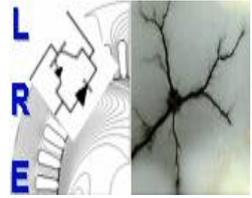




المدرسة الوطنية المتعددة التخصصات
Ecole Nationale Polytechnique

Ecole Nationale Polytechnique
Département d'Electrotechnique
Laboratoire de Recherche en Electrotechnique



Mémoire de Master en Electrotechnique

Présenté par :
OUHAB Merouane

Intitulé

Modélisation des radiations solaires en vue de leur exploitation dans les centrales thermo-solaires

Directeur(s) du mémoire :

A. Boubakeur	Professeur	ENP
R. Tahmi	Docteur	ENP
S. Mekhtoub	Professeur	ENP

ENP 2013

*A mes parents,
mes frères,
mes sœurs,
mes proches,
Et à tous mes amis.*

Remerciements

Je remercie Dieu, le tout puissant de m'avoir donné le courage, la volonté, la patience et la santé durant toutes ces années d'études, je remercie également mes parents de m'avoir soutenu durant toutes mes études.

Je tiens à remercier Monsieur le professeur TOUHAMI pour son encadrement et ses précieux conseils et sa disponibilité, grâce à qui ce travail a vu le jour. Je remercie également les membres du jury qui ont bien voulu examiner mon travail.

Merci à tous les enseignants qui ont participé à ma formation, sans oublier tous mes amis et camarades.

ملخص

من خلال هذا العمل سعيت لتقديم نظرة مجملية عن الاشعاعات الشمسية المستعملة في تحرير الطاقة الكهربائية اعتمادا على الدورات البخارية. حاولت وصف هذا النظام الشمسي من أجل اجراء حساب تقريبي للكمية الطاقة المستخرجة من الشمس, بداية من المصدر حتى سطح الارض, مرورا بدراسة مختلف الظواهر التي يمكن ان تأثر في هذه الطاقة المشعة. من أجل امكانية تحديد وضعية الشمس المهمة في محطات تحرير الكهرباء الشمسية. قمت بدراسة هندسة الشمس و الارض من أجل تحديد وضعية الشمس بالنسبة الى مراقب على الارض. ثم قمت بوصف لطريقة تركيز الطاقة الشمسية مع مختلف التقنيات المستعملة حاليا.

كلمات مفتاحية : الشمس, الاشعاع, الطاقة, الحرارة, التركيز.

Résumé

Dans ce travail, j'ai donné un aperçu sur les radiations solaires directes utilisées pour la génération d'électricité à base des cycles à vapeur. J'ai essayé de décrire tout ce système solaire, pour pouvoir atteindre le calcul approximatif de la quantité de rayonnement fournie par le Soleil, à partir de la source jusqu'à la surface de la Terre, en passant par l'étude des différents phénomènes qui peuvent atténuer cette puissance rayonnée. Pour pouvoir identifier la position du Soleil qui est nécessaire pour le fonctionnement des centrales à concentration, j'ai fait une étude sur les aspects géométriques Soleil-Terre pour localiser le Soleil par rapport à un observateur terrestre, après j'ai décrit le principe de concentration des techniques qui existent aujourd'hui.

Mots clés : Soleil, radiation, énergie, température, concentration.

Summary

In this work, i have given an outline of direct solar radiation used for generating electricity basing on vapour cycles. I tried to describe all this solar system, to be able for calculating approximatively the quantity of solar radiation, from the source to the earth surface, passing by studying various phenomena which can attenuate this radiated power. To be able to identify the position of the Sun which is necessary for the operation of CSP power stations, I have studied the geometrical aspects of the Sun-earth to locate the Sun for a terrestrial observer. After that, I described the principle of concentration of different technologies which exist today.

Key words: Sun, radiation, energy, temperature, concentration.

Table des matières

Dédicace.....	I
Remerciements.....	II
Résumé.....	III
Table des matières.....	IV
Liste des figures.....	VI
Liste des tableaux.....	VIII
Chapitre I : L'origine de l'énergie pour le fonctionnement des centrales solaires à concentration.....	4
Introduction	5
I.1 Le Soleil et sa structure	5
I.2 La fusion nucléaire dans le Soleil.....	6
Conclusion.....	6
Chapitre II : Le rayonnement solaire sur la surface de la Terre.....	7
Introduction	8
II.1 La constante solaire.....	8
II.2 Effets d'atténuation de la radiation solaire	10
II.3 La masse d'air	10
II.4 Rayonnement direct, diffus et reflété.....	11
II.5 Effet de trouble de Linke	11
II.6 Rayonnement direct sur un plan incliné.....	12
Conclusion.....	13
Chapitre III: Aspects géométriques du rayonnement solaire direct	14
Introduction	15
III.1 La géométrie Soleil-Terre.....	15
III.2 Les coordonnées géographiques	16
III.3 Le temps solaire.....	19
III.4 La direction du rayonnement solaire direct	23
III.5 L'angle d'incidence sur les surfaces inclinées	24
III.6 La durée du jour.....	25
III.7 Angle d'incidence sur des systèmes de miroir cylindro-parabolique	25
Conclusion.....	26
Chapitre IV : La concentration de rayonnement	27
Introduction	28

IV.1 La concentration de rayonnement sur des miroirs paraboliques	28
IV.2 Concentration théorique maximale du rayonnement solaire	29
IV.3 Le coefficient de concentration théorique maximal des miroirs cylindro-paraboliques.....	30
IV.4 La température théorique maximale atteinte au niveau du récepteur.....	31
Conclusion.....	33
Chapitre V : Techniques de concentration de rayonnement solaire	34
Introduction	35
V.1 Les centrales solaires à concentrateurs cylindro-paraboliques.....	35
V.2 Les centrales à tour.....	36
V.3 Les centrales à capteurs paraboliques.....	37
V.4 Les centrales à miroirs de Fresnel	38
Conclusion.....	39
Conclusion générale	40
Références bibliographiques.....	42

Liste des figures

Fig. (1): Structure du Soleil, [1].....	5
Fig. (2): Schéma permettant la détermination de la constante solaire, [4].....	7
Fig. (3) : Variation de l'irradiante durant l'année.....	7
Fig. (4) : Processus d'extinction atmosphérique.	8
Fig. (5): La masse d'air relative.	9
Fig. (6) : l'irradiante sur les plans inclinés [4].	11
Fig. (7): Perspective héliocentrique, [4].	12
Fig. (8): Perspective géocentrique, [4].	13
Fig. (9): Système de coordonnées équatoriales.	14
Fig. (10) : les variations de la déclinaison au cours de l'année.....	14
Fig. (11): Système de coordonnées horizontales [4].	15
Fig. (12): Effet elliptique [4].	16
Fig. (13): La variation annuellement périodique de la différence entre le temps standard et le temps solaire due à l'effet elliptique.	16
Fig. (14) : Effet de projection [4].	17
Fig. (15) : La variation demi-annuellement périodique de la différence entre le temps standard et le temps solaire due à l'effet de projection.	17
Fig. (16) : Représentation graphique de l'équation du temps.	18
Fig. (17): Surface inclinée [4].	21
Fig. (18): Chemin des rayons parallèles à l'axe optique d'un miroir cylindro-parabolique....	22
Fig. (19): la diffusion du faisceau solaire.	24
Fig. (20): schéma optique équivalent au système de concentration.	24
Fig. (21): Les faisceaux focaux sur un cylindro-parabole.	25
Fig. (22) : Les variations de la température au niveau de l'absorbeur en fonction du facteur de concentration.	27
Fig. (23) : Concentrateur cylindro-parabolique [13].	27
Fig. (24): Héliostats d'une centrale à tour [13].	28

Fig. (25): Concentrateur parabolique.29

Fig. (26) : Miroirs de Fresnel [13].31

Liste des Tableaux

Tableau (1) : Valeurs du coefficient d'angström et de la hauteur d'eau condensable pour trois états atmosphériques.....	10
---	----

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

Le terme CSP (concentrated solar power) comprend toutes technologies utilisées pour générer l'électricité par la concentration du rayonnement solaire direct et l'utilisation d'un processus thermique conventionnel. Cette technologie a été présente à grande échelle au début des années 1980 suite à la crise pétrolière en 1970, longtemps avant que le réchauffement climatique ne soit devenu un problème.

Elle a été considérée comme une technologie de production de l'énergie électrique en se substituant à quelques centrales électriques à ressources fossiles. Puisque la technologie CSP utilise le principe de focalisation du rayonnement solaire, elle est donc à la recherche des sites ayant un gisement solaire excellent. Cette source, qui à l'instar des autres sources d'énergie renouvelable, dépend de la météorologie avec, cependant, l'avantage d'être destinée à la forte puissance.

La radiation solaire disponible sur la terre est environ 10.000 fois plus importante que la demande annuelle mondiale d'énergie actuellement. Cependant, ceci est seulement une statistique basée sur des calculs théoriques qui peuvent être évolutifs.

Avec les ressources d'énergie fossiles limitées et l'intention d'éviter un manque soudain d'énergie conjugué à la hausse des coûts d'investissement et causant une crise économique, une nouvelle motivation a surgi durant les années 90 ; Il s'agit du réchauffement climatique causé par l'émission des gaz à effet de serre. Avec les rapports continuellement publiés par l'IPCC (Intergovernmental Panel of Climate Change), il est devenu clair que le réchauffement climatique a des conséquences sévères sur l'humanité comme la hausse de niveau de la mer, le changement du mode de précipitation et la désertification.

Une approche mondiale importante pour surmonter le problème des sources d'énergie ainsi que celui du changement climatique est le concept de DESERTEC qui a été développé par un réseau de politiciens, de scientifiques et d'économistes du pourtour méditerranéen. Ce concept prévoit une génération d'électricité à grande échelle dans le Moyen-Orient et l'Afrique du Nord (MENA).

J'ai mené cette étude par :

- L'origine de l'énergie pour le fonctionnement des centrales solaires à concentration.
- Le rayonnement solaire sur la surface de la Terre.
- Les aspects géométriques du rayonnement solaire direct.
- La concentration du rayonnement solaire.

- Techniques de concentration du rayonnement solaire.

Enfin je termine mon mémoire par une conclusion générale.

Chapitre I : L'origine de l'énergie pour le fonctionnement des centrales solaires à concentration

Introduction

La source de l'énergie que nous en faisons usage dans les centrales CSP est le Soleil, c'est l'étoile qui est au centre de notre système solaire. Il a un diamètre d'environ 1.392.000 km (109 fois le diamètre de la Terre) et une masse (environ 330.000 fois la masse de la Terre). Le Soleil a une structure multi-couches, comme illustré à la figure (1), [1].

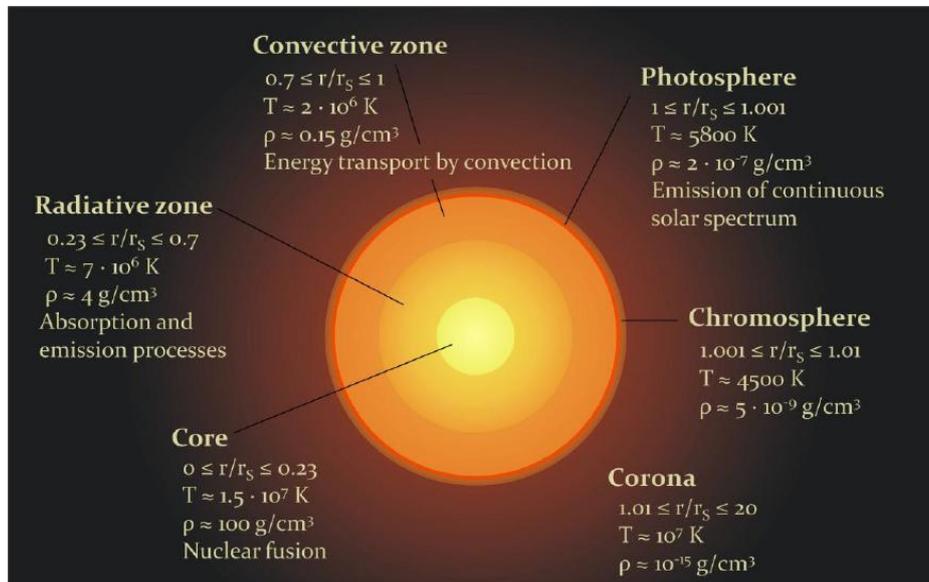


Fig. (1): Structure du Soleil, [1].

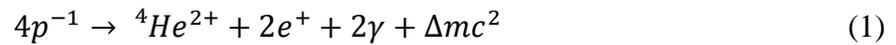
I.1 Le Soleil et sa structure

Le centre du Soleil est appelé le noyau, il s'étend sur 0.23 du rayon total du Soleil; il est caractérisé par une très forte densité, une très haute pression et des températures très élevées de l'ordre de 15.000.000 K. Le noyau est le lieu où la chaleur est produite par des processus de fusion. Le reste du Soleil est chauffé par cette énergie qui est transférée vers l'extérieur et qui laisse le Soleil enfin sous forme de rayonnement électromagnétique ou d'énergie cinétique des particules. La couche adjacente est la zone radiative, elle est de l'ordre de 0,23 à 0,7 du rayon du Soleil. Sa température moyenne est 7.000.000 °K, sa densité et sa pression sont beaucoup plus faibles que celles du noyau. Dans la zone de convection, qui suit la zone radiative (à partir de 0,7 du rayon du Soleil), la densité est beaucoup plus faible et également la température est plus basse (environ 2.000.000 °K) que dans la zone radiative. Le transport de l'énergie se fait par convection. La surface visible du Soleil est la photosphère. Il s'agit de la couche où le rayonnement solaire est visible avec son spectre continu. La photosphère est une fine couche comprise entre quelques dizaines et quelques centaines de kilomètres avec une densité très faible. Sa température est environ 5800 °K.

I.2 La fusion nucléaire dans le Soleil

Comme mentionné plus haut, l'énergie du Soleil est générée par des processus de fusion nucléaire. Dans ces processus, l'hydrogène est transformé en hélium. Le Soleil se compose d'hydrogène environ 75% (pourcentage en poids), 23% d'hélium et 2% d'autres éléments.

La chaîne de réaction la plus importante est dite la chaîne proton-proton, [1]. L'équation (1) de la réaction s'écrit par :



Conclusion

Dans ce chapitre, j'ai présenté la source d'énergie pour le fonctionnement des centrales à concentration qui est le Soleil, j'ai abordé donc sa structure interne, ensuite la réaction nucléaire qui est responsable de la génération du rayonnement solaire.

Chapitre II : Le rayonnement solaire sur la surface de la Terre

Introduction

Le rayonnement solaire à la surface de la Terre est la source directe d'énergie calorifique pour le fonctionnement des centrales solaires à concentration. Dans un premier temps on va déterminer la puissance du rayonnement solaire par unité de surface à la frontière extérieure de l'atmosphère de la Terre. Elle est à peu près constante et sa valeur est appelée la constante solaire [1, 2, 3].

II.1 La constante solaire

La constante solaire dépend essentiellement de trois paramètres: la température du Soleil, plus précisément de la photosphère qui émet la plus grande partie du rayonnement qui quitte le Soleil, la taille du Soleil, et la distance entre le Soleil et la Terre. On vient de mentionner que la température de la surface du Soleil peut être considérée comme 5777 °K , On sait également que le rayon du Soleil est de $r_s = 6.965 \times 10^8 \text{ m}$ et que la distance moyenne entre Soleil-Terre est de $r_{SE} = 1.496 \times 10^{11} \text{ m}$.

La loi de Stefan-Boltzmann permet de calculer la puissance du rayonnement solaire totale:

$$P = A\sigma T^4 \quad (2)$$

Avec : A est la surface du corps noir (dans notre cas, le Soleil) et T sa température, il vient :

$$P_s = \sigma T^4 \cdot 4\pi r_s^2 = 5.67 \cdot 10^{-8} \cdot 5777^4 \cdot 4\pi \cdot (6.965 \cdot 10^8)^2 \text{ W} = 3.85 \cdot 10^{26} \text{ W} \quad (3)$$

Où σ est la constante de Stefan-Boltzmann:

$$\sigma = \frac{2\pi^5 k^4}{15c^2 h^3} = 5.67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2/\text{K}^4 \quad (4)$$

Avec cette puissance, le Soleil émet un rayonnement dans l'espace, tel que mentionné précédemment. La puissance du rayonnement total identique arrive à n'importe quelle sphère autour du Soleil. Maintenant si on considère le rayon sphérique sur lequel l'orbite de la Terre se trouve, cela signifie que l'irradiante du Soleil (la constante solaire, voir Fig.2) [4, 5, 6] est :

$$G_{sc} = P_s / 4\pi r_{SE}^2 = 3.85 \cdot 10^{26} / 4\pi (1.496 \cdot 10^{11})^2 \approx 1367 \text{ W/m}^2 \quad (5)$$

La puissance totale de rayonnement \dot{Q}_E reçue par la Terre du Soleil peut être déterminée en multipliant la constante solaire par la surface de section transversale de la Terre, sachant que le rayon de la Terre $r_E = 6371 \text{ km}$.

$$\dot{Q}_E = \pi r^2 G_{sc} = \mu (6371 \cdot 10^3 \text{ m})^2 \cdot 136 \text{ W/m}^2 = 1,74 \cdot 10^{17} \text{ W} \quad (6)$$

Donc pendant une année (8760h), l'énergie reçue par la Terre est:

$$\dot{Q}_E = 1,52 \cdot 10^{18} \text{ kWh}$$

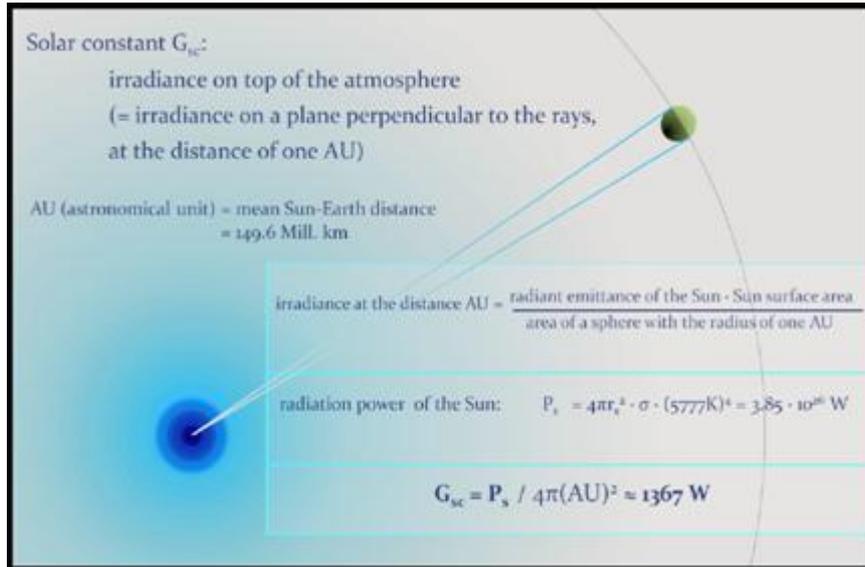


Fig. (2): Schéma permettant la détermination de la constante solaire, [2].

Cette quantité d'énergie est impressionnante si on la compare avec la demande mondiale d'énergie qui est égale à $1,4 \cdot 10^{14} kWh$ en 2007. Cela signifie que la Terre reçoit ($\approx 10^4$ fois) plus d'énergie solaire que l'humanité a réellement besoin pour sa consommation d'énergie électrique. L'énergie radiante calculée rapporte une irradiante moyenne à la Terre [4, 2] de :

$$G_E = \frac{Q_E}{4\pi r_E^2} = 341,75 \text{ W/m}^2 \tag{7}$$

La distance Soleil-Terre augmente et diminue pendant une année environ $\pm 1.7\%$ du rayon Soleil-Terre moyen. Par conséquent, l'irradiante solaire sur l'atmosphère de la Terre change environ $\pm 3.3\%$ de la valeur moyenne G_{sc} .

L'irradiante solaire directe (l'insolation directe) sur la surface de l'atmosphère peut être approximée par l'équation suivante avec DoY une journée de l'année (DoY=1 le 1 Janvier) :

$$G_{on} = G_{sc} * (1 + 0.033 * \cos(360^\circ * \frac{DoY}{365})) \tag{8}$$

Le tracé de l'énergie radiante en fonction de l'énergie reçu d'une journée de l'année en Fig.3.

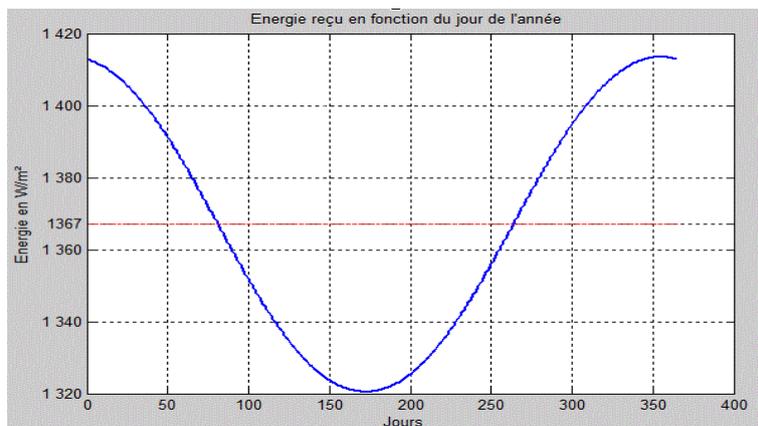


Fig. (3) : Variation de l'irradiante durant l'année.

II.2 Effets d'atténuation de la radiation solaire

Plusieurs effets atténuant le rayonnement solaire se produisent quand le rayonnement croise l'atmosphère. De façon générale, ils s'appellent les processus d'extinction atmosphérique, Fig.4. Il y a deux classes principales : l'absorption et la dispersion (La réflexion est un cas particulier de la dispersion) [4,7].



Fig. (4) : Processus d'extinction atmosphérique.

- L'absorption atmosphérique est un processus d'extinction de rayonnement qui réduit le rayonnement solaire disponible sur la surface de la Terre considérablement. Quelques constituants de l'atmosphère absorbent le rayonnement d'une certaine gamme spectrale comme l'ozone et la vapeur d'eau. L'absorption signifie que l'énergie d'un photon est prise par la matière.
- la dispersion est un processus dans lequel le rayonnement est forcé de dévier d'une trajectoire droite à cause des non-uniformités (molécules, particules de poussière etc.). on distingue deux types de dispersion *Rayleigh – Scattering*, qu'est la dispersion du rayonnement électromagnétique par des particules qui sont beaucoup plus petites que la longueur d'onde du rayonnement et *Mie – Scattering*, qu'est la dispersion du rayonnement électromagnétique par des particules dont le diamètre est de dimension à peu près identique à la longueur d'onde du rayonnement ou plus grande.

II.3 La masse d'air

L'effet d'extinction de rayonnement de l'atmosphère dépend de différents aspects comme l'humidité et particulièrement l'opacité en aérosol. Ces conditions sont fortement variables à un endroit donné et elles peuvent être déterminées seulement par la mesure.

L'atténuation de rayonnement dépend du chemin optique du rayonnement solaire direct dans l'atmosphère de la façon suivante: plus le chemin est long plus y'aura une forte atténuation de rayonnement. La longueur de chemin du rayonnement solaire à partir de l'atmosphère à un endroit donné sur la surface de la Terre, sera une fonction de l'altitude géographique de l'endroit et de l'angle solaire de zénith θ_z . On définit le facteur AM comme étant un indice sur la masse atmosphérique [8]:

$$AM = \frac{1}{\cos(\theta_z)} \quad (9)$$

La figure (5) montre la dépendance de la masse d'air de l'angle d'incidence du rayonnement solaire:

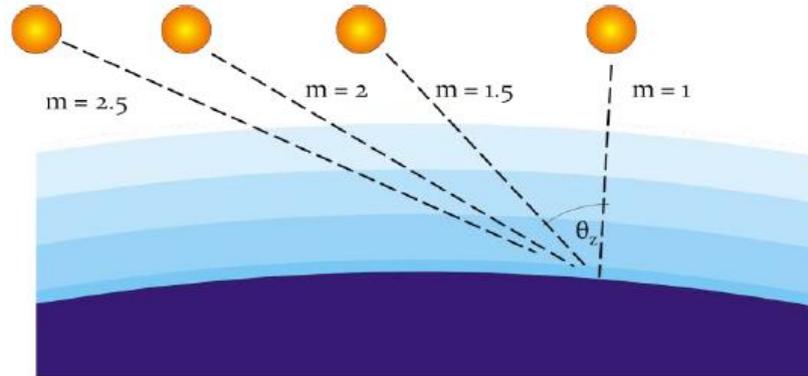


Fig. (5): La masse d'air relative.

Une formule plus exacte a été donnée par Kasten en 1989 et qui tient compte du fait que la Terre est une sphère et prendre en considération l'altitude au-dessus du niveau de la mer h (en km) du point sur la surface de la Terre, est la suivante :

$$AM = \frac{\frac{p}{p_0}}{\sin(\alpha_s) + 0.50572 * (\alpha_s + 6.07995)^{-1.6364}} \quad (10)$$

Avec :

$$\frac{p}{p_0} = e^{\left(\frac{-h}{8434.5}\right)}$$

II.4 Rayonnement direct, diffus et reflété

Les différents processus d'extinction provoquent que non tout le rayonnement qui atteint l'atmosphère atteint la surface de la Terre. En plus, la dispersion provoque qu'une partie du rayonnement arrive en tant que rayonnement diffus ou complètement reflété plutôt qu'un rayonnement direct. Le rayonnement diffus ou reflété n'a pas une direction précise.

Le rayonnement direct est un rayonnement qui arrive à la surface de la Terre dans une ligne droite, les systèmes CSP peuvent exploiter le rayonnement direct seulement. Le rayonnement non direct ne peut pas être concentré et, par conséquent, il ne peut pas être utilisé.

L'irradiante sur une surface dans l'atmosphère ou sur la Terre est toujours la somme de: l'irradiante due au rayonnement direct, au rayonnement diffus et au rayonnement reflété. Cette somme s'appelle irradiante totale ou globale [7].

II.5 Effet de trouble de Linke

On définit trois facteurs de transmission attribués aux trois phénomènes d'extinction de rayonnement : τ_{rs} (Rayleigh-scattering), τ_{ms} (Mie-scattering) et τ_{ab} (absorption).

Le rapport de l'insolation normale directe G_{bn} (l'irradiante sur la surface Terrestre et sur un plan perpendiculaire au rayonnement direct) et la constante solaire donnent [7] :

$$\frac{G_{bn}}{G_{on}} = \tau_{rs} * \tau_{ms} * \tau_{ab} \quad (11)$$

Une approche empirique a été établie pour exprimer G_{bn} :

$$G_{bn} = G_{on} * e^{-\left(\frac{AM * T_L}{0.9 * AM + 9.4}\right)} \quad (12)$$

Où AM est la masse atmosphérique et T_L est le trouble de linke qui est égale à :

$$T_L = \frac{\ln(\tau_{ms}) + \ln(\tau_{ab}) + \ln(\tau_{rs})}{\ln(\tau_{rs})} \quad (13)$$

Ce facteur dépend de l'état du ciel et prend la valeur 1 si le ciel est clair en ne présentant que le phénomène de *Rayleigh-scattering*.

Ce facteur peut être estimé par la formule suivante [9] :

$$T_L = 2.5 + 16 * \beta_A + 0.5 * \ln(w) \quad (14)$$

Tel que

β_A : est le coefficient d'angström.

w : la hauteur d'eau condensable.

Le tableau (1), présente les valeurs de β_A et w pour trois états atmosphériques différents.

	β_A	w
<i>Ciel pur</i>	0.05	1
<i>Ciel moyen</i>	0.1	2
<i>Ciel dégradé</i>	0.2	5

Tableau (1) : valeurs du coefficient d'angström et de la hauteur d'eau condensable pour trois états atmosphériques [9].

II.6 Rayonnement direct sur un plan incliné

L'angle d'incidence est défini comme l'angle entre la direction de rayonnement et la normale du plan irradié, Fig.6. Si l'irradiante normale directe est G_{bn} alors l'irradiante G_{bt} sur un plan incliné sous un angle d'incidence θ est exprimée par [7] :

$$G_{bt} = G_{bn} * \cos(\theta) \quad (15)$$

Dans le cas d'un plan horizontal, l'angle d'incidence est égal à l'angle solaire de zénith θ_z . L'irradiante directe G_b devient:

$$G_b = G_{bn} * \cos(\theta_z) \tag{16}$$

Les équations (15) et (16) donnent :

$$G_{bt} = \frac{\cos(\theta)}{\cos(\theta_z)} * G_b \tag{17}$$

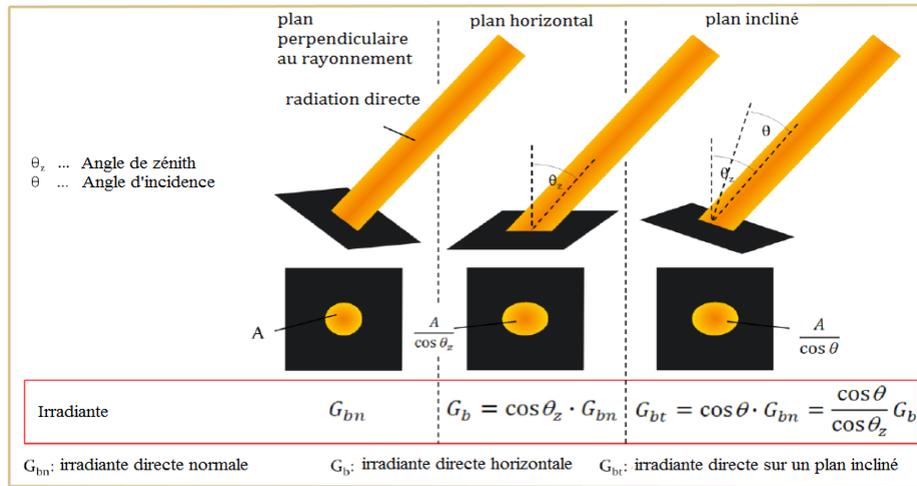


Fig. (6) : l'irradiante sur les plans inclinés [4].

L'équation (12) peut être utilisée pour généraliser l'équation (15) pour n'importe quel plan incliné:

$$G_{bt} = G_{on} * e^{-\left(\frac{AM * T_L}{0.9 * AM + 9.4}\right)} * \cos(\theta) \tag{18}$$

Conclusion

Dans ce chapitre, on a fait un calcul de la puissance rayonnée par le Soleil en faisant appel aux équations mathématiques et en se basant sur la géométrie Terre-Soleil. J'ai aussi montré les différents effets atténuant le rayonnement solaire qui se produisent quand le rayonnement croise l'atmosphère dans le but d'atteindre le calcul de la puissance reçue sur n'importe quel point de la surface de la Terre.

Chapitre III: Aspects géométriques du rayonnement solaire direct

Introduction

Le rayonnement solaire qu'utilisent les systèmes CSP est direct, cela est nécessaire pour la concentration de rayonnement. Afin de pouvoir concentrer le rayonnement solaire il faut savoir la direction du faisceau de rayonnement ou, ce qui est identique, la position (apparente) du Soleil par rapport à un observateur terrestre.

La localisation du Soleil par rapport à un observateur terrestre dépend des aspects suivants: la position de l'observateur, la géométrie générale du Soleil et de la Terre, des processus de réfraction dans l'atmosphère et, en fin, le temps.

III.1 La géométrie Soleil-Terre

Pour décrire la géométrie Soleil-Terre, il suffit de considérer la relation de changement d'angle entre l'étoile (le Soleil) et la planète (La Terre). Par conséquent, on peut employer une perspective héliocentrique ou géocentrique, [4, 3, 10, 11]. La figure (7) traduit les relations importantes pour la perspective héliocentrique.

La Terre tourne une fois par an autour du Soleil et approximativement une fois par jour tourne autour de son propre axe. Le plan dans lequel la Terre tourne autour du Soleil est appelé le plan écliptique. Le plan équatorial, c'est-à-dire le plan perpendiculaire à l'axe de la Terre qui inclut l'équateur de la Terre, est incliné par rapport au plan écliptique approximativement de $23,5^\circ$, et l'axe de la Terre est également incliné par $23,5^\circ$ par rapport à la normale du plan écliptique.

Cette inclinaison provoque annuellement de différentes variations périodiques des conditions d'irradiation aux deux hémisphères, qui sont la cause de l'existence des saisons. Le Soleil est dans le plan équatorial à l'équinoxe du printemps et à l'équinoxe d'automne. À ces deux points, les conditions d'irradiation sur l'hémisphère Nordique et méridional sont égales. Le solstice Nordique d'été est le point, où l'irradiation est maximale sur l'hémisphère Nordique et minimal sur l'hémisphère méridional. Le solstice Nordique d'hiver est le point, où l'irradiation est maximale sur l'hémisphère méridional et minimal sur l'hémisphère Nordique.

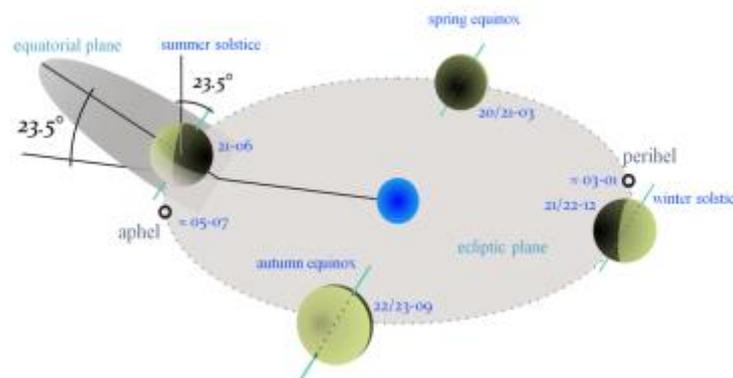


Fig. (7): Perspective héliocentrique, [4].

L'orbite de la Terre n'est pas un cercle mais une ellipse. Le Périhélie (le point le plus proche sur l'orbite de la Terre du Soleil) est atteint au début de janvier et l'Aphélie (le point le plus lointain sur l'orbite de la Terre du Soleil) est atteint au début de juillet.

La perspective géocentrique montre une révolution apparente du Soleil autour de la Terre, Fig. (8). La forme exacte de cette révolution apparente dépend de la position de l'observateur sur la Terre, plus exactement, sur la latitude de sa vue. Le mouvement apparent du Soleil est réalisé dans le plan équatorial (à l'équinoxe du printemps et à l'équinoxe d'automne) ou dans des plans qui sont parallèles au plan équatorial. Il est utile de projeter l'orbite apparente du Soleil et d'autres courbes et points d'intérêt sur une sphère céleste virtuelle.

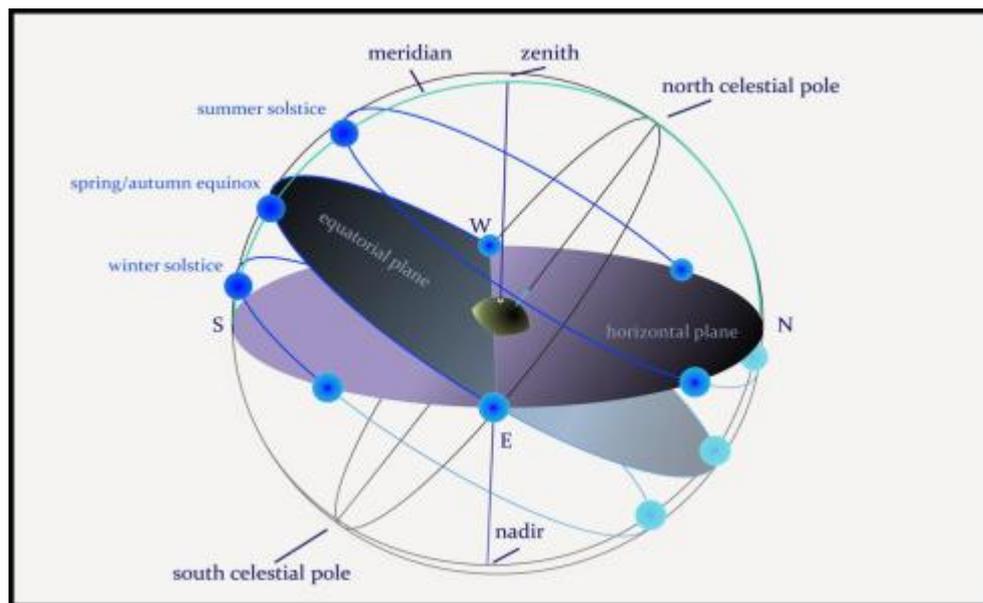


Fig. (8): Perspective géocentrique, [4].

Le plan horizontal est le plan qui inclut l'horizon de l'observateur. Il divise le ciel en deux hémisphères, l'hémisphère supérieur est visible pour l'observateur par contre l'hémisphère inférieur est invisible pour lui. L'angle entre le plan horizontal et équatorial est $90^\circ - \phi$, ou ϕ est la latitude de la position d'observateur.

Le zénith est le point sur la sphère céleste qui est verticalement au-dessus de l'observateur. Le nadir est le point sur la sphère céleste qui est vis-à-vis le zénith. Le pôle céleste du Nord est le point où la prolongation Nordique de l'axe de la Terre traverse la sphère céleste. Le point opposé est le pôle céleste du Sud. Le méridien est le cercle sur la sphère céleste qui est perpendiculaire au plan horizontal et au plan équatorial. Le zénith, le nadir, le pôle céleste du Nord et le pôle céleste du Sud sont situés sur le méridien.

III.2 Les coordonnées géographiques

Afin de décrire la position du Soleil et, en même temps la direction du rayonnement solaire direct, nous avons besoin d'un système de coordonnées approprié. Car, il est plus important

d'avoir la direction du Soleil vers la Terre que la distance Soleil-Terre, ou vers un certain endroit sur la Terre. Deux angles sont nécessaires et suffisants pour déterminer la position du Soleil. Il y a deux systèmes pour tracer les objets célestes par rapport à la Terre ou à un certain endroit sur la Terre : le système de coordonnées équatoriales et le système de coordonnées horizontales.

- *le système de coordonnées équatoriales*

Il prend le plan équatorial comme plan de référence, Fig. (9). Les deux coordonnées utilisées sont l'angle δ de déclinaison et l'angle ω qu'est l'angle d'heure. La déclinaison est l'angle entre le plan équatorial et la droite vers le Soleil. L'angle d'heure est l'écart angulaire du Soleil à l'est ou à l'Ouest du méridien local dû à la rotation de la Terre autour de son axe.

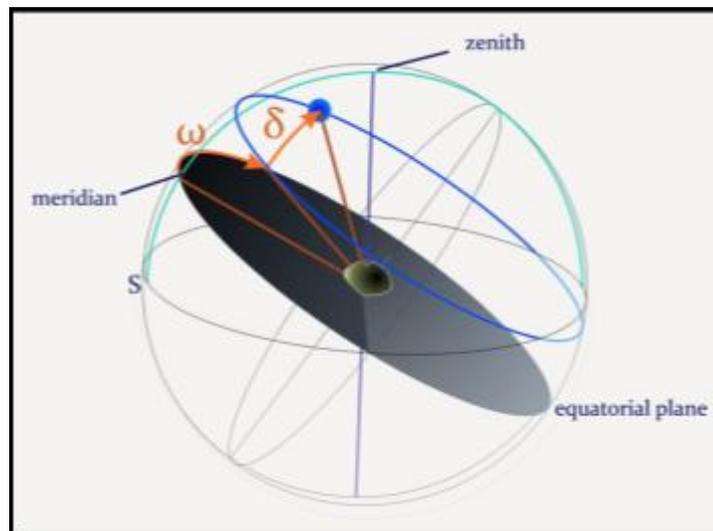


Fig. (9): Système de coordonnées équatoriales.

La déclinaison est une fonction exclusivement du temps (et pas, par exemple, de la position géographique). Sachant que l'axe de la Terre oscille avec la période d'un an entre 23.45° et -23.45° , la déclinaison peut être approximée par la formule suivante (développée par P.I. Cooper en 1969), [4, 12, 7]:

$$\delta = 23,45^\circ \cdot \sin \left(360^\circ \frac{284 + DoY}{365} \right) \quad (19)$$

Où DoY représente une journée de l'année en anglais (a day of year).

Nous présentons à la Fig. (10) les variations de la déclinaison au cours de l'année. Elle est tirée à partir de l'expression (19).

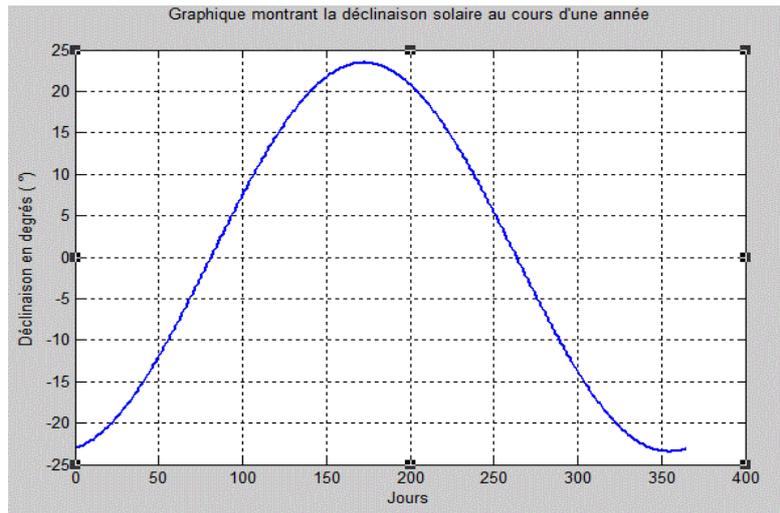


Fig. (10) : les variations de la déclinaison au cours de l'année.

- *Le système de coordonnées horizontales*

Il prend le plan horizontal local de l'observateur comme plan de référence. Les deux coordonnées utilisées sont *l'angle solaire d'altitude* α_s qui est l'angle entre l'horizontal et la ligne vers le Soleil, et *l'angle solaire d'azimut* γ_s qui indique l'écart angulaire du Sud de la projection du rayonnement de faisceau sur le plan horizontal. Les déplacements à l'Est sont négatifs et sont positifs à l'Ouest. Au lieu de l'angle solaire d'altitude α_s on peut également utiliser *l'angle de zénith* $\theta_z = 90^\circ - \alpha_s$ qui indique l'angle entre la verticale (se dirigeant au-dessus de la position de l'observateur) et la ligne vers le Soleil.

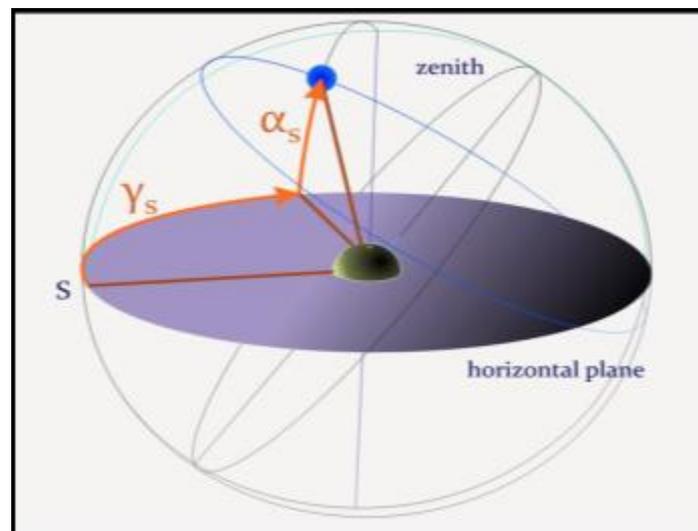


Fig. (11): Système de coordonnées horizontales [4].

L'angle d'altitude et l'angle d'azimut pour un emplacement avec une latitude géographique ϕ peuvent être exprimés dans la base du système équatorial par:

$$\begin{cases} \sin \alpha_s = \sin \varnothing \sin \delta + \cos \varnothing \cos \delta \cos \omega \\ \cos \gamma_s \cos \alpha_s = \sin \varnothing \cos \delta \cos \omega - \cos \varnothing \sin \delta \\ \cos \gamma_s \cos \alpha_s = \cos \delta \cos \omega \end{cases} \quad (20)$$

Le système de coordonnées horizontales est plus descriptif, car l'observateur voit le Soleil sur un plan horizontal, Fig. (11). Cependant, il est moins commode pour les calculs.

III.3 Le temps solaire

La position du Soleil par rapport à un observateur sur Terre est une fonction de la position géographique de l'observateur et du temps. Il existe une différence entre le temps standard et le temps solaire due à deux raisons.

D'abord, il existe une différence entre la longitude géographique de l'observateur et la longitude de référence de son fuseau horaire. Un fuseau horaire comporte une certaine gamme de longitudes et peut y avoir plus qu'une longitude de référence dans cette marge c.à.d. quand le Soleil passe le méridien local à midi.

Deuxièmement, à la même longitude le temps solaire de midi, c.-à-d. le moment où le Soleil passe par le méridien, change au cours de l'année (s'il est mesuré dans le temps standard). Cela signifie que les jours (la période entre deux croisements du Soleil et du méridien) n'ont pas la même longueur (mesurée en temps standard). Il y a deux raisons qui imposent cela:

- l'orbite elliptique de la Terre et,
- l'inclinaison du plan équatorial par rapport au plan écliptique.

Le Soleil effectue sa rotation autour de la Terre non seulement en raison de la révolution de la Terre autour d'elle, mais également en raison de la rotation de la Terre autour du Soleil. Et puisque l'orbite Terrestre est une ellipse, Fig. (12), et pas un cercle, la vitesse angulaire n'est pas constante.

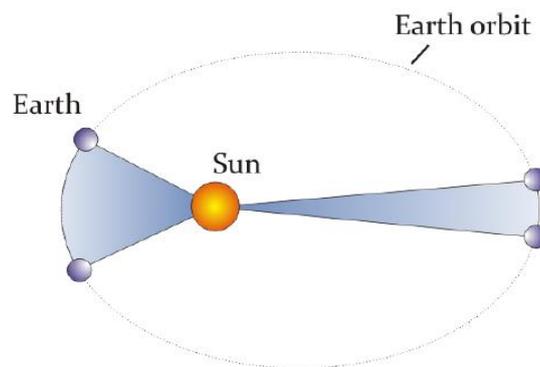


Fig. (12): Effet elliptique [4].

En conséquence, la durée des jours c'est-à-dire le temps entre deux croisements entre le Soleil et le méridien local, n'est plus une constante. Cette variation, qu'on peut appeler *l'effet d'ellipse* produit une variation sinusoïdale de temps (par rapport au temps standard) avec une amplitude de 7,66 minutes pour une période d'un an.

Nous présentons en Fig. (13) la variation annuellement périodique de la différence entre le temps standard et le temps solaire due à l'effet elliptique.

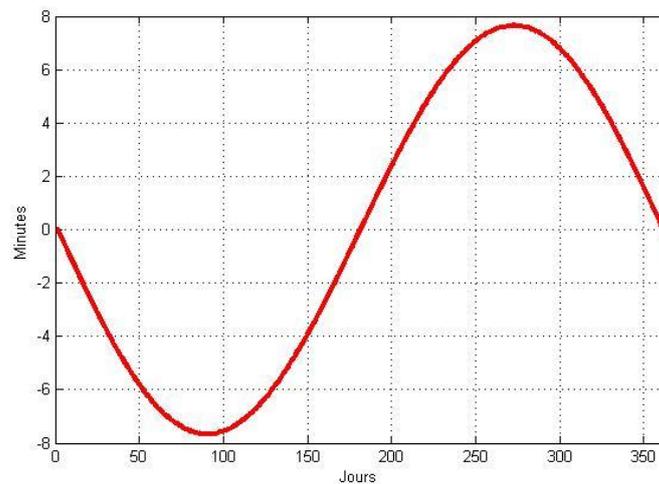


Fig. (13): La variation annuellement périodique de la différence entre le temps standard et le temps solaire due à l'effet elliptique.

Un deuxième effet existe et, est dû à l'inclinaison de l'axe de la Terre environ de 23.45° par rapport à la normale du plan d'orbite ou à l'inclinaison du plan écliptique par rapport au plan équatorial.

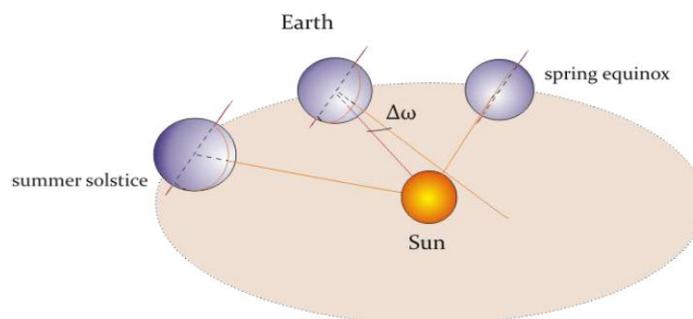


Fig. (14) : Effet de projection [4].

Par conséquent, l'inclinaison de l'axe de la Terre produit une variation régulière pendant une période de demi-année. L'amplitude de la variation sinusoïdale est de 9,87 minutes, Fig. (15).

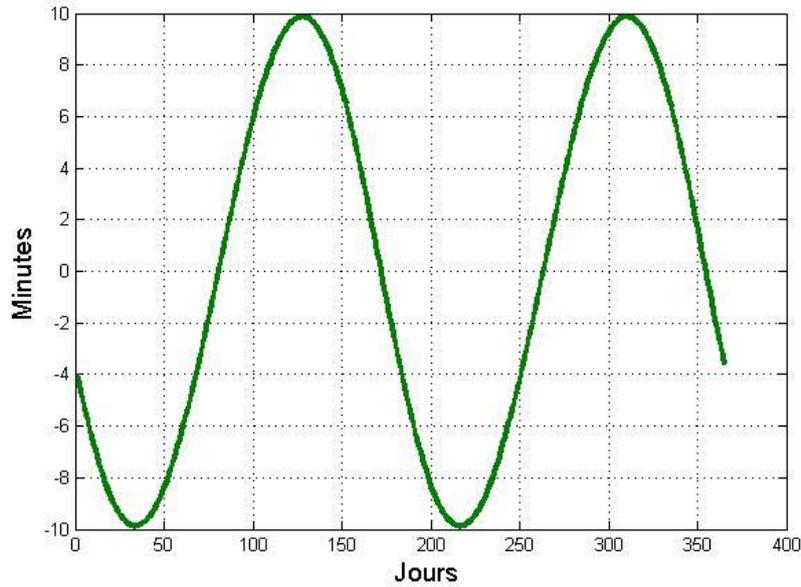


Fig. (15) : La variation demi-annuellement périodique de la différence entre le temps standard et le temps solaire due à l'effet de projection.

Nous traçons la somme graphique des deux variations à La Fig. (16). Il est illustré une différence maximale entre le temps solaire et le temps moyen local qui s'élève à plus de 16 minutes. Selon la formule d'angle d'heure si les deux effets mentionnés ne sont pas pris en compte cela signifie qu'il en résulta une erreur d'environ 4° . Elle serait inacceptable dans un contexte technique tel que le suivi des miroirs des centrales CSP.

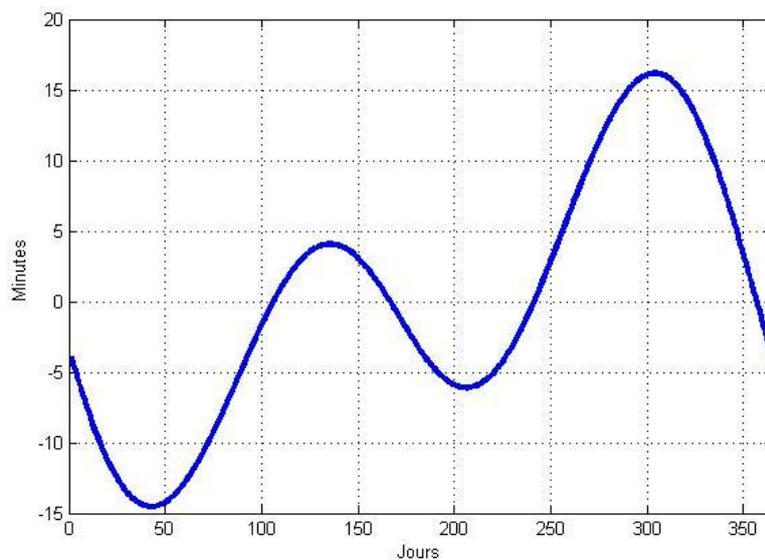


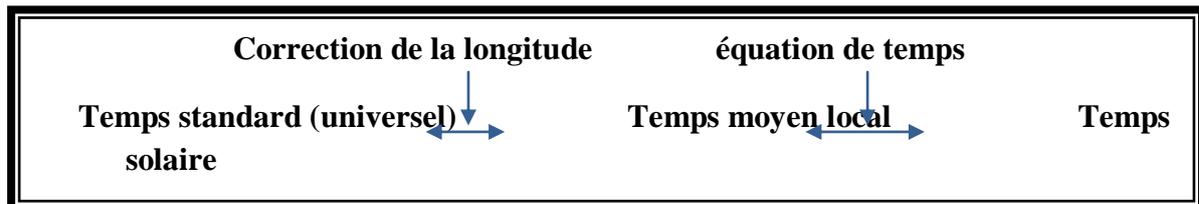
Fig. (16) : Représentation graphique de l'équation du temps.

Prenant en considération les différences entre le temps standard et le temps solaire à un endroit donné dues à :

- premièrement, l'existence des fuseaux horaires prolongés et,
- deuxièmement, les effets géométriques mentionnés

On distingue trois types de temps : le temps standard local, le temps moyen local et le temps solaire :

- *Le temps standard local* est le temps officiel dans un fuseau horaire donné.
- *Le temps moyen local* est un calendrier qui a une différence constante par rapport au temps standard local. Cette différence constante existe en raison de la différence entre la longitude de référence du fuseau horaire et la longitude de l'endroit respectif dans le fuseau horaire. Le temps moyen local pour un endroit donné est valide pour tous les endroits sur la même longitude. *Une correction de longitude* exprime la différence entre le temps standard local et le temps moyen local.
- *Le temps solaire* est une échelle de temps selon laquelle le Soleil croise toujours le méridien (par rapport à un endroit donné) exactement à midi. La prétendue *équation du temps* exprime la différence entre le temps moyen local et le temps solaire. Selon ce qui a été expliqué ci-dessus, cette différence n'est pas constante mais change avec une période annuelle.



D'abord, nous allons concrétiser la correction de la longitude qui donne la différence mentionnée entre la longitude d'endroit et la longitude de référence du fuseau horaire correspondant et convertir le temps standard local en temps moyen local et vice versa. Car, on sait que le Soleil a besoin de 4 minutes pour traverser un angle de 1° , cette correction sera d'après [8]:

$$\Delta t = (L_r - L_{loc})(4min/1^\circ) \quad (21)$$

Où L_r est la longitude de référence de fuseau horaire et L_{loc} la longitude locale. En second lieu, l'équation du temps, qui exprime la différence entre le temps moyen local et le temps solaire est la suivante [1]:

$$E = 180 \cdot \frac{4}{\pi} (0,000075 + 0,00186 \cdot \cos d - 0,032077 \cdot \sin d - 0,014615 \cos 2d - 0,0409 \cdot \sin 2d) [\text{min}] \quad (22)$$

où :

$$d = 360^\circ \cdot \frac{DoY-1}{365} \quad (23)$$

Combinant la correction de la longitude et l'équation du temps, le temps solaire t_{so} peut être déduit du temps standard t_{std} et vice versa:

$$t_{so} = (L_r - L_{loc})(4 \text{min}/^\circ) + E + t_{std} \quad [\text{min}] \quad (24)$$

$$t_{std} = -(L_r - L_{loc}) \cdot (4 \text{min}/^\circ) - E + t_{so} \quad [\text{min}] \quad (25)$$

Ces équations sont valables sous la condition suivante : Les longitudes à l'Ouest de Greenwich sont positives et les longitudes à l'Est de Greenwich sont négatives.

III.4 La direction du rayonnement solaire direct

Pour le calcul de la direction du rayonnement solaire, on doit déterminer la position du Soleil par rapport au système horizontal d'un observateur et cela pendant un temps donné. On détermine alors les coordonnées équatoriales δ et ω de la position du Soleil. Pour le calcul de la déclinaison on a besoin seulement du DoY et pour le calcul de l'angle d'heure on a besoin du temps solaire.

Pour le calcul du temps solaire, on doit savoir la longitude de l'endroit L_{loc} , le jour de l'année et le temps standard t_{std} . Après cela, on détermine la position du Soleil dans les coordonnées horizontales par rapport à l'endroit de l'observateur, tenant compte de sa latitude ϕ , L'angle solaire d'altitude est [12]:

$$\sin \alpha_s = \cos \phi \cdot \cos \delta \cdot \cos \omega + \sin \phi \cdot \sin \delta \quad (26)$$

De la même manière on peut indiquer l'angle de zénith $\theta_z = 90^\circ - \alpha_s$ identique à l'angle d'incidence θ du rayonnement solaire sur une surface horizontale où:

$$\cos \theta = \cos \theta_z = \sin \alpha_s = \cos \phi \cdot \cos \delta \cdot \cos \omega + \sin \phi \cdot \sin \delta \quad (27)$$

Afin de calculer l'angle d'azimut du Soleil, on écrit :

$$\cos \gamma_s \cos \alpha_s = \sin \phi \cdot \cos \delta \cdot \cos \omega - \cos \phi \cdot \sin \delta \quad (28)$$

En multipliant et en divisant l'équation (28) par $\cos \phi$ et après arrangement, on obtient :

$$\cos\gamma_s \cdot \cos\alpha_s = \frac{\sin\phi(\cos\phi \cdot \cos\delta \cdot \cos\omega + \sin\phi \cdot \sin\delta) - \sin\delta}{\cos\phi} \quad (29)$$

Après simplification, la relation (18) devient:

$$\cos\gamma_s \cdot \cos\alpha_s = \frac{\sin\phi \cdot \sin\alpha_s - \sin\delta}{\cos\phi} \quad (30)$$

Le signe algébrique de γ_s peut être facilement fixé : avant midi solaire γ_s est négatif, et après midi solaire γ_s est positif c'est-à-dire que son signe suit le signe de ω . Ce qui nous amène à :

$$\gamma_s = \text{sign}(\omega) \left| \cos^{-1} \left(\frac{\sin\phi \cdot \cos\theta_z - \sin\delta}{\cos\phi \cdot \sin\theta_z} \right) \right| \quad (31)$$

III.5 L'angle d'incidence sur les surfaces inclinées

L'angle d'inclinaison β et l'angle d'azimut γ de la surface inclinée sont définis de la manière suivante: Prenons une surface horizontale et inclinons-la au Sud (dans la direction positive) ou au Nord (dans la direction négative) par β et tournons-la par γ à l'Ouest (dans la direction positive) ou à l'Est (dans la direction négative) par γ (voir Fig.(17)).

Tenant compte du fait que le temps est donné en temps standard, on doit déterminer d'abord le temps solaire correspondant (du jour de l'année, de l'heure et de la longitude) pour ensuite calculer l'angle d'heure (du temps solaire) et l'angle d'inclinaison δ (du jour de l'année). A l'aide ces angles on peut déterminer l'angle d'incidence θ selon la formule suivante :

$$\cos\theta = \sin\delta \cdot \sin\phi \cdot \cos\beta - \sin\delta \cdot \cos\phi \cdot \sin\beta \cdot \cos\gamma + \cos\delta \cdot \cos\phi \cdot \cos\beta \cdot \cos\omega + \cos\delta \cdot \sin\phi \cdot \sin\beta \cdot \cos\gamma \cdot \cos\omega + \cos\delta \cdot \sin\beta \cdot \sin\gamma \cdot \sin\omega \quad (32)$$

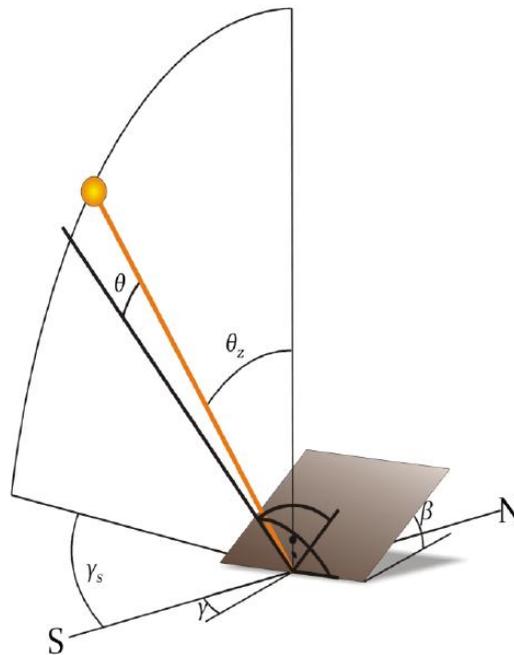


Fig. (17): Surface inclinée [4].

Pour quelques cas particuliers, la relation (32) adopte une formulation plus simple. D'abord, si on considère des surfaces horizontales, alors l'angle d'incidence sera indépendant de l'angle d'azimut de la surface horizontale (l'angle d'incidence étant identique à l'angle de zénith), ce qui donne la formulation simple suivante :

$$\cos\theta = \cos\theta_z = \sin(\alpha_s) = \cos\phi \cdot \cos\delta \cdot \cos\omega + \sin\phi \cdot \sin\delta \quad (33)$$

III.6 La durée du jour

La formule (33) permet de calculer les angles d'heure du lever et du coucher de Soleil ω_{ss} , c.-à-d. $\sin(\alpha_s) = 0$, cela donne :

$$\cos(\omega_{ss}) = -\tan(\delta) * \tan(\phi) \quad (34)$$

Pour calculer la durée de jour pour tout jour à toute latitude, on calcule la déclinaison δ , et on la met dans l'expression (34) et on détermine les deux valeurs pour ω_{ss} .

$$\begin{aligned} t_{\text{day}} &= (\omega_{ss,2} - \omega_{ss,1}) * \frac{1}{15} \\ &= \frac{2}{15} * \arccos(-\tan(\delta) * \tan(\phi)) \quad [\text{h}] \end{aligned} \quad (35)$$

III.7 Angle d'incidence sur des systèmes de miroir cylindro-parabolique

L'angle d'incidence dépend de l'alignement du concentrateur et de la position du Soleil. Pour l'alignement Nord-Sud, l'angle d'incident est calculé selon (Duffie et Beckman, 1991, [12]) comme suit:

$$\cos(\theta) = \sqrt{\cos(\theta_z)^2 + \cos(\delta)^2 * \sin(\omega)^2} \quad (36)$$

Et pour un alignement Est-Ouest :

$$\cos(\theta) = \sqrt{1 - \cos(\delta)^2 * \sin(\omega)^2} \quad (37)$$

Conclusion

Dans ce chapitre présent, la géométrie Soleil.-Terre ainsi que le temps solaire ont été abordés afin d'estimer les durées de jour et les angles d'incidence, qui servent à la poursuite du Soleil. Cela après avoir obtenu les coordonnées géographiques du site étudié.

Chapitre IV : La concentration de rayonnement

Introduction

Les miroirs possèdent un point focal ou une ligne focale. Les Paraboloïdes sont caractérisés par un point focal et les cylindro-paraboliques par une ligne focale.

Le rayonnement qui pénètre dans un plan parallèle à l'axe optique d'un cylindro-parabole est réfléchi de manière à ce qu'il passe à travers la ligne focale. Cela réduit le système à un problème de deux dimensions.

IV.1 La concentration de rayonnement sur des miroirs paraboliques

Une parabole a un point focal, ce qui signifie que le rayonnement qui arrive parallèlement à l'axe optique est réfléchi de façon à ce qu'il passe par un point focal. La figure (18) illustre parfaitement les relations géométriques. Elle montre également la section transversale d'un miroir parabolique dans un système de coordonnées. Le miroir parabolique suit le graphe de la fonction $f(x) = p \cdot x^2$. Les lignes rouges représentent la lumière qui pénètre dans le miroir en des rayons parallèles à l'axe de la parabole et passant par l'axe focal, après réflexion, au point focal F.

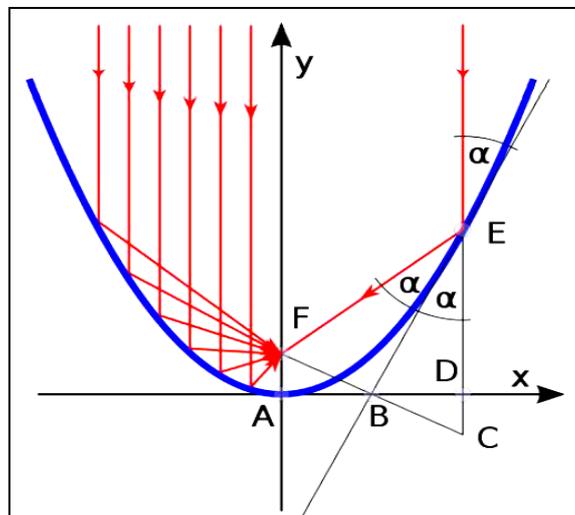


Fig. (18): Chemin des rayons parallèles à l'axe optique d'un miroir cylindro-parabolique [4].

On trouve que :

$$\overline{AF} = f = 1/(4p) \quad (38)$$

- *Démonstration*

E est sur le graphique de la fonction $f = p \cdot x^2$, par conséquent, les coordonnées de E, $(x_E; y_E)$ Ou bien $(x_E, p \cdot x_E^2)$, Le gradient \overrightarrow{EB} est le gradient de la fonction y dans le point E, c.-à-d.

$$\frac{dy}{dx}(x_E) = 2 \cdot p \cdot x_E,$$

\overline{EB} possède la forme analytique $y=2 * p * x + b$, mettons $(x_E, p * x_E^2)$ dans cette forme analytique, on aura

$$b = -p * x_E^2$$

Donc,

$$y=2 * p * x + -p * x_E^2,$$

Pour B point d'intersection de cette ligne avec l'axe des abscisses, c.-à-d. pour $(x_B, 0)$, on obtient :

$$x_B = \frac{x_E}{2}$$

Donc le point B divise le segment de droite [AD] en deux parties égales. Si on trace la droite qui passe par F et B on obtient le point C, tel que : les triangles ABF et BCD sont égaux et opposés par le sommet. De plus, ces triangles sont semblables à BDE. En raison de cette similitude, on aura :

$$\frac{\overline{AF}}{\overline{AB}} = \frac{\overline{BD}}{\overline{DE}}$$

avec $\overline{AB} = \overline{BD} = \frac{x_E}{2}$ et $\overline{DE} = p * x_E^2$

D'où l'équation (38) :

$$\overline{AF} = \frac{1}{4 * p}$$

En introduisant la troisième dimension suivant z, et pour avoir une meilleure concentration, on allonge les lignes focales suivant l'axe optique, on obtient un système cylindro-parabolique, où alors on fait tourner les lignes focales de façon parabolique autour du point focal on obtient alors une forme parabolique.

IV.2 Concentration théorique maximale du rayonnement solaire

Le rapport de la concentration C est défini comme étant le rapport entre le flux de rayonnement après la concentration et le flux de rayonnement avant la concentration. Tenant compte du fait qu'on étudie des systèmes qui concentrent le rayonnement solaire incident sur une surface d'ouverture vers une surface d'un tube absorbeur, la formule du coefficient de concentration sera :

$$C = \frac{\text{surface de l'ouverture}}{\text{surface de l'absorbeur}} \tag{39}$$

En réalité et même avec un miroir parfait, les rayonnements solaires n'arrivent pas exactement d'une façon parallèle et, par conséquent, le rayonnement du Soleil n'est pas concentré dans un point focal, mais occupe une certaine zone autour du point focal dans le plan focal. On rappelle que la distance Terre-Soleil est finie, donc il y a un écart angulaire du rayonnement solaire direct. L'angle de diffusion, appelé l'angle du faisceau solaire, vaut : $\alpha_d = 0.35^\circ$ [4], Fig. (19). L'existence d'une certaine diffusion du faisceau permet de dire qu'il est impossible de concentrer le rayonnement solaire direct en un seul point, donc il y a un coefficient de concentration fini et maximal.

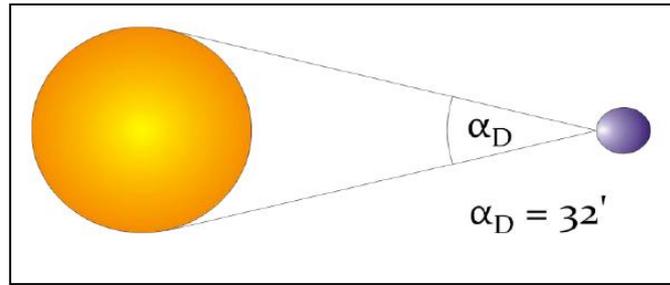


Fig. (19): la diffusion du faisceau solaire.

Il existe une loi générale qui permet la détermination de la concentration maximale sur la base de l'angle du faisceau du rayonnement incident: la loi de la conservation de la photoconductivité dans un système optique idéal. Un système optique idéal est un système dans lequel il n'y a pas de pertes d'énergie par des processus d'extinction (absorption), les coefficients de réflexion des miroirs sont unitaires (=1) et le coefficient de transmission du milieu optique est également égal à 1. Pour un tel système, comme indiqué sur la Figure (20) et, avec la condition supplémentaire que dans le trajet optique il n'y a pas de changement d'indice de réfraction entre les différents milieux optiques, le produit de l'aire de l'ouverture A et du récepteur A' et l'angle solide dans lequel le rayonnement se propage est constant [4].



Fig. (20): schéma optique équivalent au système de concentration.

IV.3 Le coefficient de concentration théorique maximal des miroirs cylindro-paraboliques

On considère des miroirs de forme cylindro-parabolique. L'image du Soleil dans le plan focal est un point diffus dont la taille totale et la forme dépendent de l'ouverture du miroir ψ Fig. (21). L'image totale du Soleil sur le récepteur est composée d'images individuelles provenant de chaque point P de la surface du miroir. Ces images individuelles sont des ellipses dont la forme et la taille dépendent de l'angle ψ de la manière suivante:

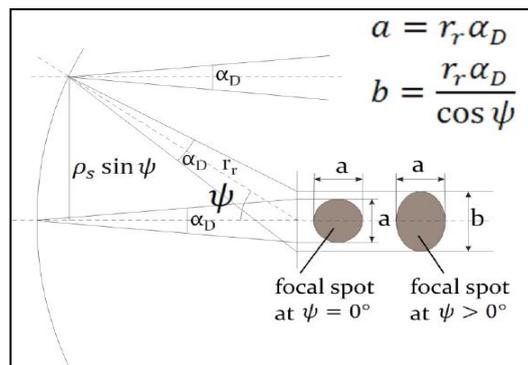


Fig. (21): Les faisceaux focaux sur un cylindro-parabole.

Dans le cas d'un miroir cylindro-parabolique de longueur l , la zone d'ouverture (la surface transversale du collecteur cylindro-parabolique) est :

$$A_{ap} = 2l \cdot r_r \cdot \sin\psi \quad (40)$$

Alors que l'image du Soleil sur le récepteur a pour surface:

$$A_{im} = l \frac{r_r \cdot \alpha_D}{\cos\psi} \quad (41)$$

Le coefficient de concentration correspondant est donc:

$$C = \frac{A_{ap}}{A_{im}} = \frac{2\sin\psi \cdot \cos\psi}{\alpha_D} = 215 \cdot \sin\psi \cdot \cos\psi \quad (42)$$

La valeur maximale est atteinte pour $\psi = 45^\circ$, ce qui donne $C_{max} = 107,5$

Les valeurs calculées ne sont valables que pour des miroirs parfaits avec la géométrie spécifiée. Les systèmes réels avec des cylindro-paraboles peuvent atteindre comme valeur moyenne le coefficient de concentration 82.

IV.4 La température théorique maximale atteinte au niveau du récepteur

La température maximale pouvant être atteinte sur l'absorbeur dépend du coefficient de concentration. Selon la loi de Stefan-Boltzmann, la puissance rayonnante d'un corps noir de surface A et de température T est: $P = A\sigma T^4$.

Ainsi, la puissance rayonnante du Soleil est :

$$P_s = 4\pi r_s^2 \sigma T_s^4 \quad (43)$$

D'après, la constante solaire :

$$G_{sc} = \frac{P_s}{4\pi r_{SE}^2} \quad (44)$$

Où r_{se} est la distance Soleil-Terre, et sans prendre en considération les influences atmosphériques, la puissance reçue par le cylindro - parabole (A_{ap} est la surface transversale du collecteur cylindro - parabolique):

$$\dot{Q}_{ap} = \frac{A_{ap} P_s}{4\pi r_{SE}^2} = A_{ap} \cdot \sigma T_s^4 \frac{r_s^2}{r_{SE}^2} \quad (45)$$

La température du récepteur (absorbeur) maximale est atteinte quand la puissance reçue par ce dernier est égale à la puissance reçue par le collecteur:

$$P_{ab} = A_{ab} \cdot \sigma \cdot T_{ab}^4 = \dot{Q}_{ap} = A_{ap} \cdot \sigma \cdot T_s^4 \cdot \frac{r_s^2}{r_{SE}^2} \quad (46)$$

Avec A_{ab} est la surface du recepateur (absorbeur).

Comme α_d est assez petit, on peut l'approximer par:

$$\alpha_d = \tan \alpha_d = 2 \frac{r_s}{r_{se}} \quad (47)$$

Ce qui donne :

$$\frac{r_s^2}{r_{se}^2} = \frac{1}{4 \cdot C_{max}^2} \quad (48)$$

Après transformation, on obtient :

$$A_{ab} T_{ab}^4 = A_{ap} T_s^4 \cdot \frac{1}{4 \cdot C_{max}^2} \quad (49)$$

Avec $C = \frac{A_{ap}}{A_{ab}}$, on obtient :

$$T_{ab} = T_s \cdot \sqrt[4]{\frac{C}{4 \cdot C_{max}^2}} \quad (50)$$

Cette équation montre la dépendance de la température atteinte au niveau de l'absorbeur avec le coefficient de concentration C, plus C est élevé plus la température du récepteur est grande. A cet effet nous traçons les variations de la température au niveau de l'absorbeur en fonction du facteur de la concentration.

Cependant, la relation (50) est tout à fait théorique, car elle considère :

- qu'aucun objet réel n'est un corps noir, ni le Soleil, ni l'absorbeur,
- les influences atmosphériques ne sont pas prises en considération et réduisent énormément le rayonnement solaire.

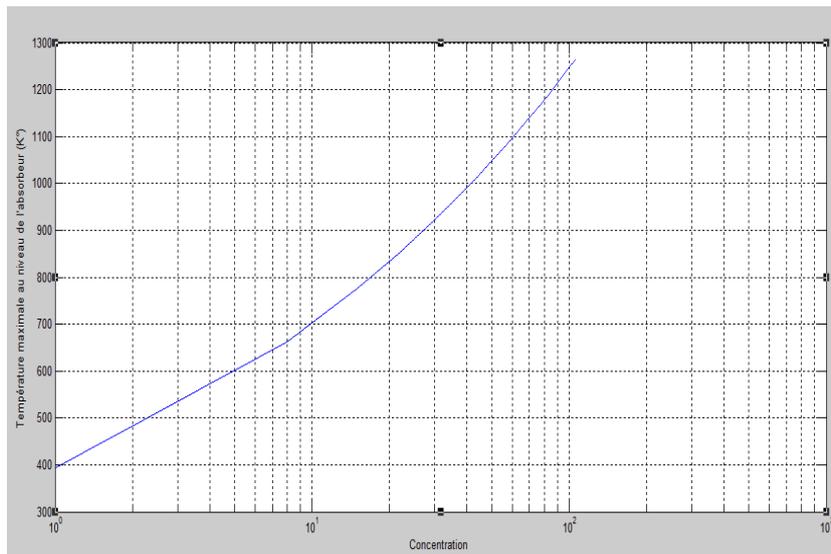


Fig. (22) : Les variations de la température au niveau de l'absorbeur en fonction du facteur de concentration.

Conclusion

La puissance thermique collectée à la sortie d'un champ solaire d'une centrale à concentration solaire dépend d'un côté de l'insolation directe normale (DNI) reçue par le champ c.à.d. du site d'implantation et d'un autre côté des performances des collecteurs. Dans ce chapitre, j'ai commencé d'abord par définir le principe de concentration au niveau d'un collecteur cylindro-parabolique qui a été pris comme exemple, afin que je puisse faire un calcul théorique de la température qui peut être atteinte au niveau du collecteur.

Chapitre V : Techniques de concentration de rayonnement solaire

Introduction

Les concentrateurs solaires utilisent des systèmes optiques (miroirs paraboliques ou cylindro-paraboliques, lentilles de Fresnel...) pour concentrer la lumière solaire dans une zone pour obtenir des températures plus élevées où il sera plus efficace d'en extraire l'énergie. Ici je vais essayer de décrire le principe de chaque technique de concentration.

V.1 Les centrales solaires à concentrateurs cylindro-paraboliques

Principe de fonctionnement des centrales solaires à concentrateurs cylindro-paraboliques

Le concentrateur cylindro-parabolique est orienté vers l'Est dès le lever du Soleil, Fig. (23). Cette poursuite solaire sera assurée grâce à un vérin électrique ou hydrolique commandé. Le fluide caloporteur qui circule à l'aide d'une pompe qui transporte sa chaleur vers un échangeur situé à l'intérieur de la cuve de stockage.

L'énergie thermique reçue au collecteur est absorbée par un tuyau métallique à l'intérieur d'un tube en verre sous vide. Le fluide (huile synthétique) qui circule à l'intérieur du tuyau, est chauffé à une température d'environ 400°C. Ce fluide est ensuite pompé à travers des échangeurs afin de produire de la vapeur surchauffée qui actionne une turbine à vapeur qui entraîne un générateur électrique [13].

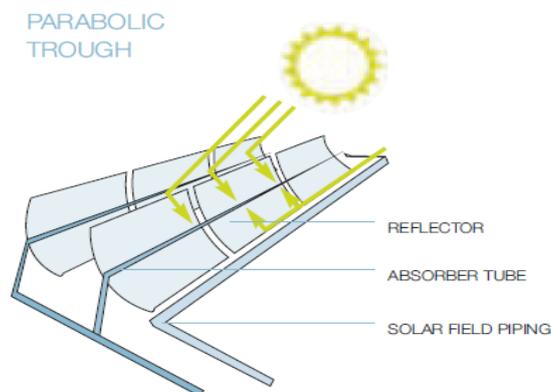


Fig. (23): Concentrateur cylindro-parabolique [13].

- *Leurs principaux avantages*

- Peu de mouvement mécanique par rapports aux autres centrales à chaleur.
- Moins onéreux que la concentration par miroir et les paraboles Stirling.
- Un bon rendement optique par rapport aux autres techniques.
- La technique de concentration la plus répandue.
- Possibilité d'intégration d'un stockage.

- *Les inconvénients*

- Ne convient pas à de petites installations.
- Toujours plus cher par watt comparé à des panneaux photovoltaïques classiques.

- Un large champ de captage est recommandé pour l'installation d'une centrale.

V.2 Les centrales à tour

Description de la technique

Les centrales solaires à tour sont constituées de nombreux miroirs concentrant les rayonnements solaires sur une chaudière située au sommet d'une tour, Fig. (24). Les miroirs uniformément répartis sont appelés héliostats. Chaque héliostat est orientable, et suit le Soleil individuellement et le réfléchit précisément en direction du receveur au sommet de la tour solaire.

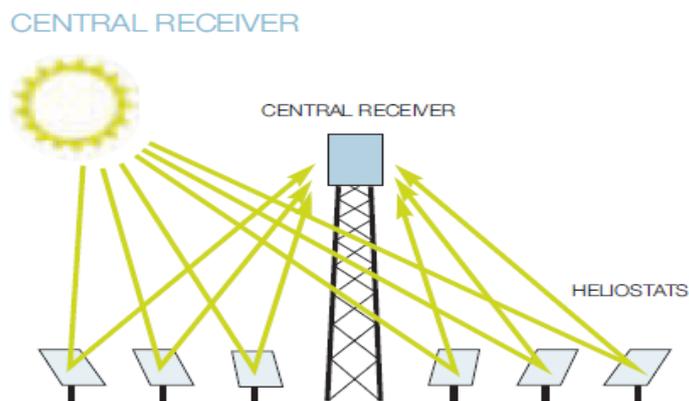


Fig. (24): Héliostats d'une centrale à tour [13].

Le facteur de concentration peut dépasser 1000, ce qui permet d'atteindre des températures importantes, de 600 °C à 1000 °C. L'énergie concentrée sur le receveur est ensuite directement transférée au fluide thermodynamique (génération directe de vapeur entraînant une turbine ou chauffage d'air alimentant une turbine à gaz), ou alors utilisée pour chauffer un fluide caloporteur intermédiaire. Ce liquide caloporteur est ensuite envoyé dans une chaudière et la vapeur générée actionne des turbines. Dans tous les cas, les turbines entraînent des alternateurs produisant de l'électricité [13].

Ses avantages

- La source d'énergie est propre et gratuite.
- Des centrales modestes peuvent être construites.
- Les coûts de construction et d'exploitation sont faibles.
- La production continue la nuit.
- Moins cher que le solaire photovoltaïque actuel.

Ses inconvénients

- Centrale très encombrante et réservée aux zones désertiques.
- Ne peut concurrencer le nucléaire en termes de puissance.
- Plus cher que le charbon (et le nucléaire).

V.3 Les centrales à capteurs paraboliques

Description de la technique

Ayant la même forme que les paraboles de réception satellite, les capteurs paraboliques fonctionnent d'une manière autonome, Fig. (25). Ils s'orientent automatiquement et suivent le Soleil sur deux axes afin de réfléchir et de concentrer les rayons du Soleil vers un point de convergence appelé foyer. Ce foyer est le récepteur du système. Il s'agit le plus souvent d'une enceinte fermée contenant du gaz qui monte en température sous l'effet de la concentration. Ce qui entraîne un moteur Stirling qui convertit l'énergie solaire thermique en énergie mécanique puis en électricité. Le rapport de concentration de ce système est souvent supérieur à 2000 et le récepteur peut atteindre une température de 1000 °C [13].

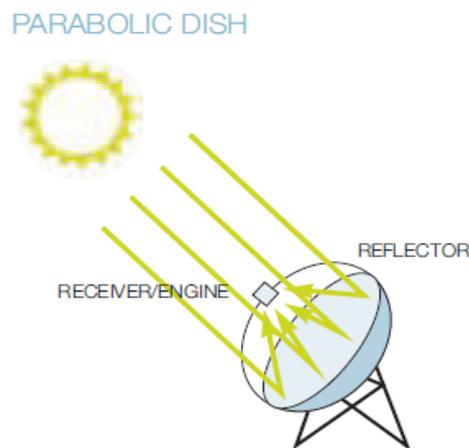


Fig. (25): Concentrateur parabolique.

Ses avantages

- La source d'énergie solaire est illimitée et gratuite.
- L'utilisation d'un moteur Stirling apporte plusieurs avantages; Un rendement jusqu'à 40 % et moins polluant (pas d'énergie fossile utilisée, pas de dégagement de fumée). Moins bruyant et un entretien facilité car peu de pièces mobiles.
- Il existe une possibilité de mise en réseau des capteurs pour obtenir une centrale de taille industrielle.

Ses inconvénients

- La taille des capteurs est limitée afin d'obtenir une rotation sur deux axes pour suivre la course du Soleil.
- Fonctionnement par intermittence.
- On obtient actuellement de faibles puissances par rapport aux autres technologies de centrales solaires thermodynamiques (de 5 à 50 kW électrique).
- Les capteurs de forme parabolique sont difficiles à obtenir.

- Les forts écarts de température créent des dilatations thermiques qui limitent le choix des matériaux.
- Coût d'investissement encore élevé car la commercialisation est en cours.

V.4 Les centrales à miroirs de Fresnel

Description de la technique

Un facteur de coût important dans la technologie des collecteur cylindro-paraboliques est la mise en forme du verre pour obtenir la forme parabolique requise. Afin de diminuer ce coût, des travaux de recherche sont orientés sur des prototypes de collecteurs de Fresnel à focalisation linéaire. L'idée est d'approximer la forme parabolique du collecteur par une succession de miroirs plans, comme indiqué sur la Fig. (26).

Un premier étage de réflecteur est installé sur le sol. Le rayonnement est réfléchi au foyer de la parabole approximée par le jeu de miroirs. Un deuxième étage de réflecteurs redirige le rayonnement vers le tube récepteur. Ce second étage de réflecteurs, en plus de réfléchir le rayonnement, joue aussi le rôle d'isolant pour le tube récepteur. Il est en effet recouvert d'une importante couche d'isolation en sa partie supérieure. La partie inférieure est, quant à elle, isolée par une vitre [14].

Les principaux avantages de cette technologie par rapport aux autres techniques de concentrations sont :

- Coût moins chers des miroirs.
- Pas de vide à l'intérieur du tube récepteur, ce qui facilite sa conception et sa durabilité.
- Les contraintes mécaniques dus à la poussée du vent sont réduites par la disposition plane des miroirs.

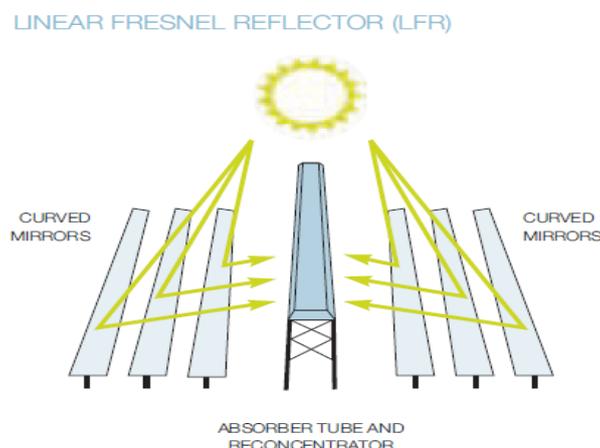


Fig. (26) : Miroirs de Fresnel [13].

Les inconvénients sont :

- Une expérience très limitée.
- Pertes optiques élevées.
- Performances optiques inférieures d'environ 30% par rapport aux réflecteurs paraboliques et cylindro-paraboliques.

Conclusion

Les systèmes solaires à concentration offrent la possibilité de produire de l'électricité à partir de l'énergie solaire. Les températures pouvant aisément dépasser les 400 °C et le rendement de conversion est généralement élevé. En exploitant le rayonnement solaire direct, considérée comme la ressource principale, ces ressources donnent une véritable alternative à la consommation des énergies fossiles avec un faible impact environnemental.

Conclusion générale

Conclusion générale

J'ai présenté un aperçu sur l'origine de l'énergie pour le fonctionnement des centrales solaires à concentration. Il est élaboré sur la base d'une recherche bibliographique très spécialisée dans le domaine conduisant à la compréhension des phénomènes liés au transfert de cette énergie sous forme de rayonnement électromagnétique ou d'énergie cinétique des particules. Ce rayonnement solaire à la surface de la Terre est la source directe d'énergie pour le fonctionnement des centrales solaires dont j'ai déterminé la puissance par unité de surface à la frontière extérieure de l'atmosphère de la Terre. L'aspect géométrique et la technique de concentration de rayonnement solaire ont été également abordés.

Références Bibliographiques

- [1] Thomas Fend and Louy Qoaider. *EnerMENA CSP (Concentrated Solar Power) Teaching Materials, Chapter 1*. Deutsches Zentrum DLR für Luft-und Raumfahrt e.V. in der Helmholtz – Gemeinschaft, 9/9/2011
- [2] Zhou Dongyi, Shi Chu-ping ,Yuan Wen-hua. Research on the Applicability of Solar Energy-Ground Source Heat Pump in Different Regions of China. *2011 Second International Conference on Digital Manufacturing & Automation*, 978-0-7695-4455-7/11 \$26.00 © 2011 IEEE Computer Society.
- [3] A. Yona and T. Senjyu. One-Day-Ahead 24-Hours Thermal Energy Collection Forecasting Based on Time Series Analysis Technique for Solar Heat Energy Utilization System. *IEEE T&D Asia* 2009, pp.1-4.
- [4] Matthias Günther. *EnerMENA Advanced CSP Teaching Materials, Chapter 2 Solar Radiation*, Deutsches Zentrum DLR für Luft-und Raumfahrt e.V. in der Helmholtz – Gemeinschaft, 9/9/2011
- [5] Fakharpour Mahsa and Soltany Najma. Estimation Solar Radiation and Status Solar Energy in Yazd Province – Iran. *978-1-4577-0547-2/12/\$31.00 ©2012 IEEE Computer Society*.
- [6] Mingzhi Zhao,Zhizhang Liu and Mingjun Yu. Data acquisition and analyzing of solar energy resource. *Proceedings of the 2010 IEEE International Conference on Information and Automation* June 20 - 23, Harbin, China. 978-1-4244-5704-5/10/\$26.00 ©2010 IEEE
- [7] Soteris Kalogirou. Solar energy engineering, chapter 2: Environmental characteristics. Cyprus University of Technologie: processes and systems / Soteris Kalogirou. 1st ed.p. cm. Includes bibliographical references and index. ISBN 978-0-12-374501-9 (hardcover). Copyright ©2009, Elsevier Inc. All rights reserved.
- [8] John A.Duffie, William A.Beckman. Solar engineering of thermal processes, chapter 1: Solar radiation, Second edition. A John Wiley & Sons, Inc.
- [9] M. Boubekri, A. Chaker et I, Zeghib. Contribution numérique à l'étude du rayonnement solaire incident sur un capteur plan pour le site de Constantine. Laboratoire de Physique Energétique Université Mentouri, Constantine (25000), Algérie
- [10] Qi Qi, Yiqiang Jiang,Shiming Deng. A Simulation Study on Solar Energy Seasonal Storage by Phase Change Material. *IEEE – ICSET 2008*, 978-1-4244-1888-6/08/\$25.00 c_ 2008 IEEE, pp.106-109
- [11] Ralf Leutz and Hans Philipp Annen. Energy Performance Modeling of Stationary and Quasi-stationary Solar Concentrators Based on Reverse Ray-tracing. *1-4244-0016-3/06/\$20.00 ©2006 IEEE* pp.714-717
- [12] Wissem Zghal, Gueorgui Kantchev and Hédi Kchaou. First International Conference on Renewable Energies and Vehicular Technology, determination of the exploitable solar energy for electricity generation using the photovoltaic systems. Laboratory of Electromechanical Systems, National Engineering School of Sfax, Tunisia, 2012
- [13] Dr. Christoph Richter,Sven Teske and Rebecca Short.” Concentrating Solar Power, Why Matthias Günther, Michael Joemann and Simon Csambor. *EnerMENA CSP (Concentrated Solar Power) Teaching Materials, Chapter 5 (Parabolic Trough Technology)*. Deutsches Zentrum DLR für Luft-und Raumfahrt e.V. in der Helmholtz – Gemeinschaft, 18/9/2011. <http://www.greenpeace.org/international/Global/international/planet/2/report/2009/5/concentrating-solar-power-2009.pdf>
- [14] Quoilin Sylvain. Rapport sur “ *Les Centrales Solaires à Concentration*”.Université de Liège, faculté des sciences appliquées. Mai 2007. http://www.labohtap.ulg.ac.be/staff/squoilin/files/centrales_solaires_SQ070925.pdf