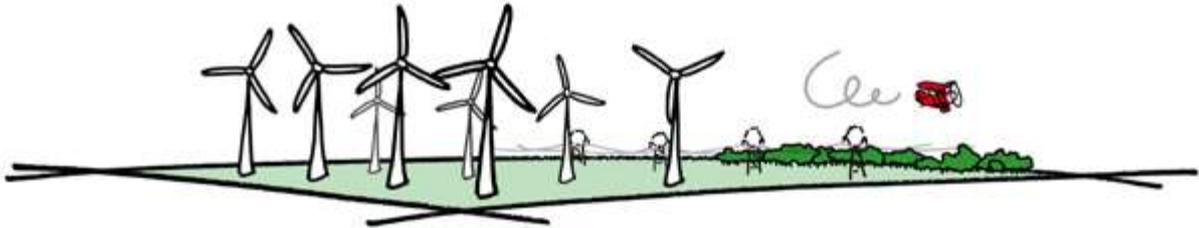
- ✓ Energie indépendante, le combustible (le rayonnement solaire) est renouvelable et gratuit.
- ✓ L'énergie photovoltaïque est une énergie propre et non-polluante qui ne dégage pas de gaz à effet de serre et ne génère pas de déchets.
- ✓ Génère l'énergie requise.
- ✓ Réduit la vulnérabilité aux pannes d'électricité.
- ✓ L'extension des systèmes est facile, la taille d'une installation peut aussi être augmentée par la suite pour suivre les besoins de la charge.
- ✓ La revente du surplus de production permet d'amortir les investissements voir de générer des revenus.
- ✓ Entretien minimal.
- ✓ Aucun bruit.

### 2. Inconvénients

- ✓ La fabrication des panneaux photovoltaïques relève de la haute technologie demandant énormément de recherche et développement et donc des investissements coûteux.
- ✓ Les rendements des panneaux photovoltaïques sont encore faibles.
- ✓ Nécessite un système d'appoint (batteries) pour les installations domestiques.
- ✓ Le coût d'investissement sur une installation photovoltaïque est cher.

---

## CENTRALES EOLIENNES



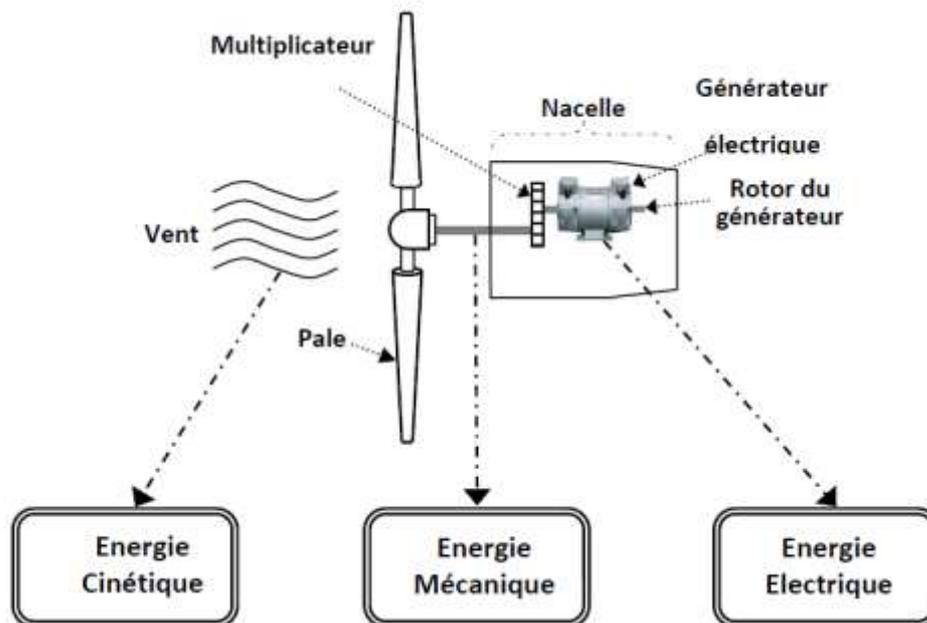
### 1. Introduction

L'énergie éolienne est produite par la force exercée par le vent sur les pales d'une hélice. Il est possible ainsi de produire deux sortes d'énergies.

Premièrement, l'hélice peut se relier à des systèmes mécaniques servant à moulin le grain ou à pomper l'eau (il s'agit du principe des moulins à vent).

Il est aussi possible de rattacher l'hélice à un générateur transformant l'énergie mécanique en énergie électrique.

La quantité d'énergie produite dépend en premier lieu de la vitesse du vent élevé au carré, puis de la surface balayée par les pales et de la densité de l'air.



Conversion de l'énergie cinétique du vent.

## 2. Les différents types d'éoliennes

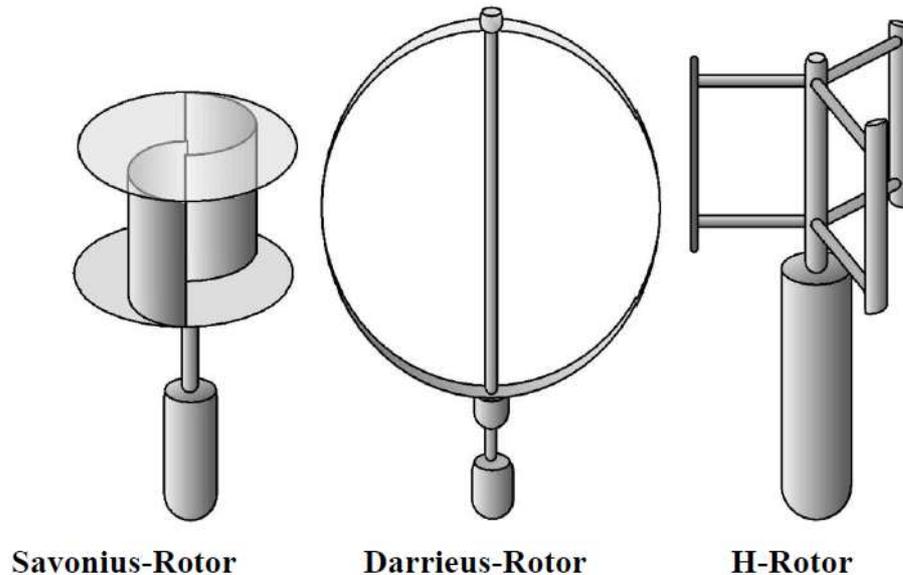
Les solutions techniques permettant de recueillir l'énergie du vent sont très variées.

Deux grandes familles d'éoliennes existent : les **éoliennes à axe vertical** et celles à **axe horizontal**.

### a. Turbines éoliennes à axe vertical (VAWT)

Ce type d'éolienne se distingue par un axe de rotation vertical par rapport au sol et perpendiculaire à la direction du vent. La conception verticale offre l'avantage de mettre le multiplicateur et la génératrice directement au sol, ce qui rend la maintenance du système plus simple et donc économique, néanmoins cette solution impose que l'éolienne fonctionne avec un vent proche du sol, moins fort qu'en hauteur car freiné par le relief.

De par son axe vertical, il y a symétrie de révolution et le vent peut provenir de toutes les directions sans avoir à orienter le rotor. Par contre, ce type d'éolienne ne peut pas démarrer automatiquement, il faut la lancer dès l'apparition d'un vent suffisamment fort pour permettre la production.



### Exemples de turbines éoliennes à axe vertical.

En ce qui concerne leur implantation, elles ont une emprise au sol plus importante que les éoliennes à tour car elles sont haubanées sur de grandes distances. En effet, les câbles des haubans doivent passer au dessus des pales. Cela représente un inconvénient majeur pour une implantation sur un site agricole par exemple.

Tous ces inconvénients alliés à la faible efficacité de la conversion d'énergie ont fortement limités le développement de ces éoliennes, laissant place aux aérogénérateurs à axe horizontal.

### Avantages Et Inconvénients De L'éolienne A Axe Vertical

- ✓ Générateur au sol
- ✓ Structure / construction simplifiée
- ✓ Peu bruyantes, plus petites et esthétiques
- ✓ Résistance forte aux variations climatiques
- ✓ Démarrage à faible vitesse (Savonius)
- ✓ Rendement faible
- ✓ Masse non négligeable

## **b. Turbines éoliennes à axe horizontal (HAWT)**

C'est de loin la structure la plus répandue de par sa faible emprise au sol et son efficacité énergétique.

Ces éoliennes sont basées sur la technologie ancestrale des moulins à vent. Elles sont constituées de plusieurs pales profilées aérodynamiquement à la manière des ailes d'avion.

Dans ce cas, la portance n'est pas utilisée pour maintenir un avion en vol mais pour générer un couple moteur entraînant la rotation. Le nombre de pales utilisé pour la production d'électricité varie classiquement entre 1 et 3, le rotor tripale étant le plus utilisé car il constitue un compromis entre le coefficient de puissance, le coût et la vitesse de rotation du capteur éolien.

Ces éoliennes captent le vent en hauteur et loin du sol ; à cette hauteur le vent est beaucoup moins ralenti par le relief. A dimension d'hélice identique, on pourra produire plus de puissance par le biais de cette structure par rapport aux éoliennes à axe vertical.

Un autre avantage, et non des moindres, est l'emprise au sol qui est très faible par rapport aux éoliennes à axe vertical. Ici, seule la tour occupe de la place au sol et contient généralement tous les systèmes de raccordement. Ainsi il n'est pas nécessaire de rajouter un local électrique et l'emprise au sol est vraiment minimale. Les concepts abordés dans la suite de cette étude se limiteront uniquement au cas des éoliennes à axe horizontal.

### **Avantages Et Inconvénients De L'éolienne A Axe Horizontal**

- ✓ Stabilité de la structure
- ✓ Bon rendement
- ✓ Bruyantes, peu esthétiques

L'éolienne à axe horizontal est pourtant beaucoup plus courante. C'est pourquoi nous expliquons son fonctionnement en détail.

### 3. Composants D'une Eolienne A Axe Horizontal

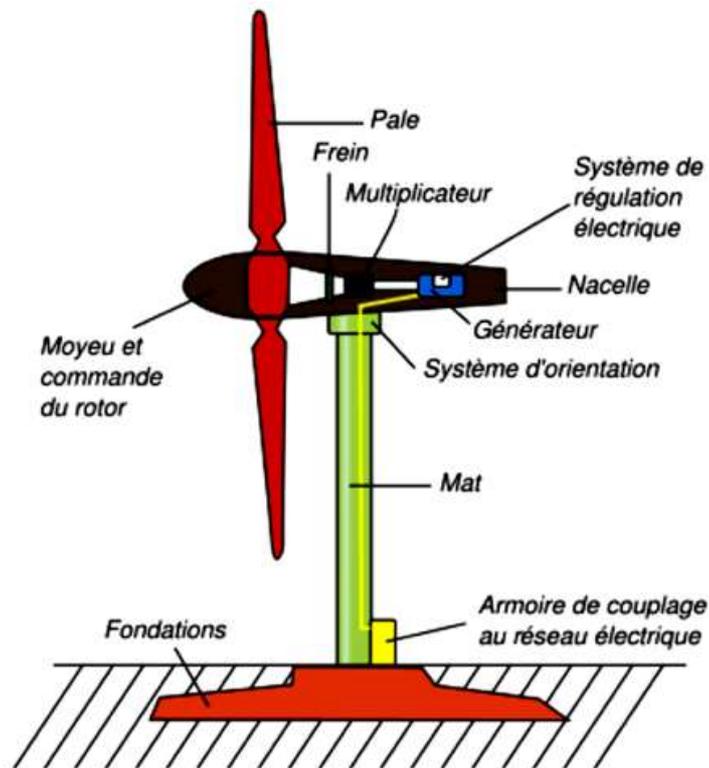
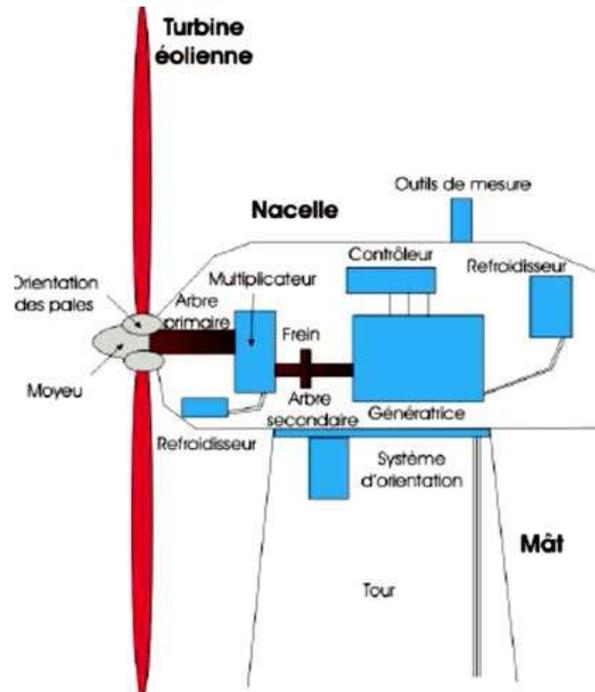


Schéma d'une éolienne de type aérogénérateur

**Des fondations :** Elles assurent l'ancrage et la stabilité de l'éolienne. Leur taille est proportionnelle à la hauteur de l'éolienne. Dans le cas des éoliennes les plus connues, la fondation nécessite environ 2000 tonnes de béton.

**Du mât (ou tour) :** Il est généralement en métal, il supporte l'ensemble des équipements permettant de produire l'électricité (nacelle + rotor).

Aujourd'hui, les mâts atteignent environ 80 m de haut. Si les éoliennes sont si haut perchées dans le ciel, c'est parce que le vent souffle plus fort en hauteur et elles ne subissent pas la conséquence de différents obstacles, donc c'est à cette hauteur que le rapport coût/rentabilité est le plus conséquent. Il faut également savoir que la puissance fournie par une éolienne est proportionnelle au cube de la vitesse du vent.



**De la nacelle :** Elle abrite les équipements qui produisent l'électricité à partir de la rotation de l'axe du rotor, qu'on appelle aussi « arbre ». Le transport de l'électricité produite dans la nacelle jusqu'au sol est assuré par des câbles électriques descendant à l'intérieur du mât de l'éolienne.

- **Le système d'orientation :** C'est une couronne dentée équipée d'un moteur qui permet d'orienter l'éolienne et de la verrouiller dans l'axe du vent grâce à un frein. Il a donc pour but de disposer les pales face au vent.

- **Le générateur :** il assure la production électrique. Sa puissance peut atteindre jusqu'à 5 MW. Il peut-être une dynamo (produit du courant continu) ou un alternateur (produit du courant alternatif). L'alternateur est le plus utilisé pour des raisons de coût et de rendement.

- **Le système de régulation électrique :** Il ralentit le rotor du générateur en cas de surrégime.

- **Le multiplicateur :** Le multiplicateur est un convertisseur de puissance : il multiplie la vitesse d'entrée (rotor de l'éolienne) pour atteindre la vitesse de sortie exigée par la génératrice électrique, en multipliant parfois par 70 la vitesse de rotation initiale. Il est constitué d'un assemblage d'engrenages.

- **Le frein :** Il permet de freiner l'arbre primaire (l'arbre qui relie les pales au multiplicateur) en cas de vents violents.

**Du rotor :** composé de plusieurs pales (en général trois) et du nez de l'éolienne

- **Les pales :** Elles sont les capteurs de l'énergie cinétique qui transmettent l'énergie au rotor. Elles sont en fibres de verre et matériaux composites. Leur profil est le fruit d'études aérodynamiques complexes.
- **Le moyeu :** Il permet d'orienter les pales pour réguler la vitesse de rotation.

Il existe aussi au sein d'une éolienne : un système de refroidissement à air, à eau ou à huile destiné au générateur et au multiplicateur ainsi qu'un système de contrôle électronique servant à gérer le fonctionnement général de l'éolienne.

#### 4. Critères de choix de sites Eoliens

Les critères de choix de l'implantation éolienne dépendent de:

- ✓ la taille
- ✓ la puissance
- ✓ et du nombre d'unités.

Ils incluent la présence d'un vent régulier et diverses conditions telles que :

- ✓ présence d'un réseau électrique pour recueillir le courant,
- ✓ absence de zones d'exclusion (dont périmètre de monuments historiques, sites classés..),
- ✓ terrain approprié, etc.

L'efficacité d'une éolienne dépend de son emplacement.

Les sites sont d'abord choisis en fonction de la vitesse et la fréquence des vents présents.

Un site avec des vents d'environ 30 km/h de moyenne sera environ huit fois plus productif qu'un autre site avec des vents de 15 km/h de moyenne.

Une éolienne fonctionne d'autant mieux que les vents sont réguliers et fréquents.

---

Un autre critère important pour le choix du site est la constance de la vitesse et de la direction du vent, autrement dit la turbulence du vent.

En règle générale, les éoliennes sont utilisables quand la vitesse du vent est comprise entre 10 et 30 km/h,

Des valeurs excessives conduiraient à la destruction de l'éolienne ou à la nécessité de la « débrayer » (pâles en drapeau) pour en limiter l'usure.

La vitesse du vent doit donc être comprise le plus souvent possible entre ces deux valeurs pour un fonctionnement optimal de l'éolienne.

De même, l'axe de rotation de l'éolienne doit rester la majeure partie du temps parallèle à la direction du vent.

Même avec un système d'orientation de la nacelle performant, il est donc préférable d'avoir une direction de vent la plus stable possible pour obtenir un rendement optimal.

Certains sites proches de grands obstacles sont à éviter car le vent y est trop turbulent (arbres, bâtiments, escarpements complexes, etc.).

Les implantations industrielles utilisent des cartes de la vitesse des vents des atlas éoliens (là où ils existent) ou des données accumulées par une station météorologique proche.

La mer et les lacs sont aussi des emplacements de choix : il n'y a aucun obstacle au vent, et donc, même à basse altitude, les vents ont une vitesse plus importante et sont moins turbulents.

D'autres critères sont pris en compte pour le choix du site.

- ✓ **La nature du sol** : il doit être suffisamment résistant pour supporter les fondations de l'éolienne.
- ✓ **L'accessibilité du site** (virages, pente, passage de ponts) doit permettre le transport des gros éléments de l'éolienne (pâles, tour, nacelle) et des grues nécessaires au montage. Cette contrainte peut limiter la puissance maximale installable par machine.
- ✓ **La connexion au réseau électrique.** Pour cela, les petites fermes d'éoliennes sont le plus souvent situées à proximité d'un poste de transformation haute tension afin de diminuer le coût de raccordement qui est directement fonction de la distance à

ce poste. Pour les grosses fermes éoliennes, le réseau doit être en mesure de supporter l'énergie produite, et son renforcement est parfois nécessaire (renforcement ou création de poste de transformation).

## 5. Calculer la Puissance Electrique Produite

La puissance dépend donc **de la vitesse, de la surface des pales** (qui doivent être face au vent) mais aussi d'autres paramètres structuraux qui soulignent l'importance portée à la qualité de la conception de l'éolienne, notamment son rotor (orientable).

$$P_{produite} = \frac{1}{2} C_P \cdot \rho_{air} \cdot S_{pales} \cdot V_{vent}^3$$

$C_P$  : Coefficient de puissance

$\rho_{air}$ : masse volumique de l'air 1,225 kg/m<sup>3</sup>

$S_{pales}$  : surface balayée par les pales A est l'aire du disque rotor

$V_{vent}$  : vitesse du vent en m/s

$P_{produite}$  : est la puissance recuperee par l'eolienne

## 6. Principaux Systèmes de Sécurité des Eoliennes

Les éoliennes implantées sur le site seront équipées des dernières technologies en matière de sécurité.

### 6.1. Système de balisage

Les éoliennes sont équipées de feux de signalisation diurne et nocturne. Ce type de balisage aéronautique présente moins d'impact visuel que de peindre en rouge le bout des pales, comme cela se fait dans quelques pays européens.

#### Le balisage lumineux de jour :

- feux d'obstacle de moyenne intensité de type A (feux à éclats blancs) ;
- visibilité de l'éolienne dans tous les azimuts (360°).

#### Le balisage lumineux de nuit :

- feux d'obstacle de moyenne intensité de type B (feux à éclats rouges) ;
- visibilité de l'éolienne dans tous les azimuts (360°).

## 6.2 Système de sécurité en cas de vents violents

A partir d'une certaine vitesse de vent, ou lors de rafales violentes, les éoliennes disposent d'un système d'arrêt automatique. Cet arrêt est réalisé par le frein aérodynamique de l'éolienne par les dispositifs d'inclinaison des pales (Pitch) qui peuvent décrocher les pales du vent en l'espace de quelques secondes seulement en les mettant en position drapeau.

## 6.3 Système de sécurité contre la foudre

Les éoliennes sont équipées d'un système parafoudre fiable afin d'éviter que l'éolienne ne subisse de dégâts. L'extérieur de l'éolienne est composé de profilé en aluminium à des endroits stratégiques. Un coup de foudre est absorbé en toute sécurité par ces profilés et le courant de foudre est dévié vers la terre entourant la base de l'éolienne. A l'intérieur de l'éolienne, les composants principaux tels que l'armoire de contrôle et la génératrice sont protégés par des parasurtenseurs.

Enfin, une liaison de communication télécom en fibre optique entre les machines permet une insensibilité à ces surtensions atmosphériques ou du réseau.

## 6.4 Système de sécurité contre les incendies

Chaque éolienne est dotée de moyens de lutte contre l'incendie appropriés aux risques et conformes aux normes en vigueur.

Tous les composants mécaniques et électriques de l'éolienne dans lesquels un incendie pourrait potentiellement se déclencher en raison d'une éventuelle surchauffe ou de court-circuit, sont continuellement surveillés par des capteurs lors du fonctionnement, et cela en premier lieu afin de s'assurer de leur bon fonctionnement. Si le système de commande détecte un état non autorisé, l'éolienne est stoppée ou continue de fonctionner mais avec une puissance réduite. Le choix des matériaux est également un aspect clé de la protection incendie, par la conception en matériaux ignifuges, difficilement, ou non inflammables pour certains composants.

Deux extincteurs manuels CO<sub>2</sub> dédiés à la protection contre l'incendie dans l'éolienne sont situés dans la nacelle et au pied du mât.

Les détecteurs de fumée et/ou les capteurs de température émettent des signaux qui sont immédiatement transmis au centre de service du constructeur par le système de surveillance à

---

distance SCADA qui alerte alors immédiatement l'exploitant, par un message SMS et/ou email, qui prévient alors les pompiers. Ces derniers décident sur place des actions à entreprendre.

Les centres de service sont disponibles 24h/24, 7j/7 et par conséquent joignable à tout moment.

Par ailleurs, l'intérieur de l'aérogénérateur sera maintenu propre et l'entreposage de matériaux combustibles ou inflammables sera interdit.

### 6.5 Système de sécurité contre la formation de glace

L'accumulation de glace alourdit les pales et modifie leur profil, ce qui diminue le rendement et peut entraîner un balourd et des vibrations sur le rotor. De plus, si la turbine est en marche, la glace peut être projetée au voisinage de la machine. Les constructeurs d'éoliennes proposent à l'heure actuelle trois systèmes de détection de formation de givre, en option, décrits ci-dessous:

- **Système de déduction de formation de glace :** Ce système déduit la formation de glace sur les pales à partir des données de température et de rendement de l'éolienne.

- **Système de détection de glace sur la nacelle :** Ce système est composé d'une sonde vibratoire installée sur la nacelle, permettant d'alerter les opérateurs dès que l'accumulation de glace dépasse un certain niveau. Ce dispositif détecte la formation de glace sur la nacelle, et donc par déduction sur les pales. Lorsqu'il y a détection, la mise à l'arrêt de la turbine est automatique ou manuelle, après vérification de la glace formée, selon le type de configuration demandé.

- **Système de détection de glace sur les pales :** Ce dispositif est constitué de capteurs de température et d'accéléromètres installés sur les pales et reliés à un serveur de collecte des données. Le dispositif est alors couplé avec le système SCADA qui met la turbine à l'arrêt en cas de détection de formation de glace sur les pales.

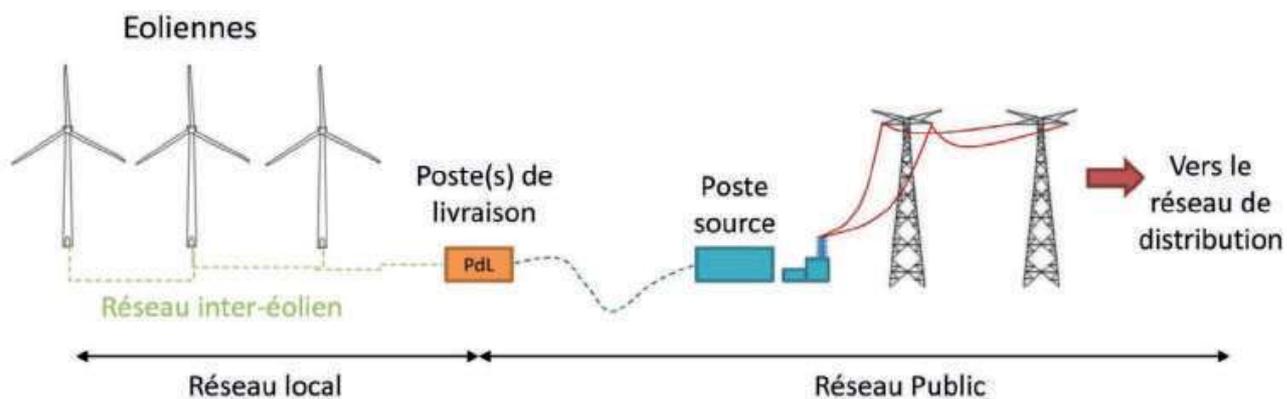
L'ensemble de ces systèmes permet de prévenir l'accumulation de glace sur les pales, et ainsi éviter les risques de projection sur des cibles éventuelles. Les procédures de redémarrage sont définies par l'exploitant.

## 6.6 Système d'arrêt d'urgence

En cas d'arrêt d'urgence, les pales sont ramenées en position dite « en drapeau » (à environ 90° par rapport à la direction de vent) par le système de sécurité. Cet état peut survenir lors de détection d'anomalies (température trop élevée sur un palier, déclenchement d'un détecteur de vibration, déclenchement du détecteur d'arc,...). C'est ce qui se produit en cas de détection de survitesse par le système de contrôle spécifique. C'est également le cas lors d'une action sur les boutons d'arrêt d'urgence.

Dans ce dernier cas, en plus de la mise en drapeau des pales, le système de frein hydraulique est actionné. Le démarrage ne peut être fait qu'en local (nécessité de déplacement sur site) après vérification de l'état de la machine.

## 7. Parc Eolien



Un parc éolien est une centrale de production d'électricité à partir de l'énergie du vent. Il est composé de plusieurs aérogénérateurs et de leurs annexes :

- **Plusieurs éoliennes** fixées sur une fondation adaptée, accompagnée d'une aire stabilisée appelée « plateforme » ou « aire de grutage »
- **Un réseau de câbles électriques** enterrés permettant d'évacuer l'électricité produite par chaque éolienne vers le poste de livraison électrique (appelé « réseau inter-éolien »)

- 
- **Un poste de livraison électrique**, concentrant l'électricité des éoliennes et organisant son évacuation vers le réseau public d'électricité au travers du poste source local (point d'injection de l'électricité sur le réseau public)
  - **Un réseau de câbles enterrés** permettant d'évacuer l'électricité regroupée au poste de livraison vers le poste source (appelé «réseau externe» et appartenant le plus souvent au gestionnaire du réseau de distribution d'électricité)
  - **Un réseau de chemins d'accès**
  - Éventuellement des éléments annexes type mât de mesure de vent, aire d'accueil du public, aire de stationnement, etc.

## 8. Avantages et Inconvénients

### 8.1 Avantages

- ✓ Usage de ressources renouvelables, sans émissions de gaz à effet de serre pour la production d'électricité
- ✓ Intermittence de production pouvant être compensée en partie par le foisonnement des régimes de vent sur le réseau.
- ✓ Conception, installation et maintenance aisée
- ✓ Coût marginal de production d'électricité très faible ("gratuité de la ressource")

### 8.2 Inconvénients

- ✓ Intermittence et caractère fatal de la production d'électricité (variabilité dans le temps et dans l'espace de la ressource)
- ✓ Incertitude dans la prévision de la ressource
- ✓ Contraintes géographiques sur les sites éligibles (topographie, obstacles, etc.)
- ✓ Acceptabilité sociale potentiellement complexe (impact paysager, biodiversité, etc.)

## **ENERGIE GEOTHERMIQUE**

### **1. Introduction**

Actuellement, le développement durable s'intéresse à d'autres filières énergétiques, plus respectueuses de l'environnement et quasiment inépuisables pour l'homme, comme la géothermie.

L'énergie géothermique est un mot composé (du grec géo = la terre et thermie = la chaleur) qui désigne l'énergie provenant de la chaleur naturelle présente dans la croûte terrestre et dans les couches superficielles de la terre.

### **2. Origine De La Géothermie**

La chaleur de la Terre provient essentiellement (90%) de la désintégration d'éléments radioactifs (uranium, thorium, potassium) présents dans les roches et du noyau terrestre qui génère un flux de chaleur vers la surface.

La chaleur produite par les réactions nucléaires varie avec la composition chimique des roches mais aussi selon l'âge des roches, raison pour laquelle les gradients géothermiques sont plus élevés dans les plates-formes jeunes.

Plus la profondeur est grande et plus la chaleur est élevée, elle augmente en moyenne de 3,3 °C tous les 100 m, mais ces valeurs peuvent être nettement supérieures dans certaines zones instables du globe et même varier de façon importante dans des zones continentales stables.

### **3. Le Gradient Géothermique**

Le Gradient géothermique ou accroissement de la température avec la profondeur varie avec:

- ✓ La composition chimique des roches (proportion en éléments radioactifs),
- ✓ Le contexte géodynamique,

- 
- ✓ La convection, si présence d'eau.
  - ✓ La variation de conductivité thermique (capacité à transférer la chaleur par conduction thermique) des couches sédimentaires.

#### 4. Le Flux Géothermique

Le Flux géothermique ou flux de chaleur est la quantité d'énergie évacuée par la Terre, exprimée par unité de surface et par unité de temps.

Le flux thermique en un point donné est obtenu en multipliant la conductivité thermique et le gradient thermique. Il dépend de la radioactivité des roches et du refroidissement de la chaleur initiale de la terre par cristallisation du noyau terrestre et il est variable suivant le contexte.

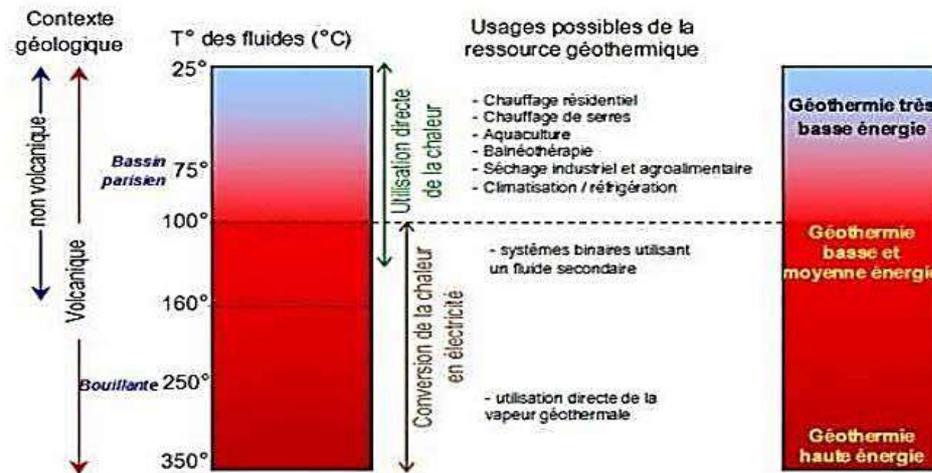
#### 5. Caractéristiques Générales de La Géothermie

La géothermie est la seule énergie renouvelable qui s'adresse aux deux grandes filières énergétiques comme illustré sur la figure 1.

- ✓ production de chaleur
- ✓ production d'électricité

Il existe trois types d'exploitation de la géothermie :

- **La géothermie très basse température** : exploite des réservoirs situés à moins de 100 m et dont les eaux ont une température inférieure à 30 °C ; on l'utilise pour le chauffage et la climatisation grâce à une pompe à chaleur.
- **La géothermie basse énergie** : utilise des aquifères à des températures comprises entre 30°C et 100°C, on l'exploite dans des réseaux de chaleur pour le chauffage urbain ou dans le cadre de procédés industriels.
- **La géothermie moyenne et haute énergie (jusqu'à 250°C)** : est utilisée pour produire de l'électricité via des turbines



### Géothermie : principaux usages en fonction du contexte géologique.

## 6. La Géothermie Moyenne et Haute Energie

Cette technologie nécessite des sols particuliers où la température est naturellement élevée ( $>150\text{ °C}$ ), c'est le cas notamment des zones volcaniques où la température de sous-sol peut augmenter de  $1000\text{ °C}/100\text{ m}$ .

La géothermie haute température consiste là encore à un doublet géothermique. A ces profondeurs, l'eau pompée est supérieure à  $200\text{ °C}$ .

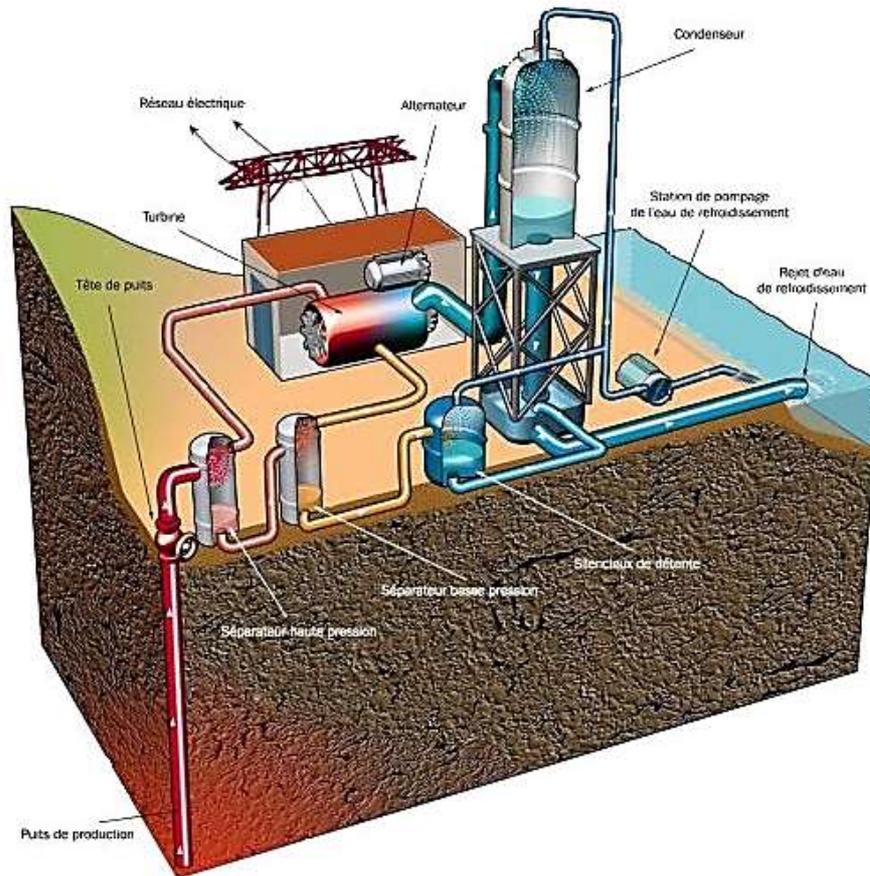


Schéma d'une centrale géothermique

## 7. Avantages et Inconvénients

### 7.1 Avantages

- Les puissances produites peuvent être importantes
- La technologie de production d'électricité est bien maîtrisée (turbine/alternateur)

### 7.2 Inconvénients

- Seules les régions volcaniques sont pour l'heure concernées par la géothermie moyenne/haute température
- Le coût des forages très élevé
- Les forages doivent être bien réfléchis pour préserver la ressource en eau souterraine et ne pas la polluer.