

COURS SUR LES ENERGIES RENOUVELABLES

Destiné aux Etudiants de Licence Energétique, niveau L3

Dr. Amel F. Boudjabi

SOMMAIRE

Chapitre 1 : Généralités	01
Avant-propos	01
1. Indicateurs de la consommation énergétique	01
2. Définitions	05
Chapitre 2 : Energie solaire	09
2.1. Energie solaire	09
2.1.1. Quelques définitions sur le système solaire	10
2.2. La conversion photo thermique	15
2.2.1. Capteur solaire plan	16
2.2.2. Systèmes solaires à concentration CSP	23
a.1. concentrateurs paraboliques	24
a.2. Miroirs Fresnel	26
a.3. Capteurs cylindro-paraboliques	27
a.4. Tours solaires	32
2.2.3. Le stockage thermique	37
2.3. Conversion photovoltaïque	43
2.3.2. Les différents types de cellules photovoltaïques	44
2.3.3. Calcul du rendement d'un panneau PV	49
Chapitre 3 : Energie hydraulique	52
3.1. L'énergie hydraulique dans le monde	52
3.2. Principe de fonctionnement	53
3.3. Types de centrales hydrauliques	54
3.4. Rendement d'une installation hydroélectrique	54
3.5. Avantages et inconvénients	55
3.6. Energie hydroélectrique en Algérie	55
Chapitre 4 : Energie éolienne	56
4.1. Principe de fonctionnement et éléments d'une éolienne	56
4.2. Modes d'exploitation de l'énergie éolienne	57
4.3. Fonctionnement technique	58
4.4. Enjeux par rapport à l'énergie	58
4.4.1. Avantages et inconvénients	58
4.4.2. Pays à grand capacité éolienne	59
4.4.3. Entreprises du secteur éolienne	59
4.5. Calculs d'une éolienne	59
4.5.1. Energie cinétique	59
4.5.2. Rendements	61
Chapitre 5 : La biomasse	63
5.1. La combustion	63
5.2. La pyrolyse	64
5.3. La méthanisation	64
5.4. La production de biocarburants	64
5.4.1. Le bioéthanol	65

5.5. Le compost	66
5.6. Avantages et inconvénients	67
5.7. Production énergie de biomasse	67
5.8. Biomasse en Algérie	68
Chapitre 6 : La géothermie	69
6.1. Types de géothermie	69
6.2. Principe	70
6.3. La géothermie utilisée pour le chauffage et l'électricité	70
6.4. Installations géothermiques	71
6.4.1. Puits canadiens	71
6.4.2. Les pompes à chaleur	71
6.5. Chauffage basse température	72
6.6. Géothermie moyenne température	72
6.7. Géothermie haute température	73
6.8. Avantages et inconvénients	74
6.8.1. Avantages	74
6.8.2. Inconvénients	74
6.9. Géothermie dans le monde	75
6.10. Géothermie en Algérie	76
Quiz de compréhension	78

Références bibliographiques

- 1- Génie Energétique, Energie Solaire. Jacques Bernard, Editions Ellipses. 2011.
- 2- Electricité photovoltaïque. Luc Chancelier & Eric Laurent. Collection « le point sur » Edition 2005
- 3- L'énergie solaire pour les bâtiments. Keith Roberston & Andreas Athienetis. SCHL- CMHC, Canada.
- 4- Eco conception des bâtiments et des quartiers. Bruno Peuportier. Ecole des mines de paris, 2008.
- 5- Villes, climat et changements climatiques. Valéry Masson. Centre national de recherches météorologiques.
- 6- Workshop sur les CSP. DLR, Allemagne, Alger, 2012
- 7- Bilan et programme national d'efficacité énergétique à l'horizon 2030. APRUE, ministère de l'énergie. 2016.
- 8- Le solaire photovoltaïque, Sylvain Delenclos, présentation 2013-2014
- 9- Les Bâtiments: efficacité énergétique et énergies renouvelables. Manuel de l'élève. Intelligent use of energy at school. Edition FR 1.2 - novembre 2010
- 10- <http://www.cder.dz/>
- 11- <https://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/biomasse>
- 12- <http://www.aprue.org.dz/>
- 13- http://enrj.renouvelables.free.fr/energie_hydraulique.html
- 14- <https://fr.wikipedia.org/>

Chapitre 1 : Généralités

Avant-propos

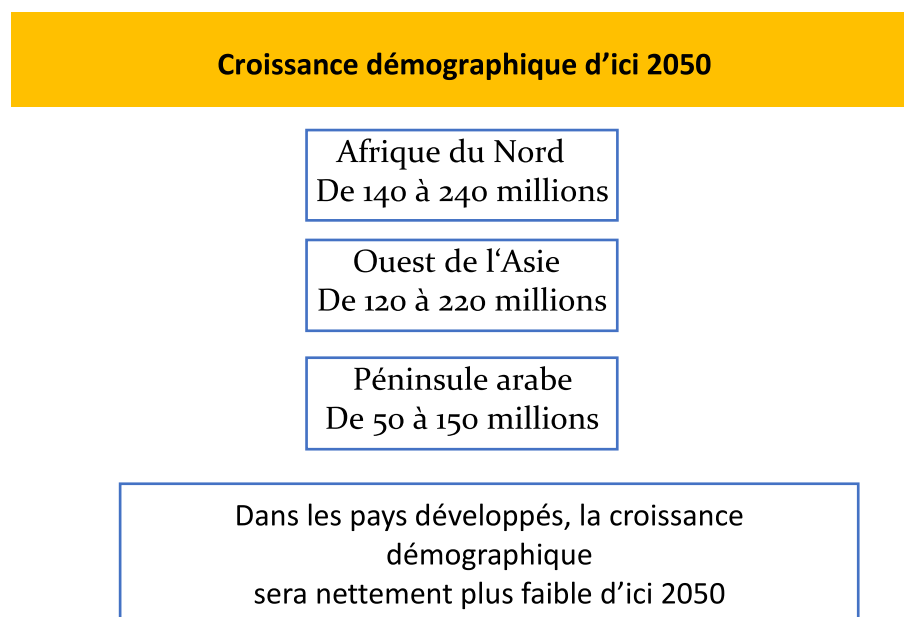
Le cours des Energies renouvelables est un cours de découverte destiné aux étudiants en Energétique afin de les initier aux nouvelles technologies du domaine des ENR comme sources alternatives pour la production de l'électricité, des biocarburants, pour le chauffage et climatisation etc...

L'homme a toujours utilisé de l'énergie, la première fut sa force musculaire et celles des animaux et ce jusqu'au début du 19^{ème} siècle. Par la suite, la science a ouvert la porte à l'exploitation d'autres sources naturelles d'énergie : le bois, l'eau, le vent, le pétrole, le gaz, le nucléaire... A chaque fois que l'énergie d'une certaine source fut maîtrisée, elle entraînait un bouleversement dans la **SOCIETE**.

C'est le cas dans notre ère où l'utilisation de sources d'énergie fossile a provoqué des conséquences nuisibles et irréversibles à l'environnement en épuisant les ressources naturelles et dégradant l'atmosphère par des émissions dangereuses de gaz à effet de serre et de gaz appauvrissant la couche d'ozone.

La production et consommation de l'énergie est liée à plusieurs indicateurs.

1. Indicateurs de la consommation énergétique ¹



¹Source : Workshop sur les CSP avec DLR Allemagne à Alger 2012.

Croissance économique

Western Asia		North Africa		Arabian Peninsula	
Jordan	2.1	Morocco	4.6	Oman	3.2
Lebanon	1.9	Algeria	4.0	Kuwait	2.1
Syria	1.7	Tunisia	3.6	Qatar	1.9
Iraq	1.6	Libya	3.8	Saudi Arabia	2.7
Iran	1.6	Egypt	4.1	UAE	1.8
				Yemen	6.5
		USA	1.2	Bahrain	2.3

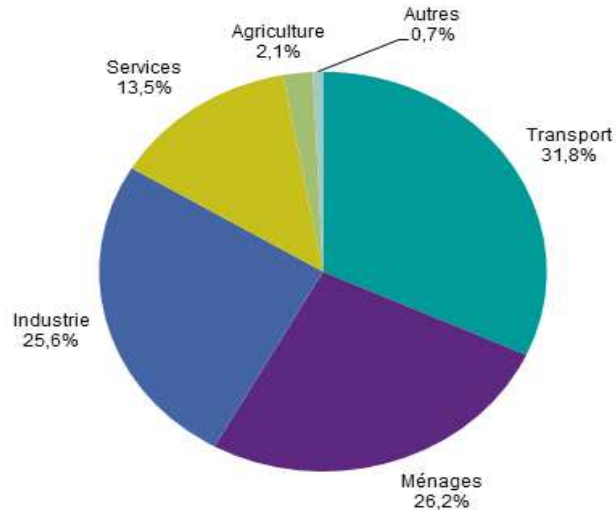


* Valeurs exprimées en PIB/hab.

→ Une demande croissante de l'énergie malgré que certains pays compensent par un gain d'efficacité tels que les USA

PIB: produit intérieur brut, la somme des valeurs ajoutées réalisées par toutes les branches d'activités

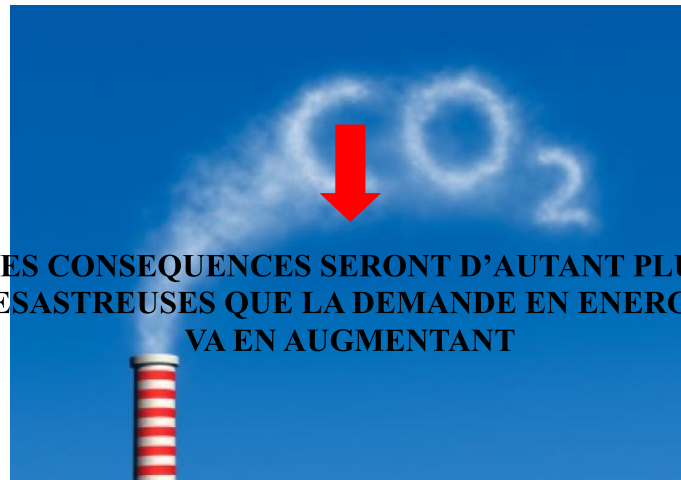
Consommation énergétique mondiale par secteur -2012



Source: Eurostat (code des données en ligne: tsdpc320)

PRODUCTION ET CONSOMMATION DE L'ENERGIE

=

Émission de gaz à effet de serre (principalement du CO₂)

Pour qu'il y ait vie sur terre, il faut qu'un équilibre entre énergie entrante et énergie sortante soit maintenu, une perturbation soutenue provoquerait des changements climatiques irréversibles (températures, précipitations, vents, inondations, etc...)

Mais sans gaz à effet de serre (GES), la température au sol de la terre serait très basse (environ -15°C), aucune vie ne serait possible, donc ces gaz sont vitaux! MAIS :

- Trop de GES (ce qui est le cas à cause des activités des humains) augmenterait la température moyenne sur terre.
- Augmentation = perturbation du cycle climatique: mouvement de la chaleur entre équateur et pôles.

Les activités humaines sont de différents types:

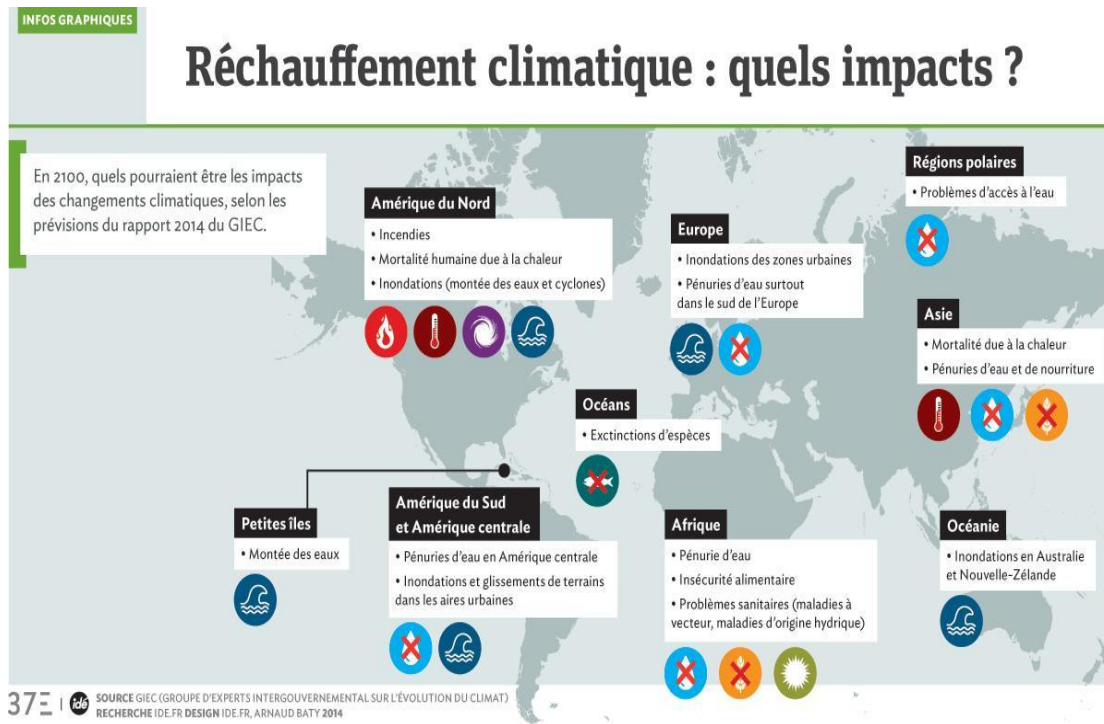
- Production de l'énergie : énergies fossiles
- Déforestation pour urbanisation
- Transports (dont le transport aérien)
- Industries
- Agriculture
- Autres....

Augmentation de la température moyenne de la terre de 1.8 °C à 4.6 °C d'ici 2100!

Impacts Socio-Economiques

- Dégradation de la qualité et conditions de vie
- Désertification ou inondations ,Insécurité alimentaire et pauvreté

- Migration incontrôlée des populations
- Densification anarchique de l'urbain
- Hausse du taux de maladies et de mortalité
- Risque de conflits locaux et internationaux



Plusieurs solutions aux problèmes de l'utilisation des énergies fossiles responsables des émissions excessives de gaz à effet de serre sont proposées dont la principale est l'utilisation des énergies renouvelables comme sources alternatives pour la production notamment de l'électricité, carburants, chauffage et climatisation.

Les ENR sont classées en cinq types de source : l'énergie solaire, l'énergie éolienne, l'énergie hydraulique, l'énergie géothermique et la biomasse.

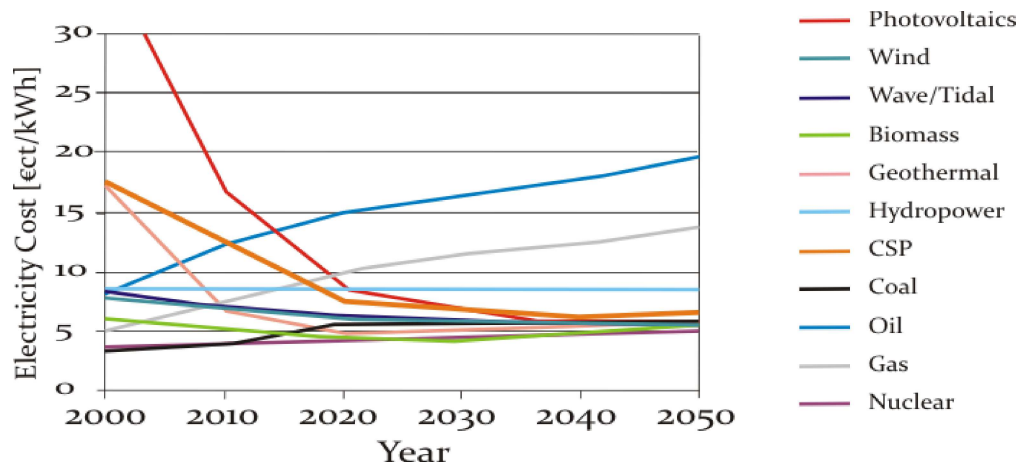


Fig1. Prévision du c t de l'électricité d'ici 2050
Obtenue par différentes sources d'énergie

2. Définition

Une énergie renouvelable est une source d'énergie qui se renouvelle rapidement pour être considérée comme inépuisable à l'échelle de l'homme. Les énergies renouvelables sont issues de phénomènes naturels réguliers ou cycliques provoqués par les astres, principalement le Soleil (rayonnement), mais aussi la Lune (marée) et la Terre ( nergie géothermique). Aujourd'hui, on assimile souvent par abus de langage les énergies renouvelables aux énergies propres.

Il existe cinq familles reconnues comme énergies renouvelables : l'énergie solaire, l'énergie hydraulique, l'énergie éolienne, la biomasse et la géothermie.

L'énergie solaire

L'énergie solaire est l'énergie que dispense le soleil par son rayonnement, directement ou de manière diffuse à travers l'atmosphère. Nous distinguons l'énergie solaire photovoltaïque et thermique.

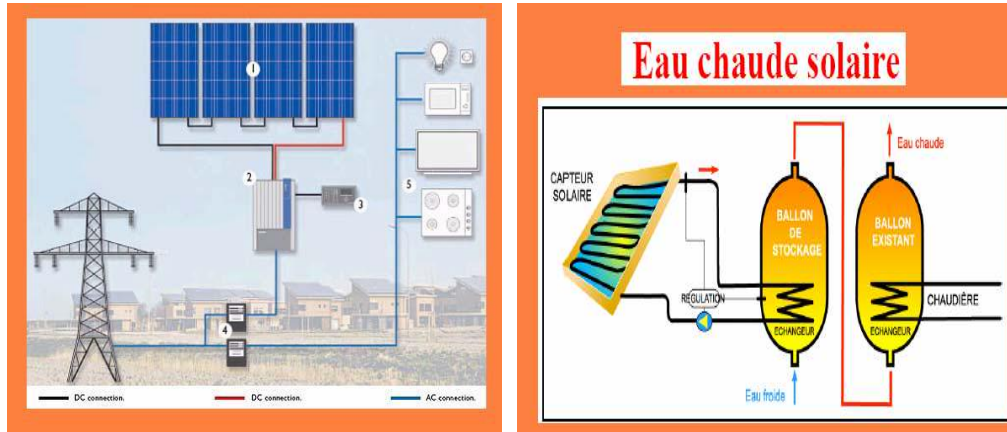


Fig2. Conversion de l'énergie solaire

La géothermie

La chaleur de la terre est une énergie qu'on peut utiliser. Au centre de celle-ci, la chaleur est tellement importante et la pression est si forte que les roches sont en fusion. On appelle cette matière le magma.

On peut utiliser la vapeur ou de l'eau capturée entre les roches et chauffée par la chaleur de la terre pour produire de l'électricité (température supérieure à 150°) et du chauffage (basse température inférieure souvent à 90°).

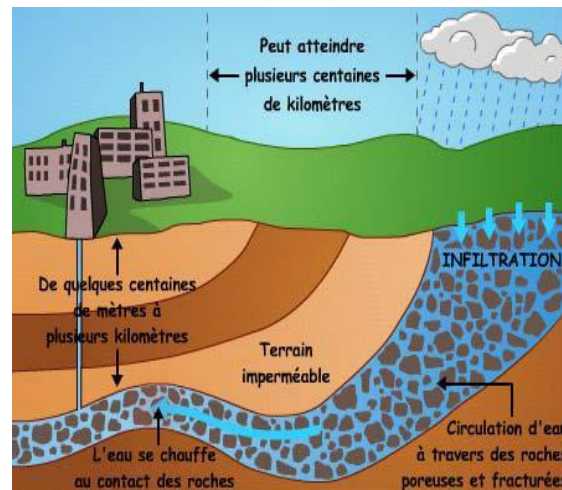


Fig3. Exemple de production de l'électricité

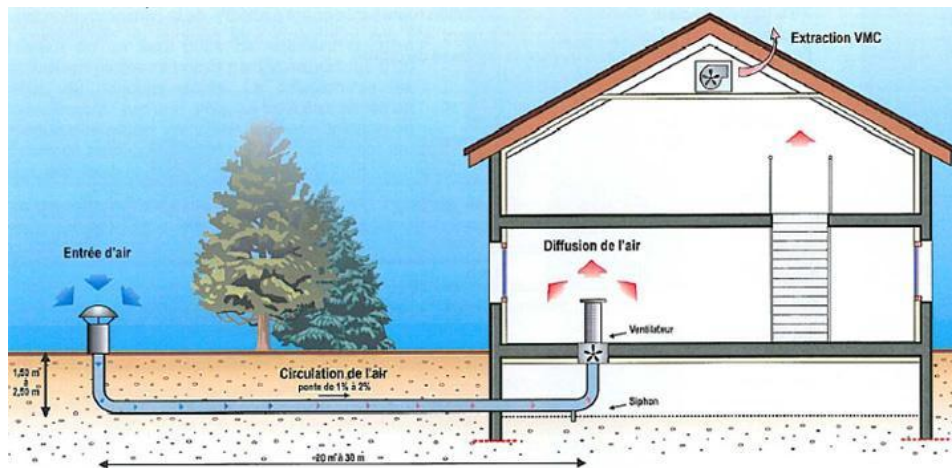


Fig4. Puits canadien ou climatique pour le chauffage

La biomasse

Les centrales biomasse sont le plus souvent installées sur les lieux mêmes de stockage des déchets, qu'ils soient urbains ou agricoles. Ces déchets servent de combustibles pour alimenter une chaudière par exemple. L'eau est ainsi vaporisée pour alimenter une turbine pour produire de l'électricité.



Fig5. Exemple de centrale à vapeur par biomasse (déchets)

L'énergie hydraulique

L'énergie hydraulique est souvent fournie par les chutes d'eau provoquées par l'ouverture des vannes d'un barrage. L'eau descend jusqu'à l'usine le long de conduites forcées, elle possède une grande énergie cinétique due à sa perte

d'altitude, qui fait tourner la roue d'une turbine entraînant un alternateur, qui produit du courant électrique.

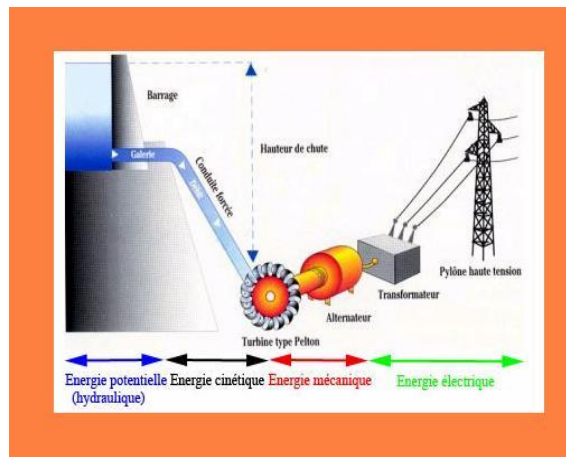


Fig6. Exemple de centrale hydroélectrique

L'énergie éolienne

L'énergie éolienne est l'énergie obtenue grâce à la force du vent. Elle peut être sous deux formes:

Mécanique : pour le pompage de l'eau : navire à voile, pour pomper l'eau, pour faire tourner un moulin...

Électrique : l'éolienne ou aérogénérateur directement relié au réseau ou de manière indépendante.



Fig7. Exemple de ferme éolienne

Chapitre 2 : L'énergie solaire

L'Algérie fait partie des pays de la partie basse (proche de l'équateur) de l'hémisphère nord, dotée d'un rayonnement annuel moyen largement supérieur à 1200 kWh/m^2 , ce potentiel énorme doit être exploité pour le confort de l'humain et la réduction des énergies fossiles, la protection de l'environnement, la consommation rationnelle et maîtrisée de l'énergie dans une vision locale et globale d'un développement durable qui commence par : l'énergie essence de la vie.

- Production de l'électricité verte photovoltaïque ou par centrales solaires
- Chauffage et rafraîchissement de l'habitat
- Production d'eau chaude, chauffe eau solaire
- Pompage d'eau

Etc...

Programme algérien de développement des énergies nouvelles et renouvelables et de l'efficacité énergétique

C'est un programme pour la période 2011- 2030 qui a été révisé et relancé en 2015.

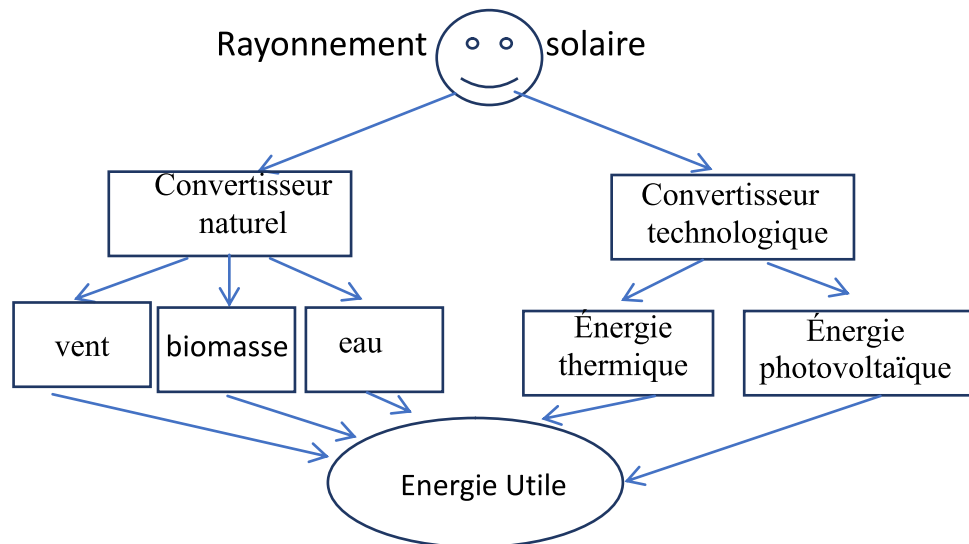
Objectif 1 : Produire 20000 MW à l'horizon 2030 dont la moitié est dédiée à l'exportation.

Objectif 2 : L'efficacité énergétique par

- revoir l'isolation des bâtiments
- développement du chauffe eau solaire
- utilisation des lampes basse consommation
- réalisation d'audit énergétique pour les grands consommateurs industriels
- conversion de centrales électriques en mode hybrides
- réalisation de projet pilotes de climatisation solaire
- fabrication de cellules photovoltaïques et autres dispositifs

2.1. Energie solaire

- Le soleil est à l'origine de la vie sur terre grâce à l'énergie inépuisable qu'il envoie.
- Cette énergie nous parvient sous forme d'ondes électromagnétiques qu'on appelle le RAYONNEMENT.
- Le soleil est à l'origine de toutes les autres énergies sur terre !



2.1.1. Quelques définitions sur le système solaire

- L'astronomie moderne est née avec le savant polonais Nicholas Copernic (1473-1543) qui dans son traité, révèle que les planètes dont la terre tournaient autour du soleil dans des orbites circulaires.
- Suivirent ensuite Galilée (1564-1642) et Giordano Bruno qui fut brûlé par l'église parce qu'il a défendu la théorie d'un univers infini avec d'autres étoiles comme le soleil et des planètes comme la terre!
- Les grandes avancées en astronomie remontent à la théorie de la gravitation universelle de Newton (1643-1727) ...
- L'univers est composé de galaxies regroupées, l'un de ces amas contient la voie lactée (c'est notre galaxie), elle est composée d'une centaine de milliard d'étoiles dont le soleil!

Quelques unités utilisées en astronomie :

- distance terre-soleil (unité astronomique UA) :

$$1 \text{ UA} = 149\,597\,870 \text{ km}$$

- l'année lumière: AL c'est la distance parcourue par la lumière en une année

$$1 \text{ AL} = 63\,240 \text{ UA}$$

** si la terre était un grain de sable de 1mm de diamètre, le soleil serait une sphère de 11.6 cm de diamètre, la distance serait alors de 12.5 m.

Caractéristiques du soleil

Masse = $1,989.10^{30}$ kg

Diamètre = $1,392.10^9$ m

Masse volumique moyenne = 1410 kg/m^3 , au centre 150000 kg/m^3

Puissance rayonnée = $3,83 .10^{26}$ W

Température superficielle= 5770 K

La composition du soleil:

- Noyau (siège des réactions nucléaires de fusion, température de 15 millions de kelvin . pression de 2.10^{11} bars et la densité atour de 10^5 kg/m^3).
- Au quart du rayon du soleil les réactions nucléaires cessent car la densité diminue, l'énergie émise par le noyau se propage par diffusion radiative puis par convection turbulente jusqu'à la photosphère d'où elle échappe sous forme de rayonnement électromagnétique.

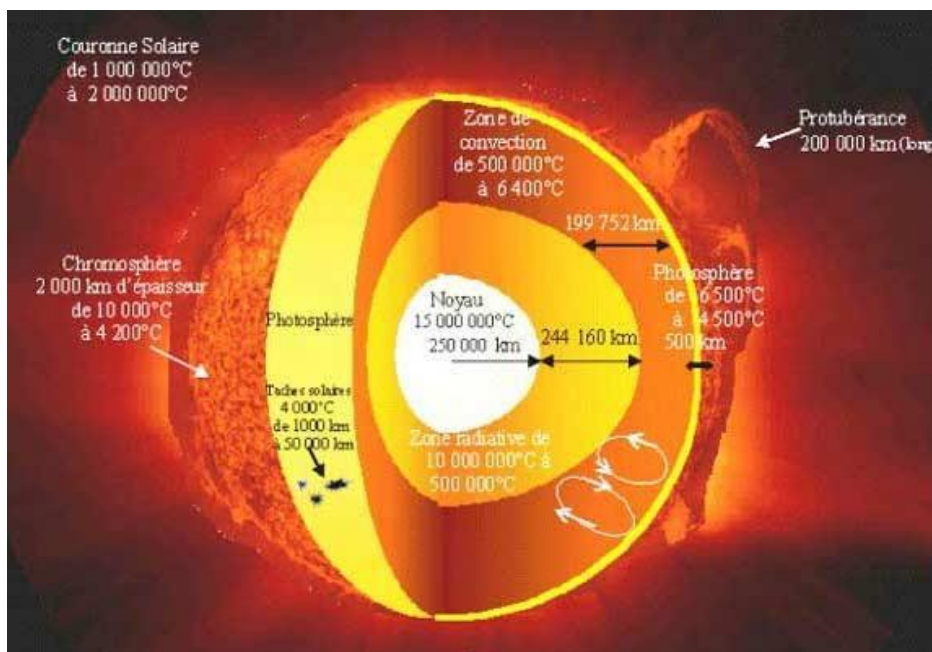


Fig. 2.1. Composition du soleil

Origine de l'énergie solaire

L'énergie solaire provient de la fusion de l'Hydrogène en Hélium dans le noyau du soleil. : 4protons (noyaux hydrogène) fusionnent pour donner naissance à un noyau Hélium en émettant deux positrons béta , deux neutrinos et 26.7 MeV ($1\text{MeV} = 1,6.10^{-13} \text{ J}$)

Cette énergie est en partie rayonnée vers la terre qui la reçoit à travers son atmosphère

L'atmosphère est divisée en plusieurs couches selon les variations de la température, en fonction de l'altitude. De bas en haut :

- la troposphère : la température décroît avec l'altitude . l'épaisseur de cette couche varie entre 13 et 16 km à l'équateur, entre 7 et 8 km aux pôles. Elle contient 80 à 90 % de la masse totale de l'air et la vapeur d'eau. C'est la couche où se produisent les phénomènes météorologiques et les mouvements atmosphériques (convection thermique, vents) ;
- la stratosphère : la température croît avec l'altitude jusqu'à 0 °C (8-15 km d'altitude à 50 km d'altitude) .elle abrite une bonne partie de la couche d'ozone.
- la mésosphère : la température décroît avec l'altitude (de 50 km d'altitude à 80 km d'altitude) jusqu'à -80 °C ;
- la thermosphère : la température croît avec l'altitude (de 80 km d'altitude à 350-800 km d'altitude) ;
- l'exosphère : de 350-800 km d'altitude à 50000 km d'altitude.

Avec sa température d'émission de 5 500°C, le soleil rayonne la plus grande partie de son énergie dans les hautes fréquences (courtes longueurs d'onde). La lumière visible représente 46 % de l'énergie émise par le soleil.

49 % du rayonnement énergétique émis par le soleil se situe, dans l'infrarouge. C'est ce rayonnement que nous ressentons comme une onde de chaleur. Le reste du rayonnement solaire, les UV, représente l'ensemble des radiations de longueur d'onde inférieure à celle de l'extrémité violette du spectre visible.

Au moins 35 % du rayonnement solaire reçu par la Terre et son atmosphère sont réfléchis vers l'espace. Une partie du rayonnement qui traverse l'atmosphère est diffusée au contact des molécules d'air, des aérosols et des particules de poussière... (c'est ce rayonnement qui donne la couleur bleue du ciel clair). La vapeur d'eau, le gaz carbonique et l'ozone de l'atmosphère absorbent eux aussi 10 à 15 % du rayonnement solaire.

1- Puissance émise par le soleil : 63500 kW/m².

2- Constante solaire : 1370 W/m².

3- Rayonnement réfléchi.

4- Rayonnement absorbé et diffusé.

5- Rayonnement solaire à la surface de la Terre (maximum : 1000 W/m²).

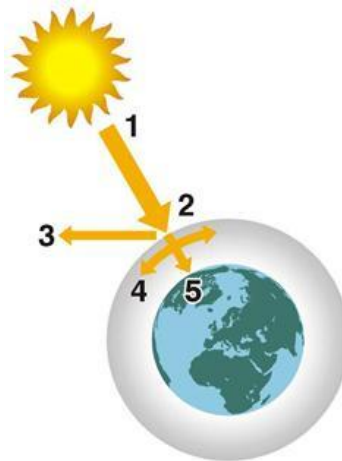


Fig. 2.2. Les différents rayonnements reçus

La masse atmosphérique: exprime le rapport de la distance parcourue par le rayon traversant l'atmosphère à l'épaisseur verticale de l'atmosphère $m^* = 1 / \sin h$
Avec, h angle entre le rayon reçu par la surface à l'horizontal.

L'albédo: est l'énergie réfléchie par une surface sur l'énergie totale reçue par cette surface.

Le rayonnement ou éclairement direct I : est le rayonnement qui arrive directement à la surface, c'est la composante normale au capteur de l'éclairement

L'éclairement diffus D : est le rayonnement diffusé par le ciel et le sol.

L'éclairement global $G = I + D$: le rayonnement total reçu sur un capteur.

L'éclairement E : est la puissance reçue par une surface en (watt par mètre carré).

L'irradiation ou rayonnement H : est l'énergie reçue par une surface en J/m^2 .
D'autres unités plus courantes sont le Wh/m^2 .

La terre intercepte une toute petite partie de l'énergie solaire rayonnée dans l'espace. Une moyenne de 1367 watts atteint chaque mètre carré au contact de l'atmosphère terrestre (pour une distance moyenne Terre-soleil de 150 Millions de km), c'est ce que l'on appelle la constante solaire (Fig.2.2.) .

Le rayonnement qui atteint le niveau de la mer à midi dans un ciel clair est de $1000 W/m^2$ et est décrit en tant que rayonnement de la masse d'air "1" (ou AM1).

Lorsque le soleil se déplace plus bas dans le ciel, la lumière traverse une plus grande épaisseur d'air, perdant plus d'énergie. L'énergie disponible est alors inférieure à $1000 W/m^2$. Les scientifiques appellent le spectre standard de la lumière du soleil sur la surface de la terre : AM1.5G ou AM1.5D. Le nombre "1.5" indique que le parcours de la lumière dans l'atmosphère est 1.5 fois supérieur au parcours le plus court du soleil,

c'est-à-dire lorsqu'il est au zénith (correspondant à une inclinaison du soleil de 45° par rapport au zénith).

La latitude du lieu L : l'angle de latitude est l'angle que fait un point sur la surface de la terre avec son centre et le cercle équatorial de la terre (latitude 0°), le pôle nord latitude $+90^\circ$ et le pôle sud par la latitude -90° .

La longitude λ : La longitude d'un lieu correspond à l'angle formé par deux plans méridiens (passant par l'axe des pôles), l'un étant pris comme origine (méridien de Greenwich 0°) et l'autre déterminé par le lieu envisagé. La longitude d'un lieu peut être comprise entre -180° et $+180^\circ$, 1° d'écart de longitude correspond à 4 minutes.

On affecte du signe (+) les méridiens situés à l'est de ce méridien, et du signe (-) ceux situés à l'ouest.

Le gisement solaire: est un ensemble de données décrivant le rayonnement Solaire disponible dans une région. Par sa situation géographique, l'Algérie dispose d'un gisement solaire parmi les plus important au monde. l'Agence Spatiale Allemande (ASA) déclare que l'Algérie possède le potentiel solaire le plus important du 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 à Hassi R'Mel. La répartition du potentiel solaire par région climatique est représentée dans le tableau suivant :

Régions	La côte	Hauts plateaux	Sahara
Superficie en %	4	10	86
Durée moy. D'enseillement(h/an)	2650	3000	3500
Énergie moy reçue (kWh/m ² /an)	1700	1900	2650

Fig.2.3. Gisement solaire Algérie

La durée d'insolation dans le Sahara algérien 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 peut baisser 6h/j en période estivale. La région d'Adrar est particulièrement ensoleillée et présente le plus grand potentiel de toute l'Algérie.

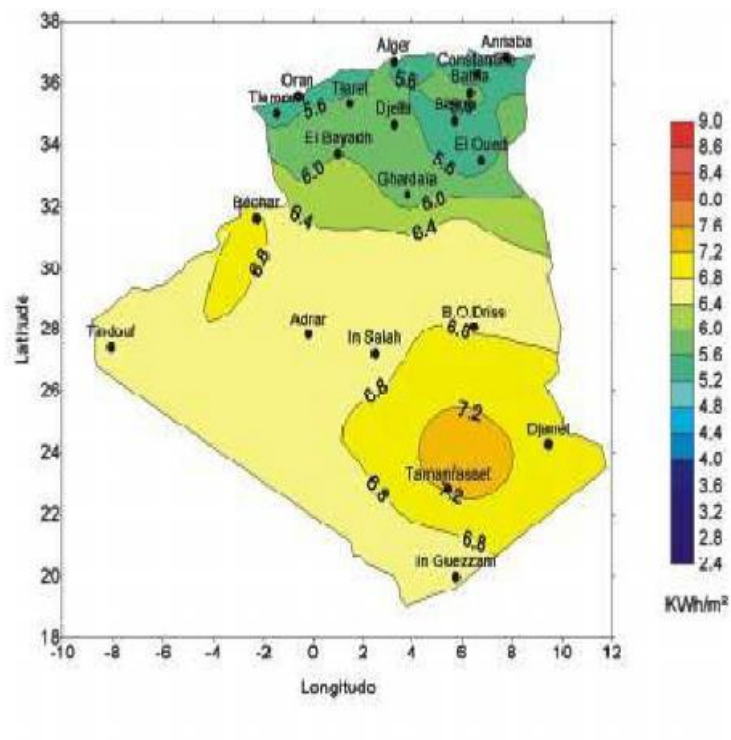


Fig. 2.4. Moyenne annuelle de l'irradiation Solaire globale reçue sur un plan incliné à la latitude du lieu

2.2. La conversion photo thermique

L'effet photo thermique ou la conversion thermique de l'énergie solaire est la transformation du rayonnement solaire reçu en énergie thermique (chaleur). Cette conversion peut se faire de différentes manières selon l'objectif du convertisseur :

- A basse température c'est le capteur plan
- A température plus élevée ce sont les systèmes à concentration



Fig.2.5. Capteurs solaire plan et panneaux photovoltaïques

2.2.1. CAPTEUR SOLAIRE PLAN (ou capteur héliothermique)

Un capteur solaire est l'élément fondamental dans la conversion thermique de l'énergie solaire à basse température (< 100 °C).

Ils sont utilisés essentiellement pour la production d'eau chaude sanitaire (ECS), chauffage des habitations ou piscines etc...

a- Eléments constructifs du capteur

a.1- définition c'est la surface qui a la possibilité de transformer le rayonnement reçu en chaleur. Cette surface doit être en un matériau absorbant (coefficient d'absorption α élevé). L'énergie solaire est reçue par la surface absorbante dans le visible mais l'absorbeur en recevant cette énergie va la rayonner dans l'infrarouge. Le coefficient représentant le rapport entre l'énergie réellement rayonnée par une surface à l'énergie rayonnée par un corps noir est appelé coefficient d'émission infrarouge ou émissivité ε

On définit l'Emittance E ou énergie émise par une surface à la température T :

$$E = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4$$

où σ est la constante de Stéphan-Boltzmann = $5.67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$

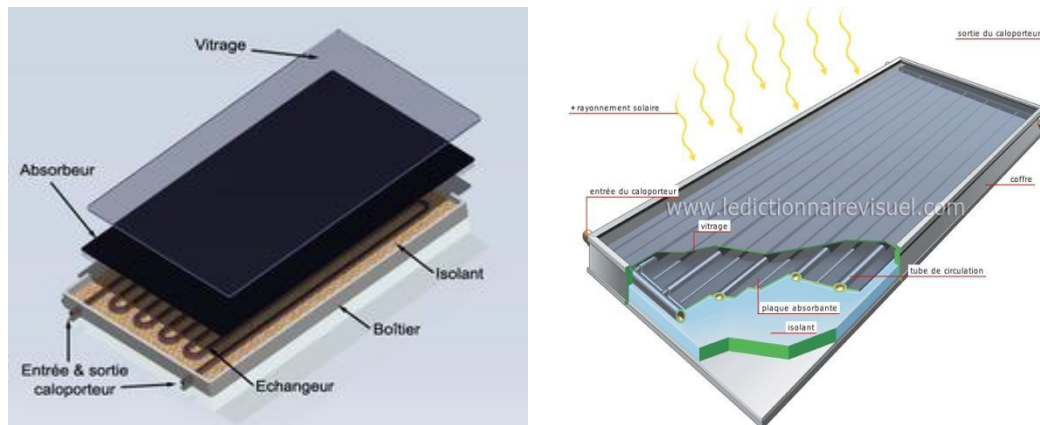


Fig. 2.6. Composants d'un capteur plan

La principale utilisation des capteurs solaires plans est l'eau chaude sanitaire, ci-dessous les différentes dispositions des chauffe-eau solaires.

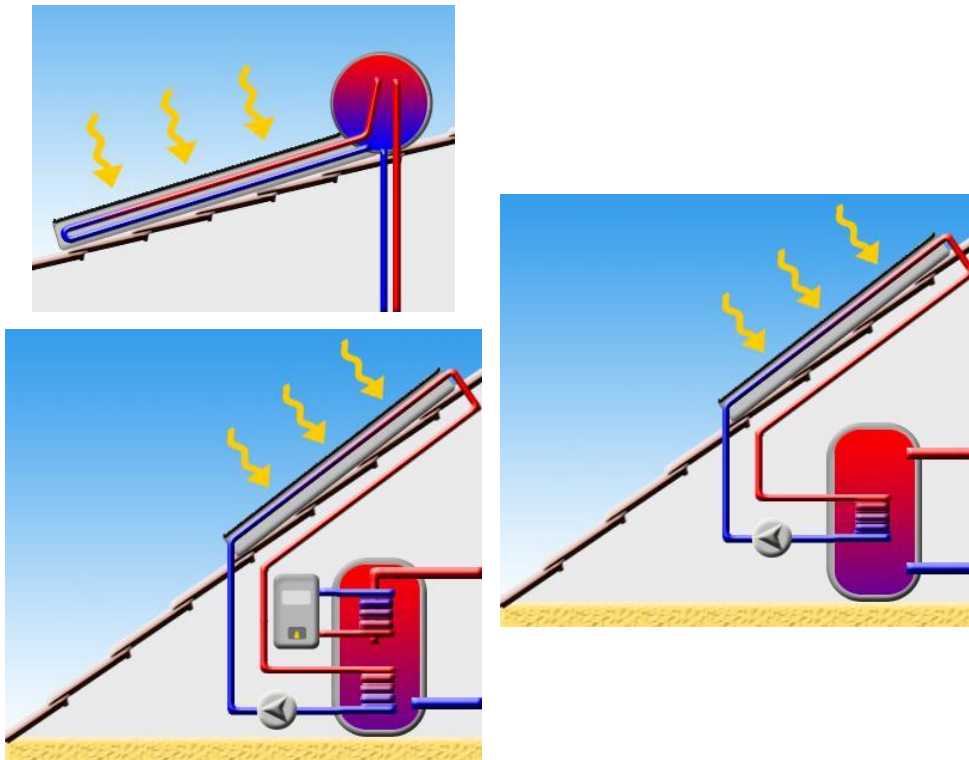


Fig.2.7. Chauffe-eau solaire et disposition du ballon de stockage d'eau chaude

La seconde utilisation du capteur plan est sur la façade en mur capteur ou façade double peau où l'air y est préchauffé en hiver.

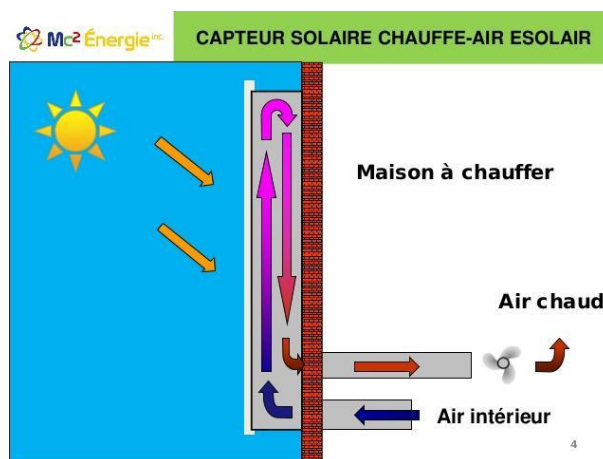


Fig.2.8. Capteur solaire en façade

a.2. Absorbeur

C'est l'élément le plus important du capteur, il doit :

- Absorber le rayonnement solaire
- Transformer ce rayonnement en chaleur
- Transmettre la chaleur au fluide caloporteur
- Absorber le maximum de flux solaire, c'est pourquoi il est généralement noir ou de couleur sombre. De cette façon, son coefficient d'absorption est proche de 0,95.
- Il est aussi souhaitable de limiter les réémissions par rayonnement infrarouge. Donc, il faut que l'absorbeur ait une faible émissivité (<0.15). De tels absorbeurs sont appelés sélectifs.
- Il faut que la transmission de la chaleur au fluide soit réalisée de façon optimale. C'est pourquoi, l'absorbeur doit être constitué d'un matériau à forte conductivité. On utilise des métaux (Plus le coefficient de conductivité est élevé, plus l'épaisseur est réduite pour un même flux transmis au fluide).

L'absorbeur est généralement une plaque en métal ou en plastique :

Les métaux les plus courants sont le cuivre, l'acier inoxydable et l'aluminium. Les plastiques peuvent avoir de bons avantages comme la légèreté, la faible sensibilité à la corrosion et la possibilité de teinter sans risque de rayures. Les inconvénients sont aussi importants: mauvaise conductibilité thermique, vieillissement à cause des UV et mauvaise tenue à des températures élevées.

Une surface absorbante est dite sélective si son coefficient de Sélectivité α/ε est élevé: c'est-à-dire on augmente la partie absorbée du rayonnement incident et on diminue la partie réfléchi voir tableau :

état de surface / matériau	α	ε	α / ε
Cuivre poli	0.25	0.02	12.5
Film plastique recouvert d'or	0.30	0.03	10
Acier poli	0.63	0.09	7
Aluminium anodisé	0.8	0.14	5.71
Nickel brillant	0.34	0.07	4.86
Aluminium poli	0.1	0.04	2.5
Peinture noire (silicate)	0.97	0.88	1.1
Peinture aluminium	0.26	0.26	1
Peinture blanche (silicate)	0.14	0.90	0.16
Optical solarreflector	0.11	0.83	0.13

a.3. Le fluide caloporteur : c'est l'agent thermodynamique qui permet de récupérer la chaleur emmagasinée dans l'absorbeur pour utilisation.

On utilise habituellement l'eau ou l'air :

eau	air
<ul style="list-style-type: none"> - Risque de gel en hiver et d'ébullition en été - problème de corrosion ou de fuites - système plus complexe et moins fiable - nécessite un échangeur de chaleur pour le chauffage des locaux - les transferts thermiques sont meilleurs - les tuyaux sont de faible section - $\rho.C_p = 4,2.10^6 \text{ J/m}^3.K$ - L'eau peut servir à l'ECS et le chauffage des locaux. 	<ul style="list-style-type: none"> - Pas de risque - pas de corrosion - pas de fuite conséquente - système à mettre en œuvre simple et fiable - pas d'échangeur à chaleur pour le chauffage. - les transferts thermiques sont moins bons. - les tuyaux sont plus larges pour obtenir le débit nécessaire - $\rho.C_p = 1225 \text{ J/m}^3.K$ - l'air est utilisé uniquement pour le chauffage des locaux.

a.4. La couverture transparente : c'est une surface vitrée facultative mais sa présence peut augmenter sensiblement le rendement du capteur par effet de serre. Utilisée surtout pour des températures $> 70 \text{ }^\circ\text{C}$.

Les couvertures transparentes sont habituellement en verre mais on trouve également des matériaux thermoplastiques transparents de synthèse ex: polycarbonate (Makrolon), polyméthacrylate (plexiglas ou altuglas), polyfluoroéthylène (téflon). Et pour les serres agricoles des films minces.

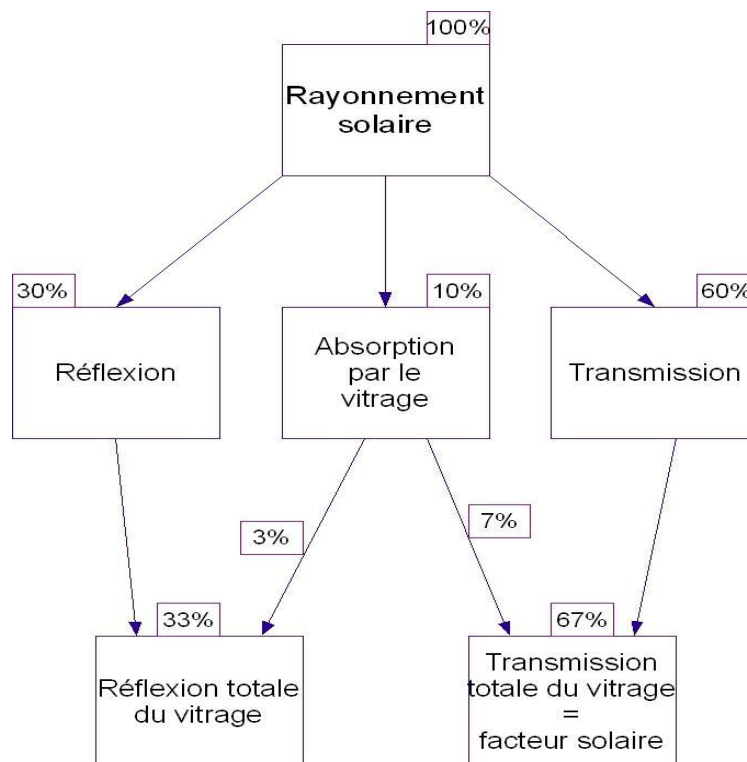


Fig.2.9. Exemple des coefficients d'absorption, transmission et réflexion du vitrage

FS = Facteur Solaire

Rapport entre l'énergie entrant dans le local (par transmission et diffusion) et l'énergie totale reçue sur le vitrage. Plus FS est bas, plus le vitrage est performant pour « filtrer » la chaleur du soleil.

La lumière :

TL = Transmission Lumineuse

Rapport entre le flux lumineux entrant dans le local (par transmission et diffusion) et le flux total reçu sur le vitrage. Plus TL est élevé, plus le vitrage laisse passer la lumière naturelle.

RL = Réflexion Lumineuse

Flux lumineux réfléchi vers l'extérieur. Plus RL est élevé, plus le vitrage aura un aspect réfléchissant ou « miroir » vu de l'extérieur.

L'énergie :

TE = Transmission Energétique

Quantité d'énergie transmise au bâtiment.

AE = Absorption Energétique

Quantité d'énergie absorbée par le vitrage. Plus le coefficient est élevé, plus le vitrage monte en température.

La lumière + l'énergie :

$$S = \text{Sélectivité} = TL / FS$$

Les vitrages les plus performants du marché ont une sélectivité de 2, alors le vitrage est performant en termes de contrôle solaire, c'est-à-dire, le meilleur compromis entre lumière naturelle entrante et chaleur naturelle voir figure

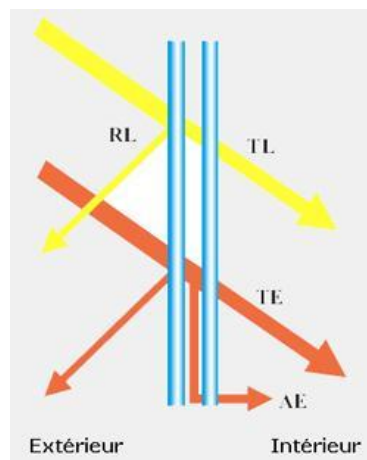


Fig.2.10. Lumière + Energie

a.5..L'isolant:il est utilisé pour minimiser les pertes de chaleur à travers le capteur par devant et à l'arrière.À l'avant ça sera par une lame d'air d'une épaisseur ne dépassant pas les 2- 3 cm.À l'arrière, on utilise un matériau isolant tels que laine de verre, laine de roche, polystyrène, mousse de polyuréthane , PVC....

Matériaux	Conductivité thermique
Laine de roche	0,032 - 0,040 W/m.K
Laine de verre	0,030 - 0,040 W/m.K
Mousses de polyuréthane (étanchéité)	0,022 - 0,030 W/m.K

b. Calcul Capteur Solaire Plan

b. 1. Bilan Energétique

Dans le bilan énergétique, on doit prendre en compte les différentes quantités d'énergie mises en jeu: puissance solaire globale reçue par le capteur G^* , l'énergie solaire absorbée par le capteur Q^* , l'énergie utile absorbée par le fluide caloporteur Q_u^* (c'est l'énergie utilisée effectivement pour l'eau chaude ou le chauffage ou transférée aux systèmes de stockage), l'énergie absorbée et perdue par le capteur vers l'environnement sous forme thermique Q_a^* et enfin l'énergie absorbée par le capteur pour qu'il atteigne sa température de fonctionnement (elle dépend de l'inertie du système) Q_i^* .

b.2. Rendement Moyen Du Capteur

$$\bar{\eta} = \frac{\int_0^{\Delta t} Q_u^* dt}{\int_0^{\Delta t} G^* dt}$$

Avec Δt la période d'exposition du capteur au soleil. La puissance solaire absorbée par le capteur :

$$Q^* = G^* \cdot \tau_c \cdot \alpha_p$$

τ_c : coefficient de transmission solaire de la couverture transparente selon l'angle d'incidence du rayonnement reçu.

α_p : coefficient d'absorption de l'absorbeur à la température T_p , température de fonctionnement du capteur.

- **Le flux thermique perdu Q_a^* :**

Ce flux peut être déterminé par analogie électrique:

- R_1 la résistance thermique existant entre l'absorbeur de température T_p et la couverture de température T_c , $R_1 = 1/(hc_1 + hr_1)$, les « h » sont les coefficients d'échange thermique par convection et par rayonnement.
- R_2 la résistance thermique entre la vitre à T_c et l'air ambiant à T_a , avec $R_2 = 1/(hc_2 + hr_2) \Rightarrow R_{av} = R_1 + R_2$
- R_1' la résistance thermique de l'isolant, avec $R_1' = e_i/\lambda_i$
- R_2' la résistance thermique entre la face externe et l'air ambiant qui est généralement négligée car $T_i \sim T_a$, $\Rightarrow R_{ar} = R_1' + R_2'$,
- L'analogie thermique – électrique permet d'écrire:

$$1/R = 1/R_{av} + 1/R_{ar}$$

En conductances thermiques, on a : $K = K_{av} + K_{ar} = 1/R = 1/R_{av} + 1/R_{ar}$

Donc: $Q_a^* = K(T_p - T_a)$

- **Le rendement instantané en régime permanent :**

$$\eta = \frac{Q_U^*}{G^*} = \frac{Q^* - Q_a^*}{G^*} = \tau_c \cdot \alpha_p - \frac{Q_a^*}{G^*}$$

Soit en fonction du rendement optique du capteur V^*

$$\eta = V^* - K \frac{T_p - T_a}{G^*}$$

*** Si le rendement optique est considéré constant et la conductance totale K constante, la variation de $\frac{T_p - T_a}{G^*}$ devient linéaire décroissante! D'où l'intérêt d'utiliser les capteurs plans à basse température.

Exemple d'application (à faire par les étudiants) : Calcul du rendement instantané d'un capteur plan

Situation: Ain Beida

météorologie : ciel clair et pur, température ambiante $T_a = 10 \text{ }^\circ\text{C}$, vent parallèle au capteur de vitesse $V = 4 \text{ m/s}$,

Capteur: orienté plein sud, incliné à 45° , température absorbeur $T_p = 60 \text{ }^\circ\text{C}$, coefficient d'émissivité infrarouge absorbeur ($\epsilon_p = 0.95$) et vitre ($\epsilon_v = 0.83$), rendement optique $V^* = 0.76$, isolant (épaisseur $e_i = 5 \text{ cm}$, conductivité thermique $\lambda_i = 0.045 \text{ W/m.K}$), lame d'air absorbeur-vitre, $b = 2.5 \text{ cm}$,

- 1- calculer la conductance globale K du capteur
- 2- calculer le rendement instantané
- 3- calculer le rendement moyen pour 6h d'ensoleillement.

2.2.2. Systèmes solaires à concentration

Il existe plusieurs technologies dans la concentration solaire, l'objectif est d'augmenter l'énergie solaire absorbée et de produire de l'énergie notamment électrique en utilisant les propriétés de l'eau et de certains fluides à haute température.

On distingue :

a.1. Les capteurs solaires paraboliques

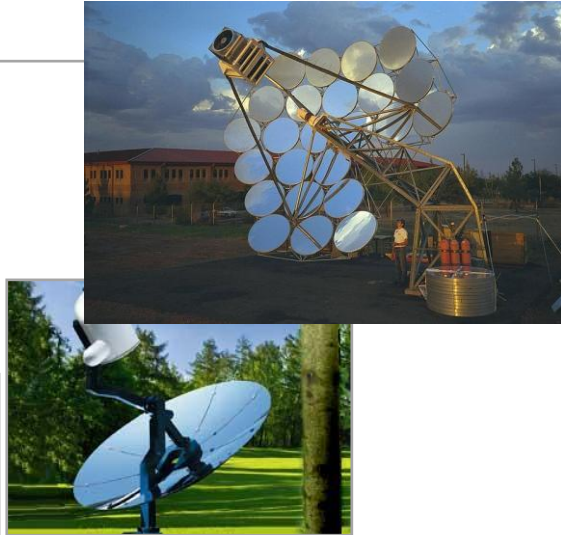
Cette technologie est la plus ancienne des systèmes à concentration solaire mais également utilisée pour les petites échelles.

1872 : première application à cycle Stirling par John Ericsson

À partir de 1970: commercialisation des systèmes capteur parabolique/ Stirling

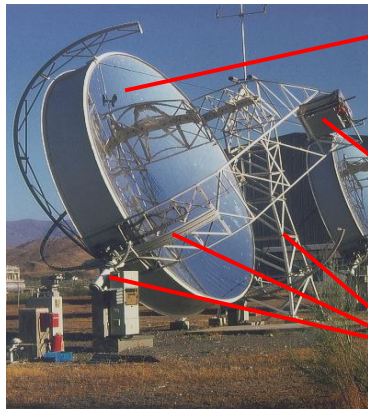


Capteur solaire parabolique



sources: www.sbp.de,
www.energylam.sandia.gov, www.sunmachine.at

Composants



Capteur (concentrateur , réflecteur)

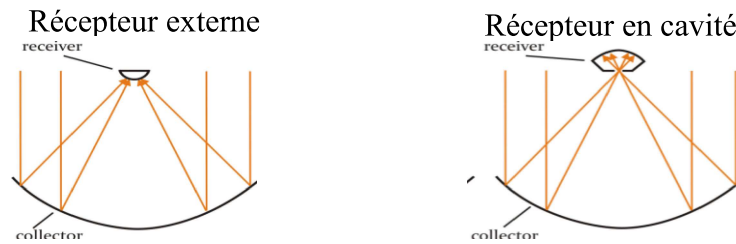
Conversion d'Énergie avec
le récepteur, la machine thermique (Stirling) et le générateur

structure et mécanisme de poursuite

Fig.2.11. Concentrateur solaire parabolique

- Les miroirs du concentrateur peuvent être à une facette unique ou à multi-facettes.

- Le récepteur est l'élément absorbeur où se concentrent les rayons solaires réfléchis par les miroirs.



Pour les hautes températures, on utilise les récepteurs en cavité.

avantages:- faible perte de chaleur grâce à la cavité

- diffusion des radiations avant d'atteindre l'absorbeur

Fig.2.12. Récepteur : externe et en cavité

Quasiment tous les systèmes à capteurs paraboliques utilisent le moteur Stirling

Alternative: micro turbines à gaz

- Inventé par Robert Stirling en 1816
- applications:
 - des années 30 à 50 : le moteur Stirling pour faire fonctionner des radios sans électricité
 - à partir des années 70 à ce jour: utilisé pour les unités de cogénération et applications solaires



Philips Stirling engine (1950s)

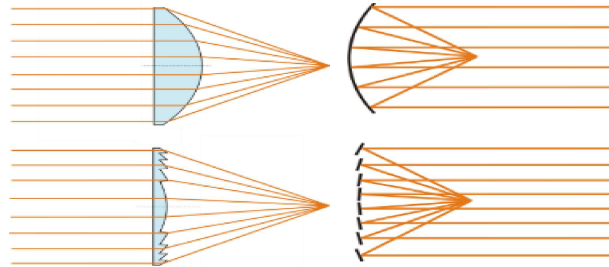
source: Norbert Schnitzler

Fig.2.13. Machine thermique : cycle de Stirling

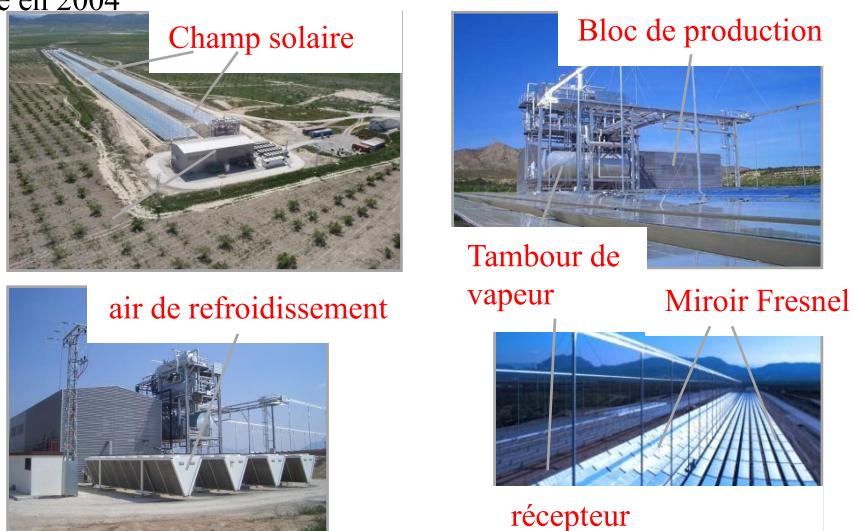
Avantages et inconvénients des systèmes à capteurs paraboliques	
+	-
<p>rendement solaire / électricité élevé comparé aux autres procédés à concentration et au PV très faible utilisation de l'eau comparé aux refroidissement dans les cycles de Rankine pas de transfert de chaleur par fluide caloporteur ce qui réduit le coût et les pertes de chaleur applications à petite échelle et possibilité d'utilisation modulaire</p>	<p>pas de stockage possible à ce jour le stockage est primordial et le PV est très compétitif dans ce cas. comporte des parties amovibles (le PV ne nécessite pas) n'utilise pas la diffusion des radiations(le PV si) investissement important et coût de l'électricité est élevé</p>

a.2. Les capteurs solaires Fresnel

Principe de fonctionnement : un élément optique (lentille ou miroir) peut être segmenté en sources secondaires ayant les mêmes propriétés que l'élément original, toutes les ondes reçues par ces segments interfèrent et donne une seule onde diffractée



Miroir linéaire de Fresnel: concentration sur une ligne d'un collecteur solaire à miroirs parallèles plans. 1^{er} prototype conçu en 1964 et 1^{ère} centrale réalisée en Australie en 2004



source: Novatec Solar

Fig.2.14. Composants du système Fresnel

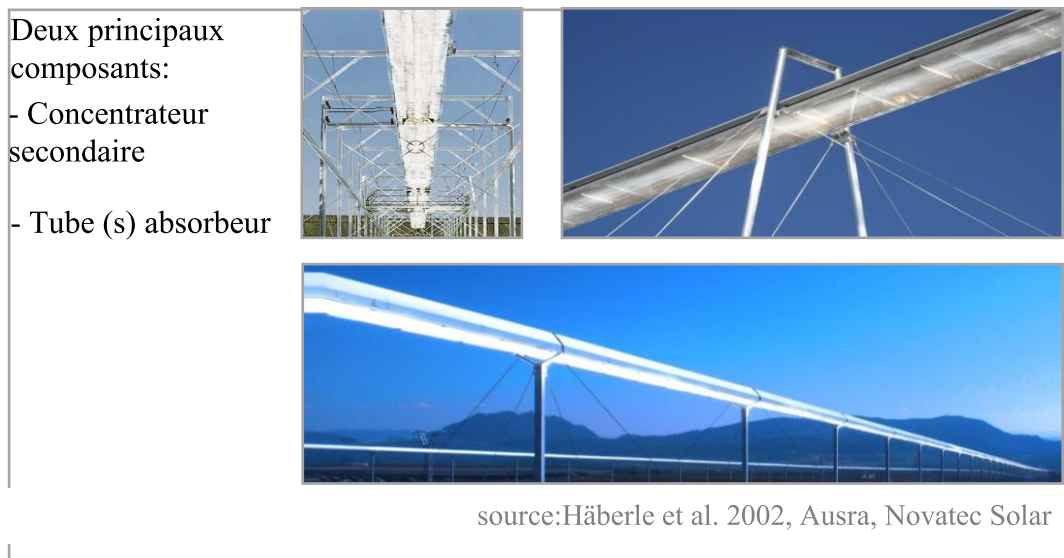
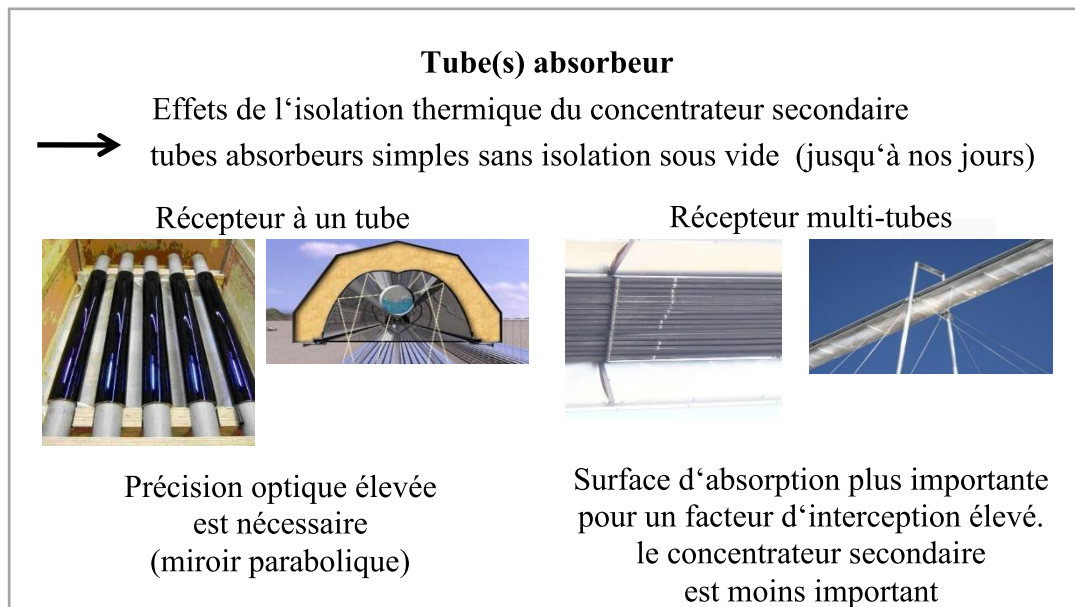


Fig.2.15. Le Récepteur Système fresnel

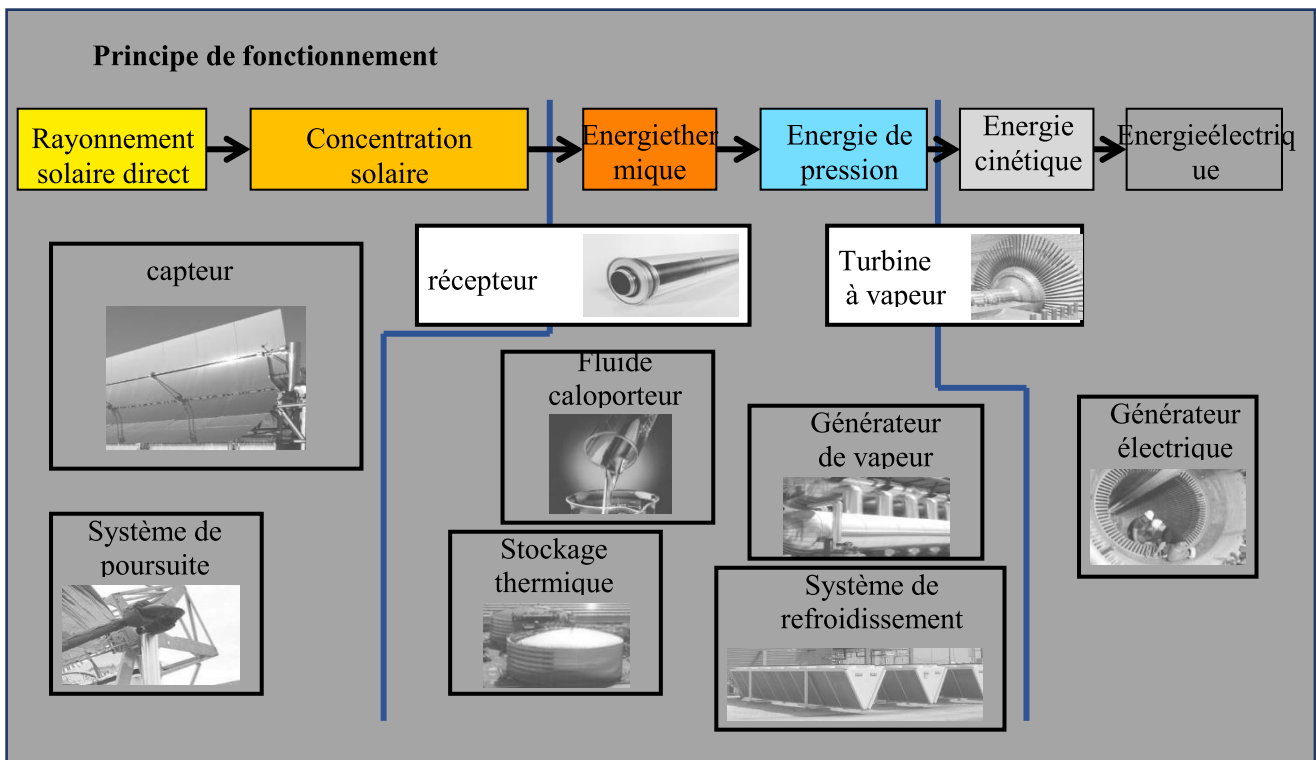


source:Novatec Solar, ISE Fraunhofer Institute, Ausra

Fig.2.16. Le tube absorbeur

a.3. Centrales thermo électriques à capteurs cylindro-paraboliques

La première utilisation de ses capteurs fut en 1880 par le suédois John Ericsson
Premier brevet pour production de la vapeur d'eau en 1907 par deux Allemands
Première centrale de pompage d'eau en Egypte en 1913
Et à partir de 1979, production de l'électricité essentiellement aux Etats Unis
En 2008 et 2011 d'autres projets en Espagne.



Miroirs en verre revêtus d'argent



- Utilisés dans tous les réseaux existants
- Technologie prouvée
- pas de diminution importante de la réflectivité avec le temps

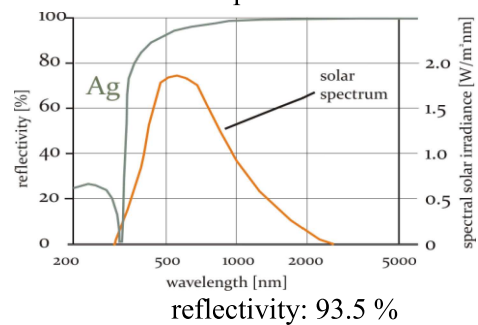
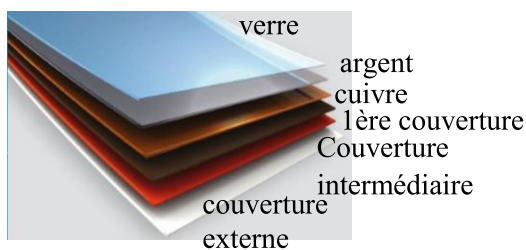


Fig.2.17. Compositions des miroirs

Autres matériaux pour les miroirs

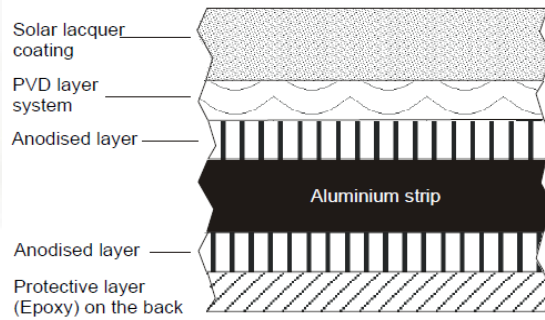
Argent recouvert par un film polymère



- Développés par NREL
- Commercialisés Par kyfuel
- Coût de fabrication moins cher que les miroirs en verre

- flexible
- réflectivité: 94%

Aluminium



surface avant du miroir en aluminium
présenté par Alanod Solar

Le récepteur

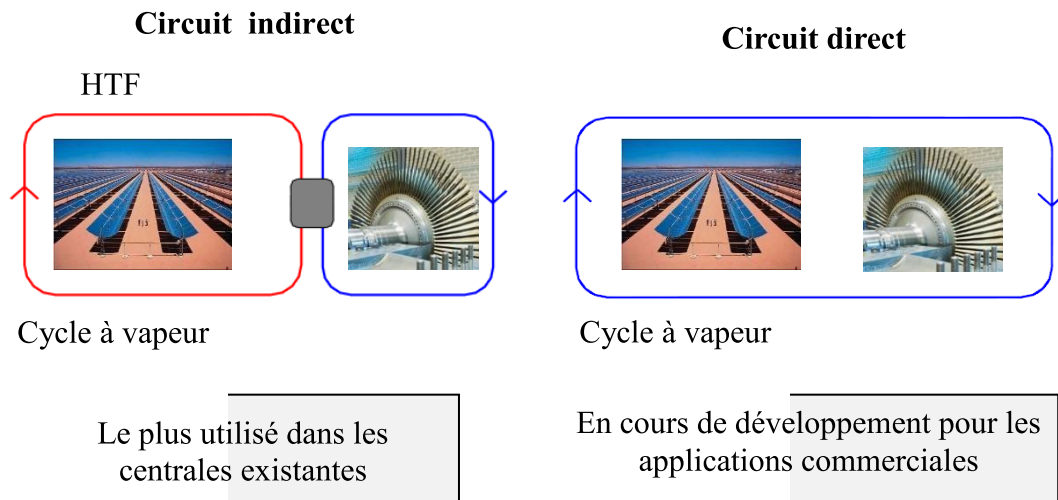


Caractéristiques :

- Absorption élevée dans le spectre solaire
- Pertes optiques et thermiques les plus faibles

sources: DLR, www.energy.siemens.com, www.pressebox.de,
www.archimedesolarenergy.com

Fig.2.18. Composition du récepteur



source: www.energy.siemens.com, Foster Wheeler

Fig.2.19. Production de la vapeur

Centrale à circuit indirect

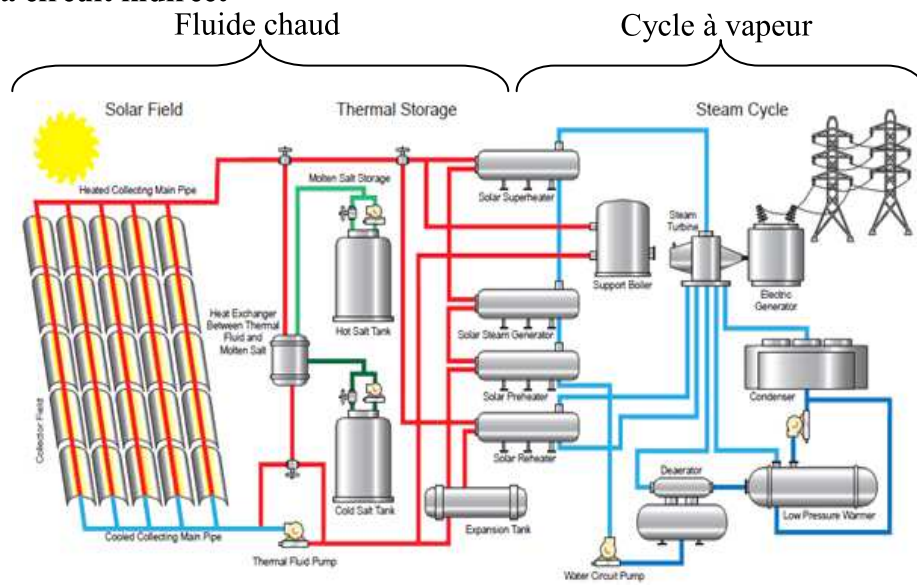


Fig.2.20. Les cycles possibles de la vapeur

Les fluides caloporteurs utilisés dans les centrales solaires

fluide	Température Max. [°C]	Chaleur spécifique [J/kg/K]	Conductivité thermique [W/m/K]	Capacité thermique volumique [kWh/m ³ /K]	Coût
Huiles minérales	300	2600	0.12	0.55	+
Huiles synthétiques	400	2300	0.11	0.57	-
Huile de silicone	400	2100	0.1	0.525	-
Sel de nitrure	450	1500	0.5	0.75	O
Sel de nitrate	565	1600	0.5	0.8	+
Sel de Carbonate	850	1800	2.0	1.05	-
Sodium (liquide)	850	1300	71.0	0.3	O

Actuellement utilisés sont les huiles synthétiques (thermo huiles) En cours de développement les sels liquides

Les différentes configurations

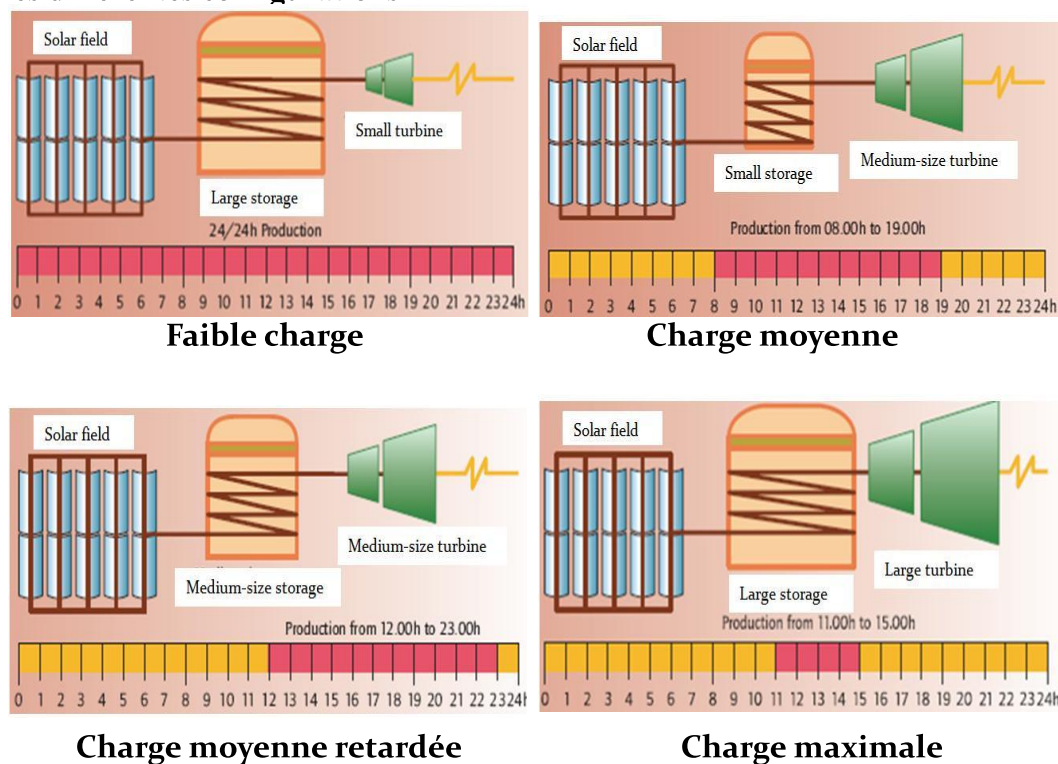


Fig.2.21. Les systèmes optimisés selon la demande

a.4. Tours solaires

Les capteurs cylindro-paraboliques et miroirs de Fresnel sont des systèmes à concentration linéaire, le récepteur reçoit le rayonnement sur une ligne en longueur du tube absorbeur. Le coefficient de concentration n'est pas élevé comparé à une concentration ponctuelle.

Les capteurs paraboliques et les tours solaires sont au contraire des systèmes où le concentré solaire est dirigé vers un point nodal. Ces deux dispositifs ont des coefficients de concentration élevés donc peuvent atteindre des températures très élevées du fluide caloporteur

Mais ce n'est pas le seul critère, les cylindro paraboliques ont été commercialisés et utilisés bien avant les tours solaires, par exemple , la première tour solaire commerciale utilisant le sel liquide comme fluide caloporteur est à Gemasolar.

Composants de la tour solaire

- Un champ d'héliostats: un nombre important de miroirs à poursuite solaire
- Une tour assez élevée avec le récepteur à son sommet
- La tour solaire utilise le cycle à vapeur de Rankine pour produire de l'électricité
- La concentration solaire est très élevée dans un point focal

Principe de fonctionnement

- Le récepteur transforme l'énergie solaire reçue en chaleur communiquée au fluide caloporteur
- Le circuit du fluide peut être:
 - Indirect: un fluide intermédiaire retransmet la chaleur reçue à l'eau pour la turbine à vapeur
 - Direct: le fluide de travail est l'eau qui se transforme en vapeur dans le cycle

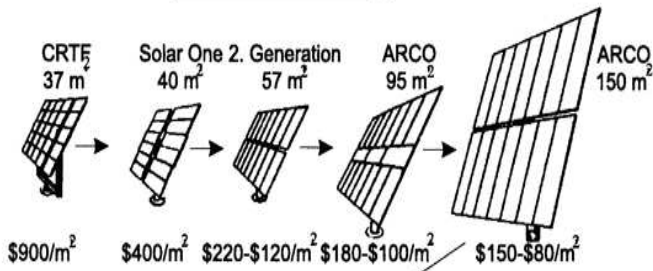
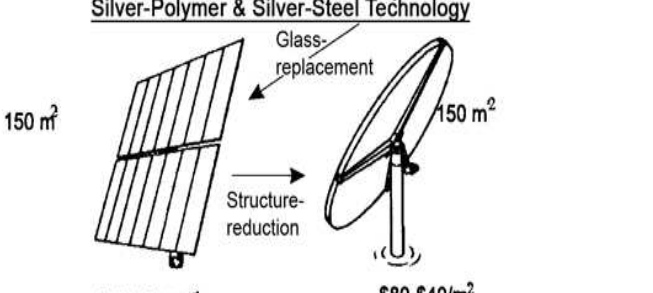


The Thémis solar tower power plant in the Eastern Pyrenees of southern France, showing the field sloping from right to left



A view from within the Thémis heliostat field, looking away from the tower

Fig.2.22. Tour Solaires et héliostat

<ul style="list-style-type: none"> • La surface du miroir Varie entre 1 et 150 m² • Dimension plus grande signifie <p>Les +</p> <ul style="list-style-type: none"> - Nombre plus faible d'héliostats - moins de moteurs - Moins de maintenance <p>Les -</p> <ul style="list-style-type: none"> - Installation plus difficile - maintenance plus complexe / remplacement des miroirs - moins de résistance contre les vents (fondations, pylônes etc...) 	<p style="text-align: center;"><u>Glass/Metal Technology</u></p>  <p style="text-align: center;"><u>Silver-Polymer & Silver-Steel Technology</u></p> 
----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

le design du champs d'héliostat dépend de la position par rapport à l'équateur

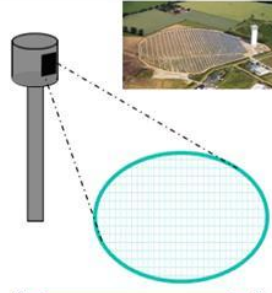
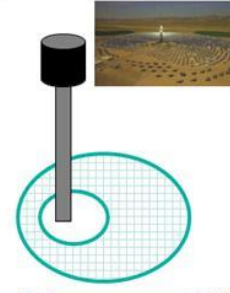
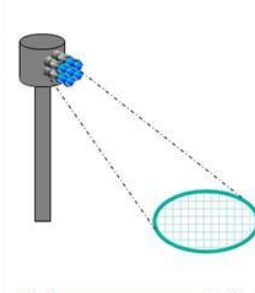
Northern Heliostat Field	Surround Heliostat Field	Elliptical Heliostat Field
In Northern Latitudes e.g. Solar Tower Jülich	Nearer the Equator e.g. Solar One/Two	For towers with secondary concentrators
 <p style="text-align: center;">S ← → N</p>	 <p style="text-align: center;">S ← → N</p>	 <p style="text-align: center;">S ← → N</p>

Fig.2.23. Positionnement de la tour / héliostats

Effet du vent et mouvement de la tour	$\eta_{W,T}$	0.93...0.97
Pertes par réflexion	$\rho = \eta_R$	0.80...0.95
Défaut d'héliostat	η_{Fail}	0.98...1.00

Le rendement total d'un héliostat à cause des pertes est :

$$\eta_{SF,i} = \eta_{B,S} \eta_C \eta_F \eta_{W,T} \eta_R \eta_{Fail}$$

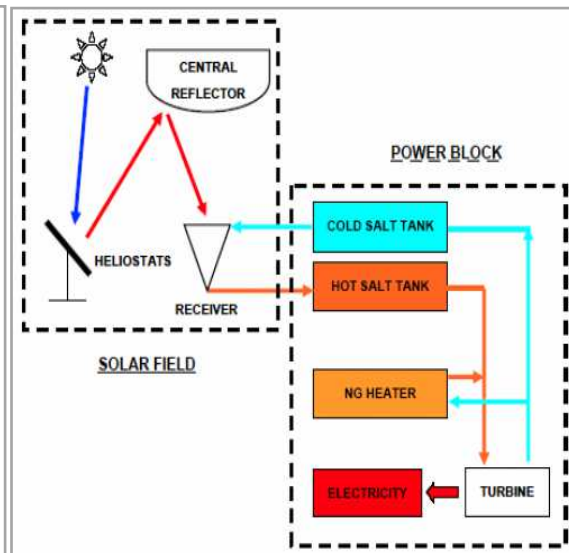
Le récepteur

Mode opératoire

Le sel liquide est pompé du réservoir froid et envoyé au récepteur

Le sel est chauffé par l'énergie solaire reçue et envoyé au réservoir de stockage chaud et de là si la température nominale est atteinte, il est envoyé au circuit à vapeur Cédant sa chaleur à un cycle à vapeur d'eau,

Il retourne au réservoir de stockage froid



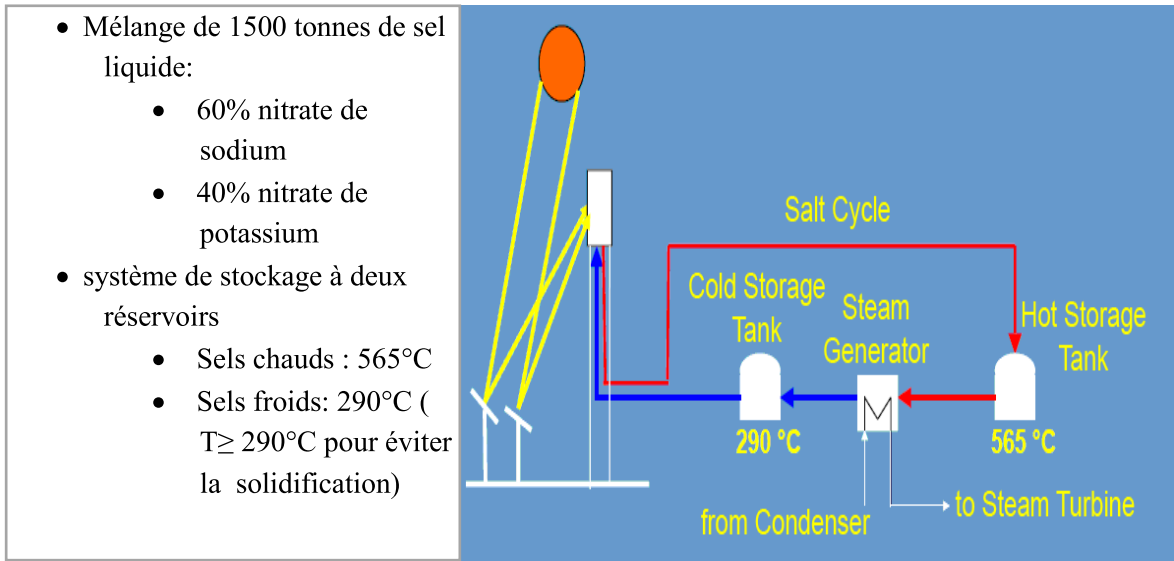
Tour Solar One (USA)

- La tour Solar One a une puissance nominale de 10 MW_e
- Édifiée en 1982 à Barstow (USA)
- Le champ d'héliostat est composé de 1818 miroirs occupant une surface de 71,000 m² (soit 39.13 m² par héliostat)
- Le verre couvert d'argent a une réflectivité de 0.9

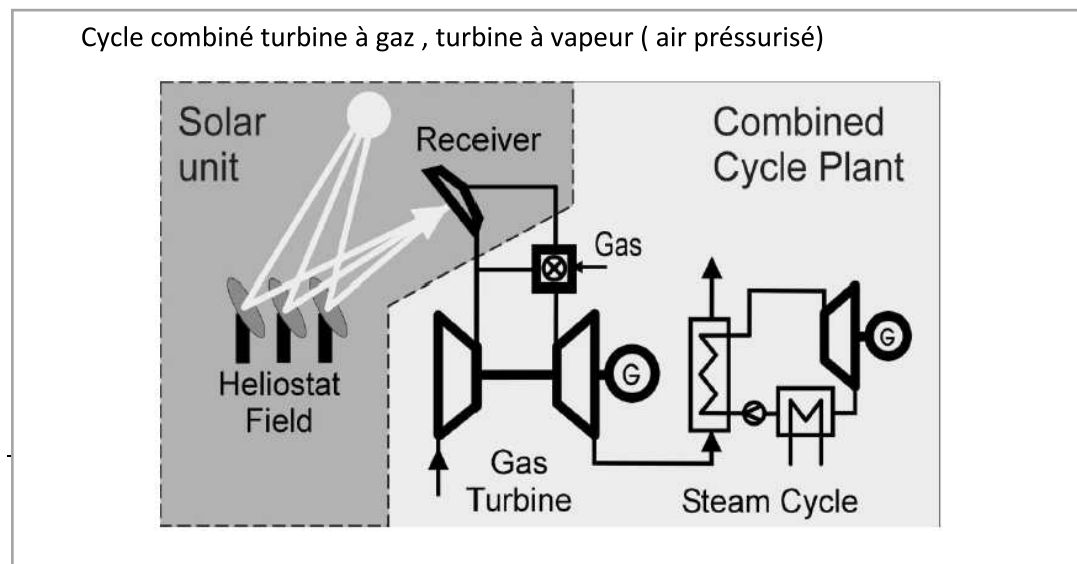
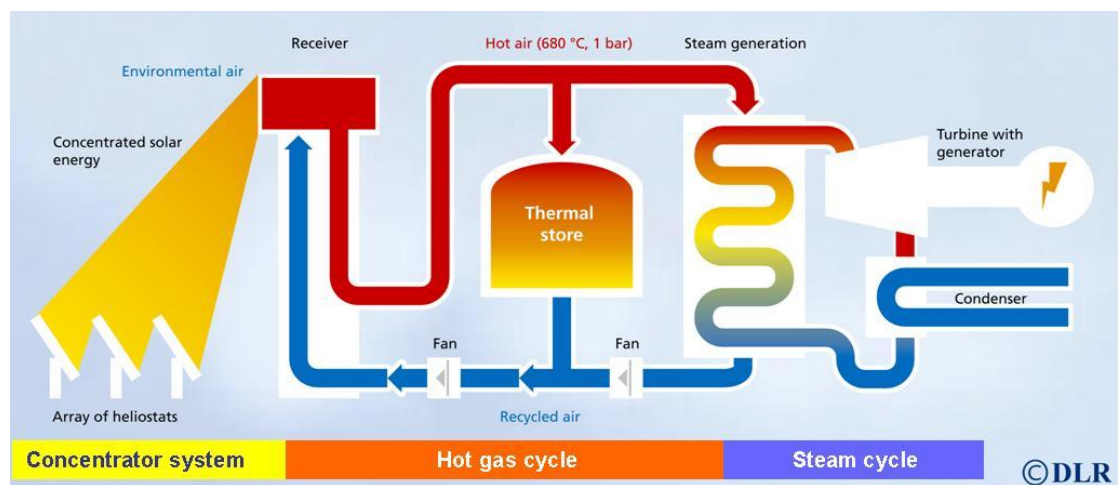
- Le récepteur cylindrique a une hauteur de 13.7 m et 7m de diamètre
- La tour s'élève sur 90 m
- Absorptivité de 0.96
- Le récepteur est à cycle direct utilisant l'eau comme fluide caloporteur



La tour Solar two (USA)

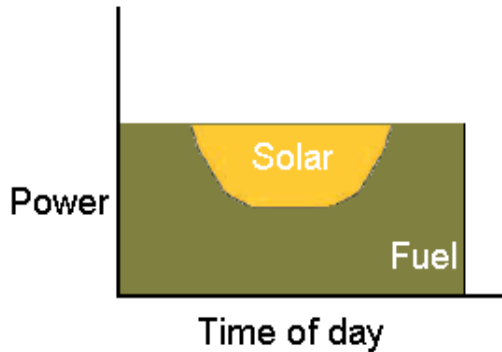


Récepteur à air



Technologie hybride avec récepteur à sel liquide

Fuel saver
without storage



Power booster
with storage

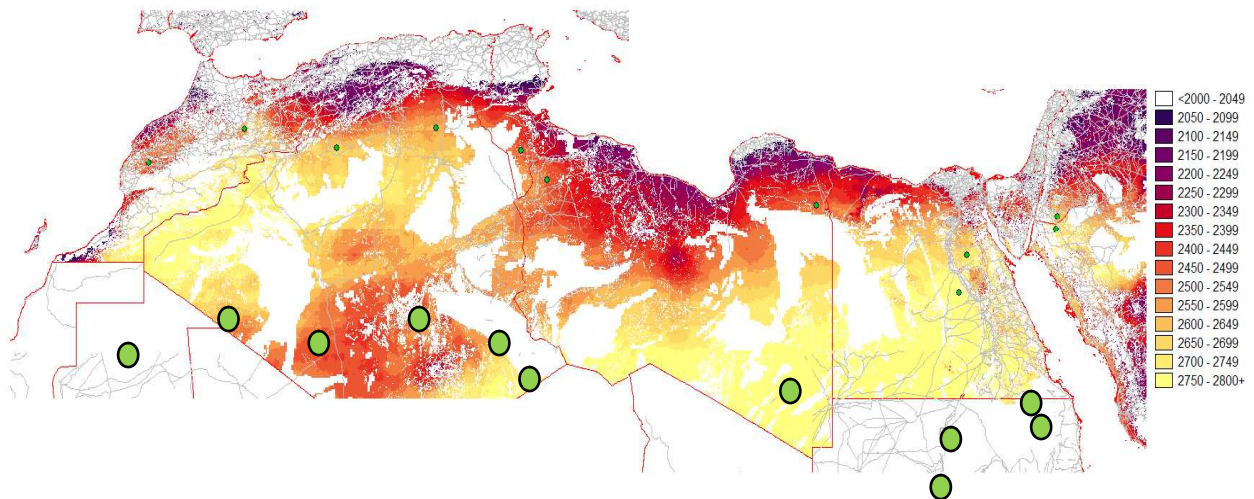
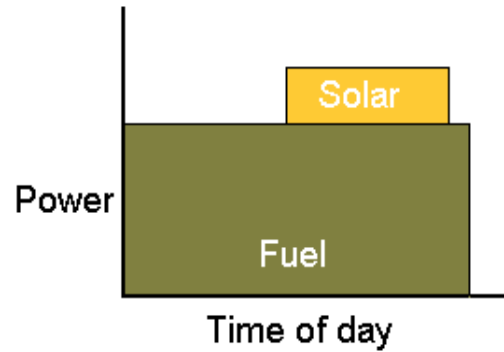


Fig.2.24. Sites possibles pour les centrales CSP

2.2.3. Le stockage thermique

Dans les centrales conventionnelles, le combustible liquide, gazeux ou solide est facile à stocker : réservoirs, manutention etc... , pas nécessaire de pratiquer un stockage supplémentaire d'énergie. Dans une installation solaire où l'énergie est intermittente, le stockage devient très important :

- Réduction du fonctionnement à charge partielle
- Gestion de l'alimentation en énergie
- Stockage tampon

Le stockage assure un apport tampon d'énergie durant les fluctuations de l'énergie solaire (jour/ nuit, saisons, climat), assure la sécurité en énergie fournie , en effet dans certaines centrales solaires, il peut alimenter en électricité pendant plusieurs heures: par exemple : 17 MW_e tour solaire de Gemasolar en Espagne , a une capacité de stockage de 15 heures.

Sans stockage, les centrales doivent êtres hybrides.

**Il est nécessaire d'intégrer un système de stockage
ou un apport conventionnel comme appoint.**

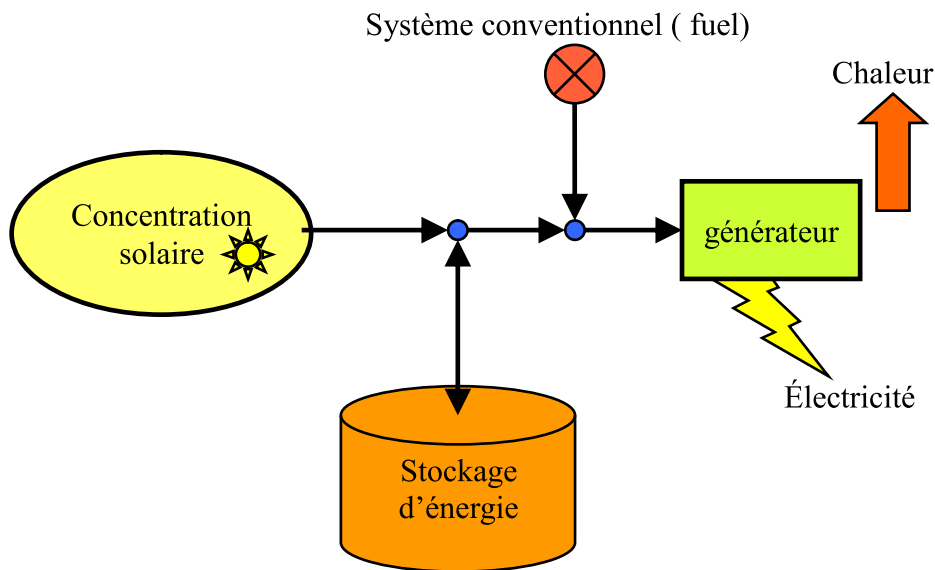


Fig. 2.25. Schéma hybride

a.1. Classification des systèmes de stockage pour les CSP

Il existe 04 concepts

- systèmes à chaleur sensible
 - a) Indirects
 - b) Directs
- stockage à chaleur latente
- accumulateur à vapeur
- système de stockage thermochimique

1. Système de stockage par chaleur sensible

a) Stockage indirect

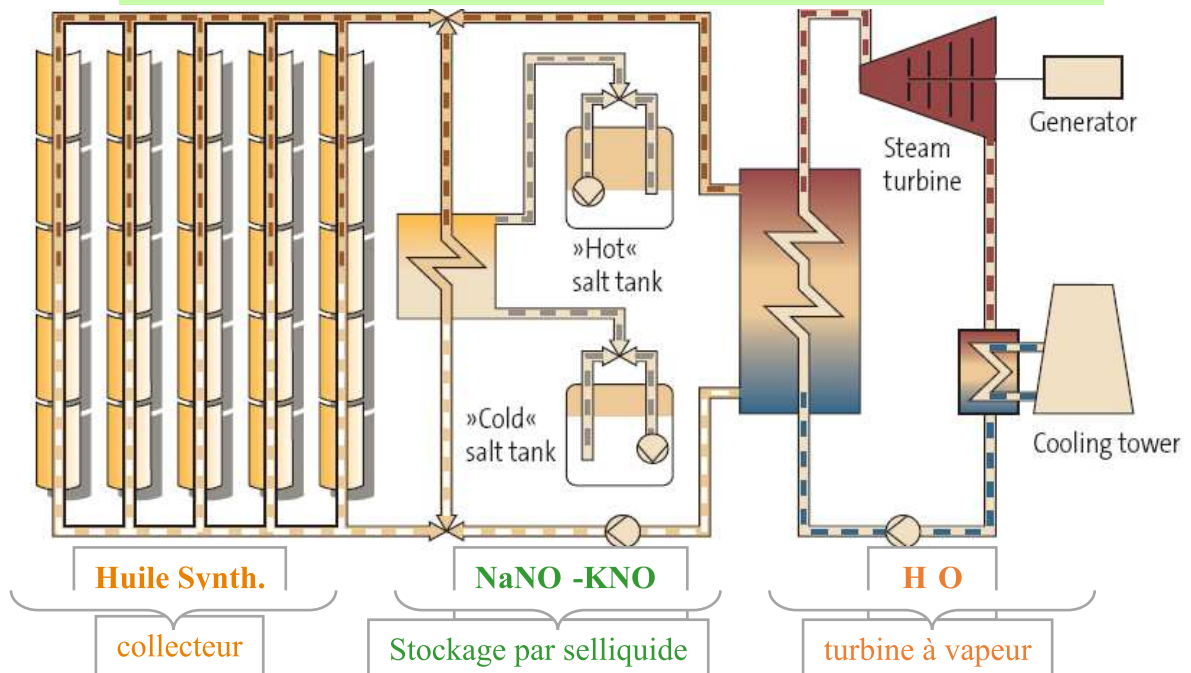
04 types de stockage:

- Deux réservoirs de sel liquide (chaud et froid)
- Lit à stockage thermique (régénérateur)
- Stockage par le sable
- Stockage par le béton



Dual tank molten salt storage of Andasol I

Schemade Andasol I : centrale à capteurs cylindro paraboliques



Stockage par le sable

- Faible coût
- Capacité élevée de stockage
- Applicable pour les températures élevées
- Sans effet sur l'environnement

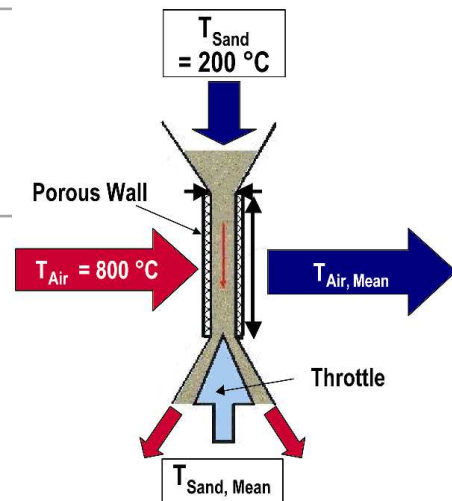
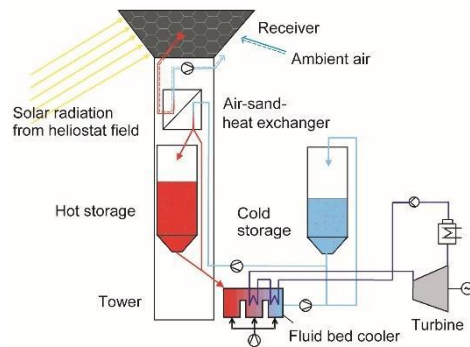


Fig.: principe de l'échangeur air-sable

Développements: stockage par le béton

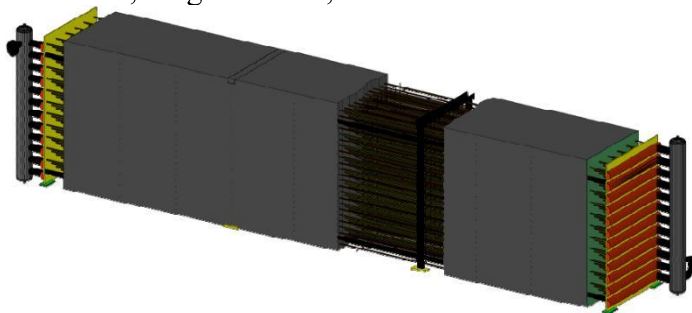
Deux modules de stockage au béton développés par DLR et Ed. Züblin AG pour les capteurs cylindroparaboliques utilisant comme fluide caloporteur de l'huile.

Conditions de fonctionnement: température: 400°C; pression: 25 bar; temps charge/décharge: 6h/6h

Composants:

Faisceau tubulaire noyé dans le béton

132 tubes; longueur: 9 m; diamètre extérieur: 18 mm



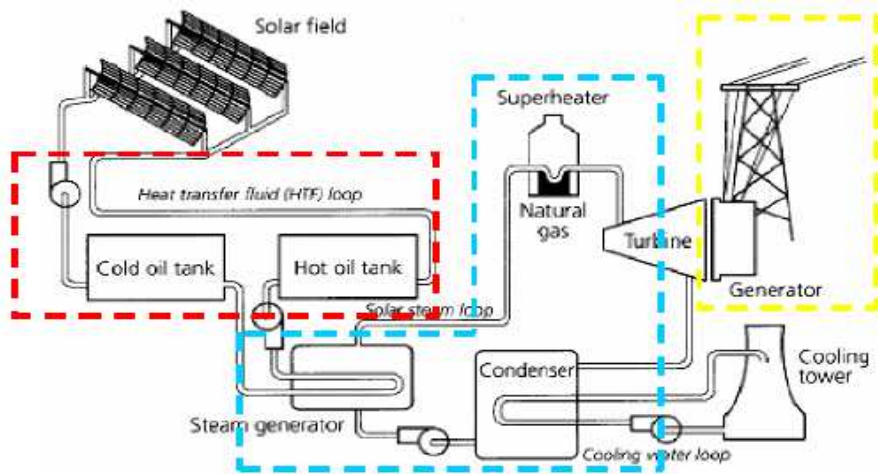
Dimension du module:

- longueur totale: 10 m
- longueur béton: 8.60 m
- hauteur/largeur: 1.70 m x 1.30 m

Contre les fuites d'huile:

- pas de joints

Stockage à deux réservoirs d'huile

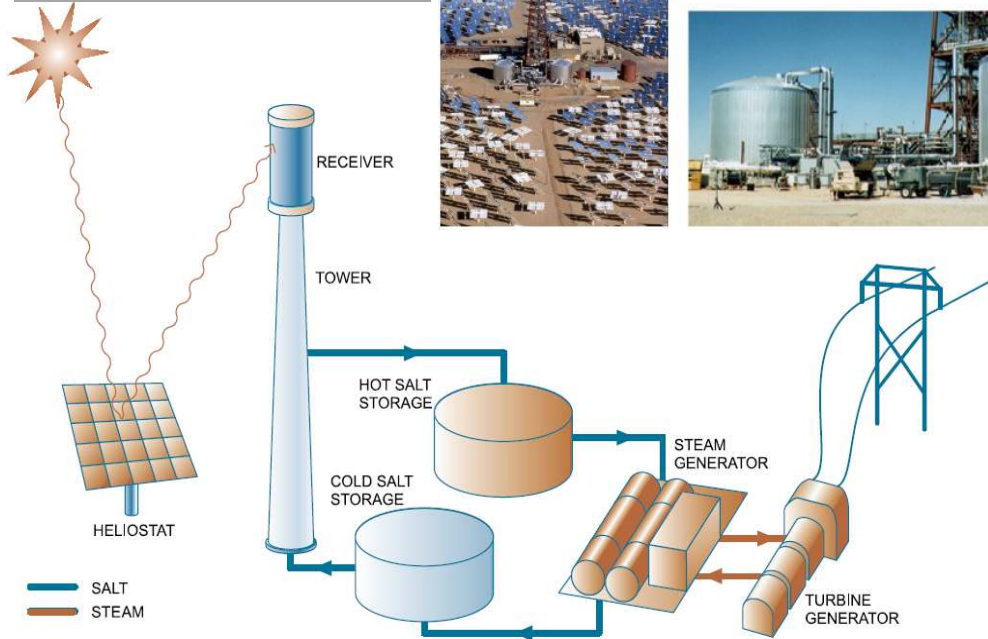


b) Stockage direct

Ex: Solar Two Barstow, USA



Tank direct storage of the "Solar Two" plant near Barstow, USA



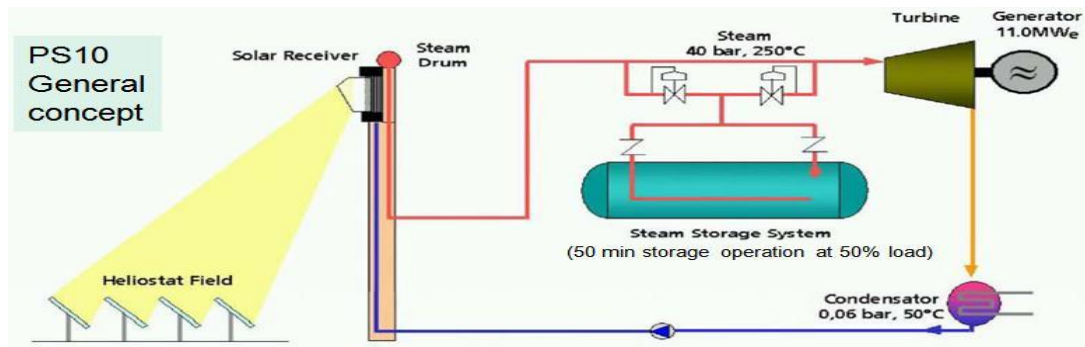
- Appliqué dans la centrale SEGS I à Mojave Desert, USA
- Fonctionne depuis 1985
- Énergie électrique maximale: 13.8 Mw_e
- 2 réservoirs de stockage pour l'huile chaude et froide

2. Système de stockage à chaleur latente

- On utilise des matériaux et fluides à changement de phase
- On utilise principalement le changement d'état:
 - solide – liquide
 - liquide – vapeur
- Dans les technologies actuelles, le procédé solide – liquide joue un rôle important dans le stockage d'énergie

3. Accumulateur de vapeur

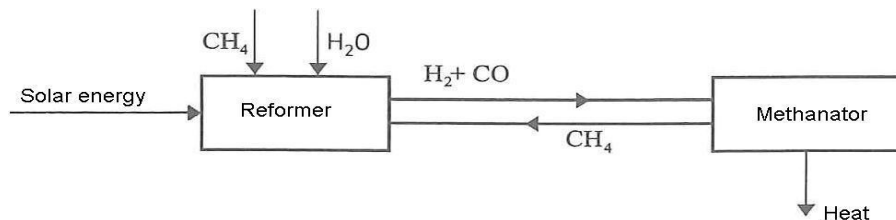
- Les accumulateurs de vapeur sont des appareils sous pression
- Ces dispositifs utilisent les fluides les plus écologiques et les moins chers disponibles.
- Le coût d'investissement concerne surtout l'accumulateur de vapeur



Accumulateurs de vapeur

4. Stockage thermo-chimique

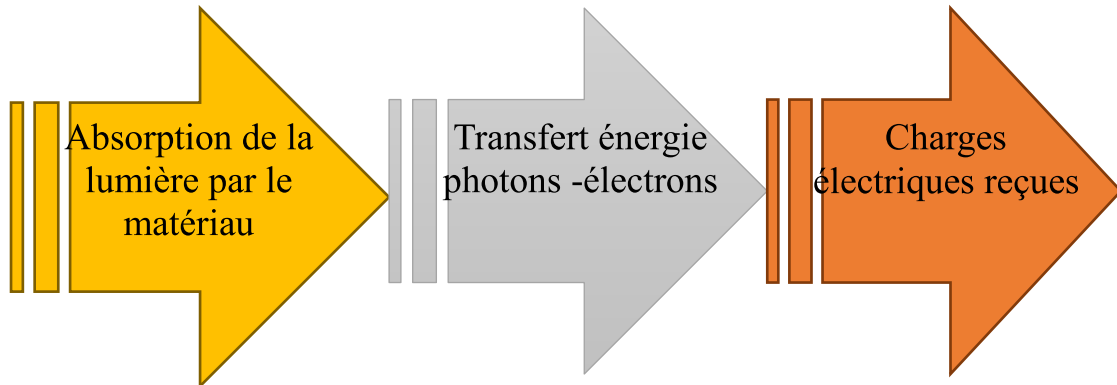
- On utilise dans ce type de stockage des substances qui peuvent subir des réactions réversibles, endothermiques pendant la charge et exothermiques durant la décharge.
- L'enthalpie de ces réactions est plus faible que celle de la combustion d'un seul ordre de grandeur et largement supérieure à celle de la chaleur sensible ou latente.
- Toutefois, cette technologie est à un premier stade, au futur elle peut être très compétitive, solution à moindre coût et à stockage continu



Stockage d'énergie thermo-chimique par le méthane

2.3. Conversion photovoltaïque

L'effet photovoltaïque consiste en la conversion de la lumière reçue (les photons) en électricité.



2.3.1. Principe :

Les cellules photovoltaïques sont des jonctions PN, faites en associant un semi-conducteur de type N (silicium dopé phosphore) avec un semi-conducteur de type P (silicium dopé bore).

Les photons heurtent le matériau photovoltaïque disposé en cellules ou en couche mince. Ils transfèrent leur énergie aux électrons qui gravitent autour des atomes. C'est l'effet photoélectrique. Les électrons « s'excitent » par absorption de cette énergie. L'électron excité forme avec le « trou » qu'il laisse au niveau inférieur une paire « électron-trou ». Les électrons et les trous sont de charges opposées ($-q$; $+q$), Les paires électrons-trou vont se séparer et les électrons excités vont se mettre en mouvement : un courant électrique se crée.

Le courant électrique continu est recueilli par des fils métalliques très fins connectés les uns aux autres aux cellules. Le courant s'additionne en passant d'une cellule à l'autre jusqu'aux bornes de connexion du panneau, et il peut ensuite s'additionner à celui des autres panneaux raccordés en "champ".

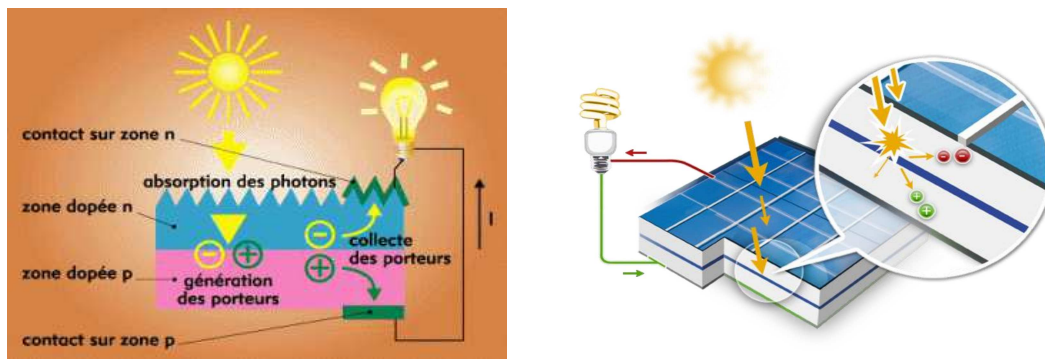


Fig.2.26. Principe du photovoltaïque

2.3.2. Les différents types de cellules photovoltaïques :

La production des cellules photovoltaïques nécessite de l'énergie, et on estime qu'une cellule photovoltaïque doit fonctionner environ 2 à 3 ans pour produire l'énergie qui a été nécessaire à sa fabrication(temps de retour d'investissement).

Une cellule, unité de base d'un système photovoltaïque, ne produit qu'une très faible puissance électrique, **de 1 à 3 W** avec une tension de moins d'un volt. Pour plus de puissance, les cellules sont assemblées en module. Les connections en série augmentent la tension pour un même courant, et en parallèle le courant en conservant la tension. Le courant de sortie et la puissance, sera proportionnelle à la surface du module.

Avantages :

Haute fiabilité, pas de pièce mobile.

Entretien réduit, peu de coût de fonctionnement.

Inconvénients :

Coût de fabrication élevé.

Fonctionnement dépend de l'ensoleillement.

Rendement faible.

CELLULE MULTIJONCTION

Les cellules multi-jonction sont composées de différentes couches qui permettent de convertir différentes parties du spectre solaire et d'obtenir les meilleurs rendements de conversion.

Rendement inégalé, rendement record en laboratoire : environ 40%

Développé pour les applications spatiales, ce type de cellule n'est pas encore commercialisable



CELLULE EN SILICIUM MONOCRISTALLIN

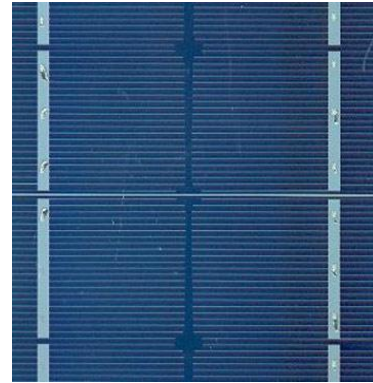
Lors du refroidissement, le silicium fondu se solidifie en ne formant qu'un seul cristal de grande dimension. On découpe le cristal en fines tranches qui donneront les cellules de couleur bleue

Avantages : très bon rendement (environ 150 Wc/m²), durée de vie importante (+/- 30 ans)

Inconvénients : Coût élevé, rendement faible sous un faible éclaircissement.

Rendement module commercial : 12 à 20%

Rendement record en laboratoire : 25%



CELLULE EN SILICIUM POLYCRISTALLIN

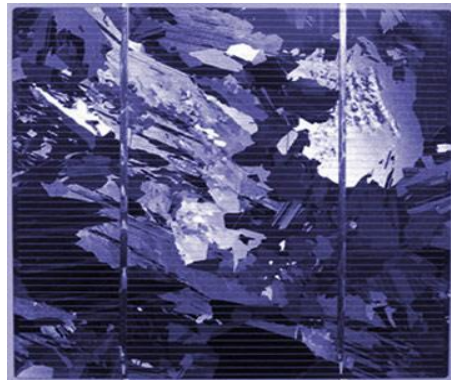
Pendant le refroidissement du silicium, il se forme plusieurs cristaux. Ce matériau est bleu, mais pas uniforme, on distingue des motifs créés par les différents cristaux.

Avantages : Bon rendement (environ 100 Wc/m²), durée de vie importante (+/- 30 ans), meilleur marché que le monocristallin, meilleur rapport qualité / prix

Inconvénients : Rendement faible sous un faible éclaircissement.

Rendement module commercial : 11 à 15%

Rendement record en laboratoire : environ 20%



CELLULE SANS SILICIUM EN COUCHE MINCE CIS

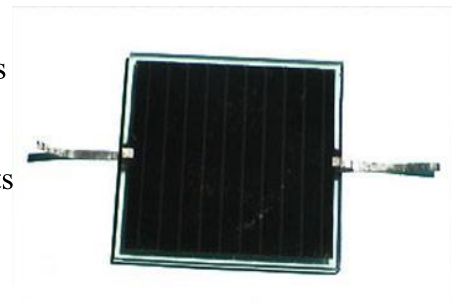
Les cellules CIS représentent la nouvelle génération de cellules solaires sous forme de films minces, de type cuivre-indium-sélénium (CIS). Les matières premières sont plus faciles à se procurer que le silicium. De plus, leur efficacité de conversion énergétique est la plus élevée à ce jour pour des cellules photovoltaïques en couche mince.

Avantages : meilleurs rendements par rapport aux autres cellules photovoltaïques en couche mince, les matériaux utilisés ne sont pas toxiques

Inconvénients: Les cellules nécessitent une surface plus importante pour atteindre les mêmes rendements que les cellules épaisses.

Rendement module commercial : 9 à 11%

Rendement record en laboratoire : environ 19,3%

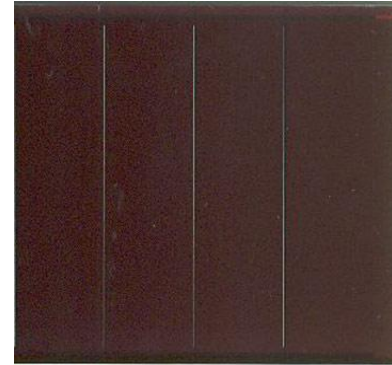


CELLULE SILICIUM AMORPHE EN COUCHE MINCE

Le silicium lors de sa transformation, produit un gaz, qui est projeté sur une feuille de verre. La cellule est gris très foncé ou marron. C'est la cellule des calculatrices et des montres "solaires".

Avantages: Fonctionnent avec un éclairage faible, bon marché, moins sensible aux températures élevées

Inconvénients: Rendement faible en plein soleil (environ 60 Wc/m^2), les cellules en couche mince nécessite une surface plus importante pour atteindre les mêmes rendements que les cellules épaisses, durée de vie courte (+/- 10 ans), performances qui diminuent sensiblement avec le temps.
Rendement module commercial : 5 à 9%
Rendement record en laboratoire : environ 13,4%



Différentes installations photovoltaïques

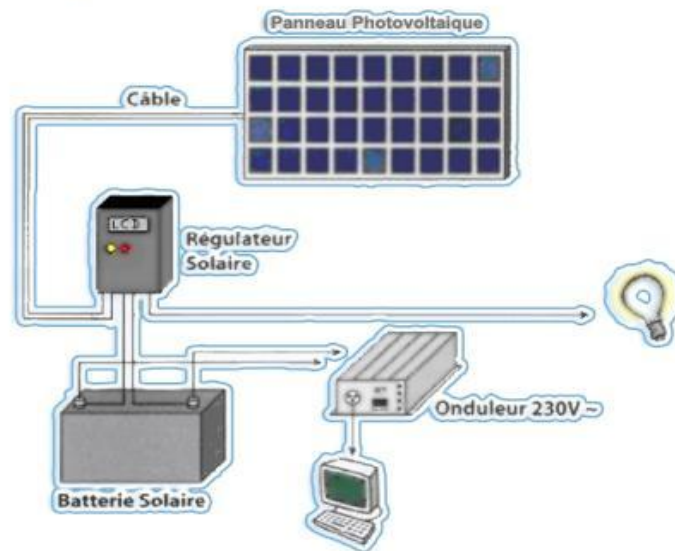
Il existe deux types d'installations des panneaux solaires. Les panneaux solaires photovoltaïques peuvent fournir de l'électricité pour des sites isolés : installations autonomes ou être reliés à un réseau de distribution électrique.

Les installations autonomes

L'installation autonome doit fournir de l'électricité jour et nuit, toute l'année hiver comme été, c'est la seule source en électricité. Ce système n'est utilisé que dans les lieux isolés. Le principe consiste à charger des batteries pour stocker le surplus de la production électrique et la réutiliser en cas de besoin. Le courant est contrôlé par un régulateur solaire.

On peut utiliser un onduleur afin d'alimenter des appareils électriques demandant plus de puissance. Difficile d'utiliser ces installations dans les habitations avec tout ce qui s'en suit en appareils électriques puissants, on peut les utiliser par contre pour l'éclairage public, les phares dans les ports etc...

Principe d'une installation solaire autonome



Source : http://perso.wanadoo.fr/ebonys/ebocrea/images/photovolta_autonome.php

Fig.2.27. installation autonome (site isolé)

Pour stocker massivement l'électricité solaire, il existe deux moyens :

les piles à combustible et les batteries au plomb.

une pile à combustible à l'hydrogène

Le fonctionnement d'une pile à combustible est très propre puisqu'elle ne consomme que des gaz et ne produit que de l'eau. La pile à combustible transforme l'énergie chimique en énergie électrique : une cathode et une anode séparées par un électrolyte qui assure le passage du courant par transfert ionique des charges. Elle consomme son oxydant (O_2) et son réducteur (H_2). Elle continue de fonctionner tant qu'elle est approvisionnée en hydrogène et oxygène. A chaque réaction, les piles à combustible produisent de l'eau et libèrent deux électrons.

En tenant compte de l'énergie nécessaire à leur fabrication, de leur fonctionnement et de leur durée de vie, le rendement des piles à combustibles est de 30 %

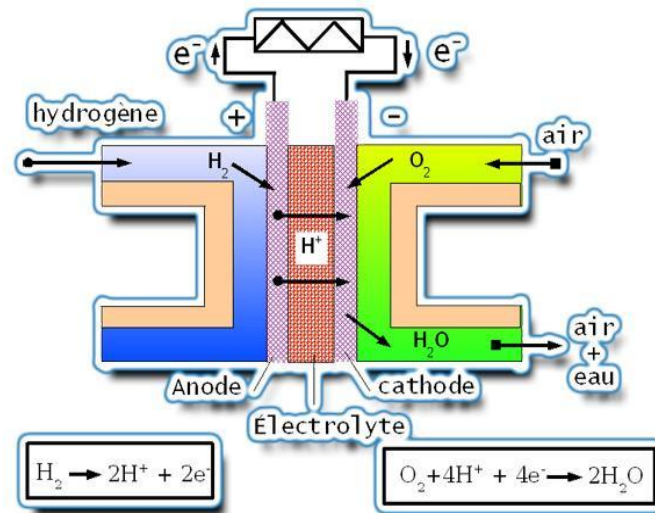


Fig.2.28. Pile à combustible

La batterie au plomb

La batterie au plomb est capable de stocker l'électricité puis de la redistribuer. Elle est constituée d'accumulateurs de 2V montés en série. Pendant la décharge il y a production de sulfate de plomb et libération d'électrons. Pendant la charge, c'est la réaction inverse.

La batterie esde taille limitée, elle ne peut pas assurer la consommation d'électricité dans toute une habitation. Il faudrait mettre des tonnes de batteries dans chaque habitation pour que tout fonctionne. Le rendement d'une batterie au plomb qui a une durée de vie de 5 à 20 ans est de 70 %.

Il faudrait couvrir une très grande surface du territoire en panneaux solaires pour que les installations autonomes puissent fournir l'électricité nécessaire.

Cela est impossible, il a été pensé à une autre solution: LE RACCORDEMENT AU RESEAU. Les habitations équipées d'une installation reliée au réseau sont munies de panneaux solaires qui peuvent fournir l'électricité et en utiliser du réseau en cas de besoin.

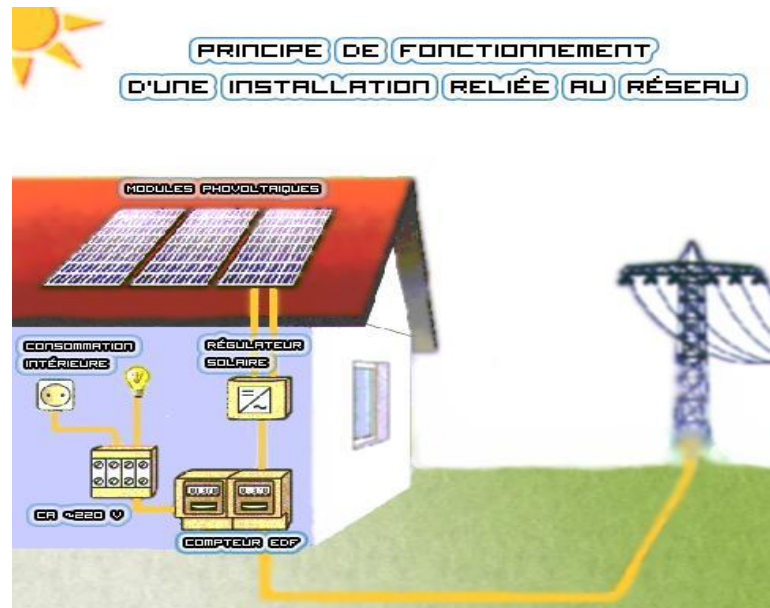


Fig.2.29. Installation reliée au réseau électrique

2.3.3. Calcul du rendement d'un panneau

Comment exprimer le rendement d'un PV. Le calcul du **Ratio de Performance** concerne la qualité de fonctionnement d'une installation.

La production d'une installation photovoltaïque est donnée par l'équation suivante :

$$E_{elec} = H_i \times S \times \eta$$

avec

E_{elec} [kWh/an] : énergie électrique produite sur un an

H_i [kWh/m².an] : irradiation reçue dans le plan des modules sur 1m² pendant un an.

S [m²] : surface du champ des modules photovoltaïques

η : rendement global du système

Le rendement global inclut toutes les pertes provoquées par ses composants, des modules jusqu'au point d'injection du courant alternatif sur le réseau de distribution.

Il est donc égal au rapport entre l'énergie lumineuse E_{lum} reçue sur les panneaux et l'énergie électrique E_{elec} de sortie injectée sur le réseau.

$$\eta = E_{elec} / E_{lum}$$

Le rendement global est écrit en deux composantes :

$$\eta = \eta_{stc} \times \eta_{système}$$

η_{stc} est le rendement des modules en conditions standards, c'est-à-dire sous une

luminosité $G_{stc} = 1000 \text{ W/m}^2$ à 25°C . il est égal à:

$$\eta_{stc} = P_c / G_{stc} \times S,$$

avec

P_c est la puissance crête du panneau en watts

$\eta_{système}$ englobe toutes les pertes sur l'onduleur, dues à la température, à cause des écrans, écart entre puissance crête et puissance réelle etc... il est estimé entre 0.7 et 0.8 pour des installations classiques.

Influence de l'éclairement et de la température sur les performances du PV

Comme le montre le graphique, le courant de court-circuit (I_{cc}) croît proportionnellement avec l'éclairement, alors que la tension à vide (V_{co}) varie très peu (environ 0,5 V). Ainsi, plus la couverture nuageuse est importante, plus l'intensité du courant est faible.

La température a une influence considérable sur le comportement de la cellule et son rendement. En effet, l'augmentation de la température provoque de la tension générée pour une très légère augmentation du courant.

Ca peut induire, une perte de 0.5 % du rendement par rapport au rendement maximum de la cellule. On voit tout l'intérêt d'une ventilation correcte à l'arrière des panneaux.

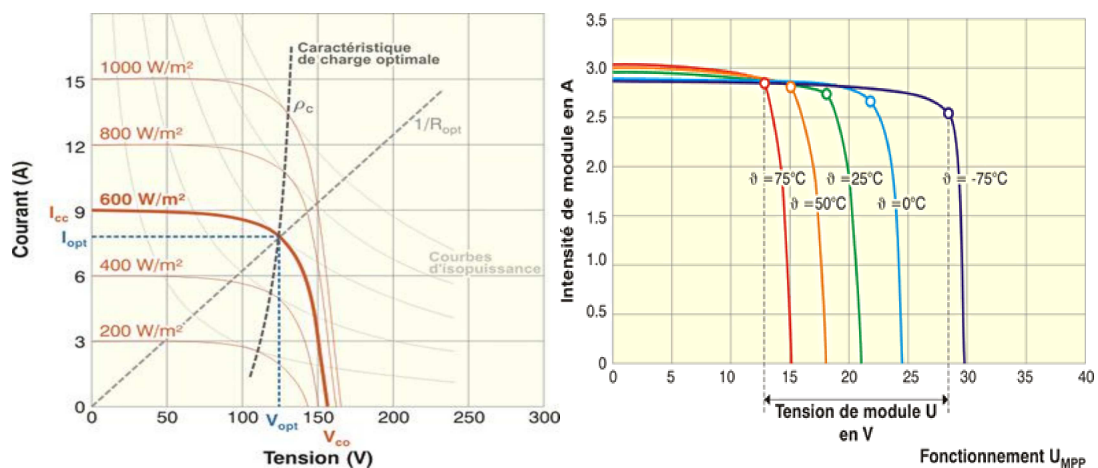


Fig.2.30. Paramètres influents sur le rendement électrique

UNE SOLUTION pour la température : Le panneau hybride ou capteur solaire mixte

Il est composé d'un **capteur solaire thermique** (chauffe-eau ou chauffe –air solaire) à haut rendement sur lequel sont disposées des **cellules solaires photovoltaïques** .

Ce panneau permet de produire à la fois de l'électricité et de la chaleur, qui offre deux avantages :

- Augmenter le rendement des cellules photovoltaïques en abaissant leur température.
- Économiser de l'espace en combinant la production électrique et thermique sur une même surface.



Application :

Soit une habitation utilisant les consommations suivantes

Usage	Equipement	Puissance (W)	Conso. veille	Nbre	Durée (h)	Periode
Eclairage	Lampe Fluo-compacte 13 W	13	0	3	6	J
Réfrigération (+2°C)	Coffre 130/140 litres	77	0	1	8	J
Audio-visuel	Radio-Réveil	5	0	1	3	J
Audio-visuel	Téléviseur couleur 42cm	50	5	1	3	J

1/ calculer la consommation journalière totale en Wh/J

2/ Déterminer la puissance crête totale si le nombre d'heures équivalent aux conditions standard est de 3.55 heures et si le rendement de l'installation est de 75%

3/ déterminer le nombre de panneaux d'une puissance crête de 150 Wc à installer.

Chapitre 3 : Energie hydraulique

L'eau est un élément naturel vital, qui recouvre jusqu'à 70% de la surface de notre planète appelée en l'occurrence « planète bleue ».

Cette eau de 1,4 milliard de km³ est salée à 97 % (mers et océans). Les 3 % restants, de l'eau douce (fleuves, rivières, lacs, nappes souterraines et des glaciers).L'eau effectue un cycle hydrologique dont le soleil est le moteur. Au cours de ce parcours, l'eau va passer entre les différentes phases: liquide, glace et vapeur d'eau.



Fig.3.1. Cycle eau

L'eau est une des premières sources d'énergie utilisées par l'Homme avec les moulins à eau de l'Antiquité, utilisés pour moudre les céréales. Au Moyen-âge, on les utilisait aussi pour fouler les tissus, travailler les métaux, préparer la pâte à papier... Il faut attendre le XIX^{ème} siècle pour révolutionner l'énergie venant de l'eau avec l'apparition de la turbine : **L'hydroélectricité!**

3.1. L'énergie hydraulique dans le monde/L'hydraulique : la première énergie renouvelable pour la production d'électricité

L'hydroélectricité est la troisième source de production électrique mondiale, derrière le charbon et le gaz (énergies fossiles), elle est à leur opposé, considérée comme source renouvelable et propre.

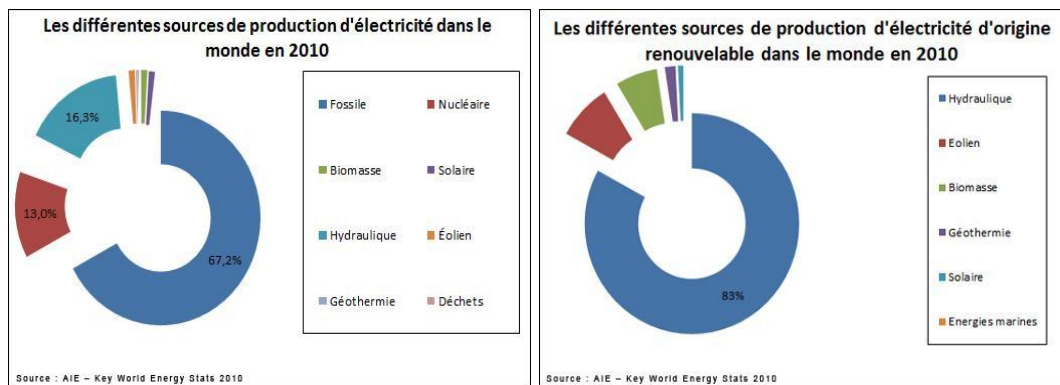


Fig.3.2. Production d'électricité / sources d'énergie

3.2. Principe de fonctionnement

La production d'électricité hydraulique utilise l'énergie mécanique (cinétique et potentielle) de l'eau. Le principe est le même que pour les moulins à eau de l'Antiquité.

Au lieu d'activer une roue, la force de l'eau active une turbine qui déclenche un alternateur et produit de l'électricité.

Ces installations sont appelées des centrales hydrauliques ou hydroélectriques. On les retrouve sur les fleuves, rivières ou barrages.

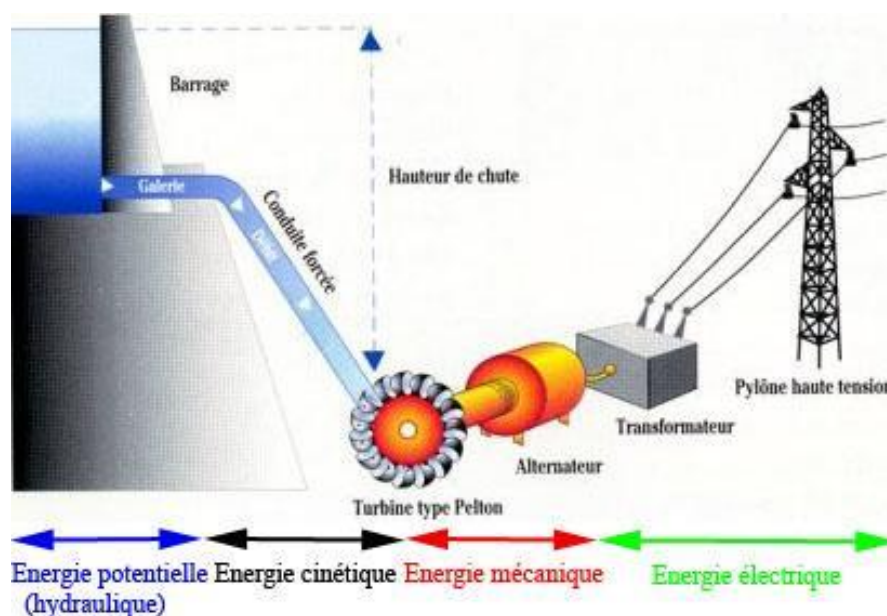


Fig.3.3. Centrale Hydroélectrique

LES ELEMENTS PRINCIPAUX :

- 1- la retenue d'eau
- 2- la conduite forcée
- 3- la turbine
- 4- l'alternateur
- 5- le transformateur

3.3. Types de centrales hydrauliques :

a.1. Les centrales basses chutes (au fil de l'eau)

Elles sont caractérisées par un débit très important et une faible hauteur de chute. Les centrales de basse chute, se trouvent sur les grands fleuves et fonctionnent au fil de l'eau avec production continue. Les turbines sont à réaction type Kaplan avec des pales qui s'orientent en fonction du débit.

a.2. Les centrales hydrauliques moyennes chutes

Elles sont caractérisées par une hauteur de chute entre 30 et 200m au pied de barrage (souvent des usines de retenues) , en moyenne montagne, elles utilisent les réserves d'eau accumulées sur des courtes périodes. Ces centrales d'éclusée servent pour la régulation journalière ou hebdomadaire de la production. Les turbines sont du type Francis (à moyenne pression).

a.3. Les centrales hydrauliques hautes chutes

Ces centrales sont caractérisées par une forte hauteur de chute de plus de 200m. L'usine est située à une distance importante de la prise d'eau (plusieurs kilomètres). Elles se trouvent en altitude, les usines de lacs disposent de plus de 400 heures de réserves. Leur rapidité de démarrage permet de répondre à la consommation, notamment en hiver. Les usines de haute chute sont généralement équipées de turbines Pelton

3.4. Rendement de l'installation hydroélectrique

Le rendement global du turbinage η_T est composé de plusieurs rendements relatifs aux différentes parties de l'installation: $\eta_T = \eta_{\text{cond}} \times \eta_{\text{TUR}} \times \eta_{\text{ARB}} \times \eta_{\text{ALT}}$

Rendement de la conduite $\eta_{\text{cond}} = 1 - \alpha Q^2$, avec Q est le débit et α est un coefficient dû au frottement. Ce rendement varie entre 90 et 95%

Rendement de la turbine η_{TUR} , les pertes dans la turbine sont liées à l'abrasion, l'érosion, la cavitation, il dépendent des caractéristiques de la turbine . ce rendement est autour de 90% à partir d'un débit avoisinant les 40% du débit maximal nominal. En plus, il ya le rendement de l'arbre de transmission qui subit des pertes sur les paliers η_{ARB} .

Rendement de l'alternateur η_{ALT} , les pertes y sont faibles surtout si la fréquence est stable et s'il n'y a pas de puissance réactive, il avoisine les 95%.

Rendement du transformateur η_{TR} , les pertes y sont des pertes surtout magnétiques et par effet Joule, elles sont limitées pour les gros transformateurs avec un rendement autour de 99%.

3.5. Avantages et Inconvénients :

3.5.1. Avantages

- Production d'énergie active durant les heures de fortes consommations d'électricité.
- Pompage durant les heures creuses afin de reconstituer la réserve d'eau dans le bassin de retenue. Ce qui permet de stocker l'énergie électrique en une énergie potentielle qui sera transformée à nouveau.
- Démarrage et arrêt très rapides.
- Aucune pollution lors de la production d'électricité.
- Production d'électricité décentralisée (pas de transports).
- Facilité d'entretien et faible usure du matériel.
- Haut rendement des machines, capable de transformer 90% de l'énergie de l'eau en énergie mécanique.
- Souplesse d'exploitation, avec les progrès de l'automatisme et des télécommandes.

3.5.2. Inconvénients :

- Modification du débit et du niveau de l'eau.
- Perturbation de la faune et de la flore.
- Surcoût lié à la nécessité d'installer des passes à poissons.
- Risque pour les personnes en aval lié au barrage.

3.6. L'énergie hydroélectrique en Algérie

A cause du stress hydrique que subit et subira le pays à l'avenir à cause de la forte sécheresse, le gouvernement compte mobiliser toutes les ressources en eau superficielles du pays pour assurer une meilleure alimentation en eau potable de la population. A cet effet, il compte porter le nombre de barrages de 70 à 100. Au-delà de l'augmentation du nombre de barrages, le gouvernement a décidé de fermer à terme les centrales hydroélectriques du pays et de consacrer les deux barrages produisant de l'électricité, le Barrage d'IghilEmda à Kherrata (Bejaia) et celui d'Erraguen à Jijel, à l'irrigation et à l'alimentation de la population en eau potable. Cette décision est due au fait que le niveau de production des centrales

hydroélectriques est très faible, soit seulement 389,4 GWh des 28.950 GWh produits, l la quasi-totalité est produite par les turbines à gaz.

Chapitre4 : Energie éolienne

Le début de l'utilisation de l'énergie éolienne remonte à peu près à 3 000 ans avant J.-C., avec les premiers bateaux à voile. Les premiers moulins à vent sont inventés par les Perses vers 200 avant J.-C. Cette technique n'est ensuite importée en Europe qu'au XII^e siècle. Deux siècles après, les célèbres moulins hollandais voient le jour. Ces moulins sont utilisés pour faire tourner des scieries ou fabriquer de l'huile. Mais c'est en Angleterre qu'ont été perfectionnées les formes des pales. L'Angleterre compte au XIX^e siècle environ 10 000 moulins. Depuis les années 1990, le développement technologique des éoliennes a permis la construction des aérogénérateurs.



Fig.4.1. Ferme éolienne

L'énergie éolienne est une énergie véhiculée par l'air en mouvement dans l'atmosphère. La racine étymologique du terme « éolien » provient du nom du personnage mythologique Éole, connu en Grèce antique comme le maître des Vents. L'énergie éolienne est une forme indirecte de l'énergie solaire comme c'est le cas de toutes les énergies sur terre : les rayons solaires absorbés dans l'atmosphère entraînent des différences de température et de pression qui créent une circulation de l'air sous force de courants.

4.1. Principe de fonctionnement et éléments de l'éolienne

Les masses d'air en mouvement, accumulent de l'énergie cinétique. Celle-ci peut être utilisée à :

- la transformation en énergie mécanique : le vent est utilisé pour faire avancer un voilier, pour pomper de l'eau (éoliennes de pompage pour irriguer)
- la production d'énergie électrique (aérogénérateur) : l'éolienne est couplée à un générateur électrique pour produire un courant continu ou alternatif.

L'énergie éolienne est une énergie renouvelable qui ne produit pas directement de gaz à effet de serre en phase d'exploitation.

La machine se compose d'un rotor doté généralement de 3 pales. Le rotor est fixé sur une nacelle qui abrite un générateur. Cet ensemble est installé au sommet d'un mat vertical.

Un moteur électrique permet d'orienter la nacelle pour garder le rotor face au vent. Le vent fait tourner les pales entre 10 et 25 tours par minute et entraîne le générateur qui transforme l'énergie mécanique en énergie électrique injectée sur le réseau.

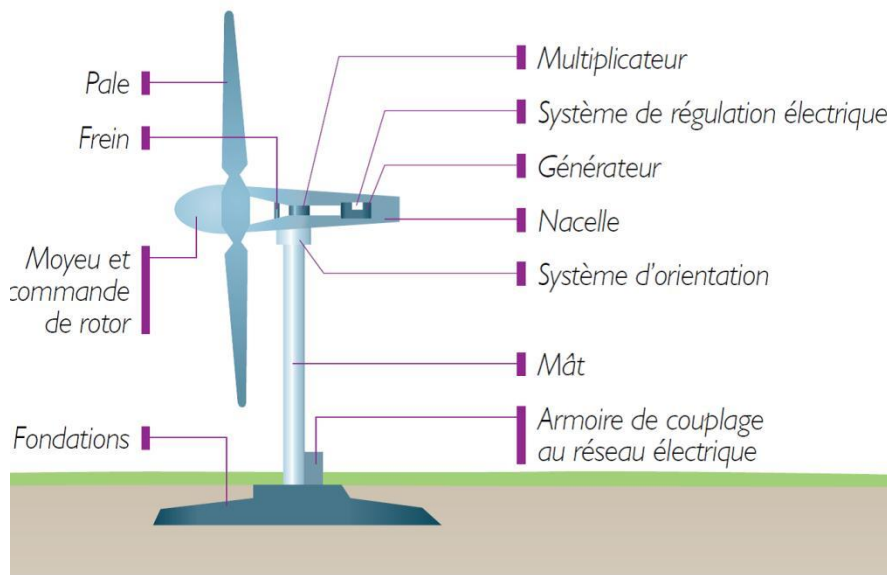


Fig.4.2. Eléments constitutifs d'une éolienne

4.2. Les modes d'exploitation de l'énergie éolienne

On distingue:

- Les éoliennes terrestres appelées « onshore » sont installées sur terre.
- Les éoliennes « offshore »: sont installées en mer, les éoliennes offshore sont plus puissantes car le vent en mer est plus fort et plus constant.

On définit également deux typologie d'installations :

- Industrielles : ce sont les grands parcs éoliens (« fermes éoliennes») raccordés au réseau électrique ;
- domestiques: ce sont de petites éoliennes installées chez les particuliers.

4.3. Fonctionnement technique

L'énergie électrique ou mécanique produite par une éolienne dépend de trois paramètres : la forme et la longueur des pales, la vitesse du vent et la température qui influe sur la densité de l'air.

- L'énergie récupérable correspond à l'énergie cinétique qu'il est possible d'extraire. Elle est proportionnelle à la surface balayée par le rotor et au cube de la vitesse du vent.

En pratique, une éolienne produit quatre fois plus d'énergie si la pale est deux fois plus grande et huit fois plus si la vitesse du vent est double.

La densité de l'air aussi influe sur l'énergie produite : 3% de plus d'électricité si, pour la même vitesse de vent, l'air est plus froid de 10°C.

L'énergie éolienne est donc une énergie intermittente et aléatoire, L'ensemble pale/rotor est orienté face au vent par un système de gouvernail. La plupart des éoliennes démarrent à la vitesse du vent d'environ 3 m/s et s'arrêtent si elle atteint 25 m/s.

4.4. Enjeux par rapport à l'énergie

Considérée comme une énergie propre, l'énergie éolienne connaît un essor important. Parmi les énergies renouvelables, elle est considérée comme la plus économique après l'hydroélectricité. D'après le GWEC (Global Wind Energy Council:), la capacité installée du parc éolien mondial a plus que doublé entre fin 2010 et fin 2015. Actuellement, elle atteint près de 432,4 GW. Malgré cette croissance, sa part dans la production d'électricité mondiale totale est d'environ 3% !

4.4.1 Avantages et Inconvénients

a. Avantages

- L'énergie éolienne suscite un grand intérêt car elle contribue à la diversification des sources d'énergie et à l'indépendance énergétique. Elle est renouvelable et décarbonée en phase d'exploitation.
- Le terrain où les éoliennes sont installées reste exploitable pour les activités industrielle et agricole. L'installation peut être démontée plus ou moins facilement.
- Le développement offshore des éoliennes est un potentiel intéressant.
 - Localement, les éoliennes peuvent répondre à des besoins électriques de masse tout comme à des besoins domestiques limités, selon la taille des installations.
 - Une éolienne fournit une puissance de quelques kW jusqu'à plus de 6 MW.

b. Inconvénients

- L'énergie éolienne dépend de la puissance et de la régularité du vent, deux variables aléatoires. C'est une source d'énergie intermittente.
- Les zones de développement sont limitées.
- Les éoliennes peuvent susciter des conflits d'ordre environnemental comme les nuisances visuelles et sonores touchant au confort.
- Il peut exister des conflits d'utilisation de l'espace terrestre ou marin .

4.4.2. Les pays à grande capacité éolienne

Ce sont la Chine et les États-Unis qui disposent des plus grands parcs éoliens dans le monde, avec 145.1 GW et 74.5 GW en 2015. Vient ensuite l'Allemagne, leader européen de l'éolien (il était leader mondial jusqu'en 2009) avec 44,9 GW installés.

Mais si on rapporte les capacités éoliennes à la superficie et la population, c'est le Danemark qui vient en tête. L'Europe a longtemps dominé le marché mondial mais actuellement tout son parc installé est équivalent celui de la Chine.

4.4.3. Les entreprises du secteur éolien

Selon le cabinet Make Consulting, les 5 principaux fabricants en 2014 sont:

- Siemens (Allemagne) avec 10,8% de parts de marché mondial ;
- GE Wind (États-Unis) avec 10,2% ;
- Vestas (Danemark) avec 10,1% ;
- Goldwind (Chine) avec 9,2% ;
- Enercon (Allemagne) avec 7,8%.

4.5. Calculs

4.5.1. Énergie cinétique

Le vent est de l'air en mouvement, ayant donc une énergie cinétique, si on considère que la masse volumique de l'air est constante, on peut dire que l'énergie fournie par le vent est :

$$E_c = \frac{1}{2} \cdot m \cdot V^2$$

La masse de l'air

A une pression atmosphérique normale et à une température de 15°C, l'air a une masse volumique d'environ 1,225 kg/m³. Cependant, l'air froid est plus dense que l'air chaud, et plus dense aussi à faible altitude. En haut des montagnes, l'altitude est plus

élevée donc l'air est plus léger à cause de la pression atmosphérique plus basse qui y règne.

$$m = \rho \cdot V$$

Dans le cas de l'éolienne, le volume d'air dépend de la surface balayée par le rotor. La puissance du vent traversant le rotor correspond à la quantité d'énergie cinétique à chaque seconde.

Énergie théoriquement récupérable

En considérant un dispositif de récupération de cette énergie de surface S et en faisant l'hypothèse que la vitesse du vent y est uniforme, le volume d'air qui traverse cette surface en 1 seconde est égale à V.S

$$P = \frac{1}{2} m V^2 = \frac{1}{2} \rho V S V^2 = \frac{1}{2} \rho S V^3$$

P: puissance récupérable (Watt)

m : débit massique du volume d'air traversant la surface S en 1 seconde (kg/s)

ρ : masse volumique de l'air (kg/m³)

V : vitesse de l'air traversant le dispositif (m/s)

S : surface du dispositif de récupération (m²)

V.S : débit volumique d'air (m³/s)

Cette puissance est théorique, l'éolienne ne pourra jamais récupérer l'énergie cinétique du vent telle qu'elle.

En pratique, une éolienne récupère l'énergie du vent, en contrepartie le dévie avant qu'il atteigne la surface balayée par le rotor. Une éolienne ne pourra donc jamais récupérer l'énergie totale fournie par le vent. Lorsque l'énergie cinétique du vent est convertie en énergie mécanique par le rotor, le vent est freiné par celui-ci, la vitesse du vent en amont du rotor est toujours supérieure à celle en aval. Or la masse d'air qui traverse la surface balayée par le rotor est identique à celle sortant. Il en résulte un élargissement de la veine d'air (tube de courant) à l'arrière du rotor. Ce freinage du vent est progressif, jusqu'à ce que la vitesse de l'air à l'arrière du rotor devienne à peu près constante.

Limite de Betz/Formule de Betz

La puissance récupérable réelle est inférieure, puisque l'air doit conserver une énergie cinétique résiduelle pour qu'il y ait un écoulement. L'allemand Albert Betz a démontré en 1919 que la puissance maximale récupérable est :

$$P_{max} = \frac{16}{27} P = \frac{8}{27} \rho S V^3$$

Lorsque la vitesse à l'amont est égale à 3 fois celle à l'aval, le **rendement maximal théorique** est d'environ 59,3 %.

Ce ratio ne prend pas en compte les pertes lors de la conversion de l'énergie du vent en énergie électrique. Dans le cas d'une hélice de diamètre D , la limite de Betz est égale à ($\rho = 1.23 \text{ kg/m}^3$ à pression atmosphérique et température $15 \text{ }^\circ\text{C}$) :

$$P = 0.37 \cdot \frac{\pi}{4} D^2 V^3 = 0.29 D^2 V^3$$

4.5.2. Rendements

L'énergie fournie par l'aérogénérateur est affectée par tous les rendements des différentes transformations (voir Fig.4.2.)

L'hélice : $0.20 > \eta > 0.85$

Le multiplicateur ou le réducteur : $0.70 > \eta > 0.98$

L'alternateur ou la génératrice continue : $0.80 > \eta > 0.98$

Le transformateur : $0.85 > \eta > 0.98$

Les batteries : $0.90 > \eta > 0.98$

Les pertes de lignes : $0.90 > \eta > 0.99$

Le rendement de chaque élément varie avec le régime de fonctionnement lié à la vitesse de rotation de l'hélice, ce qui en dehors du régime nominal diminue encore le rendement global du dispositif. Il est alors difficile de dépasser 70% de la limite de Betz.

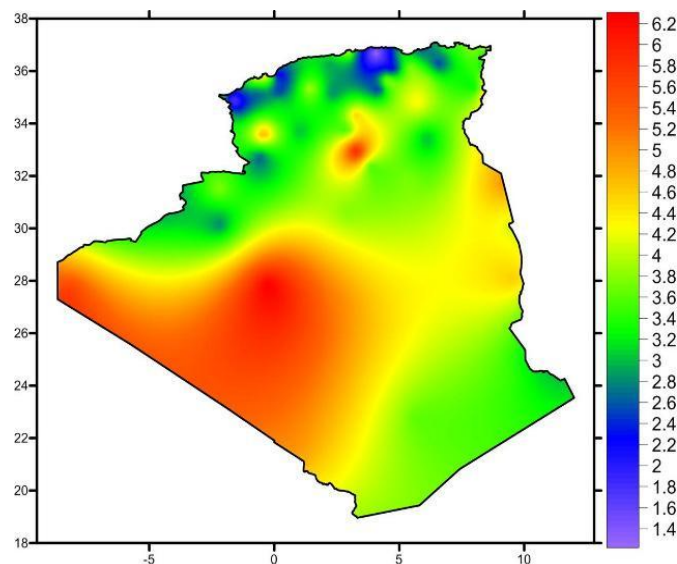


Fig.4.3. Carte du gisement éolien en Algérie
Vitesse du vent en m/s à 10 m su sol (source CDER)

Cette cartographie des vents est la plus récente effectuée par des chercheurs du CDER,

elle date de 2013 avec un nombre plus important de points de mesure.

21 zones avec une vitesse adéquate pour l'implantation de fermes éoliennes ont été répertoriées en prévision de l'implantation des futures fermes qui devrait s'effectuer en 2017.

L'Algérie avait réceptionné en 2014 la **ferme éolienne pilote d'Adrar (10 MW)**.

Selon les prévisions du groupe Sonelgaz, l'apport de l'éolien atteindra à l'horizon 2024 un taux de 20% de la production énergétique de sources propres et renouvelables avec une production de 600 MW.



Fig.4.4. Ferme éolienne Adrar

Chapitre 5 : La biomasse

La biomasse est une réserve considérable de l'action du soleil grâce à la photosynthèse. C'est de la matière organique qui peut être une intéressante source d'énergie. On entend par matière organique les matières d'origine végétale (résidus alimentaires, bois, feuilles) et d'origine animale (cadavres d'animaux, êtres vivants du sol). Il existe trois formes de biomasse source d'énergie avec des caractéristiques très variées :

les solides (paille, copeaux, bûches...);

les liquides (huiles végétales, bioalcools);

les gazeux (biogaz).

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

La valorisation de cette source d'énergie présente différents types de conversion:

- les biocarburants pour le transport (sous forme de céréales, huiles usagées...)
- le chauffage domestique (bois)
- la combustion de bois et de déchets pour production de l'électricité.

Cette conversion se fait selon trois procédés : la voie sèche, la voie humide et la production de biocarburants.

- **La voie sèche:** concerne la filière thermochimique (combustion, gazéification, pyrolyse)
- **La voie humide :** est principalement la méthanisation
- **la production de biocarburants:** ce sont des combustibles liquides ou gazeux obtenus par des réactions.

5.1. La combustion

La combustion est une réaction exothermique. Elle dégage de la chaleur qui peut être utilisée pour le chauffage ou pour produire de l'électricité.

Mais, il faut veiller à l'exploitation raisonnée des forêts (éviter la déforestation) afin de garder un impact environnemental positif.

5.2. La pyrolyse

C'est la décomposition chimique de matière organique sous l'action de la chaleur. Par ce procédé, la biomasse produit un gaz combustible (le méthane CH_4), des minéraux, du charbon de bois utilisable comme amendement organique (c'est un produit stable, sec, à haute valeur agronomique, il est issu du compostage des déchets organiques (déchets alimentaires, déchets verts, boues issues de l'épuration des eaux...) ou comme combustible.

5.3. La méthanisation

La méthanisation est un processus naturel qui transforme la biomasse en méthane.

Il est de plus en plus utilisé pour valoriser les déchets de l'agriculture (fumier, déchets des céréales, etc.). La biomasse fermente grâce aux bactéries mésophiles (vivant à température modérée) ou thermophiles (vivant à haute température) dans une cuve appelée digesteur où est produit du méthane.

Un système de cogénération (rendement supérieur à 80%) permet de produire de l'énergie électrique et/ou thermique à partir de ce méthane.

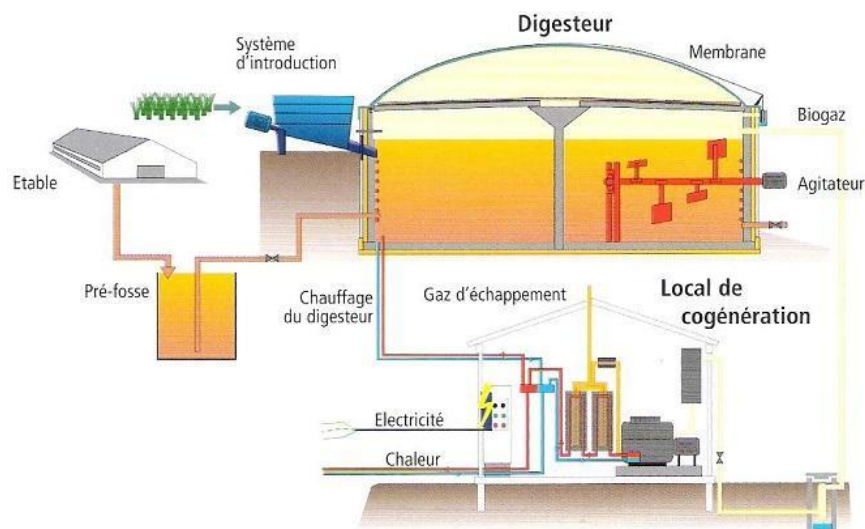


Fig.5.1. Méthanisation

5.4. La production de biocarburants

Ce 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^{ère} génération : biocarburants créés à partir des graines ;
- 2^e génération : biocarburants issus des résidus non alimentaires (paille, tiges, bois) ;
- 3^e génération : biocarburants d'hydrogène produit par des micro-organismes ou à partir d'huile produite par des microalgues.

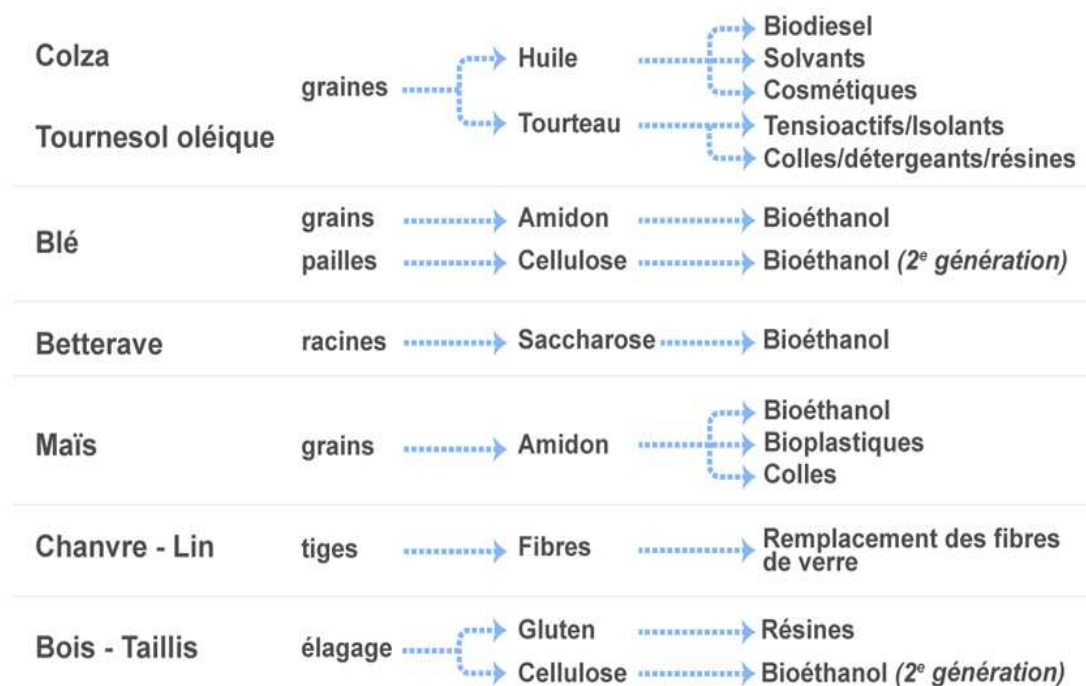


Fig.5.2. Exemples de biocarburants

5.4.1. Le bioéthanol (exemple de biocarburant)

Le bioéthanol, destiné aux véhicules équipés d'un moteur à essence, est un carburant obtenu de céréales ou de betteraves. C'est vrai qu'une tonne de céréales donne 350 litres de bioéthanol, mais, la substitution d'une tonne d'essence par une tonne de bioéthanol réduit de 75% les émissions de gaz à effet de serre.

Les différentes étapes de fabrication du bioéthanol sont :

Le broyage : le blé est transformé en farine pour rendre l'amidon plus accessible aux enzymes.

La liquéfaction et la saccharification : des enzymes fragmentent l'amidon (longue chaîne de molécules de sucre) en glucose (sucre simple).

La fermentation : les levures transforment les glucoses en éthanol : un vin à 10% d'alcool.

La distillation : le vin est séparé en un alcool brut à 94%, appelé le flegme, et en une partie non alcoolisée appelée vinasse.

La déshydratation : le flegme est condensé en un alcool anhydre à 99,9%, c'est le biocarburant qui sera mélangé à l'essence.

Les non-alcools issus de la distillation sont centrifugés et séchés afin d'obtenir une farine. Cette farine est transformée en granulés (le taux de protéines de 32%), destinés à l'alimentation animale.

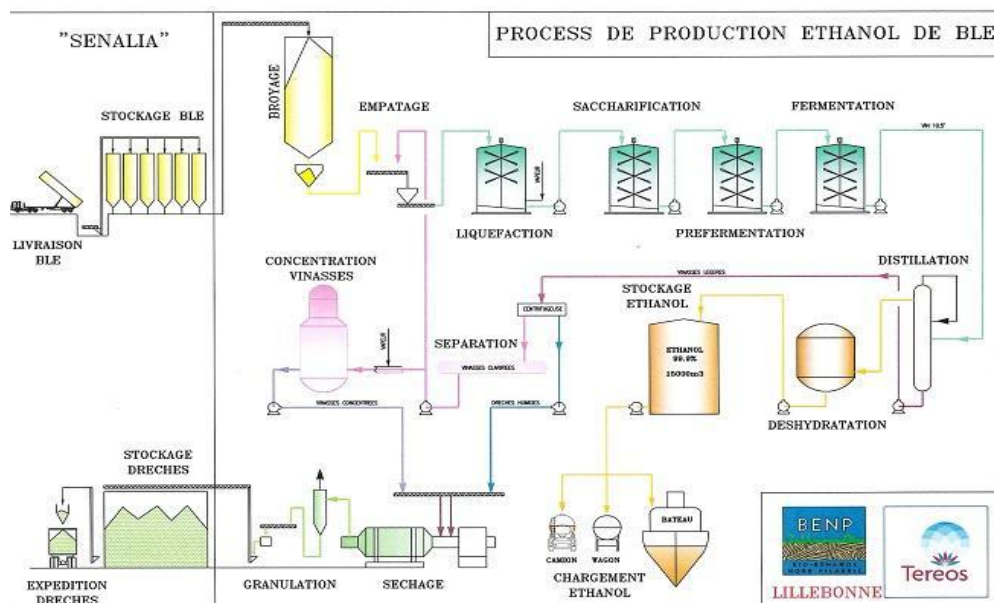


Fig.5.3. Ethanol de Blé

5.5. Le compost

C'est un "Engrais composé", fertilisant riche à base de déchets d'origine végétale ou animale. Une fois décomposée par des micro-organismes (bactéries, champignons,...), mélangée et mise en tas, cette matière organique produit un engrais totalement naturel à 100 %. C'est l'engrais le plus équilibré : plus on composte d'éléments différents plus le compost sera complet.

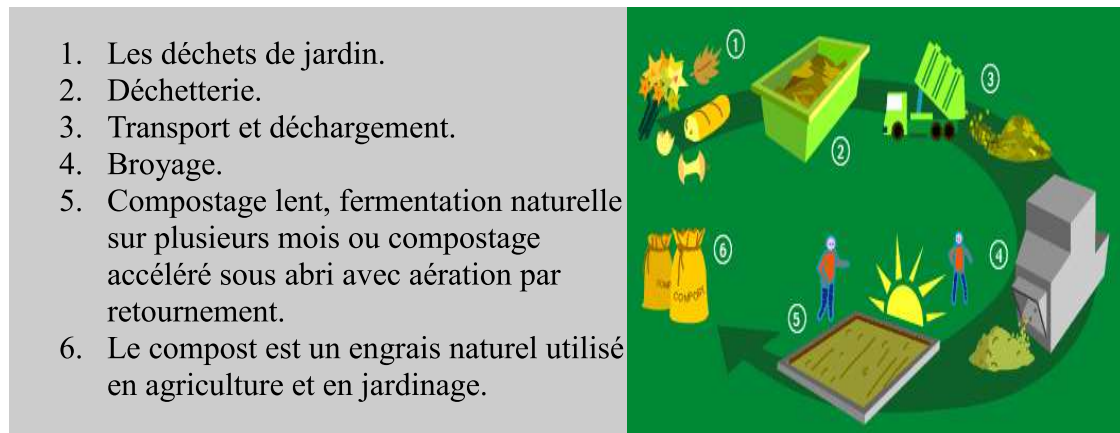


Fig.5.4. Principe d'un compost

5.6. Les avantages et inconvénients de la biomasse

a. Avantages

- Matière première renouvelable et durable.
- Biodégradable rapidement
- Les Produits issus de la biomasse sont souvent non-toxiques.
- Elle dégage autant de CO₂ qu'elle n'en absorbe
- Elle est disponible partout
- Elle peut être transformée en chaleur et en électricité.

b. Inconvénients

- Le rendement énergétique est assez faible.
- Pour produire de l'énergie biomasse il faut occuper des terres agricoles.
- Une surexploitation de la biomasse peut entraîner une déforestation importante et un danger pour l'environnement.
- Peut provoquer la pollution des eaux et des sols
- Les coûts et les impacts du transport

5.7. Production énergie de biomasse(données 2012) :

894 GWh / jour est la production mondiale moyenne. La production électrique à partir de biomasse dans le monde s'élève à 326,2 TWh.

Producteurs majeurs:

Les États-Unis avec une production électrique de 63 TWh, soit 19,4% de la production mondiale.

Le Brésil avec 42 TWh (12,8%) ;

L'Allemagne avec 41 TWh (12,7%).

6,9% : proportion d'électricité issue de la biomasse dans la production d'électricité renouvelable mondiale.

10 MW : est la puissance moyenne d'une centrale biomasse

5.8. Biomasse en Algérie- Le potentiel de la biomasse

5.8.1. Potentiel de la forêt :

Le potentiel actuel est évalué à environ 37 Millions de TEP (Tonnes équivalent pétrole).

Le potentiel récupérable est de 3,7 Millions de TEP. Le taux de récupération actuel est de l'ordre de 10%.

b) Potentiel énergétique des déchets urbains et agricoles

5 millions de tonnes de déchets urbains et agricoles ne sont pas recyclés. Ce potentiel représente un gisement de l'ordre de 1,33 millions de Tep/an

Objectifs du programme algérien des Energies Renouvelables

22 GW à l'horizon 2030

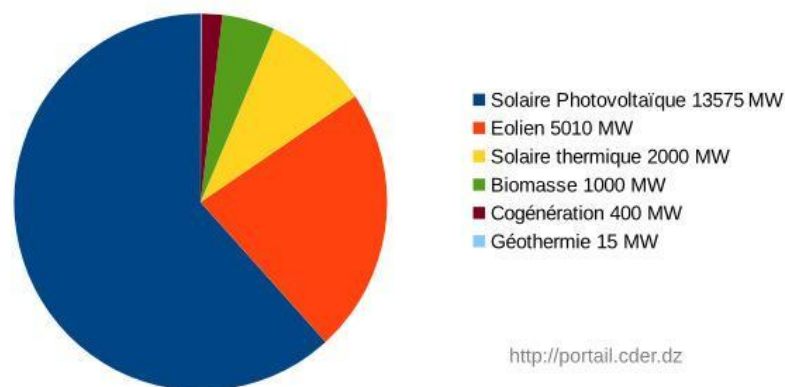


Fig.5.5. Programme national algérien sur l'efficacité énergétique et ENR

Questions d'application

- Quel est le rôle du digesteur ?
- Peut-on produire de l'électricité à partir de la biomasse ? si oui, comment ?
- A partir de quelle matière peut-on obtenir un biocarburant.

Chapitre 6: La géothermie

La géothermie désigne l'étude des phénomènes thermiques de la terre et la technologie qui vise à les exploiter. En d'autres termes, l'énergie géothermique est la chaleur emmagasinée dans le sous-sol terrestre.

Histoire : les bains thermaux sont très appréciés depuis plus de 4000 ans !

À Pompéi (en Italie), il est encore possible de visiter les bains romains vieux de 2000 ans. Un système de tuyauterie complexe permettait d'avoir des bassins de différentes températures. Malheureusement, en l'an 79, l'éruption volcanique du Vésuve, a entièrement englouti la ville de lave.

On distingue trois types de géothermie : ils ont en commun l'objectif de prélever la chaleur contenue dans le sol, issue de la pression, et, dans certains cas, du magma.

1- la géothermie peu profonde (moins de 1 500 m) à basse température ;

2- la géothermie profonde à haute température (plus de $150\text{ }^{\circ}\text{C}^{\frac{1}{2}}$), avec plusieurs procédés développés depuis les années 1970 :

- géothermie des roches chaudes sèches (*Hot Dry Rock*), basée sur la fracturation et la création d'un échangeur thermique profond.
- géothermie des roches naturellement fracturées (*Hot Fractured Rock* (HFR))
- géothermie stimulée EGS (*Enhanced Geothermal System*), imaginée aux États-Unis en 1970 et mise en œuvre à Soultz-sous-Forêts en France dans le cadre d'un projet-pilote européen et franco-allemand.

3- la géothermie très profonde à très haute température.

6.1. Types de géothermie

La répartition précédente donne lieu à une autre répartition selon la profondeur et la température souhaitée :

- a. La géothermie de surface** capte la chaleur souterraine peu profonde. Il suffit de creuser jusqu'à 80 mètres, la température $< 30^{\circ}\text{C}$.
- b. La géothermie moyenne** exploite la chaleur de gisements d'eau qui se trouvent à des centaines de mètres de profondeur, parfois jusqu'à 2000 mètres. L'eau souterraine peut atteindre les 50°C .
- c. La géothermie profonde** utilise l'eau chaude présente à une grande profondeur.

Cette eau peut remonter naturellement à la surface (sources thermales), elle peut être utilisée aussi pour le chauffage ou l'électricité. La température est de 150 à 250°C. Il faut creuser sur plusieurs kilomètres de profondeur.

d. Le magma : est une forme de roche liquide qui se trouve au cœur de la Terre. Il est extrêmement chaud et chauffe tout le globe terrestre. Plus on creuse profondément, plus la température augmente. Parfois, le magma sort de la Terre, sous d'interruptions volcaniques

On peut aussi constater la chaleur du magma avec les eaux thermales et les geysers. L'eau sort de la roche naturellement brûlante et de vapeur, chauffée par le magma comme c'est le cas des geysers (source d'eau chaude qui jaillit par intermittence en projetant à haute température et à haute pression de l'eau et de la vapeur).

6.2. Principe

La chaleur de la croûte terrestre est due à deux paramètres, le premier superficiel et plus ou moins faible lié au rayonnement solaire et l'autre plus en profondeur lié au magma.

Cette source d'énergie est considérée comme inépuisable et renouvelable, car elle dépend : pour la géothermie profonde, des sources de chaleur internes de la terre, dont la durée de vie est de plusieurs milliards d'années ; pour la géothermie de surface, des apports solaires qui est en général diffuse, avec un flux moyen de $(0,1 \text{ W/m}^2)$ et un niveau de température faible.

La puissance économiquement et techniquement exploitable est faible. Elle est plus concentrée à proximité des failles tectoniques ex: des formations volcaniques ou des formations géologiques favorables. C'est pourquoi il existe plusieurs types d'utilisation de la géothermie suivant ses caractéristiques locales:

la géothermie de surface à basse température: 5-10 °C,

la géothermie profonde 50-95 °C, jusqu'à 2 000 m de profondeur,

la géothermie très profonde à haute et très haute température, jusqu'à 10.000 m

la géothermie volcanique de type geyser.

6.3. La géothermie utilisée pour le chauffage et l'électricité

On transforme l'énergie géothermique avec de l'eau : soit on utilise de l'eau froide que l'on chauffe en l'envoyant sous terre, soit on récupère l'eau naturellement chaude dans le sous-sol qu'on remonte à la surface pour l'utiliser dans le chauffage.

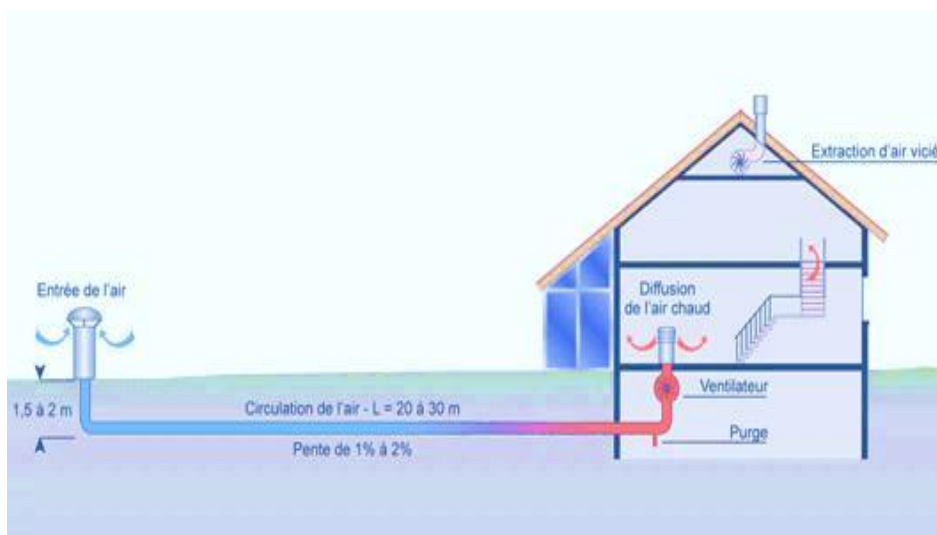
Si l'eau est bouillante(vapeur) , elle permet de produire de l'électricité.

En creusant, il faut préserver les nappes phréatiques qui servent de réserves en eau potable et éviter tout risque de provoquer des déséquilibres dans les couches terrestres.

6.4. Installations géothermiques

6.4.1. Puits canadiens (puits climatiques)

Pour préchauffer (enhiver) ou rafraichir (en été) une maison individuelle, en pratique, le tube est enterré au moins à 1,5 mètre de profondeur :le tube est à l'abri du gel. La variation de température journalière est déphasée par rapport à celle de la surface. La température varie avec les saisons : plus fraîche que la température



ambiante en été et plus élevée en hiver d'où l'intérêt de ce puits.

Fig.6.1. Puits climatique (canadien)

6.4.2. Les pompes à chaleur

Pour chauffer les bâtiments et habitations collectives, on utilise la géothermie à basse température (températures d'exploitation entre 10 et 30 °C). Les puits installés dans ce cas peuvent atteindre jusqu'à 400 mètres de profondeur. La chaleur stockée par le terrain provient essentiellement de l'énergie solaire ou du ruissellement d'eau de pluie mais très peu des profondeurs de la croûte terrestre. Ce système est géo-solaire.

Une sonde verticale en forme de U envoie un liquide sous terre. Ce liquide est ensuite pompé pour être remonté. Sa température est alors de 12 à 15°C. Cette chaleur va être valorisée par une pompe à chaleur pour l'élever sa température.

6.5. Chauffage basse température

Le chauffage sous la forme de réseau nécessite une source chaude (nappe aquifère : roches poreuses et fissurées stockant de l'eau) à une température d'au moins 60°C et un puits en profondeur.

A ces profondeurs, l'eau est souvent salée et/ou chargée en sulfures donc très corrosive. Le forage d'un puits secondaire pour la réinjection de l'eau est alors nécessaire. Mais il faut l'implanter à environ 1 500 ou 2 000 m plus loin du puits de production pour le recyclage de l'eau : doublet géothermique.

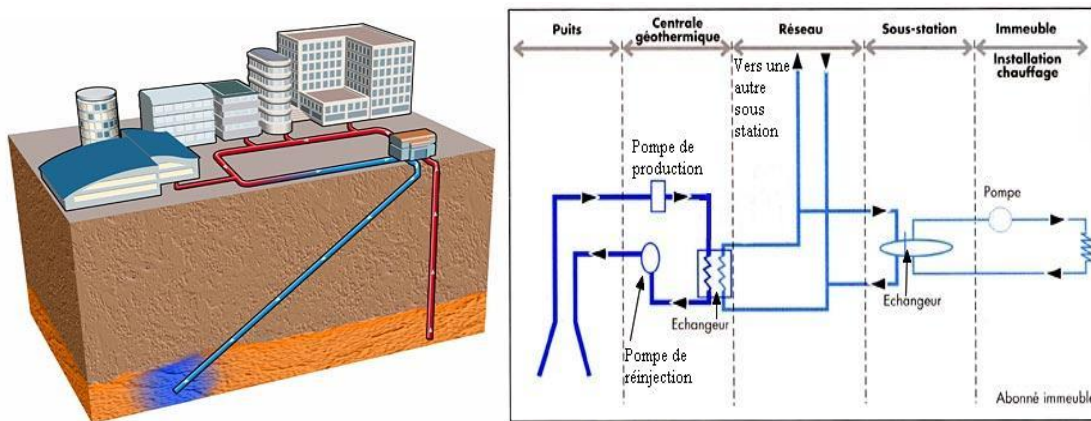


Fig.6.2. Géothermie basse température

6.6. La géothermie moyenne température

L'objectif est la production d'électricité. Un échange thermique est réalisé entre un fluide principal, à une température comprise entre 100°C et 180°C, et un fluide secondaire plus volatile (alcane, HCFC...), Ce dernier entraîne alors une turbine qui entraîne un générateur d'électricité.

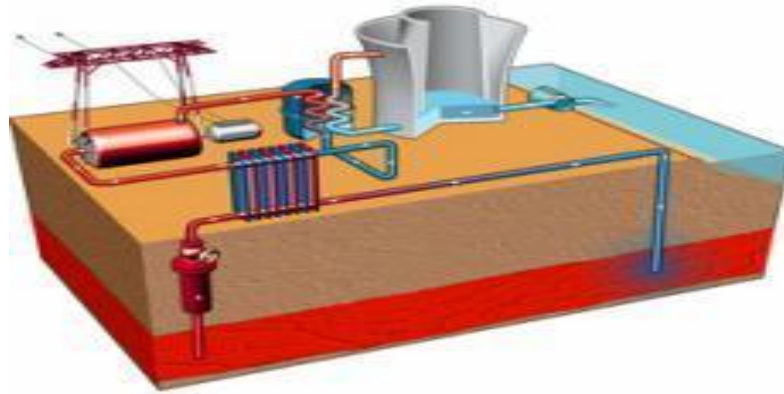


Fig.6.3. Géothermie moyenne température

6.7.La géothermie haute température

Elle utilise des eaux et des vapeurs à plus de 180 °C, qui entraînent des turbines pour la production d'électricité. Cette eau souterraine peut sous forme de vapeur faire tourner des turbines générant de l'électricité : on parle de géothermie haute énergie.

Ce principe a été utilisé, dès 1913, dans la toute première centrale électrique géothermique de l'histoire, à Larderello (Italie).

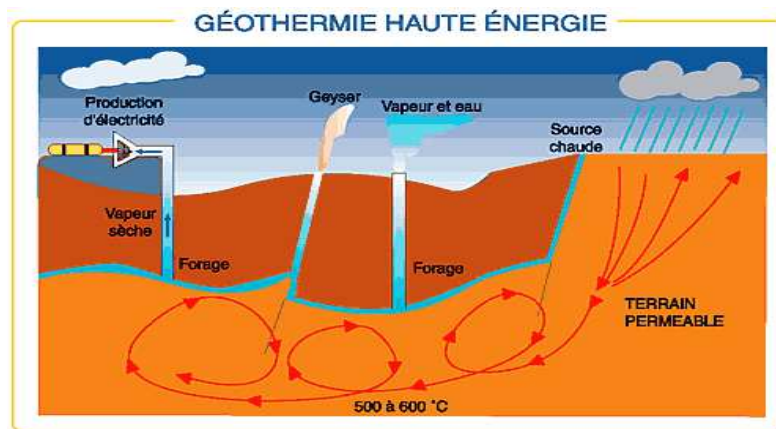


Fig.6.4. Géothermie haute température

Une autre forme de géothermie haute température est obtenue des roches fracturées. Le principe repose sur l'injection d'eau sous pression dans la roche entre 3 à 5 km de profondeur. L'eau se réchauffe en circulant dans les failles et la vapeur qui s'en dégage est pompée jusqu'à un échangeur de chaleur permettant la production d'électricité. Plusieurs expérimentations de cette technique sont en cours, le site de Soultz(France).

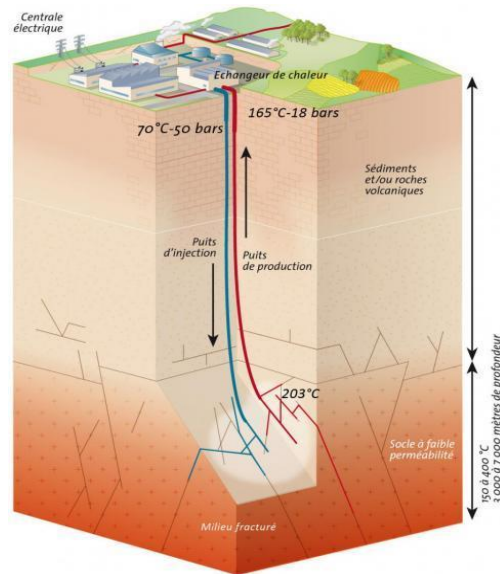


Fig.6.5. géothermie très haute température

6.8. Avantages et inconvénients de la géothermie

6.8.1. Avantages

La géothermie est une énergie renouvelable, car la chaleur est contenue dans le globe terrestre. Mais il faut toujours veiller à une gestion raisonnée de l'exploitation d'une ressource pour maintenir localement le potentiel.

Par rapport à d'autres, la géothermie de profondeur (haute et basse énergie) a l'avantage de ne pas dépendre des conditions atmosphériques (soleil, pluie, vent).

C'est une source d'énergie quasi-continue car elle est interrompue uniquement par des opérations de maintenance des installations.

Les gisements géothermiques ont une durée de vie de 30 à 80 ans en moyenne.

L'exploitation d'une ressource géothermique ne génère que très peu de gaz à effet de serre.

6.8.2. Inconvénients

L'EGS (*Enhanced Geothermal System*), testé et exploité en Europe présente trois problèmes principaux :

- Après forage, afin d'augmenter ou d'entretenir les performances hydrauliques des puits (perméabilité), des injections forcées d'eau ou stimulations hydrauliques étaient autrefois faites uniquement par fracturation hydraulique. Ces stimulations physiques induisent toujours une activité micro-sismique, (Exemple : à Soultz, le plus fort séisme induit en juin 2003 avec une magnitude de 2,9 sur l'échelle de Richter).

- Pour minimiser l'activité micro-sismique induite, la technique de la stimulation chimique (utilisée dans l'industrie pétrolière et gazière) a été testée. Des acides et produits chimiques dissolvent certains minéraux (ex : calcite), ce qui accroît la performance hydraulique des puits. Cette stimulation hydrochimique a réduit l'activité micro-sismique (faible à très modérée), mais a produit une eau plus chargée en composés indésirables (métaux, radionucléides, sels minéraux). La précipitation est limitée en surface par le maintien d'une forte pression dans les tuyauteries (20 bars), qui rend l'installation plus dangereuse en cas de fuite ;
- La chaleur est source de dilatation ou en cas de problèmes de chocs thermiques, qui peuvent endommager certaines parties vulnérables des installations.

Géothermie - Applications industrielles

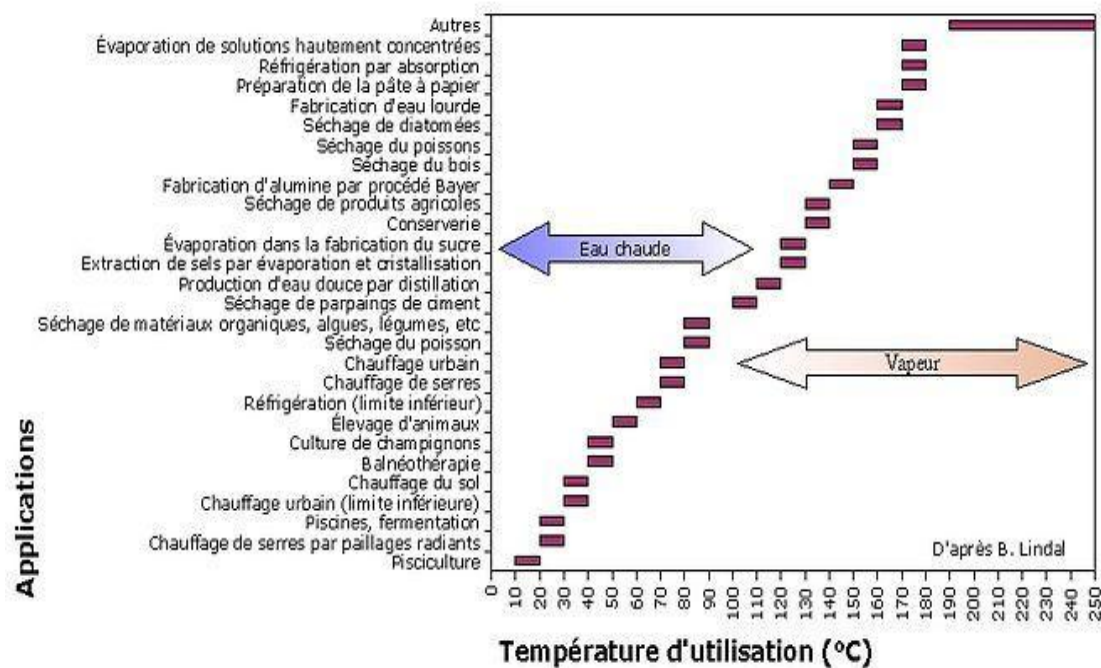


Fig 6.6. Applications selon la température

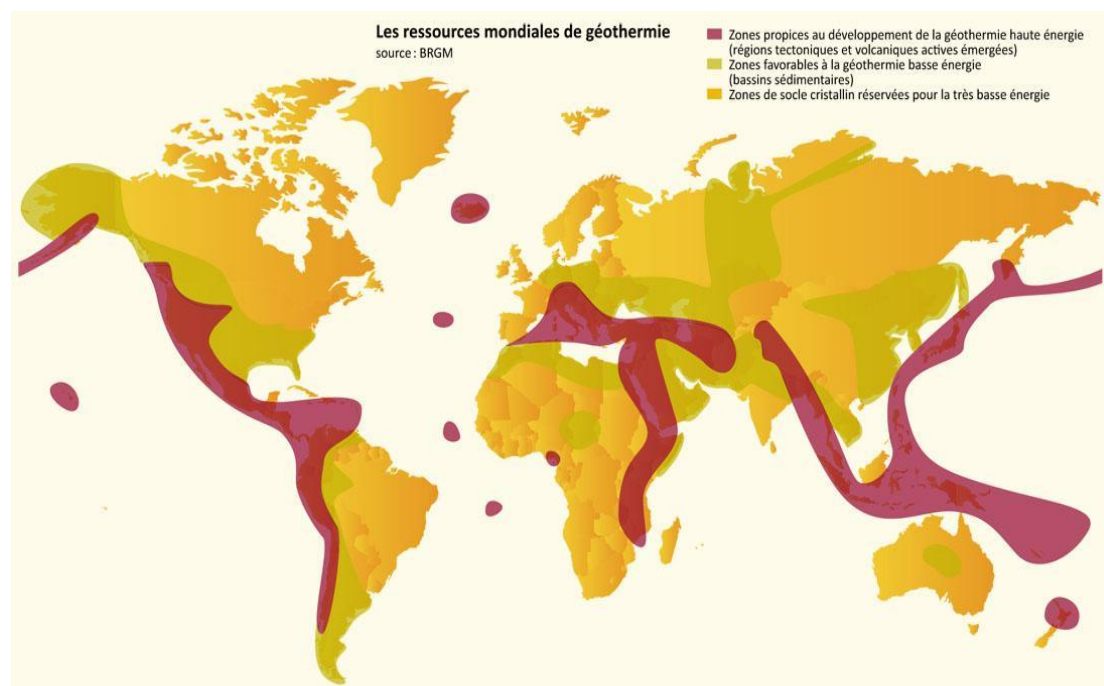


Fig.6.7. Potentiel géothermique dans le monde

6.9.La géothermie dans le monde

Il existe aujourd'hui plus de 350 installations géothermiques haute et moyenne énergie dans le monde. La puissance totale est de presque 10 000 MW en 2007, soit 0,3 % de la puissance mondiale électrique installée sur la planète. En nombre de MWh produits, la géothermie constitue, avec la biomasse et l'éolien, l'une des quatre principales sources d'électricité renouvelable dans le monde après l'hydroélectricité. Les principaux pays producteurs se situent sur la périphérie du Pacifique : six sur le continent américain pour 4 000 MW, cinq en Asie pour 3 300 MW, deux en Océanie pour 450 MW.

L'Europe compte six pays producteurs (Allemagne, Danemark, France, Islande, Italie, Suède) pour une puissance de 1 123 MW, et deux seulement en Afrique pour 134 MW. La géothermie couvre 0,4 % des besoins mondiaux en électricité.

Principaux pays producteurs d'électricité géothermique (2012)		
Pays	Production (TWh)	Part de la prod.mondiale
États-Unis	19,6	27,9 %
Philippines	10,2	14,6 %
Indonésie	7,9	11,2 %
Nouvelle-Zélande	6,2	8,8 %

Mexique	5,8	8,3 %
Italie	5,6	7,9 %
Islande	5,2	7,4 %
Japon	2,5	3,6 %
Salvador	1,5	2,2 %
Kenya	1,5	2,1 %
reste du monde	4,2	6,0 %
Total mondial	70,4	100 %

Source : [EurObserv'ER](#), 2013

6.10. Géothermie en Algérie

En Algérie, la balnéothérapie est la seule utilisation de cette énergie. Pourtant notre pays dispose de plus de deux cent sources chaudes réparties sur la partie nord du pays (carte précédente du monde) , un tiers (33%) a des températures supérieures à 45°C.

Il existe aussi des sources à hautes températures pouvant atteindre 118°C à Biskra. Des études sur le gradient thermique national ont permis d'identifier trois zones dont le gradient dépasse les 5°C/100m. Il s'agit des zones de Relizane et Mascara, Aïn Boucif et Sidi Aïssa et la zone de Guelma et Djebel El Onk.

Par filière technologique, le programme national fait ressortir que sur les 4 500 MW à réaliser, seulement 15 MW seront produits à partir de l'énergie géothermique (0,33%) de la capacité globale à produire d'ici 2030.

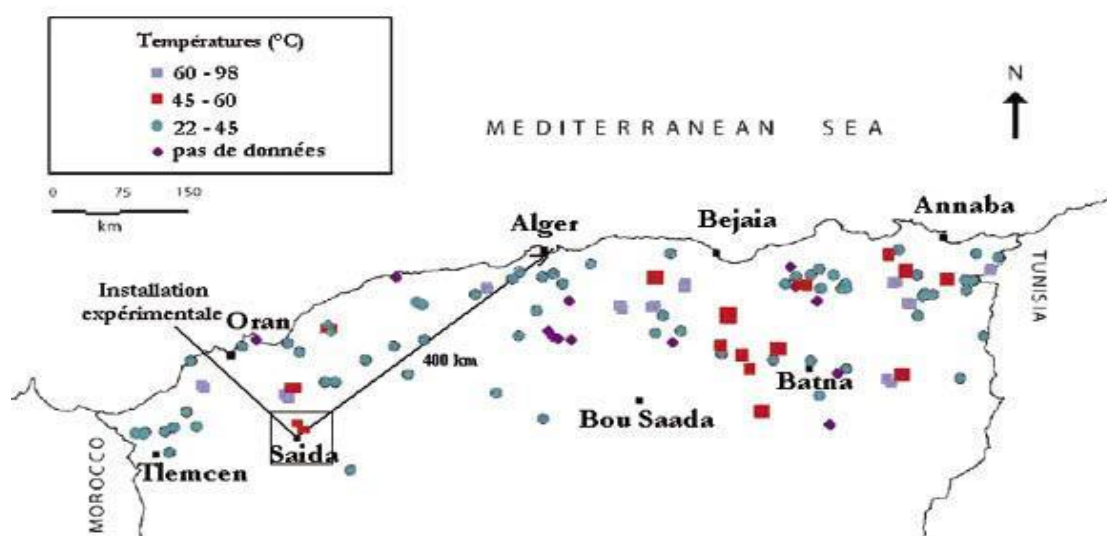


Fig.6.8. Localisation des sources géothermales du nord de l'Algérie

PROJET PILOTE

Il est prévu la réalisation d'un complexe-pilote utilisant la Géothermie dans la production agricole, dans la wilaya d'Ouargla, d'un montant de 1261 041057,72 dinars, dont 2 042 799 euros, le projet sera réalisé par l'Office national de l'irrigation et du drainage (ONID) en partenariat avec deux sociétés espagnoles: «la Empresa de TransformacionAgraria S. A. (Groupe Tragsa) et la société Alcantara Systems, S. L.».

Questions de compréhension

- Comment fonctionne un puits canadien en hiver et en été ?
- Quel est le rôle d'une pompe à chaleur géothermique ?

Quiz

1- **le réchauffement de la planète par les gaz à effet de serre provoque :**

- A- la migration incontrôlée des populations,
- B- la bonne qualité de vie,
- C- la disparition des maladies et réduction du taux de mortalité

2- **Un capteur solaire thermique est composé (dans l'ordre face au soleil) de :**

- A- un métal transparent, une lame d'air, un isolant
- B- un vitrage, une lame d'air, un serpentin en acier inoxydable, un isolant
- C- un isolant, une plaque de vitrage, une plaque en cuivre, du bois.

3- **La puissance solaire absorbée par le capteur dépend de :**

- A- rayonnement solaire global, du coefficient de transmission du vitrage et du coefficient d'absorption de l'absorbeur
- B- rayonnement solaire global, de la température de l'absorbeur, de la conductance thermique du capteur
- C- rayonnement solaire global.

4- **Le rendement d'un PV :**

- A- augmente avec l'augmentation de la température
- B- diminue avec l'augmentation de l'éclairement solaire
- C- augmente avec la diminution de la température

5- **Quelle est la bonne réponse pour l'hydroélectricité :**

- A- aucune pollution pendant la production mais avec modification du débit et du niveau d'eau.
- B- protection de la faune et de la flore
- C- impossibilité de stockage de l'énergie électrique

6- **Le compost est :**

- A- un biocarburant naturel de 1^{ère} génération.
- B- du bois broyé et humidifié
- C- un engrais naturel

7- **Le doublet géothermique :**

- A- un système à cogénération : production de chauffage et d'électricité en même temps.
- B- un chauffage en réseau utilisant une nappe aquifère
- C- un système fonctionnant avec une pompe à chaleur