

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Ecole Nationale Supérieure Polytechnique
Département de Génie Chimique

MEMOIRE DE
POST-GRADUATION SPECIALISEE
« Economie de l'Energie, Maîtrise et Applications »

Intitulé :

LA PRODUCTION DE L'ELECTRICITE PAR
CENTRALES THERMOELECTRIQUES SOLAIRES

900025

Proposé et encadré par :

Pr. Ahmed Khedim

Institut Solaire de Jülich

Allemagne

Etudié et Présenté par : M^{me} AGROUM Amel

M^{elle} MEZOUANI Nacera

Soutenu le 24 Novembre 2008 devant la commission d'examen :

Président : Pr. C.E. CHITOUR

Examineur : Pr. M. HADDADI

Rapporteur : Pr. A.KHEDIM

Invité : Dr M. BELHAMEL (CDER)

PGS1008

2008



G000025

À mon très cher regretté père

À mes chers regrettés frères

À ma très chère mère

À ma très chère sœur Fatouma

*À mes sœurs Ratiba, Karime, Malika et Lynda et à
leurs époux*

À mes neveux et nièces

Et à mes amis (ies) qui me sont chers

Nacera MEZOUANI

À mon mari Omar,

À ma chère fille Sérine

À mes chers parents et grands parents

À mon frère

Et à tous mes amis (ies)

Amel AGROUM

التوليد الكهربائي عن طريق محطات الطاقة الحرارية الشمسية
La production de l'électricité par centrales thermoélectriques solaires
Electrical Power Generation by Thermosolar Plants

ملخص:

هذا العمل يصف الطرق المختلفة لتوليد الكهرباء عن طريق محطات الطاقة الحرارية الشمسية التي تقوم بتركيز هذه الأشعة لسبب انخفاض كثافتها. ومن هنا جاءت تسميتها ب: "تركيز الطاقة الشمسية". في الجزء الأول من هذه الذاكرة، قدمنا الشمس كمصدر من مصادر الطاقة الطبيعية، نظيفة موزعة بالتساوي على العالم كله تقريبا. لقد أظهرت أن الطاقة الشمسية من الموارد الأساسية ضروري الحفاظ عنها بسبب الضوء والحرارة شروط البيولوجيا التي ننتمي إليها. ويركز الجزء الثاني على تاريخ الطاقة الشمسية الحرارية، وتطورها في ميدان العلوم والتكنولوجيا الشمسية المكثفة عن طريق تقديم ثلاثة أنواع من المحطات، وهي، محطة بارابولكية محطة سلندرو بارابولكية ومحطة "برج" (تور) التي دفعنا إلى أكثر من الاهتمام، لأنه موضوع مذكرتنا. وأخيرا حاولنا ضبط أبعاد تقريبية لتصميم محطة "برج" من الطاقة الشمسية في شمال الجزائر، باستقراء البيانات من الورقة التقنية لمحطة "Jülich الألمانية" التي كانت بحوزتنا.

ABSTRACT :

The present work describes the various processes to generate electricity by solar thermal power plants in the industrial scale. Because of the low energy density of solar radiation, the technology is based on its concentration. Hence the name: Concentrating Solar Power "CSP". In the first part of this report, we presented this natural energy source, clean and inexhaustible equitably distributed over almost the entire globe: the sun. We have shown that the solar resource is essential to keep land of light and heat conditions of biology which we belong. The second part focuses on the history of the solar thermal and evolution of the science of solar concentrator technology by presenting three types of power plants, namely cylindroparabolic, parabolic bowls and the central tower which we have paid much more attention, because it is the subject of our work. Finally we tried to make a rough design of a solar power tower in north of our country, by extrapolating the data of technical card of the power plant of Jülich "Germany" which was provided us.

RESUME

Le présent travail décrit les différents processus pour produire de l'électricité par centrales thermoélectriques solaires, à l'échelle industrielle. En raison de la faible densité énergétique du rayonnement solaire, la technologie est basée sur sa concentration. D'où le nom : « centrales solaires à concentration » ou Concentrating Solar Power « CSP ». Dans la première partie de ce mémoire, nous avons présenté cette source énergétique naturelle, propre inépuisable et équitablement répartie sur presque tout le globe : le soleil. Nous avons montré que cette ressource solaire est indispensable au maintien sur terre des conditions lumineuses et thermiques de la biologie dont nous faisons partie. La deuxième partie, porte sur l'historique de la thermie solaire et l'évolution de la science de la technologie des concentrateurs solaires en présentant les trois types de centrales, à savoir, les cylindroparaboliques, les cuvettes paraboliques ainsi que la centrale à tour à laquelle nous avons accordé beaucoup plus d'attention, car c'est le thème de notre mémoire. En dernier nous avons tenté de faire un dimensionnement grossier d'une centrale solaire à tour au nord de notre pays, en extrapolant sur les données de la fiche de la centrale de Jülich « Allemagne » qui a été mise à notre disposition.

SOMMAIRE

	<u>Pages</u>
INTRODUCTION.....	5
I - APERÇU DE LA RESSOURCE SOLAIRE	6
I-1- Le Soleil.....	6
I-2- Le Mouvement Du Soleil	10
I-3- Le Soleil et ses Caracteristiques	11
I-3-1- Le soleil: ses dimensions et ses composants.	11
I-3-2- Structure solaire.....	12
I-3-3- Fusion Du Noyau	14
I-3-4- Calcul De La Puissance Solaire	14
I-4- L'irradiation Solaire	15
II- INTEGRATION DES SOURCES D'ENERGIE RENOUVELABLE EN ALGERIE....	21
II-1- Ressources de l'énergie solaire et ses potentialités	23
II- 2- Potentiel Solaire En Algérie	23
III- LA PRODUCTION D'ELECTRICITE D'ORIGINE SOLAIRE.....	24
III- 1- La technologie solaire thermique : la plus courante.....	24
III- 2- La technologie solaire thermodynamique (à concentration)	26
III-2-1- Les centrales à capteurs cylindroparaboliques	30
1- Principe de fonctionnement	31
2- Le champ de capteurs solaires.....	34
3- Le récepteur	35
4- La technologie.....	35
5- Le transport et le stockage de la chaleur	36
III-2-2- Les centrales à capteur en cuvette parabolique/moteur Stirling	39
1-Principe de fonctionnement	40
2-Concentrateur	41
3-Récepteur	41
III-2-3- Les centrales thermoélectriques solaires à tour	46
1- Principe de fonctionnement d'une Centrale Solaire à Tour	46
2- Le champ d'héliostats	48
3- Récepteur	48
4- Fluide caloporteur et récepteur solaire	49
5- Le stockage de la chaleur et le transport.....	52
6- Le projet d'une tour solaire : PHOEBUS	54
7- Nouveau concept d'une tour.....	56
IV- LES EXPERIENCES TECHNOLOGIQUES	58

V – COMPARAISON DES TECHNOLOGIES DE LA PRODUCTION THERMIQUE SOLAIRE.....	60
VI- GISEMENT ET IMPACT ENVIRONNEMENTAL.....	60
VII- DIMENSIONNEMENT D'UNE CENTRALE A TOUR EN ALGERIE.....	61
CONCLUSION :	63
ANNEXE SUR LE CALCUL DE DIMENSIONNEMENT.....	65
BIBLIOGRAPHIE.....	68

INTRODUCTION

➤ Contexte énergétique mondial :

Le 21^{ème} siècle est une période de transition dans le secteur de l'énergie. La génération dont nous faisons partie souhaite que cette transition soit conçue dans une logique de développement durable, tant du point de vue de la préservation de l'environnement liée à la réduction des émissions des gaz toxiques et à effet de serre que de la pérennité des sources d'approvisionnement énergétique.

La crise de l'énergie des années 70 due à une hausse précipitée du prix du pétrole a conduit l'homme à s'intéresser, pour la première fois, aux énergies de sources renouvelables, au premier rang desquelles l'énergie solaire. Les principales caractéristiques de l'énergie solaire ayant suscité l'intérêt pour son exploitation étaient sa gratuité, sa répartition équitable et sa disponibilité sur une grande partie du globe terrestre, mais la principale caractéristique de l'énergie solaire se situe dans son abondance : Le soleil fournit à la terre environ 18000 fois plus d'énergie que l'humanité entière en utilise aujourd'hui.

Cette crise fut suivie par l'euphorie de la découverte d'une source d'énergie alternative, mais on s'est vite aperçu que l'énergie solaire, contrairement à l'idée répandue, n'est pas tout à fait gratuite, et, en raison de sa densité énergétique relativement faible (quelques centaines de Watt par m²). L'utilisation de cette source énergétique nécessite un investissement de départ souvent plus important que celui consacré aux énergies conventionnelles. Au fur et à mesure que les réserves des combustibles de sources fossiles s'épuisent et qu'à moyen terme l'offre ne répondra plus à la demande, les énergies de source renouvelables deviendront alors compétitives et prendront la place qui leur est due sur le marché mondial de l'énergie. Nous assistons déjà, aujourd'hui au commencement de ce processus, où le prix du kWh_{élec} produit à partir de l'énergie solaire thermique est devenu compétitif, depuis que le baril de pétrole dépasse les 100 US\$. Le développement de l'utilisation de l'énergie solaire, dans notre pays particulièrement sera donc lié non seulement à ses retombées économiques mais aussi à ses impacts environnementaux et de qualité de vie.

Les projets de recherche sur les processus de production de l'énergie de source solaire pour développer une technologie alternative à celle basée sur les combustibles fossiles et sur le nucléaire, ont depuis longtemps motivé les scientifiques et les bailleurs de fonds tels les organismes de la Communauté Européenne, la Banque Mondiale etc.

La technologie de production de l'hydrogène qui est tout à la fois considérée comme combustible et comme stockage énergétique, se situe au centre de ces recherches. Certes, en ce début du 21^{ème} siècle, l'alimentation énergétique est toujours assurée par les combustibles fossiles, particulièrement les hydrocarbures, mais les réserves de ces derniers, sont limitées et leur utilisation reste toujours tributaire de la pollution atmosphérique qui menace de plus en plus l'équilibre biologique et climatique à l'échelle de notre planète : augmentation des gaz à effet de serre et de l'ozone dans la basse atmosphère, acidification des forêts, détérioration des monuments historiques etc. En outre, on estime qu'il est irresponsable, à l'encontre des futures générations, de mettre en combustion ces hydrocarbures auxquels la nature a consacré des millions d'années pour leur production ; en d'autres termes, le pétrole et le gaz naturel sont trop précieux pour être brûlés.

Dans le secteur de l'énergie, les experts sont unanimes, aujourd'hui, de penser qu'à long terme, l'eau (H₂O) pourrait devenir la première matière énergétique. Son composant, l'hydrogène (H₂) est un porteur d'énergie parfait, à la différence du pétrole, du gaz naturel ou du charbon, l'hydrogène n'est pas disponible. Ce porteur d'énergie est lié chimiquement dans la molécule d'eau et dans d'autres produits organiques. Pour utiliser l'hydrogène en tant que combustible, il faut au préalable l'extraire de ces substances où il est solidement fixé, à long terme, l'extraction de l'hydrogène de la molécule d'eau et son utilisation comme combustible sont incontournables, puisque, l'eau est partout disponible et sa décomposition chimique en oxygène et en hydrogène ne dégage aucun gaz toxique, polluant ou à effet de serre.

Ce processus qui consiste à dissocier la molécule d'eau (H₂O) nécessite de la chaleur à très hautes températures, pour y faire le recours aux technologies des concentrateurs solaires et de la thermochimie catalytique [1]. Ces travaux, si modestes soient-ils, doivent être considérés comme une contribution à prendre conscience de l'importance que jouera, à moyen terme, la science de la technologie liée à cette matière première, présente sur notre territoire qui est l'Energie Solaire.

I - APERÇU SUR LA RESSOURCE SOLAIRE

I-1- Le soleil

Le soleil est une sphère gazeuse composée de (75%) d'Hydrogène, de (24,9%) d'Hélium et d'une fraction d'éléments plus lourds. Son diamètre est de 1 392 530 km (108 fois celui de la Terre), sa masse est de l'ordre de 2.10^{27} tonnes.

Le soleil est un réacteur en fusion. Toute l'énergie du Soleil provient des réactions thermonucléaires qui s'y produisent dans un noyau, elles transforment à chaque seconde 564 106 tonnes d'hydrogène en 560 106 tonnes d'Hélium, la différence de 4 millions de tonnes est dissipée par effet de masse sous forme d'énergie transmise par rayonnement ($E = mc^2$), ce qui représente une puissance totale de $3.7 \cdot 10^{20}$ MW.

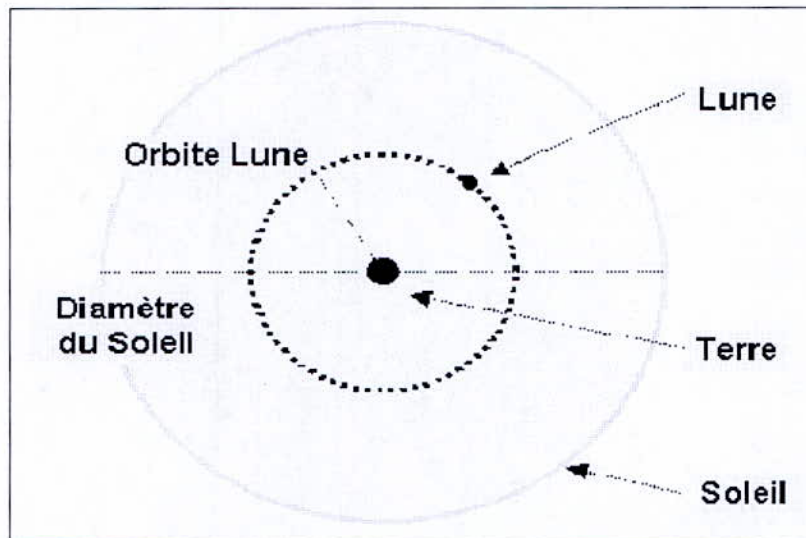


Figure 1 : Dimension de la Terre par rapport au soleil

Notre vie sur Terre dépend entièrement du Soleil, car cette étoile nous fournit de l'énergie, en grande partie sous forme de lumière. Cette quantité colossale d'énergie libérée nous parvient sur terre sous forme d'ondes électromagnétiques en 8 minutes et 23 secondes, le temps nécessaire à la lumière solaire pour parcourir les quelques 147 à 150 millions de kilomètres qui nous séparent du Soleil. Mais une partie de la radiation solaire est absorbée par l'ozone au niveau des UV, par la vapeur d'eau et le CO_2 au niveau des infrarouges.

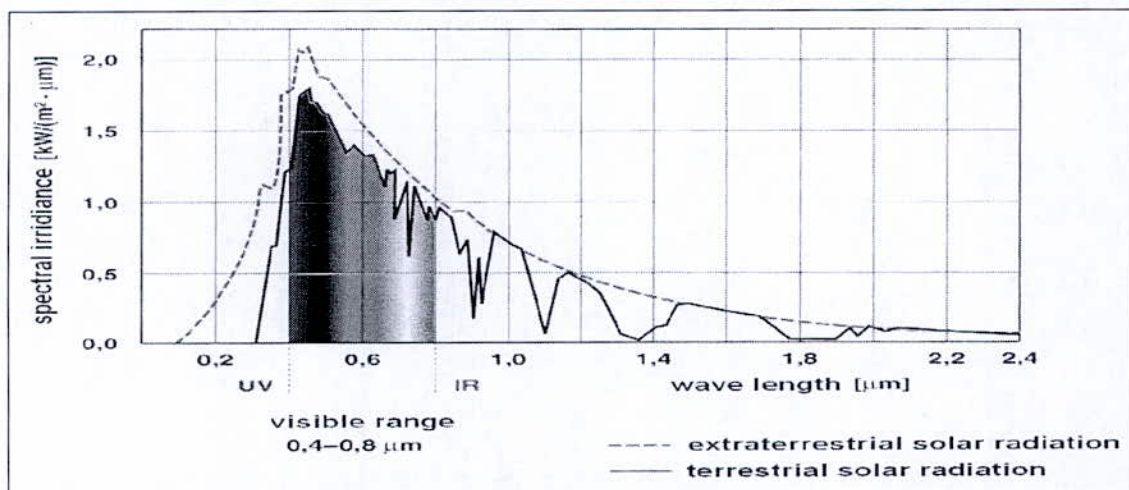


Figure 2 : Distribution spectrale de la radiation solaire en dehors de l'atmosphère terrestre et au niveau de la surface de la terre

L'ensemble de la radiation solaire incidente comprend la radiation solaire directe et la radiation déviée de sa trajectoire durant son parcours vers la terre et qu'on appelle la radiation diffuse, le tout sous forme de radiation solaire globale. Une partie des radiations solaires directes est réfléchiée au niveau de la surface terrestre, particulièrement par les glaciers des deux pôles (Albédo).

Au sol, le spectre solaire se compose de:

- 56% d'infrarouges
- 39% de lumière visible
- 5% d'ultraviolets

L'énergie solaire est indispensable au maintien sur Terre des conditions lumineuses et thermiques que nécessite la biologie dont nous faisons partie. Par exemple, la photosynthèse utilise cette énergie pour fournir aux plantes chlorophylliennes de la matière organique.

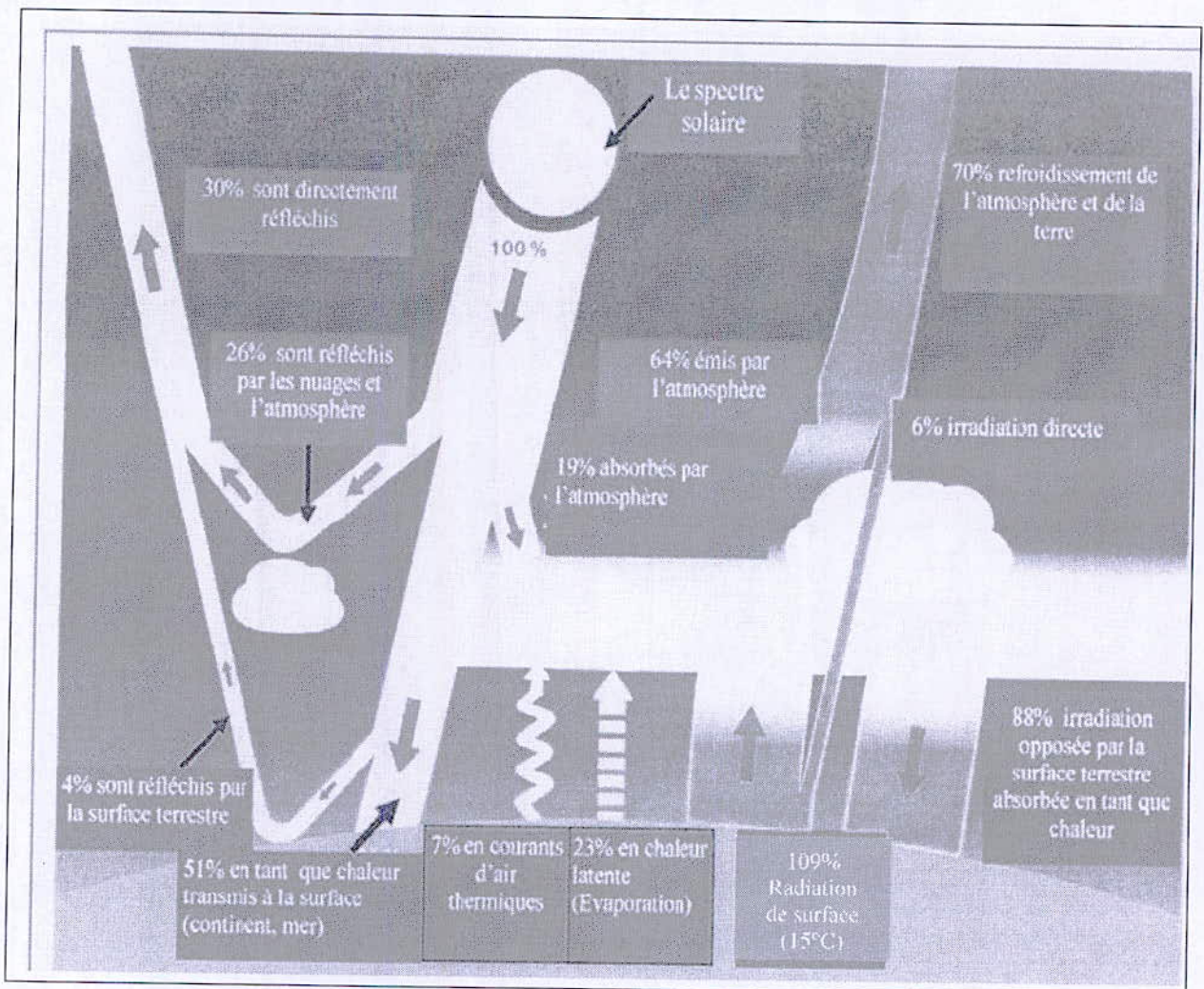


Figure 3 : Différentes transformations que subissent les rayonnements solaires
(Source : Christoph Buchal ; Energie, Nature, Humanité, Technique Environnement, Climat, avenir)

La figure 3 montre que :

- 30% du rayonnement solaire incident sont directement réfléchis dans l'espace, en grande partie au niveau des nuages et de la couche atmosphérique.

- 19% sont absorbés par l'atmosphère et servent à réchauffer les masses d'air, au-dessus de nous et dont les composants principaux (78% azote, 21% oxygène, 1% argon) sont transparents au spectre solaire. L'absorption est produite plutôt par les traces de gaz comme la vapeur d'eau, (62%), le CO₂ (22%), et l'ozone (7%), le méthane etc.

- En fin de compte, 51 % du rayonnement solaire atteignent la surface terrestre et réchauffent les continents et les mers, et les maintiennent à une température moyenne de +15°C, ce qui conduit à un réchauffement des masses d'air et à une évaporation de l'eau, particulièrement au niveau des océans tropicaux. En plus, les continents et les masses d'eau émettent de la chaleur. A une température de surface de 288°K (15°C), la loi physique sur la radiation (loi du T⁴ du corps noir) conduit à une valeur inattendue correspondant à 109% (et non 100%), donc plus élevée que celle de la radiation solaire. Fort heureusement, cette chaleur par radiation ne va pas se perdre dans l'univers mais elle est en grande partie absorbée par l'atmosphère. Cette dernière reflète à son tour, à travers une couverture dense de nuages chauds en direction de la terre, environ deux tiers (2/3) de cette énergie par radiation à sens inverse nous atteint d'une hauteur de moins de 100 mètres Cette énergie confinée entre les deux radiations opposées est très importante.

- Avec ses 88%, la radiation inverse est en moyenne plus importante que la radiation directe environ 51%, lorsqu'on considère la moyenne annuelle globale.

Sans la présence de ces traces de gaz comme la vapeur d'eau et le CO₂ et tant d'autres, la température de la surface terrestre varierait entre -15 et -18°C, par conséquent de 30 à 33 degrés plus froide. C'est la raison pour laquelle, l'effet de serre naturel est d'une importance décisive pour la biologie dont nous faisons partie.

En récapitulant : en supposant que la radiation solaire moyenne annuelle est $S_0 = 342 \text{ W/m}^2 = 100\%$

- 109% de $S_0 = 373 \text{ W/m}^2$ représentent la quantité de chaleur émise par la surface terrestre.
- 6% $S_0 =$ émis vers l'univers
- 64 % sont émis par l'atmosphère (pour refroidir).

En fin de compte 100% de la radiation retournent vers l'espace. Une partie de l'énergie par radiation reste présente durant un certain temps entre la surface du sol c'est la « couverture chaude » que représente l'atmosphère et qui rend la vie agréable sur terre. Mais le bilan énergétique serait normalement en équilibre s'il n'y avait pas, depuis environ un siècle et demi, une augmentation des concentrations de ces traces de gaz, telles que la vapeur d'eau, le CO₂, le CH₄, augmentation due aux activités de l'homme. Cela conduit, d'une manière irréversible à une augmentation de la radiation dite inverse qui représente aujourd'hui 301 W/m², soit 88% de la radiation solaire. On estime que depuis 1850, cette valeur a augmenté de 4 W/m² en corrélation avec la concentration du CO₂ qui est passée de 280 à 385 ppm (particules par million). En conséquence, la température moyenne globale a augmenté de 0,8°C, depuis le commencement de la période postindustrielle.

Le Soleil rayonne sur la Terre une puissance moyenne de 342 Watt/m². L'énergie lumineuse issue du Soleil est à la base de la majeure partie des formes d'énergie disponibles : énergies chimique, thermique, hydraulique, électrique. Par exemple, les combustibles fossiles, tels que le charbon, le gaz naturel et le pétrole, ont été formés à la suite d'un stockage d'énergie solaire par des organismes, sur une période estimée à des millions d'années.

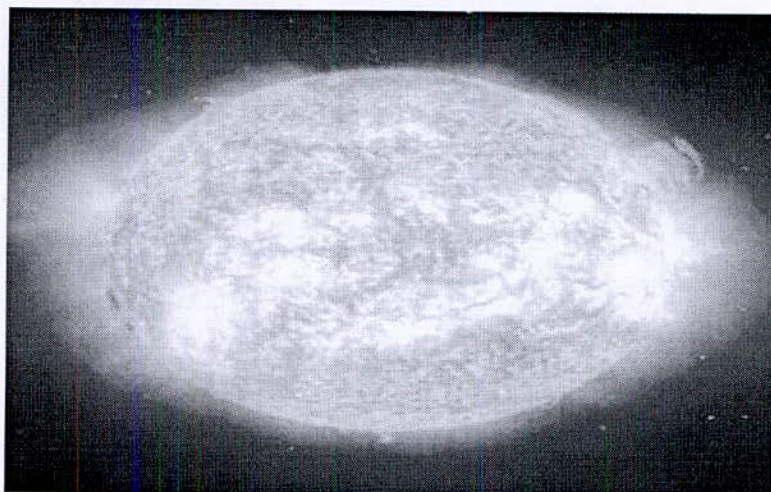


Figure 4 : L'astre central de notre système planétaire
(Source : NASA Goddard Laboratory for Atmospheres)

1-2- Le mouvement du soleil

Vu de la Terre, le Soleil est animé de deux mouvements apparents: un déplacement lent sur l'écliptique, de période annuelle, dû au mouvement de la Terre sur son orbite, et un déplacement diurne, d'Est en Ouest, correspondant à la rotation de la Terre sur elle-même. La terre parcourt son orbite autour du soleil en 365 jours, à une vitesse moyenne de 29.8 km/s soit 107 000 km/h.

La forme sphérique de la Terre, sa rotation, l'inclinaison de son axe de rotation, son mouvement de révolution autour du soleil, déterminent la distribution du rayonnement solaire. L'insolation d'une région est fonction de sa latitude, de sa topographie et de la saison durant laquelle on effectue les mesures.

1-3- Le soleil et ses caractéristiques

La terre reçoit annuellement dix fois plus d'énergie solaire que la totalité de toutes les réserves théoriques des hydrocarbures accumulées dans le sous-sol depuis des millions d'années. La quantité d'énergie exploitable de ces réserves ne représente que 0,5% de ce que nous recevons chaque année par rayonnement solaire. Le tableau ci-dessous illustre les rapports suivants :

Tableau 1 : Comparaison de la quantité d'énergie solaire disponible et les réserves mondiales en hydrocarbures

Désignations	EJ / an	TEC / an	%
Quantité d'énergie solaire	5.6×10^6	1.9×10^{14}	100%
Réserves théoriques mondiales en hydrocarbures	3.5×10^5	1.2×10^{13}	6%
Réserves économiquement exploitables	2.6×10^4	8.9×10^{11}	0.5%

TEC=Tonne Equivalent de Charbon

$$1\text{EJ} = 10^{18} \text{ J} = 34.15 \times 10^6 \text{ TEC}$$

Le budget énergétique de notre planète est assuré en très grande partie par le soleil. Il est donc normal de s'intéresser, d'abord, à cette étoile dont nous dépendons si nous voulons mieux connaître les processus de production et de transport de l'énergie solaire.

1-3- 1- Le soleil: ses dimensions et ses composants.

Diamètre	1 390 000 km (environ 109 fois celui de la terre)
Masse	$2 \times 10^{33} \text{ g} = 2 \times 10^{27} \text{ t}$ (environ 330 000 fois la masse de la terre)
Densité moyenne	$1.4 \text{ g} / \text{cm}^3$
Etat	gazeux
Composants	75% Hydrogène
	24,9% Hélium
	0,1% Reste
Gravitation à la surface	$28 \bullet \text{ g}$ (g = la gravitation terrestre)

Température à la surface	5785 K
Température au noyau	$8+40 \cdot 10^6$ K
Densité au noyau	$80 \div 100 \text{ g / cm}^3$
Pression au noyau	10^{11} bar
Rotation	(aucune ressemblance avec un corps solide)
Equateur environ	27 jours par rotation
Région polaire	30 jours par rotation

1-3-2- Structure solaire

La quantité d'énergie libérée par les réactions thermonucléaires au niveau du noyau est transportée sous forme de rayons Gamma et de rayons X sur une distance correspondant aux deux tiers du rayon du soleil, à partir de là, le transport d'énergie se fait par convection.

La **photosphère** transmet la lumière solaire. Son épaisseur ne dépasse pas les 300 km. La température moyenne de cette région est environ 5800°K . La couche suivante n'est pas visible et porte le nom de **chromosphère**. Son épaisseur est estimée à quelques milliers de km. La région d'intersection entre la photosphère et la chromosphère est relativement froide ($4\,000^\circ\text{K}$). A partir de là, la température monte de nouveau et atteint plusieurs centaines de milliers de degrés. La dernière couche solaire est la **Couronne**. Elle a plusieurs millions de km d'épaisseur. La température à l'intérieur de la couronne s'élève à plus d'un million de degrés. Les causes de cette énorme augmentation de température ne sont pas exactement connues.

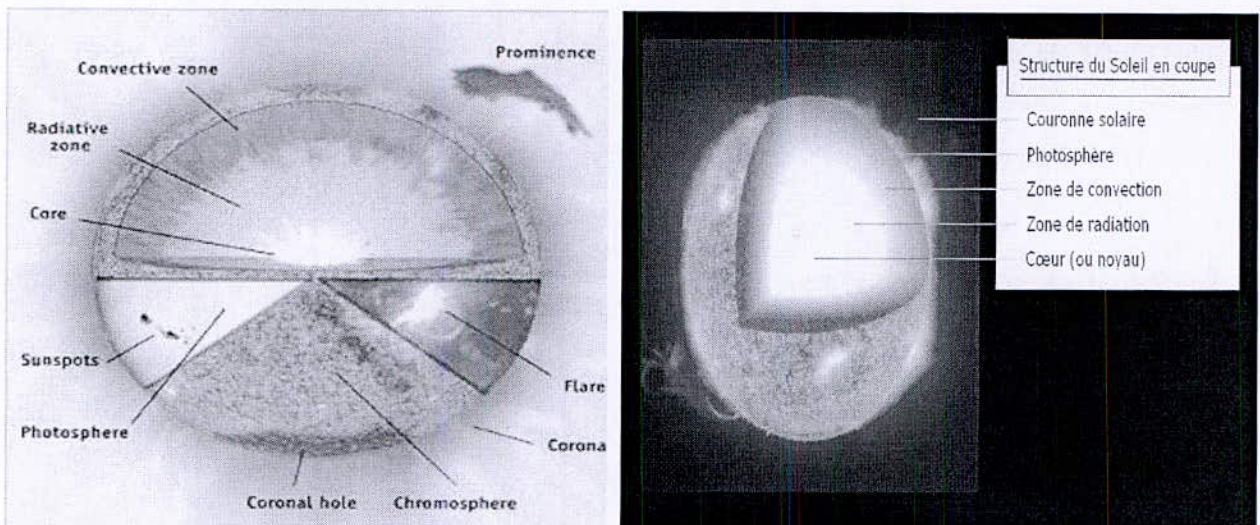


Figure 5: Structure du Soleil

La stabilité du soleil est due à cet équilibre mécanique entre la gravitation qui agit vers l'intérieur et les différentes pressions produites par les composants de gaz et par l'irradiation qui agissent au sens inverse.

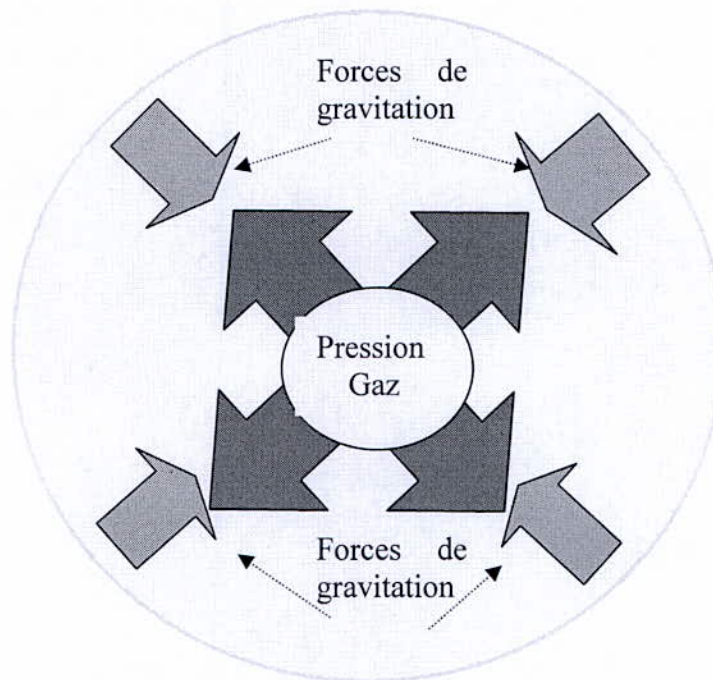


Figure 6: Equilibre des forces dans la région solaire

Retenons que le soleil est un réacteur en fusion qui fournit continuellement de l'énergie par rayonnement. Il utilise l'hydrogène comme " combustible ". Dans la réaction thermonucléaire, l'hydrogène fusionne en hélium.

La différence d'énergie de liaison entre les protons de l'hydrogène et ceux de l'hélium correspond à cette énergie libérée sous forme de rayonnement (Effet de Masse), estimée à $3.7 \cdot 10^{26} \text{ j / s} = 3.7 \cdot 10^{20} \text{ MW}$. Cet effet de masse a fait perdre au soleil, durant les cinq milliards années de son existence, environ 3 ‰ de sa masse.

La production d'énergie et la transformation du cycle solaire sont dépendantes de la température, cette production d'énergie augmente avec la température. Le cycle Proton-Proton y joue un grand rôle, quatre protons donnent naissance à un noyau d'hélium. Un autre cycle devait exister, (Carbone-Azote) dont l'existence suppose la présence du carbone. Le rôle de ce cycle n'est pas aussi important que celui du premier. Tous les deux cycles consomment de l'hydrogène et produisent de l'hélium. A la température de 15 à 20 millions de degrés, la vitesse des noyaux de l'hydrogène (Protons) est de 600 km/ s. mais la collision de deux protons qui mène à leur fusion

de durée en moyenne 14 millions d'années. Ce n'est qu'après 50 millions d'années environ que le cycle proton-proton est terminé.

1-3-3- Fusion du noyau

Qui dit fusion du noyau, dit perte de masse, l'atome qui résulte de cette fusion possède une masse légèrement plus petite que celle de ses composants. Cette différence ne se situe qu'au niveau du noyau. L'atome de l'hélium ${}^4_2\text{He}$ qui se compose de 2 protons, 2 neutrons et 2 électrons possède une masse atomique de 4.00260, alors que la somme des masses de ses composants est de 4.03424. La différence de ces deux valeurs 0.03164 correspond à l'effet de masse.

2 protons	à	1.00759	= 2.01518
2 neutrons	à	1.00898	= 2.01796
2 électrons	à	0.00055	= 0.00110
Total			4.03424
Masse atomique de He			4.00260
m			0.03164

La perte de masse due à la formation du noyau s'y retrouve en tant qu'énergie de liaison. L'effet de masse correspond exactement à cette différence d'énergie de liaison.

1-3-4- Calcul de la puissance solaire

La théorie d'Einstein dit qu'il y a une équivalence entre la masse et l'énergie d'après la formule:

$$E = m C_0^2.$$

$$C_0 = \text{vitesse de la lumière} \quad 3 \cdot 10^8 \text{ m / s}$$

$$m = \text{masse} \quad \text{kg}$$

Cela signifie que la masse peut être transformée en énergie et inversement. Cette transformation de la masse en énergie se déroule par fusion ou par fission (fissure du noyau).

➤ Calcul de la puissance solaire d'après la perte de masse Δm_s

$$P_s = E_s / t = \Delta m_s C_0^2$$

$$\Delta m_s / s = 4 \cdot 10^9 \text{ kg / s}$$

$$E_s = \text{énergie solaire}$$

$$P_s = 4 \cdot 10^9 \times (3 \cdot 10^8)^2 = 3.6 \cdot 10^{26}$$

$$[\text{kg/s} \times \text{m}^2/\text{s}^2 = \text{kg} \times \text{m} / \text{s}^2 \times \text{m} / \text{s} = \text{Nm/s} = \text{J/s} = \text{W}]$$

$$P_s = 3.6 \times 10^{26} \text{ W} = \underline{\underline{3.6 \times 10^{20} \text{ MW}}}$$

La valeur de cette puissance solaire est confirmée par la voie de calcul suivante:

➤ Calcul de la Puissance solaire P_s à partir de la surface du soleil et de son l'intensité

$$P_s = I_s * F_s$$

$$F_s = \text{surface du soleil} = \pi * D_s^2$$

$$D_s^2 = 1.39 * 10^9 \text{ m} \quad F_s = 6.07 * 10^{18} \text{ m}^2$$

$$P_s = 62.5 * 10^6 * 6.07 * 10^{18}$$

$$P_s = 3.8 * 10^{26} \text{ W} = \underline{\underline{3.8 * 10^{20} \text{ MW}}}$$

Cette énergie n'aurait représenté, en vérité, que 0.1% de l'énergie libérée si une transformation complète de la matière en énergie avait eu lieu.

➤ Calcul de l'intensité solaire I_s :

$$I_s = \delta * T_s^4$$

δ = Constante de Stéfan-Boltzmann

$$\delta = 5.67 * 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{K}^4$$

T_s = Température à la surface solaire

$$T_s = 5885 \text{ K}$$

I_s = Intensité de l'irradiation solaire W/m^2

$$I_s = 5.67 * 10^{-8} * 5.785^4 * 10^{12} = \underline{\underline{62.5 * 10^6 \text{ W/m}^2}}$$

I-4- L'irradiation solaire

I-4-1- Irradiation hors atmosphère :

L'irradiation solaire atteint la couche extérieure de l'atmosphère avec une intensité de $I_0 = 1342 \text{ W / m}^2$ appelée **Constante Solaire**.

➤ Calcul de la constante solaire I_0

L'intensité du rayonnement diminue avec le carré de son éloignement. Lorsque l'irradiation atteint la terre, elle s'est répartie sur une surface d'une sphère ayant pour rayon la distance terre-soleil (une **unité astronomique** = 1 UA)

$$P_s = I_s * F_s = I_0 * \pi (2 \text{ UA})^2$$

$$I_0 = I_s * F_s / (4 \pi \text{ UA}^2)$$

$$\text{UA} = \text{Unité Astronomique} = 1.5 * 10^8 \text{ km}$$

$$I_0 = 62.5 * 10^6 * 6.07 * 10^{18} / (4 \pi * 2.25 * 10^{22})$$

$$\underline{\underline{I_0 = 1342 \text{ W / m}^2}}$$

La Constante Solaire représente la valeur moyenne de l'irradiation solaire extérieurement à l'atmosphère terrestre. Elle est basée sur la distance moyenne **Soleil-Terre**.

➤ Puissance moyenne de l'irradiation à l'échelle du globe:

$$P_T = I_0 * \pi / 4 * D_T^2$$

$$D_T = \text{Diamètre de la terre} = 12760 \text{ km} = 1.276 * 10^7 \text{ m}$$

$$P_T = 1342 * \pi / 4 * 1.276^2 (10^7)^2$$

$$P_T = 1.72 * 10^{17} \text{ W} = 1.72 * 10^{11} \text{ MW}$$

➤ Répartition de l'irradiation solaire suivant l'étendue de la bande spectrale.

Tableau 2 : Répartition de l'irradiation solaire

Etendue du spectre	Longueur d'onde [μm]	%
Ultraviolet	0 à 0.38	7
lumière visible	0.38 à 0.78	47.3
Infrarouge	0.78 à ∞	45.7

Représentation de la densité de l'irradiation solaire hors atmosphère classifiée en trois bandes de longueur d'onde (classification standard de la NASA)

1-4-2- L'irradiation terrestre.

L'atmosphère terrestre n'est transparente au rayonnement solaire que sur deux fenêtres, la fenêtre la plus importante sur le plan énergétique est la fenêtre optique. L'irradiation solaire par cette fenêtre optique perd de son intensité en traversant l'atmosphère par les effets suivants:

- Réflexion du rayonnement par l'atmosphère et par la surface terrestre.
- Dispersion du rayonnement solaire à travers les composants de l'air.
- Absorption du rayonnement solaire par l'atmosphère.

90% de l'énergie solaire que reçoit la terre s'étend sur une région spectrale de 0,3 à 1,5 μm .

Ω (Wm^{-2} , μm^{-1}).

1-4-3- Irradiation directe, diffuse et réfléchie

Pour pouvoir dimensionner une installation solaire, il est nécessaire de connaître la quantité d'énergie disponible. Sur un plan donné, l'irradiation incidente, appelée **irradiation globale**, est la somme de trois composantes.

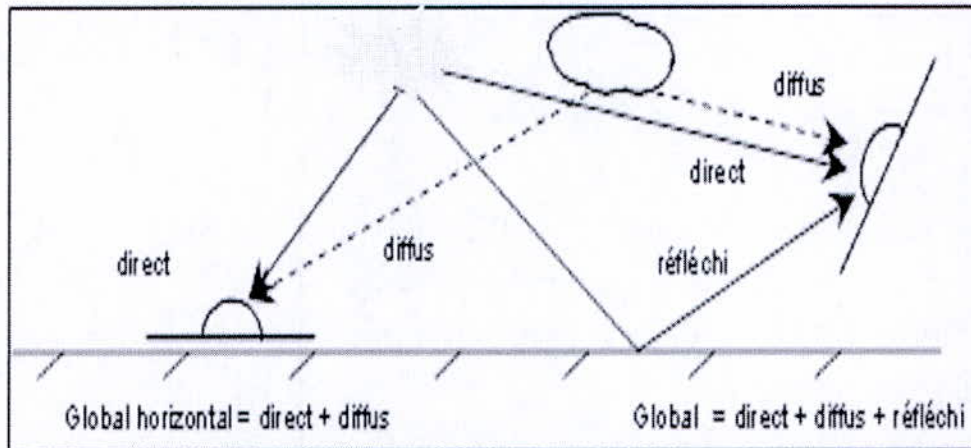


Figure 7 : les différentes irradiations

- **l'irradiation directe S (W/m^2)**, qui provient directement du soleil. Cette composante est nulle lorsque le soleil est caché par des nuages ou par un obstacle (bâtiment, masque lointain) ou tout simplement la nuit. Elle est le reste de l'irradiation hors atmosphère lorsque les pertes dues à la réflexion et à la dispersion du rayonnement solaire à travers les composants de l'air sont soustraites. Tout objet qui reçoit un rayonnement direct donne une ombre.
- l'irradiation **diffuse D (W/m^2)**, qui correspond au rayonnement dû à la dispersion du rayonnement direct dans l'atmosphère.
- l'irradiation **réfléchi (W/m^2)**, qui correspond au rayonnement renvoyé par le sol et l'environnement. Cette composante est nulle sur un plan horizontal.
- **L'irradiation globale (W/m^2)**, est la somme de l'irradiation directe et de l'irradiation diffuse. Elle se mesure avec un solarimètre ou pyranomètre.

La capacité terrestre de rejet par réflexion de l'irradiation solaire dans l'atmosphère, au niveau de la surface du sol est appelée Albédo. D'après les mesures récentes, la valeur de l'albédo représente 28% de la constante solaire. La dispersion de l'irradiation solaire par les composants de l'atmosphère, comme les molécules de l'air, la poussière, les particules d'aérosol affaiblit fortement le rayonnement solaire direct. Une partie de cette lumière dispersée est réfléchiée vers l'espace contribuant à l'augmentation de l'albédo. Le reste arrive à la surface de la terre comme rayonnement diffus. Le troisième effet qui affaiblit l'irradiation solaire directe est son absorption sélective par certains gaz contenus dans l'atmosphère comme H_2O , CO_2 , O_2 , O_3 , CH_4 , les halogènes :

L'éclairement énergétique ou irradiation est le flux de rayonnement électromagnétique, par unité de surface, incident sur un plan donné. L'éclairement énergétique est exprimé généralement en watts par mètre carré (W/m^2).

L'angle d'incidence est l'angle que fait un rayon incident avec la normale à la surface au point d'incidence. Cet angle détermine l'importance du rayonnement direct intercepté par la paroi. L'angle d'inclinaison pour une surface captatrice est l'angle que fait cette surface avec le plan horizontal.

La constante solaire se dit de l'éclairement énergétique d'une surface normale aux rayons solaires, située à la limite de l'atmosphère. Cette valeur est fixée à 1.353 W/m^2 .

I-4-5- Réception du rayonnement par un solide

Quand un rayon incident d'énergie ϕ_λ frappe un corps à la température T , une partie $(\phi_\lambda) \rho_{\lambda T}$ de l'énergie incidente est réfléchi par la surface S , une autre partie $\phi_\lambda \alpha_{\lambda T}$ est absorbée par le corps qui s'échauffe et le reste $\phi_\lambda \tau_{\lambda T}$ est transmis et continue son chemin :

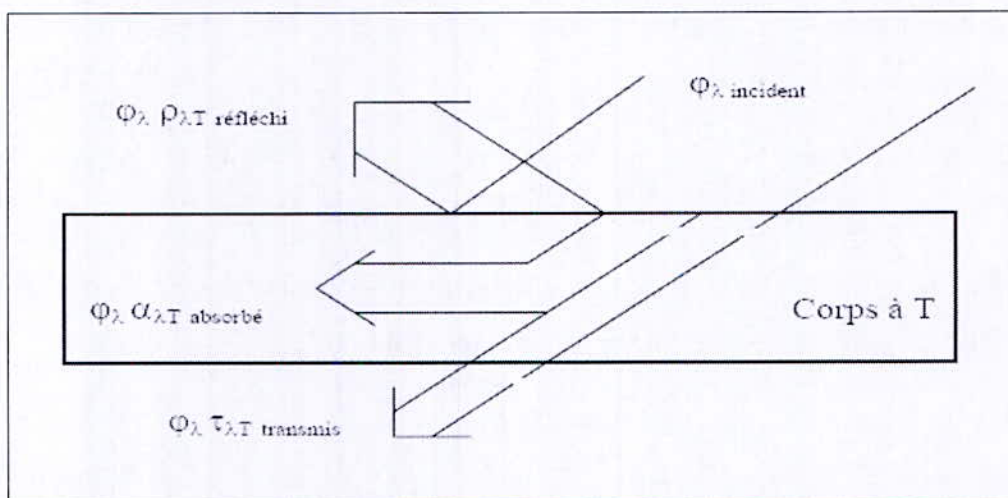


Figure 8 : Un corps solide subissant la transmission, la réflexion et l'absorption du rayonnement incident

D'où l'équation $\lambda = \lambda \rho_{\lambda T} + \lambda \alpha_{\lambda T} + \lambda \tau_{\lambda T}$ lorsqu'on simplifie les termes par λ , on obtient : $\rho_{\lambda T} + \alpha_{\lambda T} + \tau_{\lambda T} = 1$.

On définit ainsi les pouvoirs monochromatiques réfléchissant $\rho_{\lambda T}$, absorbant $\alpha_{\lambda T}$ et filtrant $\tau_{\lambda T}$ qui sont fonction de la nature du corps, de son épaisseur, de sa température T , de la longueur d'onde λ du rayonnement incident et de l'angle d'incidence.

Si l'on considère l'énergie incidente sur tout le spectre des longueurs d'onde, on obtient les pouvoirs réfléchissants ρ_T , absorbant α_T et filtrant τ_T .

I- 5- Corps noir

Un **corps noir** idéal est caractérisé par une absorption quantitative de la radiation électromagnétique solaire incidente indépendamment de son épaisseur, de l'angle d'incidence et de la longueur d'onde. Un corps absorbant n'est pas forcément noir, il peut être aussi opaque. En effet, cela signifie que le corps lui-même absorbe toute la lumière extérieure qu'il intercepte, et n'en reflète aucune. La seule radiation provenant du corps noir est la radiation thermique, ne dépendant que de la température du corps. Ce nom a été introduit par le physicien **Gustav Kirchhoff en 1860**. Il est défini par : $\alpha\lambda T = 1$.

Loi de Stefan-Boltzmann Montre que l'irradiation augmente fortement avec la température. La puissance de l'irradiation d'un **corps noir** est proportionnelle à sa surface et à la puissance quatre de sa température absolue :

$$L_S = \delta \cdot A \cdot T^4$$

L_S = puissance de l'irradiation du corps noir [W]

δ = constante de Stefan-Boltzmann = $5.67 \cdot 10^{-8}$ W / m² K⁴

A = surface du radiateur [m²]

T = température du radiateur [°K]

La puissance d'irradiation d'un corps réel est moins grande et dépend du degré d'émission de ce corps: ε , qui lui-même dépend de la structure de la surface. Pour un corps noir: $\varepsilon = 1$

$$L = \varepsilon \cdot \delta \cdot A \cdot T^4$$

L = puissance d'irradiation d'un corps réel [W]

ε = coefficient d'émission

La puissance d'irradiation échangée entre le corps radiateur et son environnement se calcule en tenant compte de la température de cet environnement.

$$L = \varepsilon \cdot \delta \cdot A \cdot (T_1^4 - T_2^4) \text{ [W]}$$

T_1 = température du radiateur [°K]

T_2 = température de l'ambiance [°K]

Calcul de l'intensité du rayonnement d'un corps noir:

$$I_S = L_S / A = \delta \cdot T^4 \text{ [W / m}^2\text{]}$$

I_S représentent le débit spécifique que le radiateur émet à son environnement. Ils sont uniquement dépendants de la température et se déterminent par les valeurs des densités spécifiques d'irradiation des différentes bandes de longueurs d'ondes $i(\lambda, T)dt$.

On obtient la loi de Stefan-Boltzmann par une intégration de la loi de Planck sur la totalité de la bande des longueurs d'onde [2]:

$$I(T) = \int_{\lambda=0}^{\infty} i(\lambda, T) * d\lambda = \int_{\lambda=0}^{\infty} \frac{C_1}{\lambda^5} * \frac{1}{\frac{C_2}{e^{\lambda T} - 1}} * d\lambda = \frac{6\pi^4 C_1}{90 C_2^4} * T^4 = \frac{2\pi^5 k^4}{15 c_0^2 h^3} * T^4 = \delta * T^4$$

I-6- Le soleil sera-t-il, à moyen terme, une source d'alimentation énergétique pour l'humanité entière ?

Longtemps, l'énergie solaire n'a pas joué le rôle qui lui est dû en raison essentiellement de cet esprit de facilité à utiliser les énergies de sources fossiles plus denses, mais que la nature a mis des millions d'années pour les produire. Aujourd'hui, au fur et à mesure que les réserves de ces combustibles fossiles diminuent et que, bientôt, ils ne répondront plus à la demande de plus en plus croissante, le développement des énergies renouvelables, en premier lieu, l'énergie solaire est devenue indispensable.

- Elle est renouvelable, donc inépuisable
- Elle est propre ne dégageant aucun gaz toxique ou à effet de serre
- Elle est équitablement répartie sur presque toute la surface terrestre.
- En tant que matière première, elle ne coûte rien
- Elle permet une production sur les lieux mêmes de l'installation, sans distribution.

Si le solaire a des atouts, il a aussi ses points faibles : l'énergie solaire est intermittente, en raison des jours et des nuits, des différentes saisons dans les zones tempérées et de la présence de nuages risquant d'absorber le rayonnement solaire. Pour rendre cette source d'énergie naturelle qui est équitablement répartie sur une très grande partie de notre planète, appropriée aux besoins de l'homme, on doit travailler activement dans le domaine de la science de la technologie. Le thème de ce mémoire en est une démonstration. En outre, la prise de

conscience accrue en raison des effets néfastes des combustions aux hydrocarbures et au charbon sur notre environnement et le risque d'un accident nucléaire comme celui de Tchernobyl a permis d'envisager une utilisation plus large de l'énergie solaire.

Aujourd'hui, le rayonnement solaire est directement converti en énergie utilisable par toute une multitude de technologies, aussi bien anciennes que nouvelles. Cette énergie ainsi convertie peut être utilisée pour les petites applications telles la production de l'eau chaude sanitaire, la cuisson solaire, le séchage des produits agroalimentaires etc. L'énergie solaire peut être également utilisée pour produire de l'électricité par centrales thermoélectriques (ou photovoltaïques) solaires :

I-6-1- Dans la thermique solaire,

Les capteurs transforment l'énergie solaire en chaleur. Cette chaleur peut être à son tour utilisée pour cuire, chauffer ou refroidir les habitations, produire de l'eau chaude sanitaire, obtenir de l'électricité par transformation de l'énergie de type thermomécanique qui est le thème de ces travaux. Cette électricité peut être utilisée pour la production d'un combustible l'hydrogène provenant de la décomposition de la molécule d'eau par électrolyse ou par la thermochimie catalytique à des niveaux de température raisonnables (800 à 900°C au lieu des 2500°C). Cet hydrogène sera ensuite utilisé comme stockage énergétique ou dans la technologie de la pile à combustible.

I-6-2- Dans la technologie du photovoltaïque,

C'est le semi-conducteur qui est utilisé, le plus souvent du silicium pour fabriquer des cellules solaires dont le rôle est de convertir directement la radiation solaire en électricité [3].

II- INTEGRATION DES SOURCES D'ENERGIE RENOUVELABLE EN ALGERIE

En raison de sa situation géographique et de son immense étendue (la deuxième d'Afrique), l'Algérie possède un grand potentiel énergétique de source renouvelable, en premier lieu, l'énergie solaire, Aujourd'hui le gouvernement algérien a tracé un programme pour exploiter les gisements solaires et encourager les investissements dans ce domaine [4].

II-1- Ressources de l'énergie solaire et ses potentialités

La carte solaire de l'Algérie représente les quantités énergétiques solaires moyennes par unité de temps et par unité de surface (kWh/m² jour) sur une projection horizontale, pour les mois de juillet et de décembre.

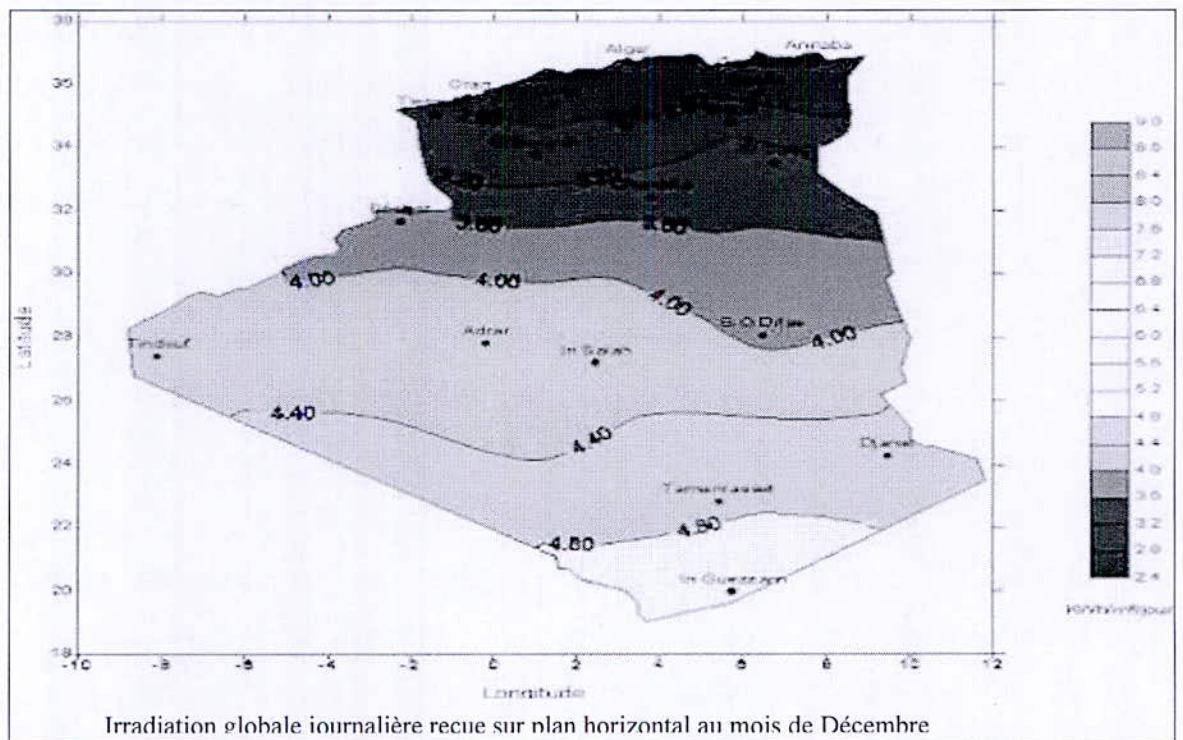
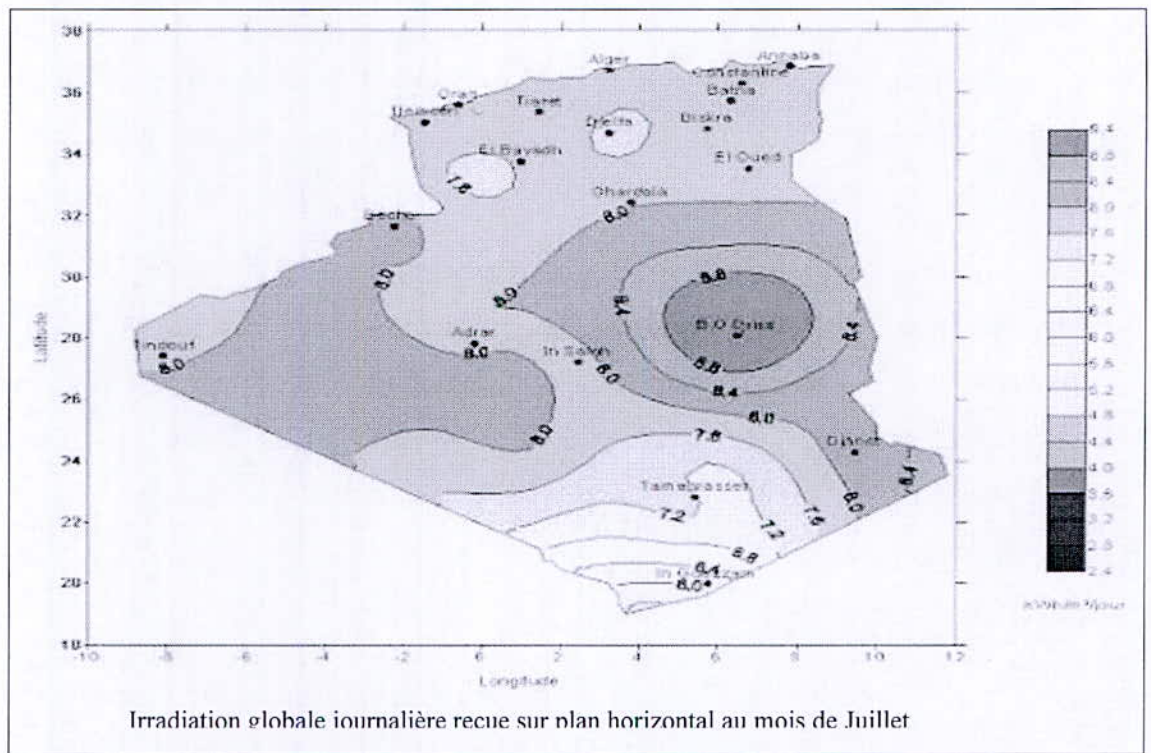


Figure 9 : La carte solaire de l'Algérie (Source : CDER)

L'énergie fournie par rayonnement solaire en Algérie est estimée à plus de 5 milliards de GWh/an. Elle varie entre 5.6 et 7.2 kWh/m² jour, avec une moyenne annuelle de la durée d'ensoleillement variant de 2650 heures dans le nord à 3500 heures dans le Sud (Sahara), correspondant à un potentiel énergétique respectif de 1700kWh/m² /an à 2700 kWh/m² /an

(voir le tableau ci dessous). Il y a un potentiel considérable en particulier pour les régions du sud où la densité de la population est très faible, ainsi les habitations sont dispersées et le recours aux solutions traditionnelles sont relativement couteuses.

II-2- Potentiel solaire en Algérie

L'Algérie possède de larges étendues de territoires disponibles à valoriser le potentiel solaire de près de 2 millions de km² dont une très grande partie est désertique. Ce potentiel reste le plus important de tout le bassin méditerranéen avec 169 440 TWh/an, soit 4600 fois la consommation algérienne en électricité et 55 fois de la consommation Européenne des 15 pays,

Tableau 3 : Données sur l'ensoleillement en Algérie

Régions	Région côtière	Hauts Plateaux	Sahara
Superficie (%)	4	10	86
Durée moyenne d'ensoleillement (Heures/an)	2650	3000	3500
Energie moyenne reçue (kWh/m²/an)	1700	1900	2700

Source: Algerian Ministry of Energy and Mines-www.mem-algerian.org

L'énergie solaire peut devenir une alternative aux sources conventionnelles, en premier lieu dans les pays du sud comme l'Algérie. Parmi les exemples mis en relief citons :

- Le chauffage à l'énergie solaire de l'eau sanitaire ou des piscines.
- La production de l'électricité par Centrales Thermoélectriques Solaire utilisant les rayonnements focalisés, qui est le thème principal de ce mémoire.
- La production de l'électricité par conversion photovoltaïque du rayonnement solaire.
- La technique de la cuisson à l'énergie solaire
- La technologie du séchage au solaire des produits agroalimentaires à l'échelle industrielle
- L'utilisation de l'énergie solaire thermique pour la production du froid par le processus de l'absorption.
- Une technique nouvelle pour convertir l'eau de mer en eau potable par le solaire thermique.

III- LA PRODUCTION D'ELECTRICITE D'ORIGINE SOLAIRE

La lumière du soleil peut être transformée en électricité à partir de différentes technologies:

III- 1- La technologie solaire thermique : la plus courante

L'énergie solaire thermique est utilisée essentiellement pour chauffer de l'eau à des températures de 60°C à 70°C, qui est ensuite principalement utilisée dans les foyers, les hôtels, les hôpitaux et d'autres établissements. Or si les bâtiments absorbent près de 40% de la consommation énergétique de l'UE, c'est en majeure partie dû au chauffage et la climatisation. L'énergie solaire thermique représente donc un gisement important de production d'énergie durable.

- **de la chaleur**, applicable aussi bien au chauffage des habitations et des piscines qu'à la production d'eau chaude sanitaire ou au séchage des récoltes.
- **du froid**, avec des processus thermiques solaires, généralement avec des machines frigorifiques à absorption.

Pour les besoins domestiques, les systèmes de production d'énergie solaire thermique peuvent couvrir de 50 à 70% des besoins d'un ménage en eau chaude sanitaire.

➤ Comment fonctionne l'énergie solaire thermique ?

La lumière du soleil est convertie en énergie thermique grâce à un absorbeur contenu dans le capteur solaire. Cette énergie thermique est transmise au fluide caloporteur.

- Le rayonnement solaire traverse un panneau de verre et il est récupéré par un absorbeur dans lequel la radiation est transformée en énergie thermique
- Le fluide caloporteur (de l'eau additionnée d'antigel et d'antioxydant) qui circule dans l'absorbeur transmet l'énergie ainsi accumulée par un circuit de canalisations en cuivre calorifugées à un ballon de stockage de l'eau, par l'intermédiaire d'un échangeur. (Système à deux circuits séparés)

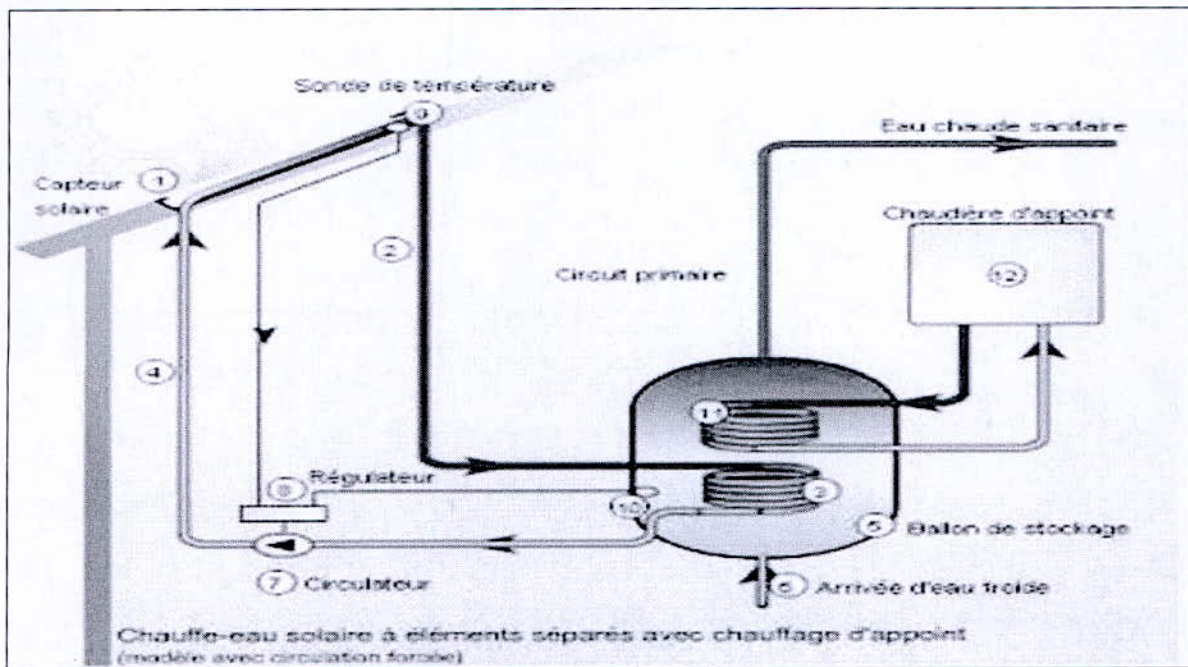


Figure 10 : une installation solaire avec échangeur interne raccordée au chauffage d'appoint

De plus, dans certains cas, le circuit peut également être raccordé à un système de plancher chauffant en tubes de cuivre, pour contribuer au chauffage du bâtiment. L'excellente conductivité thermique des tubes de cuivre, associée à une grande résistance à la corrosion, en fait un matériau de premier choix.

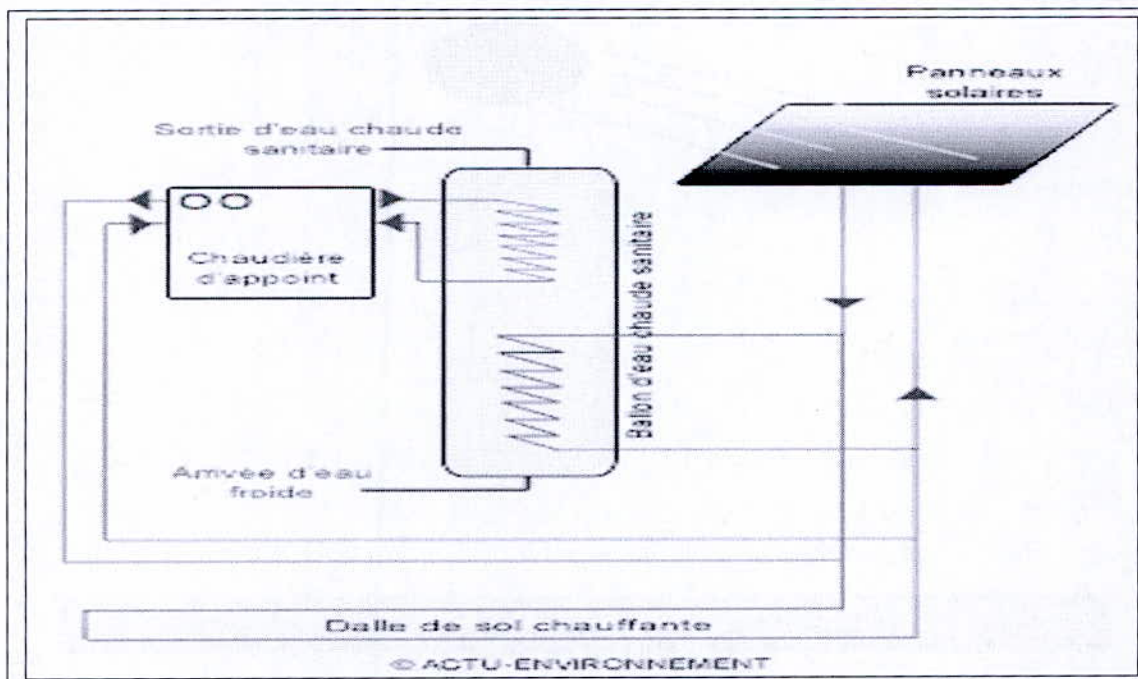


Figure 11 : Schéma d'installation d'un plancher solaire

Grâce à la combinaison judicieuse entre l'architecture et la domotique, l'énergie solaire thermique devient ainsi un élément essentiel de l'efficacité énergétique des bâtiments. En raison des exigences spécifiques de l'énergie solaire thermique, le cuivre avec ses propriétés particulières est, non seulement le principal matériau de cette technologie, mais également le meilleur [5].

III- 2- La technologie solaire thermodynamique (à concentration)

C'est en 1878 que Mouchot présente à l'exposition universelle un réflecteur de 5 mètres de diamètre associé à une machine à vapeur qui actionne une presse d'imprimerie. En 1907, un brevet est accordé au Dr Maier d'Aalen and M. Remshalden de Stuttgart pour un système parabolique de fabrication de vapeur. En 1912, Frank Shuman construit un système parabolique suivant le soleil de 45 kW près du Caire. A la fin des années 70 des projets pilotes se développent aux États-Unis, en Russie, au Japon et en Europe. Au milieu des années 80, la compagnie Américano - Israélienne Luz International a commencé à construire des centrales (technique des bassins cylindro-paraboliques) en série dans le désert californien. Les 9 centrales privées totalisaient en 1991 une puissance installée de 354 MW (voir chapitre III-2-1).

Depuis 1980 une importante campagne de travaux de développement a été menée sur ces sujets dans les pays industrialisés et plusieurs projets de centrales électro-solaires ont vu le jour, lancés par des états ou par des organismes internationaux :

- CRS à Almeria en Espagne, centrale à sodium liquide construite par l'AIE (1981, 3700m² de miroirs),
- SUNSHINE à Nio Town, centrale à eau-vapeur, (Japon, 1981, 12900m² de miroirs),
- EURELIOS à Adrano en Sicile, centrale à eau-vapeur, (CEE, 1981, 6200m² de miroirs),
- SOLAR ONE à Barstow, centrale à eau-vapeur, (Californie, USA, 1982, 71500m² de miroirs),
- THEMIS à Targassonne, centrale à sel fondu, (France, 1982, 11800m² de miroirs),
- CESA 1 à Almería, centrale à eau-vapeur, (Espagne, 1983, 11900m² de miroirs),
- SPP-5 à Shchelkino, centrale à eau-vapeur, (Crimée, Ukraine, URSS à l'époque, 1985, 40000m² de miroirs).

➤ État de l'Art

On désigne par « solaire thermodynamique » l'ensemble des techniques qui visent à transformer l'énergie rayonnée par le soleil en chaleur à température élevée, puis celle-ci en énergie mécanique et/ou électrique à travers un cycle thermodynamique. Ces techniques sont encore, pour l'essentiel, dans un état expérimental. On distingue trois technologies principales aujourd'hui :

- Cylindro parabolique : Des miroirs cylindroparaboliques alignés concentrent la chaleur. Le circuit du fluide caloporteur passe au centre de chaque miroir et traverse l'ensemble du champ de capteurs. C'est la technologie la plus répandue aujourd'hui (354 MW en Californie).

- Centrales à tour : Des centaines, voire des milliers de miroirs (héliostats) réfléchissent et concentrent le rayonnement solaire sur une surface réduite, située au sommet d'une tour est appelée récepteur ou receiver. C'est là que cette lumière amplifiée est convertie en chaleur. Exemples de réalisations : centrale Thémis en France, Solar One en Californie. La plus importante et la plus performante est en construction à Jülich (Allemagne). Il existe aujourd'hui des projets commerciaux pour quelques dizaines de MW, notamment en Espagne et en Afrique du Sud.

- Cuvettes paraboliques : Une cuvette parabolique concentre le rayonnement sur un foyer en un point, (ce concept a été appliqué pour les fours solaires). Cette technologie est adaptée aux petites puissances de quelques dizaines de kW appropriées aux points de consommation décentralisés. Quelques projets sont en cours de développement, toujours essentiellement en Californie et en Espagne [6].

➤ Les aspects techniques

La technologie des centrales solaires est relativement récente. Elle possède encore un important potentiel de développement. Elle offre une opportunité aux pays ensoleillés comme l'Algérie et certaines régions du monde telles le 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, l'Australie, etc.

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

La production d'électricité de source thermique se fait à partir du rayonnement solaire direct. L'énergie solaire étant peu dense, il est nécessaire de la concentrer pour obtenir des niveaux de températures exploitables pareils à ceux utilisés dans les processus conventionnels, pour la production d'électricité. Le rayonnement est concentré en un point, en une ligne ou en surface réduite, puis absorbé, c'est-à-dire converti en chaleur. Cette énergie thermique est ensuite transmise au fluide caloporteur qui à l'aide d'un échangeur de chaleur produit de la vapeur en surpression. La détente de cette surpression fait tourner la turbine etc. L'intensité de la concentration est définie par le facteur de concentration. Plus celui-ci est élevé, plus la température atteinte sera importante et aura une influence sur le rendement énergétique (rendement de Carnot).

Toute installation doit remplir les mêmes fonctions pour transformer l'énergie du rayonnement incident en énergie électrique avec un maximum de rendement. On les examine ci-après dans l'ordre suivant :

- la concentration du rayonnement à l'entrée du récepteur,
- sa conversion en énergie thermique au niveau de l'absorbeur
- le transport et, éventuellement, le stockage de cette chaleur,
- son utilisation dans un cycle thermodynamique associé à un alternateur pour la production d'électricité.

➤ La concentration

Pour transformer le rayonnement solaire en chaleur, il suffit de le réceptionner sur une plaque noire. Mais un tel capteur, même parfaitement absorbant, doit supporter les pertes que son propre échauffement provoque au bénéfice de l'air ambiant. Ces pertes sont, en première approximation, proportionnelles à cet échauffement et à la surface développée. Pour travailler à température élevée, il faut diminuer fortement la surface de réception pour maintenir, en proportion, ces pertes à un niveau raisonnable. Pour cela on doit disposer devant le récepteur une optique qui concentre sur celui-ci le rayonnement capté provenant d'une surface bien supérieure. On caractérise la performance du système par le facteur de sa « concentration » **qui est le rapport entre la surface des collecteurs et la surface irradiée.**

➤ Histoire de la thermique solaire :

L'idée d'utiliser la thermique solaire ne date pas d'aujourd'hui. La première description de cette source d'énergie a une origine lointaine. En Mésopotamie (l'Irak d'aujourd'hui), on a retrouvé des sculptures dans des récipients en métal précieux illustrant le procédé pour obtenir du feu au moyen de l'énergie solaire. Beaucoup plus tard, le **savant arabe Ibn Al Haïtam (965-1039)** a décrit un procédé solaire de pyrolyse par miroir parabolique ou sphérique. Plusieurs siècles ont suivi et on continue toujours à s'intéresser à l'énergie solaire comme le montrent les figures 12 et 13.

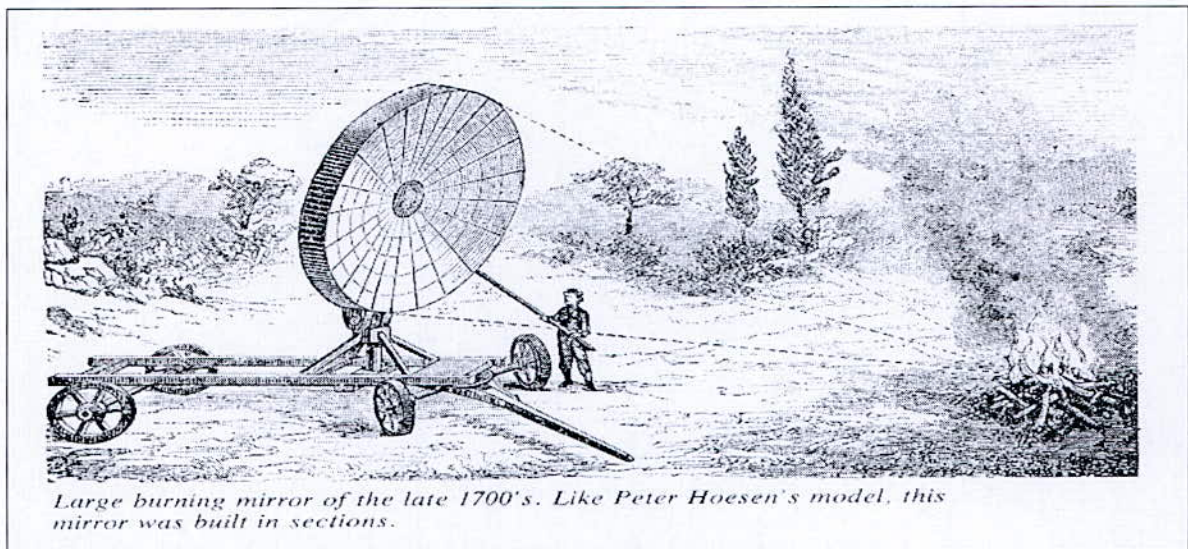


Figure 12 : Moyen d'obtenir du feu par miroir parabolique (Modèle de Peter Hoesen à la fin du 18^{ième} siècle). Auteur : Showalter S.K. Date de publication : 1^{er} janvier 2001

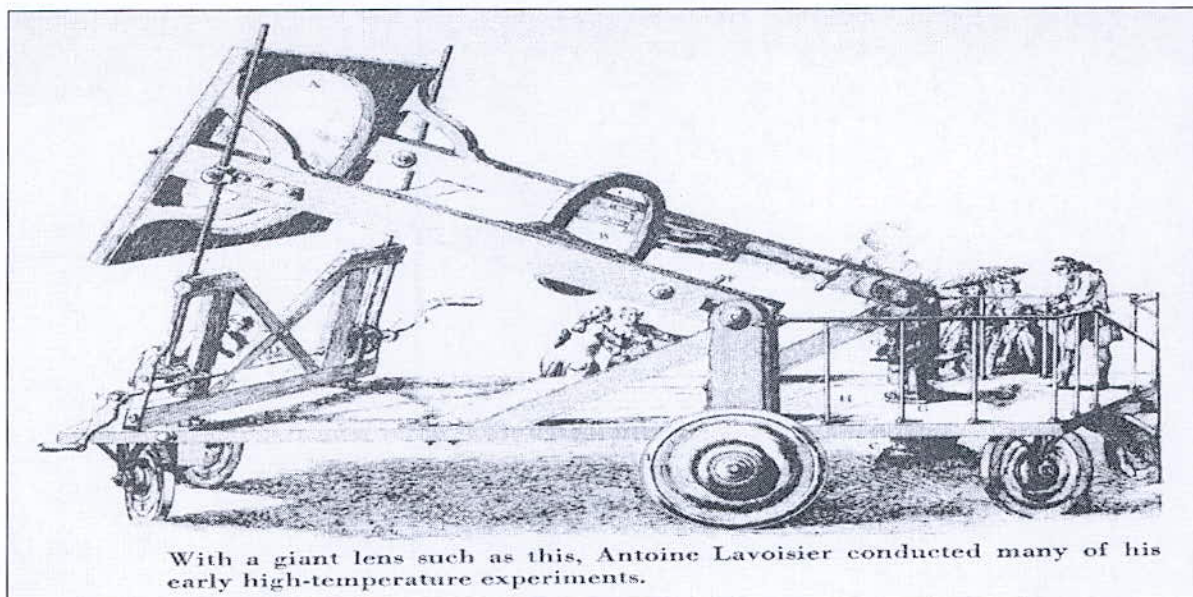


Figure 13: A l'aide d'une lentille géante, A. Lavoisier a effectué plusieurs expériences pour obtenir de hautes températures. Source : Showalter S.K. Date de publication : 30 avril 1999.

III-2-1- Les centrales à capteurs cylindroparaboliques

L'utilisation de la thermique solaire pour la production de l'électricité date du début du 20^{ème} siècle aux USA et en Egypte sous l'occupation anglaise où on a entrepris des essais à l'aide de concentrateurs en forme de bassines dont la forme est à peu près semblable à celle qu'on utilise aujourd'hui.

Les problèmes dus aux matériaux de construction auxquels s'ajoutent d'autres complications qui ont interrompu les premières applications des centrales thermiques pour la production de l'électricité. Ce n'est qu'après la crise du pétrole en 1973 qu'on a commencé aux USA à s'intéresser de nouveau à cette technologie. Une loi de ce pays impose aux sociétés publiques d'alimentation électrique d'accepter, à un prix fixe, l'électricité de source solaire provenant de producteurs privés.

La société d'alimentation électrique californienne, la Southern California Edison (SCE) offrit à ces entreprises non étatiques des contrats à long terme. En raison d'aménagement de taxes, la centrale thermoélectrique solaire devint financièrement compétitive. C'est ainsi que la société LUZ a été créée et quatre ans plus tard, un contrat de 30 ans a été conclu avec la SCE pour la vente de l'électricité solaire. De 1984 à 1991, la société LUZ construisit dans le désert californien de Mojave, sur une surface d'environ 7 km² neuf centrales solaires appelées SEGS (Solar Electric Generation Systems) totalisant une puissance de 354 MW (figure 14) [7].

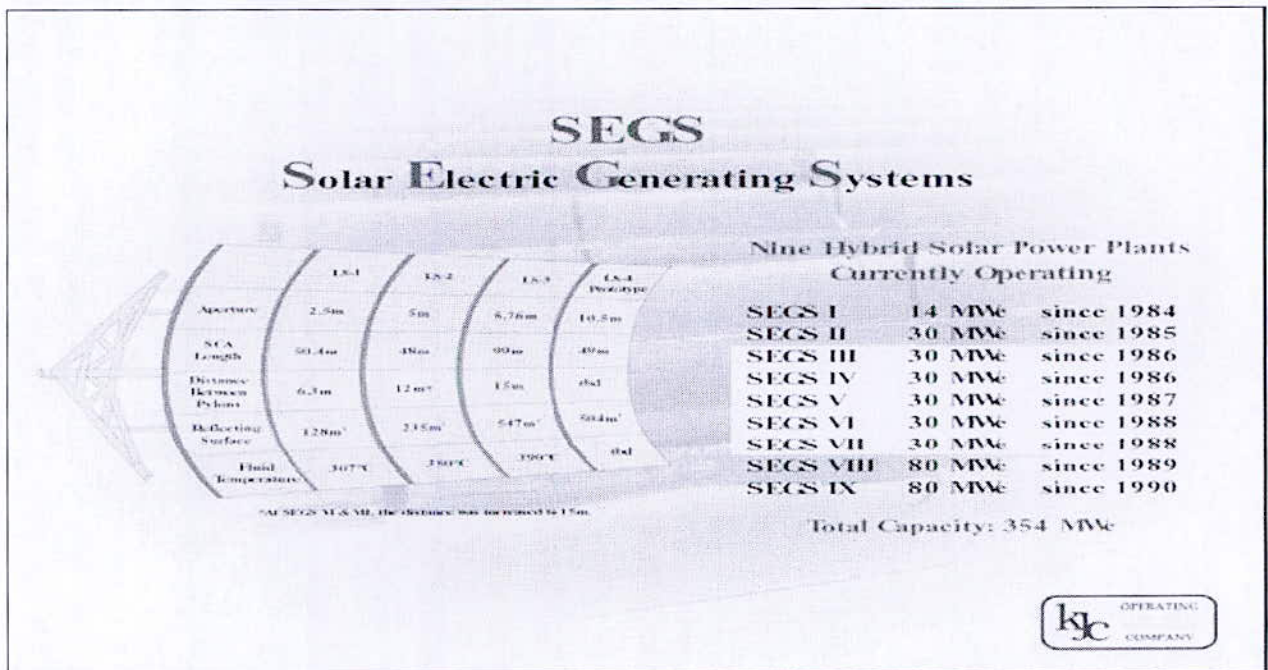


Figure 14 : Présentation chronologique des 9 centrales électro-solaires à capteurs cylindroparaboliques construites par la société LUZ.

1- Principe de fonctionnement d'une centrale solaire par miroirs cylindroparaboliques.

Grâce à un procédé de mise au point de miroirs cylindroparaboliques, nous avons réussi à concentrer le rayonnement solaire (facteur de concentration <100) sur une ligne focale. La réussite de cette technique est due à sa simplicité : les bassines paraboliques, positionnées sur un seul axe, focalisent et concentrent le rayonnement solaire réfléchi sur une tuyauterie en métal recouverte d'une couche sélective (absorbeur). Ce tube absorbeur est enveloppé d'un tuyau en verre évacué pour réduire les pertes de chaleur. La poursuite de la trajectoire solaire par les capteurs est synchronisée durant la journée grâce à un système de réglage par ordinateur. La longueur des capteurs peut mesurer jusqu'à 100 mètres et leur largeur atteint environ 5,8 mètres. Une huile thermique, réchauffée à environ 400°C circule dans le tube absorbeur et transmet la chaleur par l'intermédiaire d'un échangeur de chaleur au circuit eau-vapeur de la turbine. Sous la pression, l'eau s'évapore et continue à surchauffer. La vapeur d'eau sous haute pression actionne une turbine et un générateur pour produire de l'électricité. A la sortie de la turbine, la vapeur se condense et elle est de nouveau transférée au circuit à l'aide d'une pompe.

Ce type de centrale nécessite une installation en rangées parallèles de plusieurs capteurs, qui constituent le champ des capteurs solaires. (figure 15), lorsque le temps est mauvais ou durant la nuit, le circuit « eau-vapeur » peut être alimenté par la chaleur provenant d'une chaudière à gaz. Contrairement aux installations photovoltaïques, la centrale à concentrateurs cylindroparaboliques peut donc fonctionner continuellement. En outre, la construction d'un stockage thermique permet de renoncer totalement au combustible fossile et d'éviter toute émission de gaz toxiques ou à effet de serre [8].

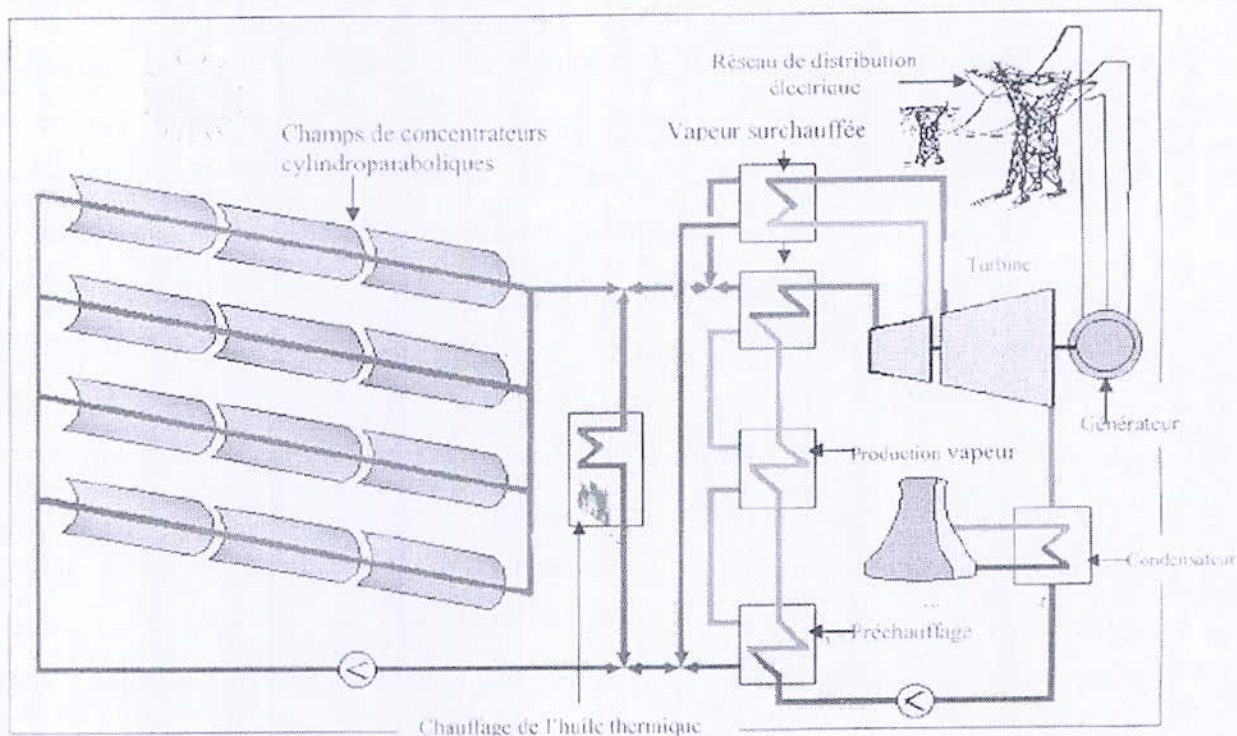


Figure 15 : Principe de construction d'une centrale thermoélectrique hybride : solaire-gaz naturel (Configuration typique d'une centrale à collecteurs cylindroparaboliques)

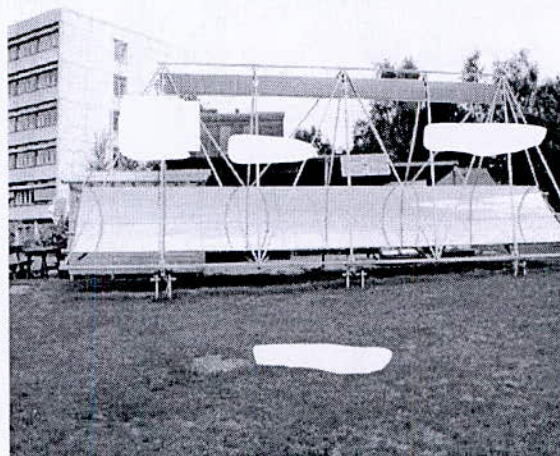
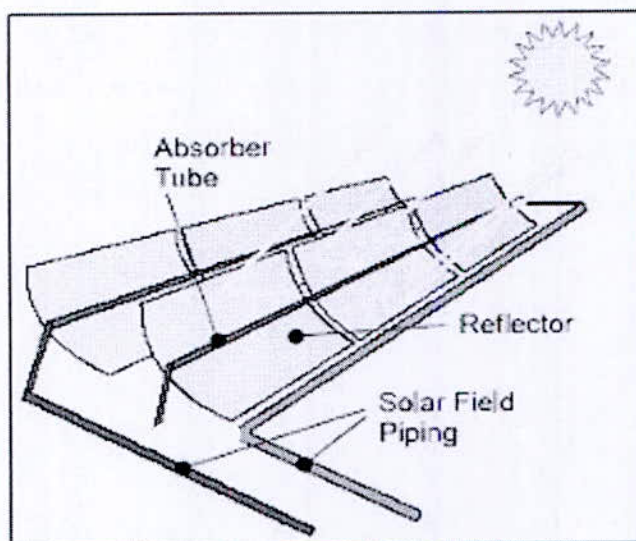


Figure 16 : Présentation d'un capteur solaire cylindroparabolique poursuivant la trajectoire solaire sur un axe à l'aide d'un moteur électrique alimenté par un module PV, (Université de Jülich/Institut Solaire)

Dans le cas des bassines paraboliques, le rôle du *mécanisme de poursuite* est d'adapter l'inclinaison du capteur de manière à ce que la radiation solaire incidente soit toujours

perpendiculaire au réflecteur. De cette manière, la radiation est réfléchiée au foyer de la parabole et concentrée sur un tube récepteur dans lequel circule le fluide caloporteur.

La structure métallique doit suffisamment être solide pour résister aux importantes contraintes mécaniques liées au vent. Elle doit de plus être munie d'extrémités assurant la compatibilité entre les dilatations thermiques inégales de l'acier et du verre [7].

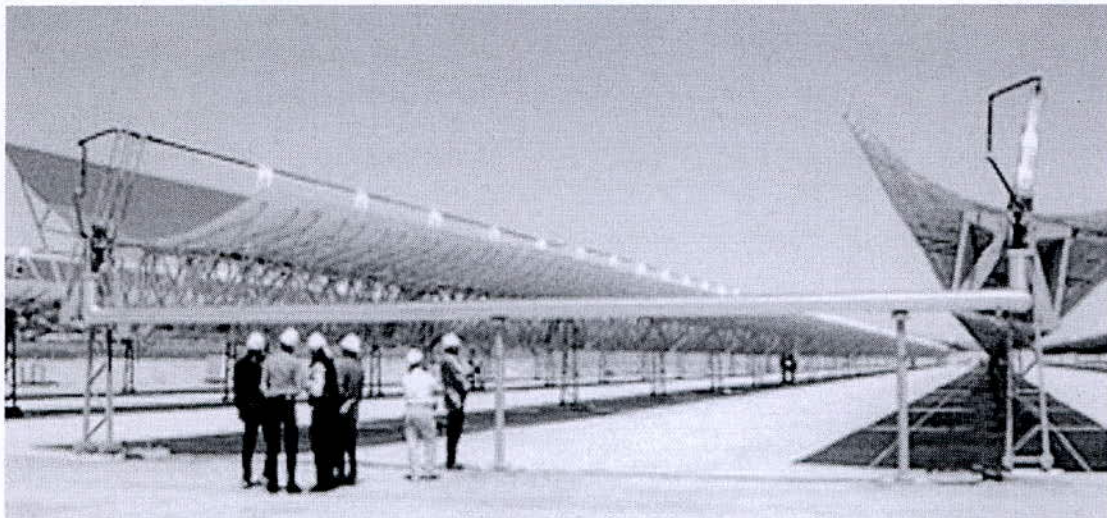


Figure 17 : Centrale du Nevada

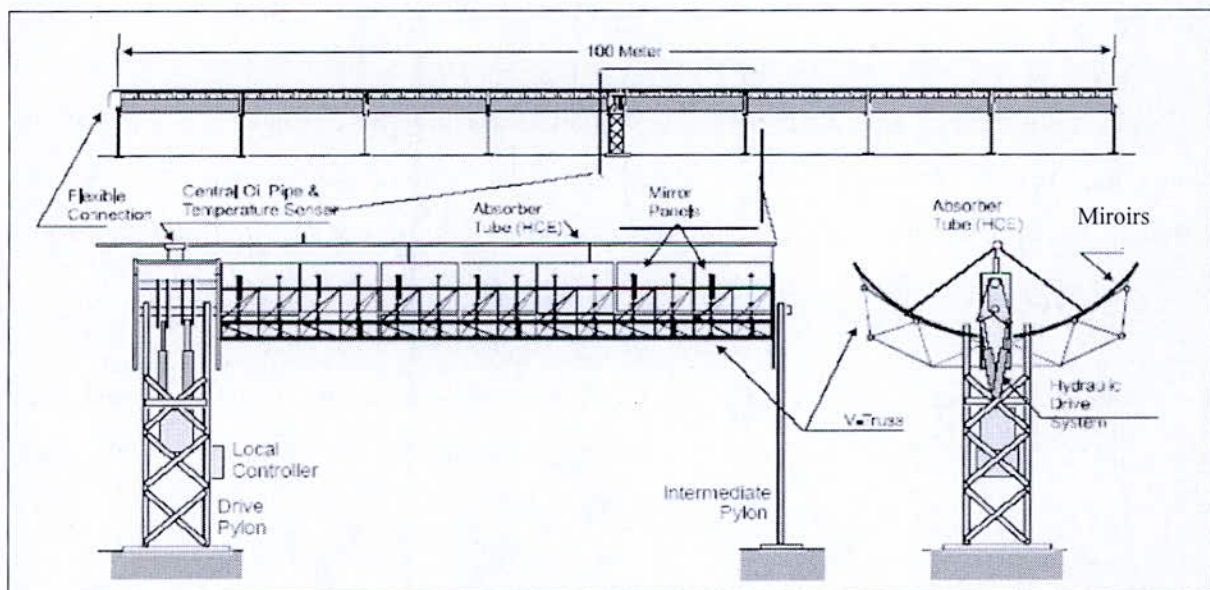


Figure 18 : Vue schématique du collecteur cylindroparabolique

Le tube collecteur doit avoir les caractéristiques suivantes :

- Bonne absorption du rayonnement : son coefficient d'absorption doit être aussi élevé que possible afin d'éviter les pertes optiques (toute réflexion du rayonnement incident).
- Pertes thermiques limitées : La température du tube dépassant généralement 400°C, les pertes par échanges convectifs et radiatifs sont très importantes. Afin de les limiter, le tube est entouré d'une enveloppe de verre sous vide.

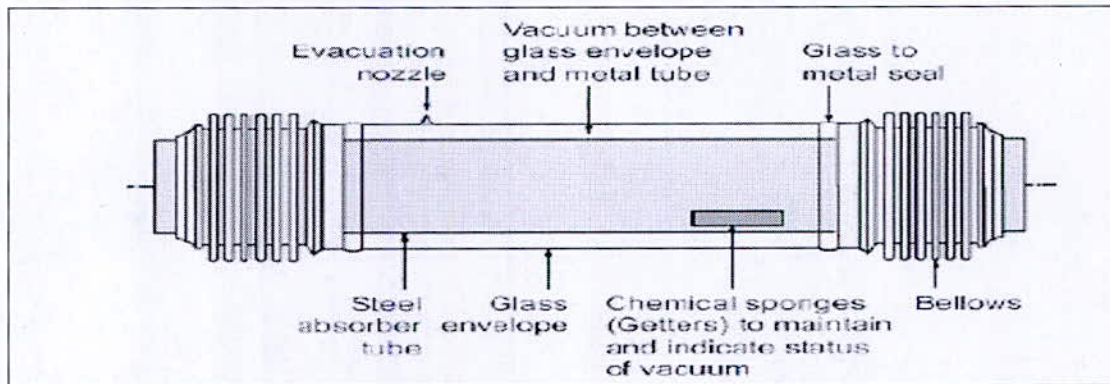


Figure 19 : Le tube collecteur-absorbeur du rayonnement solaire direct dans un système de concentrateurs en bassines cylindroparaboliques

2- Le champ de capteurs solaires en bassines cylindroparaboliques :

Le champ de capteurs solaires est la partie réceptrice de la radiation solaire 'récoltée' à partir de milliers de m² de miroirs paraboliques. Cette radiation solaire directe amplifiée est réfléchiée et absorbée au niveau du récepteur, c'est-à-dire convertie en chaleur. Les collecteurs sont connectés en série pour former de longues files qui à leur tour sont connectées en parallèle. Le dimensionnement du champ *des capteurs solaires* est fonction de la puissance désirée et de la température du fluide caloporteur de sortie.

Le champ solaire peut avoir plusieurs configurations en fonction de la manière dont il est alimenté en fluide caloporteur. Dans tous les cas, la tuyauterie de sortie est la plus courte possible pour minimiser les pertes dues à l'ambiance.

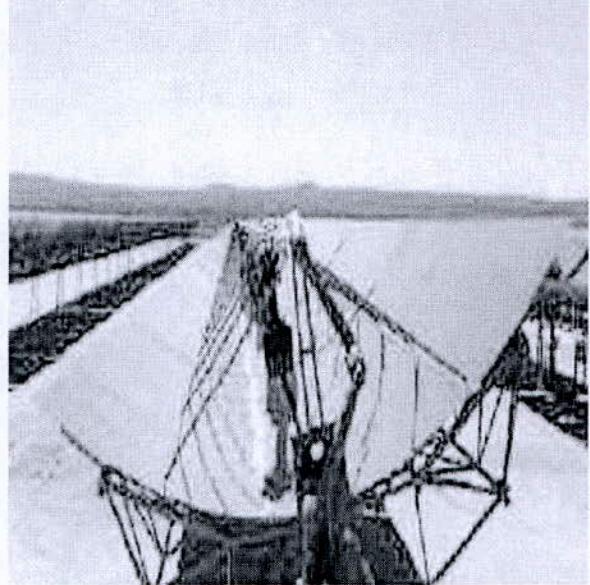
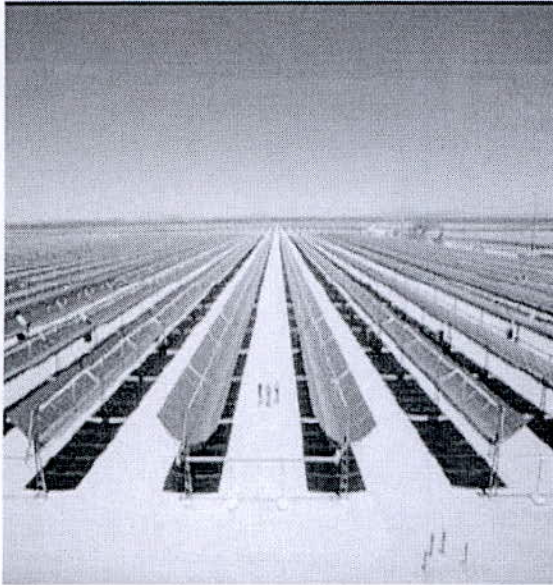


Figure 20 : Champ de collecteurs en Californie

3- Le récepteur

Le récepteur est linéaire au lieu de surfacique. Il est disposé au foyer d'un système optique peu performant, on le fait travailler, à température modérée (inférieure à 400°C), ce qui permet d'utiliser comme fluide caloporteur une huile de synthèse (l'avantage de ce fluide étant qu'il n'est pas figeable et qu'il ne nécessite donc pas de dispositif de traçage), il est protégé de pertes thermiques par deux dispositions originales et efficaces :

- L'enfermement de l'absorbeur dans un tube de verre sous vide réduit sensiblement les pertes thermiques du récepteur.
- Le revêtement du tube chaudière d'une couche de cermet (il s'agit d'un composite céramique/métal projeté par plasma) qui joue le rôle d'un absorbeur sélectif (96% d'absorptivité pour 20% d'émissivité à la température de travail) bien plus performant que la peinture utilisée dans les cas précédents ; cette disposition est rendue possible ici par la mise sous vide de l'environnement du tube chaudière (le cermet ne résisterait pas à la présence d'oxygène). Cet ultime perfectionnement n'est présent que sur la dernière version des centrales Luz, celles qui sont équipées des capteurs LS3.

4- La technologie

Le miroir cylindroparabolique est constitué de panneaux en verre relativement épais, cintrés en forme à chaud, et argentés et vernis en face arrière. Ils sont largement autoportants, ce qui permet de les assembler sur une charpente relativement légère. Celle-ci est supportée par des pylônes en charpente métallique fondés au sol. Dans leur dernière version, la plus évoluée et la moins chère, ces miroirs sont assemblés par éléments de 99 mètres de long et de 5,76 mètres d'ouverture, présentant une surface frontale de réflexion de 545 m². Ce « bloc » est mis en mouvement par des motorisations hydrauliques réparties sous le contrôle d'un capteur solaire unique.

La technologie de réflecteurs cylindroparaboliques est la plus fréquente. Elle est actuellement utilisée pour la construction de Centrales Thermoélectriques Solaires dans le Sud-ouest des Etats-Unis et dans le Sud de l'Espagne.

5- Le transport et le stockage de la chaleur

Les différentes réalisations classées dans cette filière ont toutes, jusqu'à aujourd'hui, utilisé comme fluide caloporteur (et éventuellement calo stockeur) des huiles de synthèse ou des huiles minérales de différentes provenances et de différentes performances. Toutes ces huiles ont en commun les qualités suivantes :

- état liquide pour toutes les températures utiles,
- capacité calorifique convenable autorisant le stockage à chaleur sensible dans de bonnes conditions,
- viscosité suffisamment faible pour un pompage aisé sous climat chaud.

Par contre, elles présentent les défauts suivants :

- conductivité thermique faible entraînant des capacités modestes au transfert thermique depuis les parois chaudes,
- inflammabilité dangereuse comme l'incendie du stockage en huile de « Solar One » l'a illustré,
- température de travail limitée en raison de la décomposition de l'huile,
- prix élevé.

Pour illustrer les performances des différents produits disponibles, le paramètre le plus intéressant est celui de la température élevée admise : 295°C pour le Santotherm utilisé pour le DCS d'Almería au début des années 80, 310°C pour l'ESSO 500 utilisé dans les premières centrales Luz (1983), 340°C pour le Gilotherm mis en œuvre sur les expériences « maquette » d'Odeillo en 1979 et « THEK » de Targasonne en 1983, 393°C pour l'huile Dowtherm A utilisée dans les dernières réalisations de Luz (1988).

➤ Le projet DISS (Direct Solar Steam)

La technique de production de vapeur d'eau directement dans l'absorbeur est une option prometteuse pour améliorer la rentabilité de la centrale solaire. On renonce au circuit de l'huile caloporteur et à tous les éléments qui en sont liés. En combinaison avec d'autres améliorations aux concentrateurs, on peut obtenir une augmentation du rendement de 20%. Comme exemple d'application de la technique DISS, nous citons le projet Espano-allemand portant sur une installation pilote à la Plataforma Solar de Almeria (PSA) en Andalousie. Ce projet est basé sur les résultats de travaux préparatoires obtenus par de nombreux partenaires dont la plupart sont des sociétés et des instituts de recherches possédant une grande expérience dans le domaine de la technique de l'évaporation directe dans les tubes absorbants. Les sociétés industrielles et les entreprises d'alimentation en électricité ont rapidement évalué la position que pourrait acquérir cette technologie sur le marché de l'énergie, particulièrement dans les pays du sud comme ceux du bassin méditerranéen. Un financement de la première phase avec un volume de 11 millions d'Euro réparti sur six ans a été acquis par le programme Joule de la Communauté Européenne, avec le soutien des ministères responsables des deux pays et par une contribution financière des différentes sociétés Espano-allemandes participantes.

Les travaux de coordination sont sous la direction de la société espagnole CIEMAT et du côté allemand par l'Agence Aérospatiale Allemande (DLR). Dix années de coopération fructueuse autour de cette installation pilote de Plataforma Solar d' Almeria lient ces deux institutions. Le projet a pour but de développer un procédé technologique de production directe de la vapeur à haute pression dans la tuyauterie même de l'absorbeur. Ce qui n'est pas le cas dans l'état actuel de la technique basée sur une conception qui date des années 80. On croit tirer profits de cette nouvelle technique qui réduit le coût de revient puisque 30% des frais d'investissement des capteurs solaires vont sur le compte du système de transfert thermique. Cette nouvelle technique permet :

- de renoncer au cycle de l'huile thermique ce qui conduit à épargner la pompe, l'échangeur de chaleur, l'huile etc.
- d'améliorer le rendement cyclique de la turbine: aujourd'hui, la température de sortie du champ solaire est limitée à 400°C en raison de la stabilité de l'huile caloporteur. Lorsque l'huile thermique n'est pas utilisée, on peut élever la température à 550°C. Ce qui améliore sensiblement le rendement du cycle de la turbine à vapeur.
- d'éviter les pertes thermiques dues à l'utilisation de l'échangeur de chaleur. une manière d'influencer positivement le rendement du champ solaire. Malgré les températures de sortie élevées (550°C), le rendement thermique du champ solaire ne doit pas être empiété. A ces niveaux de température qu'on tend atteindre correspondant à une pression de 100 bar, les 2/3 du champ solaire sont utilisés pour le processus d'évaporation dont la température de saturation est de 311°C. Seul le tiers des capteurs est mis au service de la surchauffe de la vapeur. De ce fait, on obtient une température moyenne d'environ 350°C, comparable à une installation utilisant l'huile thermique. Une production de vapeur saturée ou une diminution du niveau de la pression ont une influence favorable sur le rendement thermique, en raison de la température réduite du champ solaire.
- une réduction de la propre consommation du système due à la disparition du cycle du fluide caloporteur, l'énergie nécessaire à la pompe est épargnée.
- une réduction des frais de fonctionnement causé par la filtration régulière des déchets provenant de la décomposition de l'huile thermique et de temps à autre son renouvellement total.
- une diminution du danger d'incendie en cas de fuite de fluide caloporteur.

On continue, en outre à optimiser le champ de capteurs et ses composants, particulièrement dans la réduction des pertes optiques et thermiques.

➤ Réponse aux exigences spécifiques du processus DISS.

Dans le cadre des préparatifs pour une utilisation future de cette nouvelle technologie, on a mis à l'épreuve des processus liant une unité solaire de production de vapeur aux cycles d'une centrale électrique conventionnelle.

En dehors de l'utilisation de la vapeur dans des processus conventionnels d'une turbine à vapeur, la recherche est plutôt orientée vers une combinaison gaz-vapeur de source solaire à un cycle combiné turbine à gaz, turbine à vapeur.

III-2-2- Les centrales à capteur en cuvette parabolique/moteur Stirling

Les capteurs (cuvette) paraboliques fonctionnent d'une manière autonome. Ils suivent le soleil sur 2 axes afin de concentrer le rayonnement solaire sur le foyer de la parabole réfléchissante. Le facteur de concentration est souvent supérieur à 2000 avec une température de 750°C. De toutes les technologies solaires, les capteurs en cuvettes paraboliques ont démontré les meilleurs rendements solaire-électricité (29.4%).

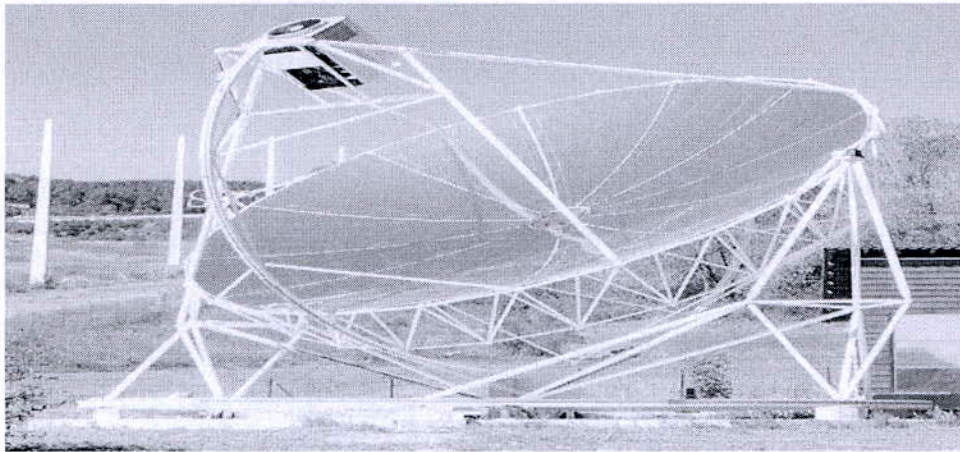


Figure 20 : Cuvette parabolique avec moteur Stirling

Un de leurs principaux avantages est la modularité : ils peuvent en effet être installés dans des endroits isolés, non raccordés au réseau électrique. Ils possèdent donc également un important potentiel de développement, particulièrement dans des régions peu peuplées de certains pays du sud.

Si un moteur Stirling est placé au foyer de la parabole, la chaleur du soleil peut faire travailler un fluide comprimé afin de générer de l'électricité. Chaque capteur est une mini centrale, qui produit de l'électricité et en associant plusieurs on peut augmenter la puissance.

Quelques données d'une cuvette parabolique solaire

- Diamètre de la parabole : 7 - 17 m
- Rapport de concentration: 300 - 4000
- Températures du gaz de travail: 620 - 750 °C
- Une option: une chaudière à gaz
- Rendement moyen de toute l'installation: 16 - 25 %

Les installations combinées « parabole-moteur Stirling » sont conçues pour une alimentation électrique décentralisée. La puissance de chacune varie entre 10 et 50 kW. On peut cependant construire en série plusieurs systèmes pour créer une « ferme solaire » d'une puissance allant jusqu'à quelques MW_e. Ce qui permet de remplacer une alimentation électrique décentralisée fonctionnant par un groupe électrogène cher et polluant [9].

1- Principe de fonctionnement

Le miroir parabolique réfléchit les rayons du soleil incidents vers un point de convergence (foyer d'inflammation), ce rayonnement est alors concentré sur le récepteur (le récepteur absorbe les radiations solaires concentrées) qui augmente de température et réchauffe le fluide caloporteur (l'hélium ou l'hydrogène). Ce récepteur est un moteur Stirling qui fonctionne grâce à l'augmentation en température et en pression d'un gaz (l'hélium ou l'hydrogène) contenu dans une enceinte fermée. La chaleur récupérée est convertie par le moteur Stirling en énergie de rotation qui est directement transmise par l'intermédiaire de l'arbre du moteur au générateur pour être à son tour transformée en énergie électrique (c'est-à-dire ce moteur convertit l'énergie solaire thermique en énergie mécanique et ensuite en électricité). Tout au long de la journée, le socle de la parabole s'oriente automatiquement face au soleil pour suivre sa course et ainsi profiter d'un ensoleillement maximum. Les systèmes à réflecteur parabolique peuvent atteindre 1 000 °C sur le récepteur, et parvenir à des rendements optimaux de conversion de l'énergie solaire en électricité en utilisant une faible quantité d'énergie. La performance de l'ensemble du système est étroitement liée à la qualité optique de la parabole et au rendement du moteur Stirling

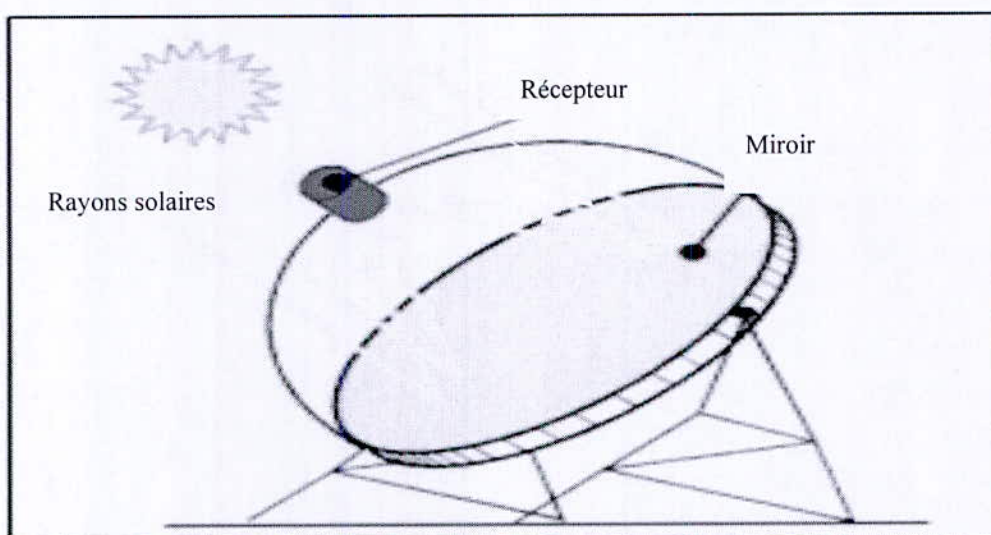


Figure 21 : Principe de fonctionnement d'une cuvette parabolique

2- Concentrateur

Le concentrateur solaire est composé d'une surface réfléchive de verre ou de plastique et concentre le rayonnement incident à son foyer. Son dimensionnement dépend évidemment de la puissance solaire requise. Comme ordre de grandeur, on peut considérer qu'un concentrateur de 10 m de diamètre peut fournir jusqu'à 25 KW d'électricité sous une insolation de 1000 W/m². Le concentrateur possède deux degrés de liberté afin de poursuivre efficacement le soleil (c'est-à-dire le concentrateur doit être dirigé exactement sur le soleil et d'une manière continue) pour cela on le fait positionner à l'aide d'un dispositif de commande sur deux axes. Le système orienteur fonctionne par ordinateur qui, grâce aux données horaires à l'aide d'un GPS, calcule la position du soleil et dirige le concentrateur au point focal.

3- Récepteur

Le récepteur est un lien entre le capteur solaire et le moteur Stirling. Il a deux fonctions :

- absorber le plus que possible la radiation solaire focalisée et réfléchiée par le capteur,
- et transmettre au moteur Stirling l'énergie sous forme de chaleur en évitant les pertes et transférer cette chaleur au fluide de travail du cycle de puissance.

Pour un récepteur fonctionnant uniquement à l'énergie solaire, il a été développé un échangeur de chaleur à faisceau tubulaire qui est fixé directement sur les têtes de cylindre du moteur Stirling et que traversent le fluide de travail (l'hélium ou l'hydrogène). Les tubes ont des parois très fines et sont résistants à la haute température. Leurs extrémités sont soudées à un tuyau collecteur. Ils forment une surface presque unitaire qui absorbe le rayonnement solaire concentré et réchauffe le gaz de travail du moteur Stirling à une température d'environ 650°C.

Des prototypes de concentrateurs paraboliques avec moteur Stirling ont déjà été construits en Arabie Saoudite, en Espagne et aux USA. En comparaison aux autres concentrateurs, leur coût de revient reste encore relativement élevé.

La température de la source chaude peut être adaptée en plaçant le récepteur plus ou moins loin du foyer du collecteur. Deux types de cycles peuvent être utilisés en aval du récepteur : le cycle de Stirling ou le cycle de Brayton.

Dans le cas du moteur Stirling, le flux de chaleur transmis est intermittent, ce qui pose des problèmes de fatigue par dilatation thermique. Pour répondre à ce problème, un fluide intermédiaire (le plus souvent du sodium) est parfois utilisé entre le récepteur et le moteur Stirling. L'efficacité du transfert de chaleur atteint 90%.

Les collecteurs (capteurs) paraboliques peuvent concentrer 200 à 3 000 fois la radiation solaire. Ils sont dirigés en permanence vers le soleil et concentrent les rayons vers le point focal de cette parabole où se trouve un moteur Stirling.

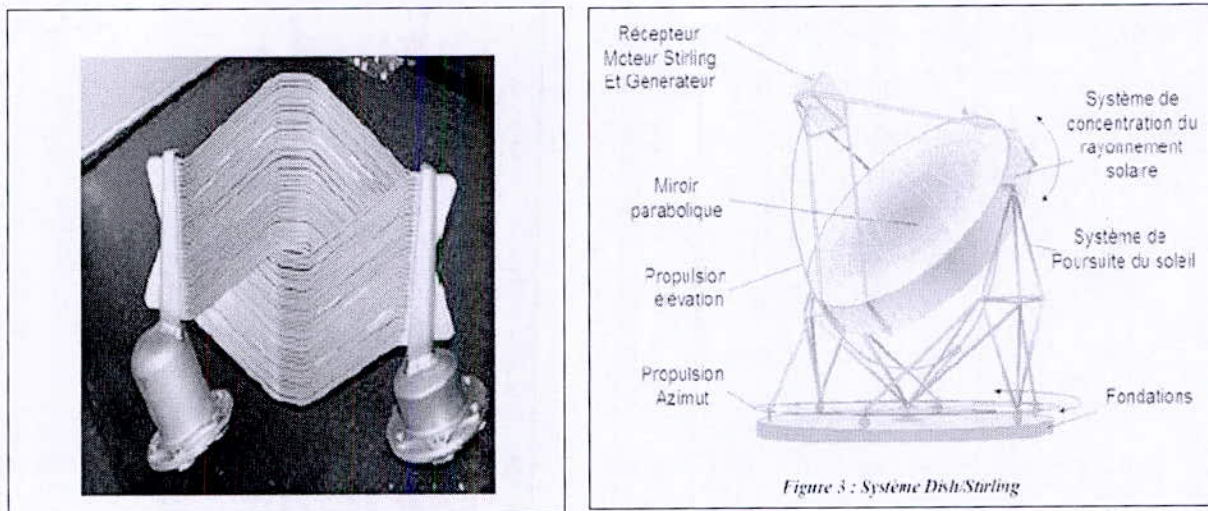


Figure 22 : Récepteur dans un cycle Stirling

Dans le cas des cycles de Brayton, une technologie semblable à celle des tours solaires est utilisée : le rayonnement solaire est absorbé par une substance poreuse, qui réchauffe l'air d'alimentation du cycle. Cette méthode offre un rendement de 80% [7].

4- Cycle de puissance

Le système a pour but de convertir l'énergie thermique provenant de la radiation solaire en énergie mécanique. Il est monté directement sur le capteur parabolique, à proximité de son foyer. Dans le cas contraire, le collecteur perdrait sa liberté de mouvement et ne pourrait plus poursuivre le soleil. Le système doit donc être aussi compact que possible, pour pouvoir dissimuler le minimum de radiation solaire. Comme mentionné dans la figure 22, deux solutions peuvent être utilisées :

➤ Le cycle de Stirling

Le cycle de Stirling idéal est représenté sur la figure 23 (source : les cycles thermodynamiques Tome II), Il comprend 4 transformations :

- ✓ 1-2 : Compression isotherme
- ✓ 2-3 : Echauffement isochore
- ✓ 3-4 : Expansion isotherme
- ✓ 4-1 : Refroidissement isochore

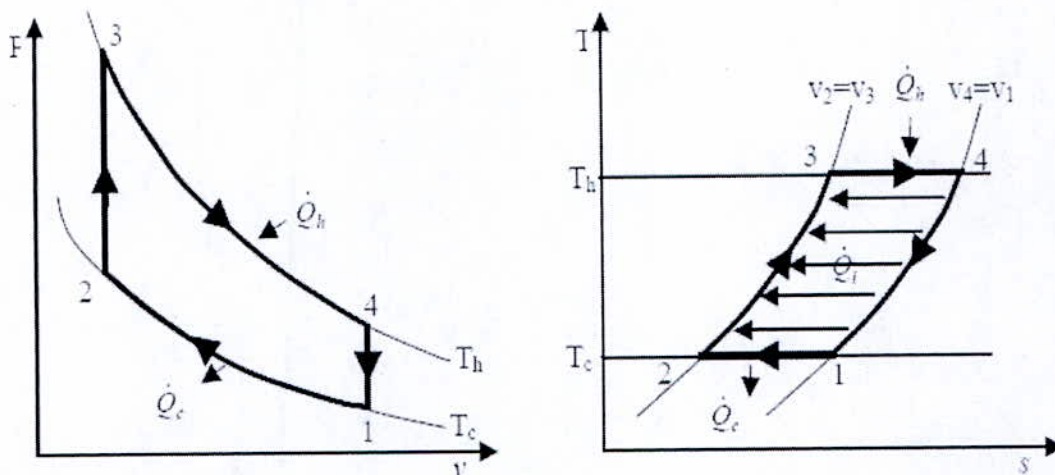


Figure 23 : Le cycle de Stirling Idéal

Le rendement du cycle de Stirling idéal est semblable au rendement de Carnot, puisque l'expansion et la compression sont isothermes. Cependant, de nombreuses irréversibilités existent dans le cycle qui réduit ce rendement, particulièrement dans le régénérateur. Dans le cas des capteurs paraboliques, la source chaude se situe généralement à une température de 700 °C et la source froide est assurée par l'air ambiant, brassé par un ventilateur à l'arrière du moteur. Le rendement électrique du moteur Stirling à ces niveaux de températures atteint les 40%.

Le principal avantage du moteur Stirling est que le fluide de travail (hélium ou hydrogène à une pression de 200 bars) est totalement isolé de son environnement. Le transfert de chaleur s'effectue à l'extérieur, ce qui simplifie la conception du système.

➤ Fonctionnement du moteur Stirling

Le moteur Stirling contient une quantité de gaz l'hélium ou l'hydrogène qui se réchauffe et se refroidit. L'expansion du gaz due au réchauffement et la contraction du même gaz provoquée par son refroidissement mettent en mouvement des cylindres qui sont liés entre eux par un mécanisme à bielle pour produire de l'énergie mécanique.

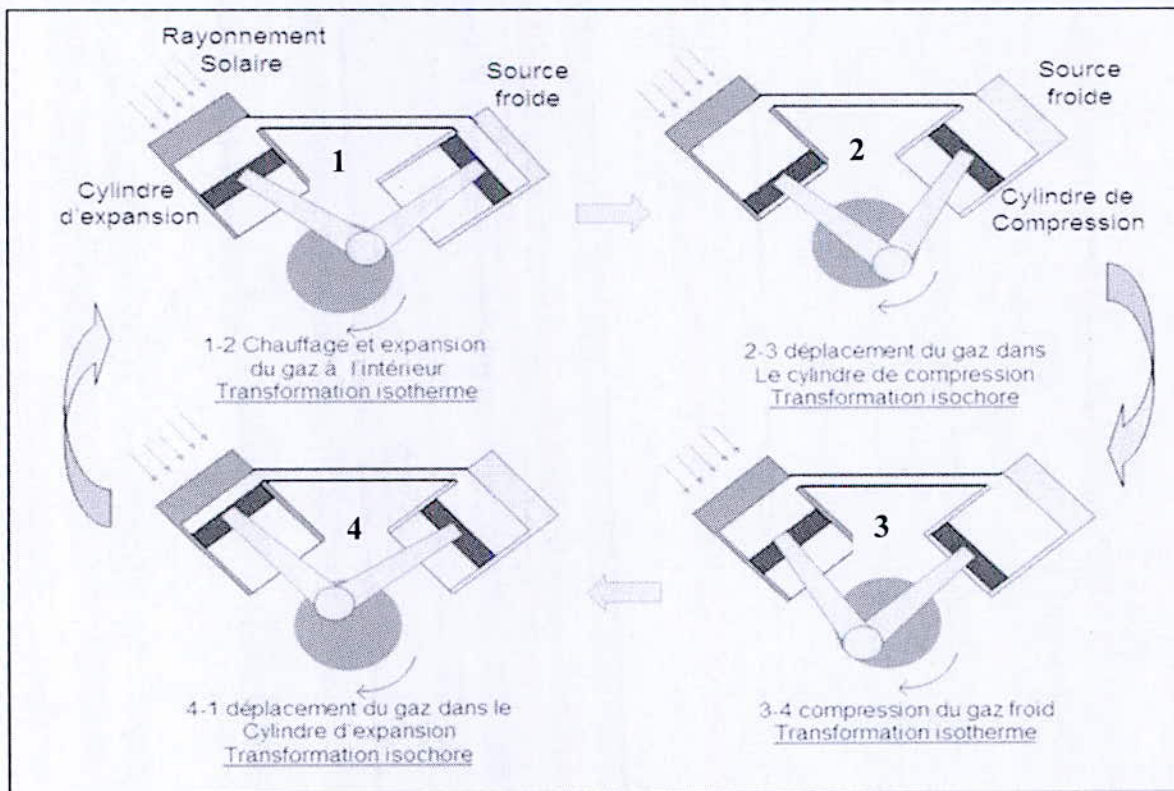


Figure 24 : Principe de fonctionnement d'un moteur Stirling

Un moteur Stirling en V se compose de deux cylindres, l'un de travail, l'autre de compression liés entre eux et contenant un gaz de travail (l'hélium ou l'hydrogène). Les pistons agissent sur un mécanisme en bielle. Lorsqu'on réchauffe le gaz dans l'unité de chauffage (récepteur) à l'aide, par exemple, du rayonnement solaire concentré, celui-ci se dilate et actionne le piston (1-2) qui effectue un travail. (Figure N°24). Une partie de ce travail est utilisée pour introduire le gaz chaud du cylindre de travail dans le cylindre de compression (2-3). A cette occasion, le gaz traverse le générateur où il cède une grande partie de sa chaleur, stockée provisoirement pour une courte durée. Le refroidisseur du gaz, traversé par un courant d'eau, et situé derrière le générateur a pour fonction de continuer à refroidir le gaz (2-3). Lorsque le piston du cylindre de compression revient, le gaz froid sera alors comprimé (3-4) et circule en reprenant la chaleur que le générateur a auparavant stockée et retourne au cylindre de travail

dans le récepteur pour être de nouveau surchauffé (4-1). Dans l'ensemble, l'expansion du gaz chaud dans le cylindre de travail livre plus d'énergie que la quantité énergétique nécessaire au déplacement et à la compression du gaz froid dans le cylindre de compression. Avec ce surplus d'énergie on peut faire marcher le générateur qui est directement mis en bride avec l'arbre du moteur. La puissance fournie varie entre 3 et 10 kW, en fonction de l'intensité du rayonnement solaire. Elle est réglée d'après la pression du gaz de travail dans la machine et suivant que ce gaz de travail soit introduit ou évacué.

➤ Le cycle de Brayton.

Remarque : les concentrateurs solaires en cuvettes paraboliques alimentent un point de consommation en énergie thermique à des températures atteignant facilement les 1000°C , par conséquent, ils peuvent remplacer les combustibles fossiles dans la chambre à combustion de la turbine à gaz dans le cycle de Brayton.

La compacité des turbines à gaz, en fait également un candidat très adapté aux capteurs paraboliques. A nos connaissances, il n'existe pas d'exemple d'application de cette technologie en raison, principalement du design plus complexe et d'un rendement inférieur. Les prédictions évaluent le rendement thermoélectrique de la turbine à gaz par capteurs en cuvettes paraboliques à 30%. Le schéma d'intégration du cycle de Brayton sur le concentrateur solaire est représenté sur la figure 25 [10].

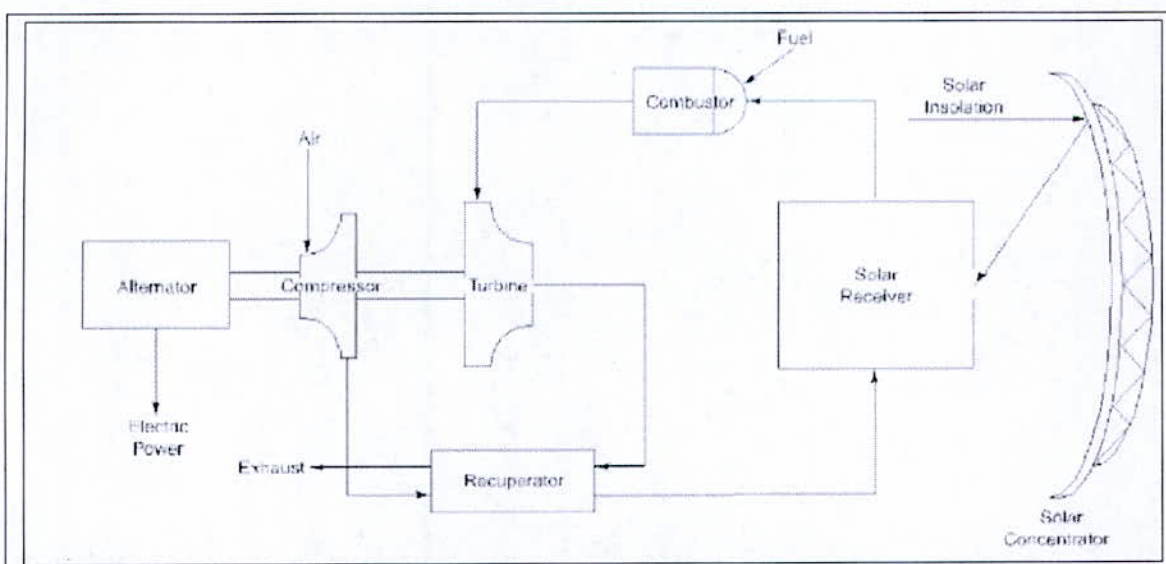


Figure 25: Système de capteur parabolique avec un cycle de Brayton

III-2-3- Les centrales thermoélectriques solaires à tour

1- Principe de fonctionnement d'une Centrale Solaire à Tour

La centrale thermoélectrique à tour solaire est conçue pour assembler en un champ de centaines de capteurs en forme de miroirs presque plats appelés héliostats. Ces miroirs sont positionnés par ordinateur pour poursuivre la trajectoire solaire sur deux axes durant la journée. Tous les miroirs (héliostats) réfléchissent la lumière solaire incidente et la concentrent à une même surface réduite (4-6m²) du récepteur situé au sommet d'une tour où elle est absorbée, c'est-à-dire convertie en chaleur. Cette énergie thermique est transférée par un fluide caloporteur approprié au processus vers la turbine ou injectée dans un stockage où l'échange thermique s'effectue par l'intermédiaire d'un échangeur de chaleur. La température dans le récepteur peut atteindre les 800°C. Là aussi, suivant le niveau de température du processus, on peut utiliser comme fluides l'eau / vapeur, des sels fondus, du sodium liquide, une huile synthétique dans une atmosphère d'hélium pour éviter la décomposition de cette huile thermique ou tout simplement de l'air.

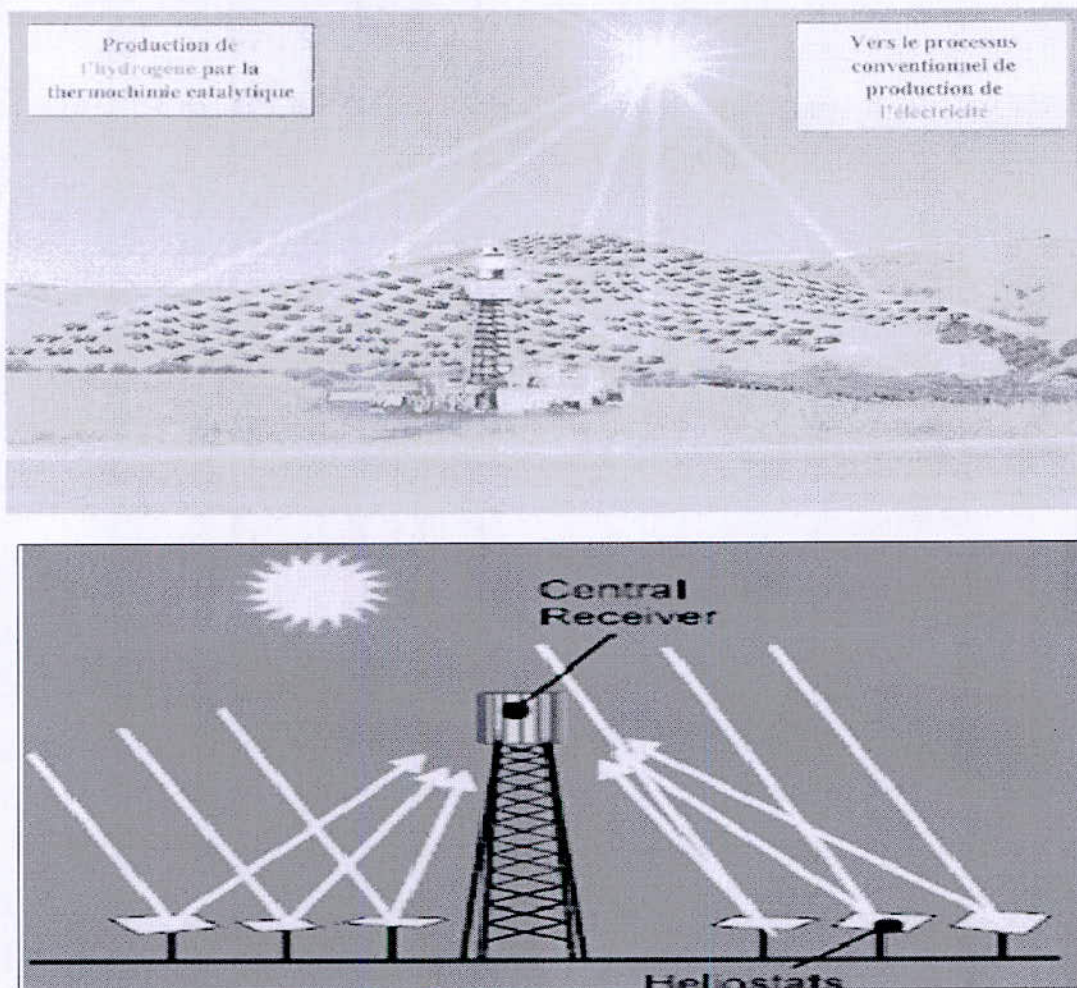


Figure 26: Installation de la tour solaire

Il est à indiquer que chaque héliostat traque le soleil individuellement et le réfléchit en direction d'un receiver au sommet de la tour solaire. Le facteur de concentration varie entre 600 et 1000, ce qui permet d'atteindre des températures importantes, au niveau du récepteur avoisinant les 800 °C.

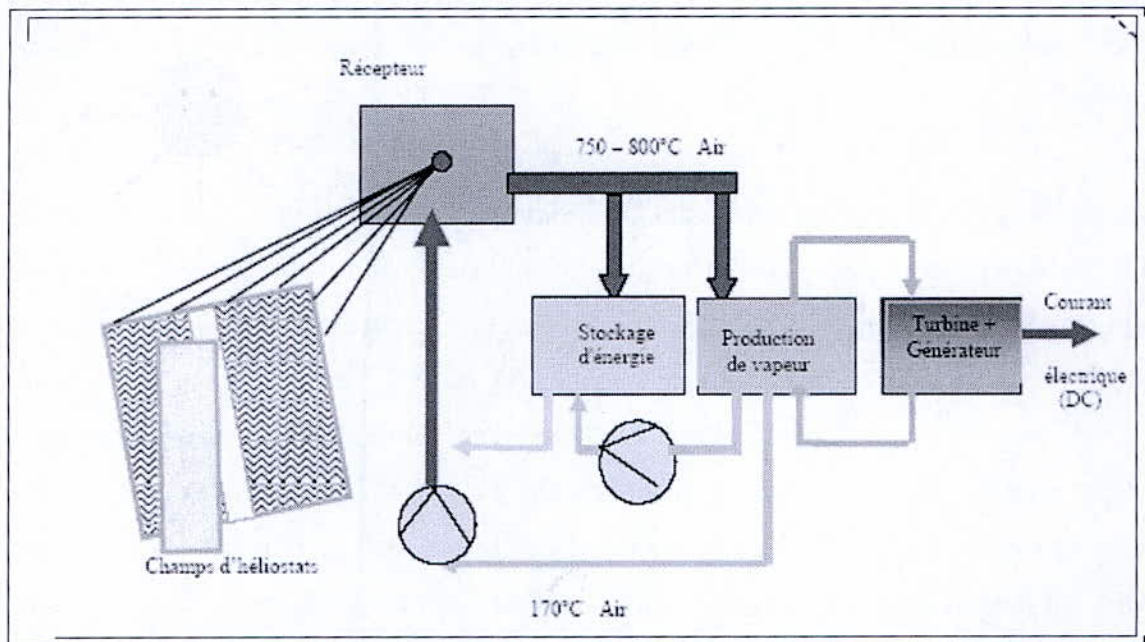


Figure 27 : Croquis simplifié d'une installation de production électrique à l'échelle industrielle par la technologie des Centrales Electrothermiques Solaires en tour (Source : Khedim)

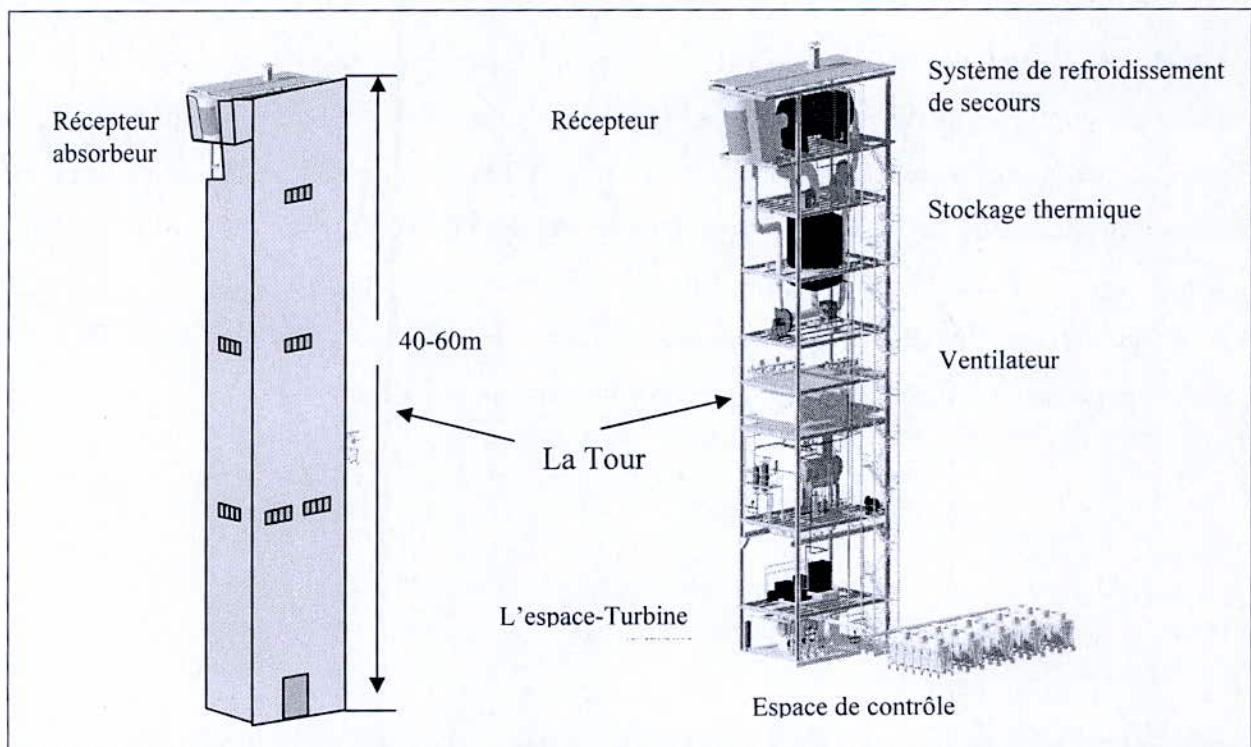


Figure 28 : Le bâtiment qui abrite tous les composants de la Tour Solaire, vue avec sa partie extérieure et son contenu intérieur (Source : Khedim A. et Hoffschmidt B., 2007)

2- Le champ d'héliostats

Une grande partie des coûts d'investissement est consacrée aux champs d'héliostats (environ 30 à 35% de l'investissement total). Nous voyons déjà, que par rapport à l'Europe Centrale, (Allemagne), et grâce à l'intensité de l'ensoleillement et à la durée en heures par an de cet ensoleillement, la surface des héliostats d'une Centrale de la même puissance peut être sensiblement réduite en Algérie. (Une estimation grossière est effectuée à la fin de ce mémoire.)

L'optimisation du champ des capteurs le désigne et la finition des héliostats sont d'une importance décisive. Le modèle d'héliostat à membrane métallique tel qu'il est construit par le groupe Schlaich, Bergermann et Partner (SBP) est constitué d'une plaque de tôle d'acier fine ramée sur un cône de serrage et sur laquelle on a collé du verre miroitant. Sur le côté dos du cône de serrage on a placé une deuxième membrane. En fonction de la sous-pression dans l'espace entre les deux membranes, on obtient dans la membrane à miroirs un réflecteur de concentration qui focalise la lumière solaire sur le récepteur. Le miroir poursuit l'évolution solaire sur deux axes. Le prototype d'héliostat tel qu'il est construit sur la PSA a une surface de 150m².

3- Récepteur

Le récepteur est l'élément principal d'une Centrale Solaire en Tour : c'est là qu'arrive la radiation amplifiée provenant de tous les héliostats et c'est là aussi qu'a lieu sa conversion en énergie thermique à des températures très élevées, au niveau de l'absorbeur. Pour une puissance thermique de 90 MW, le récepteur se compose de 4000 modules d'absorbeurs en forme hexagonale recouvrant entièrement sa surface conique (Figure ci dessous). Le débit d'air qui traverse les éléments absorbeurs est ajusté par rapport à la densité du flux de radiation par une plaque en tôle perforée et par un diaphragme solidement monté.

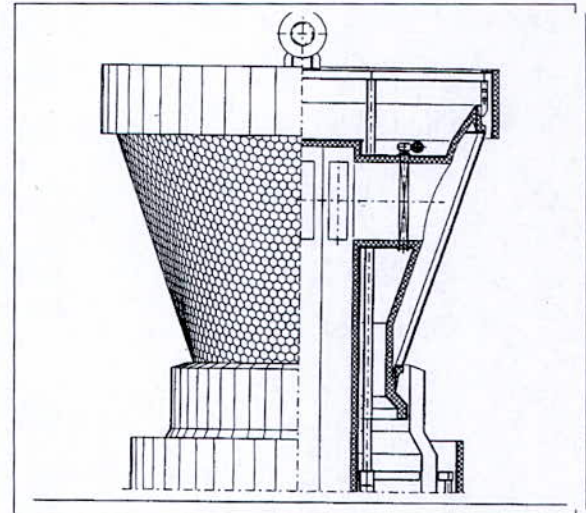
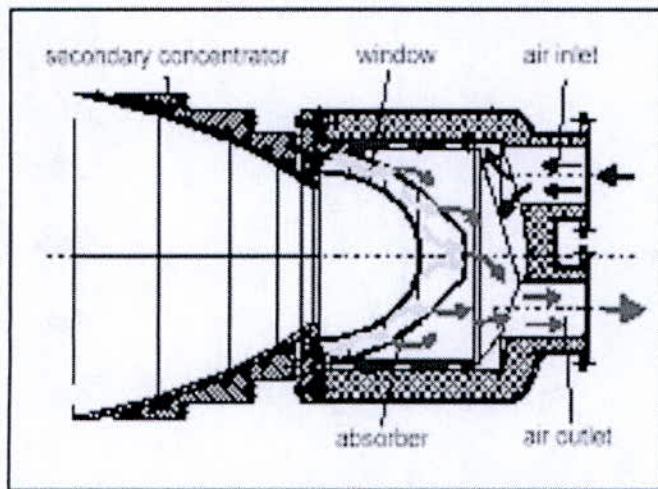


Figure 29 : Un récepteur volumétrique
(Source: G. Keintzel et A. Finker, VDI-Bericht 1200, 1995)

Durant la journée, le maximum de densité du flux de radiation change en fonction de la position solaire au tour du récepteur. Ce dernier est compartimenté en huit secteurs. Le débit d'air est adapté au profil de la densité du débit de radiation à l'aide de huit clapets réglés sur commande.

Dans le générateur de vapeur, l'air est refroidi aux alentours de 200°C. Pour éviter toute perte d'énergie thermique, cet air chaud est canalisé du bas vers le haut devant le récepteur. Ce qui permet à l'air d'entrée du récepteur de se préchauffer. De cette manière, on obtient une récupération de chaleur vouée à la perte.

Dans cette filière, trois fluides caloporteurs sont susceptibles d'être utilisés : la vapeur d'eau, les sels fondus, et l'air.

4- Fluide caloporteur et récepteur solaire

4-1- Le récepteur à vapeur- eau

Dans ce cas, on utilise un récepteur à tubes qui est alimenté en eau à haute pression. Cela pose un problème de sollicitation mécanique des tubes bien connu dans le cas des chaudières à vapeur, leur entretien est coûteux, et donc le changement d'un tube de chaudière, est courant. De plus, les possibilités d'extraction des calories sont très différentes dans les parties des panneaux qui sont « en eau » et dans celles qui sont « en vapeur ». La conduite d'un tel récepteur est donc délicate car elle implique que la cartographie des flux solaires soit

contrôlée en permanence, une mauvaise répartition de ceux-ci entraînant une surchauffe et une fusion du tube, c'est pour ces raisons que ce type de récepteur a été abandonné aujourd'hui.

4-2- *Le récepteur à sel fondu*

On utilise ici des solutions qui ressemblent à la précédente (chaudières à tubes) avec les différences suivantes :

- le sel est toujours liquide et sans pression, ce qui sollicite peu la résistance mécanique des tubes (ils peuvent donc être fins),
- il doit parcourir son circuit à grande vitesse pour que soient favorisés les échanges thermiques avec la paroi, ce qui provoque de fortes pertes de charge,
- les tubes sont soumis à une corrosion qui peut devenir galopante si leur température n'est pas maintenue au dessous d'une valeur critique,
- ils doivent être réchauffés à une température suffisante avant leur remplissage par le sel toujours figeable (au-dessus de 140°C à Thémis, et de 220°C à Solar Two).

Le récepteur à sel fondu est un appareil robuste car, étant parcouru sur toute sa surface par un liquide à grande vitesse, il est assez tolérant aux variations naturelles de la cartographie des flux. La rupture d'un de ses tubes peut être considérée comme un événement tout à fait exceptionnel, d'où un entretien a priori peu coûteux. De plus, le contrôle de cette cartographie peut être abandonné, surtout dans le cas d'une chaudière en cavité à la surface de réception généreuse (cas de Thémis). Il est donc facile à conduire.

Il doit être réchauffé avant le remplissage. Il l'est par « traçage » électrique. Cette technique est bien adaptée et a donné de bons résultats quand elle est bien appliquée. Des faux travaux peuvent provoquer des surchauffes corrosives rapides. De telles pannes sont ainsi survenues tant à Thémis qu'à Solar Two. Dans les deux cas, elles étaient dues à des prolongements anormaux des traceurs électriques.

Par contre, son fonctionnement entraîne des pertes de charge importantes nécessitant la mise en œuvre de pompes puissantes. Celles-ci entraînent une consommation électrique interne importante qui pénalise le rendement de conversion de la centrale.

A cet égard, il serait bien préférable d'absorber le rayonnement solaire dans la masse même du fluide en circulation plutôt que sur une paroi métallique intermédiaire : il serait alors

inutile de provoquer ces coûteuses pertes de charge. Un prototype de récepteur à sel de ce type a été mis à l'essai par les « Sandria Laboratoires » sur leur site d'Albuquerque. Il s'agissait d'un récepteur dans lequel on créait une lame de sel épaisse quasi verticale par écoulement en cataracte sur une tôle légèrement inclinée par rapport à la verticale. Cette tentative n'a pas eu de suite sans doute du fait de la dégradation chimique du sel provoqué par son contact cyclique avec de l'air neuf lors de sa traversée du récepteur.

4-3- Le récepteur à air

Aucune centrale à tour n'a été construite autour de ce choix excepté celle en construction à Jülich (Allemagne). Mais de nombreuses propositions de chaudière à air haute température ont été faites dans l'ambition de rendre possible la mise en œuvre d'un cycle combiné et de pouvoir profiter de ses hauts rendements.

La plus élaborée de ces propositions, et de loin, est le concept « GAST » devenu plus tard « **PHOEBUS** » étudié par les équipes allemandes de la DLR et ayant donné lieu à l'étude détaillée d'au moins un projet. De plus, des expérimentations poussées d'éléments de sa chaudière volumétrique ont été réalisées par l'équipe germano-espagnole d'Almería. Bien que jamais mise en œuvre, cette variante de la filière est souvent considérée comme une alternative crédible à la centrale à sel fondu.

Les avantages de l'introduction de ce type de récepteur mis en chantier dans la Centrale Solaire en Tour de Jülich **sont :**

- Le bon rendement du système en raison des paramètres (température et pression) de vapeurs élevés est comparable à celui d'une centrale de type conventionnel.
- La compatibilité environnementale est incontestable à cause de l'introduction de l'air comme fluide caloporteur, le fluide du mécanisme du travail de l'eau-vapeur et le matériel de stockage thermique est du sable.
- La fiabilité du système due à l'utilisation des éléments principaux provenant des centrales thermoélectriques conventionnelles.
- La disponibilité permanente de l'énergie électrique grâce à la présence d'un stockage thermique.
- La technologie des centrales solaires en tour avec récepteur à air qui produit de la chaleur à très hautes températures convient parfaitement à des applications dans la thermochimie catalytique pour la production de l'hydrogène solaire.

- La construction de champs d'héliostats en modules adaptés au besoin et à la disponibilité de l'énergie solaire.
- Une hybridation incluant une source de combustion additionnelle (turbine à gaz, biogaz, chaleur de récupération) à un système solaire est faisable. Elle est parfois même souhaitable en raison que les deux processus se complètent.

5- Le stockage de la chaleur et le transport

5-1 - Cas du sel fondu

Cette filière résout particulièrement bien le problème du stockage de l'énergie. Le sel fondu présente en effet une bonne capacité calorifique volumique (2,4 joule/°C cm³ pour le Hitec de Thémis, à comparer aux 4,18 de l'eau) et ne présente pas de difficulté particulière de manipulation si l'on accepte la nécessité de mettre en œuvre d'un réchauffage par traçage électrique lors du remplissage des tuyauteries. Il assure aussi le transport de la chaleur récoltée dans de bonnes conditions bien que sa haute densité puisse apparaître comme un inconvénient (elle rend en effet coûteux en énergie le transport du sel froid en haut de tour). Il faut cependant noter les différences qui séparent le sel à trois composants utilisé à Thémis (« Hitec ») du sel à deux composants de Solar Two (« Draw-salt ») : le Hitec fond à 140°C mais ne peut guère être chauffé à plus de 500°C.

Deux types de stockage peuvent être utilisés : celui qui met en œuvre un seul bac (stockage à un réservoir) vertical de grand allongement, c'est le stockage dit « à stratification » où le sel chaud flotte sur le sel froid, et celui qui utilise deux bacs (stockage à deux réservoirs) ayant chacun la pleine capacité de rétention du sel en circulation. Dans ce cas, l'un des bacs contient le sel « froid » (aux alentours de 200°C à Thémis, de 290°C à Solar Two) et l'autre le sel chaud. Ainsi les sels fondus sont transférés du réservoir froid au réservoir chaud afin d'accumuler l'énergie excédentaire. La première formule est en tout point préférable (capacité géométrique et surface de pertes divisées pratiquement par deux). Elle présente pour certains l'inconvénient de permettre le mélange thermique des couches chaude et froide : à leur interface, il se crée une couche « tiède » dont l'épaisseur augmente avec le temps. Cet inconvénient est toutefois plus apparent que réel car il n'entraîne pas en lui-même de perte thermique mais seulement une légère baisse de capacité de stockage par rapport à sa capacité géométrique.

5-2- Cas de l'eau-vapeur

Dans ce cas le fluide caloporteur et le fluide thermodynamique se confondent, la fonction de stockage doit être assurée avec un minimum d'autonomie pour permettre un fonctionnement correct de la turbine à vapeur (elle ne supporterait pas un régime de fonctionnement trop haché). C'est là le gros problème de la filière car le stockage de la vapeur vive est particulièrement malaisé. Son contenu énergétique volumique est faible, ce qui oblige à mettre en œuvre des réservoirs à pression de grande taille. On conçoit qu'on atteigne vite les limites raisonnables de capacité de ce stockage. On utilisera donc cette technique pour réaliser des stockages dits « nébulaires » qui sont dimensionnés au plus juste : ils assurent uniquement les conditions de régularité à très court terme de la production de vapeur qui assurent un fonctionnement correct de la turbine.

Pour augmenter l'autonomie, on est tenu de concevoir une boucle de stockage, réalisée avec un fluide plus approprié qui échangera ses calories soit avec la vapeur pour en épuiser le contenu énergétique, soit au contraire avec l'eau pour la vaporiser en cas d'absence de soleil. Un tel concept a été utilisé à Solar One. La boucle de stockage a été réalisée avec une huile de synthèse comme fluide caloporteur et un lit de cailloux pour le stockage proprement dit. Cette installation, qui dégradait le rendement thermodynamique du cycle en cas de déstockage (à cause de la température relativement basse à laquelle était assuré le stockage, 304°C, au lieu de 515°C pour la vapeur produite en chaudière), a fonctionné pendant le temps d'expérimentation de Solar one. Mais celle-ci s'est précisément arrêtée le jour où le bac de stockage a pris feu, détruisant évidemment toute la boucle. Cet événement a sans doute signé l'arrêt de mort de cette formule au niveau international car depuis cette date (1988), on n'a plus entendu parler de projet de centrale à tour à eau-vapeur.

5-3- Cas de l'air

L'air ne constitue pas un caloporteur très efficace dans la mesure où sa capacité calorifique volumique est très faible. On calcule par exemple que le débit volume d'air chaud (185-800°C) nécessaire pour transporter l'énergie thermique récoltée par un récepteur est environ 2000 fois plus grand que celui du sel fondu à 250-500°C qui assurerait la même fonction. On calcule également, dans le cas étudié, que les tuyauteries à sel de 32 cm de diamètre devraient être remplacées, pour véhiculer l'air, par des conduites de 4,60m de diamètre. C'est là une très réelle faiblesse des filières à air qui entraîne coût et déperditions. Mais il en est une autre, plus subtile, qui affecte le circuit d'air non dans sa partie chaude, mais dans sa partie froide. On a

vu plus haut qu'une grande chaudière volumétrique ne pouvait guère être fermée et qu'on était donc contraint de l'alimenter en air extérieur. Par ailleurs, dans la filière **PHOEBUS** comme dans toute autre filière à air, les calories dont se charge le caloporteur lors de son passage dans le récepteur ne peuvent pas être épuisées par les besoins du cycle thermodynamique : il doit être renvoyé vers la chaudière à une température encore notable (par exemple : 185°C). Si cette chaudière est ouverte, et c'est la seule alternative envisagée aujourd'hui, il sera impossible de recycler complètement cet air tiède (bien que dans les projets en cause on s'efforce de le « cracher » dans l'ouverture de la chaudière), et on aura à subir là une nouvelle perte qu'on peut chiffrer au minimum à 4% de l'énergie rayonnée par le champ d'héliostats. En conséquence de ces deux remarques, il faut considérer que le transport thermique constitue le point faible des centrales à air.

Par contre, même si l'air à haute température ne se stocke pas facilement, il est facile et bon marché de le débarrasser de ses calories et de les stocker sur un lit de billes de céramiques ou même de cailloux [11].

6- Le projet d'une tour solaire : PHOEBUS

La centrale thermoélectrique hybride, « solaire : fossile », **PHOEBUS** est un projet pilote soutenu financièrement par l'Allemagne et construit à Plataforma Solar de Ameria (PSA), au sud de l'Espagne. Cette centrale est constituée d'une installation thermique conventionnelle avec un circuit eau/vapeur et d'un système solaire comprenant un champs d'héliostats et un récepteur (figure 30).

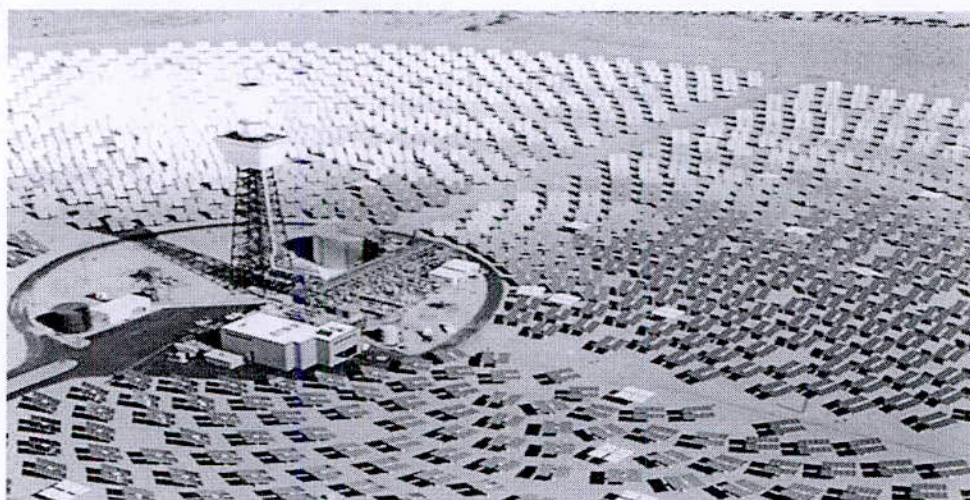


Figure 30 : Un exemple de tour solaire avec son champ d'héliostats.

➤ Conception technique de PHOEBUS.

La première centrale Phoebus a été conçue sans stockage thermique. Elle se compose d'un générateur de vapeur conventionnel, d'une turbine avec générateur et d'une installation électrique. La partie solaire comprend le champ d'héliostats, le récepteur et le circuit air (Figure ci dessus). Le nouveau système Phoebus est caractérisé par une conception particulière de la construction de son récepteur ; celui-ci fonctionne à circuit ouvert et il est refroidi à l'air atmosphérique. A la différence des autres techniques dont le récepteur est constitué d'un échangeur de chaleur en tube, l'installation Phoebus possède **un récepteur dit volumétrique**. L'élément absorbant se compose d'un tricotage métallique fin ayant une épaisseur bien définie.

Le rayonnement solaire concentré est absorbé aux fils métalliques et converti en chaleur à l'intérieur du volume de ce tissu grossier. La chaleur est transmise au débit d'air qui traverse le treillage métallique dont la partie de devant est refroidie par un courant d'air atmosphérique. Des gradients de température relativement plats s'établissent entre l'air et le tissu métallique. Le récepteur fonctionnant à l'air ne produit pas de tensions secondaires : sa flexibilité lui permet d'être inerte aux températures transitoires. En tant qu'échangeur de chaleur, l'air a l'avantage d'être ininflammable, non toxique et facilement maniable. Les héliostats forment un champ circulatoire d'un millier d'unités totalisant une surface de miroir de 150m² ciblés sur un récepteur conique au sommet d'une tour de 130m de haut. La vapeur surcompressée (540°C / 140bar) est canalisée par l'intérieur de la tour vers le sol où sont installés la turbine, le générateur, le raccordement au réseau d'alimentation et le système de refroidissement.

Dans ce complexe hybride, priorité est donnée à la production solaire. Quant au brûleur conventionnel, il n'est mis en marche qu'au lever ou au coucher du soleil. Tout en maintenant la charge de base, la centrale fonctionne de la manière suivante :

- Le débit d'air à travers le récepteur est réglé de manière à ce que la température de sortie du récepteur atteigne les 700°C, lorsque les conditions météorologiques sont propices
- Un rendement solaire minimum dû à une baisse de température causée par une présence soudaine de nuages est automatiquement compensé par le brûleur à gaz pour maintenir constant le niveau de température d'entrée de la vapeur (700°C)

- Du lever du soleil à midi, le générateur de vapeur et la turbine fonctionnent dans un état quasi stationnaire avec des variations de charges en augmentation. Elles diminuent au fur et à mesure qu'on se rapproche du coucher du soleil.
- Juste avant le lever du soleil, l'installation est mise en marche en utilisant le brûleur à gaz, pendant que les héliostats sont déjà positionnés sur le récepteur.

De ce mode de fonctionnement, l'exploitant peut tirer profit pour les raisons suivantes :

- l'installation produit des quantités d'énergie électrique prévisibles et calculables
- La radiation solaire mise à la disposition est utilisée au maximum : plus la quantité d'énergie solaire arrivant au récepteur est importante et moins le brûleur au gaz est mis en marche
- Une période de mauvais temps ne perturbe nullement l'alimentation électrique
- En raison du mode de fonctionnement quasi stationnaire (très peu de variations de charge et pas de variations de température), les problèmes de fatigue sont exclus.

Le bon fonctionnement de ce système a été validé sur une installation pilote de 2.5 MW à Almeria mais n'est pas encore disponible commercialement. Les températures atteintes sont de 800°C, mais des températures supérieures pourraient être atteintes avec des structures poreuses de SiC ou de Al₂O₃ actuellement en développement [12]

7- Nouveau concept d'une tour

Par contre le nouveau concept de construction d'une centrale thermoélectrique solaire en tour a été établi suite aux résultats de plusieurs études, avec un nouveau design basé sur un récepteur volumétrique à haute température (Koll et Hoffschmidt 2005). L'air est réchauffé à une température avoisinant les 800 °C dans un absorbeur ayant une structure en céramique poreuse et résistante aux grandes chaleurs. La chaleur est ensuite transférée vers une turbine à gaz et un générateur de vapeur avec récupération de chaleur où la vapeur en surchauffe est produite à une température de 400°C et une pression de 100 bars,

Les caractéristiques de la nouvelle conception sont les suivantes :

- La sécurité opérationnelle est garantie en raison de l'intégration des éléments sûrs provenant des centrales conventionnelles
- La partie absorbante du récepteur est conçue dans une structure simple

- Les composants du récepteur sont en céramique garantissant une haute résistivité thermique et une grande durabilité
- Un stockage thermique efficace augmente la disponibilité et rend le système flexible même durant les heures non ensoleillées
- Le système peut aisément être intégré en hybride dans un cycle combiné.
- Le fluide caloporteur est écologique et non toxique (il s'agit de l'air).

Les efforts de développement sont ciblés, à nos jours, sur le récepteur à air, sur les composants du circuit d'air en tant que fluide caloporteur et sur les moyens d'adapter les exigences de l'option solaire à la centrale thermoélectrique de type conventionnel (Koll et Hoffschmidt, 2005). Le récepteur à air est, par conséquent, le cœur du processus de conversion de l'énergie solaire thermique à très hautes températures à l'énergie électrique. Il doit répondre aux conditions des niveaux de températures dépassant les 700°C et aux densités du débit de radiation élevées, obtenues grâce à la technologie de concentration. Elles peuvent atteindre les 900 kW / m². Ce qui nécessite des matériaux répondant à des critères extrêmement résistants à de très grande température auxquels ils sont exposés. C'est la raison pour laquelle des matériaux en céramique résistants aux températures de hauts niveaux ont été utilisés, particulièrement dans la région du récepteur où les éléments sont directement confrontés à la radiation hautement concentrée. Le récepteur comprend les éléments suivants :

- Un module d'absorption en céramique
- Une structure métallique pour le transfert thermique
- Un collecteur d'air chaud.

Comparé au récepteur de structures métalliques, l'utilisation de matériaux en céramique offre de grands avantages, particulièrement pour les récepteurs grandes surfaces et dans les distributions irrégulières de la radiation à la surface du récepteur. (Koll et Hoffschmidt, 2005 ; Hoffschmidt, 1997).

Le circuit d'air sert à transporter la chaleur absorbée vers le système de récupération de chaleur du générateur de vapeur (HRSG). En raison que les températures de l'air chaud avoisinent les 700°C, un système de conduite contenant cet air surchauffé doit être soigneusement conçu.

A la sortie du générateur de vapeur, l'air refroidi retourne vers le récepteur où il a la charge de baisser la température des structures métalliques placées à l'intérieur du récepteur. Là, l'air est distribué dans divers points à l'aide de valves et de systèmes de contrôle qui tiennent compte de l'intensité irrégulière de la radiation incidente au niveau de la surface du récepteur. (Koll et Hoffschmidt, 2005).

Un paramètre essentiel dans la réduction des coûts des projets de construction d'une Centrale Solaire en Tour est le système de stockage thermique pour compenser les fluctuations de la radiation solaire ou pour ponter cette courte phase de l'apparition de nuages dans le ciel.

Une conception appropriée à une capacité de stockage, permet de tenir la centrale « au chaud » même si elle est à l'arrêt durant plusieurs jours. Ce qui lui permettra de démarrer rapidement lorsque les conditions de l'ensoleillement sont favorables.

La nouvelle conception de construction de la station envisage d'abriter tous les éléments dans la Tour-même permettant d'obtenir un design compact sans bâtiment supplémentaire et d'écourter les lignes de connexion pour le fluide caloporteur, l'électricité et le système de contrôle [13].

IV- LES EXPERIENCES TECHNOLOGIQUES

L'expérimentation a commencé aux États-Unis au laboratoire de SANDRIA à Albuquerque en 1976. La centrale avec une tour de 63 mètres et 222 héliostats contrôlés par ordinateur a permis de fournir une puissance thermique de 5 MW. Depuis, la recherche a continué aux États-Unis, en France et en Espagne avec la participation active des laboratoires allemands. THEMIS est l'unique essai français de production d'électricité au moyen d'une centrale solaire "à tour". Le projet de recherche et développement a démarré en 1975, autour d'une équipe mixte EDF – CNRS. La centrale a été livrée pour des essais d'exploitation en 1983 et abandonnée en septembre 1986. Un nouveau projet sur le même site voit le jour en 2006 : sur les 201 héliostats, la moitié recevra des cellules photovoltaïques pour la production d'électricité. L'autre moitié sera consacrée au projet de recherche "Pégase" qui est une centrale solaire thermique d'une conception nouvelle. Le futur récepteur solaire qui sera placé sur la tour aux environs de 2010, recevra les rayons réfléchis par les miroirs afin de monter à 1 000 °C, contre 500 °C auparavant. Le défi est de maîtriser les transferts de chaleur à très haute température afin de s'assurer de très hauts rendements.

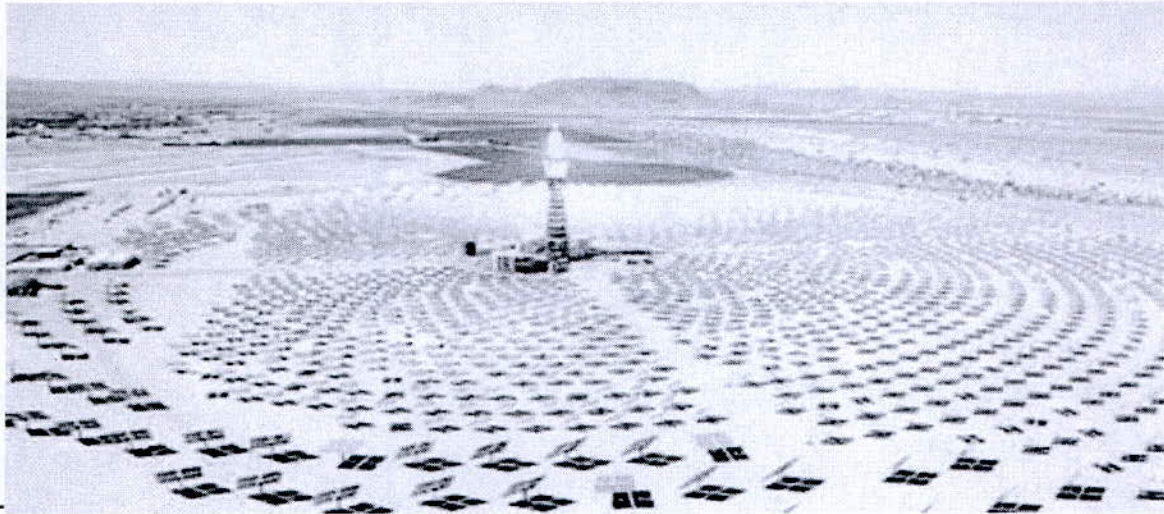


Figure 31 : La centrale SOLAR 2 avec 1926 héliostats autour de la tour

La première centrale d'une capacité de 11 MW a été inaugurée en mars 2007, elle doit produire 23 GWh d'électricité par an. Mais d'ici 2013, il est prévu de construire huit centrales à Sanlúcar, la Mayor, pour porter la capacité du complexe à 302 MW. A terme, cet ensemble sera capable d'approvisionner en électricité 180 000 foyers, l'équivalent d'une ville comme Séville [14]

V – COMPARAISON DES TECHNOLOGIES DE LA PRODUCTION THERMIQUE SOLAIRE

Tableau 4 : Comparaison des différentes technologies

Désignations	Centrales solaires cylindroparaboliques	Centrales solaires à tour	Paraboles solaires Dish-Stirling
Description	Les capteurs cylindroparaboliques de rayon de courbure de 2 à 2,5m de longueur 20 à 100 Concentration sur un tube à fluide caloporteur.	Concentrateur à tour avec héliostats, les récepteurs de 4 à 6m ² , renvoyant le rayonnement sur le concentrateur Fluide : sel fondu ou air	Miroir parabolique de diamètre 7 à 10 m Concentration sur un moteur Stirling, le gaz moteur de l'hélium ou de l'hydrogène.
Concentration	60 à 400	600 à 1 000	1000 à 4 000
Température de travail	< 450 °C	400 à 800 °C	600 à 1 000 °C
Rendement annuel net	10 – 14 %	12 – 20 %	16 – 25 %
Coût d'investissement	2,8 à 3,5 €/We	3 à 4 €/We	10 à 14 €/We
Unité de capacité maximum installée	80 MWe (SEGS IX) Californie	10 MWe (Solar Two) Californie	25 kWe (SES Boeing)
Commercialisation	Commercialisée	Prototype	En cours
Application	Production centralisée d'électricité, chaleur industrielle	Production centralisée d'électricité, chaleur industrielle HT	Petites unités décentralisées

VI- GISEMENT ET IMPACT ENVIRONNEMENTAL

On peut dire que si on se base sur les performances connues, en moyenne, des techniques qui viennent d'être énumérées que la production d'électricité pourraient largement être assurées par un nombre de centrales thermoélectriques solaires qui occuperaient, par exemple, une surface de 5000 km² dans les zones arides où le rayonnement solaire direct est presque permanent. Cela ne représente guère qu'un carré de 70 km de côté mis à disposition en zone inhabitée). Si l'humanité entière devait être approvisionnée en électricité avec un niveau de confort européen, il en faudrait 100 fois de cette superficie. Ces surfaces sont certes importantes, mais nullement démesurées par rapport à toutes ces terres arides et inhabitées disponibles sur notre planète et qui reçoivent en moyenne 2700 kWh/m²/an de rayonnement solaire.

Impact environnemental

Depuis que l'humanité prenne de plus en plus conscience des effets néfastes des combustions aux hydrocarbures et au charbon, l'impact environnemental est devenu un vrai défi. Il constitue aujourd'hui un critère pour l'utilisation rationnelle des combustibles de source fossile tout en faisant un choix sur d'autres options pour réduire la concentration des gaz à effet de serre. Pour cela, la plupart des pays ont pris l'engagement de le faire (référence au programme de Kyoto).

L'énergie solaire thermique est un choix important dans la sélection de technologies complémentaires. Avec un taux d'émission estimé inférieur à 20 kg CO₂/MWh_e, l'électricité solaire thermodynamique est comparable à celle d'origine hydraulique (4 kg CO₂/MWh_e) ou nucléaire (6 kg CO₂/MWh_e), mais elle est sans aucune comparaison avec l'électricité de type photovoltaïque (100 kg CO₂/MWh_e) ou encore l'électricité issue de la combustion du charbon (900 kg CO₂/MWh_e). Les chiffres indiqués ici tiennent compte des émissions liées à la construction des centrales et le cas échéant à l'extraction des combustibles.

Tableau 5: Les émissions de CO₂ pour différentes sources d'énergies

Porteur d'énergie	Valeur thermique	Bilan du CO ₂
Charbon	1kg – 8,14 kWh environ 3,7kg CO ₂	0,455 kg CO ₂ / kWh chaleur
Gaz Naturel	1m ³ environ 10 kWh environ 1.98 kg CO ₂	0,198 kg CO ₂ / kWh chaleur
Diesel	1 litre environ 9,80 kWh environ 2,40kg CO ₂	0,245 kg CO ₂ / kWh chaleur
Essence	1 litre environ 9,30 kWh environ 2,16kg CO ₂	0,232 kg CO ₂ / kWh chaleur

(source : Christoph Buchal, Energie 2008)

VII- DIMENSIONNEMENT D'UNE CENTRALE A TOUR EN ALGERIE

Le dimensionnement d'une Centrale Solaire, indépendamment du système et de sa puissance est un sujet complexe en lui-même car il nécessite une multitude de données spécifiques à l'endroit où cette Centrale sera installée.

Il est donc assez difficile d'effectuer le dimensionnement d'un système lié à une technologie nouvelle de haut niveau, quelque soit sa nature. Pour y faire, cela nécessitera beaucoup de temps, de données, de documentations et surtout d'un logiciel de simulation. Le thème pourra être traité dans le cadre d'une thèse de doctorat.

Pour ces raisons nous avons estimé raisonnable de ne pas tenter de traiter le dimensionnement d'une Centrale Solaire en Tour pour une application en Algérie sans connaître tous les paramètres relatifs à ce pays et au lieu de sa construction et sans avoir recours à un logiciel performant pour traiter les données en rapport avec le dimensionnement de la dite Centrale Solaire en Tour.

Par conséquent, une extrapolation des données techniques et économiques de la Centrale Solaire de Jülich, peuvent être utilisées pour dimensionner une Centrale Solaire Algérienne.

Les résultats que nous présentons ci-dessous sont dans un but exclusivement informatif.

Données techniques et économiques de la Centrale Solaire de Jülich

1- Surface de l'ensemble du site :	10 ha
2- Surface des Héliostats	1,72 ha=17200 m ²
3- Puissance électrique	1,5 MW
4- Radiation Solaire Directe	800 kWh/m ² .an
5- Nombre d'heures opératoires, pleines charge	environ 1000 heures
6- Production électrique	environ 1000MWh /an
7- Capital d'investissement	environ 12 millions €
8- Prix de revient approximatif du kWh _{élect}	entre 18 et 20 cent €

Calcul approximatif sur la base de la centrale de Jülich (voir détail du calcul en annexe)

Sur la base des données de la centrale de Jülich et sur toutes réserves comme indiquées ci-dessus, une centrale de ce même type installée à **Alger (Nord)** aurait comme caractéristiques :

1- Surface de l'ensemble du site :	5 ha
2- Surface des Héliostats	0,8094 ha= 8094m ²
3- Puissance électrique	1,5 MW
4- Radiation Solaire Directe	1700kWh/m ² .an

5- Nombre d'heures opératoires, pleines charge	environ 2650 h/an
6- Production électrique	environ 3975 MWh/an
7- Capital d'investissement	environ 7,3 millions
8- Prix de revient approximatif du kWh _{élect}	12 cent €

CONCLUSION :

Nous avons voulu, par cette contribution, présenter les différents aspects de la production électrique à l'échelle industrielle en remplaçant le combustible conventionnel par le combustible solaire. Dans ce contexte, Nous avons énuméré trois processus de concentration du rayonnement solaire direct, à savoir les installations basées sur les concentrateurs cylindroparaboliques en forme de bassines et dont la lumière solaire est amplifiée, réfléchiée et absorbée sur une ligne. Le deuxième cas porte sur des systèmes de concentration de la lumière focalisée sur un point à l'aide d'une cuvette parabolique où elle est absorbée et liée à un moteur Stirling. Pour le troisième processus auquel nous avons accordé plus d'attention c'est la technologie de l'utilisation de la tour solaire avec son récepteur volumétrique et son champ de capteurs en miroirs paraboliques presque plats, appelés héliostats. Elle est la technologie la plus innovante dans la science des énergies renouvelables, en raison de la chaleur à très haute température qu'elle peut produire (jusqu'à 1000°C) signifiant une amélioration du rendement de Carnot et de son utilisation. A moyen terme dans des processus chimiques tels la thermochimie catalytique pour la production massive de l'hydrogène par dissociation de la molécule d'eau.

Nous restons, néanmoins lucides, en indiquant que malgré leur fiabilité et leur rendement énergétique, les centrales thermoélectriques solaires n'ont toujours pas encore le rang qui leur est dû sur le marché mondial de l'énergie, encore dominé par les hydrocarbures et le charbon. Il n'empêche que plus d'un milliard d'€uros sont investis, jusqu'à présent, dans des projets de recherche et de développement par certains pays comme les USA, l'Allemagne, la Suisse et l'Espagne.

Une estimation des coûts de revient du kWh_{élec} produit par une Centrale Thermoélectrique Solaire en Tour dans notre pays ne peut être entreprise, en raison de l'incertitude des données relatives à toute une multitude de paramètres que nous n'avons pas. Il en va de même pour le manque d'un logiciel qui nous permettrait de traiter ces données. Aussi pour toutes ces raisons, nous avons fait une approche grossière sur la base des données de la centrale de Julich et les résultats ne peuvent être pris comme référence.

ANNEXE SUR LE CALCUL DE DIMENSIONNEMENT

d'une centrale solaire à tour situé au nord d'Algérie

Désignations	Centrale de Julich	Centrale au Nord d'Algérie
Surface de l'ensemble du site :	10 ha (100 000m ²)	Environ 5 ha (50 000m ²)
Prix du m² de terrain	30 €	80 €
Prix total du terrain	3 millions €	8 millions €
Surface des héliostats	1,72 ha (17 200m ²)	X=8094m ²
Prix du m² des héliostats	200 €/m ²	300 €/m ²
Prix total des héliostats	3 440 000€	2 428 200 €
Puissance électrique	1,5 MW	1,5 MW
Radiation Solaire directe	800 kWh/m ² .an	1700kWh/m ² .an
Quantité d'énergie produite par radiation directe sur une surface par m² d'héliostats par an	800 * 17200m ² = 13 760MWh/an	Y=1700*8094 =13760 MWh/an
Nombre d'heures opératoires pleines charge	1000 h/an	2650 h/an
Rendement de la centrale	7,27%	
Production électrique	1000MWh/an	3975 MWh/an
Capital d'investissement	12 millions €	7,3 millions €
Durée de fonctionnement de la centrale	20 ans	20 ans
Prix de revient approximatif du kWh_{elec}	Entre 18 et 20 Cent €	13 cent €

Supposons que la centrale qui va être installée à Alger est de la même puissance que celle de Julich

1- **Détermination de la surface d'héliostats = X**, vue que la surface des héliostats d'une centrale de la même puissance (1,5MW) est en relation directe avec l'intensité d'ensoleillement et la durée en heures par an de cet ensoleillement, donc pour :

- La Centrale de Julich, les radiations solaires directes sont de 800kWh/m².h il en faut 1,7 ha (17 000m²) pour produire 1000 MWh/an.

- La centrale au nord d'Algérie, les radiations solaires directes sont de 1700 kWh/m².h il faut X m² pour produire Y MWh/an, donc la surface des héliostats = $(17200 * 800)/1700 = 8094 \text{ m}^2 = X$

La surface des héliostats = 8094m²

2- Détermination de la quantité d'énergie produite par radiation directe sur une surface (m²) d'héliostats par an = Y

- Pour la centrale de Julich, la quantité d'énergie par radiation incidente sur une surface de 17200 m² de champs d'héliostats est de $(800 \times 17200) \text{ kWh /an} = 13\,760 \text{ MWh}$, or, cette Centrale ne fournit que 1000 MWh .
- Donc pour la centrale au nord d'Algérie, la quantité d'énergie par radiation incidente sur une surface de 8094m² de champs d'héliostats et de radiation solaire directe de 1700 kWh/m².an. = $1700 * 8094 = 13\,760 \text{ MWh}$

La quantité d'énergie produite par radiation directe = 13 760 MWh

3- Calcul de la production électrique ;

Par définition, l'énergie produite (MWh) = puissance installée (MW) x durée d'utilisation moyenne annuelle (heures) $\implies E = P * t$

- Supposons que la centrale fonctionne pendant toute la durée d'ensoleillement c à d 2650 heures qui représente en moyenne 7h/j, donc la production électrique est de $= 1,5 \text{ MW} \times 2650 \text{ (h/an)} = 3975 \text{ MWh/an}$ d'énergie produite.

4- Calcul du coût de l'installation :

Capital d'investissement = coût terrain + coût des héliostats+ coût (de receiver, la tour et les composantes annexes)

Nous prenons comme hypothèse le prix du m² des héliotats, 300€/m² un peu plus cher qu'à Julich qui est de 200€/m²

- **Cout des héliostats (capteurs) = 300 € * 8094m² = 2 428 200 Euros**

- Selon le coût d'investissement de Julich soit :
 - le coût des héliostats est égal environ à 29% du coût d'investissement (toute l'installation), ou
 - le coût d'investissement est égal à 3,5 du coût des héliostats donc,
- ⇒ Le coût d'investissement de la centrale à installer à Alger est de $2,4282 \cdot 10^6 \text{€} / 0,29 = 8,4 \cdot 10^6 \text{€}$,

Coût d'investissement = 8,4 millions d'euros

- La marge du prix de revient d'un kWh_{élec} d'une Centrale à Tour à Julich est en moyenne 19 cent €/kWh_{élec}.
- Pour celle d'Alger, le coût de kWh_{élec}. = $(8,4/12) \times 19 = 13,3 \text{ Cent €}$, soit environ 13 centimes d'Euro ce qui correspond à peu près à 13 DA / kWh_{élec}

BIBLIOGRAPHIE

Documents

- [1] Journée Nationale du Soleil, publié par CDER *Bulletin des énergies renouvelables N°1 Juin 2002*
- [2] German Aerospace Center (DLR), *Institute of Technical Thermodynamics - Concentrating Solar Power for the Mediterranean Region*, Final Report (2005)
- [3] *Renewable energy in the southern and eastern Mediterranean countries/Current situation*-Juin 2007 p.34-35
- [4] M.-A. MELIERES, *Bilan énergétique rapport* Juin 2001 LEGOS - GRGS/OMP
- [5] SOLAR EUROMED, le projet de l'installation de la 1^{ère} centrale solaire à concentration, *Extrait des PV des délibérations du conseil général de la République Française du 16 Octobre 2007*.
- [6] AHMED KHEDIM; Bernhard Hoffschmidt ; Institut Solaire de l'Université des Sciences Appliquées de Aachen, Faculté de Jülich. Heinrich-Mußmann-Str. 5. D-52428 Jülich. *Centrale Thermoélectrique Solaire en Tour, sur le chemin de la production massive de l'hydrogène de source renouvelable*.
- [7] QUOILIN SYLVAIN- Ingénieur Civil-Electromécanicien/Energéticien - Mai 2007, *Les Centrales Solaires à Concentration*.
- [8] Les cahiers de Global Chance/*petit mémento des énergies renouvelables* sept 2007, p.42
- [9] Le cuivre brille pour l'énergie solaire, *dossier de presse - European Copper Institute, Octobre 2006*, p.3-7
- [10] BRUNO RIVOIRE, responsable du « groupe d'évaluation scientifique Thémis » de 1982 à 1987, laboratoire propre du CNRS, *Le solaire thermodynamique*
- [11] Greenpeace, ESTIA, SolarPaces - *Concentrated Solar Thermal Power* (September 2005)
- [12] B. BONDUELLE, B. RIVOIRE, 1991, *Centrale à sel ou centrale à air ? L'expérience française*
- [13] F. PHARABOD, C. PHILIBERT, *Les centrales solaires LUZ*, Comité d'action pour le solaire,
- [14] W. MEINECKE, DLR (GERMANY), M. BOHN NREL (USA), 1994, *Solar energy concentrating systems. Applications and technologies*.

Sites WEB

- <http://villemin.gerard.free.fr/Science/Soleil/> /astronomie, soleil, unité astronomique
- System.solaire.free.fr
<http://la.climatologie.free.fr/soleil/soleil.htm>
- <http://www.cnrs.fr/cw/dossiers/dosclim/biblio/pagsuiv1.htm>
- *Bilan radiatif de la Terre* - Planet-Terre ressources en géologie - sciences de la Terre.mht
- <http://www.ines-solaire.com/solth/page1.html>
[http://www.interstars.net/index.php?page=apropos/Le Soleil.mht](http://www.interstars.net/index.php?page=apropos/Le_Soleil.mht)
- solaire, énergie - MSN Encarta_ Interessant.mht
- <http://www.solarviews.com/french/toc.htm>
- <http://www.actu.environnement.com>, *solaire thermique: une mise au point pour passer à l'acte*
- <http://www.ines-solaire.com/solth/page2.html>
- http://fr.wikipedia.org/wiki/Énergie_solaire
- www.eere.energy.gov/solar/csp.html
- <http://www1.eere.energy.gov/solar/csp.html>
- www.outilssolaires.com
- <http://www.soliclimate.com/> Centrales thermoélectriques de génération d'électricité
- Dmagazine.com - Le développement durable au quotidien - Deux centrales solaires pour 75 000
- Energine.com - Lancement des travaux d'une tour solaire en Allemagne.mht
- <http://www.solarenergy-thermal.ch/ecran1.htm>
- <http://www.renewables-made-in-germany.com/fr/solaire-thermique/>
- <http://www.ecosources.info/-Energies-Renouvelables->
- http://www.techniques-ingenieur.fr/dossier/centrales_solaires_thermodynamiques

