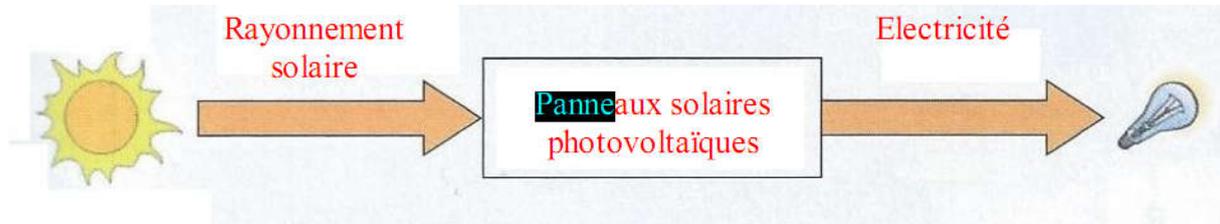


Chapitre1: Conversion électrique solaire

Introduction

Principe de l'énergie solaire photovoltaïque : transformer le rayonnement solaire en électricité à l'aide d'une cellule photovoltaïque.



Technologies des cellules et modules photovoltaïques

Cellule photovoltaïque

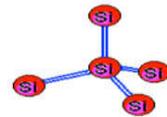
L'effet photovoltaïque a été découvert en 1839 par le physicien français Becquerel. Un panneau solaire fonctionne par l'effet photovoltaïque c'est-à-dire par la création d'une force électromotrice liée à l'absorption d'énergie lumineuse dans un solide.

Principe de fonctionnement d'une cellule.

Les matériaux semi-conducteurs :

Les matériaux semi-conducteurs sont des corps dont la résistivité est intermédiaire entre celle des conducteurs et celle des isolants. Les quatre électrons de valence du silicium permettent de former quatre liaisons covalentes avec un atome voisin.

Dans ce cas, tous les électrons sont utilisés et aucun n'est disponible pour créer un courant



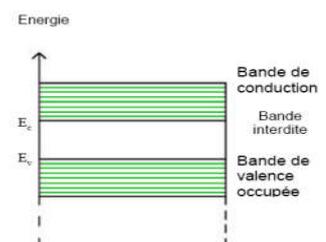
électrique.

Les semi-conducteurs intrinsèques :

Les électrons situés sur la couche la plus éloignée du noyau, qui participent aux liaisons covalentes peuvent, sous l'effet de l'agitation thermique, devenir porteur de charge.

Le diagramme énergétique est constitué de deux bandes (conduction et valence) séparé par une bande interdite. Pour franchir cette bande l'électron doit acquérir de l'énergie (thermique, photon, ...)

Mais le nombre d'électrons libres dans un semi-conducteur intrinsèque reste très faible. Ici le nombre de trou et d'électron est égal.

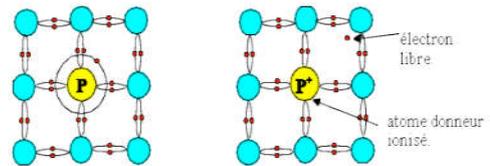


Les semi-conducteurs extrinsèques :

Pour augmenter la conductivité des semi-conducteurs on y introduit des impuretés. Ce procédé est appelé dopage.

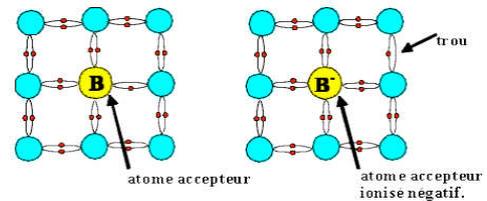
Dopage de type N :

On remplace un atome de silicium par un atome pentavalent. Quatre d'entre eux assurent les liaisons avec les atomes voisins de silicium et le cinquième resté disponible va être excité vers la bande de conduction très facilement par l'agitation thermique. D'où le nombre d'électron libre qui va fortement augmenter : dans ce cas le nombre de trou est très inférieur au nombre d'électron libre. On obtient ainsi un cristal dopé N (négatif).



Dopage de type P :

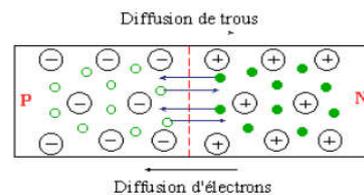
De la même façon on introduit des atomes trivalents, ses trois électrons vont assurer les liaisons covalentes avec trois atomes voisins mais laisser un trou au quatrième. Ce trou se déplace de proche en proche dans le cristal pour créer un courant. Ici le nombre de trous est très supérieur au nombre d'électrons libres du cristal intrinsèque, on obtient donc un cristal dopé P (positif), les impuretés utilisées sont souvent du Bore.



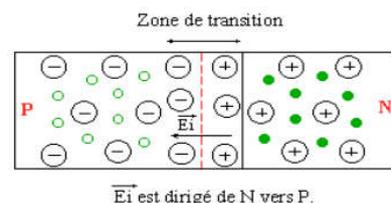
La jonction PN :

Une jonction PN est l'accolement d'une région dopé P et d'une région dopée N.

Lors de cet assemblage les porteurs de charges libres s'attirent et se recombinent dans la zone de jonction où les porteurs libres disparaissent : c'est la zone de transition.

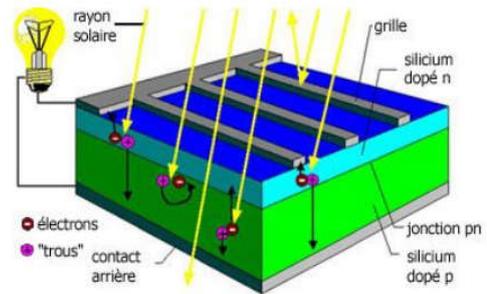


Il ne reste donc plus que les ions dans cette zone qui vont créent un champ électrique interne au niveau de la jonction et qui empêche les charges libres restantes dans chaque zone de traverser la jonction pour se recombiner.



L'effet photovoltaïque

Lorsqu'un matériau est exposé à la lumière du soleil, les photons constituant la lumière « attaquent » les atomes exposés au rayonnement. Les électrons des couches électroniques supérieures, appelés aussi électrons de valence ont tendance à être arrachés. Dans les cellules PV, une partie des électrons ne revient pas à son état initial et les électrons « arrachés » créent une tension électrique continue et faible.



Energie lumineuse :

La lumière est constituée de photons vibrant à des fréquences f et sont donc porteurs d'une énergie

$$E = h \times f$$

h est la constante de Planck ($h = 6,62 \cdot 10^{-34}$ Js)

f la fréquence de l'onde lumineuse en Hertz

E l'énergie de ce photon en Joules

Remarque : Unité couramment employée l'électron volt : Unité de mesure représentant l'énergie cinétique d'un électron, accéléré dans le vide sous une différence de potentiel de 1 Volt:

$$1 \text{ eV} = 160,217 \cdot 10^{-21} \text{ Joule} = 44,505 \cdot 10^{-24} \text{ Wh. Alors } E_{(eV)} = \frac{1,2419}{\lambda_{(\mu m)}}$$

Le flux de photons par seconde et par centimètre carré $N(\lambda)$ dépend du potentiel solaire $M(\lambda)$

Tel que $N(\lambda) = M_{\lambda} \frac{\lambda}{hc} d\lambda$ avec $N_{(\lambda)} (cm^{-2} \cdot s^{-1} \cdot \mu m^{-1})$ flux de photons

La conversion de photons en électrons dans un matériau pouvant produire un courant électrique nécessite que :

- les photons soient absorbés par le matériau (absorption optique) en transmettant leur énergie au matériau ;
- l'énergie transmise aux électrons soit une énergie potentielle et non une énergie thermique ;
- les électrons excités par les photons soient collectés avant de reprendre leur énergie initiale (relaxation), afin de fournir un courant électrique.

Module solaire

a-/ Association des cellules en série

Les caractéristiques électriques d'une seule cellule sont généralement insuffisantes pour alimenter les équipements électriques. Il faut associer les cellules en série pour obtenir une tension plus importante : le module solaire ou panneau photovoltaïque.

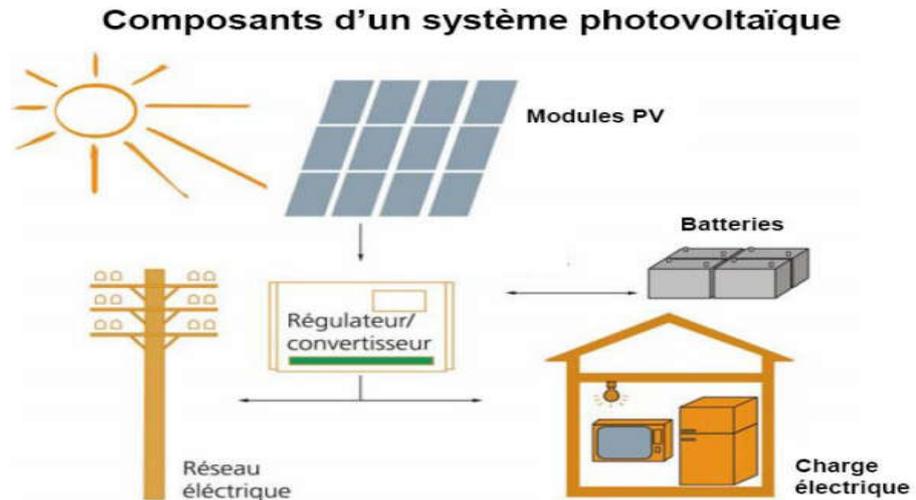
Un panneau photovoltaïque est un assemblage en série de cellules permettant d'obtenir une tension de 12 volts.

b-/ Diodes « by-pass »

La mise en série des cellules peut être dangereuse lorsque l'une d'entre elles se retrouve à l'ombre. Elle va s'échauffer et risque de se détruire.

En effet, une cellule "masquée" voit l'intensité qui la traverse diminuer. De ce fait, elle bloque la circulation de l'intensité "normale" produite par les autres modules. La tension aux bornes de cette cellule "masquée" augmente, d'où apparition d'une surchauffe.

Technologies des systèmes photovoltaïques



* **Générateur photovoltaïque** : Modules et un ensemble de composants selon l'application.

Le silicium est actuellement le matériau le plus utilisé pour fabriquer les cellules photovoltaïques. Il doit être purifié afin d'obtenir un silicium de qualité photovoltaïque.

Il se présente alors sous la forme de barres de section ronde ou carrée appelée lingots.

Les lingots sont ensuite découpés en wafers : fines plaques de quelques centaines de microns d'épaisseur. Ils sont ensuite enrichis en éléments dopants pour obtenir du silicium semi-conducteur de type P ou N.

Des rubans de métal sont alors incrustés en surface et raccordés à des contacts pour constituer des cellules photovoltaïques.

Type de cellules.

- Les cellules mono-cristallines :
- Les cellules poly-cristallines
- Les cellules amorphes (cellules de calculatrices par exemple)
- Les cellules nanocristallines

* **Batterie :**

- De type Plomb-Acier
- Fonctionnement en continue.

* **Régulateur de charge:**

Protection des batteries contre les surcharges solaires excessives et les décharges profondes.

* **Convertisseur :**

- Intercalé entre modules et utilisation.
- Conversion du DC en CC.
- Fonctionnement au maximum de puissance

Outils de mesure et d'évaluation des ressources solaire

Le luxmètre

Les luxmètres modernes fonctionnent selon le principe d'une cellule C.C.D ou cellule photovoltaïque ; un circuit intégré reçoit une certaine quantité de lumière (photons constituant le « signal » qui est une énergie de rayonnement) et la transforme en signal électrique (signal analogique). Ce signal est visualisé par le déplacement d'une aiguille, l'allumage d'une diode, l'affichage d'un chiffre...

Une photorésistance associée à un ohmmètre jouerait le même rôle.

Un filtre de correction de spectre permet d'éviter que les différences de spectre ne faussent la mesure (la lumière jaune est par exemple plus efficace que la bleue pour produire un électron à partir de l'énergie d'un paquet de photons)

Les luxmètres peuvent avoir plusieurs échelles pour s'adapter aux faibles ou fortes luminosités (jusqu'à plusieurs dizaines de milliers de lux).

Correspondance lux W/m^2

Approximation concernant l'Eclairement en W/m^2



Tableau 5 – Caractéristiques de quelques sources lumineuses [16]

Sources lumineuses	Température de couleur (K)	Grandeurs visuelles		Grandeurs énergétiques		Efficacité lumineuse (lm/W)
		Luminance ($cd \cdot m^{-2}$)	Éclairement ($lm \cdot m^{-2}$)	Luminance ($W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1}$)	Éclairement ($W \cdot m^{-2}$)	
Lumières naturelles						
Soleil hors atmosphère sur un plan de front au niveau de la Terre	6 200	$1,96 \times 10^9$	$1,35 \times 10^5$	$2,04 \times 10^7$	$1,39 \times 10^3$	97,5
Soleil au zénith vu du niveau de la mer sur un plan de front (avec ciel bleu)	5 760		$1,16 \times 10^5$	$1,37 \times 10^7$	$1,03 \times 10^3$	112
— diffusé par un papier blanc		$2,6 \times 10^4$		$2,3 \times 10^2$		
— diffusé par un sol moyen				$1,7 \times 10^2$		

Le pyranomètre

Un pyranomètre est un capteur de flux thermique utilisé pour la mesure de la quantité d'énergie solaire en lumière naturelle et est notamment utilisé en météorologie. Il permet la mesure de la puissance du rayonnement solaire total en watts par mètre carré. Il est sensible dans un domaine spectral de 300 à 2500 nanomètres selon le filtre utilisé.

Le pyranomètre est utilisé, par exemple, lors de la mesure de rayonnement solaire en serre, évalué en comparaison de la valeur du rayonnement en extérieur pour estimer les pertes d'énergie directe lors de la traversée des toitures. L'unité du rayonnement est le watt par mètre carré (W/m^2).

Il s'agit d'une pile thermoélectrique générant une force électromotrice (fem) à la réception du rayonnement solaire incident. La mesure de cette fem permet de déterminer l'intensité du rayonnement solaire (valeur instantanée en W/m^2). Le montage horizontal illustré ici mesure le rayonnement solaire global horizontal.

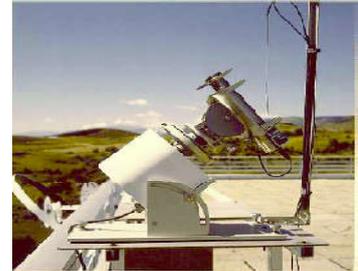


Le pyranomètre à rayonnement diffus

Cet appareil identique au précédent comporte une "bande d'ombre" qui évite la composante directe du rayonnement incident. Ce dispositif permet de mesurer le rayonnement solaire diffus.

Le pyrhéliomètre

Il mesure la composante directe du rayonnement solaire. Il a besoin d'un "suiveur solaire" et d'un collimateur pour maintenir en permanence le disque solaire focalisé et masquer le reste de la voûte céleste. Le capteur est une pile thermoélectrique. Elle mesure le rayonnement solaire direct.



L'héliographe

Cet appareil en réalité ne mesure pas le rayonnement solaire mais la période au cours de laquelle la puissance de ce rayonnement au mètre carré a dépassé un certain seuil (env. 120 à 300 W/m²).

L'extrémité de la fibre optique tourne sur l'axe du soleil. Elle est équipée d'un diaphragme pour minimiser l'influence du rayonnement diffus. A l'autre extrémité se trouve un photodétecteur au silicium précis, compensé en température. Il reçoit des impulsions lumineuses à chaque passage devant le soleil. Le détecteur délivre un signal analogique proportionnel à l'intensité du rayonnement. Lorsque l'intensité dépasse 120 W/m² une impulsion est délivrée.

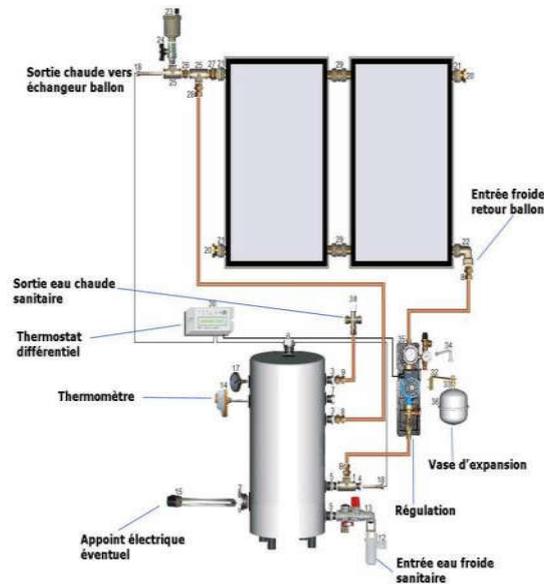


Albédomètre



La différence de masse volumique entre l'eau chaude et l'eau froide conduit à l'établissement d'un gradient de température dans un ballon de stockage d'eau chaude : la température de l'eau est plus élevée en haut qu'en bas du ballon ainsi que le schématise la figure 16 Le rendement d'un capteur solaire étant d'autant plus élevé que la température d'entrée du fluide est faible, on a intérêt :

- A choisir un rapport hauteur/diamètre du ballon suffisant (>2) pour obtenir une stratification suffisante,
- A éviter le brassage de l'eau dans le ballon qui « casserait » la stratification,
- A envoyer vers le capteur de l'eau provenant de la partie basse du ballon.



j **Figure 15** : Eléments d'un chauffe-eau solaire à éléments séparés

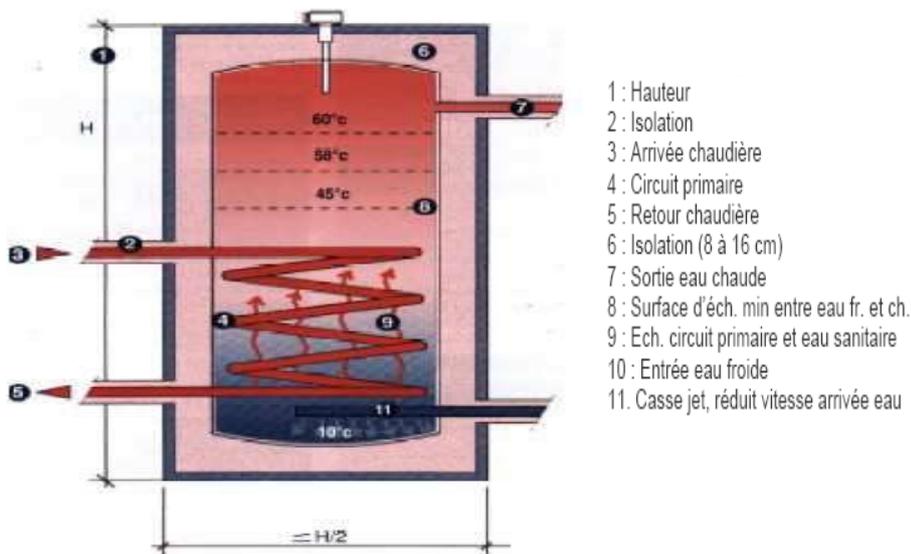


Figure 16 : Schématisation de la stratification dans un ballon d'eau chaude
(extrait de Bragard

2.5. 3. Froid et climatisation

- **Réfrigération**

L'énergie solaire peut être utilisée pour produire du froid par deux voies :

- Photoélectrique : on utilise l'électricité produite par des panneaux photovoltaïques pour alimenter un groupe frigorifique à compression ou des éléments Peltier
- Thermique : on utilise la chaleur récupérée dans un capteur solaire pour produire du froid par sorption.

Des réfrigérateurs fonctionnant sur ce principe sont opérationnels comme celui de Flechon et Godmel dont on trouvera le schéma sur la figure 17.

Son fonctionnement repose sur l'utilisation d'un couple absorbant/fluide frigorigène. La substance absorbante reste dans le capteur solaire. Dans la journée, l'élévation de sa température dans le capteur provoque l'évaporation du fluide frigorigène qui se condense dans un condenseur placé dans l'air ambiant à l'extérieur de l'enceinte à réfrigérer. Il est ensuite stocké dans un réservoir.

Pendant la phase nocturne le composé absorbant se refroidit et devient « avide » de fluide frigorigène. Celui-ci s'évapore donc dans l'évaporateur placé à l'intérieur du caisson isolé à refroidir pour être réabsorbé par le composé absorbant.

Le cycle peut alors se répéter le jour suivant. La production de froid s'effectuant la nuit, il faut prévoir un stockage du froid produit pour limiter l'élévation de température de l'enceinte réfrigérée dans la journée. Ce stockage s'effectue généralement par un volume d'eau glycolée placée dans l'enceinte.

Le facteur limitant la diffusion de ces réfrigérateurs reste un coût élevé.

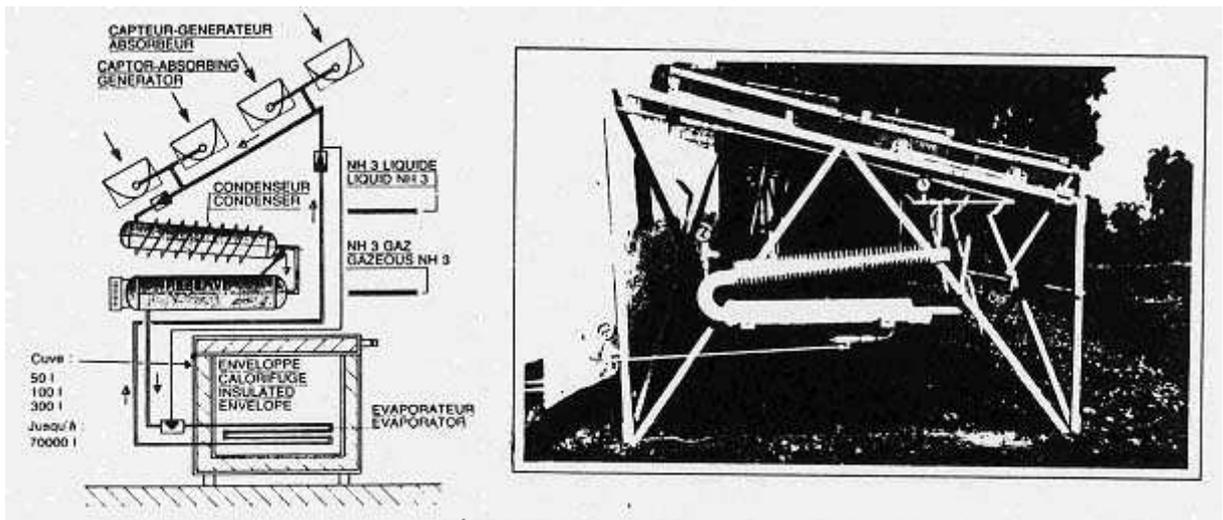


Figure 17: Schéma du réfrigérateur photothermique des Prs Flechon et Godmel

- **Climatisation**

Nous présenterons ici, le principe de deux systèmes reposant sur des cycles intermittents d'absorption/désorption d'eau dans un solide hygroscopique (gel de silice) :

Le système conçu par Dannies (figure 18) ne comporte aucun mécanisme et ne fait appel qu'aux mouvements de l'air par convection naturelle. Les murs Est et Ouest du bâtiment contiennent les éléments absorbants au travers desquels l'air circule selon le processus suivant :

- Le matin le soleil chauffe le mur Est : le mélange d'air et de vapeur d'eau réchauffé et plus léger monte dans le mur Est et en sort à sa partie supérieure. Il en résulte une aspiration correspondante d'air par les orifices supérieurs du mur Ouest dans lequel l'air passe sur l'absorbant régénéré la veille et s'y dessèche. Un dispositif d'évaporation d'eau placé au pied du mur permet alors de le refroidir avant son introduction dans la pièce. Durant cette phase, l'échauffement du mur Est provoque la déshydratation de l'absorbant qu'il renferme.
- L'après-midi, le soleil chauffe le mur Ouest et la circulation d'air s'inverse.

Ce système expérimenté au Libéria et en Lybie a permis de maintenir les locaux à une température de 5 à 15°C au-dessous de l'ambiance extérieure, avec une humidité relative comprise entre 65 et 75%.

Un autre système destiné à la déshumidification de l'air en zone humide a été mis au point par Lof aux Etats- Unis (figure (19)). L'air à déshumidifier passe à travers une pluie de solution de glycol concentrée et s'y dessèche. La chaleur latente de condensation et la

chaleur d'absorption sont éliminées dans un échangeur à eau : à la sortie l'air déshumidifié est à la même température qu'à l'entrée.

Le glycol dilué par son échange avec l'air humide est envoyé dans un régénérateur où il tombe en gouttelettes à travers un courant ascendant d'air sec réchauffé dans un capteur solaire à air. Ces systèmes restent toutefois au stade de faible diffusion et semblent difficilement adaptables à l'habitat individuel. Leur avenir se situe plutôt dans une intégration à une centrale de climatisation en vue de réduire la consommation énergétique.

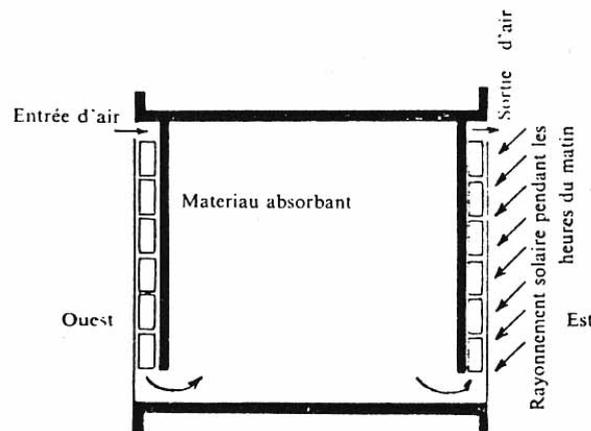


Figure 18: Schéma du procédé Dannies (d'après IIF)

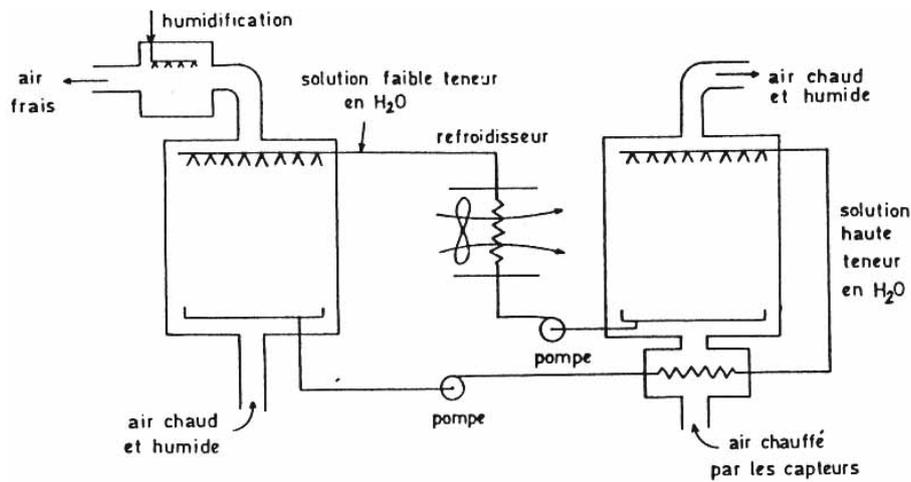


Figure 19 : Schéma du procédé Lof

2.5. 4. Le séchoir solaire

Le séchage naturel connu et pratiqué par nos ancêtres consiste à exposer le produit à sécher directement au soleil, en l'étalant au sol sur des nattes ou des claies. Ce type de séchage, bien qu'il soit simple et gratuit, a l'inconvénient de nécessiter de longues durées de séchage, d'exposer le produit à la poussière, à la pluie et aux insectes. D'où altération de la qualité et risque de pourrissement et de moisissures qui peuvent atteindre jusqu'à 50% des récoltes.

Le séchage solaire a pour avantage de conserver les aliments tout en gardant une majorité des éléments nutritifs, seules les vitamines B et C sont majoritairement perdues. Correctement stockés, les aliments se conservent entre 6 et 12 mois sans baisse de la qualité

Ce n'est qu'au 20^{ème} siècle avec l'apparition du concept de l'activité de l'eau (*water activity* Aw) et la connaissance des mécanismes de transfert de l'humidité dans les produits que furent développés les premiers séchoirs artificiels conçus selon des règles scientifiques.

Le séchoir solaire apparaît alors comme une solution non polluante. Souvent artisanaux, le séchoir peut se décliner sous différentes formes

2.5. 4.1. Types de séchoirs solaires

1) **Les séchoirs-Tunnel :** Ce sont des séchoirs industriels destinés au séchage des grandes récoltes et dans les processus de conservation de certains aliments. Ils se composent d'un champ de capteurs solaires et d'un circuit aéraulique, le tout constituant le générateur d'air chaud. Le produit à sécher est disposé dans des chariots montés sur des rails, qui traversent un tunnel de quelques mètres de façon continue (Figure20).



Figure 20 : Les séchoirs-Tunnel

- 2) **Les séchoirs-stock** Appelés aussi séchoirs étuves, ce sont des séchoirs immobiles, où le produit à sécher est entreposé sur des claies ou étagères. Les séchoirs stocks peuvent être directs ou indirects.
- **Les séchoirs solaires directs (séchoirs-serre)** Dans ce type de séchoirs, l'insolateur (capteur solaire) et le stock (chambre de séchage) forment un seul bloc. Le séchoir est constitué d'un caisson isolé à sa base et recouvert d'une vitre ou d'un plastique clair. Les aliments à sécher reçoivent directement les rayons du soleil à travers la couverture transparente (Figure 21). Ce type de séchoir est adapté au séchage des fruits et légumes dont la teneur en eau initiale est importante et qui nécessitent de longues durées de séchage (Figure 22).



Figure 21 : Séchoir solaire direct portable



Figure 22 : Séchoir solaire serre

- **Les séchoirs solaires indirects :** Ils sont composés d'isolateurs couplés à une chambre de séchage. L'isolateur sert à chauffer l'air et à l'envoyer dans cette dernière (Figure 23). En convection naturelle, ceci ne suffit pas à réchauffer l'air à la température désirée, ce qui

explique l'ajout d'une cheminée. L'énergie supplémentaire qui se trouve à la base de la cheminée améliore considérablement le fonctionnement du séchoir en augmentant le débit de l'air dans la masse du produit à sécher.



Figure 23 : Deux types de séchoirs solaires indirects

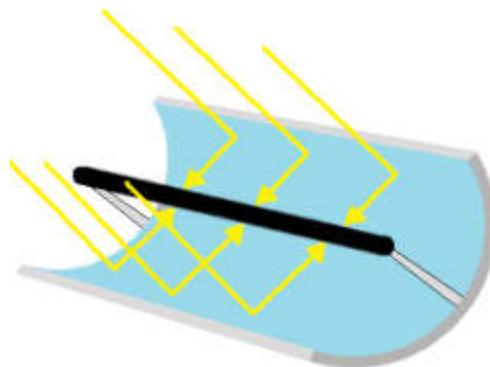
3. Capteurs haute température

Nous nous référons à high-température solaire thermique à ces collecteurs qui travaillent à des températures supérieures à 500 ° C. Ils sont utilisés pour la production d'électricité.

Les technologies utilisées dans high-température de l'énergie solaire thermique sont:

- Capteurs cylindro-paraboliques
- Centrales à tour
- Concentrateurs paraboliques
- concentrateurs Fresnel linéaire

3.1. Les capteurs cylindro-paraboliques



Cylindroparabolique capteurs solaires se concentrent la lumière du soleil en utilisant des miroirs paraboliques dans un tuyau d'absorbeur qui passe par l'axe de la parabole. Dans ce

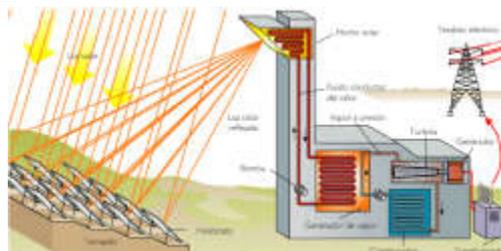
tube de tuyau absorbant un fluide est chauffé et peut atteindre des températures aussi élevées que 450 ° C

Selon l'application et la température à laquelle vous voulez réaliser un type de fluide ou un autre est utilisé. À une température maximale de 200 ° C peut être utilisé de l'eau déminéralisée ou de l'éthylène glycol comme fluides de travail et pour des températures plus élevées allant jusqu'à 450 ° C des huiles synthétiques sont utilisés.

Ce type de concentration getter doit être en train de modifier leur position adapter à la position du soleil en tournant autour de l'axe parallèle à sa ligne focale pour tirer parti de la position de lumière directe du soleil.



3.2. Les centrales à tour

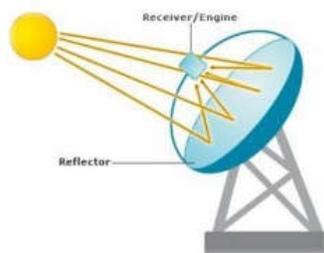


systèmes tour ou tour de récepteur central se composent d'un champ d'héliostats (miroirs mobiles de plus de 2 essieux). La héliostats capture et concentrer la lumière du soleil directe sur un récepteur, installé sur le sommet d'une tour centrale.

Fonctionnement de l'installation est simple, le récepteur solaire central génère la vapeur à haute température. La vapeur produite est ensuite utilisée pour entraîner une turbine qui produit l'électricité.



3.3. Les concentrateurs paraboliques



Les antennes paraboliques sont des systèmes qui concentrent l'énergie solaire en un point où le récepteur solaire est situé et un moteur Stirling ou une microturbine qui est couplée à un alternateur.

Le fluide situé dans le récipient est chauffé à des températures supérieures à 750°C , obtenant ainsi une certaine énergie thermique. Cette énergie thermique produite est utilisée par le moteur Stirling ou la microturbine pour produire de l'électricité.

Un moteur Stirling est un moteur thermique, ce qui signifie que l'apport d'énergie peut être réalisée grâce à l'énergie solaire concentrée. Un alternateur couplé à un moteur Stirling se rapproche du mouvement généré par le moteur pour produire de l'électricité. L'électricité produite peut être connecté au réseau pour la vente ou dans la plupart des cas peuvent être utilisés pour la consommation directe.

Cette technologie est encore au stade expérimental et est encore moins rentable que la tour ou des miroirs paraboliques.



3.4. Les concentrateurs linéaires de Fresnel

Les réflecteurs conduisent miroirs plats normaux et simuler la courbure des miroirs paraboliques (plus chers) faisant varier l'angle de chaque ligne avec un seul suivi de l'axe.

Le principal avantage du système linéaire de concentrateurs de Fresnel est sa simplicité d'installation et de faible coût, bien que le rendement est inférieur aux capteurs solaires cylindro-paraboliques.



Chapitre 3:Technologies des éoliennes

1. Introduction : Les éoliennes utilisent la force du vent pour produire de l'électricité. Elles sont montées aux sommets de mâts afin de bénéficier d'un maximum de puissance. A 30 mètres du sol ou plus au-dessus du sol, elles bénéficient d'une plus grande vitesse de vent, et évitent ainsi les turbulences aérodynamiques qui se trouvent proches du sol. Les éoliennes captent l'énergie du vent par leurs pales en forme d'hélices. Le plus souvent 2 ou 3 pales sont montées sur un axe pour constituer un rotor. Il existe de manière générale deux sortes d'éolienne, à axe vertical et à axe horizontal.

2. L'histoire de l'éolienne

Des moulins à vents depuis l'antiquité pour moudre du grain, presser des produits oléifères, battre le fer, le cuivre, le feutre ou les fibres du papier... ou relever de l'eau).

1890 : Première éolienne industrielle développée par le Danois Poul La Cour pour fabriquer de l'hydrogène par électrolyse de l'eau. Il crée l'éolienne Lykkegard, dont il vend 72 exemplaires en 1908.

1955 : Une éolienne expérimentale de 800 kW est exploitée pendant 8 ans dans la Beauce. Deux éoliennes de 130 et 1 000 kW furent testées par EDF à Saint Rémy des landes(50).

1973 : premier choc pétrolier, le Danemark entreprend un vaste plan de développement éolien suivi par d'autres pays.

3. Le vent : Le vent est lié à la différence de pression atmosphérique existant sur terre, la direction du vent allant de la haute pression vers la basse pression.

De manière générale les vents sont plus forts sur les océans que sur le continent. En effet, la vitesse proche du sol dépend de la rugosité du terrain.

4. Principe de l'aérogénérateur

L'aérogénérateur utilise l'énergie cinétique du vent pour entraîner l'arbre de son rotor : cette énergie cinétique est convertie en énergie mécanique qui est elle-même transformée en énergie électrique par une génératrice électromagnétique solidaire au rotor. L'électricité peut être envoyée dans le réseau de distribution, stockée dans des accumulateurs ou être utilisée par des charges isolées.

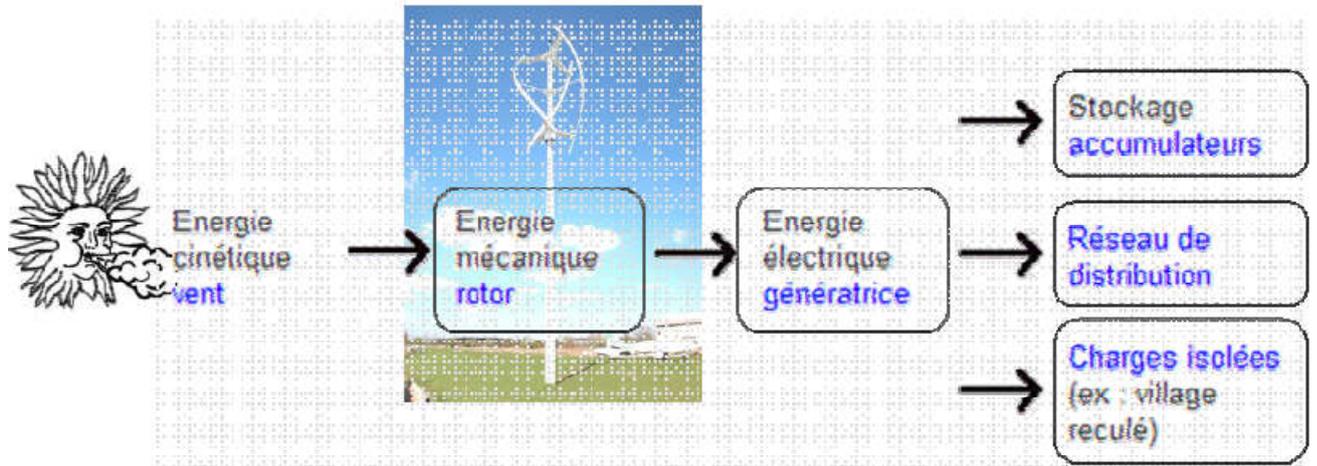


Figure 1 : Principe de l'aérogénérateur

5. Les composants de l'aérogénérateur :

a. La fondation et le mât :

- ✓ **La fondation** : Elle assure l'encrege et la stabilité de l'éolienne, et leur taille est proportionnelle à la hauteur de l'aérogénérateur.
- ✓ **Le mât (la tour)** : Le mât est une composante principale de l'aérogénérateur. Il supporte l'ensemble des équipements permettant de produire l'électricité (Nacelle et Rotor).

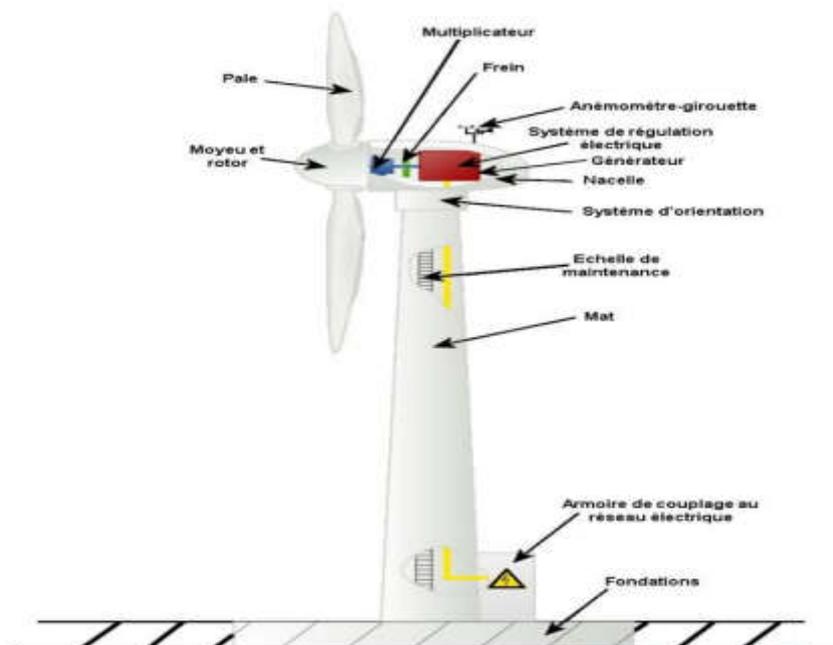


Figure 2 : Les composants de l'éolienne

b. La nacelle :

La nacelle contient les principaux composants d'une éolienne, elle est généralement réalisée en résine renforcée de fibres de verre.

Son rôle est d'abriter l'installation de génération de l'énergie électrique ainsi que ses équipements.

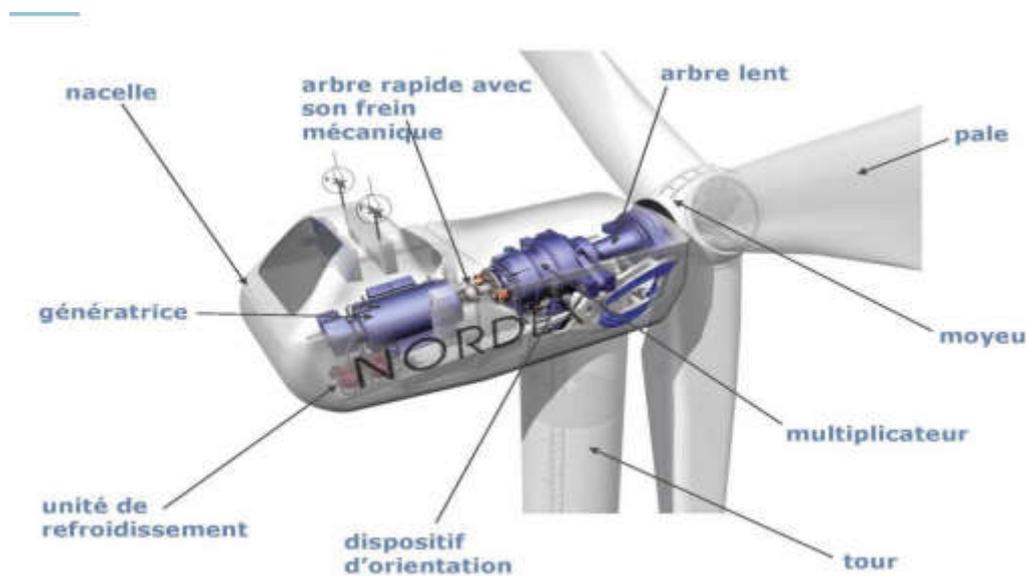


Figure 3 : les équipements électriques de la nacelle

La nacelle comporte :

- ✓ **L'arbre principal au primaire (lent):** Ou arbre primaire relie le moyeu du rotor au multiplicateur qui tourne lentement (14.6 à 30.8 tours/min). Il est relié à l'arbre secondaire par l'intermédiaire du multiplicateur.
- ✓ **Le multiplicateur ou boîte de vitesse:** Il sert à élever la vitesse de rotation entre l'arbre primaire et l'arbre secondaire qui entraîne la génératrice électrique.
- ✓ **Un générateur électrique:** C'est un convertisseur qui transforme l'énergie mécanique en énergie électrique à travers un champ électromagnétique qui entraîne la création du courant.
- ✓ **Un disque de freinage:** C'est un dispositif de sécurité, déclenché par l'anémomètre. Il permet l'arrêt total de l'éolienne en cas de vitesse élevée du vent (si vitesse du vent est supérieur à 25m /s) ou de maintenance.
- ✓ **Un système d'orientations :** 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 pour produire un maximum d'électricité.
- ✓ **Le capot:** Couverture qui protège les composantes de la nacelle, fait en résine de polyester renforcé de fibres de reine (isolement acoustique).
- ✓ **Le châssis:** Il y a le châssis arrière droit qui support le générateur; de gauche qui supporte le contrôleur du TOP. Le châssis avant est formé d'une poutre rigide y sont fixées le paliersupport et le système d'orientations.

- ✓ **Mesure du vent** : sur le toit arrière de la nacelle on trouve deux capteurs :
- ✓ **La girouette**: sert à la direction du vent.
- ✓ **L'anémomètre**: indique la vitesse du vent.

c. Rotor :

Il transforme l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique, il se compose de trois pales et il est relié à la nacelle par son moyeu (il fonctionne de la même manière qu'une hélice d'avion mais avec un sens de rotation inversé).

- ✓ **Cône du nez** : Le cône du nez protège le moyeu et les roulements de pale. Le cône est fabriqué en polyester et fibre de verre. Il est vissé à l'avant du moyeu et est soutenu par les roulements de pale
- ✓ **Pales** : Elles transfèrent la puissance du vent au moyeu du rotor. Elles peuvent être fabriquées en fibre de verre et résine époxy.
- ✓ **Moyeu** : Il supporte les pales et relie le rotor à la nacelle. Il fait varier l'angle d'attaque des pales simultanément. Le moyeu est de forme sphérique est fabriqué en fonte nodulaire.

6. Les types d'éolienne

Il existe deux types d'éolienne domestique. Elles se distinguent selon l'orientation de leur axe de rotation.

6.1. L'éolienne horizontale est le type d'éolienne le plus utilisé. Elle offre un rendement important mais elle est responsable de nombreuses nuisances non négligeables.

Il existe deux catégories d'éolienne à axe horizontal:

- **Amont** : le vent souffle sur le devant des pales en direction de la nacelle. Les pales sont rigides, et le rotor est orienté selon la direction du vent par un dispositif.

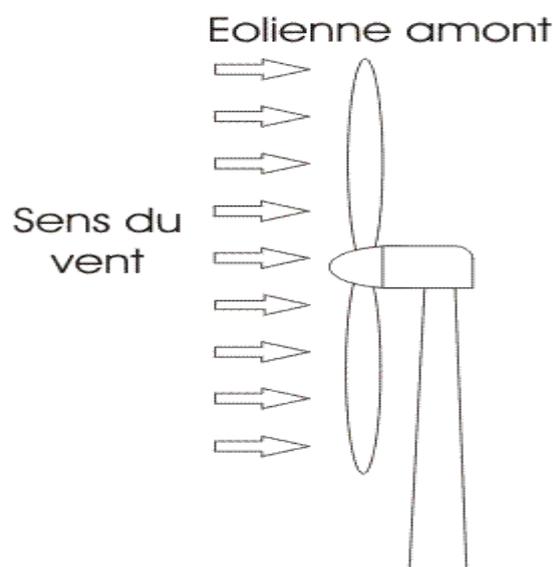


Figure 4 : Schéma d'une éolienne à axe horizontal amont

- **Aval :** le vent souffle sur l'arrière des pales en partant de la nacelle. Le rotor est flexible, auto-orientable.

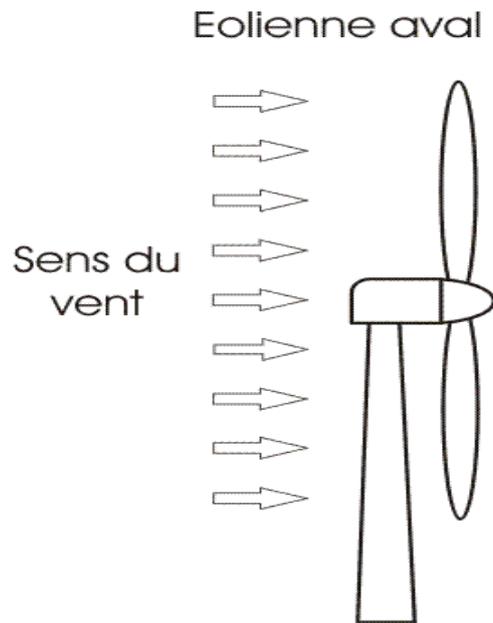


Figure 5 : Schéma d'une éolienne à axe horizontal aval

6.2. L'éolienne verticale est pour l'heure le type d'éolienne le moins répandu. Cependant, son rendement égal voire supérieur à celui d'une éolienne classique, et ses atouts d'intégration au bâti, de fonctionnement même avec un vent faible et d'occupation d'espace moindre, font d'elle une solution très intéressante, notamment pour les éoliennes domestiques.

- **Le rotor de Savonius** dont le fonctionnement est basé sur le principe de la traînée différentielle. Les efforts exercés par le vent sur chacune des faces d'un corps creux sont d'intensités différentes. Il en résulte un couple entraînant la rotation de l'ensemble.

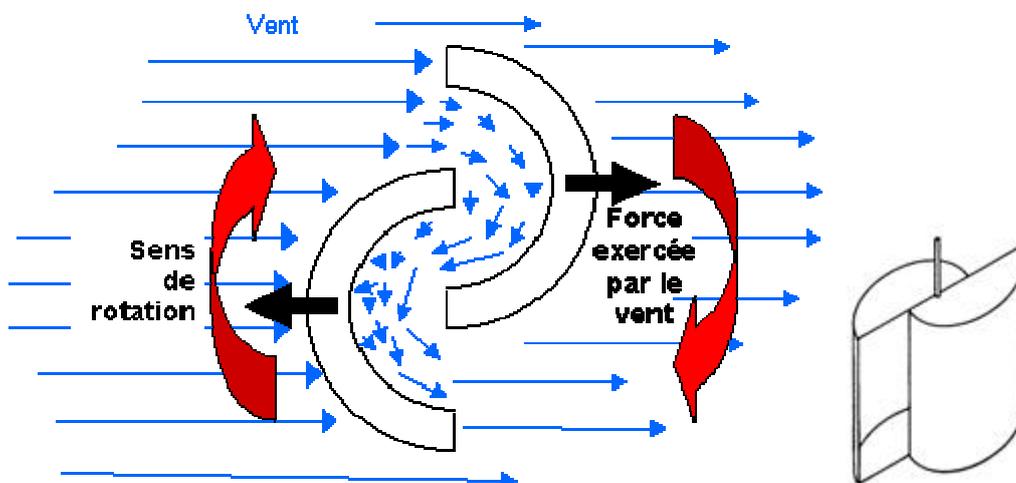


Figure 6 : Rotor de Savonius

- **Le rotor de darrieus** est basé sur le principe de la variation cyclique d'incidence. Un profil placé dans un écoulement d'air selon différents angles, est soumis à des forces d'intensités et de directions variables. La résultante de ces forces génère alors un couple moteur entraînant la rotation du dispositif.

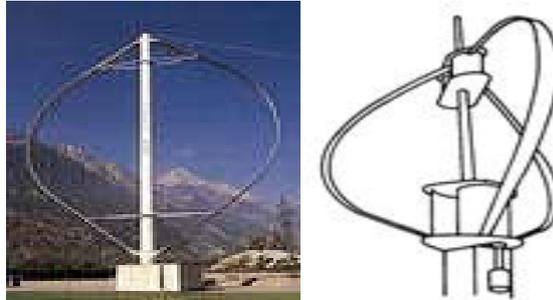


Figure 7 : Rotor de darrieus

7. Notions de calculs sur les éoliennes

- Puissance récupérable par les pâles

L'énergie du vent est l'énergie cinétique de l'air récupérable qui traverse une certaine surface S , la puissance associée est donc :

$$P_{vent} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot v^3 \quad (1)$$

v : la vitesse du vent en m/s

$\rho \sim 1,25 \text{ kg/m}^3$, masse volumique de l'air, dans les conditions normales de température et de pression au niveau de la mer

S : la surface d'air en m^2 balayée par les pales

- Coefficient de puissance C_p

Le coefficient C_p caractérise le niveau de rendement d'une turbine éolienne. On peut le définir comme le rapport suivant :

$$C_p = \frac{\text{Puissance disponible sur l'arbre}}{\text{Puissance disponible (récupérable)}} \quad (2)$$

Cependant, cette énergie ne peut pas être entièrement récupérée, car il faut évacuer l'air qui a travaillé dans les pales du rotor. On introduit alors le coefficient de puissance C_p dans le calcul de la puissance P :

$$P_{turbine} = \frac{1}{2} \cdot C_p \cdot \rho \cdot S \cdot v^3 \quad (3)$$

- **Variation de vitesse du vent v en fonction de la hauteur h**

$$\frac{v}{v_0} = \left(\frac{h}{h_0}\right)^\alpha \quad (4)$$

v : vitesse en m/s à la hauteur h de référence au-dessus du sol

α : coefficient caractéristique du lieu entre 0,1 et 0,4

La puissance d'une éolienne est aussi en fonction de la hauteur du mât, la figure donne un aperçu sur l'évolution de la puissance d'une éolienne en fonction de sa hauteur et du diamètre balayé.

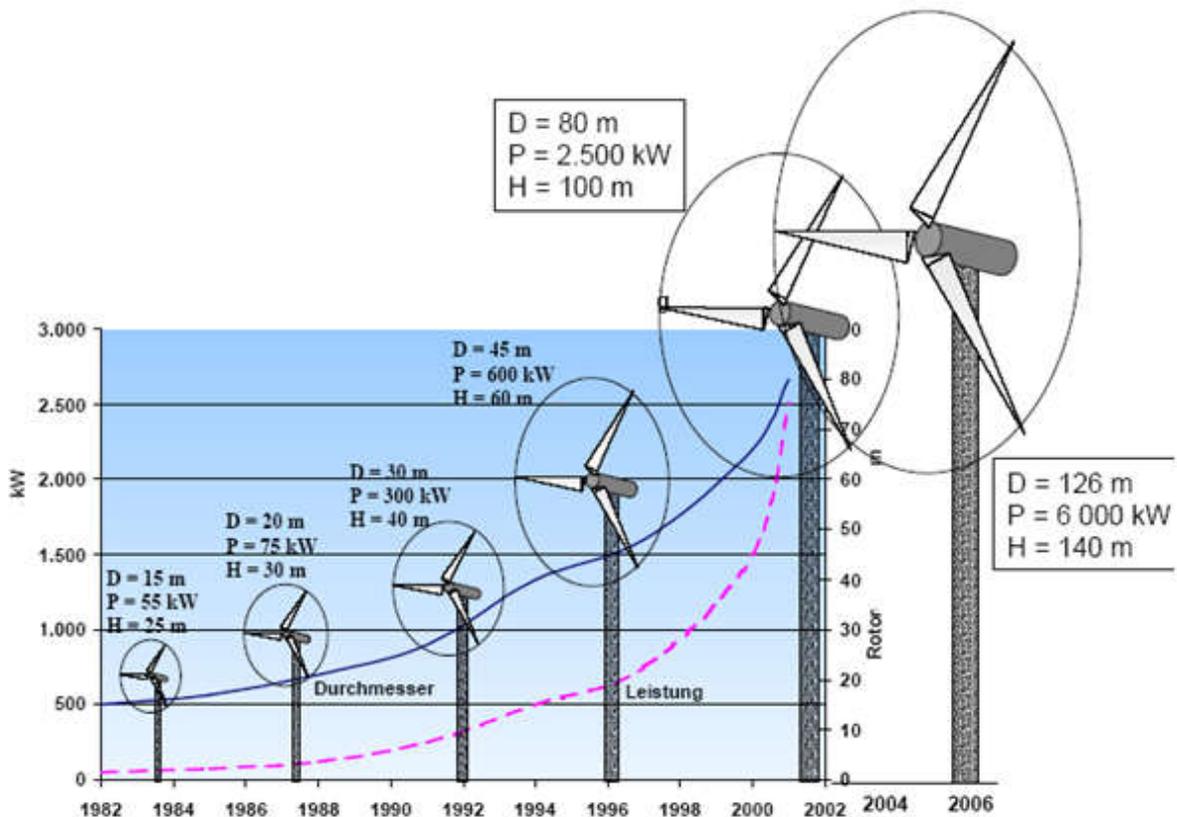


Figure 8 : Tailles des éoliennes et puissance associée.

8. L'utilisation

L'énergie éolienne peut être utilisée de trois manières :

- **Conservation de l'énergie mécanique** : le vent est utilisé pour faire avancer un véhicule (navire à voile ou char à voile), pour pomper de l'eau (moulins de Majorque, éoliennes de pompage pour irriguer ou abreuver le bétail) ou pour faire tourner la meule d'un moulin ;
- **Transformation en force motrice** (pompage de liquides, compression de fluides...)

Et surtout celle qui nous intéresse plus particulièrement ici :

- **La production d'énergie électrique :** l'éolienne est alors couplée à un générateur électrique pour fabriquer du courant continu ou alternatif. Le générateur est relié à un réseau électrique ou bien fonctionne au sein d'un système « autonome » avec un générateur d'appoint (par exemple un groupe électrogène) et/ou un parc de batteries ou un autre dispositif de stockage d'énergie.

9. Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne

A la lumière des fondements de la première section, certains avantages et inconvénients peuvent être mis en évidence.

9.1. Avantages de l'énergie éolienne

Parmi les avantages de l'énergie éolienne nous pouvons citer les suivants :

- Énergie renouvelable
- Disponible toute l'année
- Installation démontable
- Technologie bien maîtrisée
- Sans déchet et sans risque majeur

9.2. Inconvénients d'énergie éolienne:

- Impact sur le paysage
- Seulement si le vent souffle
- Installation à durée de vie limitée (20-30 ans)
- Rendement moyen (20-60%)

Chapitre 4: Ressources géothermales

1. Introduction : La géothermie, comme le fait deviner son étymologie, est l'énergie contenue dans la terre. C'est une énergie utilisée depuis des siècles notamment avec les thermes gallo-romains. Ce n'est cependant pas l'énergie la plus ancienne apprivoisée par l'homme puisque la première est incontestablement l'énergie de la biomasse, avec la maîtrise du feu.

On distingue 3 types de géothermie:

- La géothermie très basse énergie exploite des eaux à moins de 30°, ou directement l'énergie contenue dans les roches. (système lié à une pompe à chaleur)
- La géothermie basse énergie utilise de l'eau entre 30 et 100°
- La géothermie haute énergie utilise de l'eau ou de la vapeur à plus de 100°, jusqu'à 250°. Elle permet de produire de l'électricité.

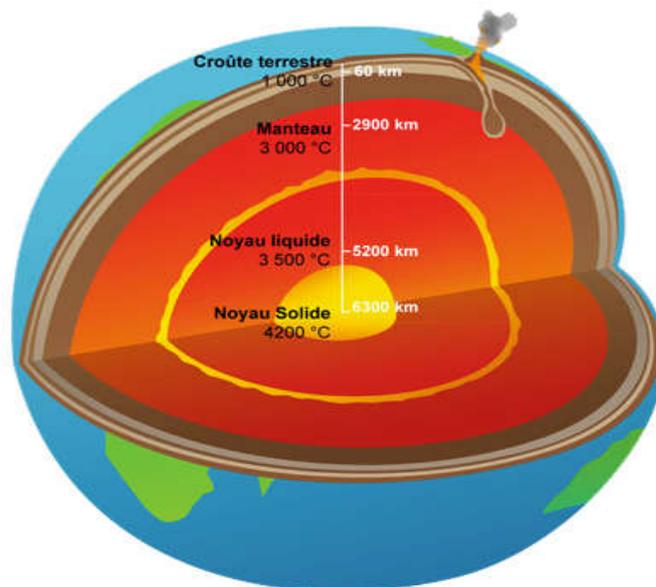


Figure 1 : Coupe du globe terrestre

2. Les différents types de géothermie

2.1. La géothermie très basse température

La géothermie basse température provient de l'énergie solaire. En effet, c'est le rayonnement solaire qui chauffe les premiers mètres sous Terre. La terre a un fort pouvoir d'inertie, la température sous terre est donc plus constante qu'à sa surface, à savoir entre 10 et 20°C selon la saison (environ 14°C de moyenne) à 1m de profondeur.

2.1.1. Captage horizontal

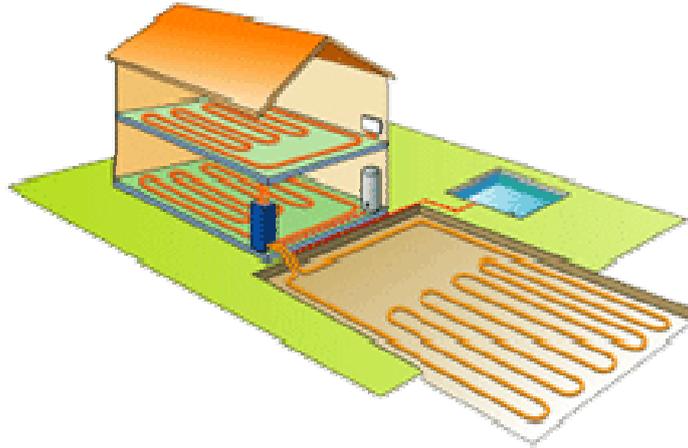


Figure 2 : Géothermie par captage horizontal.

C'est le type de captage le plus courant puisque le moins coûteux. En effet, le captage horizontal consiste à placer des tubes entre 80cm et 1,2m de la surface. A cette profondeur, la température est assez stable et ne varie que pendant les saisons entre 10 et 20°C. Si les travaux sont effectués lors de la construction de la maison, cela peut avoir un coût très faible puisque les engins sont déjà sur place. On considère qu'il faut entre 1,5 et 2 fois la surface de la maison pour chauffer convenablement. S'il est possible de planter des choses à la surface (fleurs, pelouse), les arbres et les terrasses sont eux à proscrire au-dessus des tubes. Cette technique possède un inconvénient majeur : si les tubes ne sont pas assez enterrés et/ou que les besoins en chauffage sont trop grands pour la surface de captage, la température de la terre risque de chuter jusqu'à faire geler la surface, tuant par la même tout ce que vous auriez pu planter au-dessus, y compris la pelouse.

2.1.2. Captage vertical

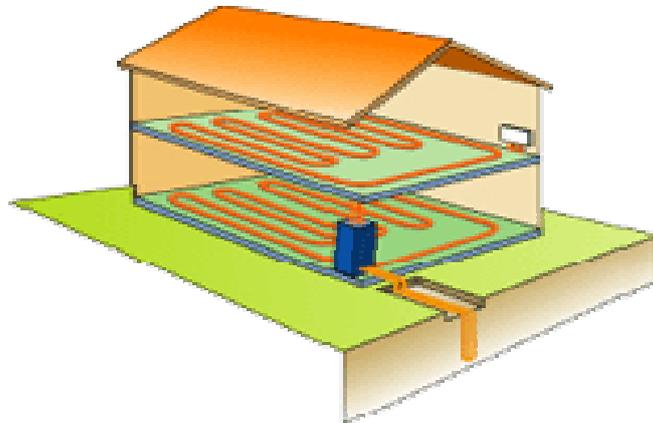


Figure 3 : Géothermie par captage vertical.

Cette technologie requiert deux sondes de 15 à 100m de profondeur. A cette profondeur, la température est beaucoup plus stable qu'avec un captage horizontal. Cependant, les forages coûtent très chers rendant cette solution beaucoup plus coûteuse que la précédente. Les sondes doivent être situées à une dizaine de mètres d'écart minimum. Il est donc possible d'installer ce type de système sur des petites surfaces de terrains. De plus, la surface ne risque pas de geler.

2.1.3. Captage sur nappe phréatique

Les capteurs géothermiques sur nappes phréatiques, aussi appelés doublets géothermiques fonctionnent à l'aide d'un ou deux forages.

Lorsqu'il n'y a qu'un forage, l'eau est extraite de la nappe avec une pompe puis on récupère ses calories grâce à l'échangeur de la PAC et on rejette l'eau dans un ruisseau ou une rivière (lorsque la réglementation l'autorise). Il n'est en effet pas possible de rejeter l'eau refroidie au même endroit sous peine de refroidir aussi l'eau qui sera pompée, ce qui diminuera sensiblement les performances de l'installation.

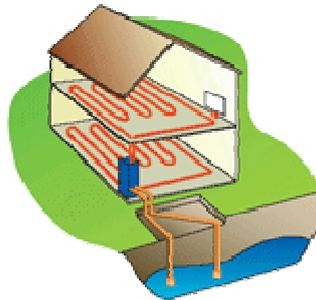


Figure 4 : Géothermie par captage sur eau de nappe.

L'autre solution (la plus courante) consiste à mettre en place une deuxième sonde donnant sur la même nappe phréatique, mais espacée de plusieurs mètres de la première. La température de l'eau pompée sera donc préservée de même que la quantité d'eau souterraine de la nappe qui est une denrée rare.

2.1.3.1. Principe de la pompe à chaleur géothermique

L'énergie géométrique s'obtient le plus souvent au moyen de pompes à chaleur, voir figure5, principe qui est également utilisé pour les forages profonds dans le cadre de travaux de grande envergure ne concernant pas les particuliers.

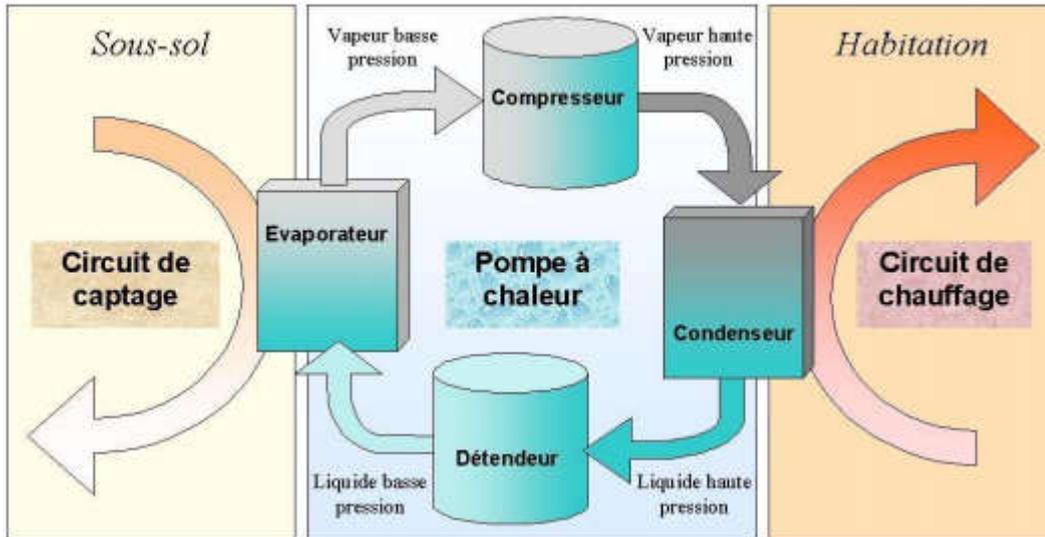


Figure 5 : Principe d'une pompe à chaleur appliquée à la géothermique

2.2. La géothermie basse température

La géothermie basse température se situe à des profondeurs allant de quelques centaines à quelques milliers de profondeur. A cette profondeur, seuls les changements de température saisonnier influe et de façon minime. Vous le savez peut-être, le noyau de la Terre est un énorme amas de magma extrêmement chaud. C'est donc grâce à lui que la géothermie basse température existe. Une notion très importante est la notion de gradient de température. On estime ainsi que pour chaque kilomètre plus près du centre de la Terre, on gagne 3°C . Un gradient de température est la distance qu'il faut pour augmenter de 1°C . Il faut également savoir que selon le type de sous-sol, le gradient de température sera différent. C'est-à-dire qu'entre deux zones différentes, à la même profondeur, la température sera différente.

La géothermie basse température se situe entre 30°C et 100°C . Les bassins aquifères sont idéals pour la géothermie basse température, puisque leur gradient de température est faible.

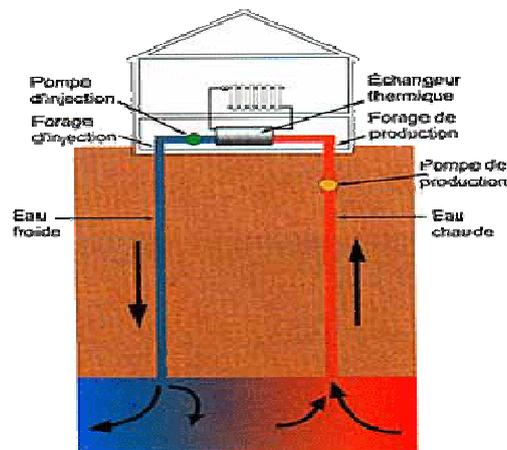


Figure 6 : Le principe du doublet géothermique

La géothermie basse température fonctionne sur le principe du doublet géothermique (capteurs verticaux sur nappe phréatiques). La température de l'eau est assez élevée pour se passer d'une pompe à chaleur. Il est en effet possible de chauffer directement des logements avec cette température via des réseaux de chaleur.

Beaucoup l'ignorent mais le plus grand réseau de chaleur (de France) se situe à Paris et fonctionne justement avec la géothermie basse température. D'autres réseaux de chaleur fonctionnent en effet avec des chaudières à biomasse ou encore grâce à des usines d'incinération de déchets.

2.3. La géothermie haute/moyenne température

Le noyau de la Terre est un énorme amas de magma extrêmement chaud. C'est grâce à lui que la géothermie haute température existe. Une notion très importante est la notion de gradient de température. On estime ainsi que pour chaque kilomètre plus près du centre de la Terre, on gagne 3°C. Un gradient de température est la distance qu'il faut pour augmenter de 1°C. Il faut également savoir que selon le type de sous-sol, le gradient de température sera différent. C'est-à-dire qu'entre deux zones différentes, à la même profondeur, la température sera différente.

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

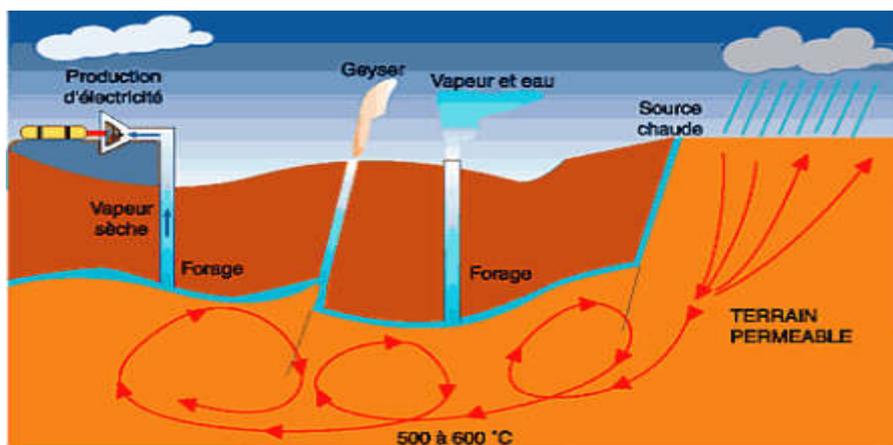


Figure 7 : Principe l'exploitation énergie géothermique

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

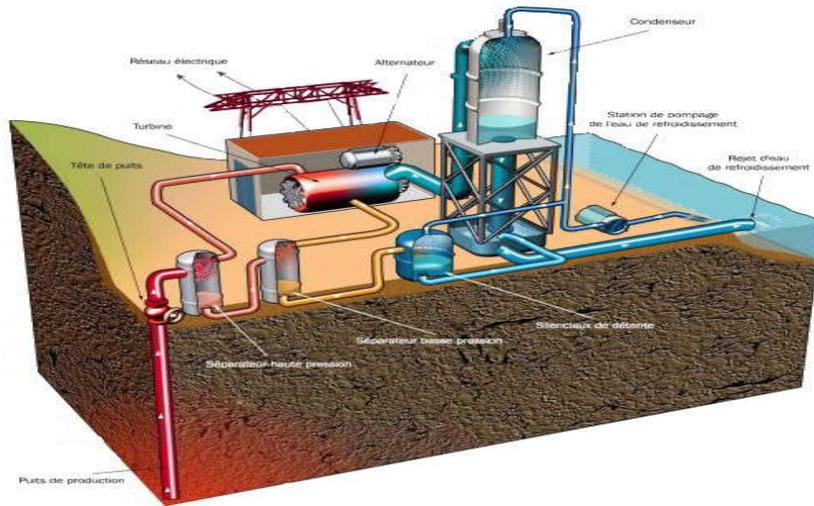


Figure.8 : Schéma d'une installation-type de géothermie

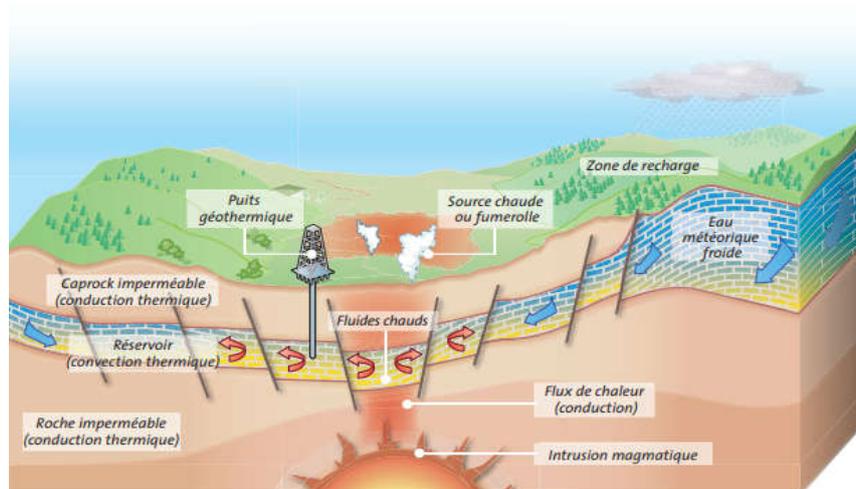


Figure.9 : Schéma de la centrale géothermique de la Bouillante

3. Les différentes applications de la géothermie suivant la température

Tableau 1. Les différentes applications de la géothermie

Type de géothermie	Température en °C	Domaines d'utilisation	
Haute énergie	200 et plus		Production d'électricité par la méthode conventionnelle
	190	Réfrigération par absorption	
	180	Préparation de pâte à papier	
	170	Fabrication d'eau lourde	
	160	Séchage de poisson et de bois	
	150	Fabrication d'alumine	
Moyenne énergie	140	Séchage de produits agricoles	Production d'électricité par cycle binaire
	130	Evaporation	
	120	Production d'eau douce par distillation	
	110	Séchage de parpaings de ciment	
	100	Séchage de légumes	
	90	Déshydratation	
Basse énergie	80	Chauffage urbain – chauffage de serres	
	70	Réfrigération	
	60	Elevage d'animaux	
	50	Balnéothérapie	
	40	Chauffage de sols	
Très basse énergie	30	Piscine, fermentation	
	20	Pisciculture	

4. La production d'électricité géothermique : La production d'électricité géothermique consiste à convertir la chaleur des nappes aquifères haute température (de 150 à 350°C) à l'aide de turboalternateurs. Si la température de la nappe est comprise entre 100 et 150°C, il est également possible de produire de l'électricité, mais en utilisant la technologie du cycle binaire. Dans ce cas, un échangeur transmet la chaleur de la nappe à un fluide (isobutane, isopentane, ammoniac) qui a la propriété de se vaporiser à une température inférieure à celle de l'eau.

5. La disponibilité des ressources géothermiques : Cette chaleur est variable selon les zones. À la surface du globe, le flux géothermique moyen est faible (il s'agit de l'énergie disponible pour une superficie et une période données). Ce flux s'élève à 0,06 watt par mètre carré et par an, soit 3 500 fois moins que le flux d'énergie solaire reçu en une année par la même surface de sol ! C'est pourquoi on cherche à exploiter en priorité les ressources calorifiques de certaines zones susceptibles de fournir des quantités d'énergie importantes. Ces « réservoirs géothermiques » sont disponibles dans tous les bassins sédimentaires de la planète mais la géothermie haute énergie se situe surtout à proximité de volcans. Dans ces zones, le flux géothermique peut atteindre 1 watt/m²/an.

Les réservoirs géothermiques ont tendance à s'épuiser au fur et à mesure de leur exploitation, certains plus rapidement que d'autres. Leurs capacités de renouvellement reposent sur :

- Des sources de chaleur internes à la croûte terrestre (radioactivité essentiellement et chaleur résiduelle) ;
- Des apports d'énergie venus de l'extérieur du réservoir (chaleur solaire) pour les usages de très basse température au moyen de pompes à chaleur (PAC). Assurer ces conditions de réchauffement se révèle d'autant plus crucial pour les PAC géothermales que le sous-sol est également refroidi par des facteurs extérieurs : en hiver, par exemple, on y récolte moins de chaleur ;
- La circulation des eaux souterraines qui leur permet de se réchauffer au contact de sources de chaleur éloignées du réservoir, avant de réintégrer celui-ci. Ainsi, pour pouvoir exploiter un réservoir de manière durable, on doit veiller à la reconstitution progressive de ses ressources calorifiques. Cela passe par le plafonnement des quantités de chaleur prélevées et la limitation dans le temps de l'exploitation du site.

En outre, la disponibilité de l'énergie géothermique est limitée géographiquement. Le transport de la chaleur sur de longues distances génère en effet d'importantes pertes thermiques. Il en résulte une difficulté à faire correspondre lieux de production et lieux de consommation pour couvrir les besoins en énergie.