

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République Algérienne Démocratique et Populaire  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي  
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique  
جامعة حمزة لخضر الوادي  
Université Hamma Lakhder d'El Oued

Faculté de Technologie  
Département de Génie Mécanique



كلية التكنولوجيا  
قسم الهندسة الميكانيكية

# *POLYCOPIE*

# *Energies Renouvelables*

- Cours -

(Niveau Licence)



**Dr. AOUN yacine**

**Maitre de conférences classe B**

**Année Universitaire 2017/2018**

# ***Préface***

En raison de l'importance de l'énergie renouvelable dans les sociétés, l'enseignement de ses fondamentaux est devenu nécessaire dans le progrès de l'étudiant universitaire dans le domaine de la "science et de la technologie". Ces énergies non polluantes contribuent à un environnement plus protecteur face aux émissions dangereuses, qu'elles soient appelées gaz à effet de serre ou celles qui perturbent la qualité de l'air. Ce cours, dans le cadre de mon habilitation universitaire, est principalement destiné aux étudiants en génie mécanique. L'objectif de ce cours est de fournir un large aperçu des différents types d'énergies renouvelables (sources et technologies). Cette version du cours se compose de neuf chapitres répartis comme suit:

Le premier chapitre regroupe le Gisement Solaire. Dans ce chapitre, nous allons définir certaines grandeurs solaires à savoir :

- Les grandeurs astronomiques.
- Les grandeurs géographiques.
- Le rayonnement solaire hors atmosphère.
- Le rayonnement direct, diffus et global.

Le deuxième chapitre permet à l'étudiant de découvrir la conversion thermique à basse température.

Un résumé des modes de stockage d'énergie solaire est aussi sera employé dans le troisième chapitre.

La conversion photovoltaïque et la géothermie auront leurs places dans ce polycopié aux chapitres 4 et 5, plusieurs applications domestiques et industrielles y sont présentées.

L'énergie éolienne et l'énergie hydraulique sont traitées respectivement dans les chapitres 6 et 7.

Les biocarburants et le biogaz feront l'objet du huitième chapitre qui concerne la biomasse.

Le dernier chapitre est consacré à un type très important d'énergie renouvelable, qui est l'énergie des mers.

## Table de Matière

---

### *Préface*

### *Introduction Générale*

6

### *Chapitre 1 : Le Gisement Solaire*

1. Introduction .....	8
2. Le soleil .....	8
3. La constante solaire .....	10
4. Le mouvement de la terre .....	10
5. La sphère céleste .....	10
6. Les coordonnées célestes .....	11
7. Les temps solaires .....	14
8. Rayonnement solaire .....	14
9. Le gisement solaire en Algérie .....	15

### *Chapitre 2 : Conversion Thermique : Applications à Basse Température*

1. Introduction .....	18
2. Capteur solaire basse température .....	18
2.1. Principe de fonctionnement.....	18
2.2. Bilan thermique global.....	19
2.3. Rendements d'un capteur solaire .....	20
2.4. Les différents types de capteurs solaires thermiques.....	20
2.4.1. Les capteurs plans non vitrés ou souples.....	20
2.4.2. Les capteurs plans.....	21
2.4.3. Les capteurs sous vides.....	22
2.5. Applications.....	23
2.5.1. Les distillateurs solaires .....	23
2.5.2. Production d'eau chaude.....	24
2.5.3. Froid et climatisation.....	29
2.5.4. Le séchoir solaire.....	31
3. Conclusion .....	34

### *Chapitre 3 : Stockage de L'énergie Solaire*

1. Introduction .....	36
2. Les différentes technologies de stockage de l'énergie solaire .....	36
2.1. Mode de stockage mécanique.....	36
2.2. Mode de stockage électrochimique et électrostatique.....	38
2.3. Mode de stockage thermique.....	41
2.4. Mode de stockage thermochimique.....	43
2.5. Mode de stockage chimique.....	43
3. Quelques technologies alternatives nouvelles de stockage d'électricité sous forme de chaleur.....	45

### *Chapitre 4 : La Conversion Photovoltaïque*

1. Introduction .....	48
2. L'effet photovoltaïque .....	48
3. Composition d'une cellule PV.....	51
3.1. Les principales technologies de cellules solaires .....	52
4. Caractéristique électriques d'une cellule PV.....	53
5. Les systèmes photovoltaïques.....	55
5.1. Module solaire ou photovoltaïque.....	55

5.2.	Les différentes installations photovoltaïques.....	56
6.	Domaine d'application.....	57
6.1.	Les applications autonomes.....	57
6.2.	Les applications raccordées au réseau public de distribution d'électricité que l'on peut.....	58
7.	Avantages et inconvénients.....	58

### ***Chapitre 5 : La Géothermie***

1.	Introduction .....	60
2.	Les différents types de géothermie .....	60
2.1.	La géothermie très basse température.....	60
2.1.1.	Captage horizontal.....	61
2.1.2.	Captage vertical.....	61
2.1.3.	Captage sur nappe phréatique.....	62
2.1.3.1.	Principe de la pompe à chaleur géothermique..	62
2.2.	La géothermie basse température.....	63
2.3.	La géothermie haute/moyenne température.....	64
3.	Les différentes applications de la géothermie suivant la température.....	65
4.	La production d'électricité géothermique .....	66
5.	La disponibilité des ressources géothermiques .....	66

### ***Chapitre 6 : L'énergie éolienne***

1.	Introduction .....	69
2.	L'histoire de l'éolienne .....	69
3.	Le vent .....	69
4.	Principe de l'aérogénérateur .....	69
5.	Les composants de l'aérogénérateur .....	70
6.	Les types d'éolienne.....	72
6.1.	L'éolienne horizontale.....	72
6.2.	L'éolienne verticale.....	73
7.	Notions de calculs sur les éoliennes.....	74
8.	L'utilisation.....	75
9.	Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne.....	76

### ***Chapitre 7 : L'énergie Hydraulique***

1.	Introduction .....	78
2.	Histoire de l'énergie hydraulique .....	78
3.	Les différents types de centrales hydroélectriques .....	81
4.	Les différents types de barrages .....	83
5.	Les turbines .....	84
6.	Les avantages et les inconvénients de la production d'électricité hydraulique.....	84
7.	Solutions d'accompagnement.....	85

### ***Chapitre 8 : L'énergie de la Biomasse***

1.	Définition et catégories .....	87
2.	Fonctionnement technique ou scientifique .....	87
3.	Procédés de valorisation de la biomasse .....	87
3.1.	La voie sèche.....	87
3.2.	La voie humide.....	88
3.3.	La production de biocarburants.....	88
4.	Enjeux par rapport à l'énergie.....	89

5. Zone de présence ou d'application.....	90
---	----

### ***Chapitre 9 : L'énergie des Mers***

1. Introduction .....	92
2. Les différentes énergies marines .....	92
2.1. L'énergie des marées.....	92
2.2. L'énergie des courants marins.....	93
2.3. Les autres sources d'énergies marines.....	95
2.3.1. L'énergie thermique des mers.....	95
2.3.2. L'énergie des vagues et de la houle.....	96
2.3.3. L'énergie osmotique.....	97
2.3.4. La biomasse marine.....	97
3. Avantages et inconvénients.....	98
<b><i>Références bibliographique</i></b> .....	99

## ***Introduction Générale***

L'utilisation de sources d'énergie renouvelables par les humains, y compris l'énergie solaire, éolienne et hydroélectrique est très ancienne; ce type d'énergie est utilisé depuis l'antiquité et son utilisation a continué à exister jusqu'à l'arrivée de la "Révolution Industrielle", époque à laquelle, étant donné le bas prix du pétrole, elles ont été abandonnées.

Cependant, depuis ces dernières années étant donné l'accroissement du coût des combustibles fossiles et des problèmes environnementaux dérivés de leur exploitation, nous assistons à un renouvellement des énergies renouvelables.

Les énergies renouvelables sont inépuisables, propres et peuvent être utilisées de manière autogérée (elles peuvent être utilisées au même endroit où elles sont produites). Elles ont également l'avantage de se compléter mutuellement. Elles ont également l'avantage de se compléter mutuellement. Par exemple, l'énergie solaire photovoltaïque fournit de l'électricité les jours dégagés (généralement avec de petits vents), tandis que dans les jours froids et venteux, avec des nuages, les aérogénérateurs produisent la majorité de l'énergie électrique.

*Chapitre 1*  
*Le Gisement Solaire*

**1. Introduction :** Les énergies renouvelables; comme leur nom l'indique, ce sont des sources inépuisables d'énergies offertes par la nature elle-même et dont la maîtrise garantirait largement l'autonomie de la planète. On y trouve l'énergie solaire, l'énergie éolienne, l'énergie géothermique, l'énergie marémotrice, l'énergie de la biomasse. La première source peut trouver leur origine dans les

- Le rayonnement solaire qui fournit 99.97% de sa densité thermique.
- La chaleur interne terrestre qui fournit 0.03% de sa densité thermique.
- Le travail des forces de gravitation.

## 2. Le soleil

Le soleil est une étoile naine de forme pseudo-sphérique comparable à une immense boule de gaz très chauds qui se compose de 80% d'hydrogène et de 19% d'hélium, le 1% restant étant un mélange de plus de 100 éléments, soit pratiquement tous les éléments chimiques connus .

Bien que le soleil soit une étoile de taille moyenne, il représente à lui seul 99.9% de la masse du système solaire qui est dominé par les effets gravitationnels de l'importante masse du soleil.

### 2.1. Caractéristiques du soleil

Les caractéristiques principales du soleil sont regroupées dans le tableau 1 :

**Tableau 1.** Caractéristiques principales du soleil

Diamètre (km)	1392000
Masse (kg)	$2.10^{30}$
Surface (km <sup>2</sup> )	$6.09.10^{12}$
Volume (km <sup>3</sup> )	$1.41.10^{18}$
Masse volumique moyenne (kg/m <sup>3</sup> )	1408
Vitesse (km/s)	217
Distance du centre de la voie lactée (km)	$2.5.10^{17}$

Le soleil n'est pas une sphère homogène, il est constitué de :

- Le noyau contient 40% de la masse du soleil, c'est là où se crée 90% de son énergie sous forme de rayons gamma et X, tout le rayonnement émis dans cette région est totalement absorbé par les couches supérieures, cette zone s'étend sur une épaisseur de  $25.10^4$  km, elle présente les caractéristiques suivantes:
  - Une température de  $15.10^6$  °C.
  - Une densité est de  $1015 \text{ kg/m}^3$ .
  - Une pression de 109 ATM.
- La zone radiative où la chaleur produite se propage par une diffusion radiative, elle présente les propriétés suivantes:



- Une épaisseur de 244160 km.
- Une température variant de  $10 \cdot 10^6 \text{ °C}$  à  $50 \cdot 10^4 \text{ °C}$ .
- La zone de convection où la chaleur produite se propage par une convection Turbulente, elle présente les propriétés suivantes:
  - Une température comprise entre  $50 \cdot 10^4 \text{ °C}$  à  $6400 \text{ °C}$ .
  - Une épaisseur de l'ordre 199758 km.
- La photosphère est une couche opaque, les gaz qui la constituent sont fortement ionisés et capables d'absorber et d'émettre un spectre continu de radiations, elle émet 99% du rayonnement total principalement dans le visible et c'est elle que l'oeil humain perçoit. Elle présente les caractéristiques suivantes:
  - La température de surface décroît de  $6400 \text{ °C}$  à  $4500 \text{ °C}$ .
  - Une épaisseur de 500 km.
  - Une pression de 1/100 ATM.
- La chromosphère constitue avec la couronne l'atmosphère du soleil, cette couche présente les caractéristiques suivantes:
  - Une épaisseur 2000 km.
  - Une température augmentant de  $4200 \text{ °C}$  à  $10^4 \text{ °C}$ .
- La couronne est la dernière couche du soleil, ses caractéristiques sont:
  - Elle est sans limite précise.
  - La température augmente de  $10^6 \text{ °C}$  à  $2 \cdot 10^6 \text{ °C}$ .

La figure 1 montre la structure du soleil.

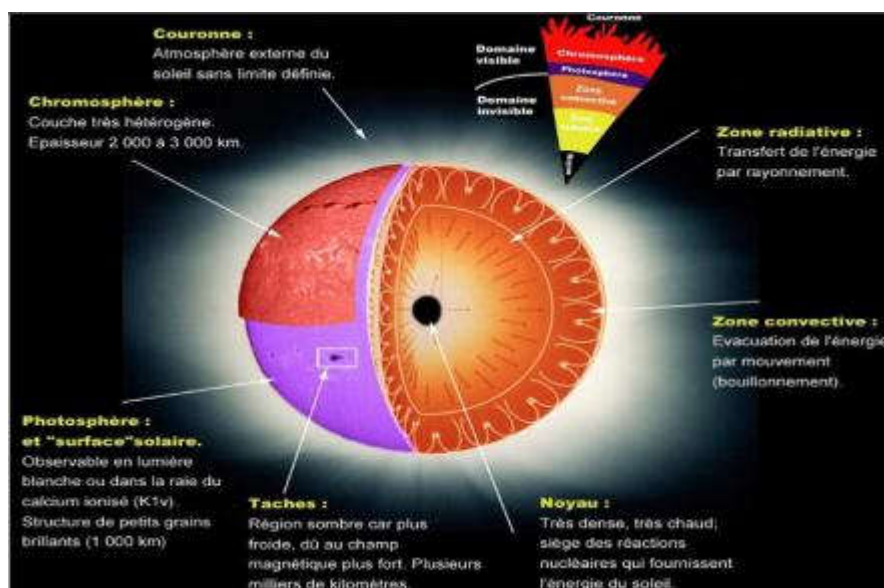


Figure 1 : La structure du soleil.

### 3. La constante solaire

La valeur du rayonnement solaire "IC", reçu par une surface perpendiculaire aux rayons solaires placée à la limite supérieure de l'atmosphère terrestre (soit à environ 80 Km d'altitude) varie au cours de l'année avec la distance Terre/Soleil. Sa valeur moyenne " E<sub>0</sub>" appelée constante solaire est de l'ordre de 1354 W.m<sup>-2</sup>. En première approximation, on peut calculer la valeur de "E" en fonction du numéro du jour de l'année "j" par la relation suivante:

$$E = E_0 [1 + 0,033 \cos (0,984 j)] \quad (1)$$

### 4. Le mouvement de la terre

Dans son mouvement autour du soleil, la terre décrit une ellipse dont le soleil est l'un de ses foyers, la révolution complète s'effectue en une période de 365,25 jours. Le plan de cette ellipse est appelé l'écliptique.

C'est au solstice d'hiver (21 décembre) que la terre est la plus proche du soleil : 147 millions de km. Au 22 juin la distance terre-soleil vaut 152 millions de km, c'est le jour ou la terre est la plus éloignée, c'est le solstice d'été. Le 21 mars et le 21 septembre sont appelés respectivement, équinoxes de printemps et équinoxe d'automne. Aux équinoxes, le jour et la nuit sont égaux.

En plus de sa rotation autour du soleil, la terre tourne également sur elle-même autour d'un axe appelé l'axe des pôles. Cette rotation s'effectue en une journée. Le plan perpendiculaire à l'axe des pôles et passant par le centre de la terre est appelé l'équateur. L'axe des pôles n'est pas perpendiculaire à l'écliptique, ils font entre eux un angle appelé inclinaison égale à 23°27'.

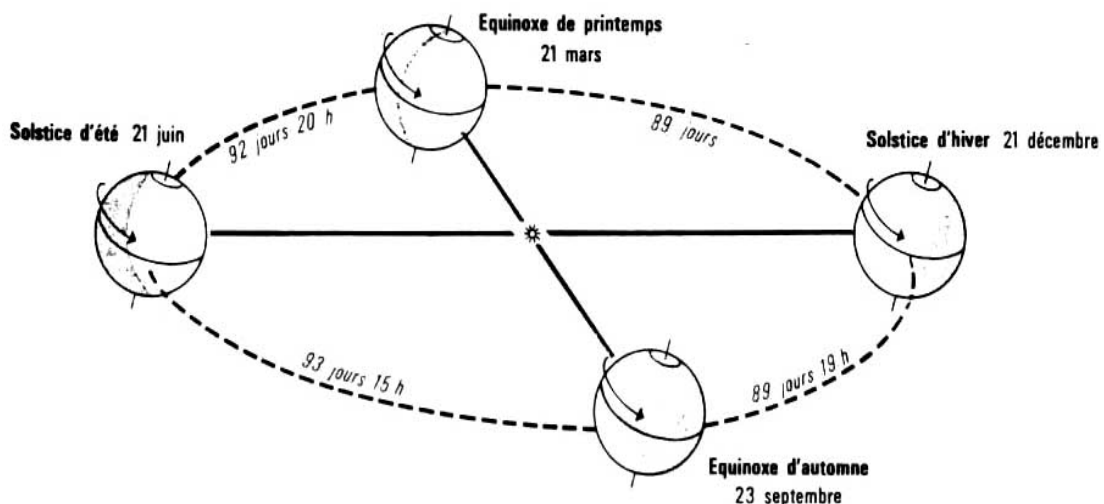
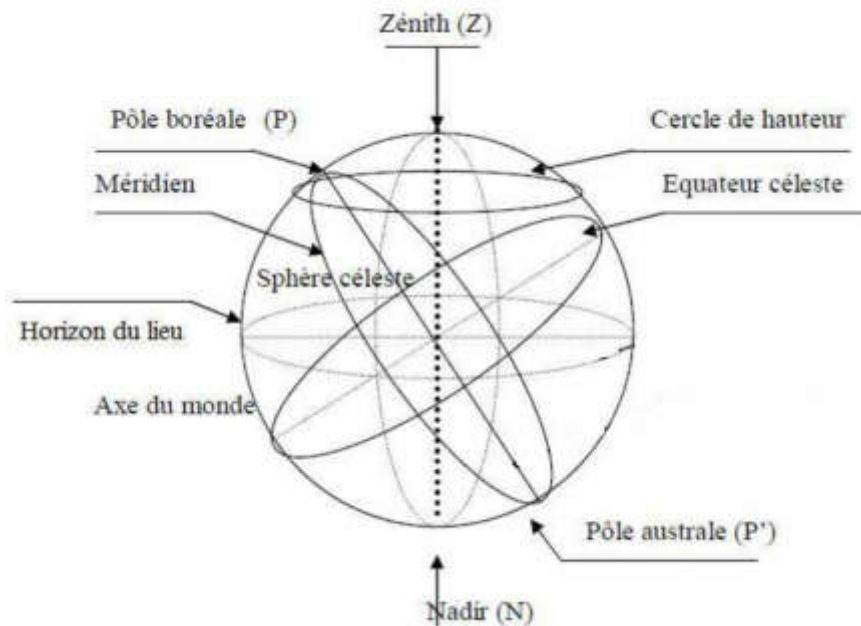


Figure 2 : Le mouvement de la terre autour du soleil

**5. La sphère céleste :** La sphère céleste est une sphère imaginaire d'un diamètre immense, qui admet pour centre la terre, et pour rayon la distance (terre – soleil). On considère que tous les objets visibles dans le ciel se trouvent sur la surface de la sphère céleste. On peut résumer les différentes caractéristiques sur la sphère elle-même comme c'est indiqué sur la figure 3.



**Figure 3** : La sphère céleste

La direction des objets peut être quantifiée de façon précise à l'aide d'un système de coordonnées célestes.

## 6. Les coordonnées célestes

**6.1. Les coordonnées géographiques** : La terre est pratiquement une sphère qui tourne autour d'un axe passant par le pôle nord, et le pôle sud. Chaque point de la terre est caractérisé par sa latitude et sa longitude. Ces deux grandeurs représentent, les coordonnées géographiques de ce point, ainsi que par son altitude. Figure(4)

➤ **La longitude (L)** : c'est l'angle formé par le méridien de Greenwich et le méridien du lieu considéré. La longitude est comprise entre  $-180^\circ$  (vers l'ouest) et  $+180^\circ$  (vers l'est). Comme la terre met 24 heures pour faire un tour sur elle-même ( $360^\circ$ ), chaque heure représente  $15^\circ$  d'écart de longitude et donc, chaque degré de longitude représente 4 minutes.

➤ **La latitude ( $\varphi$ )** : la latitude d'un lieu à la surface de la terre est l'angle entre l'équateur et le rayon de la terre passant par le lieu considéré. Elle est comptée positivement de  $0$  à  $+90^\circ$  vers le nord et négativement de  $0$  à  $-90^\circ$  vers le sud.

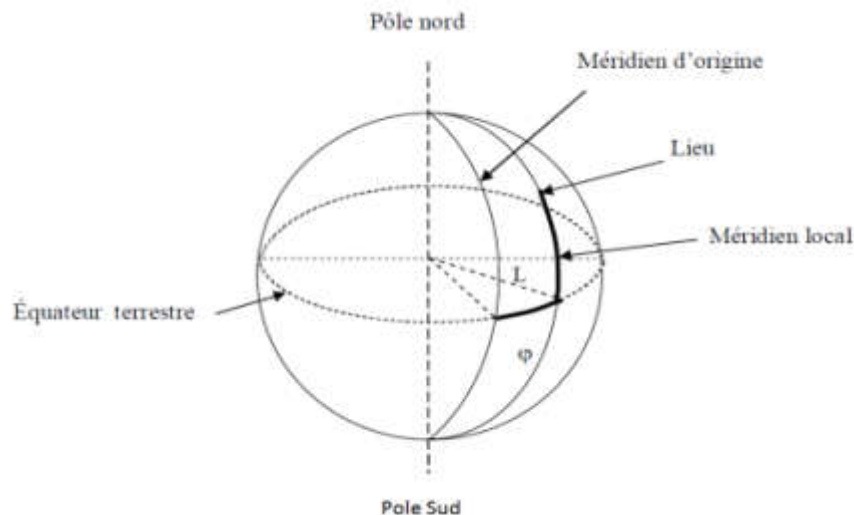


Figure 4 : Les coordonnées géographiques

## 6.2. Les coordonnées horaires

Les coordonnées horaires dont le repère sont données par l'axe des pôles et le plan de l'équateur, le méridien du lieu étant pris comme origine. Chaque point de l'espace est repéré par sa déclinaison  $\delta$  et son angle horaire  $\omega$ . Figure(6)

➤ **La déclinaison ( $\delta$ )** : c'est l'angle fait par le plan de l'équateur avec celui de l'écliptique. Elle varie au cours de l'année de  $+23^{\circ}27'$  à  $-23^{\circ}27'$  et détermine l'inégalité des durées des jours, elle vaut 0 aux équinoxes.  $\delta$  est donnée par la relation suivante :

$$\delta = 23.45^{\circ} \sin (60365 \times (284 + j)) \quad (2)$$

Où  $j$  est le numéro du jour dans l'année compté à partir du premier janvier.

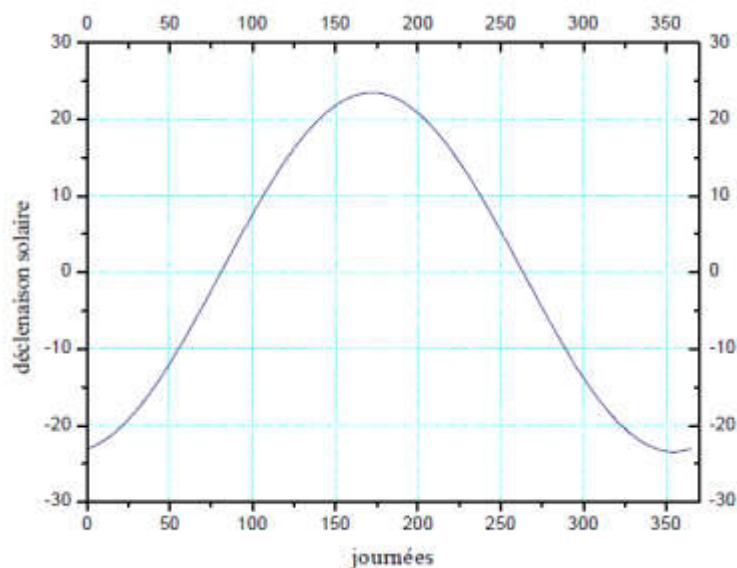
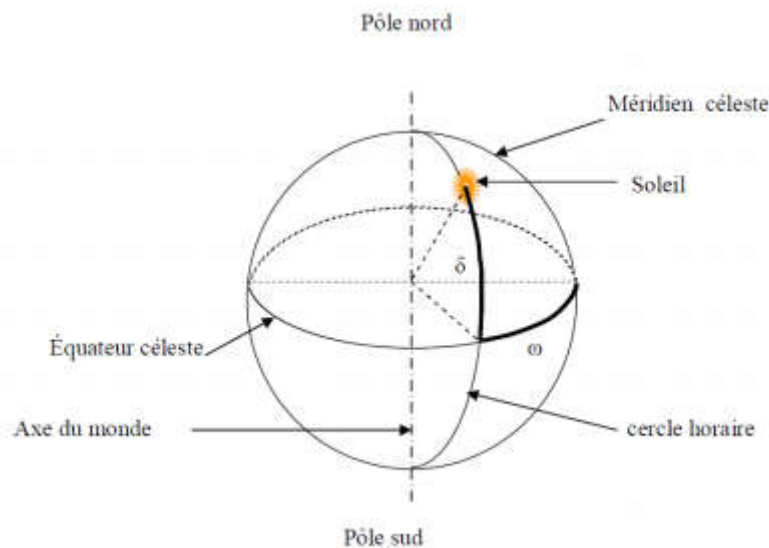


Figure 5: La déclinaison du soleil en fonction des jours

➤ L'angle horaire ( $\omega$ ) : C'est l'angle compris entre la méridienne origine passant par le sud et la projection du soleil sur le plan équatorial, il mesure la course du soleil dans le ciel. Il est donné par la relation suivante :

$$\omega = 15 (\text{TSV} - 12) \text{ avec TSV : temps solaire vrai}$$

Il vaut  $0^\circ$  à midi solaire, ensuite chaque heure correspond à une variation de  $15^\circ$ , car la période de la terre dans sa rotation sur elle-même est égale à 24h. Compté négativement le matin lorsque le soleil est vers l'est et positivement le soir.



**Figure 6 : Les coordonnées horaires**

**6.3. Les coordonnées horizontales :** Le repère horizontal est formé par le plan de l'horizon astronomique et la verticale du lieu.

Dans ce repère les coordonnées du soleil sont :

➤ La hauteur du soleil ( $h$ ) : La hauteur du soleil est l'angle formé par la direction du soleil et sa projection sur le plan horizontal. Il est particulièrement égal à  $0^\circ$  au lever et au coucher astronomiques du soleil, sa valeur est maximale à midi, en temps solaire vrai. L'expression de la hauteur du soleil est donnée par :

$$\sin (h) = \sin (\varphi) . \sin (\delta) + \cos (\varphi) . \cos (\delta) \cos (\omega) \quad (3)$$

$\varphi$  : Latitude du lieu.

$\delta$  : La déclinaison du soleil.

$\omega$  : L'angle horaire.

➤ L'azimut ( $a$ ) : C'est l'angle compris entre la projection de la direction du soleil sur le plan horizontal et le sud. L'azimut est compté positivement vers l'ouest et négativement vers l'est. Il est donné par la relation suivante :

$$\sin (a) = \cos (\delta) . \sin (\omega) \cos (h) \quad (4)$$

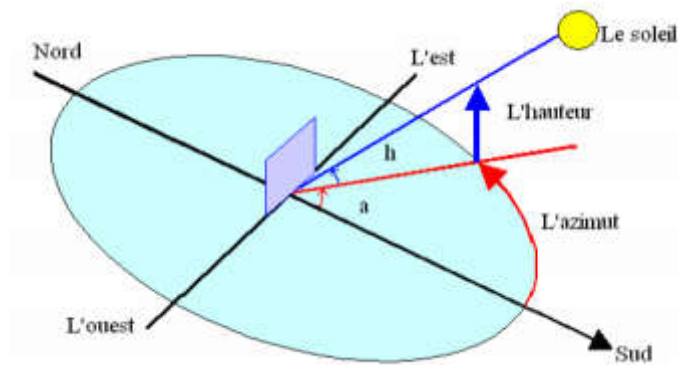


Figure 7 : Les coordonnées horizontales

## 7. Les Temps Solaires

**7.1. Le Temps Solaire Vrai (T.S.V) :** Le temps solaire vrai, en un instant et un lieu donné, est l'angle horaire du soleil  $\omega$ . Il est donné sous la forme suivante :

$$TSV = 12 + \omega 15 \quad (5)$$

## 7.2. Le Temps Solaire Moyen (T.S.M)

Le temps solaire moyen est appelé parfois temps local, Il est donné par la relation suivante:

$$TSM = TSV - Et \quad (6)$$

$$Et = 9.87 \sin[2.360365(N - 81)] - 7.53 \cos[360365(N - 81)] - 1.5 \sin[360365(N - 81)] \quad (7)$$

Et : est l'équation du temps exprimée en minutes.

N : est le numéro du jour dans l'année.

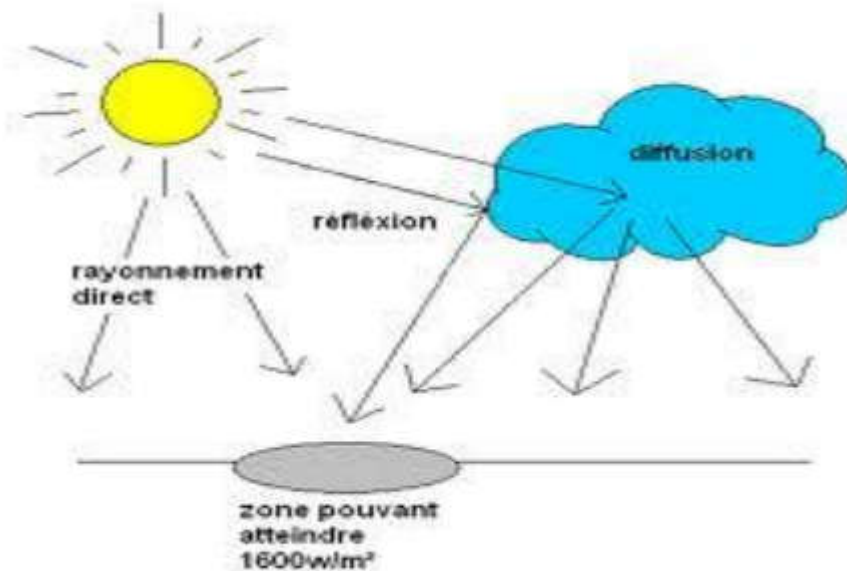
**8. Rayonnement solaire :** L'énergie reçue au niveau du sol est plus faible que 1354 w/m<sup>2</sup> (la constante solaire) car l'atmosphère absorbe une partie du rayonnement solaire (environ 15%) et la réémet dans toutes les directions sous forme de rayonnement diffus. L'atmosphère réfléchit une autre partie du rayonnement solaire vers l'espace (environ 6%). Le rayonnement global au niveau du sol se définit donc comme la somme du rayonnement direct et du rayonnement diffus figure(8) L'énergie reçue par une surface dépend en outre de la saison, de la latitude, des conditions météorologiques, du relief, de la pollution, de l'orientation de la surface considérée, etc.

**8.1. Rayonnement direct :** Le rayonnement direct est la lumière parvenant directement du soleil par ciel clair.

**8.2. Rayonnement diffus :** Le rayonnement diffus est le rayonnement émis par des obstacles (nuages, sol, bâtiments) et provient de toutes les directions. La part du rayonnement diffus n'est pas négligeable et peut atteindre 50% du rayonnement global (selon la situation géographique du

lieu). Le rayonnement global sur la terre et sa part de rayonnement diffus varie au cours de l'année.

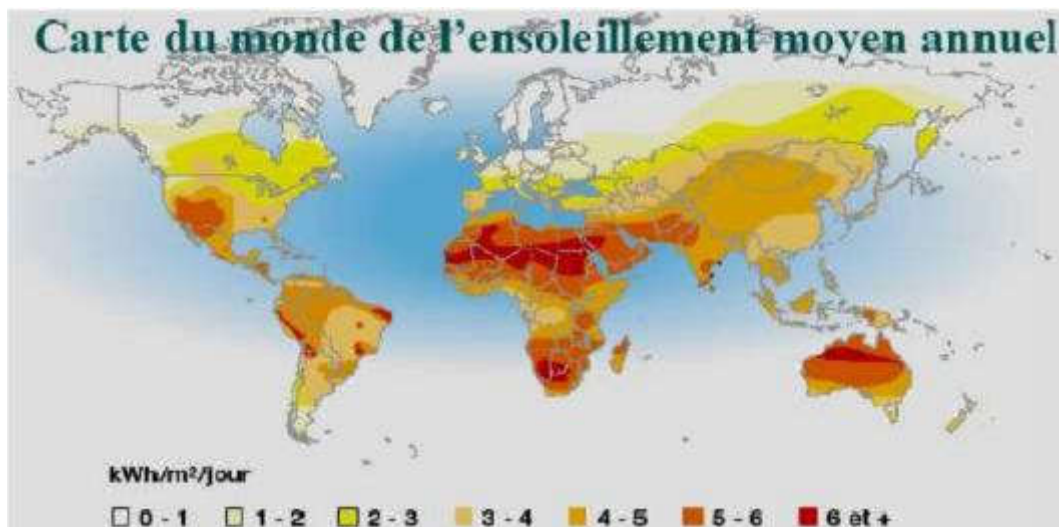
**8.3. Rayonnement global :** Le rayonnement global est la somme des rayonnements diffus et direct.



**Figure 8 :** Les composants du rayonnement solaire.

**9. Le gisement solaire en Algérie :** Le gisement solaire est un ensemble de données décrivant l'évolution du rayonnement Solaire disponible au cours d'une période donnée. Il est utilisé pour simuler le fonctionnement d'un système énergétique solaire et faire un dimensionnement le plus exact possible compte tenu de la demande à satisfaire.

De par sa situation géographique, l'Algérie dispose d'un gisement solaire énorme comme le montre dans la figure 9 :



**Figure 9 :** Carte du monde de l'ensoleillement moyen annuel

Suite à une évaluation par satellites, l'Agence Spatiale Allemande (ASA) a conclu, que l'Algérie représente le potentiel solaire le plus important de tout le bassin méditerranéen, soit 169.000 TWh/an pour le solaire thermique, 13,9 TWh/an pour le solaire photovoltaïque. Le potentiel solaire algérien est l'équivalent de 10 grands gisements de gaz naturel qui auraient été découverts à Hassi R'Mel. La répartition du potentiel solaire par région climatique au niveau du territoire algérien est représentée dans le tableau 2 selon l'ensoleillement reçu annuellement:

Régions	Régions côtières	Hauts plateaux	Sahara
Superficie (%)	4	10	86
Durée moyenne d'ensoleillement (h/an)	2650	3000	3500
Energie moyenne reçue (kWh/m <sup>2</sup> /an)	1700	1900	2650

**Tableau 2** : Ensoleillement reçu en Algérie par régions climatiques

La durée d'insolation dans le Sahara Algérien est de l'ordre de 3500h/an est la plus importante au monde, elle est toujours supérieure à 8h/j et peut arriver jusqu'à 12h/j pendant l'été à l'exception de l'extrême sud où elle baisse jusqu'à 6h/j en période estivale.



*Chapitre 2*  
*Conversion Thermique : Applications à*  
*Basse Température*

**1. Introduction :** L'énergie solaire est directement convertie en chaleur grâce à des capteurs solaire thermique. Elle est constituée d'une surface absorbante de couleur foncée (l'absorbeur), généralement placée derrière une vitre. Un matériau résistant à la chaleur et thermiquement isolant est placée derrière l'absorbeur pour limiter les pertes calorifiques. La chaleur absorbée par la surface noire est transmise à un fluide caloporteur (eau, air,..). Sa température peut atteindre 60 à 80°C, voire 100 °C.

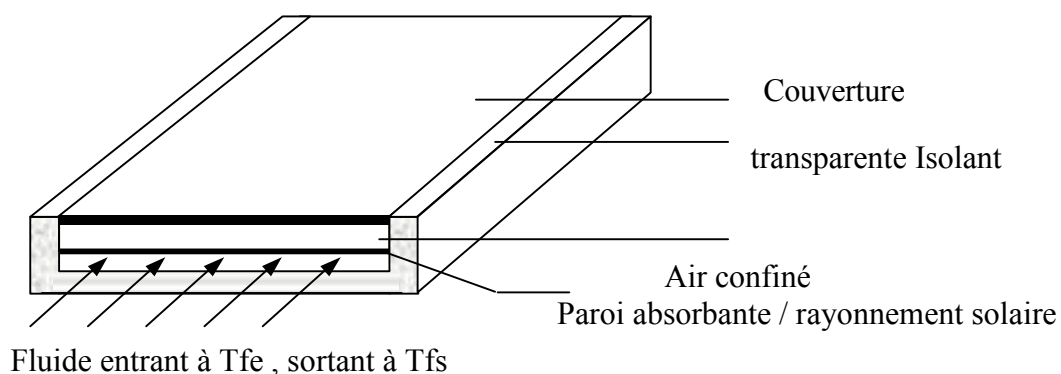
Les collectionneurs capteurs solaires thermiques sont classés comme faible, moyenne et haute température en fonction de la façon dont vous travaillez.

- Capteurs basse température, fournir de la chaleur utile à des températures en dessous de 65°C.
- Capteurs moyen température, sont des dispositifs qui concentrent le rayonnement solaire pour fournir de la chaleur utile à une température plus élevée, généralement entre 100 et 300 ° C.
- Capteurs haute température, ils travaillent à des températures supérieures à 500 ° C. Ils sont utilisés pour la production d'énergie.

## 2. Capteur solaire basse température

### 2.1. Principe de fonctionnement

Le capteur reçoit le rayonnement solaire, dans une bande de longueurs d'ondes  $0,15 \mu\text{m} < \lambda < 0,30 \mu\text{m}$ , le spectre visible allant de 0,40 à 0,75  $\mu\text{m}$ . Le capteur comporte un absorbeur, qui est une surface noircie pour accroître sa capacité d'absorption de l'énergie solaire. Si c'est une surface sélective, son absorptivité  $\alpha > 0,9$  et son émissivité  $\varepsilon < 0,1$ . L'absorbeur chauffé émet de l'infrarouge. Une isolation est utilisée pour limiter les pertes thermiques du capteur. On utilise des matériaux dont la conductivité thermique est très faible. Un vitrage est utilisé pour créer l'effet de serre, ce qui a pour effet d'augmenter la température de l'absorbeur. ...). Le schéma de principe d'un capteur solaire plan est donné sur la figure 1.



**Figure 1:** Schéma de principe d'un capteur solaire plan.

La paroi absorbante s'échauffe sous l'effet de l'absorption du rayonnement solaire incident. Le fluide qui circule sous cette paroi récupère par convection une partie de cette énergie absorbée et subit une élévation de température  $T_{fs} - T_{fe}$  à la traversée du capteur.

## 2.2. Bilan thermique global

Le bilan thermique de la paroi absorbante s'écrit :

$$\varphi_{sa} = \varphi_{p \rightarrow} + \varphi_u + \varphi_{st} \quad (1)$$

Où :  $\varphi_{sa}$  Flux solaire absorbé  
 $\varphi_{p \rightarrow}$  Flux perdu par la paroi absorbante  
 $\varphi_u$  Flux utile transmis au fluide caloporteur  
 $\varphi_{st}$  Flux stocké dans le capteur qui s'écrit :

$$\varphi_{st} = M_e c_{eau} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2)$$

Où :  $M_e$  Masse en eau du capteur définie par :  $\sum m_i c_i = M_e c_{eau}$ ,  $i$  représentant les différents éléments constitutifs du capteur

$T$  Température moyenne du capteur  
 $t$  Temps

La puissance absorbée par le capteur s'écrit :

$$\varphi_{s \rightarrow p} = \tau_{cs} \alpha_{ps} G^*(i, \gamma) \quad (3)$$

Où :  $\varphi_{s \rightarrow p}$  Flux solaire absorbé par la surface exposée (W)  
 $G^*(i, \gamma)$  Eclairement (densité de flux) solaire incident sur le capteur ( $W \cdot m^{-2}$ )  
 $\alpha_{ps}$  Coefficient d'absorption de la paroi absorbante par rapport au rayonnement solaire  
 $\tau_{cs}$  Coefficient de transmission de la couverture transparente par rapport au rayonnement solaire  
 $S$  Surface de la paroi absorbante.

Dans le cas où le fluide caloporteur ne subit pas de changement d'état, le flux utile s'écrit :

$$\varphi_u = q_{cf} (T_{fs} - T_{fe}) \quad (4)$$

Où :  $q_{cf}$  Débit calorifique du fluide caloporteur ( $W \cdot ^\circ C^{-1}$ ) = débit massique x capacité calorifique .

$T_{fe}$  Température du fluide caloporteur à l'entrée de l'absorbeur.

$T_{fs}$  Température du fluide caloporteur à la sortie de l'absorbeur.

Les déperditions thermiques du capteur sont mises sous la forme :

$$q_{p \rightarrow} = h_p (T_{pm} - T_a) S \quad (5)$$

- Où :  $h_p$  Coefficient global de pertes du capteur  
 $T_{pm}$  Température moyenne de la paroi absorbante  
 $T_a$  Température de l'air extérieur

### 2.3. Rendements d'un capteur solaire

Les rendements d'un capteur sont définis par rapport au flux solaire incident de la manière suivante :

- Le rendement global :

$$\eta = \frac{\varphi_u}{G^*(i,\gamma)S} \quad (6)$$

- Le rendement interne :

$$\eta_i = \frac{\varphi_u}{\varphi_{s \rightarrow p}} \quad (7)$$

- Le rendement optique :

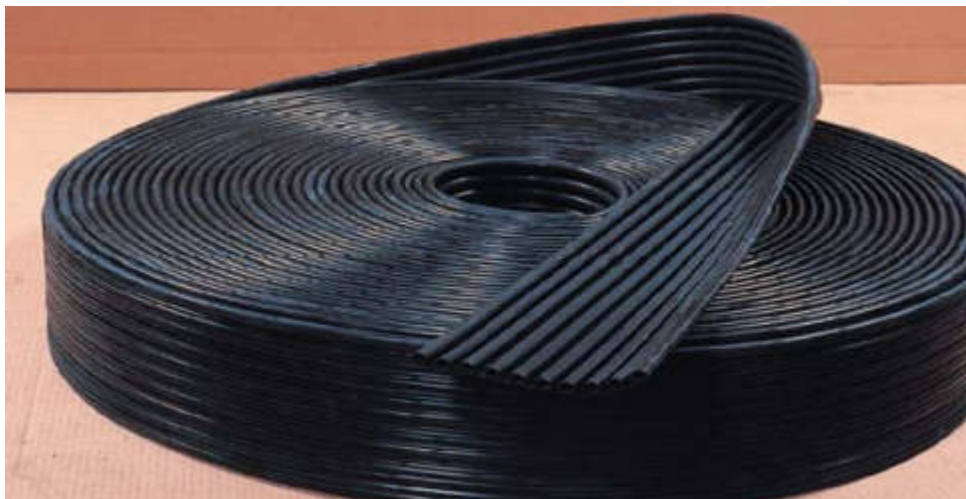
$$\eta_o = \frac{\varphi_{s \rightarrow p}}{G^*(i,\lambda)} \quad (8)$$

### 2.4. Les différents types de capteurs solaires thermiques

Il existe différents types de capteurs solaires thermiques selon le type de fluide, le niveau de température que les panneaux solaires permettent d'atteindre. On distingue 3 familles de capteurs solaires thermiques.

#### 2.4.1. Les capteurs plans non vitrés ou souples

C'est le modèle le plus rustique et également le plus économique. Il est généralement constitué d'une simple plaque de métal ou de matière plastique (absorbeur) dans laquelle circule le liquide à réchauffer (figure 2).



**Figure 2** : Capteur plan non vitré.

Le principal domaine d'utilisation de ce capteur est le chauffage des piscines de plein air. Celles-ci sont le plus souvent utilisées en été, lorsque la température ambiante et le rayonnement solaire sont élevés. Le niveau de température de l'eau des bassins est quant à lui inférieur à 30 °C. Dans ces conditions, l'efficacité des capteurs est très bonne, et l'utilisation de capteurs vitrés ne permettrait pas une meilleure collecte de l'énergie solaire.

L'absence de gel pendant la période autorise la circulation directe de l'eau de la piscine dans les capteurs. Afin d'éviter des problèmes de corrosion et également pour des raisons économiques, les constructeurs de matériels utilisent souvent des matières plastiques (figure 3).



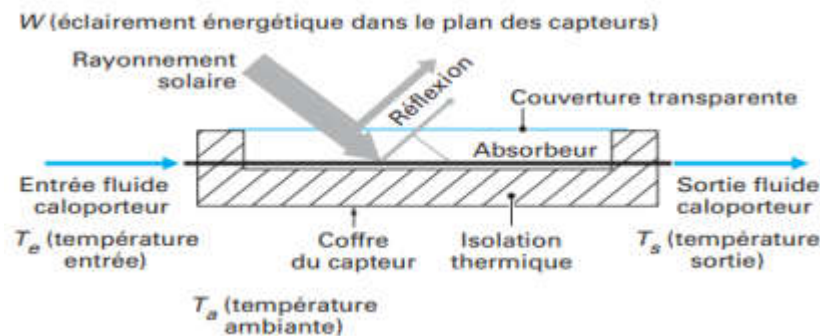
**Figure 3 :** Piscine publique utilisant des capteurs souples.

Les capteurs sans vitrage peuvent également être utilisés pour des installations de production d'eau chaude sanitaire. C'est en particulier le cas dans des régions chaudes et fortement ensoleillées. La parfaite intégration architecturale qu'autorise ce type de produit permet la mise en œuvre de surfaces plus importantes, pour compenser la différence d'efficacité avec des capteurs vitrés, en particulier l'hiver (figure 4).



**Figure 4 :** Installation de production d'eau chaude sanitaire.

**2.4.2. Les capteurs plans vitrés :** Les capteurs munis d'une couverture transparente, souvent appelés « capteurs vitrés », sont les plus utilisés, car ils correspondent au domaine d'application le plus courant : le chauffage de l'eau sanitaire. La température d'utilisation est en général inférieure à 70 °C. Plus rarement, certains d'entre eux, munis d'une couverture transparente de type « double vitrage », permettent d'atteindre des températures de fonctionnement de l'ordre de 100 °C (figure 5).



**Figure 5 :** Coupe d'un capteur vitré.

Le capteur vitré est constitué de différents composants :

- ✓ le coffre ;
- ✓ l'isolation thermique ;
- ✓ l'absorbeur ;
- ✓ la couverture transparente.

**2.4.3. Les capteurs sous vides :** Lorsque la température de fonctionnement du capteur est très élevée ( $> 100$  °C) ou lorsque la température ambiante est faible (région de montagne), il est intéressant d'utiliser un capteur solaire dit « sous vide », qui se présente sous la forme de tubes de faible diamètre (jusqu'à une quinzaine de centimètres) dans lesquels sont disposés les absorbeurs, de conception identique à celle d'un capteur plan. L'intérieur du tube est vidé de l'air qu'il contient et des pertes par convection entre l'absorbeur et la paroi vitrée du tube sont ainsi supprimées. Le capteur sous vide voit ainsi ses déperditions limitées au rayonnement infrarouge. Pour limiter les effets de celui-ci, la surface de l'absorbeur possède un revêtement « sélectif » (figures 6 et 7).



Figure 6 : Détail d'un capteur solaire sous vide.

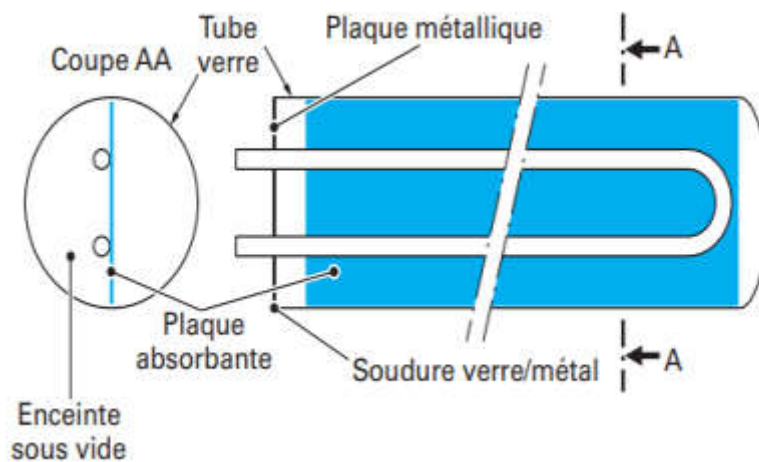


Figure 7 : Coupe d'un capteur sous vide.

## 2.5. Applications

Les applications du solaire thermique à basse température sont nombreuses. On peut citer entre autres:

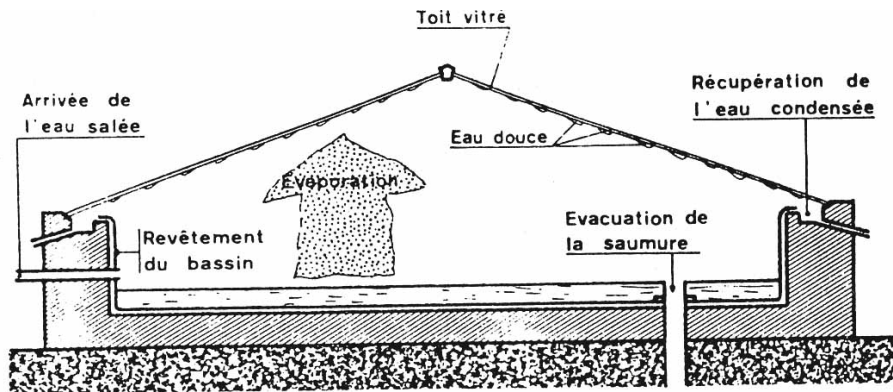
- Le distillateur solaire
- Le chauffe-eau solaire
- Froid et climatisation solaire
- Le séchoir solaire

### 2.5. 1. Les distillateurs solaires :

La disponibilité de l'eau potable est aujourd'hui une préoccupation majeure de l'humanité. La terre est recouverte d'eau à 71%, mais 98% de ce volume à une concentration en sel trop élevée. Cette eau n'est donc pas potable. Elle ne peut pas non plus être utilisée dans l'irrigation ou dans l'industrie.

- **Distillation a un étage**

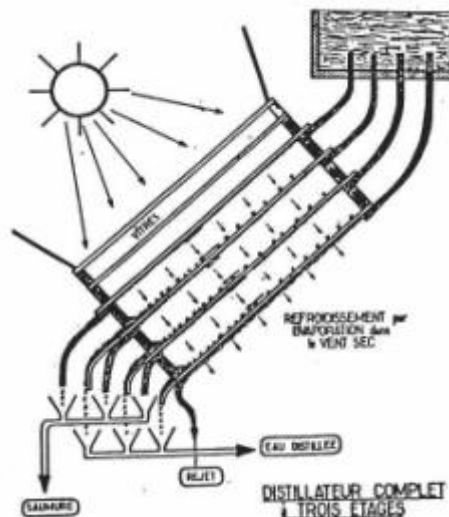
C'est le plus simple et le plus répandu, on en trouvera une schématisation sur la figure.8. L'eau placée dans un bac noirci disposé au fond d'un capteur solaire s'échauffe par absorption du rayonnement solaire traversant la vitre. Cet échauffement provoque une évaporation superficielle, la vapeur d'eau produite venant ensuite se condenser sur la vitre plus froide. Il suffit alors de récupérer l'eau distillée ruisselant sur la face interne de la vitre à l'aide d'un système de gouttières placées de chaque côté de la vitre.



**Figure 8:** Schéma de principe d'un distillateur solaire à un étage.

- **Distillateur a plusieurs étages**

Pour augmenter le rendement des distillateurs solaires, le Pr. Le Goff a imaginé un distillateur à plusieurs étages où la chaleur libérée par la condensation est récupérée dans un 2<sup>ème</sup> étage pour servir à évaporer une masse d'eau supplémentaire suivant le schéma de la figure 9.



**Figure 9:** Schéma du distillateur solaire DIFICAP du Pr. Le Goff.

La production distillée peut théoriquement atteindre 10 à 15 l.m<sup>-2</sup> par jour. Les problèmes liés à sa réalisation n'ont pas jusqu'à présent permis sa vulgarisation.

**2.5.2. Production d'eau chaude :** La production d'eau chaude sanitaire est à l'heure actuelle l'application la plus développée de l'énergie solaire thermique. Sous un climat tropical sec, un

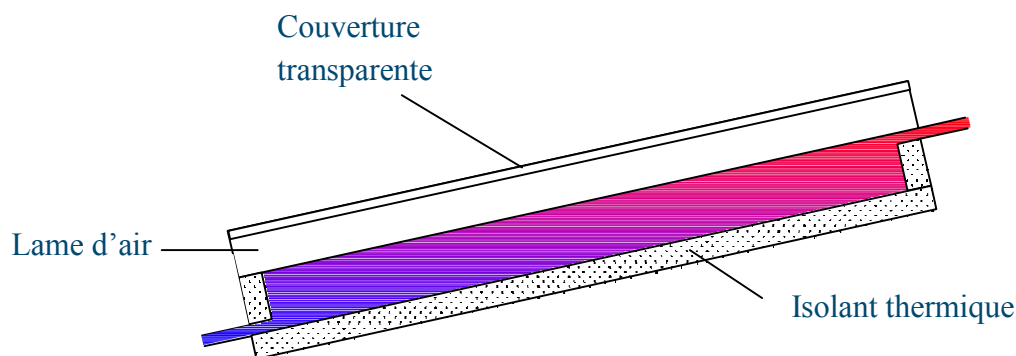


chauffe-eau solaire performant et bien dimensionné peut permettre de satisfaire les besoins en eau chaude d'une famille toute l'année. Sous un climat tropical humide, il sera nécessaire à certaines périodes d'utiliser une énergie d'appoint. Le chauffe-eau solaire permettra quand même de réaliser d'importantes économies. Il existe plusieurs types de chauffe-eau solaire que nous allons détailler.

- **Chauffe-eau solaire capteur-stockeur**

Ce sont des appareils qui se présentent comme des capteurs solaires à eau classiques avec coffre, vitrage, isolant et absorbeur. La contenance de l'absorbeur, de l'ordre de  $75 \text{ l.m}^{-2}$  permet d'assurer dans le même appareil les fonctions de captage et de stockage de l'énergie.

Ces appareils sont peu encombrants, peu coûteux et faciles à installer. Ils présentent un bon rendement lors des journées ensoleillées (résistance thermique négligeable entre l'absorbeur et l'eau : contact sur toute la surface de l'absorbeur). Cependant les pertes de chaleur sont importantes la nuit et la température de l'eau le matin en période fraîche (décembre, janvier en climat tropical sec) est souvent trop bas. Des modèles de fabrication locale bien isolés ont été testés et donnent des résultats satisfaisants. Le problème principal à résoudre est la réalisation d'un capteur plat d'une épaisseur de l'ordre de 5 mm résistant à la pression d'eau du réseau.



**Figure 10** : Schéma d'un chauffe-eau solaire capteur-stockeur

- **Chauffe-eau solaire monobloc**

Il s'agit d'appareils dont le ballon de stockage d'eau chaude est solidaire du capteur solaire comme représenté sur la figure.2, la circulation d'eau entre les deux éléments s'effectuant par thermosiphon. La figure.3 représente une vue éclatée d'un chauffe-eau solaire monobloc commercialisé.

Pour un bon fonctionnement de ces appareils, les règles suivantes doivent être respectées :

- Eviter les possibilités d'accumulation d'air en un point haut du circuit
- Placer les tubes en parallèle pour éviter les pertes de charge
- Le bas du réservoir doit être situé au-dessus du capteur
- Respecter une inclinaison minimale ( $>10^\circ$ , on choisit souvent  $30^\circ$ ) pour un fonctionnement correct du thermosiphon

La figure.11 illustre quelques-unes de ces règles d'installation.

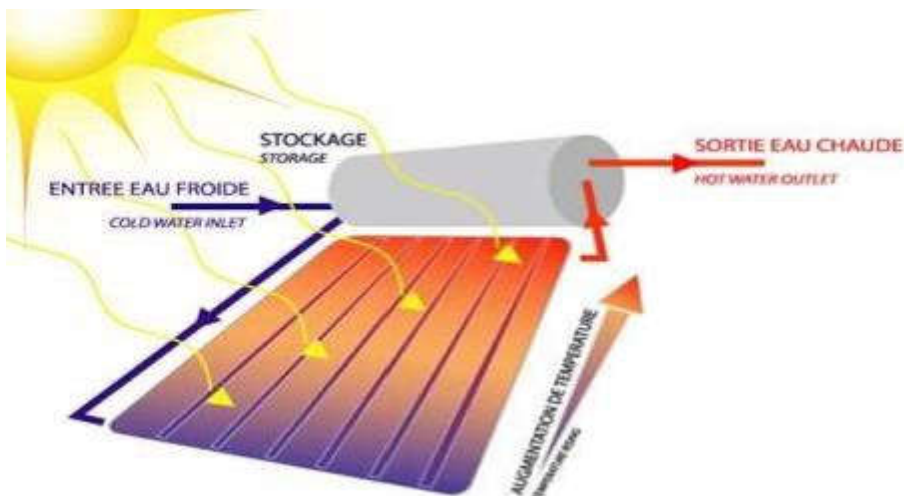


Figure 11 : Schéma de principe d'un chauffe-eau solaire monobloc.

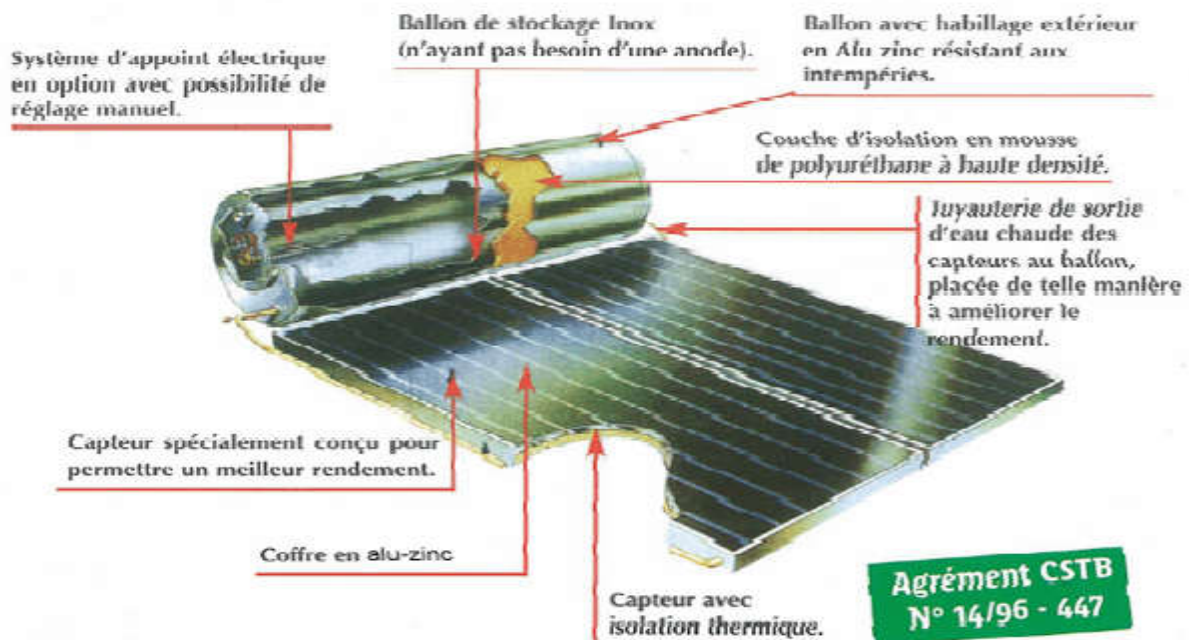


Figure 12 : Vue éclatée chauffe-eau solaire BP Solar (<http://www.apex-bpsolar.com/solaire/chauffeEau>)

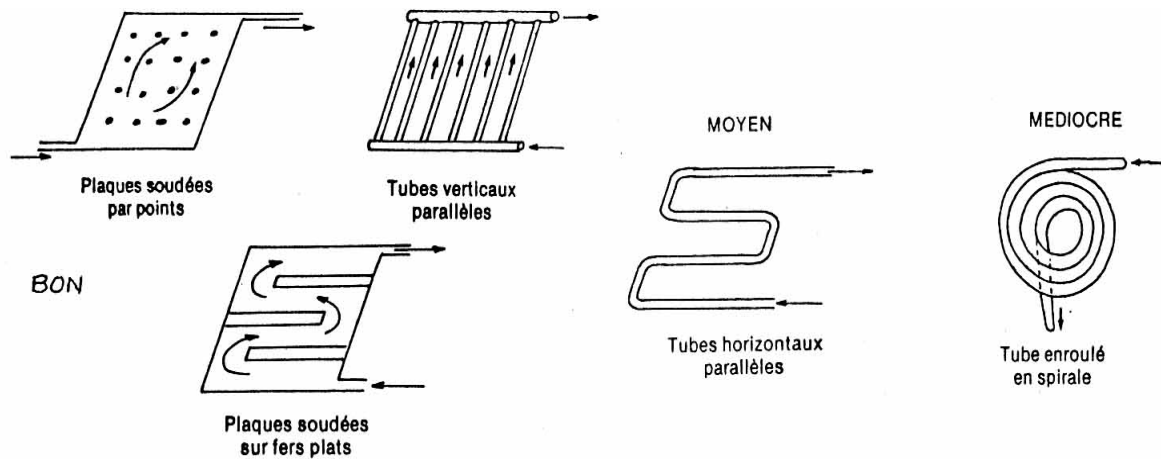


Figure 13 : Règles d'installation des chauffe-eau solaires monoblocs

- **Chauffe-eau solaire à éléments séparés**

Ces appareils sont constitués d'un ballon relié à un ou plusieurs capteurs par des tuyauteries de longueur variable. Le ballon non solidaire du capteur peut être installé à l'intérieur du logement. Ils fonctionnent le plus souvent en convection forcée (circulation de l'eau assurée par une pompe) ce qui nécessite le raccordement au réseau électrique. D'une plus grande souplesse d'utilisation, leur bon fonctionnement est davantage tributaire du soin apporté à leur installation. On trouvera sur la figure 14 le schéma de principe d'une installation type et sur la figure 15 le détail des différents éléments constitutifs.

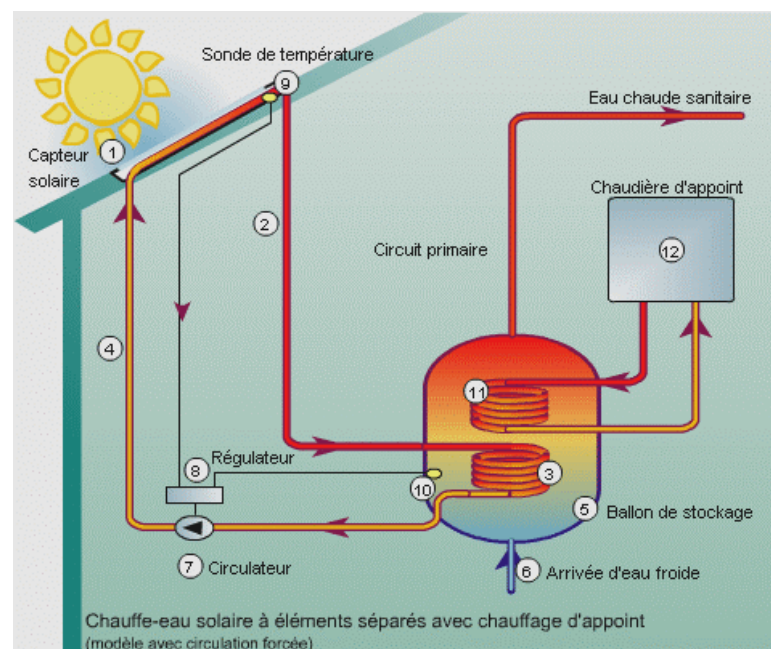
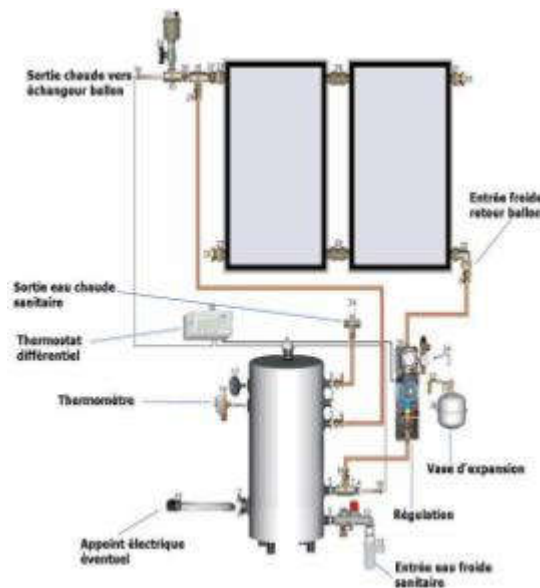


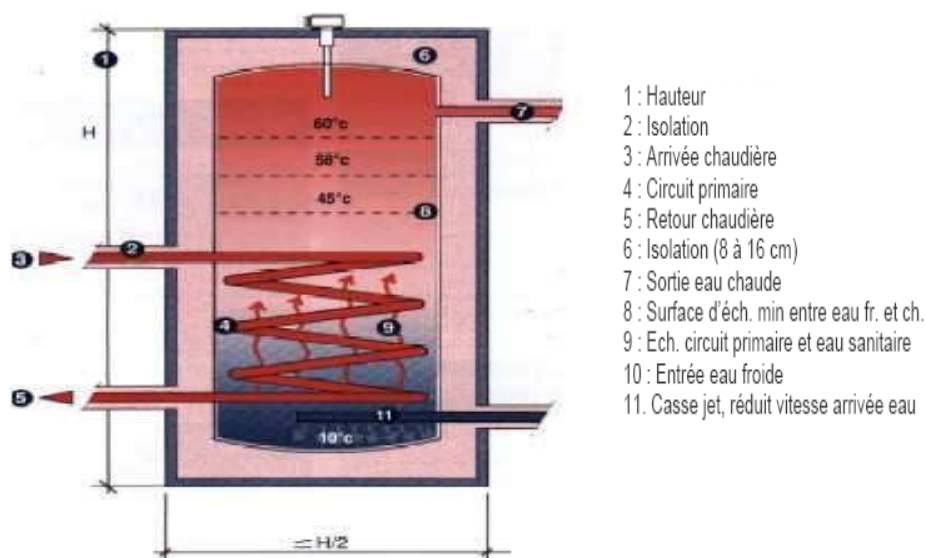
Figure 14 : Schéma de principe d'un chauffe-eau solaire à éléments séparés

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.

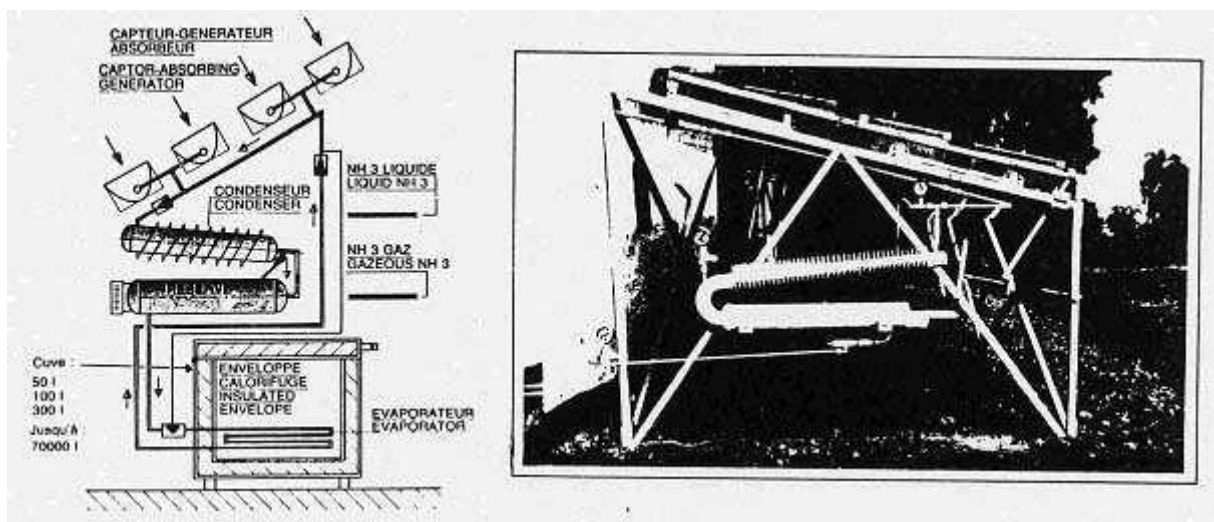
Des réfrigérateurs fonctionnant sur ce principe sont opérationnels comme celui de Flechon et Godmel dont on trouvera le schéma sur la figure 17.

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.

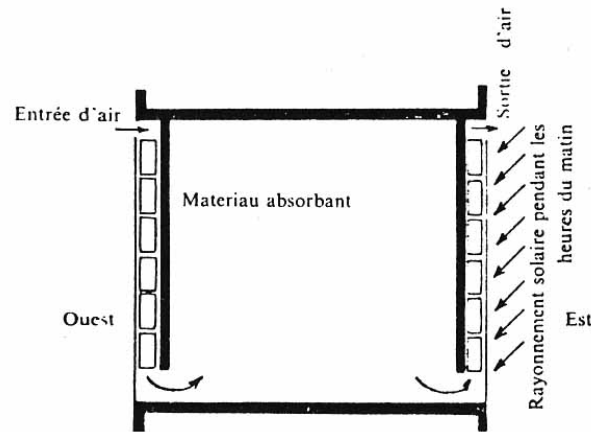


Figure 18: Schéma du procédé Dannies (d'après IIF)

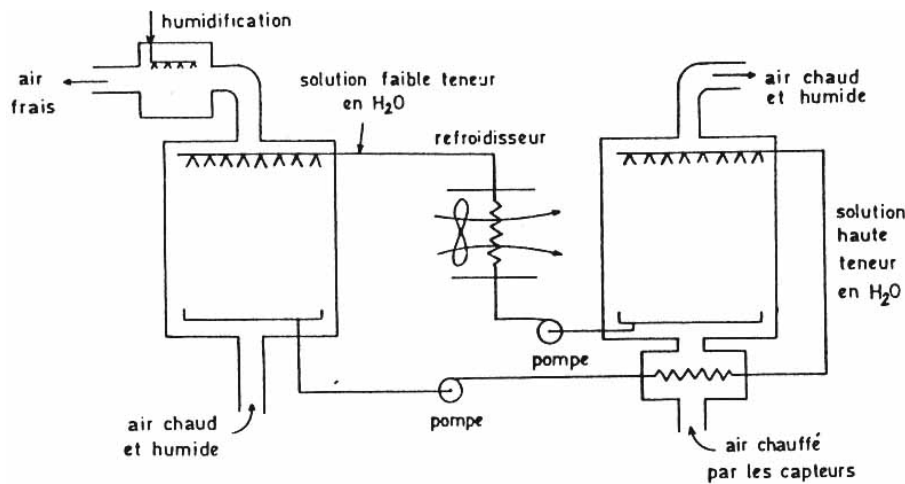


Figure 19 : Schéma du procédé Lof

#### 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<sup>ème</sup> siècle avec l'apparition du concept de l'activité de l'eau (*water activity*  $A_w$ ) 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 portatif



**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

### **Conclusion**

Les applications de la solaire thermique basse température sont assez nombreuses et concourent à la satisfaction de très nombreux besoins dans le domaine de l'agriculture, de la santé et de l'amélioration de la qualité de la vie. La cuisson solaire, qui sort du cadre des basses températures, n'est pas abordée ici. Signalons cependant que c'est un domaine important, contribue à la qualité de la vie et également à la préservation de l'environnement.

*Chapitre 3*  
*Stockage de L'énergie Solaire*

**1. Introduction :** Stockage de l'énergie solaire lorsque vous avez beaucoup pour l'utiliser, quand vous en avez besoin d'une nécessité. Le stockage permet de différer une utilisation de l'énergie par rapport à sa production, en évitant ainsi qu'à chaque instant la demande et l'offre soient égales. On peut stocker de l'électricité ou de la chaleur. Il existe de nombreuses technologies de stockage. Dans ce cours, nous allons en décrire quelques unes.

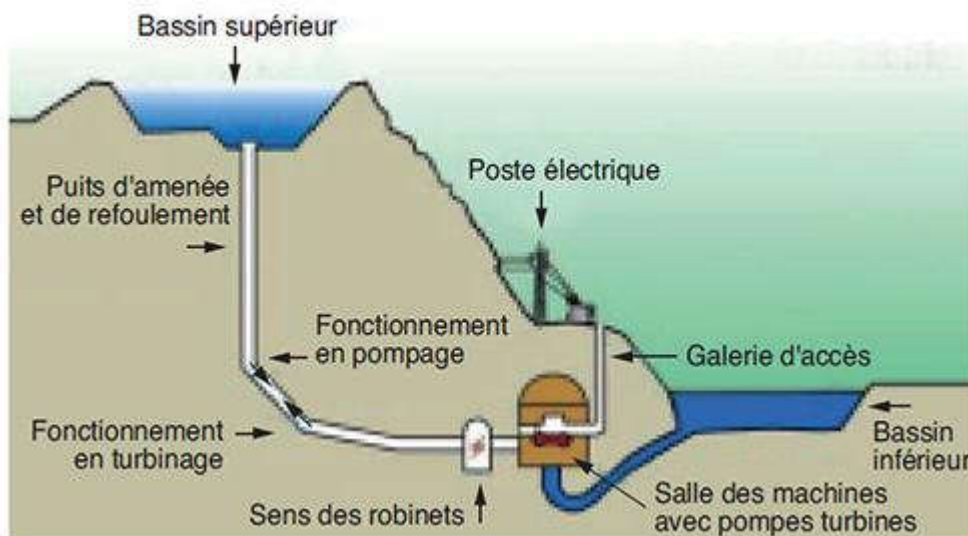
## 2. Les différentes technologies de stockage de l'énergie solaire

### 2.1. Mode de stockage mécanique

#### • Station de transfert d'énergie par pompage (STEP)

Les stations de pompage sont des technologies de stockage par gravitation. Elles sont composées de deux retenues d'eau à des hauteurs différentes, reliées par un système de canalisations. Elles sont équipées d'un système de pompage, permettant de transférer l'eau du bassin inférieur vers le bassin supérieur en heures creuses. En heures pleines, la station fonctionne comme une centrale hydroélectrique classique.

Ce système de stockage repose sur le principe de l'énergie gravitaire. Il représente près de 99 % des capacités de stockage massif d'énergie installées dans le monde, avec près de 400 STEP pour une capacité totale d'environ 125 GW.



**Figure 1 :** Schéma de fonctionnement d'une (STEP).

La STEP est une technologie mature nécessitant néanmoins des installations conséquentes et un contexte géographique spécifique. Elle est en plein essor dans les régions montagneuses du monde entier, notamment en Asie, où est prévu un doublement de la capacité d'ici à 2020, et en Europe, où plus de dix projets sont actuellement en développement. Plusieurs projets consistent également à convertir un barrage hydroélectrique existant en STEP.

### Générale

D'autres approches géographiques sont également à l'étude comme l'installation de STEP en bord de mer avec un réservoir positionné au-dessus d'une falaise, l'utilisation du dénivelé créé lors d'une extraction minière à ciel ouvert, la création d'îles ou de digues artificielles en offshore, ou encore la construction de digues en liaison avec des dépressions topologiques terrestres. Un cas opérationnel de STEP en bord de mer existe à Okinawa au Japon depuis 15 ans, le dénivelé de la falaise étant d'environ 100 m et la puissance fournie de l'ordre de 100 MW.

#### • **Stockage par air comprimé classique (CAES, Compressed Air Energy Storage)**

Le principe du CAES repose sur l'élasticité de l'air : l'air est d'abord comprimé via un système de compresseurs, à très haute pression (100 à 300 bar) pour être stocké dans un réservoir (cavités souterraines par exemple). Pour récupérer cette énergie potentielle, l'air est détendu dans une turbine qui entraîne un alternateur. Comme l'air se réchauffe pendant sa compression, la chaleur à la sortie du compresseur peut être récupérée via des échangeurs et stockée afin d'être utilisée pour réchauffer la turbine.

Il existe deux types de stockage à air comprimé : CAES classique et Advanced Adiabatic CAES (AA-CAES)

##### → **CAES classique**

Le système fonctionne pratiquement comme une centrale à gaz sauf que les phases de compression et de détente sont séparées et décalées dans le temps. Ce système met en œuvre une turbine à gaz; la chaleur produite n'est pas stockée mais seulement récupérée et le stockage de l'air comprimé se fait dans des cavernes souterraines.

##### → **Advanced Adiabatic CAES (AA-CAES)**

Le principe du AA-CAES reprend cette idée, mais propose que les deux énergies thermique et de compression soient stockées dans deux réservoirs spécifiques. La chaleur nécessaire pour réchauffer l'air comprimé pour sa détente est apportée par cette réserve et le système s'affranchit ainsi des apports en gaz comme dans le CAES classique.

\* Un processus est dit adiabatique lorsque les deux systèmes qui le composent n'échangent pas de chaleur entre eux.

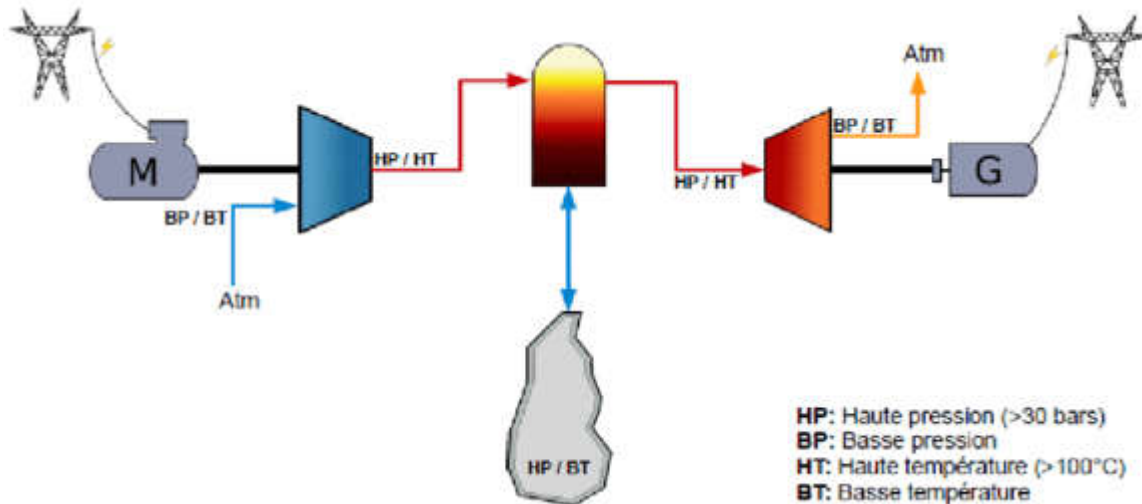


Figure 2 : Principe du AA-CAES

- **Energie mécanique cinétique**

L'énergie peut être stockée sous forme d'énergie cinétique dans un « volant d'inertie », dispositif en forme de roue tournant autour de son axe central. Une machine électrique lui fournit l'énergie cinétique (fonctionnement moteur) et la récupère selon les besoins (fonctionnement générateur), entraînant une baisse de la vitesse de rotation du volant d'inertie. Ce système permet de restituer plus de 80% de l'énergie accumulée mais pour un temps de stockage limité. En pratique, le volant d'inertie est utilisé pour un lissage à très court terme de la fourniture d'énergie au sein d'appareils de production. C'est notamment le cas des moteurs thermiques et surtout des moteurs diesel.

## 2.2. Mode de stockage électrochimique et électrostatique

Ce mode de stockage, dont le principe repose sur la conversion de l'énergie chimique en énergie électrique, concerne principalement les batteries, piles et accumulateurs.

Les batteries utilisées comme réserve massive d'énergie peuvent délivrer une puissance pendant quelques heures ou sur plusieurs jours et résister à un certain nombre de cycles de charge/décharge. Leur utilisation se situe plutôt à l'échelle d'un bâtiment ou d'une petite collectivité où elles permettent d'optimiser la gestion de sources d'énergie renouvelables, solaire ou éolienne (ou autre), notamment pour le lissage de la charge journalière en stationnaire. Quelques batteries au plomb peuvent répondre à ce besoin, de même que des batteries au sodium ou lithium-ion, mais ce sont surtout les batteries à flux qui font l'objet d'études pour le stockage massif à ce jour.

En effet, la notion de durée de vie liée au nombre de cycles de charge/décharge entre en ligne de compte pour l'utilisation des batteries en stationnaire : les batteries à flux peuvent

## Générale

revendiquer plus de 10 000 cycles, contre quelques centaines pour les batteries au plomb, voire quelques milliers pour les nouvelles batteries sodium (NaS et Zebra). Les systèmes de stockage électrochimique sont généralement composés d'un ensemble de batteries qui cumule la puissance de chaque unité. Leur attractivité repose sur leur flexibilité et leur réactivité.

## • Batteries à flux

Ces batteries permettent le stockage des couples électrochimiques (électrolytes à l'état liquide) à l'extérieur de la batterie. Les électrolytes circulent à travers une cellule d'échange d'ions dont les deux compartiments sont séparés par une membrane solide.

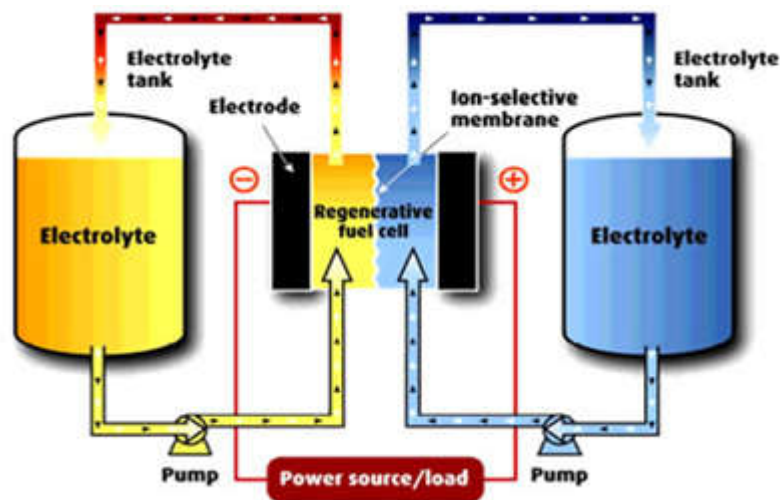


Figure 3 : Schéma d'n batterie à circulation

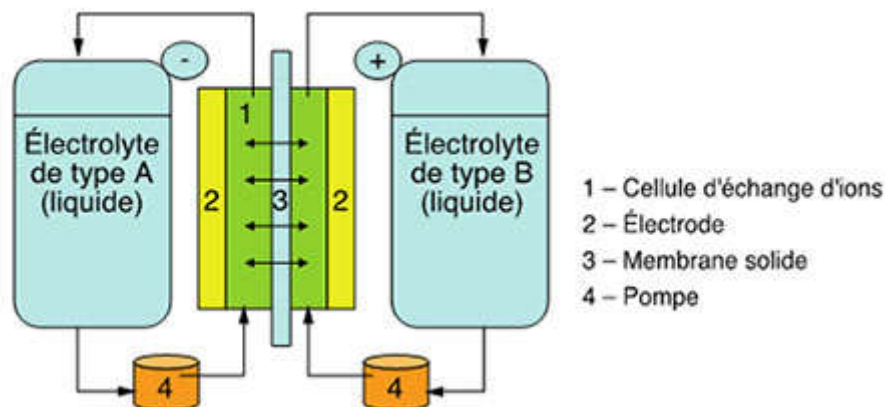


Figure 4 : Principe d'une batterie à flux

Les électrolytes peuvent également fonctionner comme liquides caloporteurs, facilitant ainsi la régulation de température, alors que les batteries conventionnelles dépendent d'une conduction passive de la chaleur, conduisant à des températures élevées à l'intérieur des cellules. Plusieurs types de batteries à flux sont ou ont été étudiés mais deux seulement sont actuellement opérationnels.

## → Batteries Zn-Br

### Générale

Ces batteries sont fondées sur le couple zinc/brome ( $Zn^{+}/Br^{-}$ ). Plusieurs démonstrateurs ont été réalisés (par exemple un système de 400 kWh réalisé à partir de modules de base de 50 kWh à Akron, Michigan) et quelques installations commerciales sont aujourd'hui opérationnelles.

Cependant, la nature corrosive du brome et la formation de dépôts solides de zinc constituent un frein important à leur mise en œuvre.

#### → Batteries Vanadium-Redox Flow (VBR)

Le stockage de l'énergie est assuré par les couples redox (réaction chimique d'oxydo-réduction par échanges d'électrons) de vanadium dans une solution d'acide sulfurique,  $V^{2+}/V^{3+}$  dans l'électrolyte négatif et  $V^{4+}/V^{5+}$  dans l'électrolyte positif.

Un des avantages de cette technologie réside dans l'absence de contamination possible d'un compartiment électrolytique à l'autre puisqu'il s'agit du même composant chimique.

Plusieurs installations sont en service à ce jour :

- King Island en Tasmanie, qui fonctionne depuis 2003 avec une batterie de capacité moyenne de 200kW/4h ou de 400kW/10 s en période de pointe ;
- L'unité de stockage associée à la ferme éolienne de Tomamae Villa au Japon, d'une capacité de 4 MW/90min, en service depuis 2005.

#### • Batteries sodium pour stockage stationnaire

En ce qui concerne ce type de batteries, la R&D est aujourd'hui en plein essor et les installations se multiplient. Ces batteries fonctionnent à ce jour à haute température (de l'ordre de 300 °C) puisque les électrodes sont sous forme liquide.

##### → Batteries sodium/soufre (NaS)

Les électrodes liquides sont des formes ioniques de sodium (pôle négatif) et de soufre (pôle positif), l'électrolyte solide intermédiaire est une céramique d'alumine bêta (de sodium) et la température nécessaire est comprise entre 290 et 390 °C. Plus de 190 systèmes sont aujourd'hui installés au Japon, dont le plus performant a été mis en service en 2008 en liaison avec la ferme éolienne de Rokkasho et affiche une puissance de 34MW. Une installation expérimentale de 1 MW de puissance, développée par EDF et NGK, a été construite fin 2009 à la Réunion pour soutenir le réseau électrique de l'île en période de pointe.

##### → Batteries sodium/chlorure de nickel (Zebra)

Le concept de base a été défini dès 1985 à l'université de Pretoria (Zebra, Zeolite Battery Research Africa Project) : il met en jeu une électrode positive, mélange de Ni-NaCl, avec une



*Générale*

électrode liquide auxiliaire, le  $\text{NaAlCl}_4$ . Ces batteries sont encore limitées aux applications mobiles, mais un système de 100 kWh a été testé en Ontario (par Halton Hills Hydro) avec un rendement de 84 %.

**• Batteries lithium-ion "avancées"**

Le fonctionnement de la batterie lithium-ion repose sur l'échange réversible de l'ion lithium entre une électrode positive et une électrode négative. La R&D s'intensifie sur des batteries Li-ion stationnaires de capacité compatible avec le stockage temporaire d'énergie renouvelable. Ainsi, on peut citer à titre d'exemple le projet européen STOREvisant à mettre en service en 2013 un système de stockage (produit par Saft) capable de restituer 1 MW/3 h sur l'île espagnole de Grande Canarie.

Le plus important démonstrateur à ce jour se trouve en Chine, à Zhangbei ; il a été mis en service fin 2011 et allie un système de batteries Li-ion (produit par BYD) d'une capacité de 20 à 36 MW sur 4 à 6 h avec une production éolienne de 100 MW et une production solaire de 40 MW.

**2.3. Mode de stockage thermique**

Le stockage de chaleur concerne principalement le chauffage (ou la climatisation) des bâtiments, qui représente près de 50 % de la consommation énergétique en Europe.

Les sources de chaleur proviennent en premier lieu du solaire pour lequel le stockage permettrait de réduire les effets de son intermittence et du décalage entre les périodes les plus productives (le jour/l'été) par rapport aux périodes de plus grandes demandes (le soir/l'hiver). Il est également possible de stocker la chaleur produite par certaines industries en corollaire de leur activité principale (centrales à gaz ou d'incinération par exemple).

Tout matériau possède la capacité de libérer ou de stocker de la chaleur via un transfert thermique. Ce transfert peut être :

- par chaleur sensible, c'est-à-dire par changement de la température du matériau (la chaleur est alors emmagasinée dans le matériau),
- ou par chaleur latente, c'est-à-dire par changement de phase du matériau, généralement changement solide/liquide d'un matériau pour lequel la variation volumique est faible.

Le stockage de la chaleur peut aussi se faire par voie thermochimique (ou sorption) via des procédés mettant en œuvre des réactions chimiques réversibles qui permettent de séparer un produit sous l'effet d'une source de chaleur. Les deux (ou plus) composants sont alors stockés séparément sans perte thermique et la chaleur est restituée lorsqu'ils sont remis en présence en reformant le produit initial.

## Générale

• **Chaleur sensible**

Le stockage sensible de grande capacité concerne surtout le stockage saisonnier en réservoirs soit

- en réservoirs souterrains dans des aquifères naturels (nommés ATES pour Aquifer Thermal Energy Storage),
- dans des roches ou en souterrain (appelés UTES ou BTES pour Underground ou Borehole Thermal Energy Storage)
- ou encore dans des cuves en surface ou plus ou moins enterrées.

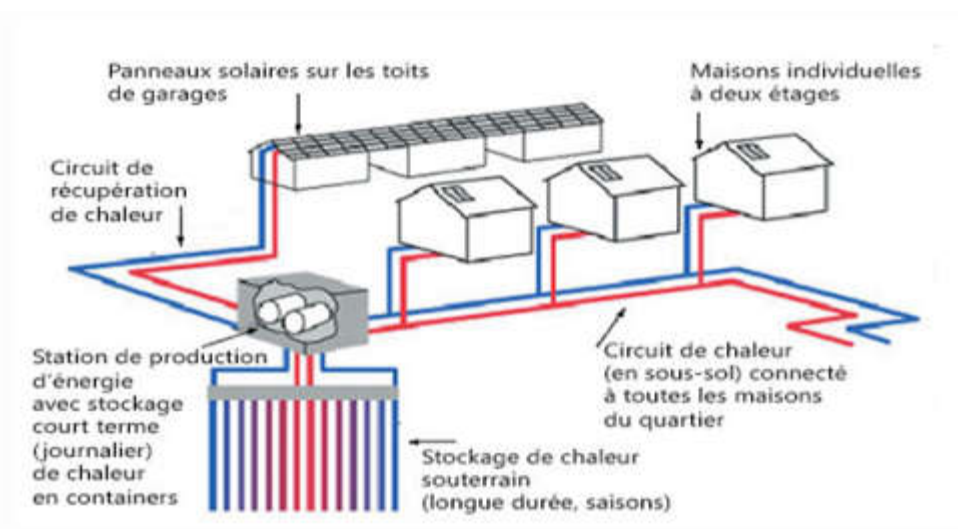
Il y a deux facteurs clés pour les matériaux de stockage étudiés :

- L'inertie thermique (sables, bétons, céramiques).
- La capacité à supporter de très hautes températures.

Quelques ATES existent déjà, comme celui de Neubrandenburger Stadtwerke en Allemagne, mis en service en 2004 et mettant en œuvre un stockage de 4 MW de puissance, à une température entre 60 et 80 °C dans un aquifère à une profondeur de 1200-1300 m, en relation avec une centrale à gaz et à vapeur.

Plusieurs projets structurants sont en cours : le programme ECES (Energy Conservation through Energy Storage) de l'AIE est probablement le plus actif (15 projets en cours), mais des actions sont également lancées en Europe (programmes de l'EERA, European Energy Research Alliance) et en France (projets ANR-Ancre, suite au projet Geostocal).

Les exemples d'UTES ou de BTES sont assez nombreux notamment en Norvège ou au Canada, comme par exemple le Drake Landing Solar Community (DLSC) dans l'Alberta qui alimente en hiver un quartier de plus de 50 maisons grâce à de la chaleur solaire stockée en été.



**Figure 5.**Exemple de BTES

### Générale

Une autre voie en cours d'étude est le stockage de chaleur lié aux centrales solaires thermodynamiques, qui consiste à concentrer le rayonnement solaire sur un récepteur permettant de chauffer à haute température un fluide caloporteur qui, directement ou après stockage, va activer un générateur d'électricité via une turbine. Le type de fluide caloporteur est généralement un sel fondu, mais des projets sont en cours pour identifier d'autres fluides comme par exemple des verres fondus (projet Halotechnics, programme HEATS, USA).

- **Chaleur latente**

Les matériaux à changement de phase (MCP) qui présentent des opportunités intéressantes pour le stockage de chaleur latente sont de plusieurs types : métaux, matériaux organiques (acides gras et paraffines) ou inorganiques (sels hydratés). Ces matériaux sont souvent utilisés dans les matériaux de construction pour tempérer les bâtiments.

Il n'existe pas à ce jour d'installations de stockage de grande capacité basées sur ce principe mais de nombreux projets sont en cours, en particulier aux USA, comme par exemple le projet Metallic Composites Phase-Change Materials for High-Temperature Thermal Energy Storage conduit au MIT sur les nanomatériaux fondus.

### 2.3. Mode de stockage thermochimique

Par rapport aux deux voies précédentes, les procédés mis en œuvre ici sont plus complexes : séparation des produits au stockage, mise en contact des réactants à la restitution, possibilité de changements de phase lors du cyclage. Les réactions de sorption semblent les plus adaptées à la climatisation des bâtiments et des applications existent.

La société suédoise ClimateWell, par exemple, propose un système commercial de climatisation/ stockage par **adsorption à trois phases utilisant une** solution saturée de LiCl en contact avec du LiCl solide.

Plusieurs pilotes ont été réalisés comme le système allemand à partir d'hydratation/déshydratation de zéolite ou de gel de silice. En France, le projet ANR Prossisvise à étudier un procédé de stockage intersaisonnier utilisant les propriétés d'hydratation/déshydratation de LiBr, jusqu'à la cristallisation.

### 2.4. Mode de stockage chimique :

- **Stockage intrinsèque**

- Hydrocarbures

Les hydrocarbures liquides sont actuellement la forme dominante du stockage d'énergie en volume, notamment pour le secteur du transport. Les carburants proviennent des énergies

*Générale*

fossiles et ont un rendement de 75% de la « source à la pompe ». Les biocarburants sont eux issus de la biomasse, avec un rendement de 70% « de la biomasse à la pompe ».

- Biomasse

Le terme « biomasse » désigne l'ensemble des matières organiques pouvant devenir des sources d'énergie. Dans le cas des végétaux, elle est une forme de stockage de l'énergie solaire: les matières organiques sont issues du CO<sub>2</sub> capté lors de la photosynthèse. La biomasse peut être utilisée soit directement (bois énergie), soit après une méthanisation de la matière organique (biogaz) ou de nouvelles transformations chimiques (biocarburant).

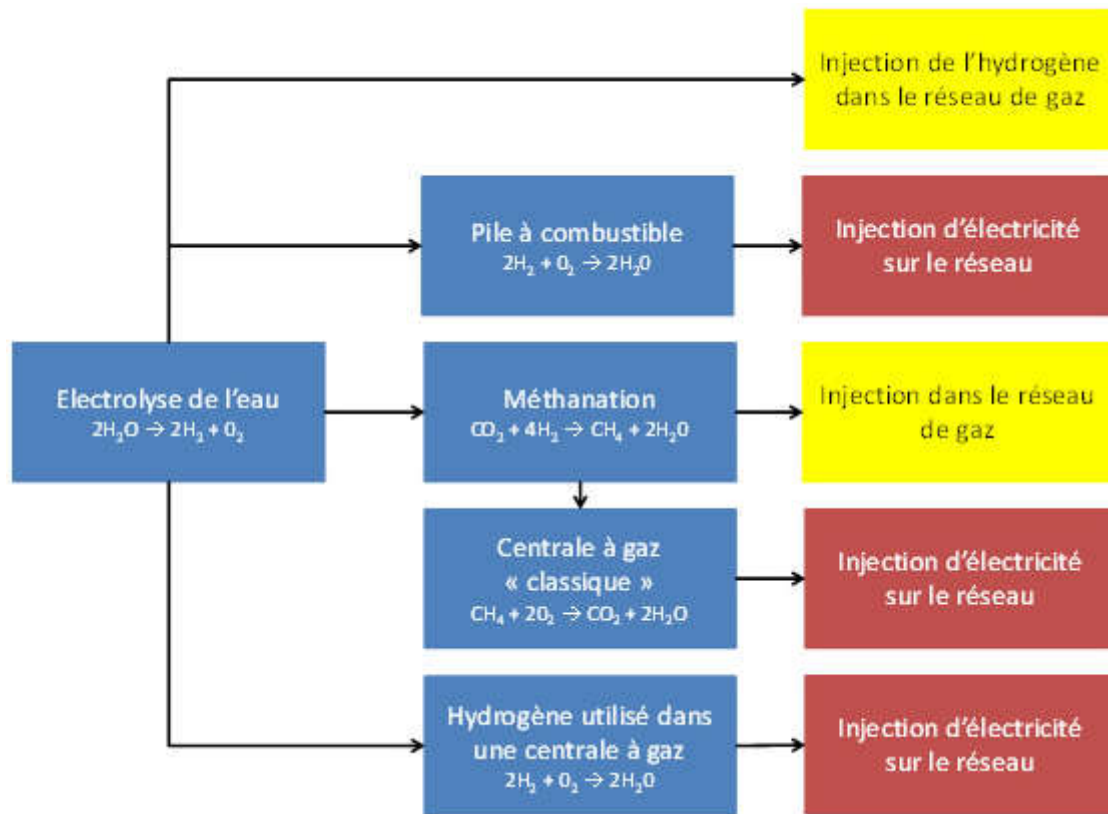
Toutefois, ce processus de stockage d'énergie est long, de l'ordre de plusieurs mois, et d'un rendement faible. En effet, seul 1% des rayonnements solaires utilisés lors de la photosynthèse est restitué sous la forme de biomasse.

- **Production d'hydrogène**

Les systèmes de stockage d'énergie grâce à l'hydrogène utilisent un électrolyseur intermittent. Pendant les périodes de faible consommation d'électricité, l'électrolyseur utilise de l'électricité pour décomposer de l'eau en oxygène et en hydrogène, selon l'équation  $2 \text{H}_2\text{O} = 2\text{H}_2 + \text{O}_2$ . Cet hydrogène est ensuite comprimé, liquéfié ou stocké sous forme d'hydrure métallique.

Ensuite, il existe trois moyens différents pour réinjecter de l'électricité sur le réseau à partir de l'hydrogène stocké :

- le premier consiste à alimenter une pile à combustible ;
- le deuxième consiste à synthétiser du gaz naturel selon le procédé de la méthanation. Ce gaz peut certes être injecté directement dans le réseau de gaz existant mais surtout être utilisé pour alimenter une centrale à gaz « classique », produisant de l'électricité ;
- le troisième consiste à utiliser l'hydrogène directement dans une centrale à gaz spécialement conçue à cet effet, afin de fabriquer de l'électricité.



**Figure 6 :** Les différentes possibilités de stockage de l'énergie grâce à l'hydrogène

L'intérêt de ce type de système réside :

- dans la grande flexibilité d'usage du vecteur d'hydrogène, qui a pour particularité d'être facilement stocké et transporté, que ce soit sous forme liquide ou gazeuse ;
- et dans le découplage énergie-puissance : en effet, la capacité de puissance en absorption ou en production est dimensionnée par l'électrolyseur ou la pile à combustible. La capacité en énergie est dimensionnée par la taille des réservoirs et peut aller de plusieurs heures à plusieurs jours en fonction de l'application du système (secours, décalage de consommation).

Pendant leur utilisation, les électrolyseurs et les piles à combustible dégagent de la chaleur (entre 20 et 50 % de l'énergie du système selon la technologie), dont la valorisation améliore la rentabilité économique du système.

### 3. Quelques technologies alternatives nouvelles de stockage d'électricité sous forme de chaleur

- **Thermo-electrical Energy Storage (TEES)**

*Générale*

Le TEES est une technologie alternative de stockage reposant sur des cycles thermodynamiques, étudiée principalement par ABB Research Ltd. Le système consiste à convertir de l'électricité produite en excès en énergie thermique pendant la phase de charge, à stocker cette chaleur via un fluide circulant, puis à la reconverter en électricité pendant la phase de décharge.

**• Pumped Heat (ou Thermal) Electricity Storage (PHES ou PTES)**

→ **La technologie PHES**, mise au point par Saipem, repose également sur la thermodynamique. Elle s'apparente à une "super" pompe à chaleur réversible qui comprime de l'argon et le fait circuler dans deux conteneurs externes de graviers de températures différentes (800°C et -70°C). Un projet de 20 M\$ pour la réalisation d'un démonstrateur au Royaume-Uni a été signé en juin 2012.

→ **La technologie PTES**, étudiée notamment dans le projet SETHER soutenu par l'ANR, est équivalente et repose sur un cycle thermodynamique au cours duquel de l'énergie électrique est emmagasinée sous forme de chaleur sensible dans des matériaux réfractaires portés à haute température, puis restituée au moment du besoin.

*Chapitre 4*  
*La Conversion Photovoltaïque*

**1. Introduction** La conversion de l'énergie solaire en énergie électrique repose sur l'effet photoélectrique, c'est-à-dire sur la capacité des photons à créer des porteurs de charge (électrons et trous) dans un matériau.

## 2. L'effet photovoltaïque

L'effet photovoltaïque constitue la conversion directe de l'énergie du rayonnement solaire en énergie électrique.

Le terme photovoltaïque vient du grec "phos, photos" qui désigne la lumière et de "voltaïque", mot dérivé du physicien italien Alessandro VOLTA, connu pour ses travaux sur l'électricité.

Le principe de fonctionnement de cette cellule fait appel aux propriétés du rayonnement et celles des semi-conducteurs.

### 2.1. 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:  $1 \text{ eV} = 1,60217 \cdot 10^{-19} \text{ Joule} = 4,4505 \cdot 10^{-24} \text{ Wh}$ . 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.



## 2.2. Principe de conduction dans un matériau:

Les atomes sont constitués de noyaux et d'électrons qui gravitent autour. Pour qu'un matériau conduise l'électricité il faut que des électrons soient capables de se déplacer. Les électrons possèdent une certaine quantité d'énergie qui est quantifiée. Il existe donc des niveaux d'énergie auxquels appartiennent les électrons.

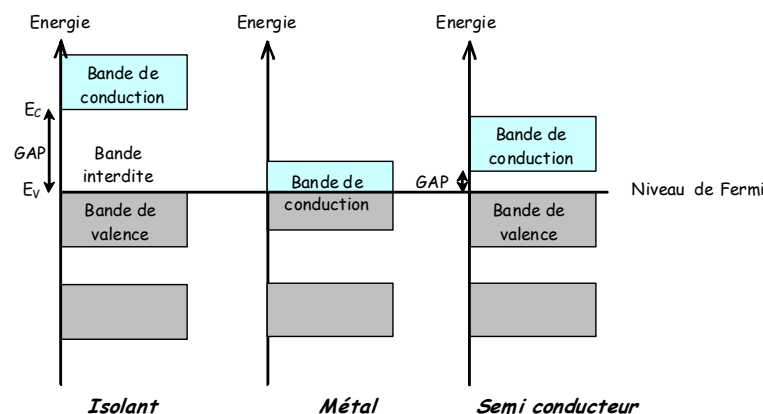
Ces niveaux d'énergies se découpent ainsi :

**La bande de valence :** (ayant 2 électrons) les électrons qui s'y trouvent participent aux liaisons entre les atomes.

**La bande de conduction :** les électrons qui s'y trouvent sont mobiles et peuvent bouger d'un atome à l'autre si on leur applique un champ approprié, ils participent donc à la conduction électrique ; c'est le déplacement de ces électrons là qui est responsable du courant électrique.

**La bande interdite ou GAP :** la gamme d'énergie auxquelles les électrons n'ont pas accès (il n'y a pas de niveau d'énergie dans cette gamme),.

**Le niveau de Fermi :** correspond à l'énergie limite qui sépare, au zéro absolu, les niveaux occupés des niveaux vides. Cette énergie est caractéristique du matériau.



**Figure 1 :** Représentation schématique des bandes d'énergie d'un solide.

**Dans un métal,** le gap est nul ; il y a continuité entre les bandes de valence et celles de conduction, il y a donc toujours des électrons susceptibles de conduire le courant.

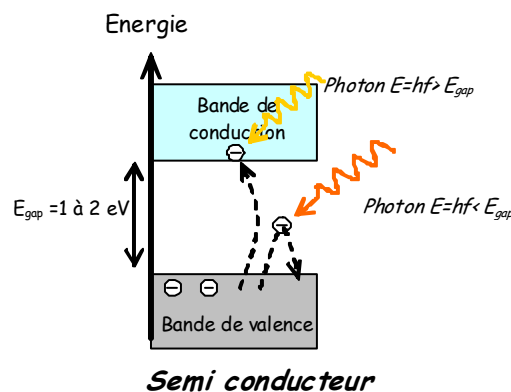
**Dans un isolant,** la dernière bande de valence est pleine, et le gap est énorme : il n'y a donc aucune chance d'exciter un électron pour qu'il passe dans la bande de conduction (l'énergie requise est trop importante et ferait fondre le matériau avant qu'il ne commence à conduire).

**Pour les semi-conducteurs,** à température nulle (=0 Kelvin) ce sont des isolants : bandes de valence pleines, et bandes de conduction vides. Mais un apport d'énergie faible (thermique ou lumineuse) suffit à faire passer des électrons dans la bande de conduction car le gap est très faible (de l'ordre de l'eV) : le matériau devient ainsi conducteur.

### 2.3. Principe de la cellule photovoltaïque : les photons font conduire les électrons

En effet lorsqu'un matériau est exposé à la lumière du soleil, les atomes exposés au rayonnement sont " bombardés " par les photons constituant la lumière; sous l'action de ce bombardement, les électrons des couches électroniques supérieures (électrons des couches de valence) ont tendance à être " arrachés / décrochés " :

- ✓ si l'électron revient à son état initial n'ayant réussi à franchir le GAP l'agitation de l'électron se traduit par un échauffement du matériau. L'énergie cinétique du photon est transformée en énergie thermique.
- ✓ par contre, dans les cellules photovoltaïques, une partie des électrons ne revient pas à son état initial. Les électrons " décrochés " passent le GAP et vont dans la bande de conduction et créent une tension électrique continue faible. Une partie de l'énergie cinétique des photons est ainsi directement transformée en énergie électrique : c'est l'effet photovoltaïque..



**Figure2** : Principe de la cellule photovoltaïque

### 2.4. Le dopage : réduit le Gap et crée un champ électrique pour collecter les électrons

La méthode utilisée pour créer ce champ est celle du "dopage" par des impuretés c'est-à-dire leur ajouter un autre atome à une certaine concentration, dont une bande d'énergie va se trouver exactement dans la bande interdite du semi-conducteur. Deux types de dopage sont possibles:

#### a) Le dopage de type N (négatif)

Il consiste à introduire dans la structure cristalline semi-conductrice des atomes étrangers qui ont la propriété de donner chacun un électron excédentaire (charge négative), libre de se mouvoir dans le cristal. C'est le cas du phosphore (P) dans le silicium (Si). Dans un matériau de type n, on augmente fortement la concentration en électrons libres. Ainsi le dopant va

ajouter une bande d'énergie dotée d'électrons près de la bande de conduction ainsi, l'énergie nécessaire pour que les électrons passent dans la bande de conduction est bien plus facilement atteinte.

Les électrons sont des porteurs majoritaires et les trous des porteurs minoritaires.

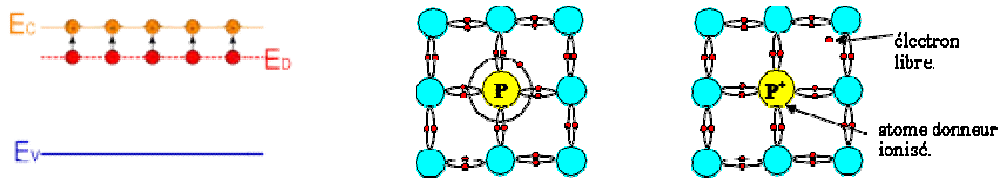


Figure 3 : Le dopage de type N (négatif)

### b) Dopage P (positif)

Les trous sont alors des porteurs majoritaires et les électrons des porteurs minoritaires.

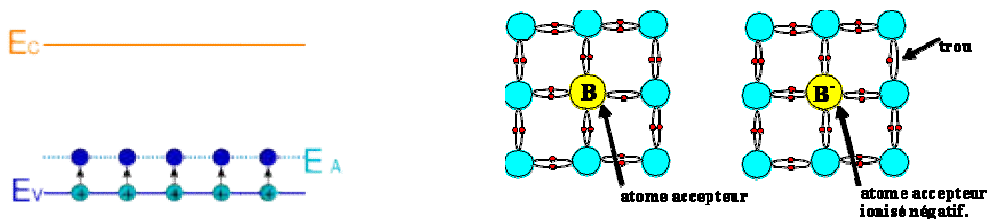


Figure 4 : Le dopage de type P (positif)

## 3. Composition d'une cellule PV

Les technologies utilisées par les différents fabricants varient, mais les caractéristiques de base des composants d'une cellule sont les mêmes.

Pratiquement, la cellule PV est composée de plusieurs couches minces à savoir :

- **une couche "anti-reflet"** réduit les pertes par réflexion (avant en TiO<sub>2</sub> :34 % de réflexion du spectre visible, mais remplacée aujourd'hui par du nitrure de silicium hydrogéné (SiN-H). 8 %
- **une grille conductrice** avant "collectrice des électrons" qui doit (être dense pour collecter les électrons mais peu dense pour laisser passer la lumière) également être liée au silicium et ne pas être sensible à la corrosion ; ( Ni, Sn , Pb)
- **une couche dopée N** avec porteurs de charge libres négatifs (électrons) ; (Phosphore)
- **une couche dopée P** avec porteurs de charge positifs (trous) ; (Bore)

- **une surface de contact arrière conductrice** en métal " collectrice des électrons ", ayant une bonne conductivité ainsi qu'un bon accrochage sur le silicium ; (Al , Ni, Sn , Pb)

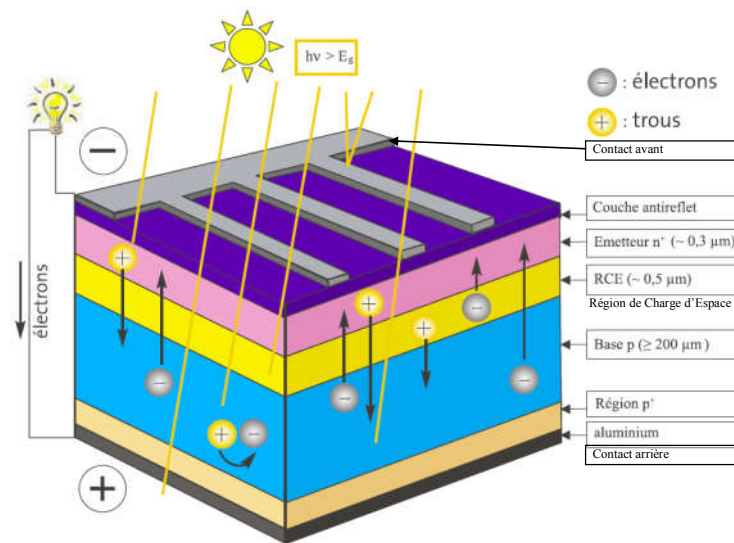


Figure 5 : Composition d'une cellule PV

### 3.1. Les principales technologies de cellules solaires

On peut distinguer trois grandes familles de cellules solaires :

- **les cellules au silicium cristallin**, pour lesquelles l'élément actif est le silicium dopé dans la masse. Bien que plus ancienne, cette technologie représente encore 90 % des parts de marché du fait de sa robustesse et de ses performances (rendement modules allant de 12 à 20 % pour une durée de vie de 30 ans environ) ainsi que des investissements importants qui lui ont été destinés, que ce soit pour la transformation du silicium, l'élaboration des cellules ou l'assemblage des modules.
- **les cellules à base de couches minces** qui ont en commun le procédé de dépôt du matériau semiconducteur à faible épaisseur sur des substrats variés et donnant un aspect uni, produisant des modules de rendement légèrement inférieur (de 7 à 13 %). La part de marché pour l'ensemble de ces technologies est d'environ 10 % et reste relativement stable : ces filières ont perdu l'avantage de leur moindre coût de production avec les investissements massifs consentis dans le silicium au début des années 2000.
- **les cellules à base de photovoltaïque organique**, segment sur lequel la recherche s'intensifie dans la perspective de produire des cellules à très bas coût pour des applications nouvelles. Leur principe de fonctionnement est basé sur les cellules à colorant de Michaël Grätzel avec des variations sur le type de matériaux utilisés.

Avec des rendements de l'ordre de 3 à 5 %, leur point faible reste aujourd'hui encore leur durée de vie limitée.

#### 4. Caractéristique électriques d'une cellule PV

##### 4.1. La courbe courant-tension

Sous un éclairage donné, toute cellule photovoltaïque est caractérisée par une courbe courant-tension (I-V) représentant l'ensemble des configurations électriques que peut prendre la cellule. Trois grandeurs physiques définissent cette courbe:

- Sa tension à vide :  $V_{co}$ . Cette valeur représenterait la tension générée par une cellule éclairée non raccordée.
- Son courant court-circuit:  $I_{cc}$ . Cette valeur représenterait le courant généré par une cellule éclairée raccordée à elle-même.
- Son point de puissance maximal: MPP (en anglais : maximal power point) obtenu pour une tension et un courant optimaux :  $V_{opt}$ ,  $I_{opt}$  (parfois appelés aussi  $V_{mpp}$ ,  $I_{mpp}$ ).

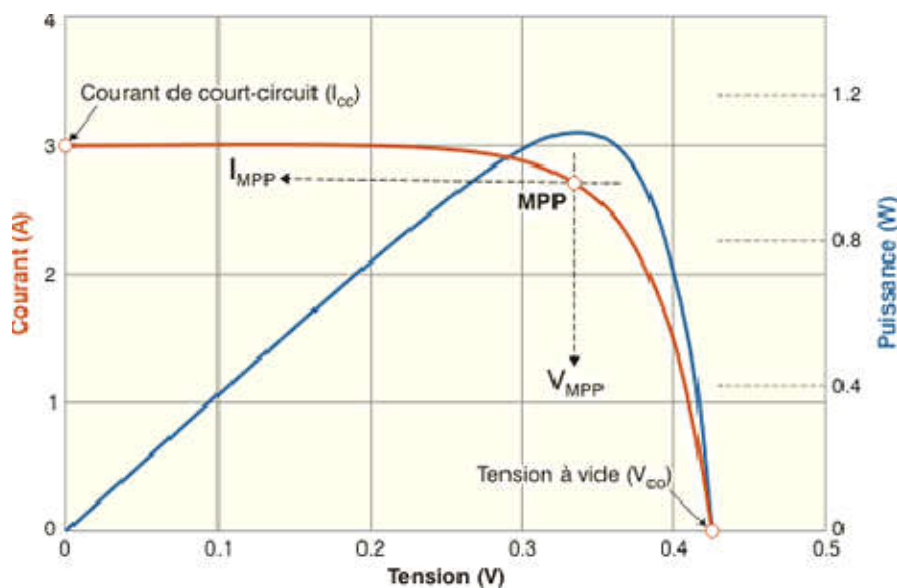


Figure 6 : Caractéristique courant-tension d'une cellule photovoltaïque.

##### 4.2. La puissance crête d'une cellule PV

Dans le cas d'utilisation de photopiles avec le rayonnement solaire, la puissance crête d'une photopile, aussi nommée puissance "catalogue", notée  $W_c$  (Watt crête) ou  $W_p$  (Watt peak) (En moyenne, un Watt crête correspond à la puissance d'une cellule monocristalline d'une surface de  $1 \text{ dm}^2$ ), représente la puissance électrique maximum délivrée dans les conditions suivantes dites conditions standard :

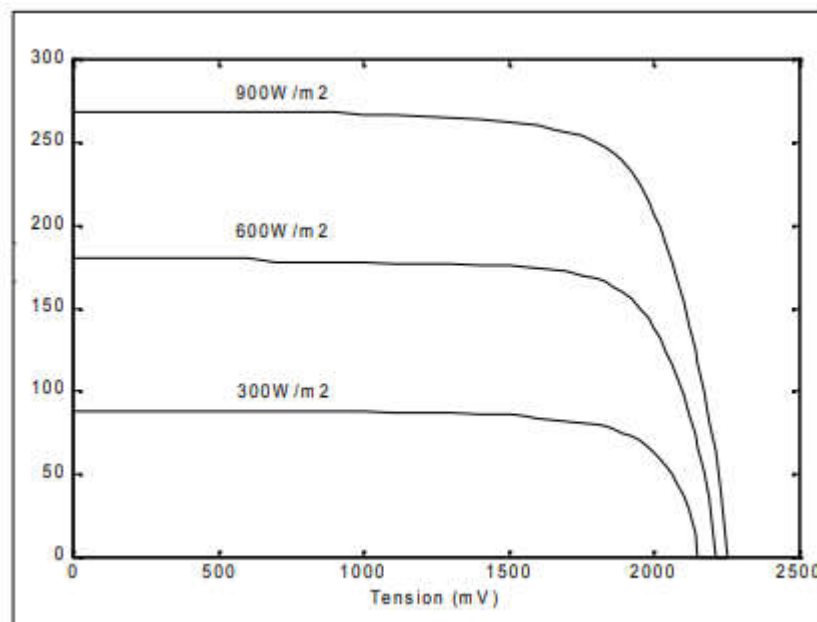
- éclairement solaire de  $1 \text{ kW/m}^2$  (correspondant à peu près à une exposition perpendiculaire aux rayons du soleil à midi par temps clair d'été) ;
- température de la cellule PV égale à  $+25 \text{ °C}$ .

répartition spectrale du rayonnement dit **AM.1,5 (correspondant au rayonnement solaire parvenant au sol après avoir traversé une atmosphère de masse 1 à  $45 \text{ °}$ )**.

### 4.3. Influence de l'éclairement

L'énergie électrique produite par une cellule photovoltaïque dépend de l'éclairement qu'elle reçoit sur sa surface. On remarque que la tension  $V_{\text{max}}$  correspondant à la puissance maximale ne varie que très peu en fonction de l'éclairement, contrairement au **courant  $I_{\text{max}}$  qui augmente fortement avec l'éclairement**.

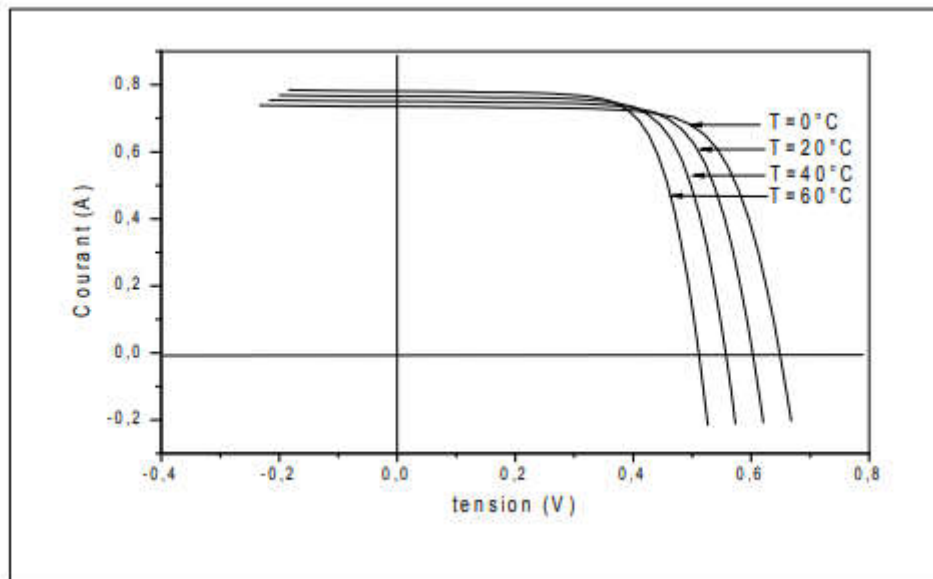
Comme la forme de la courbe varie peu en fonction de l'éclairement, le rendement varie très peu en fonction de l'éclairement.



**Figure 7 :** Influence de l'éclairement sur la caractéristique I-V d'une cellule solaire.

### 4.4. Influence de la température

Les caractéristiques électriques d'une cellule PV dépendent de la température de jonction au niveau de la surface exposée. Le comportement de la cellule PV en fonction de la température est complexe.



**Figure 8 :** Influence de la température sur la caractéristique I-V d'une cellule solaire éclairée.

## 5. Les systèmes photovoltaïques

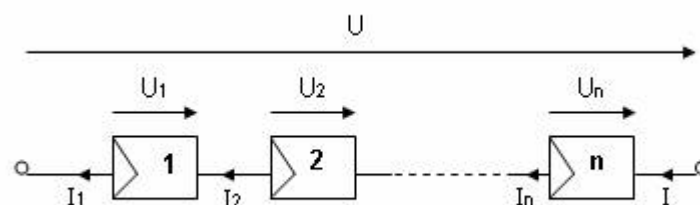
### 5.1. Module solaire ou photovoltaïque

#### 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.

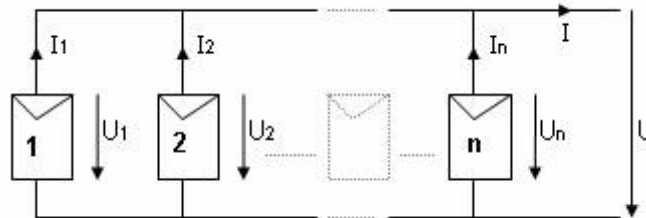
La puissance d'un panneau solaire est fonction de sa surface, c'est à dire du nombre de cellules photovoltaïques.



**Figure 9 :** Association série

#### b. Association des cellules en parallèle

Dans un groupement de cellules connectées en parallèle, les cellules étant soumises à la même tension, les intensités s'additionnent : la caractéristique résultante est obtenue par addition de courants à tension donnée.

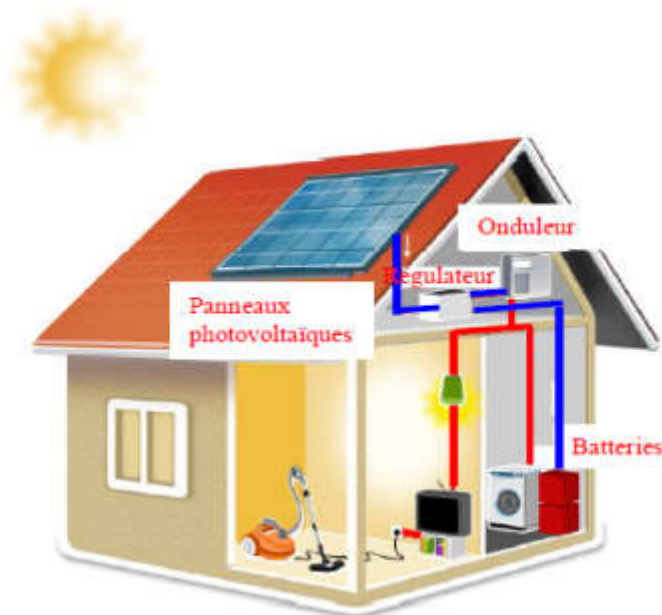


**Figure 10 :** Association parallèle.

## 5.2. Les différentes installations photovoltaïques

### a. Les installations sur site isolé

Ce type de montage est adapté aux installations ne pouvant être raccordées au réseau. L'énergie produite doit être directement consommée et/ou stockée dans des accumulateurs pour permettre de répondre à la totalité des besoins.



**Figure 11 :** Installations photovoltaïque sur site isolé

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.

### **b. Les installations raccordées au réseau de distribution public**

#### ✓ **Solution avec injection totale**

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

Cette solution est réalisée avec le raccordement au réseau public en deux points :

- le raccordement du consommateur qui reste identique avec son compteur de consommation (on ne peut pas utiliser sa propre production),
- le nouveau branchement permettant d'injecter l'intégralité de la production dans le réseau, dispose de deux compteurs :

- l'un pour la production,
- l'autre pour la non-consommation (permet de vérifier qu'aucun soutirage frauduleux n'est réalisé).

#### ✓ **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.

Un seul compteur supplémentaire est ajouté au compteur existant.

## **6. Domaine d'application**

### **6.1. Les applications autonomes**

- les satellites artificiels pour lesquels le photovoltaïque constitue la seule source d'énergie qui réponde à toutes les contraintes
- les appareils portables, aujourd'hui calculettes et montres, demain téléphones et micro-ordinateurs
- les applications « professionnelles », relais de télécommunications, balises maritimes ou aéroportuaires, signalisation routière, bornes de secours autoroutières, horodateurs de stationnement, etc.)

- l'électrification rurale des sites isolés, habitat dispersé, refuges, dispensaires et écoles dans les pays en voie de développement, ...

**6.2. Les applications raccordées au réseau** public de distribution d'électricité que l'on peut subdiviser en trois grands domaines :

- les systèmes attachés à un bâtiment consommateur d'électricité, qu'il soit à usage résidentiel ou professionnel : les modules peuvent être " sur-imposés " à la toiture (toit en pente ou toiture-terrasse) ou bien " intégrés au bâti " dans une logique de double fonction (clos et couvert, bardage, verrière, garde-corps,...).
- les systèmes posés sur ou intégrés à des structures non-consommatrices d'électricité par elles-mêmes mais pour lesquelles les panneaux remplissent une fonction bien identifiée en sus de la production d'électricité (ombrière de parking, couverture de passage public ou de quai de gare, mur antibruit,...)
- les parcs photovoltaïques au sol, constitués de quantités importantes de modules posés sur des structures porteuses, dont la production est exclusivement destinée à l'alimentation directe du réseau électrique.

## 7. avantages et inconvénients

Les principaux avantages d'un système photovoltaïque sont :

- Une autonomie énergétique à des sites non raccordés au réseau de distribution d'électricité;
- Un système fiable et exigeant très peu d'entretien;
- Une longue durée de vie utile si bien protégée (plus de 20 ans);
- La production d'une énergie propre et renouvelable;
- Un fonctionnement silencieux. En contrepartie,

Les principaux inconvénients des systèmes photovoltaïques sont :

- Le coût à l'achat est très élevé;
- Le coût de production de l'énergie est élevé;
- Le rendement énergétique des cellules photovoltaïques est faible (7 à 17 %);
- Le stockage de l'énergie est difficile avec les technologies actuelles;
- Les applications rentables en agriculture sont restreintes;
- Le recyclage des cellules photovoltaïques en fin de vie cause des problèmes environnementaux.

*Chapitre 5*  
*La Géothermie*

**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.

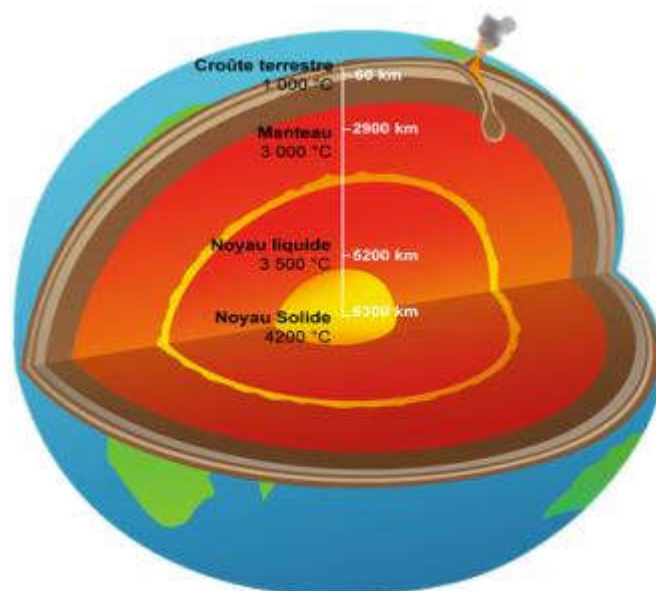


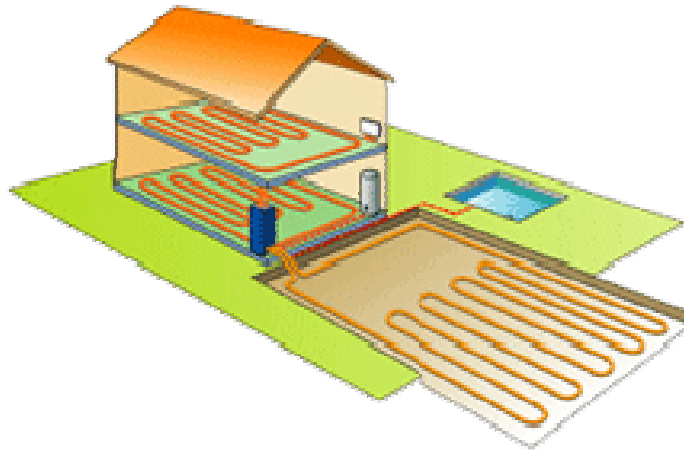
Figure 1 : Coupe du globe terrestre

## 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.

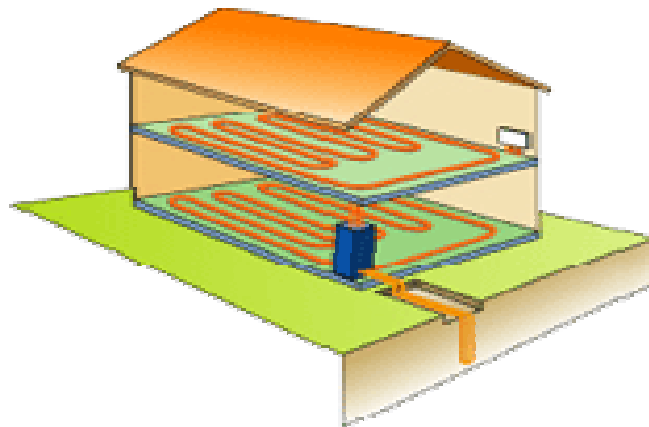
### 2.1.1. Captage horizontal



**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



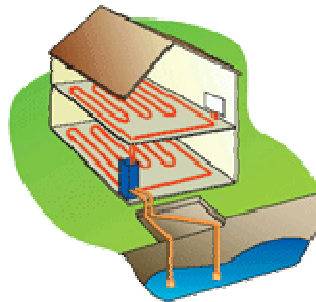
**Figure 3 :** Géothermie par captage vertical.

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.

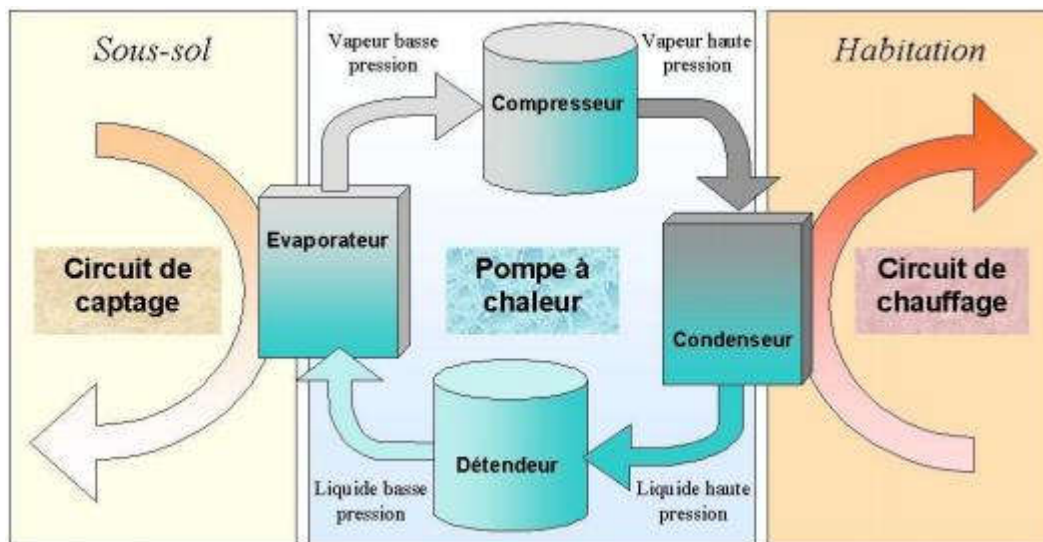


Figure 5 : Principe d'une pompe à chaleur appliquée à la géothermie

## 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.

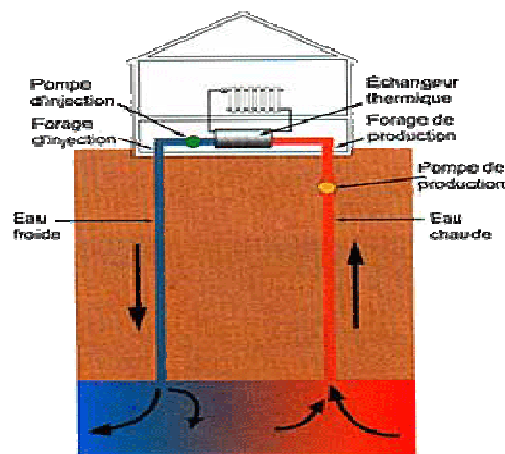


Figure 6 : Le principe du doublet géothermique

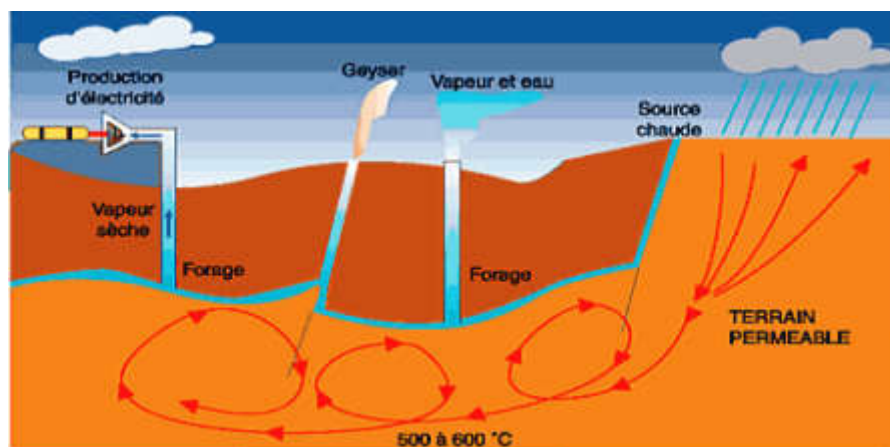
La géothermie basse température fonctionne sur le principe du doublet géothermique (capteurs verticaux sur nappe phréatiques). La température de l'eau est assez élevée pour se passer d'une pompe à chaleur. Il est en effet possible de chauffer directement des logements avec cette température via des réseaux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

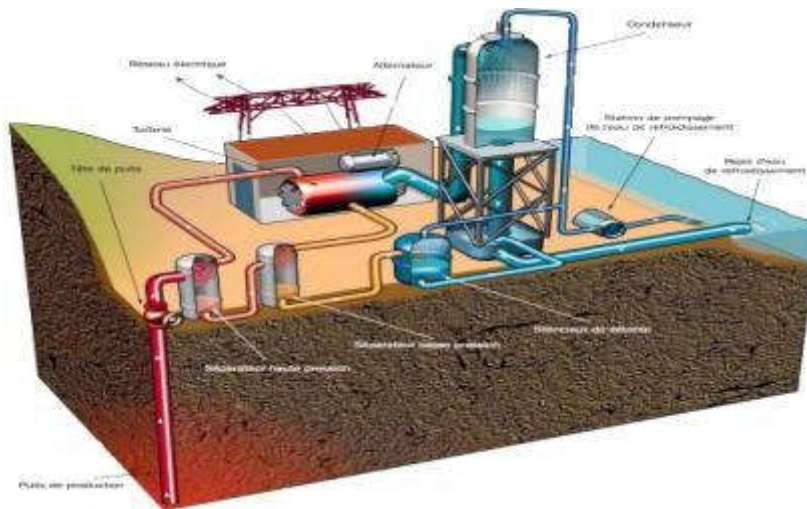
Cette technologie nécessite des sols particuliers où la température est naturellement élevée (>150°C), c'est le cas notamment des zones volcaniques où la température de sous-sol peut augmenter de 1000°C/100m.



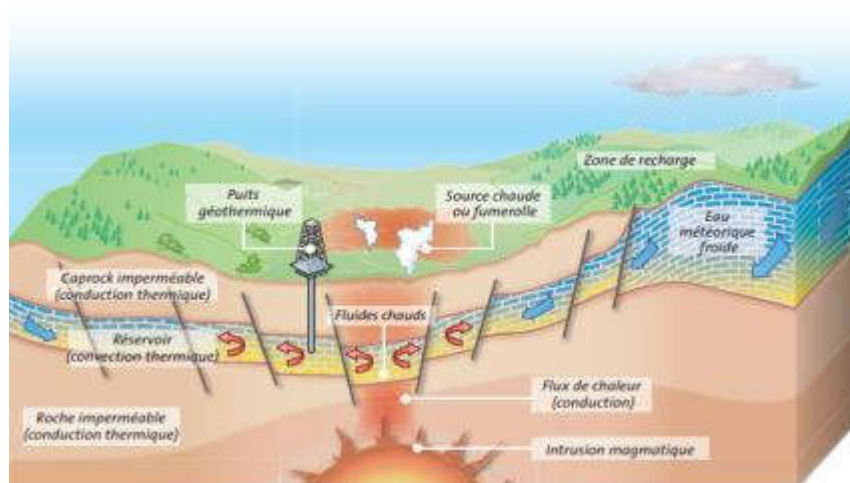
**Figure 7** : Principe l'exploitation énergie géothermique

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/m<sup>2</sup>/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.

***Chapitre 6***  
***L'énergie Eolienne***

**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 moulin 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.

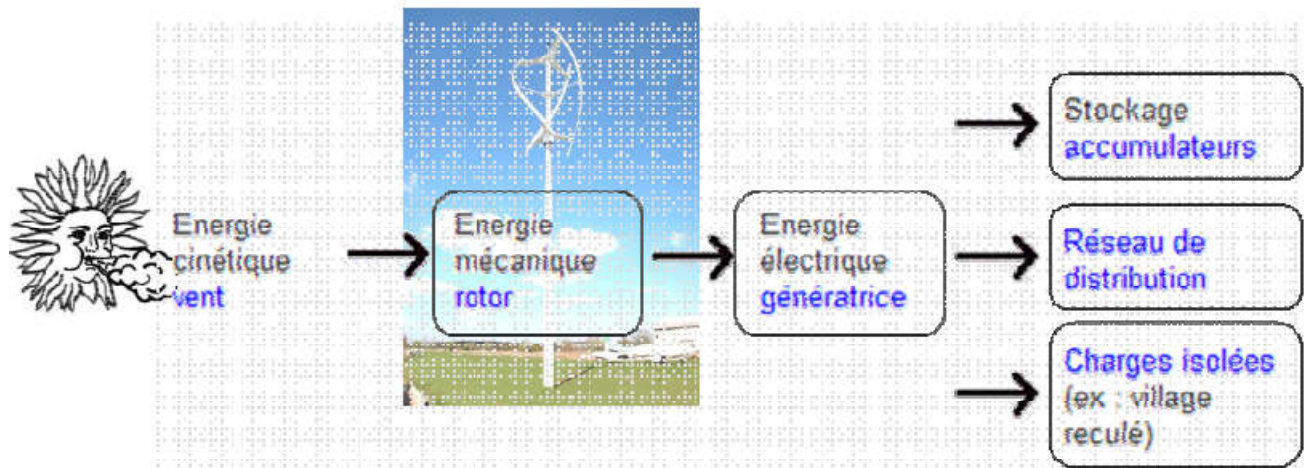


Figure 1 : Principe de l'aérogénérateur

## 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).

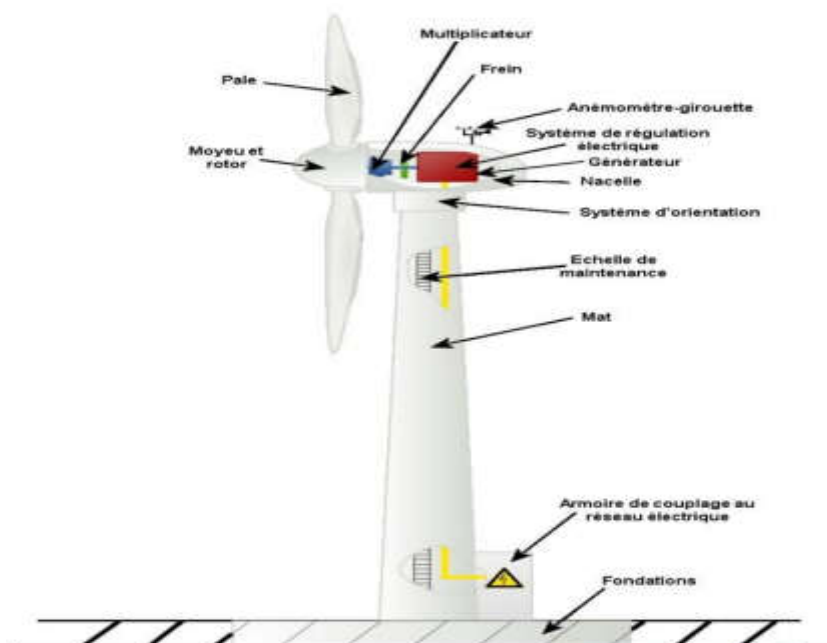
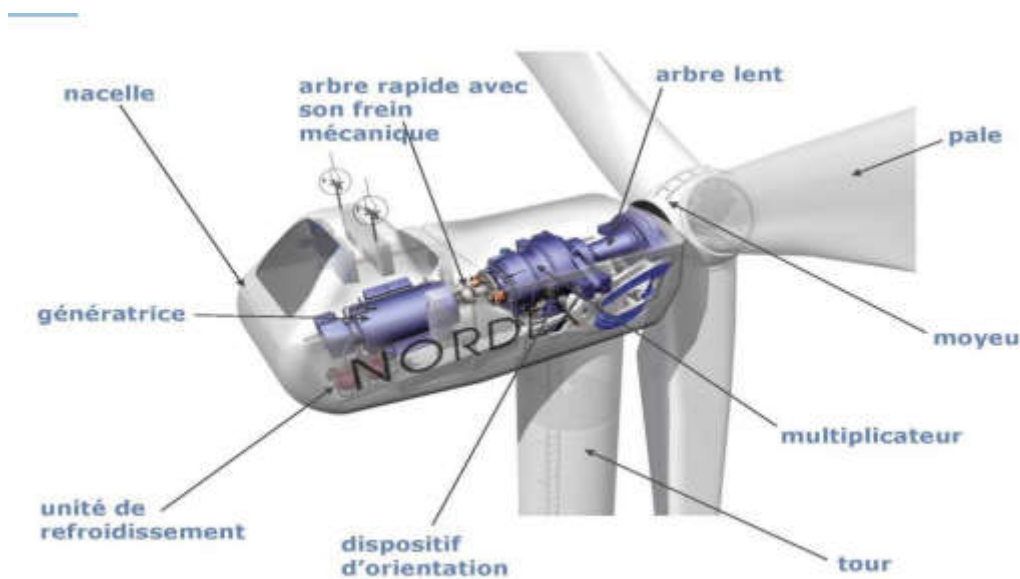


Figure 2 : Les composants de l'éolienne

### 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.

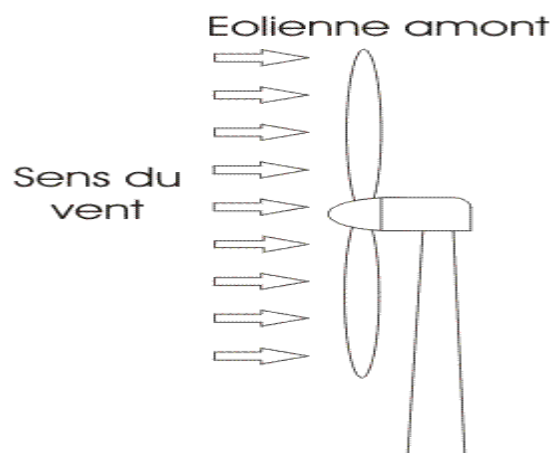
## 6. Les types d'éolienne

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:

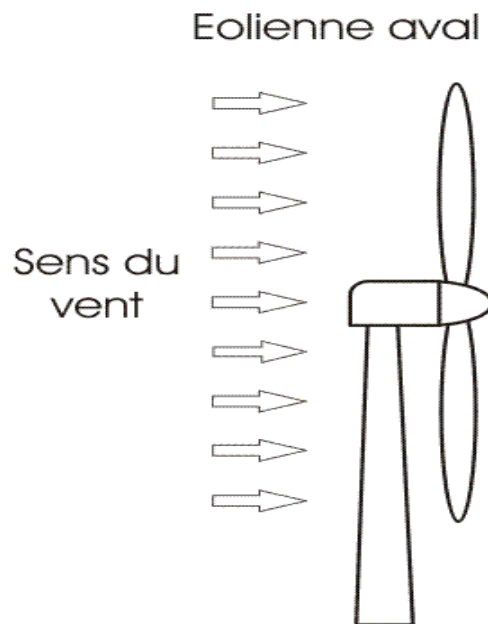
- **Amont** : le vent souffle sur le devant des pales en direction de la nacelle. Les pales sont rigides, et le rotor est orienté selon la direction du vent par un dispositif.



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



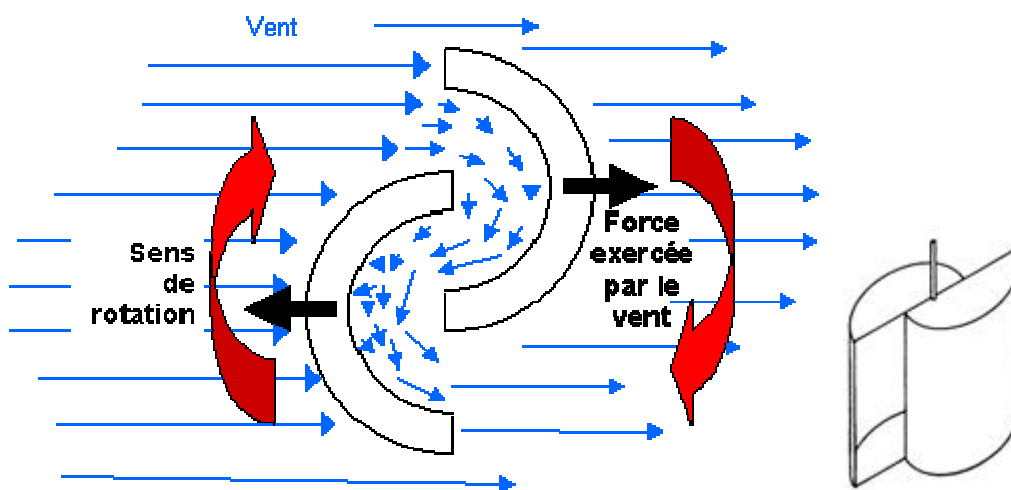
- **Aval** : le vent souffle sur l'arrière des pales en partant de la nacelle. Le rotor est flexible, auto-orientable.



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

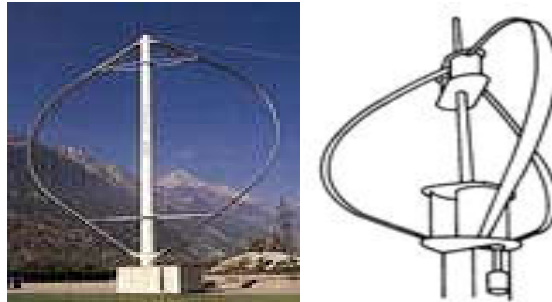
**6.2. L'éolienne verticale** est pour l'heure le type d'éolienne le moins répandu. Cependant, son rendement égal voire supérieur à celui d'une éolienne classique, et ses atouts d'intégration au bâti, de fonctionnement même avec un vent faible et d'occupation d'espace moindre, font d'elle une solution 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  $\text{m}^2$  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  $h$  0 de référence au-dessus du sol

$\alpha$  : 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.

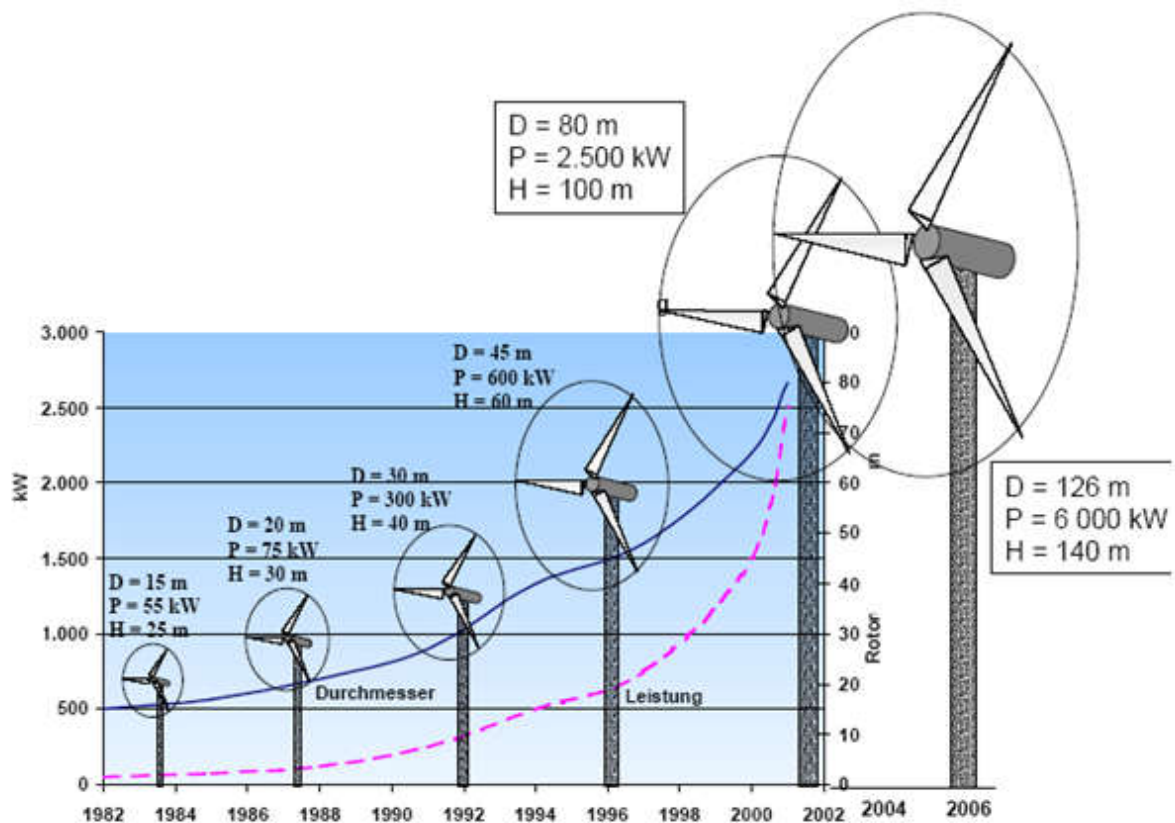


Figure 8 : Tailles des éoliennes et puissance associée.

## 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 7***  
***L'énergie Hydraulique***

**1. Introduction** : L'énergie hydraulique est l'énergie fournie par le mouvement de l'eau, sous toutes ses formes : chute, cours d'eau, courant marin, marée, vagues. Ce mouvement peut être utilisé directement, par exemple avec un moulin à eau, ou plus couramment être converti, par exemple en énergie électrique dans une centrale hydroélectrique.

Du point de vue de la mécanique, l'énergie hydraulique est en fait une énergie cinétique dans le cas des courants marins ou des cours d'eau, des marées, des vagues, et une énergie potentielle dans le cas des chutes d'eau et barrages.

L'énergie hydraulique est issue du cycle de l'eau continuellement reproduit grâce au rayonnement solaire. Il s'agit donc bien d'une énergie renouvelable.

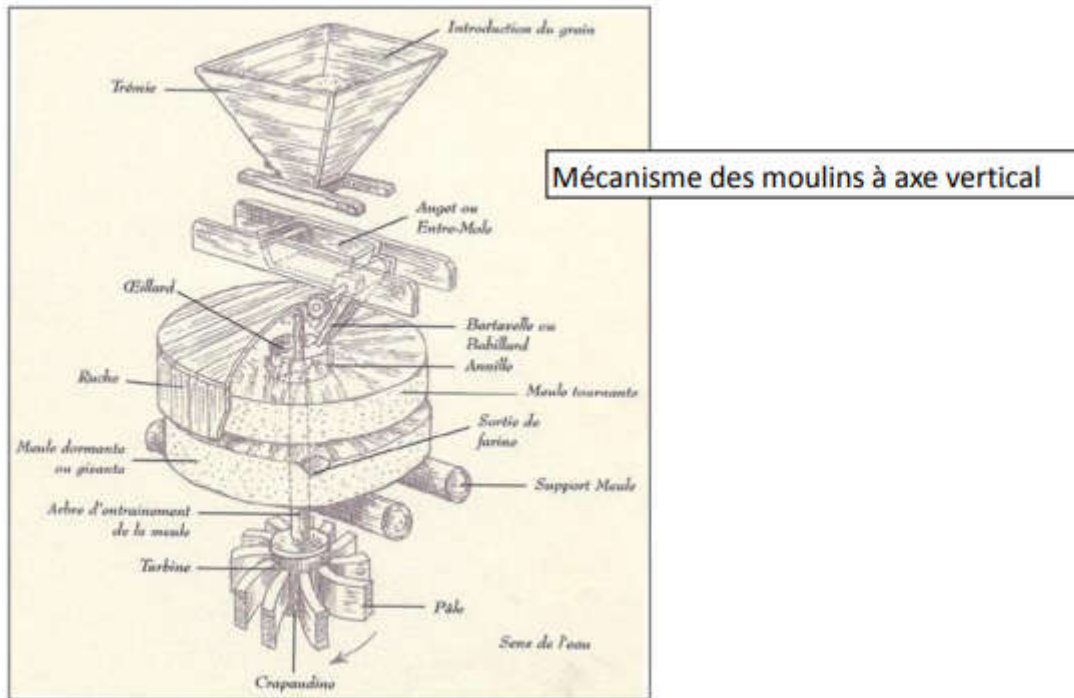
## 2. Histoire de l'énergie hydraulique

Les hommes de l'Antiquité se sont assez peu intéressés à l'énergie hydraulique. Le climat méditerranéen s'y prête peu : rares sont les cours d'eau ayant un débit constant et les aqueducs sont une solution très coûteuse. La principale machine utilisant la force du courant comme source d'énergie durant l'Antiquité est la noria. Il s'agit d'une grande roue à ailettes installée sur un cours d'eau et actionnée par le courant. Un chapelet de godets fixés à cette roue élève et déverse l'eau dans un aqueduc associé qui la distribue. La noria serait apparue chez les Romains au I<sup>er</sup> siècle avant Jésus-Christ.



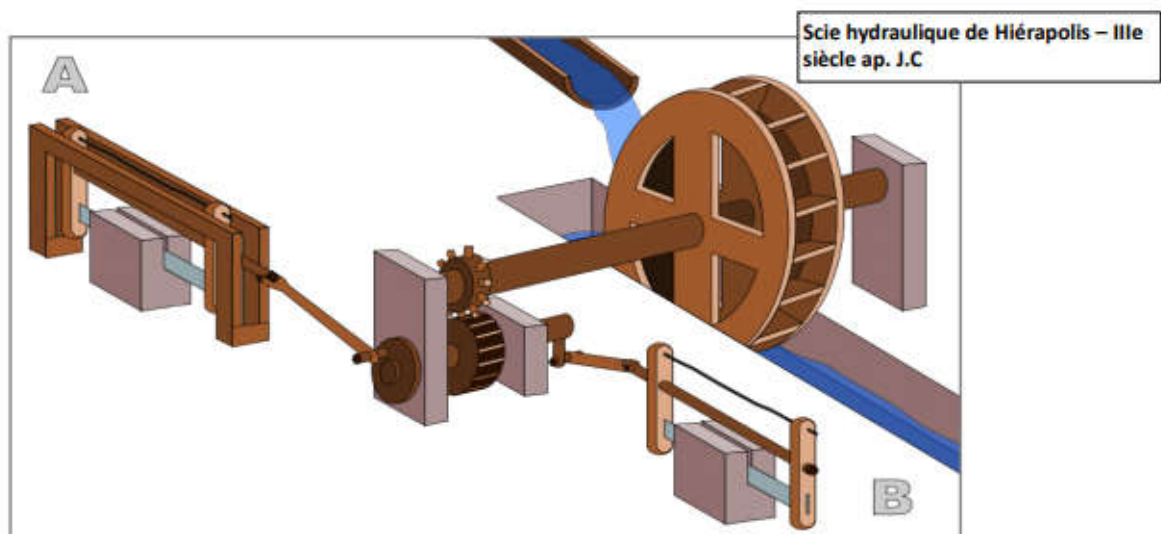
**Figure 1** : Noria à Hama en Syrie

Les premiers moulins à eau construits par les Grecs vers 300-250 avant Jésus-Christ se composaient d'une roue motrice horizontale plongée dans le courant d'eau. L'arbre de la roue se prolongeait verticalement en hauteur, traversait la meule dormante et entraînait la meule courante placée audessus. De petite dimension et à usage domestique, ce type de moulin fut utilisé à travers l'Europe jusqu'à la fin du Moyen Âge.



**Figure 2** : mécanisme des moulins à eau à roue verticale

Le moulin à eau à roue verticale est quant à lui, apparu en 240 avant Jésus-Christ : il nécessite l'utilisation d'un mécanisme d'engrenages, beaucoup plus complexe que celui des moulins à roue horizontale. La plus ancienne machine à eau connue utilisant un système bielle manivelle est représenté sur un bas-relief du III<sup>e</sup> siècle de notre ère, à Hiérapolis en Turquie. Elle actionnait une paire de scies destinées à couper de la pierre. Il s'agit cependant probablement d'un cas particulier. Le système bielle manivelle ne connaîtra un réel essor qu'à la Renaissance.



**Figure 3** : Scie hydraulique de Hiérapolis

- **Les moulins à eau**

Les moulins à eau étaient très rares et de taille modeste durant l'Antiquité. Ils vont se multiplier et se perfectionner dans le courant du Moyen Âge. En effet, ce type de machine permet une productivité bien plus grande que celle fournie par les meules antiques actionnées par des esclaves : chaque moulin à eau peut moulin 150 kg de blé à l'heure ce qui correspond à peu près au travail de 40 personnes.



**Figure 4 :** Moulin à eau avec sa roue à aubes

À l'origine, ils servent essentiellement à moulin les grains, presser les olives, broyer les noix ou les raisins, voire les minéraux... Ils vont être adaptés à des activités industrielles proprement dites grâce à l'introduction d'un mécanisme intermédiaire révolutionnaire, l'arbre à cames : ce dispositif transforme en effet le mouvement circulaire continu de la roue motrice en un mouvement rectiligne et alternatif.

- **Les centrales hydro-électriques**

Ce n'est qu'au cours du XIX<sup>e</sup> siècle que les roues à aubes sont utilisées pour produire de l'électricité. À la fin du siècle, la turbine remplacera la roue hydraulique et les premiers barrages feront leur apparition.

En effet, au XIX<sup>e</sup> siècle Benoist de Fourneyron (1802-1867) invente la première turbine. Il utilise l'effet de la pression pour entraîner une roue à eau. Il commence en 1827 avec une première turbine aux forges de Pont-sur-l'Ognon en Franche-Comté. La hauteur de chute de 1,4m génère une puissance de 4,5 kW avec 60 tours par minute. Quelques années plus tard, en 1837, en Allemagne, il équipe une chute de 112 mètres avec une turbine de 55 cm de diamètre et atteint une puissance de 45 kW pour une vitesse de rotation de 2300 tours par minute.



Plus tard, l'apparition des dynamos et des alternateurs mis au point par le Belge Zénobe Gramme (1826-1901) entre 1869 et 1877 permettront de produire industriellement de l'électricité et de la transporter sur de longues distances.

L'hydroélectricité va connaître ensuite un développement spectaculaire. Ainsi, entre 1920 et 1940, plus de cinquante barrages sont édifiés.

Parmi toutes les énergies renouvelables, l'hydroélectricité est la seule à être exploitée à grande échelle, et ceci dans le monde entier. En effet, elle représente 16 % de la production électrique mondiale contre 67 % pour les combustibles fossiles (charbon, pétrole, etc.), 17 % pour le nucléaire et 0,3 % pour les centrales géothermiques.

Actuellement, la Belgique est équipée d'un parc d'une cinquantaine de centrales hydroélectriques dont la puissance installée totale est d'environ 100 MW.

### 3. Les différents types de centrales hydroélectriques

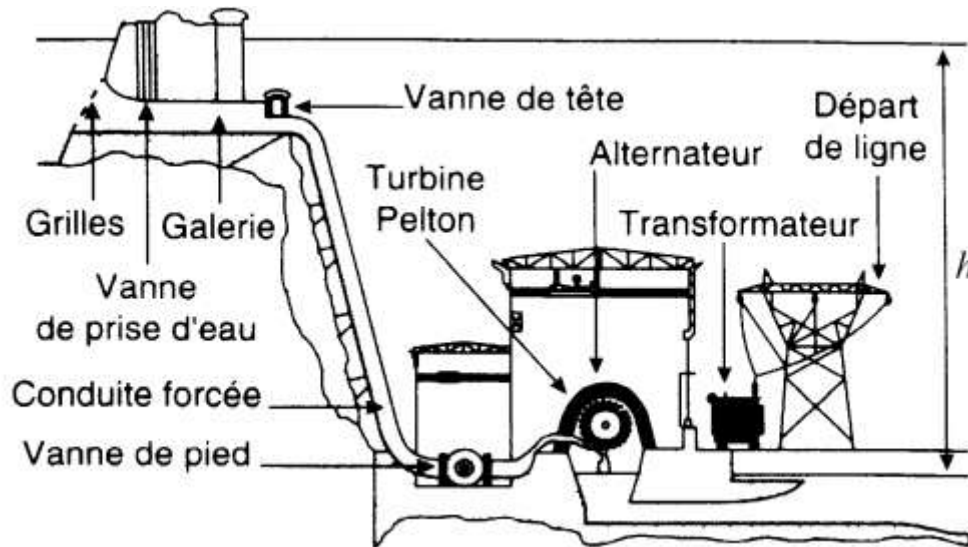
Il existe différents types de centrales hydroélectriques en fonction de la hauteur de la chute d'eau et du volume de la réserve d'eau :

- **les centrales gravitaires** qui mettent à profit l'écoulement de l'eau au long d'une dénivellation du sol. On distingue les usines de lac (plus de 300 m de chute), les usines d'éclusée (entre 25 et 300 m) et les usines au fil de l'eau (moins de 25 m).
- **les Stations de Transfert d'Énergie par Pompage** qui en plus de produire de l'énergie à partir de l'écoulement naturel, comportent un mode pompage permettant de stocker l'énergie produite par d'autres types de centrales lorsque la consommation est basse, par exemple la nuit, pour la redistribuer, en mode turbinage, lors des pics de consommation.
- les usines marémotrices au sens large qui utilisent l'énergie du mouvement des mers, qu'il s'agisse du flux alterné des marées (marémotrice au sens strict), des courants marins permanents (hydroliennes au sens strict) ou du mouvement des vagues.

**3.1. Principe de fonctionnement des centrales hydrauliques :** L'eau accumulée dans les barrages ou dérivées par les prises d'eau, constitue une énergie potentielle disponible pour entraîner en rotation la turbine d'une génératrice. L'énergie hydraulique se transforme alors en énergie mécanique. Cette turbine accouplée mécaniquement à un alternateur l'entraîne en rotation afin de convertir l'énergie mécanique en énergie électrique.

La puissance disponible résulte de la conjonction de deux facteurs :

- Ę hauteur de la chute,
- Ę débit de la chute.



**Figure 5 :** Schéma fonctionnelle d'une centrale hydraulique

La définition de l'énergie potentielle est

$$W = m \cdot g \cdot h \quad (1)$$

Avec :

W : énergie potentielle en Joules

[J] m : masse de l'eau en Kilogrammes [Kg]

g : accélération de la pesanteur en mètres/secondes<sup>2</sup> [m/s<sup>2</sup>]

h : hauteur de la chute d'eau en mètres, [m]

La définition de la puissance est :

$$P = \frac{W}{t} \quad (2)$$

Avec : P : puissance utile de la chute d'eau en Watt, [W]

t : durée en secondes [s]

On peut alors calculer la puissance d'une chute d'eau en fonction de sa hauteur et de son débit:

$$P = \frac{\rho \cdot V \cdot g \cdot h}{t} \quad (3)$$

Avec :

$\rho$  : Masse volumique en Kilogrammes/mètres<sup>3</sup>, [Kg/m<sup>3</sup>]

V : Volume en mètres cube, [m<sup>3</sup>]

Ce qui donnera au final :

$$P=Q \cdot g \cdot h \quad (4)$$

Avec :

Q : Débit de la chute d'eau en mètres<sup>3</sup> /secondes, (m<sup>3</sup> /s)

On voit que, pour avoir une puissance importante, le produit Q.h doit être le plus élevé possible. L'idéal est d'avoir un grand débit sur une grande hauteur de chute. Malheureusement ces deux conditions sont rarement réunies.

#### 4. Les différents types de barrages

Il existe différents types de barrages:

**4.1. Barrage poids** Un barrage poids est un barrage dont la propre masse suffit à résister à la pression exercée par l'eau.



**Figure 6 :** Barrage de Vassivière

**4.2. Barrage à contreforts** Le barrage à contreforts reporte la poussée de l'eau sur les fondations inférieures et sur les rives.



**Figure 7:** Barrage de Grandval

**4.3. Barrage en voûte** La poussée de l'eau est reportée sur les flancs de la vallée au moyen d'un mur de béton arqué horizontalement, et parfois verticalement (on la qualifie alors de voûte à double courbure).

Ces énormes structures ne constituent que la partie supérieure d'un barrage hydroélectrique. Dans les sous-sols, se trouvent les turbines et les alternateurs.



**Figure 8:** Barrage de Luzège

## 5. Les turbines

Les centrales sont équipées de turbines qui transforment l'énergie du flux d'eau en une rotation mécanique de façon à actionner des alternateurs.

Le type de turbine utilisé dépend de la hauteur de la chute d'eau :

- pour les très faibles hauteurs de chute (1 à 30 mètres), des turbines à bulbe peuvent être utilisées ;
- pour les faibles chutes (5 à 50 mètres) et les débits importants, la turbine Kaplan est privilégiée : ses pales sont orientables ce qui permet d'ajuster la puissance de la turbine à la hauteur de chute en conservant un bon rendement ;
- la turbine Francis est utilisée pour les moyennes chutes (40 à 600 mètres) et moyen débit. L'eau entre par la périphérie des pales et est évacuée en leur centre ;
- la turbine Pelton est adaptée aux hautes chutes (200 à 1 800 mètres) et faible débit. Elle reçoit l'eau sous très haute pression par l'intermédiaire d'un injecteur (impact dynamique de l'eau sur l'auget).

Pour les petites centrales hydroélectriques, des turbines à prix bas (et dont le rendement est moins bon) et de concepts simples facilitent l'installation de petites unités.

## 6. Les avantages et les inconvénients de la production d'électricité hydraulique

### 6.1. Les avantages :

La technologie des microcentrales hydroélectriques est très certainement la mieux maîtrisée de toutes les énergies renouvelables. L'équipement est caractérisé par sa grande robustesse, sa

fiabilité et sa longue durée de vie. L'entretien de l'installation est très simple et les frais de fonctionnement sont réduits (quelques % de l'investissement). Il s'agit bien entendu d'une énergie propre dans ce sens qu'elle ne génère, directement, aucune émission nocive et ne nécessite aucun transport.

## 6.2. Les inconvénients:

- **Les limites :**

La production d'électricité d'une microcentrale est parfois caractérisée par des fluctuations importantes suite à la grande variabilité des débits de certains sites. Les coûts d'investissement peuvent être assez importants pour certaines installations. L'installation d'une microcentrale hydroélectrique nécessite des sites appropriés (cours d'eau et chute)

- **Impacts négatifs sur l'environnement:**

Une microcentrale mal intégrée dans son environnement, peut générer des perturbations de diverses natures. L'atteinte au paysage par l'aspect peu esthétique de la centrale, de la prise d'eau et de la conduite forcée. Le bruit généré par les turbines, le multiplicateur de vitesse, l'alternateur, du transformateur et l'écoulement de l'eau peu provoquer une gêne pour le voisinage proche. La prise d'eau peut entraîner une perturbation du régime de l'eau et de la relation nappes aquifères - rivières. Dans la partie court-circuitée de la rivière, une eutrophisation du milieu aquatique ainsi qu'une modification et une perturbation de la faune peuvent être observées. L'installation peut constituer un obstacle aux migrations des poissons.

## 7. Solutions d'accompagnement :

Si la microcentrale est bien conçue, la plupart des atteintes à l'environnement peuvent être minimisées. En assurant le respect du débit réservé. Par la mise en place de passes à poissons. En veillant à l'intégration de la microcentrale dans le paysage. En outre, au niveau de l'entretien des cours d'eau, le dégrilleur peut jouer un rôle non négligeable en éliminant les éléments flottants.

*Chapitre 8*  
*L'énergie de la Biomasse*

## 1. Définition et catégories

La biomasse désigne l'ensemble des matières organiques pouvant se transformer en énergie. On entend par matière organique aussi bien les matières d'origine végétale (résidus alimentaires, bois, feuilles) que celles d'origine animale (cadavres d'animaux, êtres vivants du sol).

Il existe trois formes de biomasse présentant des caractéristiques physiques très variées :

- les solides (ex : paille, copeaux, bûches) ;
- les liquides (ex : huiles végétales, bioalcools) ;
- les gazeux (ex : biogaz).

La biomasse est une réserve d'énergie considérable née de l'action du soleil grâce à la photosynthèse. Elle existe sous forme de carbone organique. Sa valorisation se fait par des procédés spécifiques selon le type de constituant.

La biomasse n'est considérée comme une source d'énergie renouvelable que si sa régénération est au moins égale à sa consommation. Ainsi, par exemple, l'utilisation du bois ne doit pas conduire à une diminution du nombre d'arbres.

## 2. Fonctionnement technique ou scientifique

La valorisation énergétique de la biomasse peut produire trois formes d'énergie utile, en fonction du type de biomasse et des techniques mises en œuvre :

- de la chaleur ;
- de l'électricité ;
- une force motrice de déplacement.

**3. Procédés de valorisation de la biomasse :** On distingue trois procédés de valorisation de la biomasse : la voie sèche, la voie humide et la production de biocarburants.

### 3.1. La voie sèche

La voie sèche est principalement constituée par la filière thermochimique, qui regroupe les technologies de la combustion, de la gazéification et de la pyrolyse :

- **la combustion** produit de la chaleur par l'oxydation complète du combustible, en général en présence d'un excès d'air. L'eau chaude ou la vapeur ainsi obtenues sont utilisées dans les procédés industriels ou dans les réseaux de chauffage urbain. La vapeur peut également être envoyée dans une turbine ou un moteur à vapeur pour la production d'énergie mécanique ou, surtout, d'électricité. La production combinée de chaleur et d'électricité est appelée cogénération ;
- la gazéification de la biomasse solide est réalisée dans un réacteur spécifique, le gazogène. Elle consiste en une réaction entre le carbone issu de la biomasse et des gaz réactants (la

vapeur d'eau et le dioxyde de carbone). Le résultat est la transformation complète de la matière solide, hormis les cendres, en un gaz combustible composé d'hydrogène et d'oxyde de carbone. Ce gaz, après épuration et filtration, est brûlé dans un moteur à combustion pour la production d'énergie mécanique ou d'électricité. La cogénération est également possible avec la technique de gazéification ;

- la pyrolyse est la décomposition de la matière carbonée sous l'action de la chaleur. Elle conduit à la production d'un solide, le charbon de bois ou le charbon végétal, d'un liquide, l'huile pyrolytique, et d'un gaz combustible. Une variante de la pyrolyse, la thermolyse, est développée actuellement pour le traitement des déchets organiques ménagers ou des biomasses contaminées.

### 3.2. La voie humide

La principale filière de cette voie est la méthanisation. Il s'agit d'un procédé basé sur la dégradation par des micro-organismes de la matière organique. Elle s'opère dans un digesteur chauffé et sans oxygène (réaction en milieu anaérobie). Ce procédé permet de produire :

- **le biogaz** qui est le produit de la digestion anaérobie des matériaux organiques ;
- **le digestat** qui est le produit résidu de la méthanisation, composé de matière organique non biodégradable.

### 3.3. La production de biocarburants

Les biocarburants sont des carburants liquides ou gazeux créés à partir d'une réaction :

- entre l'huile (colza, tournesol) et l'alcool dans le cas du biodiesel ;
- à partir d'un mélange de sucre fermenté et d'essence dans le cas du bioéthanol.

Il existe 3 générations de biocarburants :

- **1<sup>ère</sup> génération** : biocarburants créés à partir des graines ;
- **2<sup>e</sup> génération** : biocarburants créés à partir des résidus non alimentaires des cultures (paille, tiges, bois) ;
- **3<sup>e</sup> génération** : biocarburants créés à partir d'hydrogène produit par des micro-organismes ou à partir d'huile produite par des microalgues.

Les biocarburants de 2<sup>e</sup> et 3<sup>e</sup> génération ont entre autres pour vertu de ne pas « occuper » un territoire agricole en compétition avec la production d'aliments pour l'homme. Leur maturité industrielle, tout particulièrement pour la 3<sup>e</sup> génération, reste à établir.

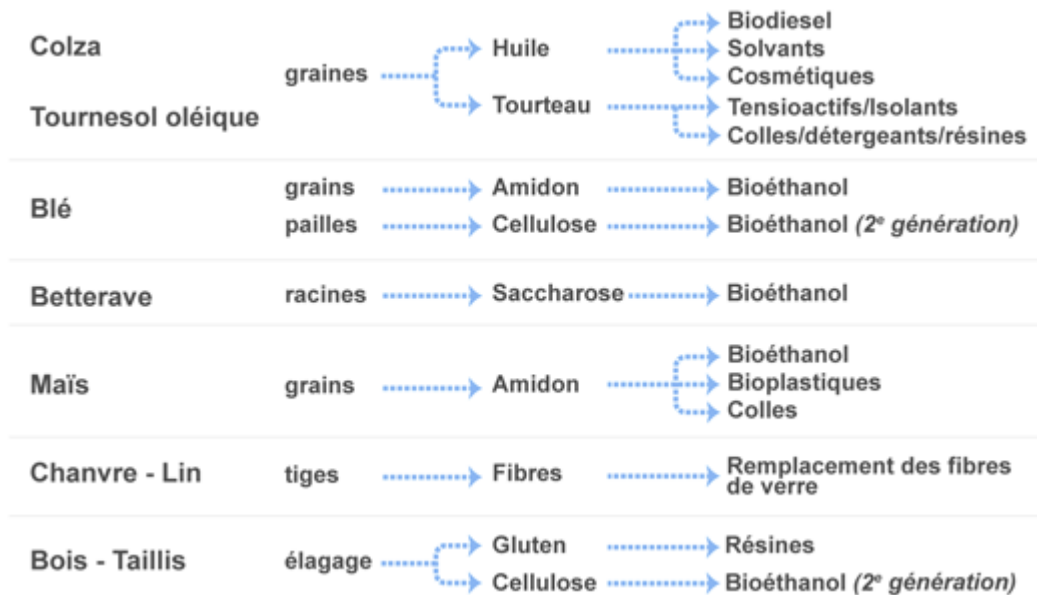
Ces biocarburants peuvent prendre différentes formes :

- des esters d'huiles végétales produits, par exemple, à partir du colza (biodiesel) ;



- de l'éthanol, produit à partir de blé et de betterave, incorporable dans le super sans plomb sous forme d'ETBE (éthyl tertio butyl ether).

La valorisation de la biomasse ne produit toutefois pas que des biocarburants.



**Figure 1 :** Voies de valorisation de la biomasse

#### 4. Enjeux par rapport à l'énergie

- **Une énergie naturelle et propre**

La valorisation énergétique de la biomasse peut permettre d'augmenter la part des énergies renouvelables dans un mix énergétique et de réduire la dépendance au pétrole ou au gaz. La diversité des matières organiques constituant la biomasse permet à de nombreux pays d'avoir accès à cette ressource. Elle peut donc favoriser leur indépendance énergétique.

De plus, la biomasse participe à la lutte contre les émissions de gaz à effet de serre dans la mesure où le CO<sub>2</sub> dégagé par la combustion des bioénergies est compensé par le CO<sub>2</sub> absorbé par les végétaux lors de leur croissance. La récupération du biogaz dans les décharges permet de capter le méthane issu de la biomasse (dont l'effet de serre est considéré comme 21 fois plus fort que le CO<sub>2</sub>).

- **Une énergie renouvelable si son utilisation est maîtrisée**

L'utilisation de la biomasse peut dans certains cas engendrer des déséquilibres environnementaux. L'amalgame entre énergie propre et énergie renouvelable est fréquent.

Il est important de préciser que la biomasse ne peut être considérée comme une énergie renouvelable que si elle est renouvelée.

- **Les biocarburants en débat**

La concession de parcelles à l'industrie des biocarburants a réduit la taille des terres agricoles destinées à l'alimentation. Certains experts craignent que l'essor des biocarburants déclenche une crise alimentaire mondiale, en particulier dans le contexte d'une forte croissance démographique terrestre (plus de 100 millions d'individus en plus par an). Après en avoir fait l'éloge, certains médias et ONG ont opté pour des campagnes de dénigrement et de désinformation globale à l'égard des biocarburants en omettant de souligner les différences propres à chaque génération.

### **5. Zone de présence ou d'application**

Hors consommation domestique, les principaux pays dans le monde ayant recours à la biomasse sont le Brésil, les États-Unis et l'Inde.

La biomasse et les déchets constituent 67,6 % de la production primaire d'énergie renouvelable dans l'Union européenne en 2010.

*Chapitre 9*  
*L'énergie des Mers*

**1. Introduction :** Les énergies marines dépendent des ressources naturelles des eaux de la mer et des océans. Elles permettent de produire de l'électricité grâce aux flux naturels d'énergie des courants et des marées, et à la matière marine, exploités dans différents types d'installations.

L'eau recouvre en grande partie notre planète, principalement à travers les mers et les océans. Elle constitue donc une source d'énergie importante, aujourd'hui encore peu exploitée.

Les énergies marines n'émettent aucun gaz à effet de serre et leur matière première est disponible dans de nombreux pays du monde.

Ce terme d'énergie marine ou énergie des mers, fait référence aux énergies renouvelables directement extraite du milieu marin ; entre autre :

- l'énergie des marées, ou énergie marémotrice ;
- l'énergie des courants marins ou énergie hydrolienne ;
- l'énergie marée thermique ;
- l'énergie des vagues et de la houle.

## **2. Les différentes énergies marines**

### **2.1. L'énergie des marées**

L'énergie marémotrice consiste à exploiter l'énergie issue des marées dans des zones littorales de fort marnage (différence de hauteur d'eau entre la marée haute et la marée basse se succédant). Le phénomène de marée est induit par l'effet gravitationnel sur l'océan de deux astres à proximité de notre planète : la Lune et le Soleil.

Contrairement aux hydroliennes qui captent l'énergie cinétique des courants de marée, le principe d'une centrale marémotrice s'appuie sur une énergie potentielle : cette source d'énergie utilise le marnage pour produire de l'électricité en exploitant la différence de hauteur entre deux bassins séparés par un barrage. La centrale de la Rance en Bretagne a été la première grande centrale marémotrice dans le monde et longtemps la plus puissante avec une capacité installée de 240 MW.

#### **2.1.1. Principe de fonctionnement d'une usine marémotrice**

Un bras de mer ou un estuaire en zone de fort marnage est équipé d'une infrastructure qui met en œuvre des turbines de basse chute actionnées par le flux d'eau de mer entre les deux bassins (situés à des niveaux différents).

Les conditions naturelles favorables à l'implantation de sites marémoteurs sont :

- un marnage supérieur à 5 mètres, idéalement entre 10 et 15 mètres ;
- une profondeur de 10 à 25 mètres sous les basses mers ;

- un substrat rocheux (ou sablo-graveleux) pour fixer les fondations de l'infrastructure.

### 2.1.2. Exemple d'une Usine marée motrice

La France a été pionnière en énergie marémotrice avec l'inauguration en 1966 de l'usine marémotrice de la Rance, près de Saint-Malo. Le site de la Rance est connu pour avoir les plus grandes amplitudes de marées au monde. Au XII<sup>e</sup> siècle, des moulins à aubes y étaient déjà installés pour profiter de l'énergie des marées. Positionnées sur les 750 mètres de large de l'estuaire de la Rance, les 24 turbines de la centrale disposent d'une puissance installée de 240 MW et fonctionnent dans les deux sens, en marée montante et descendante. La production annuelle s'élève à 540 GWh, soit la consommation d'une ville de 300 000 habitants.

## 2.2. L'énergie des courants marins

L'énergie des courants marins est captée pour produire de l'électricité grâce à des hydroliennes, comme les éoliennes le font avec la force des vents.

Leur fonctionnement est aussi simple que celui d'une éolienne :

1. La force des courants marins actionne les pales d'une ou plusieurs hélices.
2. L'énergie mécanique produite par la rotation des pales est transmise à un alternateur.
3. L'alternateur produit de l'énergie électrique, acheminée par des câbles sous-marins jusqu'au rivage.

Il existe différents dispositifs pour exploiter l'énergie hydrolienne. Les principaux sont :

- Les hydroliennes côtières fixées à une structure métallique,

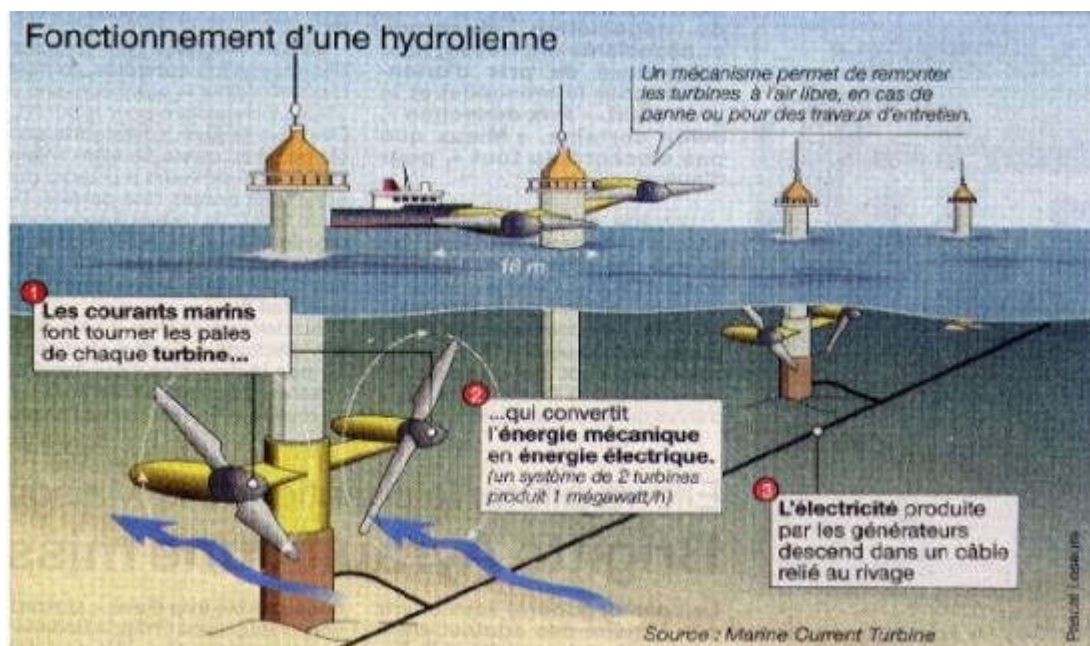
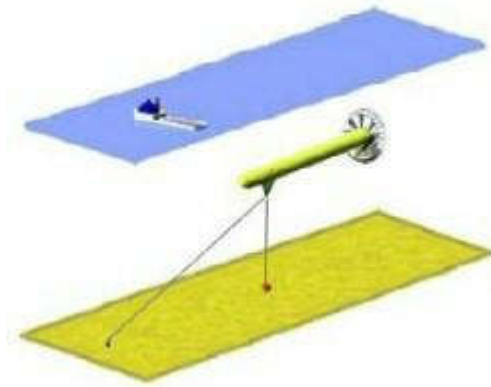


Figure 1: Fonctionnement d'une éolienne

- Les hydroliennes flottant à mi- profondeur situées assez loin des côtes,



**Figure 2 :** Les hydroliennes flottant

- Les hydroliennes situés à l'embouchure de fleuve ou des côtes pour utiliser les courants des marées.



**Figure 3:** Les hydroliennes situés à l'embouchure de fleuve

Ce mode de production d'énergie possède de nombreux atouts :

- il est prévisible : les marées, donc le mouvement des courants, peuvent être calculées à l'avance
- il occupe peu d'espace : du fait de la densité de l'eau, les machines peuvent donc être plus compactes
- il possède un gros potentiel du fait des courants qui baignent les côtes de nombreux pays dans le monde

Un premier site pilote de parc hydrolien en France est en cours de construction au large de Paimpol-Bréhat dans les Côtes d'Armor à 15 km du continent. Dans cette zone, les courants

marins sont parmi les plus élevés d'Europe (3 m/s). La France concentre en effet 20 % du potentiel hydrolien européen au large de la Bretagne et du Cotentin. Composé de plusieurs hydroliennes placées à 35 m de fond, ce parc d'une capacité de 2 à 4 MW sera raccordé au réseau d'électricité dès son inauguration et permettra d'alimenter environ 4 000 foyers.

### 2.3. Les autres sources d'énergies marines

D'autres modes de production d'électricité, actuellement en recherche ou expérimentation à des stades plus ou moins avancés, utilisent les richesses de la mer telles que :

- **l'énergie thermique des mers** qui exploite la différence de température entre les eaux superficielles et les eaux profondes des océans
- **l'énergie des vagues et de la houle**
- **l'énergie osmotique**, qui exploite le phénomène d'osmose entre l'eau douce et l'eau salée, par exemple au voisinage des estuaires, où ces deux eaux se mélangent
- **la biomasse marine**, qui exploite les algues et le phytoplancton par gazéification, fermentation ou combustion

#### 2.3. 1. L'énergie thermique des mers

On appelle « énergie thermique des mers » l'énergie potentielle exploitable de la différence de température entre les eaux de surface et les eaux profondes. En effet, dans les régions tropicales, la température de l'eau en surface peut aller à plus de 25°C alors qu'en profondeur, elle est froide (environ 5°C). Cela s'explique par la différence de densité de l'eau. Une eau froide et très salée est plus dense (et donc plus lourde et plus profonde) qu'une eau chaude et moins salée.

Les eaux mondiales circulent sans cesse dans le but de réguler la température moyenne de la planète. C'est ce que l'on appelle la « circulation thermohaline ». Ainsi, les eaux froides des pôles circulent vers les zones tropicales, alors que les eaux chaudes remontent vers les pôles, où la chaleur est ensuite évacuée dans l'atmosphère.

- **Exploitation de l'énergie thermique des mers**

Des canalisations, de plusieurs mètres de diamètre, vont acheminer à la surface l'eau pompée à environ 1 000 m de profondeur. La différence de température entre les profondeurs et la surface va permettre, via le cycle thermodynamique de Rankine, de faire fonctionner cette technologie, comparable à une pompe à chaleur.

En effet, un fluide thermodynamique en circuit fermé se vaporise dans un échangeur de chaleur (évaporateur) grâce à l'eau de mer chaude de surface, la vapeur sous pression actionne une turbine, qui, couplée à une génératrice, produit de l'électricité. Grâce à l'eau de mer froide,

la vapeur se condense ensuite dans un autre échangeur (condenseur) et peut ainsi recommencer un nouveau cycle.

- **L'eau de mer pour refroidir ou chauffer des bâtiments**

L'utilisation de l'eau de mer est également envisagée pour refroidir et chauffer les bâtiments selon les saisons. Le principe est celui d'une pompe à chaleur alimentée avec de l'eau de mer. La température de l'eau étant relativement stable, cette solution est envisagée à la fois en France métropolitaine et en outre-mer.

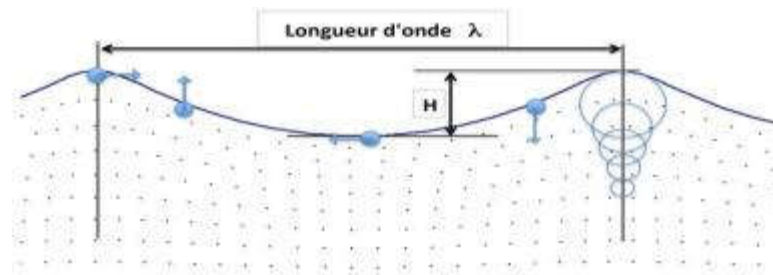
### 2.3.2. L'énergie des vagues et de la houle

Les vagues sont un mouvement ondulatoire de la surface de la mer. Elles sont créées par le vent qui transfère de l'énergie de l'atmosphère dans la mer. Les phénomènes en jeu sont très compliqués, et les études théoriques se poursuivent encore maintenant.

En un lieu et à un moment donné, la force des vagues définit ce qu'on nomme un état de mer.

Celles-ci sont caractérisées par leur hauteur, leur période et la direction de leur propagation.

La houle est une onde qui agite la surface de façon périodique. Lorsque la profondeur est suffisante, les particules d'eau suivent des trajectoires circulaires, comme schématisé sur la figure 4.



**Figure 4** : Schéma d'une houle se propageant de gauche à droite.

Les mouvements des particules d'eau sont des trajectoires circulaires dont le rayon de giration diminue avec la profondeur. Les flotteurs sur la surface visualisent le mouvement à différents instants.

- **Techniques de récupération**

Il existe 4 principaux types de dispositifs pour récupérer l'énergie des vagues :

- ✓ **les corps flottants** : ces dispositifs constituent une structure flottante articulée et perpendiculaire aux vagues. Ils sont formés de tuyaux en aciers ou de pontons reliés par des joints contenant des pompes hydrauliques. Le mouvement des vagues force le liquide hydraulique qui actionne une turbine.



- ✓ **les colonnes d'eau oscillante** : la surface de l'eau de mer agit comme un piston pour pousser l'air dans un tuyau (« trou du souffleur ») ; cet air actionne à son tour une turbine qui peut travailler dans les deux sens. Ce type de dispositif peut être installé en mer ou sur le littoral.
- ✓ **les systèmes à déferlement** : la vague déferlant sur un plan incliné est recueillie sur un bassin en hauteur dans lequel l'eau actionne une turbine, puis retourne à la mer.
- ✓ **les parois oscillantes immergées** : ce sont de petits dispositifs en comparaison à la longueur d'ondes des vagues, dont il existe plusieurs variantes. Ils peuvent soit osciller (sorte de volet oscillant dans les deux sens avec le passage des vagues), soit actionner une sorte de pompe à piston à vérin hydraulique.

### 2.3.3. L'énergie osmotique

L'énergie osmotique utilise la concentration en sels de l'eau de mer pour produire de l'électricité. Plus précisément, le procédé exploite la pression hydrostatique apparaissant lorsque deux liquides présentant des concentrations en salinité différentes sont mis en contact par le biais d'une membrane semi-perméable. Cette production d'électricité par osmose, encore expérimentale, est principalement utilisée au niveau des estuaires. C'est la moins avancée de toutes les énergies marines renouvelables.

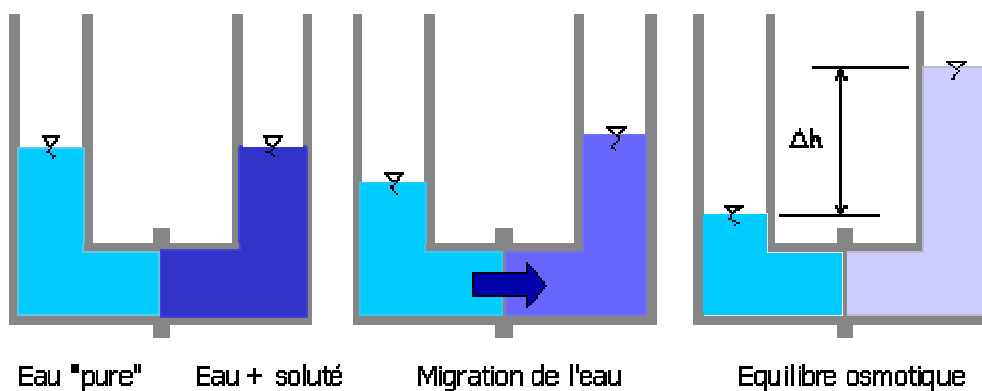


Figure 5 : Principe naturel de l'osmose

### 2.3.4 La biomasse marine

Le terme de biomasse désigne dans le domaine des bioénergies l'ensemble des matières organiques ( ici les algues ) ayant la possibilité de devenir des sources d'énergie de diverses manières notamment par combustion , par méthanisation ( dans le cas des biogaz ) et par transformation chimique.

- **Application à la production d'énergie**

La grande diversité existante au niveau des algues pourraient permettre de créer des agro carburants en extrayant les sucres et les huiles. En effet il existerait entre 200 000 et un million d'espèces d'algues.

Le potentiel théorique de cette énergie est extrêmement important ; il serait 10 fois supérieur à celui des espèces oléagineuses terrestres.

### **3. Avantages et inconvénients**

L'énergie marémotrice présente l'avantage d'être une énergie renouvelable, qui, après la construction du barrage, n'émet pas de gaz à effet de serre . En revanche, la production d'électricité a un caractère intermittent. Il existe des périodes (prévisibles) sans courant ni retenue suffisante pendant lesquelles les turbines ne peuvent pas fonctionner. Son impact environnemental est fort avec la création d'un nouvel équilibre écologique en amont et en aval du barrage. En outre, les investissements et les coûts de maintenance sont très élevés.

Il est à noter que l'énergie des marées pourrait être exploitée ailleurs que sur le littoral. Plusieurs schémas de projets marémoteurs s'appuient sur une conception nouvelle : le lagon artificiel<sup>2</sup>, un modèle qui limiterait l'impact environnemental. Fonctionnant à la manière d'un lac artificiel, ces lagons se rempliraient d'eau à marée haute, puis se videraient par des sas équipés de turbines. Les études portent à ce jour sur 3 sites : Swansea et Severn, au Royaume-Uni, et Yalu, en Chine.

## Références bibliographiques

- [1] J.M Chassériau, Conversion thermique du rayonnement solaire ; Dunod, 1984.
- [2] R. Bernard; G. Menguy; M. Schwartz, Le rayonnement solaire conversion thermique et applications ; Technique et documentation Lavoisier , 2ème édition 1980.
- [3] S. Saadi, Effet des paramètres opérationnels sur les performances d'un capteur solaire plan, Mémoire de Magister en physique ; UMC, 2010.
- [4] M. Capderou, Atlas solaire de l'Algérie, Tome 1, Vol. 1 et 2 ; OPU, 1987.
- [5] A. Mefti; M.Y Bouroubi; H. Mimouni, Evaluation du potentiel énergétique solaire, Bulletin des Energies Renouvelables, N° 2, P12, décembre 2002.
- [6] M. Capderou, Atlas solaire de l'Algérie, Tome 1, Vol. 1 et 2 ; OPU, 1987.
- [7] Charles Chauliaguet : L'énergie solaire dans le bâtiment, P22, 32 et p147-148 Editions Eyrolle 1981.
- [8] <http://www.lei.ucl.ac.be/multimedia/eLEE/FR/realisations/EnergiesRenouvelables/FiliereSolaire/PanneauxPhotovoltaiques/PanneauxPhotovoltaiques.htm>
- [9] <http://web.laghuniv.dz/web/fr/doc/publications/ouvrage/techno/Mesri.pdf>
- [10] DUFFIE J. A. , BECKMAN W. A., Solar energy thermal processes, John Wiley and Sons, New York,1974.
- [11] Boudellal M., La pile à combustible : Structure. Fonctionnement. Application, 2007, Dunod, 1 st ed., Paris, France.
- [12] Manuel d'enseignement des énergies renouvelables, Horizon Fuel Cell.
- [13] CDER, Bulletin des énergies renouvelables, pp 22- 23, N°8, Décembre 2005.
- [14] URL : [http://www.cder.dz/vlib/bulletin/pdf/bulletin\\_008\\_14.pdf](http://www.cder.dz/vlib/bulletin/pdf/bulletin_008_14.pdf)
- [15] Rémi SAISSET, Contribution à l'étude systémique de dispositifs énergétiques à composants électrochimiques. Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse, 2 Avril 2004.
- [16] Dinh An NGUYEN, Modélisation dynamique du cœur de pile a combustible de type PEM, Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Lorraine, 09 Juillet 2010.
- [17] URL : [http://docnum.univ-lorraine.fr/public/INPL/2010\\_NGUYEN\\_D\\_A.pdf](http://docnum.univ-lorraine.fr/public/INPL/2010_NGUYEN_D_A.pdf)
- [18] Livre : « Guide des énergies vertes pour la maison », Patrick Piro, éd. Terre vivante, L'écologie pratique,2006.
- [19] <http://www.smartgrids-cre.fr/index.php?p=stockage>
- [20] [http://www.tecsol.fr/st\\_fr/plansite.asp?page=gar0.htm](http://www.tecsol.fr/st_fr/plansite.asp?page=gar0.htm)