

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

BADJI MOKHTAR ANNABA-UNIVERSITY
UNIVERSITE BADJI MOKHTAR ANNABA



FACULTE DES SCIENCES DE L'INGENIEUR
DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE

MEMOIRE

PRESENTE EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME DE MASTER

INTITULE

Etude d'une centrale solaire thermique

DOMAINE : SCIENCES ET TECHNIQUES

FILIERE : MASTER GENIE MECANIQUE

SPECIALITE : ENERGETIQUE & ENVIRONNEMENT

PRESENTE PAR : KHADRAOUI ZAKARIA

DIRECTEUR DU MEMOIRE : MERZOUG BACHIR

DEVANT LE JURY

PRÉSIDENT : MR. MERZOUG BACHIR

EXAMINATEURS : Pr. SARI M/RAFIK
Dr. MECHIGHEL FARID
MR. KADRI SALIM

Année : 2017

Remerciement

Je remercie tout d'abord Dieu le tout puissant qui nous éclaire le bon chemin. je souhait remercier également Monsieur MERZOUG BACHIR pour son encadrement efficace ses conseils précieux et sa patience Je remercie toute personne m'ayant aidé de près ou de loin à l'aboutissement de ce travail.

Résumé :

La plus grande ressource d'énergie techniquement accessible sur la planète est disponible dans les régions désertiques. Nous allons étudier plus particulièrement l'énergie solaire qui permet de récupérer la chaleur du rayonnement solaire au sein d'un fluide, cela par la conversion de l'énergie noble (énergie solaire) en énergie thermique par la mise en œuvre des capteurs solaires thermiques. Les centrales thermiques solaires sont idéales pour produire de l'électricité de manière sûre. Une importance particulière est en train d'être accordée à la recherche dans le domaine des énergies renouvelables, ceci pour plusieurs causes qui peuvent être principalement résumées, d'une part, en la croissance accrue de la demande mondiale en énergie conventionnelle et ses problèmes d'approvisionnement, et d'autre part, en l'élévation de son coût et la pollution qu'elle provoque. L'eau, le soleil, le vent, les végétaux, les marées, la chaleur de la terre peuvent fournir de l'énergie propre qui favorise un développement durable.

Abstract:

The largest resource of technically accessible energy on the planet is available in the desert regions. We will study more particularly the solar energy which makes it possible to recover the heat of the solar radiation within a fluid, this by the conversion of the noble energy (solar energy) into thermal energy by the use of the solar thermal collectors. Solar thermal power plants are ideal for generating electricity safely. Particular importance is being given to research in the field of renewable energies for several reasons which can be mainly summarized, on the one hand, in the increase in global demand for conventional energy and its problems And on the other hand, by raising its cost and the pollution it causes. Water, sun, wind, plants, tides, the heat of the earth can provide clean energy that promotes sustainable development

Nomenclature

Symbole	Désignation	Unité
I₀	Constante solaire	W/m ²
M_f	Débit massique	Kg/s
C	Concentration	-
F	Distance focale	m
I	Inclinaison	(°) degré
W₁	Angle horaire du lever	En heure
I	Rayonnement direct sur plan horizontal	W/m ²
D₀	Rayonnement diffus sur plan horizontal	W/m ²
G₀	Rayonnement global sur plan horizontal	W/m ²
D_i	Rayonnement diffus sur plan incliné	W/m ²
S	Rayonnement direct sur plan incliné	W/m ²
G	Rayonnement global sur plan incliné	W/m ²
H	Hauteur du soleil	(°) degré
A	Azimut	(°) degré
T₁	Coefficient de trouble atmosphérique	-
B_A	Coefficient d'angström	m
N	Nombre de miroir	-
(S_i, i)	L'éclairement direct sur un plan incliné	W/m ²
(G_i, i)	L'éclairement global sur un plan incliné	W/m ²
Z	Altitude	m
Δ	Déclinaison	(°) degré
Θ	Angle d' incidence	(°) degré
γ₁	Orientation	(°) degré

Liste des figures :

Figure 1 : le noyau du soleil	22
Figure 2 : collecteurs paraboliques	33
Figure 3 : La centrale à tour Thémis (France).....	34
Figure 4 : La centrale SEGS (Californie).....	35
Figure 5 : Image de synthèse de la future tour Buronga.....	36
Figure 6 : satellite solaire.....	37
Figure 7 : Deux prototypes de voitures solaires mis au point par des universités américaines.....	38
Figure 8 : bateau solaire.....	39
Figure 9 : avion solaire.....	39
Figure 10 : irradiation solaire moyenne.....	43
Figure 11 : Coordonnées géographiques.....	44
Figure 12 : Coordonnées horizontales.....	45
Figure 13 : irradiation globale, diffuse, directe normale et globale inclinée collecté par la station radiométrique à Ghardaïa en 2004	49

Liste des tableaux

Tableau 1: carte d'identité du soleil	21
Tableau 2: puissance pv installée au 31/12 MWc dans 15 pays les plus équipés en PV	28
Tableau 3: Estimation du numéro du jour de l'année.....	48
Tableau 4 : Caractéristiques miroir solaire migo.....	51

Sommaire

Introduction générale09

Chapitre01

Les Energies renouvelables

Introduction.....10

Historique.....10

Définition des énergies renouvelables.....11

Les différents types d'énergies renouvelables.....12

Les avantages d'énergies renouvelables.....14

Les inconvénients d'énergies renouvelables.....15

Nuisances et pollutions.....16

Impact sur le réchauffement climatique.....16

Le Coût

Situation actuelle (ensemble des énergies renouvelables)

. Dans le Monde.....17

. En l'Algérie19

Conclusion19

Un œil sur l'avenir.....20

Chapitre02 :

Energie solaire

Introduction	21
Le soleil	21
Historique	22
Définition de l'énergie solaire	24
Les différents types d'utilisation de l'énergie solaire.....	24
Les avantages et les inconvénients de l'énergie solaire	26
Aspect économique.....	26
Energie solaire dans le monde.....	27
Energie solaire en l'Algérie.....	29
L'effet sur l'environnement.....	30
La recherche	31
Conclusion.....	31

Chapitre 03

Les centrales solaires thermiques

Introduction.....	32
Définition d'une centrale solaire	32
Les différentes centrales solaires.....	33
Les projets d'exploitation de l'énergie solaire	35
L'énergie solaire dans le transport	37
Le stockage de l'énergie	39
Aspects économiques.....	40
Coûts de production	40
Installations réalisées et projets.....	41
Conclusion.....	42

Les différents calculs dans une centrale solaire thermique

Introduction43
But de travail43
Le rayonnement solaire44

I. Paramètre de position44
a. Les coordonnées géographiques44
b. Les coordonnées horaires.....44
c. Les coordonnées solaires locales.....45

II. Calcul des irradiations solaires directe, diffuse et globale46
a. La déclinaison (δ).....46
b. La hauteur (h).....46
c. L'azimut (a).....46
d. La durée du jour (DDJ).....46
e. La distance optique (mh).....46
f. Facteur de trouble de linke(Tl).....47
g. L'éclairement diffus (Do) sur un plan horizontal.....47
h. L'éclairement global (Go) sur un plan horizontal.....47
i. L'éclairement diffus (Di) sur un plan d'inclinaison (i).....47
j. L'éclairement direct (I) sur un plan horizontal.....48
k. L'éclairement direct (S) sur un plan incliné.....48
l. L'éclairement global (G) sur un plan incliné.....48

III. Estimation du numéro du jour de l'année.....48

Caractéristique miroir solaire migo.....51

Détermination du nombre des miroirs.....52

Conclusion.....52

Conclusion générale54

Références55

Introduction générale

La production d'énergie est un défi de grande importance pour les années à venir. En effet, les besoins énergétiques des sociétés industrialisées ne cessent d'augmenter. Par ailleurs, les pays en voie de développement auront besoin de plus en plus d'énergie pour mener à bien leur développement. De nos jours, une grande partie de la production mondiale d'énergie est assurée à partir de sources fossiles. La consommation de ces sources donne lieu à des émissions de gaz à effet de serre et donc une augmentation de la pollution. Le danger supplémentaire est qu'une consommation excessive du stock de ressources naturelles réduit les réserves de ce type d'énergie de façon dangereuse pour les générations futures.

Poussée par un contexte favorable (volonté politique, intérêt économique...), la production décentralisée se développe dans de nombreux pays. L'observation des programmes de recherche et du développement, des opérations de démonstration actuellement en cours mettent en évidence un développement commercial dans les prochaines années de petits moyens de production inférieurs à 100 kW comme les systèmes photovoltaïques, les micro turbines à gaz associées à différents systèmes de stockage tels que les batteries d'accumulateurs, les super condensateurs ou le stockage inertiel. Un développement significatif de ce type de production entraînerait un foisonnement important du point d'injection de puissance sur les réseaux basse tension de nature à y générer des difficultés d'exploitation.

Le soleil fournit une énergie lumineuse grandiose à la Terre. Mais le problème réside dans le fait que la forme sous laquelle nous recevons l'énergie n'est pas nécessairement celle sous laquelle cette énergie est utilisable. C'est pourquoi, nous devons utiliser des processus de conversion de l'énergie. Par exemple, les cellules solaires photovoltaïques permettent de convertir l'énergie lumineuse du soleil en énergie électrique.

La diminution des sources énergétiques traditionnelles telle que (pétrole, gaz..) due à une utilisation croissante, entraîne que l'étude des énergies renouvelables met une importance cruciale pour les années à venir. Les énergies renouvelables d'actualité sont de plusieurs types tels que : Hydraulique, chauffage solaire actif, éolienne, géothermique, photovoltaïque, biomasse ...etc.

Dans ce contexte général, notre étude s'intéresse à la filière de l'énergie solaire dans le but de concevoir une centrale thermique pour une ville de notre pays de 100000 habitants au sud.

Chapitre 01 : les énergies renouvelables

Introduction :

Les énergies renouvelables sont des sources d'énergies dont le renouvellement naturel est assez rapide pour qu'elles puissent être considérées comme inépuisables à l'échelle du temps humain. L'expression énergie renouvelable est la forme courte et usuelle des expressions « sources d'énergie renouvelables » ou « énergies d'origine renouvelable » qui sont plus correctes d'un point de vue physique.

Historique :

Pendant la plus grande partie de son histoire, l'humanité n'a disposé que d'énergies renouvelables pour couvrir ses besoins énergétiques. Au Paléolithique, les seules énergies disponibles étaient la force musculaire humaine et l'énergie de la biomasse utilisable grâce au feu ; mais de nombreux progrès ont permis d'utiliser ces énergies avec une efficacité grandissante (inventions d'outils de plus en plus performants).

Le progrès le plus significatif a été l'invention de la traction animale, qui est survenue plus tard que la domestication des animaux. On estime que l'homme a commencé à atteler des bovins à des araires ou des véhicules à roues durant l'IV^e millénaire av. J.-C. Ces techniques inventées dans l'ancien croissant fertile ou en Ukraine, ont par la suite connu un développement mondial [1].

L'invention de la marine à voile a été un progrès très important.

Celle des moulins à eau et moulins à vent a également apporté une énergie supplémentaire considérable. Braudel qualifie de « première révolution mécanique » l'introduction progressive, du XI^e siècle au XIII^e siècle, des moulins à eau et à vent : « ces « moteurs primaires » sont sans doute de modique puissance, de 2 à 5 HPⁿ 1 pour une roue à eau, parfois 5, au plus 10 pour les ailes d'un moulin à vent. Mais, dans une économie mal fournie en énergie, ils représentent un surcroît de puissance considérable. Plus ancien, le moulin à eau a une importance bien supérieure à celle de l'éolienne. Il ne dépend pas des irrégularités du vent, mais de l'eau, en gros moins capricieuse. Il est plus largement diffusé, en raison de son ancienneté, de la multiplicité des fleuves et rivières, ... » [2]

À la fin du XVIII^e siècle, à la veille de la révolution industrielle, la quasi-totalité des besoins d'énergie de l'humanité était encore assurée par des énergies renouvelables. Dans un essai d'évaluation de la répartition des consommations par source d'énergie, Fernand Braudel estime à plus de 50 % la part de la traction animale, environ 25 % celle du bois, 10 à 15 % celle des moulins à eau, 5 % celle de la force humaine et un peu plus de 1 % celle du vent pour la marine marchande ; il renonce à chiffrer la part des moulins à vent, faute de données, tout en précisant : « les éoliennes, moins nombreuses que les roues hydrauliques, ne peuvent représenter que le quart ou le tiers de la puissance des eaux disciplinées » [2]. On peut donc, évaluer la part totale de l'énergie éolienne (voile + moulins à vent) entre 3 et 5 %. Il

mentionne pour mémoire la batellerie fluviale, la marine de guerre, le charbon de bois et le charbon de terre.

L'apparition de la machine à vapeur, puis du moteur Diesel, ont entraîné le déclin des moulins à eau et de l'énergie éolienne au XIX^e siècle ; les moulins à eau et à vent ont disparu, remplacés par les minoteries industrielles. Au milieu du XX^e siècle, l'énergie éolienne n'était plus utilisée que pour la navigation de plaisance et pour le pompage (agriculture, polders). Par contre, l'énergie hydraulique a connu un nouvel âge d'or avec l'hydroélectricité, apparue en Suisse, Italie, France et États-Unis à la fin du XIX^e siècle.

Au XIX^e siècle également, François de Larderel met au point en Italie les techniques d'utilisation de la géothermie ; en 1911, la première centrale géothermique était construite à Larderello.

Dans les années 1910, les premiers chauffe-eau solaires individuels apparaissent en Californie.

Puis, les éoliennes sont réapparues, bénéficiant de techniques plus performantes issues de l'aviation ; leur développement a pris de l'ampleur à partir des années 1990. Le solaire thermique et le solaire photovoltaïque décollent au début des années 2000.

Définition :

Les énergies renouvelables sont des énergies qui peuvent être renouvelées ou régénérées naturellement. Elles peuvent donc être utilisées sans limite dans le temps tandis que les énergies fossiles proviennent de réserves qui s'épuisent.

Il y a cinq familles principales d'énergies renouvelables. Dans l'ordre d'importance de leur exploitation actuelle, ce sont :

- l'énergie solaire
- l'énergie éolienne
- l'énergie hydraulique (hydroélectricité)
- la biomasse (avec le bois de chauffage, ainsi que biogaz...)
- la géothermie

Si on compte toute l'utilisation du bois pour le chauffage et la cuisson, c'est celui-ci, et donc la biomasse, qui est l'énergie renouvelable la plus importante, tandis que pour la production d'électricité, c'est l'énergie hydraulique qui est de loin l'énergie renouvelable la plus utilisée.

Les systèmes d'utilisation d'énergie renouvelable sont très variés, certains sont mis en œuvre par des particuliers et d'autres ne sont possibles ou rentables que dans de grandes installations.

La quantité d'énergie produite par l'ensemble des énergies renouvelables est assez grande, mais par rapport au total de l'énergie consommée (encore beaucoup plus grand), cela reste une part assez faible. Pour que cette part augmente sérieusement, il faudrait non seulement une

augmentation de la production d'énergies renouvelables mais il serait nécessaire que l'énergie consommée au total diminue beaucoup [1].

Les différents types d'énergies renouvelables :

1 .L'énergie solaire :

Le soleil est la première et la principale source d'énergie renouvelable. Ces rayons sont retenus par des capteurs thermiques vitrés et sont transformés pour produire de l'énergie électrique ou pour réchauffer de l'eau destinée à un usage sanitaire. Pour pouvoir exploiter l'énergie solaire, on peut se servir soit de **panneaux solaires photovoltaïques**, soit de **panneaux solaires thermiques**.

Les **panneaux solaires photovoltaïques** sont placés sur les toits des bâtiments ou à tout autre endroit où ils pourraient être en contact direct avec les rayons solaires. Ils sont composés de capteurs qui retiennent la lumière du soleil grâce au silicium présent dans chacune des cellules des panneaux et qui relâche des électrons pour créer de l'électricité. Celle-ci peut être transformée en courant alternatif à l'aide d'un onduleur et utilisée immédiatement (utilisation individuelle) ou stockée en batteries ou encore injectée dans le réseau.

Les **panneaux solaires thermiques** quant à eux, ne captent pas les rayons du soleil, mais emmagasinent plutôt la chaleur qui en est issue et la transmettent au ballon d'eau chaude pour réchauffer l'eau qui s'y trouve à travers un circuit fermé. Cette eau peut alors être distribuée dans toute la maison. On peut utiliser ce système pour chauffer les locaux, les piscines, sécher les récoltes ou encore faire cuire des aliments (fours thermiques) [3].

2 .L'énergie éolienne :

Auparavant, il était question de moulins à vent avec des pales en forme de voile, qui utilisaient l'énergie mécanique pour actionner des équipements tels que des pompes. Aujourd'hui, on ne parle plus de moulins à vent, mais d'éoliennes. Sous la force du vent, elles produisent des forces mécaniques ou électriques qui sont utilisées pour générer de l'électricité qui va être injectée sur l'installation électrique d'une habitation (consommation directe) ou dans un réseau de distribution (consommation indirecte). Étant donné qu'elles prennent trop d'espace, elles sont le plus souvent placées en mer. Mais pour un usage domestique, il en existe des modèles réduits [3].

3. l'énergie hydraulique :

À l'instar de l'énergie éolienne, les énergies hydrauliques (à l'exception de l'énergie marémotrice) ont leur origine principale dans les phénomènes météorologiques et donc l'énergie solaire. Le soleil provoque l'évaporation de l'eau, principalement dans les océans et en libère une partie sur les continents à des altitudes variables. On parle du cycle de l'eau pour

décrire ces mouvements. L'eau (en fait, la vapeur d'eau) possède, en altitude, une énergie potentielle de pesanteur ; cette énergie peut être captée et transformée dans des barrages hydroélectriques, lors du retour de l'eau vers les océans. Avant l'avènement de l'électricité, les moulins à eau permettaient de capter cette énergie mécanique pour entraîner des machines ou des outils (machines à tisser, moulins à moudre le blé, etc.).

Depuis l'invention de l'électricité cette énergie mécanique est transformée en énergie électrique ; l'hydroélectricité est après la biomasse, la deuxième énergie renouvelable : selon l'Agence internationale de l'énergie, elle fournit 2,4 % de l'énergie primaire produite dans le monde en 2014 (contre 1,8 % en 1973), sur un total de 14,1 % d'énergies renouvelables (12,4 % en 1973) [4].

4. biomasse :

Depuis la nuit des temps, la biomasse solide a toujours été utilisée comme énergie renouvelable. Dans certaines régions du globe, elle est la source d'énergie principale pour cuisiner et se chauffer. Cette biomasse qui comprend tous les produits obtenus à partir de plantes ou de résidus de plantes, secs ou déshydratés comme le bois, la paille, les grignons d'olives, la bagasse de la canne à sucre, est exploitée par combustion ou métabolisation. Mais pour être une réelle énergie renouvelable, les quantités brûlées ne doivent pas excéder les quantités produites. En fonction des besoins, elle permet une production de chaleur ou d'électricité en constance. De ce fait, sa participation à la production d'énergie mondiale est énorme par rapport aux autres énergies [3].

5. L'énergie géothermique :

La géothermie consiste à exploiter la chaleur présente dans le sol et l'utiliser sous forme de chauffage ou la transformer en électricité, à l'aide de pompes et de turbines. Nous avons donc sous nos pieds, une source de chaleur disponible en permanence et qui ne dépend pas des éléments atmosphériques, mais de la radioactivité naturelle des roches du noyau et de la croûte terrestre. Selon la température des différentes couches du sol, on qualifie la géothermie de « haute énergie » (150 °C), « moyenne énergie » (entre 90 et 150 °C), « basse énergie » (entre 30 et 90 °C) et de « très basse énergie » (moins de 30 °C). Ainsi, plus on s'enfonce dans la terre, plus la température y est élevée et on pourra en faire des usages différents [3].

6. L'énergie aérothermique :

Contrairement à la géothermie où la chaleur est puisée dans le sol, l'aérothermie comme son nom l'indique, consiste à puiser la chaleur dans l'air. En effet, les rayons du soleil chauffent continuellement l'air qui se charge de calories. C'est cette chaleur qui sera récupérée par une pompe aérothermique (une espèce de gros ventilateur) qui débouche sur un échange d'air. La pompe puise donc l'air extérieur, qu'elle réchauffe pour diffuser de la chaleur à l'intérieur du bâtiment, à travers un plancher chauffant ou des radiateurs à accumulation douce. On parle

dans ce cas d'un système Air/Air. L'air extérieur peut aussi être récupéré puis transformé en eau chaude grâce à l'installation d'un circuit hydraulique. On parle alors d'un système Air/Eau. L'utilisation de cette énergie permet de réaliser de très grandes économies [3].

7. La récupération d'eau de pluie :

Les études montrent que 38 % de notre consommation en eau est affectée à l'arrosage et au sanitaire et 62 % à des fins domestiques. Récupérer l'eau de pluie va donc permettre de réduire l'exploitation des eaux souterraines en utilisant une ressource naturelle. Le mécanisme est simple : l'eau de pluie est recueillie par les gouttières qui sont reliées à une cuve et un récupérateur d'eau pluviale se charge du filtre pour la débarrasser des déchets comme les insectes, les brindilles et les feuilles qui pourraient s'y trouver. Ce filtre permet également d'éviter l'altération de l'eau ainsi que la formation de vase.

Grâce à une pompe électrique, l'eau est acheminée de la cuve vers la maison où elle pourra être utilisée pour les besoins courants de toute la famille et l'entretien du domicile (cuisine, sanitaires, boisson, arrosage, lave-linge...). Votre portefeuille ne s'en portera que mieux surtout avec la suppression des coûts de pompage, de distribution, de traitement des eaux et la diminution du montant de la facture.

Pour aller plus loin : il existe des infrastructures permettant de faire un geste pour la planète en alliant design et économies d'énergie : la pergola bioclimatique permet en effet de créer une ventilation naturelle et de pallier à l'effet de serre, tout en régulant la température [3].

Les avantages d'énergies renouvelables :

On attribue souvent aux énergies renouvelables des caractéristiques favorables (qu'elles peuvent mériter ou non), telles que :

- la sûreté (faible risque d'accident, faibles conséquences d'un éventuel accident, etc.).
- la propreté (peu, voire pas du tout de déchets, peu dangereux et facile à gérer : recyclables, par exemple)
- la décentralisation (développement local des territoires, réserve d'emplois locaux non délocalisables, etc. ; fin 2012, pour l'UE-27, le marché total des énergies renouvelables représentait près de 1,2 million d'emplois (dans le photovoltaïque, la biomasse solide et l'éolien surtout, pour un chiffre d'affaires cumulé (toutes EnR confondues) évalué à plus de 137 milliards d'euros [5].) ;
- le respect de l'environnement, lors de la fabrication, pendant le fonctionnement, et en fin de vie (démantèlement).

Pour ces caractéristiques, c'est chaque filière, voire chaque cas séparément, qu'il convient d'examiner pour vérifier si on peut ou non lui attribuer le bienfait supposé, et si oui, dans quelle mesure. Par exemple :

- l'énergie éolienne peut certainement être considérée comme une production locale au Danemark (bien qu'elle soit très dépendante des échanges d'électricité avec la Norvège et la Suède pour compenser son irrégularité par le recours aux barrages hydroélectriques de ces deux pays), mais pas dans un pays qui importe la technique, les capitaux, et les hommes pour faire fonctionner les machines ;
- de même, l'énergie solaire perd ses atouts en termes de décentralisation, d'emploi et d'indépendance énergétique depuis la vague de faillites parmi les producteurs européens causée par l'arrivée massive des concurrents chinois à très bas coûts ;
- les biocarburants ont un impact environnemental et social contesté (concurrence avec la production alimentaire, dépenses énergétiques très importantes pour le transport et la transformation des matières premières) ;
- les installations hydroélectriques, outre les destructions provoquées par l'engloutissement d'une vallée, peuvent se rompre (entre 1959 et 1987, trente accidents ont fait 18 000 victimes dans le monde, dont plus de 2 000 morts en Europe [6])
- les terres rares utilisées pour la fabrication des éoliennes (néodyme et dysprosium pour les alternateurs) et des cellules photovoltaïques (gallium, indium, etc) sont sources de pollutions très importantes au niveau de leur extraction ; de plus, leurs réserves limitées laissent prévoir des conflits pour l'accès aux ressources.

Par ailleurs, dans tous les cas, les énergies renouvelables réduisent la production de CO₂ à hauteur de l'énergie non renouvelable qu'elles remplacent. Cependant, elles peuvent rester responsables d'autres émissions de gaz à effet de serre pour leur mise en place (fabrication et installation des équipements) ou dans le cadre de leur fonctionnement, chaque technique devant être là encore examinée séparément.

Inconvénients des sources d'énergies renouvelables :

Comme pour chaque chose, les EnR ont également leurs petits défauts. On notera en priorité un coût relativement important à l'achat des installations dont la rentabilité peut se faire attendre des années. De plus, la plupart de ces énergies vertes sont sujettes aux caprices de Dame nature. En effet, des journées sans vent ou sans grande luminosité peuvent contrarier fortement la production de l'éolien et du solaire. Reprenons en détails les trois sources précédemment citées :

La production d'énergie de l'éolien est très dépendante de la force du vent. Pour pallier cela, les éoliennes sont toujours placées dans des zones très venteuses. Cependant, certaines populations refusent leur implantation à cause des nuisances sonores et visuelles qu'elles entraîneraient.

L'énergie biomasse, à l'instar de l'énergie géothermique, a pour défaut de ne pas pouvoir être exploitée de manière intensive au risque d'épuiser trop rapidement les ressources naturelles.

Enfin, l'énergie solaire ne possède pas encore un rendement suffisant pour subvenir à la totalité des besoins énergétiques d'un foyer. Se pose également le problème du recyclage des cellules photovoltaïques et thermiques.

Nuisances et pollutions :

Le terme d'énergie renouvelable est souvent assimilé à celui d'énergie propre ou « propre et sûre ». La définition est différente : une énergie propre ne produit pas ou peu de polluant, ou bien, elle produit des polluants qui disparaissent rapidement sans conséquences pour l'environnement. Une énergie renouvelable n'est pas nécessairement propre[7], et inversement : par exemple, la collecte et la combustion de la biomasse peut produire des nuisances (déforestation, réduction de biodiversité, etc.) et des polluants (NOx, suies, dioxines, etc., c'est notamment le cas de la biomasse solide comme le bois) [8][9]. Il n'y a donc que des sources d'énergie plus ou moins nuisibles suivant les circonstances [10].

Selon l'OMS, près de 1,7 millions de décès prématurés par an sont attribués à la pollution de l'air intérieur causée par la cuisine dans l'Asie du Sud-est, l'Inde en particulier, où 700 millions de personnes dépendent des combustibles solides (bois, charbon de bois, charbon, déchets végétaux et animaux) et des foyers traditionnels pour cuisiner [11].

Impact sur le réchauffement climatique :

Lorsqu'on ne tient pas compte du potentiel de réduction des émissions de gaz à effet de serre des modes actuels de production et d'utilisation de l'énergie, les énergies propres et renouvelables sont parfois présentées comme une solution au problème du réchauffement climatique. En réalité, il faut considérer deux aspects complémentaires des politiques de la maîtrise de l'énergie : les économies d'énergie d'une part et les énergies renouvelables d'autre part ; ceci de façon à diminuer la consommation d'énergies fossiles.

Selon le scénario énergétique sur les potentiels respectifs, en économies d'énergie et en énergies renouvelables, des experts de Greenpeace pour 2030, l'éolien et le solaire représenteraient à eux deux environ 3 % de la production d'énergie mondiale [12].

Selon Jean-Marc Jancovici [13], le développement des énergies renouvelables ne suffira pas à éviter une importante diminution des consommations d'énergie : « malgré les renouvelables, des changements de nos modes de vie lui semblent nécessaires » [14].

Des sources académiques sur le sujet ont montré qu'un scénario énergétique entièrement renouvelable permettant de garantir la qualité de vie des pays développés à l'ensemble de la population mondiale était techniquement faisable avec les meilleures techniques disponibles actuellement en matière d'efficacité énergétique [15]. Toutefois ces études ne se sont intéressées qu'aux aspects environnementaux, industriels et techniques et n'abordent pas les questions de financement, d'acceptabilité sociale et de risques géopolitiques liées à un tel changement.

Le Coût :

Les coûts de production d'électricité (coûts moyens actualisés) à partir d'énergie renouvelable ont peu varié entre 2009 et 2015, sauf ceux du solaire photovoltaïque : ceux de l'éolien à terre ont baissé de 14 % (83 \$/MWh contre 96 \$/MWh), mais après deux années de baisse ils remontent légèrement ; ceux de l'éolien en mer ont fortement augmenté jusqu'à plus de 220 \$/MWh en 2012 avant de redescendre à 174 \$/MWh en 2015 ; le solaire thermodynamique avec stockage est resté stable à environ 275 \$/MWh ; le solaire photovoltaïque (silicium cristallin) a chuté de 61 % entre 315 \$/MWh au 3^e trimestre 2009 et 122 \$/MWh fin 2015, et certains projets de centrales dans des zones très ensoleillées ont atteint des prix très bas : 58,5 \$/MWh à Dubai, 64 \$/MWh au Rajasthan et 68 \$/MWh dans l'Andhra Pradesh.

Situation actuelle (ensemble des énergies renouvelables):

▪ Dans le monde :

Le nombre de pays s'étant fixé des objectifs en termes d'énergie renouvelable a quadruplé en 10 ans, passant de 43 en 2005 à 164 en 2015, selon un rapport publié par l'Agence internationale de l'énergie renouvelable. Les pays émergents combleront leur retard : 131 d'entre eux se sont donné des objectifs ; la trentaine de nations sans objectifs sont surtout en Afrique et en Asie centrale. 151 pays ont fixé des objectifs pour les énergies renouvelables électriques, mais seulement 47 dans le domaine du chauffage et du froid et 59 pour les transports [16].

Selon le bilan annuel 2015 commandé par le Programme des Nations unies pour l'environnement, les investissements mondiaux dans les énergies renouvelables ont progressé de 5 % en 2015, à 286 Mds \$ (milliards de dollars) (hors grands projets hydroélectriques, estimés à 43 Mds \$), dépassant leur précédent record de 278,5 Mds \$ atteint en 2011 ; ce record a été obtenu malgré la chute des prix des combustibles fossiles. Les investissements dans les installations de production d'énergies renouvelables ont représenté plus du double de ceux dans les énergies fossiles (charbon et gaz), estimés à 130 Mds \$. La part des énergies renouvelables dans la production d'électricité n'est cependant encore que légèrement supérieure à 10 %. Pour la première fois, les investissements des pays en développement et émergents ont dépassé ceux des pays développés : 156 Mds \$ (+19 %) contre 130 Mds \$ (-8 %) ; la Chine à elle seule a investi 102,9 Mds \$ (+17 %), soit 36 % du total mondial, suivie par l'Europe : 48,8 Mds \$ (-21 %), les États-Unis : 44,1 Mds \$ (+19 %) et l'Inde : 10,2 Mds \$ (+22 %)^{97,t 2}. Le solaire arrive en tête avec 161 Mds \$ (+12 %), suivi par l'éolien : 109,6 Mds \$ (+4 %) ; les autres énergies renouvelables totalisent 15,2 Mds \$ et ont toutes connu un fort recul en 2015 ; ainsi, les investissements dans les biocarburants sont tombés à 3,1 Mds \$ alors qu'à leur apogée en 2007 ils atteignaient 28,3 Mds \$; les investissements en biomasse-déchets sont tombés à 6,0 Mds \$ contre 18 Mds \$ en 2011.

En 2012, les énergies renouvelables représentaient 19 % de la consommation finale mondiale d'énergie, dont 9 % pour la biomasse et 10 % pour les énergies renouvelables « modernes » : 4,2 % de chaleur produite par les énergies renouvelables thermiques, 3,8 % d'hydroélectricité, 1,2 % pour les autres renouvelables électriques (éolien, solaire, géothermie, biomasse, biogaz)

et 0,8 % pour les biocarburants. Les taux de croissance moyens annuels les plus élevés sur cinq ans (2008-2013) ont été ceux du solaire photovoltaïque (+55 % l'an), du solaire thermodynamique (+48 %), de l'éolien (+21 %), du solaire thermique (+14 %) et du biodiesel (+11 %).

La part des énergies renouvelables dans la consommation mondiale d'énergie primaire était de 14,1 % en 2014, dont 10,3 % issus de la biomasse et des déchets, 2,4 % de l'hydroélectricité et 1,4 % des autres EnR (éolien, solaire, etc) et 22,7 % de la production mondiale d'électricité (hydro : 16,4 %, autres : 6,3 %).

La différence entre ces deux statistiques provient des conventions adoptées pour les bilans énergétiques, qui minorent la part des énergies renouvelables électriques dans l'énergie primaire.

La consommation totale d'énergie primaire issue de la biomasse atteignait 57 exajoules (= 15 800 TWh) en 2013, dont 60 % de biomasse traditionnelle (bois pour l'essentiel) ; l'usage principal de la biomasse est le chauffage.

La puissance des systèmes de chauffage à biomasse « modernes » a progressé en 2013 de 1 % à 296 GW_{th}. Les biocarburants ont représenté 2,3 % de la consommation de carburants du transport mondial ; leur production a progressé de 7,7 milliards de litres pour atteindre 116,6 milliards de litres ; la production d'éthanol s'est redressée de 6 % après deux ans de déclin, le biodiesel a progressé de 11 % et celle d'huile végétale carburant de 16 %, à 3 millions de litres ; de nouvelles usines de biocarburants avancés produits à partir de biomasse non-alimentaire ont été mises en service en Europe et en Amérique du Nord ; cependant, le total des investissements en nouvelles usines de biocarburant a continué à décliner depuis le pic de 2007.

L'usage direct de la chaleur géothermique (bains thermaux, chauffage de piscines, chauffage de locaux, procédés agricoles et industriels) est estimé à plus de 300 pétajoules par an, mais progresse peu.

La puissance thermique des capteurs de chaleur solaire, à eau ou à air, est passée de 283 GW_{th} fin 2012 à 330 GW_{th} fin 2013 ; la Chine reste le principal marché, avec plus de 80 % du marché mondial ; la demande continue à ralentir en Europe, mais de nouveaux marchés se développent dans des pays comme le Brésil, où le prix du chauffage solaire de l'eau est compétitif ; la tendance au développement de systèmes collectifs se confirme, ainsi que l'utilisation du solaire thermique pour le chauffage urbain, la production de froid et les applications industrielles.

▪ En l'Algérie :

L'Algérie a lancé, le 3 février 2011 [17], son Programme national de développement des énergies renouvelables et de l'efficacité énergétique [18]. Ce programme, qui s'étale sur la période allant de 2011 à 2013, ambitionnait de produire 22 000 MW d'électricité à partir du solaire et de l'éolien dont 10 000 MW destinés à l'exportation [19].

Le gouvernement algérien a adopté fin février 2015 son programme de développement des énergies renouvelables 2015-2030. Une première phase du programme, démarrée en 2011, avait permis la réalisation de projets pilotes et d'études sur le potentiel national. Le nouveau programme précise les objectifs d'installations d'ici à 2030 :

- 13 575 MWc de solaire photovoltaïque,
- 5 010 MW d'éolien,
- 2 000 MW de solaire thermodynamique (CSP),
- 1 000 MW de biomasse (valorisation des déchets),
- 400 MW de cogénération,
- 15 MW de géothermie.

Le total s'élève ainsi à 22 GW, dont plus de 4,5 GW doivent être réalisés d'ici à 2020[20].

Conclusion :

La principale raison pour empêcher de ne plus utiliser les sources d'énergie renouvelable c'est que, jusqu'à récemment, les coûts de production de ces énergies étaient beaucoup plus élevés que ceux des énergies fossiles. De plus, les sources d'énergie renouvelable ne sont pas constantes : imaginez par exemple que le vent tombe soudainement ou que des nuages couvrent le soleil. Une exploitation optimale de ces sources nécessiterait également la construction d'installations dans des zones reculées, dont le raccordement au réseau principal serait à la fois coûteux et difficile.

Toutefois, la situation évolue rapidement. Des politiques mises en place ont contribué à faire grimper la demande en sources d'énergie renouvelable dans le monde, entraînant une diminution rapide de leurs coûts de production. Vu l'augmentation du prix du gaz et du pétrole ces dernières années et les initiatives prises par les gouvernements, il ne fait aucun doute que les sources d'énergie renouvelable ont un bel avenir devant elles.

Un œil sur l'avenir :

Ne serait-il pas fascinant de répondre à tous nos besoins énergétiques grâce aux sources d'énergie renouvelable ? Une chose est sûre : nous avons la technologie et la volonté pour le faire. En fait, cet objectif n'est peut-être pas si éloigné qu'il y paraît ! La Feuille de route pour l'énergie à l'horizon 2050 indique que « La part des sources d'énergie renouvelables (SER) augmente considérablement dans tous les scénarios, pour atteindre 55 % de la consommation énergétique finale brute en 2050.

La part des SER dans la consommation d'électricité atteint 64 % dans le Scénario "haute efficacité énergétique" et 97 % dans le scénario "part élevée de SER", qui prévoit un important stockage d'électricité pour absorber les variations dans l'approvisionnement en provenance des SER même lorsque la demande est faible. »

Plusieurs autres associations et gouvernements soutiennent que l'objectif d'une énergie provenant entièrement des sources d'énergie renouvelables peut être atteint dans les prochaines décennies⁴⁵. Le principal problème reste le stockage de l'électricité, un point délicat. Étant donné que l'énergie des différentes sources renouvelables n'est pas constante et qu'on ne peut pas la contrôler, nous devons pouvoir stocker l'énergie électrique produite quand les SER sont disponibles pour l'utiliser quand elles ne le sont pas. Cela est rendu possible grâce à des technologies de pointe comme les systèmes de stockage d'énergie avec supraconducteurs⁶, les supercondensateurs⁷, le stockage d'hydrogène⁸, le stockage par air comprimé⁹, les centrales hybrides faisant appel aux énergies renouvelables et le stockage par pompe hydraulique¹⁰, pour n'en citer que quelques-unes. Est-ce la solution pour atteindre 100 % d'utilisation de SER ? Cela reste à voir.

Chapitre 02

Energie solaire

Introduction :

Le Soleil se trouve à la base de toutes les énergies. Il produit la chaleur et la lumière nécessaires à la vie sur Terre. Ce rayonnement solaire est utilisé pour chauffer et pour produire de l'électricité.

Le Soleil est une fantastique boule de feu qui brûle depuis 4,55 milliards d'années. Elle est si grande et si chaude que, même si nous en sommes très éloignés, nous bénéficions encore de sa chaleur et de sa lumière. Imagine plutôt: le Soleil est 1'300'000 fois plus gros que la Terre, et la chaleur dans son cœur peut atteindre 15 millions de degrés ! Heureusement, 150 millions de kilomètres nous séparent de cette formidable source d'énergie, et notre atmosphère nous protège de la puissance de ses rayons.

Le soleil :

Le Soleil est une étoile, la seule du système solaire, et la plus proche de nous. La plus proche après elle est Proxima du Centaure, située à 4,2 année lumières du Soleil.

Carte d'identité du Soleil

Age	4,6 milliards d'années	
Diamètre équatorial	1 392 530 km	
Circonférence	4 372 544 km	
Distance par rapport à la Terre	149 598 000 km	
Composition (éléments/ pourcentage)	Hydrogène	73,46%
	Hélium	24,85%
	Oxygène	0,77%
	Carbone	0,29%
	Fer	0,16%
	Néon	0,12%
	Azote	0,09%
	Silicium	0,07%
	Magnésium	0,05%
	Soufre	0,04%
Autres éléments	0,01%	
Température	Noyau	15 000 000 K
	Zone radiative	1 500 000 K
	Zone de convection et photosphère	6 000 K
Densité (eau=1)	1,41	

Tableau 01 carte d'identité du soleil

Le noyau: il s'étend du centre à environ 0,2 rayon solaire. Sa masse volumique est supérieure à 76000 kg/m^3 . C'est là qu'est produite l'énergie solaire.

La zone radiative: elle s'étend de 0,2 à 0,7 rayon solaire environ. Sa température est bien plus basse que celle du noyau, mais sa densité reste très forte. Cette zone joue un rôle important dans les transferts et le filtrage de l'énergie, du cœur vers la surface du Soleil.

La zone de convection: elle s'étend de 0,7 rayon solaire à 400 km de la surface du Soleil environ. Elle permet les échanges d'énergie entre la zone radiative et la photosphère. En raison de sa faible densité, les échanges dans cette zone se font par convection: les gaz chauds remontent à la Surface, se refroidissent, puis redescendent, se réchauffent, remontent, et ainsi de suite.

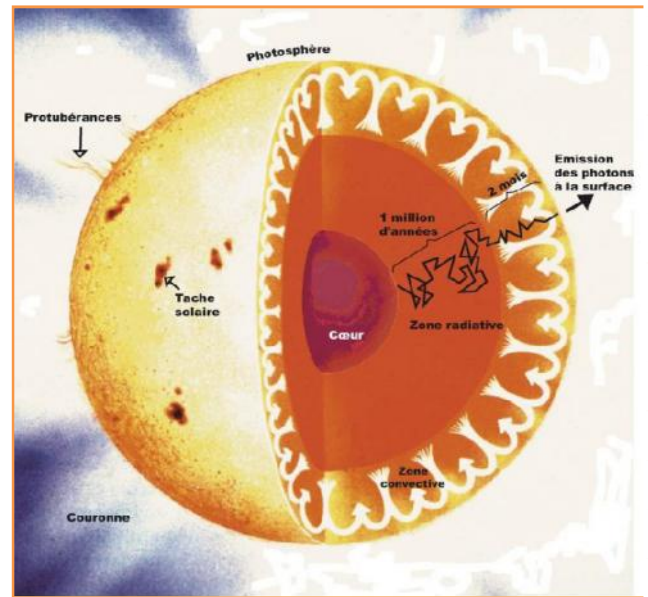


figure 01 le noyau

La photosphère: elle s'étend sur les derniers 400 km du rayon de l'étoile. Une partie de la lumière visible que nous percevons y est produite. Elle est composée de gaz moins denses que les autres couches du Soleil.

Historique :

L'utilisation de l'énergie solaire remonte à l'Antiquité. Par exemple, les Grecs allumaient la flamme olympique grâce à un système de miroirs concentrant les rayons du Soleil. Cependant le début des applications pratiques est apparu au XVII^e siècle.

Le Français Salomon de Caus construit en 1615 une pompe solaire, grâce à l'utilisation d'air chauffé par le rayonnement solaire.

Au XVII^e siècle, François Vilette, opticien au palais de Versailles, conçoit un miroir en bronze (*appelé miroir ardent*) d'un mètre de diamètre, grâce auquel il fait des démonstrations de fusion d'objets[21].

En 1747, Georges-Louis de Buffon expérimente un miroir qui concentre la lumière du soleil en un point focal. Il arrive à faire fondre un morceau d'argent (soit plus de $1\,044 \text{ }^\circ\text{C}$).

À la fin du XVIII^e siècle, grâce à une lentille à liquide qui concentre les rayons solaires, Antoine Lavoisier construit un four solaire qui atteint la température de $1\,800 \text{ }^\circ\text{C}$.

Dans les années 1780, H. B. de Saussure invente un instrument de mesure lui permettant d'étudier les effets calorifiques des rayons du soleil qu'il nomme « hélio thermomètre » ; cet instrument utilise l'effet de serre obtenu par un vitrage placé au-dessus d'un absorbeur dans un caisson isolé ; il crée ainsi un capteur solaire thermique à basse température.

La conversion de la lumière en électricité, appelée effet photovoltaïque, est découverte par Edmond Becquerel en 1839 [22], mais il faudra attendre près d'un siècle pour que les scientifiques approfondissent et exploitent ce phénomène de la physique.

En 1875, Werner von Siemens expose devant l'Académie des Sciences de Berlin un article sur l'effet photovoltaïque dans les semi-conducteurs.

En 1913, William Coblentz dépose le premier brevet pour une cellule solaire qui malheureusement ne pourra jamais fonctionner. En 1916, Robert Millikan sera le premier à produire de l'électricité avec une cellule solaire, mais pendant les quarante années suivantes, personne ne fera beaucoup de progrès en énergie solaire car les cellules photovoltaïques ont un trop mauvais rendement pour transformer la lumière du soleil en énergie. Le phénomène reste encore une découverte anecdotique.

Pendant l'année 1954, trois chercheurs américains (Chapin, Pearson et Prince) mettent au point une cellule photovoltaïque à haut rendement (9 %) et les Laboratoires Bell construisent le premier panneau solaire mais il était trop coûteux pour être produit en série. C'est la conquête spatiale qui fera réellement progresser l'énergie solaire ; le panneau solaire est le seul moyen non-nucléaire d'alimenter des satellites en énergie, de plus l'énergie solaire est une source d'énergie constante pour les satellites en orbite. En effet, c'est en 1958 qu'a lieu le premier lancement d'un satellite fonctionnant à l'énergie photovoltaïque. L'industrie spatiale investira beaucoup de fonds dans le développement des panneaux solaires. C'est la première utilisation importante de la technologie solaire photovoltaïque.

Pendant les années 1970 et 1980, des efforts sont faits pour réduire les coûts de sorte que l'énergie photovoltaïque soit également utilisable pour des applications terrestres. L'énergie solaire connaîtra un second élan au cours du premier choc pétrolier dans les années 1970. Alors que le prix du pétrole augmente de façon spectaculaire, les panneaux solaires photovoltaïques commencent à être utilisés pour la première fois dans les maisons. En effet, en 1973, la première maison alimentée par des cellules photovoltaïques est construite à l'université du Delaware et en 1983, la première voiture alimentée par énergie photovoltaïque parcourt une distance de 4 000 km en Australie. Depuis les panneaux solaires se sont développés lentement. Pendant longtemps, ils ont été considérés comme des sources d'énergies naturelles. L'énergie solaire est de nouveau en plein essor car on prévoit une pénurie de pétrole prochaine, on se préoccupe du réchauffement de la planète et les prix de l'énergie n'ont jamais été aussi hauts. L'énergie solaire devient une priorité pour de plus en plus de pays. Des centrales solaires sont en cours de construction dans le monde entier. Les entreprises investissent également. Les entreprises d'électricité et les gouvernements ont offert des subventions et des réductions pour encourager les propriétaires à investir dans l'énergie solaire pour leur maison. En effet, en 1995, des programmes de toits photovoltaïques raccordés au réseau ont été lancés, au Japon et en Allemagne, et se généralisent depuis 2001.

De nouveaux types de panneaux solaires ont été développés ; panneaux solaires très fins (4 mm d'épaisseur) et flexibles, des peintures solaires. L'objectif est de réduire très fortement le coût de l'énergie solaire.

En novembre 2015 une « Alliance internationale pour l'énergie solaire » (ou ISA) pour « *International solar alliance* » a été créée. Le projet en était porté par Narendra Modi (Premier ministre indien). Cette alliance doit réunir les États disposant d'importantes ressources solaires afin de mieux coordonner le développement de leur exploitation (thermique et photovoltaïque) via des actions de formation, de standardisation de matériels, de partage d'expériences, co-entreprises...). La cérémonie de lancement a eu lieu lors de la COP21 à Paris, organisée par l'Inde et la France [23], avec le soutien du secteur privé selon Engie.

Définition d'énergie solaire :

L'énergie solaire est l'énergie rayonnée par le soleil. Cette énergie est à l'origine de nombreux phénomènes Physiques tels que la photosynthèse, le vent ou le cycle De l'eau. Elle vient de la fusion nucléaire se produisant au cœur du Soleil. Elle circule dans l'espace sous forme d'un Rayonnement électromagnétique. Ce rayonnement est Composé de photons, petites particules d'énergie Élémentaires.

Les différents types d'utilisation d'énergie solaire :

La première et plus répandue des utilisations de l'énergie solaire est sa transformation en énergie thermique. Nous effectuons cette transformation naturellement : il suffit de se mettre au soleil pour ressentir de la chaleur. Notre corps transforme l'énergie solaire en énergie thermique. Avec une architecture appropriée, un bâtiment est aussi capable de transformer cette énergie en énergie thermique. L'utilisation la plus connue actuellement est le chauffage « solaire » :

L'eau pour les robinets ou les radiateurs est chauffée par des panneaux solaires. Une autre utilisation de cette transformation est l'usage de fours solaires. Les petits fours solaires « domestiques » peuvent chauffer facilement jusqu'à 150°C et les fours industriels ou pour la recherche peuvent atteindre jusqu'à 3000°C en quelques secondes!

Sur Terre, il existe différents types d'énergies solaires tout d'abord nous allons les citer et ensuite les expliquer :

- _ L'énergie passive
- _ L'énergie thermique
- _ L'énergie photovoltaïque
- _ L'énergie thermodynamique

a) l'énergie passive

C'est une énergie non polluante et qui est disponible en grande quantité. Ce type d'énergie va être utilisé pour le chauffage, pour l'éclairage naturel et la climatisation des locaux.

Son fonctionnement : l'énergie lumineuse du soleil qui pénètre à l'intérieur des pièces par les fenêtres et qui est absorbée par les murs mais aussi par les meubles, par les planches, est rejetée sous forme de chaleur.

b) l'énergie solaire thermique :

Cette énergie est la transformation des rayons du soleil en énergie thermique c'est-à-dire en chaleur. Cette énergie peut être utilisée directement soit pour le chauffage mais aussi pour obtenir de l'eau chaude.

Le principe général est de concentrer les rayons solaires en un seul endroit. Ceux-ci sont alors piégés par des capteurs solaires thermiques vitrés qui transmettent l'énergie solaire à des absorbeurs métalliques. Ces mêmes absorbeurs réchauffent alors un réseau de tuyaux où circule un fluide caloporteur (c'est-à-dire un fluide qui reçoit de la chaleur en un point de son circuit et qui la cède en un autre point). Cet échangeur va ensuite chauffer à son tour de l'eau stockée dans un cumulus, cette même eau ira alimenter chauffe-eau (pour l'eau sanitaire) et systèmes de chauffages solaires.

c) l'énergie photovoltaïque :

Cet effet photovoltaïque a été découvert par Alexandre Edmond Becquerel en 1839. Cette forme d'énergie reste aujourd'hui quantitativement négligeable mais on lui prédit un grand avenir, son coût baissera fortement dans les années à venir. Cette énergie sera durable et ne devra nécessiter aucun entretien. Elle peut répondre aux besoins en énergie électrique d'une maison, contrairement aux autres formes d'énergies solaires qui ne produisent que de la chaleur grâce aux capteurs du panneau qui transforment les rayonnements du soleil en cellule photovoltaïque. Une cellule photovoltaïque est un composant électronique qui exposé à la lumière, génère une tension électrique, ces cellules se présentent sous la forme de deux fines plaques. Le courant qui en ressort est continu donc cette énergie produit de l'électricité.

d) l'énergie thermodynamique :

L'énergie solaire thermodynamique est un moyen de produire de l'électricité et d'accumuler l'énergie thermique nécessaire à cette production pendant plusieurs heures après le coucher du soleil, dans des centrales solaires à concentration. Le principe est de concentrer la chaleur du soleil par des miroirs pour chauffer un fluide haute température (plusieurs centaines de degrés) afin de générer de la vapeur par échange thermique pour ensuite produire de l'électricité au moyen d'une turbine. Le fluide utilisé peut conserver sa chaleur pendant plusieurs heures après le coucher du soleil, cela permet de produire de l'électricité en début de soirée, au moment où la consommation est la plus importante.

Le solaire, une énergie renouvelable qui comporte des avantages... :

- L'énergie solaire est inépuisable et non polluante
- L'énergie est propre et ne dégage pas de gaz à effet de serre
- L'énergie solaire thermique permet d'assurer une partie des besoins en eau chaude sanitaire et en chauffage. L'installation des panneaux solaires thermiques permet de réaliser des économies conséquentes
- Les frais de maintenance et de fonctionnement d'une installation thermique sont relativement faibles
- Il s'agit d'une source d'énergie électrique totalement silencieuse ce qui n'est pas le cas, par exemple des installations éoliennes.
- Le rendement énergétique est positif : il faut en moyenne entre 3 et 4 ans pour que le panneau produise l'énergie nécessaire à sa fabrication et un panneau solaire produit en moyenne entre 9 à 14 fois l'énergie qu'il a consommé pour sa fabrication.

Mais aussi des inconvénients :

- Le coût d'investissement d'une installation solaire thermique est relativement élevé
- L'énergie solaire est une énergie intermittente. Il faut donc un système de chauffage d'appoint.
- La production d'énergie solaire n'est possible que lorsqu'il y a du soleil
- Il faut pouvoir stocker la chaleur dans des ballons ou des dalles chauffantes
- Un cycle de vie en question : la durée de vie d'une installation photovoltaïque n'est pas éternelle mais de l'ordre de 20 à 30 ans. Le rendement des cellules photovoltaïques diminue avec le temps qui passe. On parle en général pour les panneaux photovoltaïques, d'une perte de rendement de 1 % par an. De plus, les panneaux solaires contiennent des déchets toxiques : cuivre, chrome, silicium, cadmium et tellure.
- Les rendements des panneaux photovoltaïques sont encore faibles et de l'ordre de 20 % (pour les meilleurs). L'énergie photovoltaïque convient donc mieux pour des projets à faible besoins, comme une maison unifamiliale, par exemple.

Aspect économique :

Sur le long terme, les prix du charbon, du gaz naturel et du pétrole augmentent avec l'épuisement de la ressource. Le solaire apporte une source virtuellement inépuisable d'énergie et la commission européenne pour les énergies renouvelables prévoit que l'énergie solaire représentera une proportion de 20 % dans les énergies renouvelables, celles-ci devant apporter 20 % de l'énergie en 2020 et 50 % en 2040.

Les systèmes de production d'énergie solaire ont un coût proportionnel quasi-nul : il n'y a pas de combustible, seulement des frais (entretien, gardiennage, réparation...) qui dépendent très peu de la production. Il faut cependant tenir compte des coûts d'investissement, beaucoup plus élevés que pour les techniques fossiles ou les autres renouvelables (éolien, hydraulique...).

L'usage de capteurs thermiques permet de produire de l'eau chaude sanitaire à faible coût. Une fois l'installation réalisée, l'entretien est très peu coûteux et permet de faire des économies substantielles de combustible fossile ou d'électricité.

En revanche, pour la production d'électricité, le coût de l'installation est important (pour le solaire thermodynamique) ou très élevé (pour le photovoltaïque), et ces techniques ne sont pas encore matures pour une généralisation. De nombreux pays ont donc mis en place des systèmes d'incitation financière (sous forme de détaxation, de subventions, ou de tarifs avantageux pour le rachat de l'énergie produite).

L'usage de systèmes de production d'énergie solaire se justifie aussi dans les situations où il est très coûteux de transporter des combustibles (fossiles) ou de procéder à un raccordement au réseau électrique, comme pour des appareils isolés (balises marines, horodateurs), ou dans des zones isolées ou peu peuplées. En France, l'électrification de nombreux refuges en montagne et de villages isolés (en Guyane) a été réalisée par des modules photovoltaïques, parfois couplés à un groupe électrogène d'appoint.

En dépit de sa profusion, et à cause de ses coûts d'investissements lourds, l'énergie solaire est aujourd'hui une énergie peu compétitive, sauf situations particulières, et qui ne se développe que grâce aux aides d'état. Toutefois, un nombre croissant d'acteurs estiment qu'il serait imprudent d'attendre les effets du pic de production du pétrole sur le prix (économique et politique) des énergies fossiles, ou ceux des éventuels changements climatiques dus à leur combustion (effet de serre) ; Quand ces phénomènes se manifesteront, il sera trop tard pour réagir, ce qui justifie un soutien des états à cette technique qui a un grand potentiel de réduction de prix, passant notamment par une augmentation de la production.

Energie solaire dans le monde :

L'énergie solaire photovoltaïque s'est d'abord développée pour satisfaire des besoins électriques en sites isolés, tels que les régions de montagnes, les îles et les zones rurales des pays en développement, particulièrement en Afrique et en Asie. Depuis le début des années 2000, le développement de l'énergie solaire photovoltaïque a pris une toute autre dimension, à l'échelle mondiale, suite à la prise de conscience de l'enjeu environnemental lié au réchauffement climatique et à la nécessité de développer des énergies renouvelables, non émettrices de CO₂.

Des politiques publiques de soutien aux énergies renouvelables en Europe, au Japon, aux Etats-Unis, en Australie et plus récemment en Chine ont créé un boom de la demande mondiale en panneaux solaires, permettant à l'industrie solaire de se développer massivement et de réduire ses coûts de production. Toutefois, un coup d'arrêt brutal à ces politiques de soutien a été donné en 2008-2009 en raison de la crise financière internationale. Les politiques de réduction des déficits publics depuis 2010 n'ont pas permis de soutenir à nouveau les énergies renouvelables et le secteur photovoltaïque tout entier s'est retrouvé en surcapacité de production, au niveau mondial. S'en est suivi une série de fermetures de sites de production de panneaux solaires ainsi que des rachats d'entreprises, conduisant à une plus grande concentration du secteur.

Le grand avantage de la période de massification de la production de panneaux solaires est la réduction drastique des coûts et donc des prix, permettant désormais à l'énergie solaire d'être à

la fois plus accessible pour la réalisation des projets en sites isolés et de plus en plus compétitive par rapport aux autres sources d'énergie (pétrole, charbon, nucléaire), atteignant progressivement et pays après pays la parité réseau. Cette baisse des prix conjuguée aux nouvelles politiques de lutte contre le changement climatique a relancé vigoureusement la demande d'installations photovoltaïques dans le monde. Les investissements annuels en énergies renouvelables dépassent désormais les investissements en énergies fossiles. La tendance devrait s'amplifier sous l'effet de la baisse continue du prix des panneaux photovoltaïques, appelés à devenir les grands vainqueurs de la transition énergétique.

Les principaux pays producteurs de cellules solaires et de panneaux solaires sont la Chine, les Etats-Unis, le Japon et l'Allemagne. La puissance installée dans le monde est passée de quelques MegaWatts au début des années 2000 à 102 GigaWatts fin 2012 puis 227 GigaWatts fin 2015 et 300 GigaWatts fin 2016. Le rythme d'installation de puissance solaire photovoltaïque est actuellement de plus de 70 GigaWatts par an. C'est en Asie, notamment en Chine et en Inde, que plus de la moitié des installations solaires sont réalisées. Ci-dessous le détail des puissances solaires photovoltaïques installées dans le monde :

Puissance PV installée au 31/12 (MWc) dans les 15 pays les plus équipés en PV

Pays	2009 ⁸⁰	2010 ⁸⁰	2011 ⁷⁹	2012 ⁷⁹	2013 ^{m 7,81}	2014 ^{p 2}	2015 ^{s 6}
 Chine	300	800	3 300	8 300	18 300	28 199	43 530
 Allemagne	9 959	17 370	24 807	32 411	35 715	38 200	39 700
 Japon	2 627	3 618	4 914	6 914	13 600	23 300	34 410
 États-Unis	1 616	2 534	4 431	7 777	12 000	18 280	25 620
 Italie	1 181	3 502	12 923	16 361	17 928	18 460	18 920
 Royaume-Uni	46	91	904	1 829	3 375	5 104	8 780
 France	335	1 054	2 924	4 003	4 673	5 660	6 580
 Espagne	3 523	3 915	4 889	5 166	5 340	5 358	5 440
 Australie	188	571	1 412	2 412	3 300	4 136	5 070
 Inde	nd	nd	nd	nd	2 208	2 936	5 050
 Corée du Sud	nd	nd	nd	nd	1 475	2 384	3 430
 Belgique	386 ⁸²	1 055	2 051	2 650	2 983	3 074	3 250
 Grèce	nd	198	624	1 536	2 579	2 595	2 610
 Canada	nd	nd	nd	nd	nd	1 900	2 500
 République tchèque	466 ⁸³	1 946	1 959	2 072	2 175	2 134	2 080
Total mondial	23 605	40 670	71 061	102 156	138 856	177 000^{p 3}	227 100
dont total Europe	16 850	30 472	52 884	70 043	79 964	86 674	93 965
% Europe	71,4 %	74,9 %	74,4 %	68,6 %	57,6 %	49,0 %	34 %

Tableau 02 puissance pv installée au 31/12 MWc dans 15 pays les plus équipés en PV

La recherche et développement dans le domaine de l'énergie solaire reste principalement axée sur l'amélioration des rendements des cellules solaires, qui permet de gagner de la puissance surfacique donc de réduire le coût du Watt crête. L'industrie solaire est ainsi passée de 15% à 25% de rendement maximal des cellules solaires en l'espace d'une vingtaine d'années. D'autres techniques permettent d'augmenter le rendement solaire des installations photovoltaïques : il s'agit des panneaux solaires à concentration, qui consistent à concentrer jusqu'à 1000 fois les rayons du soleil sur une cellule solaire grâce à un jeu de lentilles optiques. La technique des

trackers est un autre moyen d'augmenter le rendement des installations solaires. Elle consiste à installer les panneaux solaires sur des structures inclinables qui suivent la course du soleil, captant ainsi le maximum d'énergie solaire tout au long de la journée.

En conclusion, on peut dire que l'industrie de l'énergie solaire photovoltaïque est suffisamment structurée, puissante et performante pour continuer sa croissance et apporter au monde une énergie propre, sûre et durable

Energie solaire en l'Algérie :

Le secteur économique de l'énergie en Algérie occupe une place prédominante dans l'économie de l'Algérie : les hydrocarbures à eux seuls représentent 30 % du PIB, 60 % des recettes du budget et 95 % des recettes d'exportation.

L'Algérie est en 2015 le 18^e producteur de pétrole, le 10^e producteur de gaz naturel et le 6^e exportateur de gaz naturel au monde.

La production et la consommation d'énergie, y compris dans le secteur de l'électricité, sont tirées des hydrocarbures à plus de 99 %.

Cependant, l'État algérien commence à envisager des solutions écologiques en investissant dans les énergies renouvelables. Selon le Programme algérien de développement des énergies renouvelables et d'efficacité énergétique (PENREE) de 2012, l'Algérie vise une puissance installée d'origine renouvelable de 22 000 MW d'ici 2030. Mais trois ans après ce plan, les réalisations se font attendre : le rapport annuel du *Global Wind Energy Council* sur l'éolien ne mentionne même pas l'Algérie, et celui de l'Agence internationale de l'énergie sur le solaire annonce seulement que l'Algérie a installé 300 MW.

Le 9 décembre 2011, la société algérienne de l'électricité et du gaz (Sonelgaz et Desertec Industry), Initiative ont signé à Bruxelles un accord de coopération visant au renforcement des échanges d'expertise technique, à l'examen des voies et moyens pour l'accès aux marchés extérieurs et à la promotion commune du développement des énergies renouvelables en Algérie et à l'international[24].

Pour que l'Algérie préserve les réserves énergétiques actuelles (pétrole et gaz), le pays a opté pour le développement et l'exploitation de l'énergie solaire. Afin de concrétiser son programme d'exploitation de l'énergie solaire, l'Algérie a chargé la Sonelgaz de construire la centrale électrique mixte de Hassi R'Mel, mise en service en 2011 à Tilghemt dans la wilaya de laghouat dans le sud du pays, d'une capacité de 150 mégawatts (30 MW solaire thermodynamique + 120 MW gaz)[25]. C'est la société New Energy Algeria (NEA), qui est chargée du secteur des énergies nouvelles et renouvelables [26].

La première usine privée algérienne de fabrication de panneaux solaires est opérationnelle à partir du mois de mars 2012 avec un taux d'intégration nationale de 90 % [27].

L'énergie solaire photovoltaïque est une source d'énergie non polluante. Modulaires, ses composants se prêtent bien à une utilisation innovante et esthétique en architecture.

La stratégie énergétique de l'Algérie repose sur l'accélération du développement de l'énergie solaire. Le gouvernement prévoit le lancement de plusieurs projets solaires photovoltaïques d'une capacité totale d'environ 800 MWc d'ici 2020. D'autres projets d'une capacité de 200 MWc par an devraient être réalisés sur la période 2021-2030.

L'effet sur l'environnement :

L'énergie solaire, comme l'hydroélectricité, l'éolien, la géothermie et l'énergie marémotrice, est une énergie verte ou propre c'est-à-dire qu'elle produit une faible quantité de polluants.

Les centrales électriques solaires et les panneaux photovoltaïques permettent de produire de l'électricité à partir de l'énergie solaire. L'impact environnemental se situe principalement au niveau de la fabrication, du transport, de l'installation et du recyclage de ces infrastructures. La transformation de l'énergie solaire en énergie électrique en tant que telle n'émet pas de pollution.

L'utilisation du silicium dans la fabrication des panneaux photovoltaïques alourdit le bilan énergétique. En effet, les usines de silicium rejettent une grande quantité de CO₂ dans l'air. Les panneaux solaires sont aussi constitués en faible quantité de substances dangereuses comme le plomb, le brome ou le cadmium. Néanmoins, des efforts sont faits pour remplacer ces matériaux par d'autres, plus écologiques.

Garantis 20 à 30 ans, que deviennent les panneaux photovoltaïques en fin de vie ? Dans les faits, ils sont recyclables à 85 %. Des entreprises privées et des organismes à but non lucratif facilitent le recyclage dans le but de diminuer l'enfouissement et la pollution des sols. D'après une étude effectuée en 2007 par l'Agence Internationale de l'Énergie, il faut de 1 à 5 ans pour qu'un système photovoltaïque produise autant d'énergie qu'il a été nécessaire pour sa fabrication.

Installés au sol, les panneaux solaires peuvent modifier le paysage et déranger la faune locale principalement par la pose de clôture sur des terrains de grande superficie. Une des réponses à ce problème est de construire des corridors pour faciliter le passage des animaux.

Aujourd'hui, l'énergie est essentielle pour répondre aux besoins des individus, des industries ou des transports. On cherche donc des solutions alternatives aux énergies fossiles polluantes et limitées, et l'énergie solaire en est une. Ces impacts environnementaux sont minimes par rapport aux avantages à long terme et les avancées dans ce domaine en feront une énergie de plus en plus propre aux fils des années.

La recherche :

La recherche mondiale actuelle dans le solaire porte surtout sur l'amélioration des systèmes (meilleur rendement) et une baisse des coûts des équipements [28].

Le plus grand projet en chantier en 2014 se trouve aux États-Unis, l'Empire Valley Project, qui devrait en principe atteindre une puissance de 890 mégawatts. Commencé en 2012, les travaux devraient se terminer fin 2014.

Dans l'espace, l'énergie des photons provenant du soleil, le vent solaire, peut être utilisée par exemple pour propulser une voile solaire.

Solar Impulse I : Sept années de calculs, de simulations, de construction et de test seront nécessaires aux 80 ingénieurs et techniciens de l'équipe Solar Impulse pour mettre au point ce premier prototype, qui bénéficie d'une multitude d'innovations techniques, notamment dans le domaine de la capture et du stockage de l'énergie solaire et dans celui des matériaux de structure et d'équipement.

Conclusion :

L'énergie solaire est de plus en plus utilisée. Cependant, devons nous vraiment développer cette énergie ?

Son point fort est qu'elle ne pollue pas mais n'oublions pas son le principal problème : elle est disponible uniquement le jour. Même si certains systèmes permettent de produire quelques heures après le coucher du soleil, le stockage électrique est encore trop peu efficace pour que le soleil puisse être utilisé comme unique source d'électricité.

De plus, l'énergie solaire ne pourra jamais réellement servir aux transports (du moins dans un futur proche), qui sont la principale cause de pollution atmosphérique.

Notons que les systèmes passifs n'engagent que peu d'intérêt car en plus d'avoir toujours existé, ils ne nécessitent pas d'investissements massifs: seul un petit surcoût est nécessaire à la construction. Cependant, leur efficacité est moins importante que celle des systèmes actifs.

Les centrales solaires thermiques

Introduction :

De nos jours, l'homme a à sa disposition sur la Terre de nombreuses sources d'énergie. Les plus utilisées sont les énergies dites fossiles (charbon, pétrole, gaz) car non renouvelables et issues d'un long processus de transformation de la matière organique, parce qu'elles sont faciles à exploiter, et rentables. Cependant, pour différentes raisons, il s'avère que ces énergies ne peuvent plus être utilisées. Tout d'abord, les réserves d'énergie fossiles commencent à s'amoinrir. Ensuite, en raison de la très forte demande en provenance des pays en voie de développement comme la Chine et l'Inde pour ne pas les citer, les prix de ces énergies ne cessent d'augmenter, les rendant inabordables pour certaines personnes. Et puis, lors de leur utilisation, ces énergies émettent une grande quantité de gaz à effet de serre (dioxyde de carbone, notamment) qui participent fortement au réchauffement planétaire, qui devient un problème grandissant pour la Terre et les êtres vivants.

De nombreuses énergies non polluantes, ou renouvelables, ou abondantes partout à la surface du globe pourraient pourtant être utilisées par l'homme. Entre autres, on distingue l'énergie éolienne, l'énergie nucléaire, l'énergie hydroélectrique et l'énergie solaire. Mais l'énergie éolienne n'est pas assez rentable, au sens qu'elle ne permet pas de produire beaucoup d'énergie par unité de surface. L'énergie nucléaire, même si elle a un fort rendement, produit des déchets très polluants et peu dégradables. De plus elle fait peur en raison des graves accidents qui peuvent se produire (catastrophe de Tchernobyl), et en raison du risque de prolifération nucléaire. L'énergie hydroélectrique a un bon rendement mais, un fort impact écologique et humain, n'est pas disponible partout, et la plupart des espaces qui lui sont propices sont déjà saturés de barrages. L'énergie solaire, elle est disponible partout à la surface du globe, en quantité égale dans l'année, et a un bon rendement grâce à la technologie actuelle. Elle est de plus facile à exploiter. Elle semble être l'énergie la plus prometteuse pour l'avenir. C'est pour cela que nous avons décidé de l'étudier plus en détail.

Mais comment exploiter au mieux cette énergie? Et quels sont les enjeux liés à son utilisation?

Définition des centrales solaires :

Rappelons que la plupart des grandes centrales électriques (nucléaire, à charbon etc.) fonctionne selon le même principe : l'énergie thermique produite par une combustion (pétrole, charbon...) ou par fission nucléaire permet de transformer l'eau en vapeur ou de faire monter des gaz à très haute température et donc, selon la loi des gaz parfaits, à très haute pression. La différence de pression permet alors d'actionner des turbines ou des pistons ; ceux-là font ensuite tourner un générateur électrique qui crée donc du courant. Le rendement final est d'autant plus élevé que la chaleur fournie au départ est à haute température. Un projet ambitieux qu'ont eu les européens est de créer une usine sur ce principe sans utiliser de carburant. Après tout, c'est grâce au soleil qu'il fait une température vivable sur terre. Alors

pourquoi ne pas se servir directement de cette chaleur pour faire évaporer de l'eau et actionner des turbines, la place de brûler du fioul cher et de plus en plus rare ?

Il a fallu attendre les années 70 et 80 avant la création des premières centrales solaires électriques expérimentales. Le principe est de concentrer les rayons solaires vers un unique point afin de créer de hautes températures et ainsi produire de l'électricité grâce à un système tel que décrit ci-dessus.

Les trois principaux types de centrales solaires thermiques se distinguent surtout par la manière dont on focalise les rayons solaires.

- Les collecteurs cylindro-paraboliques, qui sont de longs miroirs cylindriques qui concentrent les rayons sur un tuyau dans lequel un liquide est chauffé.
- Les centrales à tour, sortes de lampadaires entourés d'un champ de miroir orientables situés sur le sol (les héliostats) qui renvoient les rayons solaires vers le haut de la tour où est installée une chaudière.
- Les collecteurs paraboliques qui ressemblent à nos antennes de TV, dirigés en permanence vers le soleil et concentrent les rayons vers le point focal de cette parabole.

Il existe aussi plusieurs centrales photovoltaïques, composées d'un champ de panneaux solaires photovoltaïques dont le but est également de produire de l'électricité.

Les différentes centrales solaires :

1. collecteurs paraboliques :

Les capteurs paraboliques fonctionnent d'une manière autonome. Ils sont constitués d'une grande parabole de révolution réfléchissante et d'un moteur « Stirling » au foyer de la parabole. Le tout pivote sur 2 axes pour suivre le déplacement du soleil afin de concentrer son rayonnement sur le foyer de la parabole réfléchissante. Le rapport de concentration est généralement d'environ 4000 et la température obtenue entre 500 et 1000°C.

Ainsi, la chaleur du soleil fait travailler un fluide comprimé afin de générer de l'électricité. Chaque capteur est en fait une mini-centrale, qui produit de l'électricité de manière autonome. L'association de plusieurs.

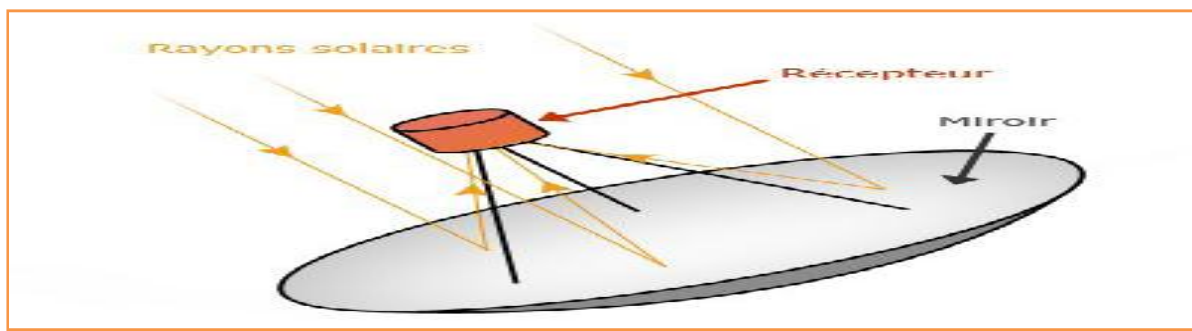


Figure 02 collecteurs paraboliques

Collecteurs paraboliques permet d'augmenter la puissance finale qui est de 15kW dans la plupart des cas.

De nombreuses centrales de ce genre existent un peu partout dans le monde, mais l'on ne retrouve presque jamais le même type de parabole d'une centrale à l'autre nous sommes donc

encore en phase d'expérimentation mais nous avons déjà constaté que cette technologie n'est probablement pas la plus rentable [29].

2. Les centrales à tour :

Le principe des centrales à tour est le suivant : des héliostats au sol réfléchissent les rayons du soleil vers une chaudière en haut d'une tour où un liquide (généralement du sel fondu) est chauffé jusqu'à 2000°C. Ce liquide porte ensuite à ébullition de l'eau dont la vapeur actionne des turbines et produit de l'électricité.

On dénombre aujourd'hui dans le monde plusieurs dizaines de centrales à tour, et c'est pour le moment la manière la plus répandue de produire de l'électricité grâce au solaire thermique.

Un exemple que nous avons tenu à traiter est celui de la centrale à tour Thémis.



Figure 03 La centrale à tour Thémis (France)

Exploitée par EDF de juin 1983 à septembre 1986 pour faire face au choc pétrolier, Thémis produisait du courant par un principe thermodynamique, grâce à la concentration d'énergie solaire sur une chaudière en haut d'une tour de 100m de hauteur à l'aide de 200 miroirs tournant avec le soleil. Après trois ans d'exploitation et plus de 400 millions de francs (60,9 millions d'euros) d'investissement, la centrale, jugée pas assez rentable, est abandonnée. Le Conseil général, propriétaire du lieu, met alors le site à la disposition des chercheurs du CNRS, présents jusqu'en 2004. Mais voilà que depuis quelques années la France a pris conscience de son retard dans le domaine du solaire, surtout par rapport à l'Allemagne, et a décidé de le rattraper en créant presque simultanément deux centrales solaires thermiques, Thémis et l'usine à collecteurs cylindro-paraboliques SOLENHA prévue pour 2009 (avant seules quelques centrales photovoltaïques étaient en activité en France). La centrale désaffectée est alors rénovée, et Thémis produit donc de l'électricité depuis début novembre. La centrale est composée, en plus de 200m² de panneaux photovoltaïques, de 80 héliostats totalisant 4000m² de miroirs pour une puissance de 600 kW (consommation équivalente à 350 foyers [29]).

3. Les collecteurs cylindro-paraboliques :

Ce type de centrale se compose d'alignements parallèles de longs miroirs hémicylindriques, qui tournent autour d'un axe horizontal pour suivre la course du soleil. Les rayons solaires sont concentrés sur un tube horizontal dans lequel circule un fluide caloporteur (généralement une huile synthétique). Les tuyaux étant noirs, ils absorbent toute la chaleur du soleil et permettent à la température du fluide de monter jusqu'à 500° C. La chaleur ainsi récupérée produit de la vapeur via un échangeur, vapeur qui actionne des turbines et qui produisent de l'électricité. Certaines centrales sont désormais capables de produire de l'électricité en

continu, nuit et jour, grâce à un système de stockage de la chaleur. Si ce n'est pas le cas, une partie annexe de la centrale prend le relais et produit de l'électricité en brûlant des carburants traditionnels (gaz, charbon...) une fois le soleil couché [29].



Figure 04 La centrale SEGS (Californie)

Les collecteurs cylindro-paraboliques, grâce à leur relative simplicité et leur rendement économique très élevé par rapport à un coût assez faible, vont peut-être devenir le système de centrale solaire thermique du futur. En attendant, on en dénombre une petite dizaine seulement, uniquement aux Etats-Unis et en phase de construction en Espagne.

4. Les centrales photovoltaïques :

Le principe des centrales solaires photovoltaïques est extrêmement simple. Elles sont constituées d'un champ de modules solaires photovoltaïques reliés entre eux en série ou en parallèle, et branchés sur un ou plusieurs onduleurs. L'énergie est directement transformée en électricité dans les panneaux, et passe ensuite dans le réseau électrique vers la ville la plus proche.

Le Portugal construit depuis 2006 une immense centrale solaire photovoltaïque à Moura. Avec 350 000 Panneaux solaires installés sur 114 hectares et une capacité de production de 62 mégawatts, la centrale photovoltaïque sera la plus grande du monde. Elle sera six fois plus puissante que l'actuelle plus grande centrale « Bavaria Solarpark » en activité en Allemagne depuis 2004[29].

Les projets d'exploitation de l'énergie solaire :

Il existe également d'autres systèmes assez surprenants voir incroyables pour créer de l'électricité à partir de l'énergie solaire.

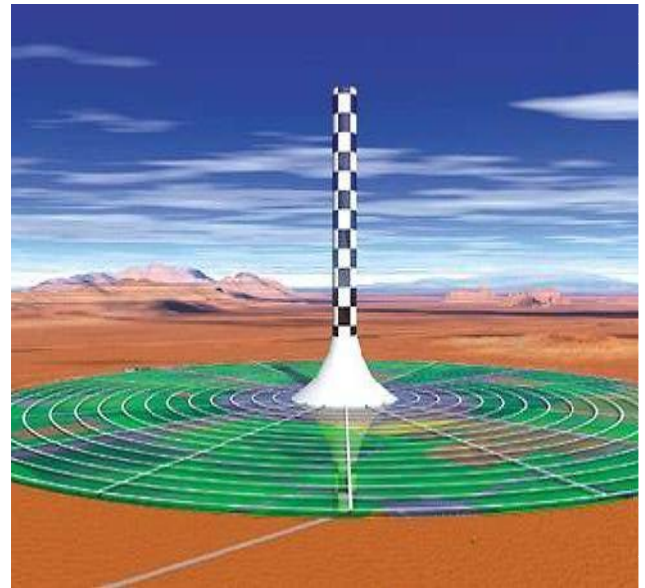
Les Tours Solaires :

La Tour Solaire, de 500 à 1000 mètres de hauteur, est l'un des projets les plus ambitieux de la planète pour la production d'énergie alternative. C'est une usine d'énergie renouvelable qui fournit la même puissance qu'un petit réacteur nucléaire tout en étant plus sûr et plus propre.

Un projet de tour solaire, appelé Projet Buronga et prévu pour 2010, est actuellement développé en Australie par la société Enviromission.

La hauteur envisagée de la tour (990 mètres) sera presque le double de celle du plus haut gratte-ciel jamais construit. Son diamètre à la base sera de 70 mètres, entouré d'une « serre » circulaire de 6 km de diamètre.

La tour pourrait produire environ 200 mégawatts soit six fois moins qu'une centrale nucléaire moderne, mais assez pour fournir en électricité environ 200.000 logements. La tour n'est en fait qu'une cheminée. L'air, sous une serre gigantesque (le « collecteur ») placée tout autour de la cheminée centrale, est chauffé par le Soleil et dirigé vers le haut par convection, le déplacement de l'air permettant aux 32 turbines situées à l'embouchure de la cheminée de produire de l'électricité. Son fonctionnement se base sur un principe simple : l'air chaud étant plus léger que l'air froid, il s'élève. En effet, le Soleil chauffe la plate-forme à la base (d'un diamètre de 7 kilomètres) figure 05 Image de synthèse de la future tour Buronga la température extérieure est de 30° C au sol et atteint 70° C au pied de la cheminée [29].



Les satellites solaires :

Un projet assez fou sur lequel nous sommes tombés au cours de nos recherches est le suivant : capter l'énergie solaire sur des satellites artificiels puis la renvoyer sur terre. En effet, de nombreuses centrales solaires terrestres existent déjà à travers le monde. Toutefois, le rayonnement solaire est huit fois moins intense sur la surface terrestre que dans l'espace. Alors pourquoi donc ne pas le capter dans l'espace et propulser son énergie vers la Terre sous la forme de micro-ondes qui pourraient pénétrer l'atmosphère plus efficacement ? Telle est la question à laquelle une équipe de chercheurs à la NASA tente de répondre.

Ceux-ci ont proposé à cet effet de placer sur orbite d'énormes satellites dotés d'antennes et de panneaux photovoltaïques. Ces derniers capteraient le rayonnement solaire puis transmettraient l'électricité captée vers la terre sous forme de micro-ondes. Les stations de réception au sol transformeraient l'énergie transmise en électricité qui, contrairement à l'électricité produite par les stations solaires terrestres, alimenterait sans interruption le réseau électrique quelles que soient les saisons, les conditions météorologiques ou les zones géographiques. En effet, s'ils sont bien orientés, les satellites captent aussi bien le rayonnement solaire aux pôles qu'à l'équateur.

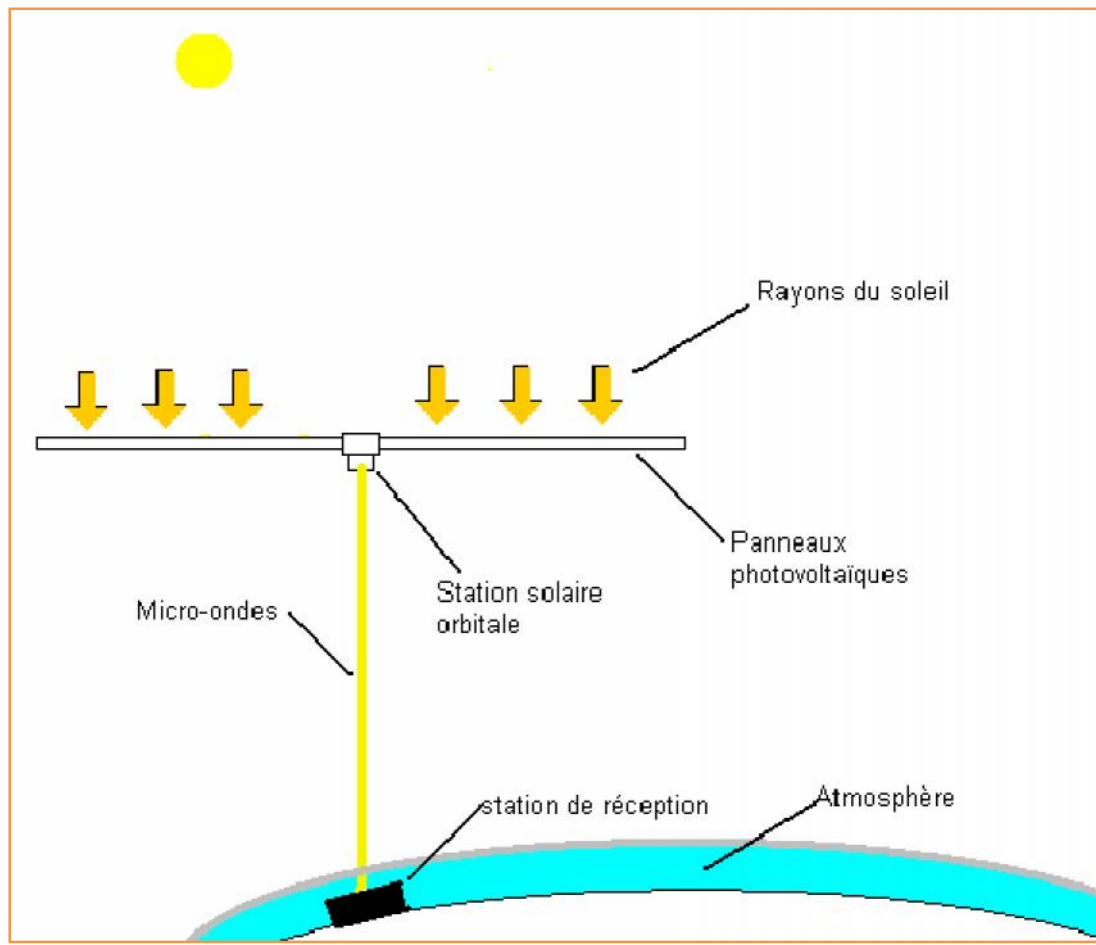


Figure 06 satellite solaire

Toutefois, les frais de construction demeurent excessivement élevés, ce qui a pour effet de décourager qui que ce soit d'investir dans ce domaine. Le coût le plus important a trait au transport du matériel et des dispositifs à bord de la navette spatiale : 20 000 dollars le kilogramme. Si l'on arrivait à diviser ces coûts par cent, ce système deviendrait rentable. Le développement de ce projet passe donc par la construction d'un lanceur réutilisable, qui pourrait très certainement ne pas voir le jour ces cinquante prochaines années [29].

L'énergie solaire dans le transport :

L'idée de faire fonctionner les transports, principale cause du réchauffement climatique dû à la quantité de gaz à effet de serre qu'ils rejettent, grâce à une énergie non polluante est née il y a quelques décennies. Depuis, la recherche se développe de plus en plus du côté de l'énergie solaire, mais seuls quelques prototypes ont vu le jour :

1. Les voitures solaires :

Il existe déjà en vente quelques voitures recouvertes de panneaux photovoltaïques sur le toit ou sur le capot (voir la photographie ci-contre). Seulement l'énergie solaire captée ne sert qu'à alimenter la batterie ou permettre à la voiture de parcourir une dizaine de kilomètres

grâce à l'énergie solaire accumulée dans une journée, la voiture fonctionnant le reste du temps à l'essence.

Un concours, le World Solar Challenge, réunit tous les ans en Australie des prototypes de voitures solaires créés par des étudiants de diverses grandes universités dans le monde. L'équipe vainqueur est celle dont la voiture aura mis le moins de temps pour parcourir 3000km. Le record est battu presque à chaque fois d'une année sur l'autre tellement les progrès sont rapides. La voiture la plus rapide de l'édition 2007 a roulé pendant 33 heures à la vitesse moyenne de 102 km/h. Bien sûr la nuit les panneaux solaires ne fonctionnent pas, la voiture étant propulsée grâce à l'énergie stockée pendant la journée. Ces vitesses sont assez exceptionnelles, mais il faut néanmoins rappeler que la course a eu lieu en plein désert d'Australie (là où l'ensoleillement est l'un des plus forts au monde), que les voitures sont très larges et qu'elles ne peuvent contenir qu'une charge de 100kg maximum. La recherche se poursuit, mais de telles voitures n'arriveront en France sur le marché que dans 20 ou 30 ans pour les plus optimistes [29].



Figure 07 Deux prototypes de voitures solaires mis au point par des universités américaines

2. Les trains solaires :

Du côté des trains et des TGV, plusieurs études ont été réalisées et il en est ressorti que la pose de panneaux solaires sur les trains serait inefficace et absolument pas rentable, principalement à cause de la puissance qu'ils nécessitent (1MW pour le TGV), bien trop importante pour des panneaux photovoltaïques [29].

3. Les bateaux solaires :

De nombreux bateaux dits « solaires », propulsés par des panneaux photovoltaïques alimentant un moteur électrique, sont en circulation depuis bientôt 20 ans. Ce sont bien sûr principalement des bateaux de croisières, car leur vitesse ne peut guère dépasser les 20km/h. Le bateau solaire est idéal pour les voies navigables intérieures, et pour prendre la mer un système ingénieux consiste à équiper un tel bateau avec des voiles auxiliaires qui servent également à charger des batteries en inversant le système de propulsion en générateur. Le bateau solaire a donc de Le bateau solaire Sun21 l'avenir, et l'énergie solaire pourrait très bien servir un jour de source principale de traction des transports fluviaux, même si elle serait remplacée par un carburant en cas d'intempéries [29].



Figure 08 bateau solaire

4. Les avions solaires :

Un avion solaire est un avion dont la propulsion électrique est alimentée, complètement ou en partie, par de l'énergie qu'il capte du soleil grâce à des panneaux photovoltaïques. Disposés habituellement sur la surface de l'aile, ils convertissent l'énergie lumineuse de notre étoile en énergie électrique. Connecté aux panneaux, un circuit électronique appelé MPPT assure une utilisation optimale de cette énergie afin d'alimenter le moteur qui transforme cette énergie électrique en énergie mécanique au travers de l'hélice. Dans la majorité des cas, une batterie est utilisée pour stocker l'énergie supplémentaire afin de pallier un manque de soleil[29].



Figure 09 avion solaire

Le stockage de l'énergie :

Les technologies solaires thermodynamiques présentent un avantage majeur par rapport au photovoltaïque : elles permettent de prolonger la production d'électricité au-delà de la période d'irradiation solaire, moyennant un investissement additionnel, en stockant le fluide caloporteur dans des réservoirs pour pouvoir en extraire la chaleur plusieurs heures après le coucher du Soleil.

Ainsi, la centrale solaire américaine Solar Two peut encore fonctionner trois heures après que le Soleil a disparu. Le stockage de l'énergie est fait à l'entrée du générateur sous forme de chaleur (560 °C) dans des cuves de sels fondus ^[7], ce qui permet à la centrale de continuer à fonctionner en l'absence de Soleil. Cette technique est reprise dans la centrale Solar Three construite à Alméria en Espagne, mais cette fois l'autonomie sans Soleil passe à 16 heures, ce qui lui permet de fonctionner nuit et jour lors des périodes de fort ensoleillement. Ce type d'installation est destiné aux régions à fort ensoleillement comme la Californie ou le Sud de l'Espagne.

Areva a mis en service à Albuquerque, au Nouveau-Mexique, un démonstrateur de stockage d'énergie aux sels fondus dans le parc solaire hélio-thermodynamique du laboratoire national américain Sandia intégrant des réflecteurs à miroirs de Fresnel linéaires. Il utilise les sels fondus comme fluide caloporteur, en les extrayant d'un réservoir « froid » (290 °C) pour les chauffer à 550 °C au contact des miroirs, puis les fait passer par un échangeur thermique pour générer la vapeur nécessaire à la production d'électricité ; les sels fondus sont enfin redirigés soit vers le réservoir froid, pour répéter le processus en boucle, soit vers un réservoir séparé pour le stockage. Les premiers résultats montrent que les sels fondus permettent de faire fonctionner la centrale à haute température, de simplifier les opérations et donc de réduire le coût global, un facteur clé alors que le département américain de l'Énergie (DOE) vise, à travers son programme Sunshot, la réduction des coûts des centrales solaires installées de 0,06 \$/kWh d'ici à 2020[30].

Aspects économiques :

Perspectives de marché :

Selon les scénarios prospectifs établis sous l'égide de l'Agence internationale de l'énergie (AIE), le solaire thermodynamique à concentration est appelé à jouer un rôle significatif dans la production électrique mondiale à l'horizon 2050 : dans son rapport de 2014, l'AIE prévoit que le solaire thermodynamique à concentration (toutes filières confondues) représentera 11 % de la production d'électricité en 2050, soit 4 350 TWh avec une capacité installée de près de 1 000 GW, dont 229 GW aux États-Unis, 204 GW au Moyen-Orient, 186 GW en Inde, 147 GW en Afrique et 118 GW en Chine ; 53 GW seraient exportés de l'Afrique du Nord vers l'Europe ; la baisse des coûts moyens de production de 168 \$/MWh en 2015 à 71 \$/MWh pour des centrales avec stockage les rendrait compétitives dans les pays les plus ensoleillés, en pointe et demi-pointe, vers 2020 et en base vers 2030 ; ces centrales pourraient également produire de la chaleur pour les process industriels et le dessalement d'eau de mer et de l'hydrogène pour remplacer le gaz naturel (3 % des besoins d'énergie en 2050)[31].

Dans les scénarios les plus optimistes, tels que ceux établis dans le cadre du programme AIE SolarPACES (en), la European Solar Thermal Electricity Association et Greenpeace anticipent une capacité installée de 1 500 GW au niveau mondial. Ces perspectives supposent le développement rapide d'une filière industrielle solaire thermodynamique à concentration, sachant qu'en 2014, le parc de centrales en service comporte une quarantaine de sites au niveau mondial.

Coûts de production :

Une étude de l'IRENA (Agence internationale de l'énergie renouvelable) publiée en 2013 évalue les coûts de production actualisés de l'électricité (LCOE) renouvelable en 2012 ; pour le solaire thermodynamique, elle fournit les coûts suivants :

- technologies cylindro-parabolique et Fresnel, sans système de stockage : 0,19 à 0,38 \$/kWh (hypothèses : coût d'investissement : 3400 à 4 600 \$/kW ; facteur de charge : 20 à 27 %) le bas de la fourchette correspond à des projets très compétitifs (hors OCDE) dans des pays bénéficiant d'un ensoleillement exceptionnel ;
- avec un système de stockage de six heures : 0,17 à 0,37 \$/kWh ;

- centrales à tour (technologie moins mature selon l'étude) : 0,20 à 0,29 \$/kWh avec système de stockage de six heures à sept heures 30, et 0,17 à 0,24 \$/kWh avec stockage de 12-15 h.

Le coût est fortement corrélé à l'ensoleillement : partant d'une base à 2 100 kWh/m²/an (ensoleillement DNI typique pour l'Espagne), le coût LCOE diminue de 4,5 % pour chaque tranche de 100 kWh/m²/an en plus. Ces coûts de 2012 devraient continuer à baisser en fonction des progrès technologiques et des économies d'échelle [32].

Le coût minimum de 0,17 \$/kWh, soit 170 \$/MWh, équivaut à 126 €/MWh ; en comparaison, une étude du Fraunhofer Institute parue en novembre 2013 évalue le LCOE des centrales photovoltaïques du sud de l'Allemagne (indice solaire de 1 200 kWh/m²/an) entre 79 et 98 €/MWh, et un contrat récemment signé au Texas faisait ressortir un coût de 54 €/MWh[33] ; le coût du solaire thermodynamique reste donc largement supérieur à celui du photovoltaïque, mais avec l'avantage du stockage qui lui confère une valeur nettement plus élevée .

Installations réalisées et projets :

La production des centrales solaires thermodynamiques atteignait 8 490 GWh en 2014, soit 0,04 % de la production mondiale d'électricité. Les principaux pays producteurs sont l'Espagne : 5 455 GWh et les États-Unis : 2 688 GWh [34].

En 2008, la capacité installée était évaluée à environ 431 MW, dont 420 MW en solaire thermodynamique à concentration de type cylindro-parabolique ; mi-2013, elle est de 7,5 GW en fonctionnement ou en construction. La concrétisation des scénarios évoqués précédemment suppose un déploiement à grande échelle de la solaire thermodynamique à concentration, à un rythme soutenu, soit en moyenne environ 25 GW de capacité supplémentaire par an. Le marché mondial correspondant peut être évalué entre 50 et 100 Md€ par an. À court terme, la feuille de route établie par l'Agence internationale de l'énergie (AIE) pour le solaire thermodynamique à concentration prévoit que la capacité installée à l'horizon 2020 pourrait atteindre 148 GW.

Parmi les plus anciennes installations on trouve celle d'Albuquerque aux États-Unis d'une puissance de 5 MW (1976), celles de *Luz Solar Energy* situées à *Kramer junction* et *Daggett* en Californie d'une puissance totale de 354 MW (1985) et *Solar 2* en Californie (1996) d'une puissance de 10 MW. En février 2006, Nevada Solar One d'une puissance de 64 MW a été mise en service à Boulder City, Nevada aux États Unis. En 2010, Andasol I Aldeire près de Grenade en Espagne (50 MW) a été mise en service.

À travers le monde, d'autres projets sont en cours de réalisation :

- En Afrique du Sud, trois centrales sont en fonctionnement en 2016 : Bokpoort (50 MW), Khi Solar One (50 MW) et KaXu Solar One (100 MW), une quatrième est en construction : Xina Solar One (100 MW) et plusieurs autres sont en développement : Kathu Solar Park (100 MW), Ilanga I (100 MW) et Redstone Solar (tour solaire de 100 MW) [35].
- En Algérie, le programme des Énergies Renouvelables Algérien est de (22 000 MW), où 12 000 MW sont prévus pour les besoins locaux et 10 000 MW pour l'export. Le projet consiste en la construction de (13 575 MW) en photovoltaïque, (2 000 MW) en

solaire thermique (CSP), (5 010 MW) en éoliennes, (1 000 MW) en biomasse, (400 MW) en cogénération et (15 MW) en géothermie. L'investissement prévu s'élève à 60 milliards de dollars.

- Le Plan Solaire Marocain, Maroc (2 000 MW) en 2020[36];
- Le Projet Desertec est un projet visant à produire une grande partie de l'électricité des pays d'Afrique du Nord et du Moyen-Orient.
- La tour solaire de la nouvelle Ville de Boughezoul en Algérie (3 à 7 MW) [37].
- Des projets de centrales solaires thermiques en Algérie (total de 1 350 MW) dans le cadre du Programme algérien de développement des énergies nouvelles et renouvelables et de l'efficacité énergétique [38].

Conclusion :

L'énergie provenant du Soleil pourrait donc combler les besoins de l'Homme. Cependant les raisons économique et politique sont un frein à son exploitation et à son développement. En effet les pays susceptibles d'exploiter l'énergie solaire à grande échelle (les pays riches) seraient contraints d'installer leur exploitation dans les pays possédants le meilleur rayonnement solaire, c'est-à-dire dans les pays proche du Sahara. Malheureusement, l'instabilité politique qui règne dans ses pays rend une telle exploitation risquée. Pourtant, une solution devra être prise d'ici peu puisque selon les prévisions, en 2030 la demande mondiale énergétique sera un tiers plus importante qu'actuellement. Cependant il ne nous est pas encore possible de dire si l'énergie solaire serait capable de répondre à ces besoins, vu qu'à ce jour les rendements de cette énergie restent faibles. Des progrès devront donc être faits dans l'avenir pour que celle-ci puisse combler nos besoins énergétiques.

Les différents calculs dans une centrale solaire thermique

Introduction :

Les centrales solaires sont une technologie relativement récente, possédant un important potentiel de développement. Elles offrent une opportunité aux pays ensoleillés meilleur que celle des fermes éoliennes pour les pays côtiers.

Les endroits les plus prometteurs pour l'implantation de ces technologies sont ceux du sud-ouest des États Unis, l'Amérique du Sud, une grande partie de l'Afrique, les pays méditerranéens et du Moyen Orient, les plaines désertiques d'Inde et du Pakistan, la Chine, l'Australie, etc.

Dans beaucoup de régions du monde, un kilomètre carré de terrain suffirait à générer jusqu'à 120 Gwh d'électricité par ans, grâce à la technologie des centrales solaire. Cette énergie est équivalente à la production annuelle d'une centrale classique de 50 MW.

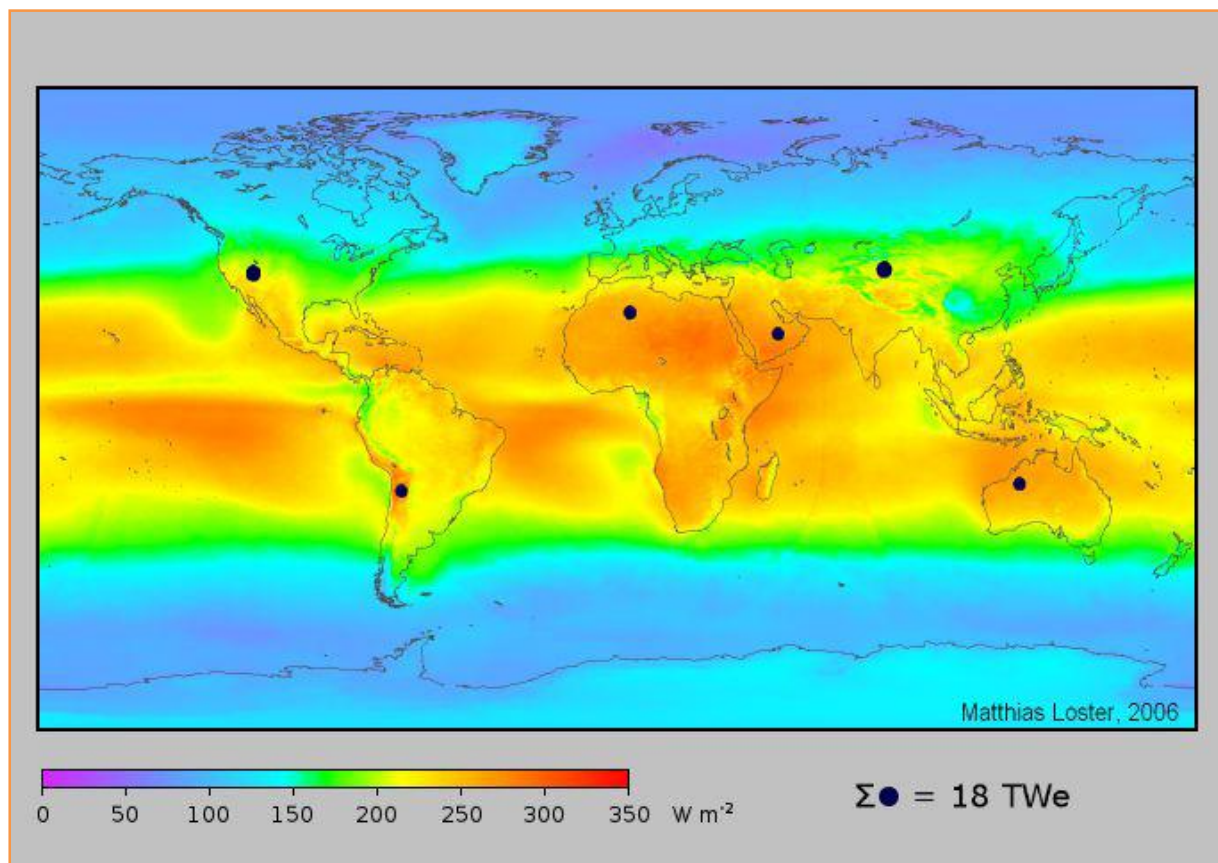


Figure 10: irradiation solaire moyenne

Le but de travail :

Dans ce chapitre on va introduire les différents facteurs et les différentes formules utilisées dans le calcul d'une centrale solaire thermique telle que celle qui existe au sud de l'Algérie « Ghardaïa » ainsi que la détermination du nombre des miroirs nécessaires pour couvrir les besoins de 100000 habitants en électricité.

Le rayonnement solaire :

I. Paramètres de position

Pour récupérer un maximum d'énergie en provenance du soleil, il est nécessaire d'orienter au mieux le récepteur [39]. La connaissance de la position du soleil dans le ciel par rapport au lieu de captation s'avère donc nécessaire.

a. Les coordonnées géographiques

Tout point de la sphère terrestre est repéré par ses coordonnées géographiques.

- La latitude (ϕ) d'un lieu, correspond à l'angle avec le plan équatorial, que fait le rayon joignant le centre de la terre à ce lieu. Elle varie entre (0° et $+90^\circ$) au pôle Nord et (0° et -90°) au pôle Sud [40].
- La longitude (λ) d'un lieu, correspond à l'angle que fait le plan méridien passant par ce lieu avec un plan méridien retenu comme origine. On a choisi pour méridien origine 0° le plan passant par l'observatoire de Greenwich. Par convention on affecte du signe (+) les méridiens situés à l'est de ce méridien, et du signe (-) les méridiens situés à l'ouest [41].

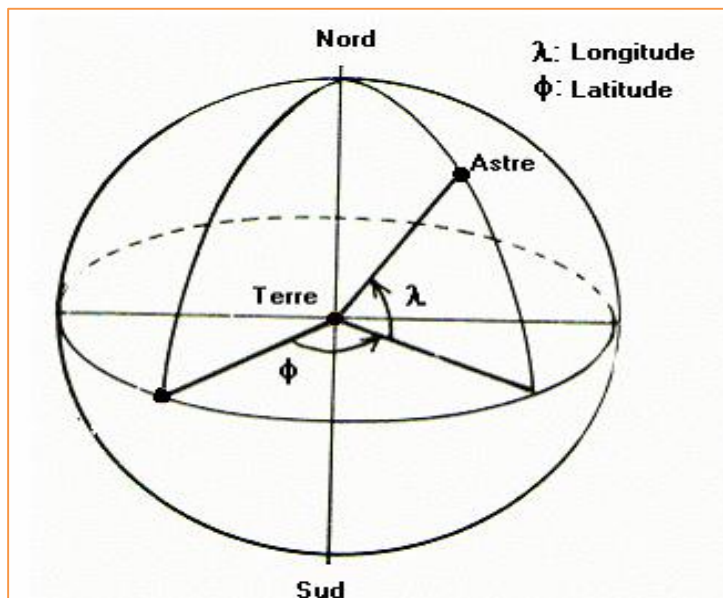


Figure 11. Coordonnées géographiques

b. Les coordonnées horaires

- La déclinaison solaire (δ), est l'angle formé par la direction du soleil et le plan équatorial terrestre, (figure II.2). Elle varie tout au long de l'année, entre deux valeurs extrêmes, ($-23,45^\circ$ à $23,45^\circ$), s'annule aux équinoxes de printemps et d'automne, et prend les valeurs extrêmes aux solstices d'été et d'hiver.
- L'angle horaire (w), du soleil, est l'angle formé par le plan méridien du lieu et celui qui passe par la direction du soleil si l'on prend comme origine le méridien de Greenwich. L'angle horaire est compris entre 0° et 360° . La valeur de l'angle horaire est nulle à midi solaire, négative le matin, positive dans l'après midi et augmente de 15° par heure [40].

La formule suivante donne l'angle horaire [41] :

$$W = (TSV - 12) \times 15^\circ$$

TSV : temps solaire vrai.

c. Les coordonnées solaires locales

La position d'un astre dans l'espace, peut être repérée par ses coordonnées horizontales définies sur la sphère céleste.

- la hauteur (h), est l'angle que fait la direction de l'astre, avec le plan horizontal, (Figure II.2).
- l'azimut (a), est l'angle que fait la projection du rayon solaire sur le plan horizontal (Plan tangent au sol) avec la direction sud .

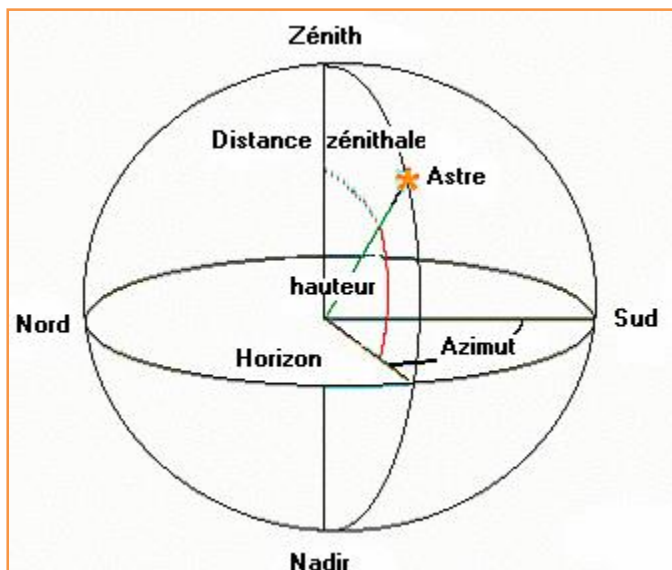


Figure 12. Coordonnées horizontales

II. Calcul des irradiations solaires directe, diffuse et globale :

Afin d'évaluer l'énergie solaire captée par une surface d'orientation quelconque et placée au niveau du sol, on fait appel à un grand nombre de formules analytiques et empiriques [41]. Plusieurs spécialistes ont proposés des modèles pour caractériser le rayonnement solaire. Dans notre étude nous avons adopté la méthode de Kasten qui est valable pour des hauteurs de plus de 10°, et tient compte du trouble atmosphérique. Il existe des algorithmes pratiques, qui permettent une évaluation de l'éclairement reçu par une surface d'orientation quelconque à partir des données astronomiques, géographiques et géométriques du lieu.

a. La déclinaison (δ)

La valeur de cet angle peut être calculée par la formule [42] :

$$\delta = 23,450 \times \sin(360 \times (284 + n) / 365) \text{ avec } n: \text{ numéro du jour dans l'année}$$

b. La hauteur (h)

L'expression suivante appelé formule de Gauss, donne la hauteur angulaire de l'astre (Soleil) [39] :

$$\sin(h) = \sin(\delta) \times \sin(\phi) + \cos(\delta) \times \cos(\phi) \times \cos(w)$$

c. L'azimut (a)

Une autre formule de Gauss donne cet angle [39].

$$\cos(h) \times \sin(a) = \sin(w) \times \cos(\phi)$$

d. La durée du jour (DDJ)

$$DDj = 2/15 \times [\arccos(-\tan(\delta) \times \tan(\phi))]$$

$$\cos(w_1) = -\tan(\delta) \times \tan(\phi)$$

$$W_1 = 1/15 \times [\arccos(-\tan(\delta) \times \tan(\phi))]$$

W_1 : angle horaire du lever

e. La distance optique (mh)

Appelée aussi masse atmosphérique, elle est définie à partir de l'unité d'épaisseur Atmosphérique prise verticalement au niveau zéro, et calculée comme suit [41]:

$$mh = (1 - 0,1 \times (Z)) / (\sin(h) + 0,15 \times (h + 3,885) - 1,253)$$

Z , étant l'altitude

f. Facteur de trouble de linke (T_l)

Il conduit à une évaluation de l'extinction atmosphérique par les molécules gazeuses et les aérosols. Il peut être calculé par la formule [41].

$$T_l = 2,5 + 16 \times BA + 0,5 \times \ln(w')$$

W' : hauteur d'eau condensable.

BA : coefficient d'angström.

Le coefficient d'angström est défini à partir du nombre d'aérosols renfermés dans la masse atmosphérique, unité placée verticalement au lieu de mesure (en fonction de la clarté du ciel), avec la hauteur d'eau condensable.

- ciel dégradé : $W' = 5 \text{ cm}$, $BA = 0.2$
- ciel moyen : $W' = 2 \text{ cm}$, $BA = 0.1$
- ciel pur : $W' = 1 \text{ cm}$, $BA = 0.01$

g. L'éclairement diffus (D_0) sur un plan horizontal [41].

Dans sa traversée de l'atmosphère, une partie du rayonnement solaire est diffusé par les aérosols. L'éclairement diffus est donné par la relation :

$$D_0 = (I_0/25) \times (\sin h)^{1/2} \times (T_L - 0,5 - (\sin h)^{1/2})$$

Où, I_0 est l'énergie solaire qui frappe une surface d'aire unité placée dans la direction normale au soleil à la limite extérieure de l'atmosphère terrestre. Elle est indépendante des conditions Météorologiques, et appelée constante solaire.

La valeur moyenne de la constante solaire actuellement retenue est $I_0 = 1353 \text{ W/m}^2$ [41].

h. L'éclairement global sur un plan horizontal [41].

Il représente la somme des deux types de rayonnement direct et diffus.

$$G_0 = M \times (\sin h)^N$$

M , N : caractérisant l'état de l'atmosphère.

Selon l'état du ciel, on détermine l'éclairement global sur un plan horizontal par les formules suivantes [41]:

- Ciel dégradé: $G_0 = 990 \times (\sin h)^{1,25}$
- Ciel moyen : $G_0 = 1080 \times (\sin h)^{1,22}$
- Ciel pur : $G_0 = 1150 \times (\sin h)^{1,15}$

i. L'éclairement diffus (D_i) sur un plan d'inclinaison (i)

$$D_i = ((1 + \cos i) / 2) \times D_0 + ((1 - \cos i) / 2) \times a_1 \times G_0 \quad \text{avec: } a_1 = 0,2 \quad \text{l'albédo}$$

j. L'éclairement direct (I) sur un plan horizontal

Le rayonnement solaire direct est défini comme étant le rayonnement provenant du seul disque solaire, et calculé par l'expression :

$$I = I_0 \times \exp(- (m_h \times T_1) / (0,9 \times m_h + 9,4))$$

k. L'éclairement direct sur un plan incliné (Si, i)

$$S_i, i = I \times (\cos(h) \times \sin(i) \times \cos(a - 1) + \sin(h) \times \cos(i))$$

i : L'inclinaison du collecteur.

l. L'éclairement global sur un plan incliné (Gi, i) est donné par :

$$G_i, i = S_i, i + D_i$$

III. Estimation du numéro du jour de l'année

Liu et Jordan ont proposé de prendre le 16^{ème} jour de chaque mois, comme le plus représentatif du jour moyen du mois considéré. Quant à Klein il a montré qu'il était préférable de choisir ce jour à l'aide du tableau II.1, [43]:

Mois	N° du jour dans le mois	N° du jour dans l'année
Janvier	17	17
Février	16	47
Mars	16	75
Avril	15	105
Mai	15	135
Juin	11	162
Juillet	17	198
Aout	16	228
Septembre	15	258
Octobre	15	288
Novembre	14	318
Décembre	10	344

Tableau 3. Estimation du numéro du jour de l'année

Application numérique :

La connaissance du rayonnement solaire au niveau du sol est un élément important pour les systèmes de conversion de l'énergie solaire. Cette information peut être recueillie par différentes méthodes à savoir: mesure au sol par des pyranomètres ou des cellules de références, ou par des mesures satellitaires.

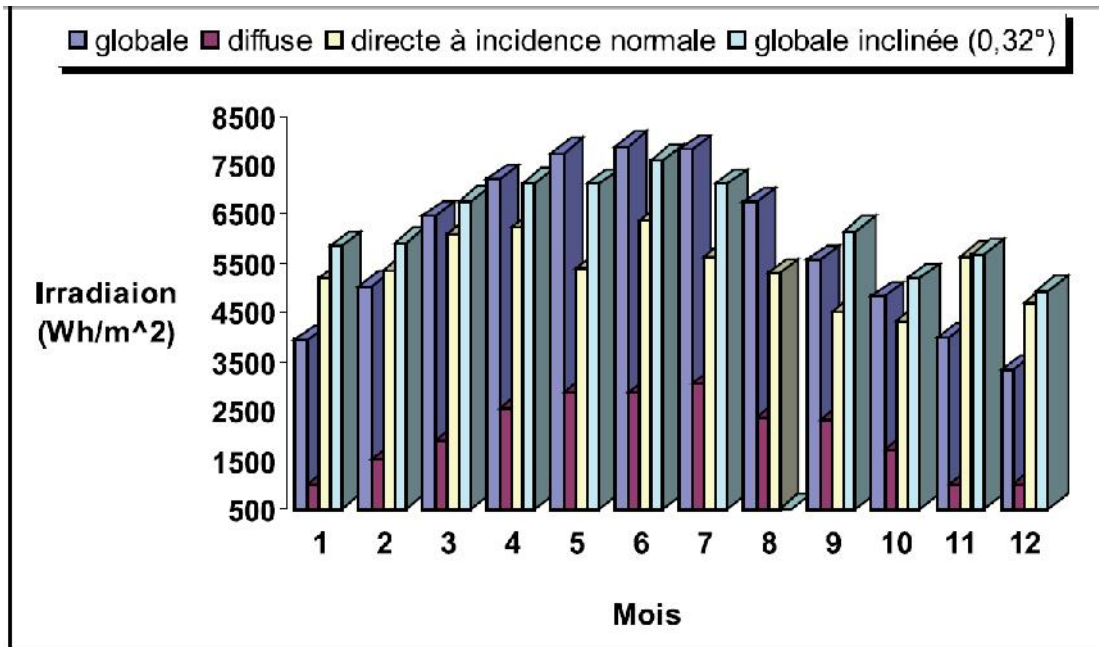


Fig.13: irradiation globale, diffuse, directe normale et globale inclinée collecté par la station radiométrique à Ghardaïa en 2004

Les coordonnées géographiques et horaires à Ghardaïa :

Latitude : 23°,29',27'' Nord

Longitude : 3°,40',24'' Est

L'altitude par rapport au niveau de mer : 503 m

L'angle horaire : $W = (14-12) \times 15^\circ = 30^\circ$

Calcul des irradiances solaires directe, diffuse et globale :

a. La déclinaison () :

n: numéro du jour dans l'année = 105

$$= 23,450 \times \sin(360 \times (284 + 105) / 365) = 9,065^\circ$$

b. La hauteur (h) :

$$\sin(h) = \sin(9,065) \times \sin(3) + \cos(9,065) \times \cos(3) \times \cos(30) = 0,192$$

$$h = 11,0695^\circ$$

c. L'azimut (a) :

$$\cos(11,069) \times \sin(a) = \sin(30) \times \cos(9,065)$$

$$\sin(a) = 0,5030$$

$$a = 30,20^\circ$$

d. La durée du jour (DDJ) :

$$DDj = 2/15 \times [\arccos(-\tan(9,065) \times \tan(3))] = 12,063 \text{ h}$$

$$W_1 = 1/15 \times [\arccos(-\tan(9,065) \times \tan(3))] = 6,031 \text{ h}$$

e. La distance optique (mh) :

$$mh = (1 - 0,1 \times (503)) / (\sin(11,0695) + 0,15 \times (11,0695 + 3,885) - 1,253) = 41,73$$

f. Facteur de trouble de linke (T_l) :

$$T_l = 2,5 + 16 \times BA + 0,5 \times \ln(w')$$

- ciel moyen : $W' = 2 \text{ cm}$, $BA = 0,1$

$$\text{Donc : } T_l = 2,5 + 16 \times 0,1 + 0,5 \times \ln(2) = 4,446$$

g. L'éclairement diffus (D₀) sur un plan horizontal :

$$D_0 = (1353/25) \times (\sin 11,0659)^{1/2} \times (4,446 - 0,5 - (\sin 11,0659)^{1/2}) = 83,155 \text{ w/m}^2$$

h. L'éclairement global sur un plan horizontal :

$$G_0 = M \times (\sin h)^N$$

- Ciel moyen : $G_0 = 1080 \times (\sin h)^{1,22}$

$$\text{Donc : } G_0 = 1080 \times (\sin(11,0659))^{1,22} = 144,171 \text{ w/m}^2$$

i. L'éclairement diffus (Di) sur un plan d'inclinaison (i) :

$$D_i = ((1 + \cos(0) / 2) \times 83,155 + ((1 - \cos(0) / 2) \times 0,2 \times 144,171) = \mathbf{83,155 \text{ w/m}^2}$$

j. L'éclairement direct (I) sur un plan horizontal :

$$I = 1353 \times \exp(- (41,73 \times 4,446) / (0,9 \times 41,73 + 9,4)) = \mathbf{76,586 \text{ w/m}^2}$$

k. L'éclairement direct sur un plan incliné (Si, i) :

$$S_{i, i} = 76,586 \times (\cos(11,0695) \times \sin(0) \times \cos(30,20 - 1) + \sin(11,0695) \times \cos(0))$$

$$S_{i, i} = \mathbf{0,191 \text{ w/m}^2}$$

l. L'éclairement global sur un plan incliné (Gi, i) est donné par :

$$G_{i, i} = S_{i, i} + D_i$$

$$G_{i, i} = 0,191 + 83,155 = \mathbf{83,346 \text{ w/m}^2}$$

Caractéristiques miroir solaire migo :

1. MIGO miroir solaire est un miroir en verre clair de haute réflectivité est parfaitement adapté pour les applications solaires.
2. MIGO miroir solaire a totalement 7 couches de revêtement sur le dos du verre (couche sensible, couche super sensible, couche d'argent, couche de passivation, première protection de peinture solaire, deuxième protection pour la peinture, protection de peinture résistant aux UV).
3. MIGO miroirs solaires sont des miroirs plats et plans, peuvent être utilisés comme miroirs de tour de puissance solaire, miroir solaire plat ou miroir de collecteur de Fresnel linéaires.
4. miroirs solaires font partie intégrante de toute technologie d'énergie solaire à concentration. Dans tous les cas, réflectivité et haute longévité sont primordiales.

Principales caractéristiques : tablea 04 Caractéristiques miroir solaire migo :

Réflectivité légère	3,2mm : jusqu'à 94% 4.0 mm : jusqu'à 93,6 %
Substrat de miroir	Verre de floteur ultra clair de faible teneur en fer
Tolérance d'épaisseur	±0,2 mm
Tolérance de dimension	± 0,5-1,0 mm
Poids spécifique (kg/m ²)	3,2 mm: 8 kg /m ² 4.0 mm : 10 kg/m ²
Propriété de miroir	Non-trempé
Surface	1 m ²

Détermination du nombre des miroirs :

Après nous effectuons des recherches, nous avons découvert que le rendement d'une centrale thermique ne dépasse pas de 30%, On propose qu'on ait gagné juste 25% comme énergie, et on à connue que un corps noir de surface S égale à 1 m^2 absorbe une puissance de 1000 w [44] donc chaque miroir donne 250 w (0,25 kw) comme énergie.

Nous savons aussi que la consommation moyenne d'électricité par habitant (Les normes internationales) est estimée à 25 kwh par jour = 1,0416 kw

1 seul habitant \longrightarrow 1,0416 kw

100000 habitant \longrightarrow 104160 kw

Alor :

1 un seul miroir \longrightarrow 0,25 kw

N miroirs \longrightarrow 104160 kw

Donc :

$N \text{ miroir} = (104160 \text{ kw}) / (0,25 \text{ kw}) = 416640 \text{ miroirs}$

Le nombre des miroirs dans la centrale thermique = **416640 miroirs**

Conclusion :

Pour assurer un bon fonctionnement et Pour avoir un meilleur rendement et aussi pour gagné beaucoup d'énergie il faut choisir une bonne qualité des miroirs solaire car elle joue un rôle très important pour la production de l'électricité, dans cette étude on à utilisé des miroirs migo qui sont des miroirs plus réfléchissants et très pratique.

conclusion générale

Conclusion générale :

L'exploitation de l'énergie solaire produite du rayonnement solaire, ressource inépuisable et non polluante, ne cesse de se développer de nos jours. Une raison majeure qui empêche l'utilisation massive de cette énergie est sa variabilité qui dépend des facteurs météorologique et induit donc une production intermittente.

Au niveau économique, la technologie des centrales solaires pour la production d'électricité est prête pour le marché. Plusieurs types d'installations ont déjà été testés et analysés avec succès. Une expérience non négligeable a été acquise dans ce domaine, qui pourra apporter une contribution significative aux installations futures.

L'Algérie peut capturer assez d'énergie solaire pour répondre aux besoins énergétiques notamment pour son développement durable, l'agriculture et l'exportation vers l'Europe.

L'Algérie peut aussi devenir un modèle pour d'autres pays grâce à la surface et le potentiel solaire, son désert du Sahara.

Référence :

1. [1] Énergies renouvelables et de récupération (ENR&R) [archive] Driee Ile-de-France, consulté en mars
2. [2] Pierre Pétrequin, Rose-Marie Arbogast, Anne-Marie Pétrequin, Samuel Van Willigen, Maxence Bailly, Premiers chariots, premiers araires : La diffusion de la traction animale en Europe pendant les IV^e et III^e millénaires avant notre ère, CNRS, coll. « Recherches Archéologiques », 16 novembre 2006, 397 p. (ISBN 2-271-06426-0)
3. [3] Energie-Renouvelable.tv.htm
4. [4] ^{a, b, c et d} (en) [PDF] Agence internationale de l'énergie (AIE - en anglais : International Energy Agency - IEA) Key World Energy Statistics 2016 [archive], 16 octobre 2016.
5. [5] Batiactu, 1,2 million de salariés dans les énergies renouvelables en Europe [archive]
6. [6] Prim, portail de prévention des risques majeurs [archive], voir aussi Manicore [archive], site de Jean-Marc Jancovici
7. [7] Il y a beaucoup d'énergies renouvelables, mais pas ou peu d'énergies propres, sur le site de la DRIEdu Limousin (2007).
8. [8] Conclusions du programme européen CARBOSOL [archive] (doc. CNRS)
9. [9] [PDF] Poussières fines - Questions et réponses - État en janvier 2013 [archive], page 21 (doc. OFEV)
10. [10] À quoi ressemblerait un monde « énergétiquement vertueux » ? [archive]
11. [11] (en) Clean household energy can save people's lives [archive], OMS, mars 2014
12. [12]. Science et Vie, mars 2008
13. [13]. Jean-Marc Jancovici [archive], sur le site manicore.com
14. [14]. Le plein s'il vous plaît ! - La solution au problème de l'énergie [archive], (ISBN 978-2020857925).
15. [15]. Bent Sorensen, Renewable Energy 3 e édition, Elsevier Science & Technology Books
16. [16]. Énergies renouvelables - Multiplication des objectifs dans le monde [archive], La lettre des énergies renouvelables du 25/06/2015.
17. [17]. Adoption du programme des énergies renouvelables et de la politique d'économie d'énergie » [archive] (consulté le 23 juillet 2011)
18. [18] « Programme algérien de développement des énergies nouvelles et renouvelables et de l'efficacité énergétique » [archive] (consulté le 23 juillet 2011)
19. [19] « Programme Algérien de Développement des Énergies Nouvelles et Renouvelables et de l'Efficacité Énergétique (Liste des projets) » [archive] (consulté le 23 juillet 2011)
20. [20] Algérie - Renouvelables au programme [archive], La lettre des énergies renouvelables, 17/03/2015.
21. [21] Miroir ardent de Louis XIV [archive] Science.chateauxversailles.fr, consulté le 1^{er} septembre 2013

22. [22] Les cellules solaires photovoltaïques sont des semi-conducteurs capables de convertir directement la lumière en électricité. [archive] Sur le site lénergie-solaire.fr - consulté le 12 mai 2012
23. [23] L'Inde et la France lancent l'Alliance internationale pour l'énergie solaire [archive], 1^{er} décembre 2015
24. [24] Desertec Industry Initiative et Sonelgaz conviennent de coopérer étroitement dans le domaine des énergies renouvelables
25. [25] Algérie: Énergie solaire - Une filière prometteuse, Samira Imadalou, La Tribune, 18 juillet 2011
26. [26] Présentation New Energy Algeria, Site officiel de la NEA, Consulté de 18/07/2012
27. [27] Énergies renouvelables : Des panneaux solaires made in Algeria disponibles sur le marché, La rédaction, El Moudjahid, 15 février 2012
28. [28] « Des énergies décarbonées pour un futur durable » - 19, Énergies du XXI^e siècle, CEA
29. [29] PDF Elie Gouzien
30. [30] Nouveau-Mexique - Areva teste les sels fondus comme fluide caloporteur [archive], site energies-renouvelables consulté le 6 juin 2014.
31. [31] (en)Technology Roadmap: Solar Thermal Electricity [archive], AIE, 29 septembre 2014
32. [32] EurObserv'ER : Baromètre solaire thermique et thermodynamique [archive], mai 2014.
33. [33] Baromètre photovoltaïque [archive] - EurObserv'ER, avril 2014 [PDF]
34. [34] (en)World : Electricity and Heat for 2014 [archive], Agence internationale de l'énergie, octobre 2016.
35. [35] (en)Concentrating Solar Power Projects in South Africa [archive], NREL.
36. [36] (en)Concentrating Solar Power Projects in South Africa [archive], NREL.
37. [37] Accueil > LE PLAN SOLAIRE MAROCAIN > Dates Clés [archive], sur le site masen.org.ma
38. [38] Accord pour la réalisation d'une tour pour le développement de l'énergie solaire à Bougezoul [archive], 15 octobre 2012
39. [39] J, Bernard. Energie solaire, calculs et optimisation. Ellipse Edition Marketing. Paris. (2004).
40. [40] I, Zeghib. Etude et réalisation d'un concentrateur solaire parabolique, thèse de magistère, Université de Constantine. (2005).
41. [41] P, H, Communay. Héliothermique, Le gisement solaire, méthodes et calculs. Groupe de Recherche et d'Édition, France. (2002).
42. [42] R, Bernard; G, Menguy ; M, Schwartz. Le rayonnement solaire, conversion thermique et application. Technique et Documentation, Paris. (1979).
43. [43] M, Daguinet. Les séchoirs solaires. Théorie et Pratique. Unesco (1985).
44. [44] nouvelles technologies de l'énergie 1_ les énergies renouvelables ; jean-claude sabonnadière