

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement supérieur
et de la Recherche Scientifique



Département : Energies Renouvelables
Mémoire de fin d'étude pour l'obtention du diplôme
Master en Energies Renouvelables

Option : Conversion Thermique et Energétique.

Thème

**Mini Centrale Solaire à Miroirs de Fresnel Couplé à
un Moteur Ericsson**

Réalisé par :

QUIEZA

André Paulo Panzo

Jury d'évaluation :

Président : **Mustapha Merzouk**

Membres et correcteurs : **Mr K.**

Nehal

Mihoub...

Promoteur :

Pr. Said Nouroddine

2015 - 2016

Remerciements

Ce travail a été réalisé dans le cadre d'un projet de fin d'études, pour obtenir le diplôme Master en Energies Renouvelables option Conversion Thermique à l'université de Saad Dahleb Blida / département des Energies Renouvelables Blida.

Avant tout, je remercie à DIEU tout puissant de m'avoir donné la volonté et le courage de mener à bien ce travail. Et d'une façon toute particulière, je remercie mes chers parents (André Quieza, Maria Diavua Panzo, Paula Quieza...) pour leur patience et le bonheur qui m'ont apporté.

Je tiens à remercier mon encadreur Mr. Said Noureddine pour m'avoir fait travailler sur un projet aussi intéressant et riche. Je le suis reconnaissant tout particulièrement pour la confiance qu'il m'a témoignée et la liberté qui m'a laissé.

Mes remerciements s'adressent également à Messieurs les jurys pour avoir accepté d'évaluer ce travail, avec l'espoir d'être à la hauteur de leur attente.

Je remercie aussi tous ceux qui, tout au long de ces années d'études, m'ont encadré, observé, aidé, conseillé (Ana Paula, Laura Figueiredo, Antonio Calunga, Henriques Salomão, Gelson Mata, Emmanuel Quinjango, Abrão Afonso Jakson Kindu, Edgar Sabedoria, Engração Ventura, Vicente Mateus, Kelson Chialuca Manuel Epalanga...) et même supporté surtout les enseignants du département des Energies Renouvelables.

Enfin, je souhaite exprimer toute mes gratitudes à l'ensemble des personnes, qui bien en marge de ce travail, ont contribué largement à son aboutissement. Que ce soit depuis toujours, depuis plusieurs années ou quelques mois seulement, nombreux sont celles et ceux qui ont participé à mon épanouissement. Je les remercie sincèrement.

Dédicaces

Je dédie ce travail

A mes chers parents.

A mes frères et sœurs.

A toute ma famille et mes amis.

Résumé

Les centrales solaires à concentration sont une excellente alternative aux centrales fossiles pour la production décentralisée de l'électricité surtout dans les pays qui se situent dans la ceinture solaire.

Parmi ces dernières, les centrales SEGS (Solar Electric Generation System) installées en Californie, après plus de vingt ans de service, ont montré leur fiabilité.

Dans notre mémoire, nous proposons l'étude et la simulation du mini central solaire à miroir de Fresnel en vue d'être implémentée en Algérie dans la ville d'IIIizi. La centrale est généralement divisée en sous-systèmes, à savoir:

Le champ solaire,

L'ensemble récepteur de rayonnement solaire concentré et le moteur Ericsson,

Production d'électricité et d'eau chaude sanitaire.

Un modèle numérique a été établi en utilisant le logiciel MATLAB.

Le modèle de cette dernière est utilisé pour la simulation journalière et annuelle de la centrale dans le site d'IIIizi, dont les données météorologiques sont fournies par le modèle r.sun et comparé au **système d'information géographique**.

Ce travail ainsi présenté n'est qu'une initiation à la technologie des centrales héliothermique et vise à encourager l'état algérien à investir dans ce genre de centrales.

ملخص

و CSP ممتازة لمحطات الطاقة alternative au الأحفوري لتوليد توزيع الكهرباء وخصوصا في البلدان التي تقع في الحزام الشمسي.

من هذه، والنباتات SEGS (الطاقة الشمسية نظام توليد كهربائي) مثبتة في ولاية كاليفورنيا بعد أكثر من عشرين عاما من الخدمة، وقد أثبتت موثوقيتها.

وباختصار لدينا، فإننا نقترح دراسة ومحاكاة المركزية صغيرة للطاقة الشمسية مرآة فريسنل لكي يتم تنفيذها في الجزائر في مدينة IIIizi. وينقسم مصنع عموما في النظم الفرعية، وهي: في مجال الطاقة الشمسية وتتركز استقبال الإشعاع الشمسي بأكمله والمحرك اريكسون، الكهرباء والماء الساخن.

وقد تم تطوير نموذج عددي باستخدام برنامج MATLAB.

يتم استخدام نموذج لذلك لمحاكاة اليومية والسنوية للمصنع في موقع IIIizi بما في ذلك البيانات الطقس يتم توفيرها من قبل نموذج sun.r وبالمقارنة مع نظام المعلومات الجغرافية.

هذا العمل عرض جيد هو مقدمة لالشمسية تكنولوجيا الطاقة الحرارية، ويهدف إلى تشجيع الدولة الجزائرية للاستثمار في هذه المحطات.

summary

CSP (Concentrating Solar Power) is an excellent alternative to fossil fuel power plants for distributed generation of electricity especially in countries that fall in the sunbelt.

Of these, the SEGS plants (Solar Electric Generation System) installed in California, have demonstrated their reliability after more than twenty years of service.

In our paper, we propose the study and simulation of a mini solar power plant with Fresnel mirrors in order for it to be implemented in Algeria in the city of Illizi. The plant is generally divided into subsystems, namely:

The solar field

The entire concentrated solar radiation receiver and the Ericsson engine,
Electricity and hot water.

A numerical model was developed using MATLAB software.

The above mentioned model is used for the daily and annual simulation of the plant in the site of Illizi including weather data which is provided by our model and compared with the geographic information system.

This well presented work is an introduction to solar thermal power technology and is designed to encourage the Algerian state to invest in such plants.

Introduction Générale

Dans le contexte économique et environnemental actuel, l'utilisation de la ressource solaire disponible présente un intérêt évident (ressource renouvelable, à faible impact en gaz à effet de serre). Ces dernières années, on constate une renaissance de la filière **héliio-thermodynamique** notamment pour la production d'électricité. Les installations réalisées à travers le monde varient de quelques kW à quelques MW. Sur ces installations, le captage solaire repose sur des technologies telles que les **tours solaires, les miroirs de Fresnel, les champs de capteurs cylindro-paraboliques...**

La conversion thermodynamique de l'énergie solaire est ensuite réalisée grâce à des systèmes tels que: **turbine à vapeur, turbines à gaz, moteurs Stirling, moteurs Ericsson...** Dans notre travail, nous nous intéressons à la cogénération solaire de faible puissance (10 à 50kW). Nous travaillons essentiellement sur des systèmes composés de concentrateurs de Fresnel couplés avec des moteurs Ericsson (Moteur à apport de chaleur externe).

Notre but dans cette étude consiste à caractériser les performances d'un système conçu à partir d'un concentrateur de Fresnel en le couplant avec un moteur Ericsson '**théorique**'. À cette fin, nous analysons d'abord les performances du concentrateur solaire à l'aide d'une modélisation optique établie. Dans une deuxième étape, nous établissons un modèle global de l'installation, c'est-à-dire du concentrateur solaire et du moteur. À partir de ce modèle, nous développons un outil de simulation. Ce dernier nous permet de caractériser les performances globales du système et de réaliser des études de sensibilité paramétriques sur les principaux paramètres de dimensionnement et les conditions opératoires.

Nous proposons dans un premier temps de présenter le système étudié et son principe de fonctionnement. Une seconde partie fait état des modèles que nous avons développés pour décrire le fonctionnement de cette installation. Enfin nous décrivons dans une dernière section les simulations que nous avons réalisées et présentons les résultats obtenus sur l'ensemble du système.

Présentation du système étudié:

Le système étudié permet la conversion de l'énergie solaire en travail mécanique en vue de la production d'électricité. Il est composé d'un miroir de Fresnel, et d'un moteur Ericsson à cycle ouvert avec récupérateur de chaleur (figure 1). Les moteurs Ericsson sont des moteurs à apport de chaleur externe, de la même famille que les moteurs Stirling. À la différence des moteurs Stirling, des clapets ou soupapes isolent les espaces de détente et de compression lors de la détente et de la compression du fluide de travail.

Dans la machine proposée, l'air ambiant est utilisé comme fluide de travail dans le moteur, conformément au schéma de principe (figure 1).

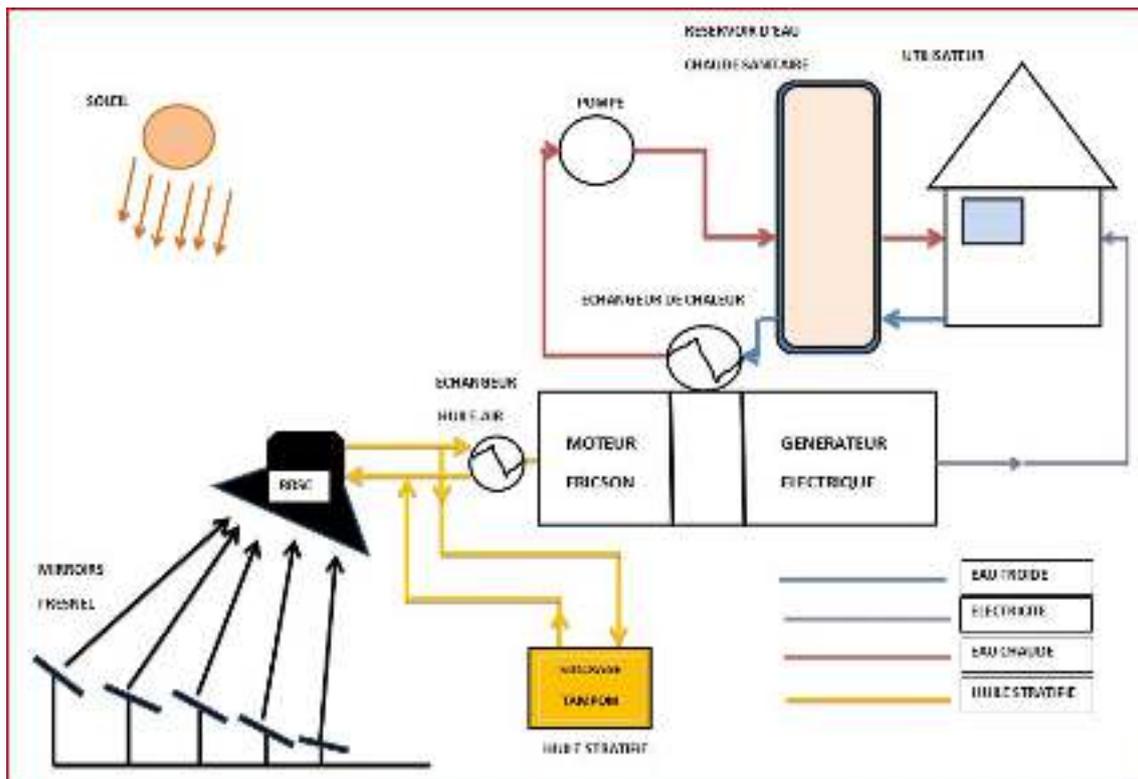


Figure 1: Principe de fonctionnement du système.

Cette étude comporte les chapitres suivants :

Le premier chapitre comporte une étude sur les généralités sur l'énergie solaire.

Le deuxième chapitre comprend une étude bibliographique (état de l'art) concernant le concentrateur de Fresnel et du moteur Ericsson.

Le troisième chapitre comporte une étude sur la modélisation théorique du concentrateur de Fresnel et du moteur Ericsson.

Le dernier chapitre est consacré à une étude de cas.

Enfin une introduction générale et une conclusion se rapportant au travail, ont été aussi mise en œuvre.

Introduction Générale

Chapitre 1
Le Rayonnement Solaire

1.1 Introduction

Les énergies renouvelables sont des formes d'énergies inépuisables c'est à dire leur consommation ne diminue pas leur ressource à l'échelle humaine. L'énergie solaire est la ressource énergétique renouvelable la plus abondante. C'est l'énergie produite dans toutes les directions par le soleil grâce au rayonnement solaire.

Le rayonnement solaire émis qui arrive directement à la terre à travers l'atmosphère, sera exploité dans des centrales thermodynamiques de puissance ; ces centrales ont pour rôle de transformer l'énergie solaire en énergie thermique par phénomène de concentration du rayonnement, ensuite cette énergie thermique sera convertie en énergie électrique grâce à un cycle de puissance relié à un générateur électrique.

1.2 Les paramètres de position

Les ondes électromagnétiques, provenant du soleil, portent l'énergie, dont la projection dépend de l'orientation de la surface réceptrice. Pour récupérer le maximum d'énergie en provenance du soleil, il est nécessaire d'orienter au mieux le récepteur par rapport aux rayons lumineux. La connaissance de la position du soleil en fonction du temps est primordiale. Pour un lieu donné, la position du soleil est repérée à chaque instant de la journée et de l'année en utilisant les suivants paramètres de position inspirés des références [8] :

1.2.1 Les coordonnées géographiques terrestres :

Ce sont les coordonnées angulaires qui permettent de repérer un point sur la terre, comme illustre la Figure 1.3.

a) *Latitude φ*

La latitude d'un lieu φ correspond à l'angle avec le plan équatorial, que fait le rayon joignant le centre de la terre à ce lieu. L'équateur terrestre est donc caractérisé par une latitude égale à 0, le pôle nord par la latitude +90 et le pôle sud par la latitude -90. Cette convention de signe affecte le signe (+) à tous les lieux de l'hémisphère nord et le signe (-) à tous les lieux de l'hémisphère sud [9], [10].

b) *Longitude L*

La longitude d'un lieu L correspond à l'angle que fait le plan méridien passant par ce lieu avec un plan méridien retenu comme origine. On a choisi pour méridien (origine 0) le plan passant par l'observatoire de Greenwich. Par convention on affecte du signe (+) les méridiens situés à l'est de ce méridien, et du signe (-) les méridiens situés à l'ouest [11].

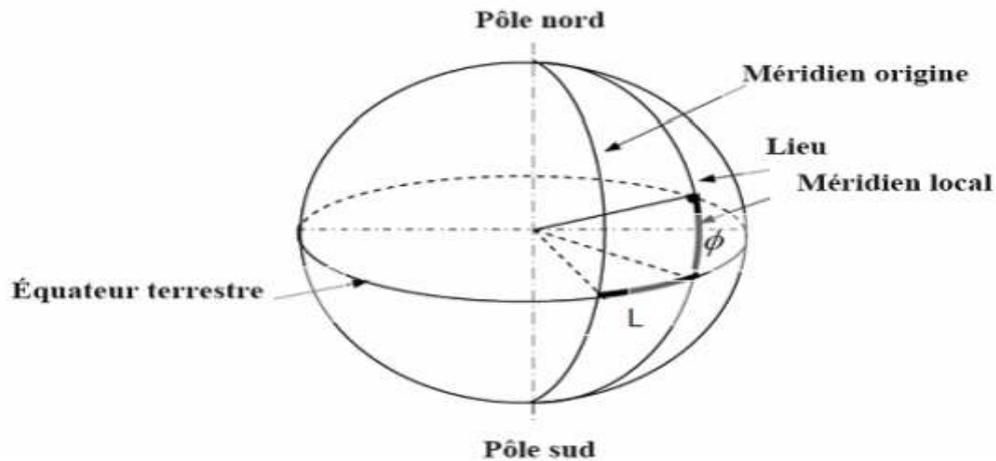


Figure 1.1: Définition des coordonnées terrestres d'un lieu donné. [3]

1.2.2 Les coordonnées horaires :

La position du soleil est repérée par rapport au plan équatorial de la terre à l'aide de deux grandeurs illustrées par la Figure 1.5:

a) La déclinaison solaire (δ)

C'est l'angle formé par la direction du soleil et le plan équatorial terrestre. (Voir la figure 1.4). Elle varie tout au long de l'année, entre deux valeurs extrêmes : $(-23.45^\circ$ et $+23$ environ) et elle s'annule aux équinoxes de printemps et d'automne, sa valeur peut être calculée par la formule [12]:

$$\delta = 23.45 \sin\left(360 \cdot \frac{284+n}{365}\right) \quad (1.1)$$

Où :

n : est le numéro du jour de l'année (1 pour le 1 Janvier, 365 pour le 31 décembre).

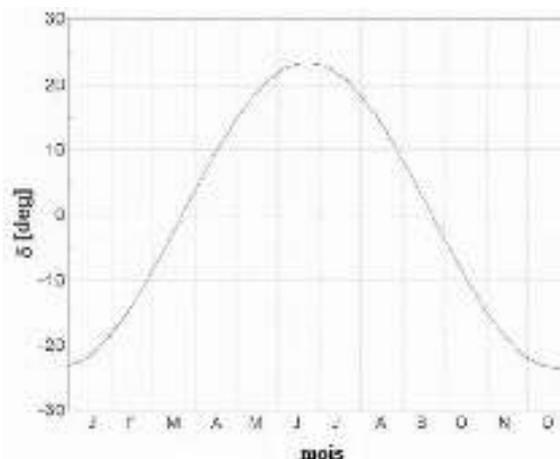


Figure 1.2 : La déclinaison du soleil en fonction du jour de l'année. [13]

b) L'angle horaire (ω)

C'est l'angle formé par le plan méridien du lieu et celui passant par la direction du soleil. Cet angle augmente de quinze degrés (15°) par heure, la valeur zéro degré (0°) est atteinte au passage du soleil à la verticale (zénith) du plan méridien (midi solaire vrai = 12 h TSV (TSV: Le temps solaire vrai)).

L'angle horaire est compté négativement avant midi TSV et positivement à l'après-midi. La relation directe entre TSV et l'angle horaire (ω) du soleil est donnée par:

$$\omega = 15^\circ (TSV - 12) \quad (1.2)$$

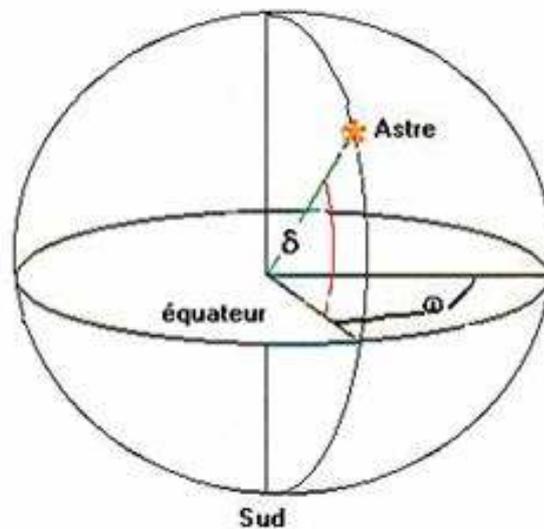


Figure 1.3: Les coordonnées horaires.

1.2.3 Les coordonnées horizontales :

Le repère horizontal est formé par le plan de l'horizon astronomique et la verticale du lieu comme indique la Figure 1.6. Dans ce repère, on a deux coordonnées:

a) Hauteur angulaire du soleil (h)

C'est l'angle formé par la direction du soleil avec sa projection sur le plan horizontal. La hauteur du soleil varie à chaque instant de la journée et de l'année selon la relation suivante, appelée formules de Gauss:

$$\sin(h) = \sin \varphi \cdot \sin \delta + \cos \varphi \cdot \cos \delta \cdot \cos \omega \quad (1.3)$$

b) L'Azimut du soleil (a)

C'est l'angle que fait la direction de la projection du soleil sur le plan horizontal avec la direction sud. La connaissance de l'azimut est importante pour le calcul de l'angle d'incidence des rayons sur une surface non horizontale, l'azimut nul correspond à la direction sud dans l'hémisphère nord et la direction nord dans l'hémisphère sud. L'orientation Est correspond à l'azimut $a = -90^\circ$ et l'orientation Ouest à $a = +90^\circ$. Il est défini par la relation suivante :

$$\sin(a) = \frac{\cos(\delta) \cdot \cos(\omega)}{\cos(h)} \quad (1.4)$$

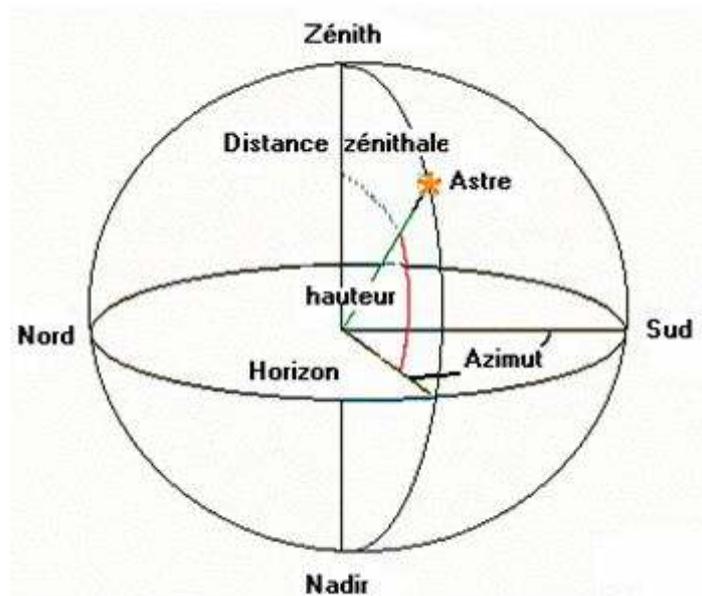


Figure 1.4: Les coordonnées horizontales.

1.3 Les paramètres de temps :

On distingue:

1.3.1 Le temps solaire vrai :

Le temps solaire vrai TSV est une conséquence de la loi des aires, les passages du soleil au méridien du lieu ne se succèdent pas à 24 heures d'intervalle en raison de la trajectoire elliptique. Cette notion a une liaison avec l'angle horaire ω indiquée par l'équation (1.2).

1.3.2 Equation du temps :

La variation de la vitesse

de rotation de la terre sur sa trajectoire, autour du soleil, introduit un terme correctif appelé équation du temps qui représente l'écart entre le temps solaire vrai et le temps solaire moyen, calculé par:

$$ET = 229.18 \left(\begin{array}{l} 0.00075 + 0.001868 \cos(B) - 0.032077 \sin(B) \\ -0.014615 \cos(2B) - 0.04089 \sin(B) \end{array} \right) \quad (1.5)$$

Avec:

$$B = \frac{360}{365} (n - 1)$$

On trouvera la variation annuelle de l'équation du temps sur la Figure 1.7

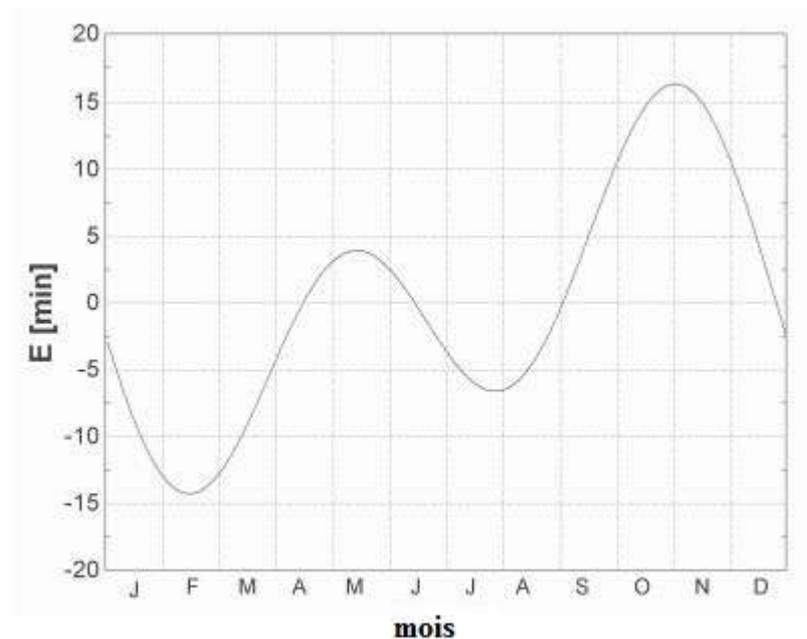


Figure 1.5: Equation du temps en fonction du jour de l'année.

1.3.3 Durée du jour, décalage et fuseau horaire :

- La durée du jour est donnée par l'équation suivante :

$$Dj = \frac{2}{15} \ar \cos(-\tan(\varphi) \cdot \tan(\delta)) \quad (1.6)$$

- Le temps solaire est calculé par la suivante:

$$TS = TL - C + ET + \frac{(L_{std} - L)}{15} \quad (1.7)$$

Où :

L_{std} : Longitude standard servant de référence au temps légal (en général le centre du fuseau)

L : Longitude du lieu considéré.

TL : Le temps légal (donné par montre)

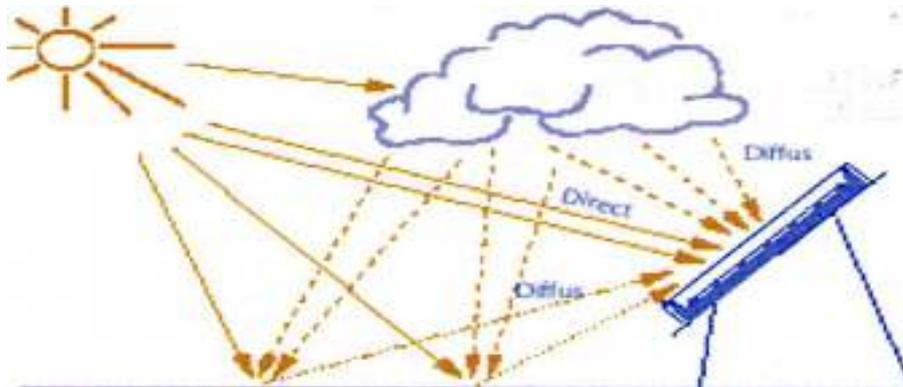
C : le décalage horaire par rapport au méridien de Greenwich, il représente la différence (fixée par chaque pays) entre l'heure légale TL et l'heure civile TCF correspondant au fuseau horaire adopté par le pays. L'heure civile TCF du fuseau horaire est égale au temps universel TU (temps solaire du méridien de Greenwich).

$$C = TL - TCF \quad (1.8)$$

1.4 L'éclairement solaire

1.4.1 Définition

L'éclairement solaire est défini comme étant la puissance (W/m^2) reçue par unité de surface réceptrice plongée dans un flux énergétique. Le rayonnement solaire hors atmosphère suit une ligne directe du soleil vers la terre. En traversant l'atmosphère, une partie du rayonnement solaire ne subit aucune modification (absorption ou réflexion), c'est ce qu'on appelle le rayonnement direct, l'autre partie est diffusée par les particules solides ou liquides en suspension dans l'atmosphère, c'est ce qu'on appelle le rayonnement diffus. La somme du rayonnement direct et diffus est le rayonnement global (Figure 1.8).



*Figure 1.6:*Types de rayonnement solaire.

1.4.2 Angle d'incidence :

L'angle d'incidence θ représente l'angle entre le rayonnement direct sur une surface et le plan normal de cette dernière. L'angle d'incidence varie tout au long de la journée, ce qui provoque la variation du rayonnement direct sur la surface du capteur. La figure 1.9 illustre l'angle d'incidence sur un capteur solaire à concentration.

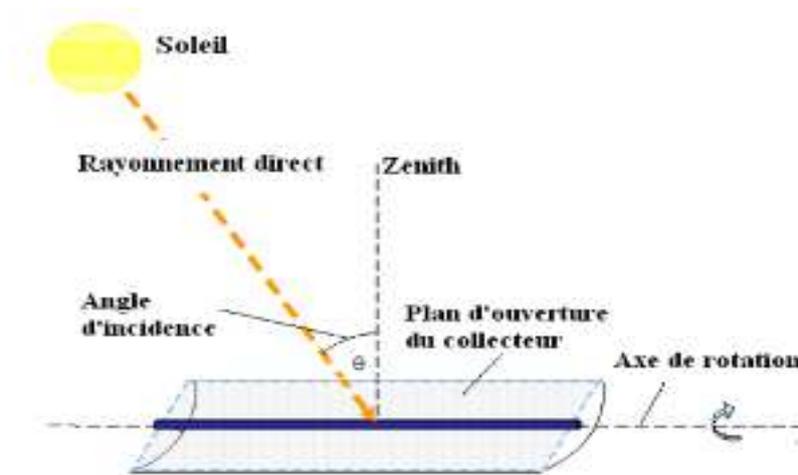


Figure 1.7: Angle d'incidence sur un capteur solaire à concentration. [13]

1.4.3 Estimation de l'éclairement solaire :

La ressource utilisée par les systèmes solaires à concentration est le rayonnement solaire direct (DNI), le terme normal signifie que le rayonnement direct incident est perpendiculaire à la surface. Il représente entre 50% et 90% de la totalité du rayonnement solaire. Ce qui conduit à deux conséquences [14]:

- La nature de l'intermittence (fréquence, amplitude) est différente de celle observée dans le cas de l'ensoleillement global. On peut s'attendre à une plus forte amplitude, les coupures de flux liées aux passages nuageux sont plus brutales.
- La distribution de la ressource (cartographie du DNI) introduit des différences remarquables par rapport à l'utilisation du Photovoltaïque ou solaire thermique. Le rayonnement direct normal est mesuré par un pyréliomètre ou calculé par des Modèles numériques. La relation qui permet de calculer le rayonnement direct est comme suit :

$$R_D = DNI \cdot \cos(\theta) \quad (1.9)$$

Où :

R_D : rayonnement direct

θ : Angle d'incidence

1.5 Le rayonnement solaire :

Les réactions thermonucléaires qui se produisent au sein du soleil, provoquent l'émission d'onde électromagnétique de très forte puissance ou rayonnement thermique solaire.

Le rayonnement ou spectre solaire se présente sensiblement comme celui d'un corps noir à 5800°K.

L'énergie solaire reçue par la terre en dehors de l'atmosphère est environ $1370\text{W}/\text{m}^2$.

Cette grandeur est appelée constante solaire. [15]

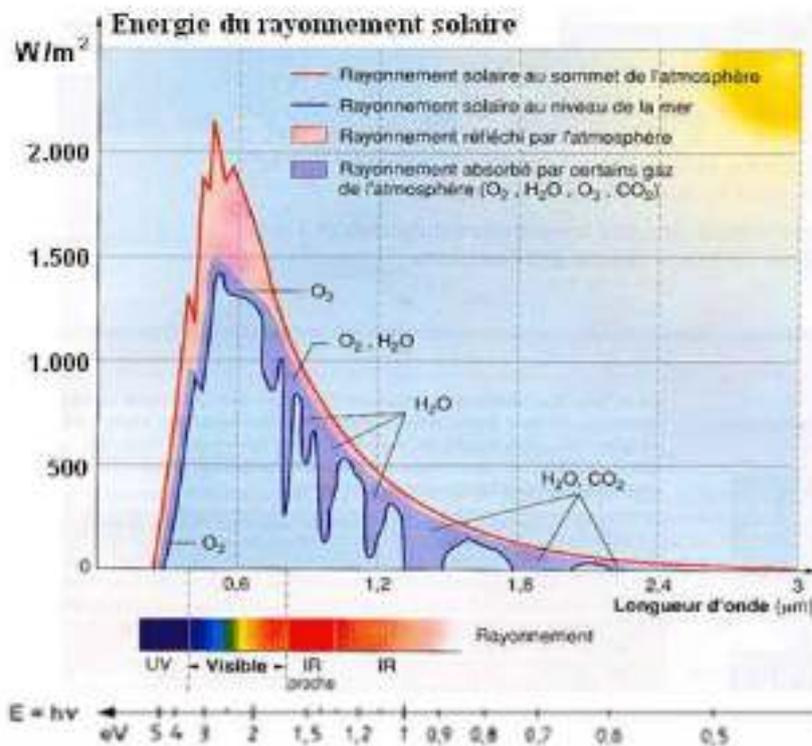


Figure 1.8 : Répartition spectrale du rayonnement solaire.

Le domaine de longueur d'onde utile pour les applications solaires est situé entre $0.25\mu\text{m}$ et $2.5\mu\text{m}$, l'énergie émise dans cette bande (contenant les zones UV, Visible et IR) représente 95% environ du total [16].

Mais en traversant l'atmosphère l'énergie radiative solaire est atténuée par absorption et diffusion, et l'énergie enregistrée au niveau de la mer est l'ordre de $1000\text{W}/\text{m}^2$ [17].

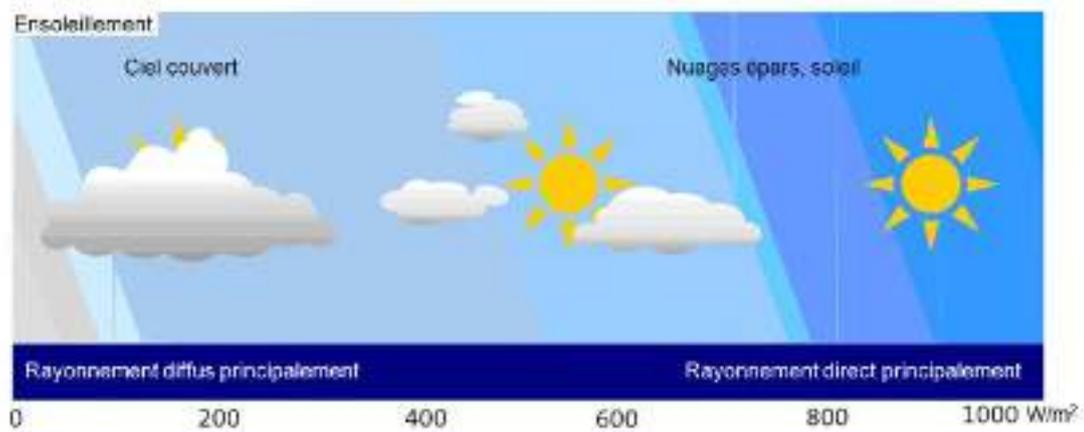


Figure 1.9 : Variation du rayonnement solaire.

Ce chiffre variera ensuite en fonction de l'angle d'incidence sur le récepteur, de l'intensité et de la durée d'ensoleillement.

Le rayonnement solaire est ainsi composé de deux types de rayonnement (la proportion du rayonnement dû à l'albédo étant très faible) :

1.5.1 Le rayonnement solaire direct :

Le rayonnement provenant directement du disque solaire reçu sur un plan normal, et traverse l'atmosphère sans subir de modification.

1.5.2 Rayonnement solaire diffus :

C'est le rayonnement provenant de toute la voûte céleste à l'exception du disque solaire, il s'agit du rayonnement solaire diffusé par les particules solides ou liquides en suspension dans l'atmosphère.

1.5.3 Le rayonnement solaire global :

C'est la somme des deux types de rayonnements direct et diffus et dont l'intensité est variable d'un endroit à un autre et d'une heure à l'autre [18].

$$I = I_0 * [1 + 0.033 * \cos\left(n \frac{360}{365}\right)] \quad (1.10)$$

Avec : **n** : nombre de jours à partir du 1^{er} janvier

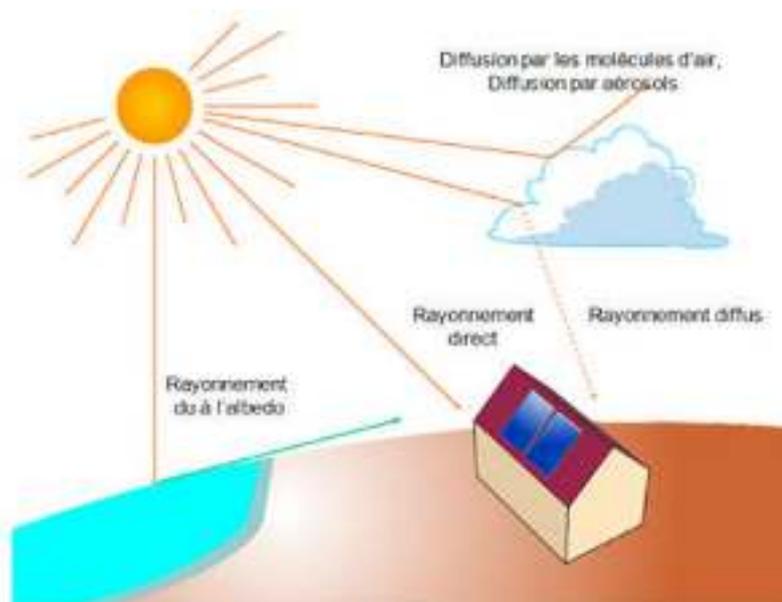


Figure 1.10 : Composantes du rayonnement solaire.

Mais la concentration optique, dont il est question dans notre mémoire, ne concerne que le rayonnement direct, provenant du soleil par temps clair.

Les concentrateurs sont alors dotés de dispositifs de suivi de la course du soleil, en hauteur ou en hauteur et en azimut.

En effet, le trajet parcouru par le rayonnement solaire au cours d'une même journée est à son maximum aux premières heures de la matinée et en fin d'après midi. Par contre, il est à son minimum lorsque le soleil est au zénith. Pour cette même raison, l'intensité du rayonnement est variable au cours des saisons et avec la latitude. Ainsi, Le rayonnement solaire global reçu au cours d'une journée peut varier de $0,5 \text{ kWh/m}^2$ pour une journée d'hiver ensoleillée dans les régions nordiques, à plus de $6,0 \text{ kWh/m}^2$ pour une journée ensoleillée dans les régions tropicales.

Les centrales solaires à concentration ne sont donc productives que durant les heures de beau temps. Leur productibilité est proportionnelle au nombre d'heures annuel de présence du soleil. Ce paramètre est donc nécessaire pour une réflexion sur l'étendue du gisement pour un projet de centrale thermodynamique solaire (la limite inférieure des zones utilisables se situe vers 2500 heures annuelles de présence du soleil).

Toute étude, application ou conversion de l'énergie solaire en un site donné nécessite une connaissance complète et détaillée du rayonnement solaire dans ce site. Ceci est généralement possible grâce aux stations de mesure météorologique. Cependant, dans la plupart des cas, il n'existe pas de mesures locales du rayonnement solaire et le recours à certaines méthodes appropriés, permettant de prédire les caractéristiques du rayonnement solaire et de l'estimer, est nécessaire [19].

L'énergie solaire effective reçue est alors mesurée sur l'année en énergie thermique pour un emplacement donné. Les pays du sud de la Méditerranée ont un grand potentiel tel que démontré dans la figure 1.13:

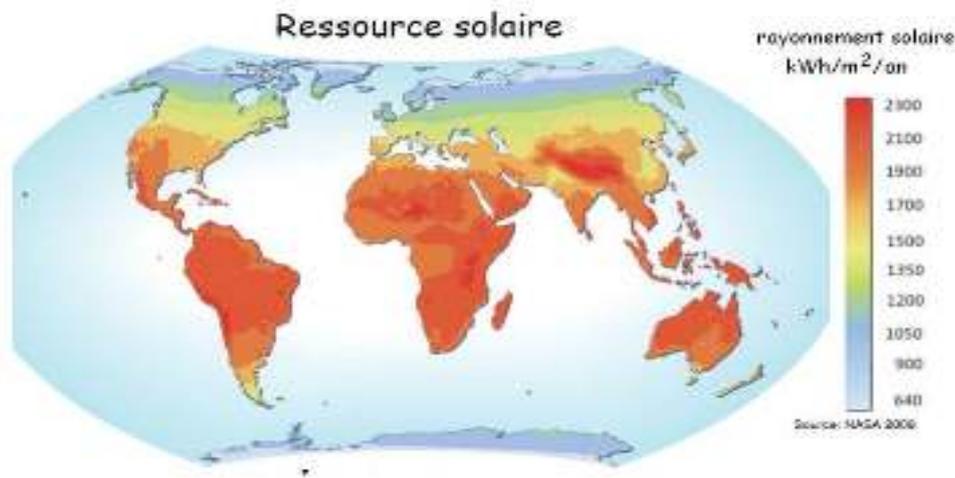


Figure 1.11 : Rayonnement solaire annuel en $[\text{kWh}/\text{m}^2/\text{an}]$.

1.6 Masse Atmosphérique

On appelle masse d'air la masse d'atmosphère traversée par le rayonnement direct pour atteindre le sol (par ciel clair), par rapport à une traversée verticale au niveau de la mer [30]. Plus le soleil est bas sur l'horizon, plus il va traverser une épaisseur importante d'atmosphère et plus il va subir des transformations. Dans l'Atlas Solaire de l'Algérie, **Capderou** a utilisé la formule suivante : [22]

$$m_A = \frac{1}{\sin(h) + 9.40 \times 10^{-4} [\sin(h) + 0.0678]^{-1.253}} \quad (1.11)$$

En 1989, **Kasten** et al (de [23] à [24]) donnent une expression pour m_A qui est devenue largement utilisée. **Le modèle R.sun** utilise cette formule avec une légère correction de la hauteur du soleil.

$$m_A = \frac{p/p_0}{\sin(h_0^{\text{ref}}) + 0.50572 [\sin(h_0^{\text{ref}}) + 6.07995]^{-1.6364}} \quad (1.12)$$

p/p_0 : est la correction de l'altitude Z (m) :

$$\frac{p}{p_0} = \exp\left(-\frac{Z}{8434.5}\right) \quad (1.13)$$

h_0^{ref} : est l'altitude du soleil corrigée par la composante de la réfraction atmosphérique.

$$h_0^{\text{ref}} = h_0 + \Delta h_0^{\text{ref}} \quad (1.14)$$

$$h_0^{\text{ref}} = \frac{0.061359(0.1594 + 1.123h_0 + 0.065656h_0^2)}{1 + 28.9344h_0 + 277.3971h_0^2} \quad (1.15)$$

h_0 : est l'altitude du soleil donnée par l'équation (1.32).

1.7 Epaisseur Optique de l'Atmosphère

En 1922, **Linke** [25] définit l'épaisseur optique de Rayleigh **R** comme étant l'épaisseur optique totale d'une atmosphère sans nuages, vapeur d'eau et aérosols. **Kasten**, en 1980[32] a utilisé les données spectrales publiées par **Feussner** et al en 1930 [22, 23]. Il a proposé aussi l'expression (1.16) pour **R** connue sous le nom de pyréliométrique de Kasten, dont la diffusion moléculaire et l'absorption de la couche d'ozone stratosphérique sont prises en compte.

$$\delta_R = 9.4 + (0.9 \times m_A) \quad (1.16)$$

Dans cette formule, l'absorption par les gaz atmosphériques permanents tels que: $\text{CO}_2, \text{O}_2, \text{NO}_2$ et le CO n'est pas prise en compte. Dans l'Atlas Solaire de l'Algérie, Capderou a utilisé la formule pyréliométrique de Kasten.

En 1986, Louche (de [23] à [24]) ajouta l'absorption par les constituants permanents de l'atmosphère et proposa un polynôme de 4^{ème} ordre pour la masse d'air.

Récemment en 1996, Kasten a ajusté la formule de Louche et proposa une nouvelle expression pour [23,26]. Le modèle **R.sun** a exploité la formule ajustée de Kasten pour une masse d'air inférieure à 20 et calcule comme suit:

Pour $m_A < 20$

$$\delta_R = \frac{1}{6.6296 + (1.7513 \times m_A) - (0.1202 \times m_A^2) + (0.0065 \times m_A^3) - (0.00013 \times m_A^4)} \quad (1.17)$$

$m_A > 20$

$$\delta_R = \frac{1}{10.4 + 0.718 \times m_A} \quad (1.18)$$

$\delta_R(m)$: est l'épaisseur optique de Rayleigh.

1.8 Modèle R. Sun

1.8.1 Facteur de trouble de Linke

Le facteur de trouble atmosphérique de linke T_L représente le nombre d'atmosphères idéales qui, si elles étaient superposées, entraîneraient la même atténuation que l'atmosphère réelle (de [23] à [24]). L'avantage du facteur de linke est d'exprimer les divers paramètres, tels que la vapeur d'eau atmosphérique et les aérosols en un seul indice facile à utiliser.

Le rayonnement direct normal est exprimé en fonction du facteur T_L . Selon la formule suivante [23],

$$I_N = I \times \exp(-T_N \times m_A \times \delta_R) \quad (1.19)$$

La détermination du rayonnement solaire en fonction du facteur de Linke nécessite un modèle mathématique indépendant du rayonnement [23]. La plupart des modèles existants nécessitent la connaissance d'un grand nombre de données relatives au site [24].

Malheureusement, ces données ne sont pas toutes disponibles. Par contre, des tables relatives au facteur de Linke sont très abondantes (de [27] à [24]). Pour cela, nous avons choisi d'utiliser les données du projet Soda [28] mis en disposition sur un site Web. La méthode adoptée par ce projet fait appel à des données satellitaires d'une part et des données de mesures au sol d'autre part pour calculer le facteur de Linke.

1.8.2 Eclairage direct incident sur un plan horizontal par Ciel clair

Le rayonnement direct normal B_{oc} ($W m^{-2}$) est exprimé en fonction du facteur T_{LK} selon la formule suivante [29, 30]:

$$B_{oc} = I \times \exp(-0.8662T_{LK} \times m_A \times \delta_R(m)) \quad (1.20)$$

Le terme $-0.8662T_{LK}$ est le deuxième facteur de trouble atmosphérique de Linke par ciel clair (sans dimension) corrigé par Kasten (de [27] à [24]).

Le rayonnement direct incident sur un plan horizontal par ciel clair B_{hc} est donné par l'équation suivante.

$$B_{ho} = B_{oc} \times \sin h_o \quad (1.21)$$

1.8.3 Eclairage diffus incident sur un plan horizontal par ciel clair

Puisque le ciel sans nuage devient plus trouble, donc, l'éclairage diffus augmente lorsque l'éclairage direct diminue. L'estimation de la composante diffuse

sur un plan horizontal $D_{hc}(\text{Wm}^{-2})$ est effectuée en faisant le produit de l'éclairement énergétique I normal extraterrestre, le facteur de transmission (T_n est en fonction uniquement du facteur de trouble atmosphérique de Linke corrigé T_{LK}) et une fonction du diffus de l'altitude solaire F_d qui ne dépend que de l'altitude solaire h_o [31, 32].

$$D_{hc} = I \times T_n(T_{LK}) \times F_d(h_o) \quad (1.22)$$

L'estimation du facteur de transmission T_n (T_{LK}) permet de donner un éclairement diffus théorique sur une surface horizontale. L'expression suivante est sous forme d'une fonction polynomiale de deuxième ordre:

$$T_n(T_{LK}) = -0.051843 + 0.030543 T_{LK} + 0.0003797 T_{LK}^2 \quad (1.23)$$

F_d : La fonction de l'altitude solaire, elle est donnée par l'expression:

$$F_d(h_o) = A_1 + A_2 \sin h_o + A_3 \sin^2 h_o \quad (1.24)$$

A_i : sont des coefficients dépendants uniquement du facteur de trouble T_L corrigé définis par les expressions suivantes [29, 30]:

$$A'_1 = 0.26463 - 0.061581 T_{LK} + 0.0031408 T_{LK}^2 \quad (1.25)$$

$$A_1 = 0.0022 / T_n(T_{LK}) \text{ si } A'_1 T_n(T_{LK}) > 0.0022 \quad (1.26)$$

$$A_1 = A'_1 \text{ si } A'_1 T_n(T_{LK}) \leq 0.0022 \quad (1.27)$$

$$A_2 = 2.04020 + 0.018945 T_{LK} - 0.011161 T_{LK}^2 \quad (1.28)$$

$$A_3 = -1.3025 + 0.039231 T_{LK} - 0.0085079 T_{LK}^2 \quad (1.29)$$

Subséquentement, l'éclairement global sur une surface horizontale est calculé comme suit:

$$G_{hc} = G_{hc} + D_{hc} \quad (1.30)$$

1.8.4 Eclairement direct incident sur un plan incliné par ciel clair

Le rayonnement direct normal sur un plan incliné $B_{ic}(\text{Wm}^{-2})$ est obtenu en utilisant la relation suivante:

$$B_{ic} = B_{oc} \sin \delta_{exp} \quad (1.31)$$

Ou bien

$$B_{ic} = B_{hc} \sin \delta_{exp} / \sin h_o \quad (1.32)$$

Avec δ_{exp} qui est l'angle d'incidence solaire mesuré entre le soleil et une surface inclinée défini dans l'équation (1.37).

La position du soleil par rapport à une surface horizontale est donnée par les deux coordonnées classiques suivantes:

Altitude solaire **ho**: un angle entre la trajectoire du soleil et une surface horizontale,

Azimut **Ao** : angle horizontal entre le soleil et le méridien mesuré à partir de l'Est [22]:

$$\sin ho = C_{31} \cos T + C_{33} \quad (1.33)$$

$$\cos Ao = (C_{11} \cos T + C_{13}) / ((C_{22} \sin T)^2 + (C_{11} \cos T + C_{13})^2)^{1/2} \quad (1.34)$$

Avec

$$C_{11} = \sin \varphi \cos \delta \quad (1.35)$$

$$C_{13} = -\cos \varphi \sin \delta \quad (1.34)$$

$$C_{22} = \cos \delta \quad (1.35)$$

$$C_{31} = \cos \varphi \cos \delta \quad (1.36)$$

$$C_{33} = \sin \varphi \sin \delta \quad (1.37)$$

Dans le modèle R.sun, nous avons mis une déclinaison du soleil (rad) qui correspond à: [29, 26]:

$$\delta = \arcsin (0.398 \times \sin (N' - 14 + 0.0355 \sin (N' - 0.0489))) \quad (1.38)$$

La position du soleil par rapport à une surface inclinée est définie par l'angle δ_{exp} [33]. Si la surface inclinée est définie par l'angle d'inclinaison δ et l'azimut α (un angle entre la projection de la normale sur la surface horizontale et l'Est) alors:

$$\sin \delta_{exp} = C'_{31} \cos (T - \lambda') + C'_{33} \quad (1.39)$$

Où

$$C'_{31} = \cos \varphi' \cos \delta \quad (1.40)$$

$$C'_{33} = \sin \varphi' \sin \delta \quad (1.41)$$

Et

$$\sin \varphi' = -\cos \varphi \sin \beta \cos \alpha + \sin \varphi \cos \beta \quad (1.42)$$

$$\tan \lambda' = -(\sin \beta \sin \alpha) / (\sin \varphi \sin \beta \cos \alpha + \cos \varphi \cos \beta) \quad (1.43)$$

L'angle horaire du temps du lever et du coucher du soleil sur une surface horizontale T_h^{rs} peut être calculé par:

$$\cos T_h^{rs} = -C_{33} / C_{31} \quad (1.44)$$

L'angle horaire du temps du lever et du coucher du soleil sur une surface inclinée peut

être calculé par:

$$\cos (T_h^{rs} - \lambda') = -C'_{33} / C'_{31} \quad (1.45)$$

1.8.5 Eclairement diffus incident sur un plan incliné par ciel clair

Le modèle d'estimation de l'éclairement diffus par ciel clair sur une surface inclinée est représenté par les équations suivantes:

$$\begin{aligned} & \text{Si} \\ & h_o \geq 0.1 \text{ rad} \end{aligned} \quad (1.46)$$

C'est-à-dire si on considère que

$$h_o \geq 5.7^\circ \quad (1.47)$$

$$D_{ic} = D_{hc} \{F(\gamma_N) (1 - K_b) + K_b \sin \delta_{exp} / \sin h_o\} \quad (1.48)$$

Si

$$h_o < 0.1 \text{ rad} \quad (1.49)$$

$$D_{ic} = D_{hc} \{F(+N) (1 - K_b) + K_b \sin +N \cos A_{LN} / (0.1 - 0.008h_o)\} \quad (1.50)$$

$$A_{LN}^* = A_o - A_N \quad (1.51)$$

$$A_{LN} = A_{LN}^* \text{ si } -\Pi \leq A_{LN}^* \leq \Pi \quad (1.52)$$

$$A_{LN} = A_{LN}^* - 2 \Pi \text{ si } A_{LN}^* > \Pi \quad (1.53)$$

$$A_{LN} = A_{LN}^* + 2 \Pi \text{ si } A_{LN}^* < -\Pi \quad (1.54)$$

$$K_b = B_{hc} / G_{oh} \quad (1.55)$$

Où G_{oh} (W.m^{-2}) est calculé comme suit:

$$G_{oh} = G_o \sin h_o \quad (1.57)$$

1.9 conclusion

L'énergie solaire est une source d'énergie propre et inépuisable. Compte tenu de son potentiel énorme, le solaire à concentration se développe aujourd'hui dans plusieurs pays, en particulier dans le sud-ouest des Etats-Unis et en Espagne où de très nombreux projets sont en cours de réalisation.

La puissance électrique produite par les centrales solaires se situe actuellement de 10 à 300MWe plus faible comparés à celles des centrales thermiques nucléaires 800 à 1600 MWe. Mais ces projets génèrent des milliers d'emplois ainsi qu'une énergie propre et durable.

Les centrales solaires à concentration ne peuvent valoriser que le rayonnement issu du disque solaire lui-même (soit le « direct » et non le « diffus »), c'est-à-dire qu'elles ne sont productives que durant les heures de beau temps. On peut en déduire sans trop d'erreur que leur productibilité est proportionnelle au nombre d'heures annuel de présence du soleil. Ce paramètre est classiquement mesuré dans la quasi-totalité des stations météorologiques. Il est donc disponible partout et peut être un bon point de départ pour une réflexion sur l'étendue du gisement, ou plus simplement sur l'implantation d'un projet de centrale thermodynamique solaire. Vis à vis de ce critère, la limite inférieure des zones utilisables se situe vers 2500 heures annuelles de présence du soleil.

Chapitre 2
Etat de L'art

2 Introduction

Dans ce chapitre nous allons montrer l'état de l'art du concentrateur de Fresnel et du moteur Ericsson. Nous allons donner un peu plus des détails concernant les deux, en montrant les travaux qui ont été déjà réalisés.

2.1 Miroir de Fresnel

Un facteur de coût important dans la technologie des collecteur cylindro-paraboliques et la mise à forme du verre pour obtenir la forme parabolique requise ont amené les chercheurs à une autre alternative. Afin de diminuer ce coût, plusieurs groupes de recherche travaillent 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 figure 2.1.

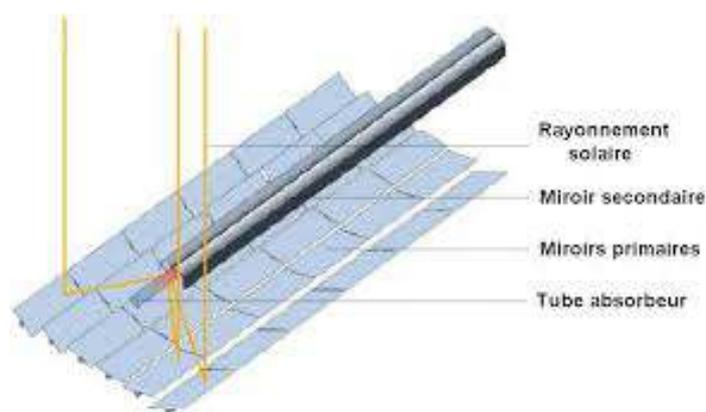


Figure 2.1 : Concentrateur linéaire de Fresnel

2.1.1 Les systèmes à capteurs linéaires de Fresnel (CLFR)

Le système à capteurs linéaires de Fresnel est un système concentrateur linéaire similaire aux systèmes cylindro-paraboliques mais avec un absorbeur fixe. Ce système est composé de miroirs plans, ou faiblement paraboliques, disposés en lames parallèles qui s'inclinent sur un axe de façon à réfléchir les rayons lumineux vers un récepteur tubulaire fixe (Figure 2.2).

La chute des performances optiques de cette technologie doit être compensée par une forte diminution des coûts de maintenance et d'investissement. Cette baisse des coûts est largement possible grâce à une conception simplifiée.

1. Seule la génération directe de vapeur est envisageable pour cette technologie pour éliminer l'étage d'échangeurs complexe et cher.
2. Les tubes absorbeurs sont séparés du champ de miroirs et fixes ; les problèmes de joints des tubes absorbeurs sont éliminés.

3. Les mouvements des miroirs, leurs conceptions et leurs fabrications sont simplifiés et la prise au vent et l'encombrement sont réduits.

Cette technologie très récente souffre encore d'un manque de maturité qui pourrait être comblé rapidement grâce aux projets de recherche à Almeria et surtout en Australie. De plus, AUSRA un industriel australien développe actuellement des projets très ambitieux dont une centrale de 177 MWe en Californie dont les travaux devraient démarrer en 2009 [34].

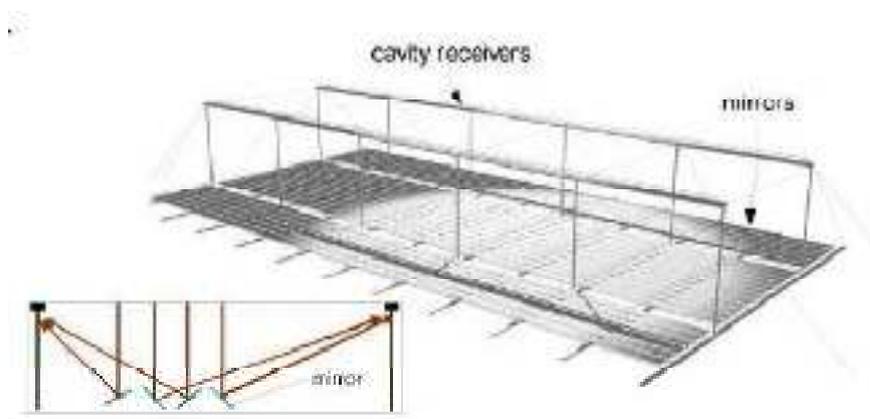


Figure 2.2 : Schéma d'un système à capteurs linéaires de Fresnel

2.2 Principe de fonctionnement des miroirs de Fresnel

Le principe d'un concentrateur de Fresnel réside dans ses miroirs plans (plats) dits "réflecteurs compacts linéaires". Chacun de ces miroirs peut pivoter en suivant la course du soleil pour rediriger et concentrer en permanence les rayons solaires vers un tube absorbeur.

Un fluide caloporteur est chauffé jusqu'à 500° en circulant dans ce tube horizontal. Cette énergie est transférée à un circuit d'eau, la vapeur alors produite actionne une turbine qui produit de l'électricité. Voir figure 2.4

Principal avantage de cette technologie, les miroirs plats sont bien meilleur marché que les miroirs paraboliques.

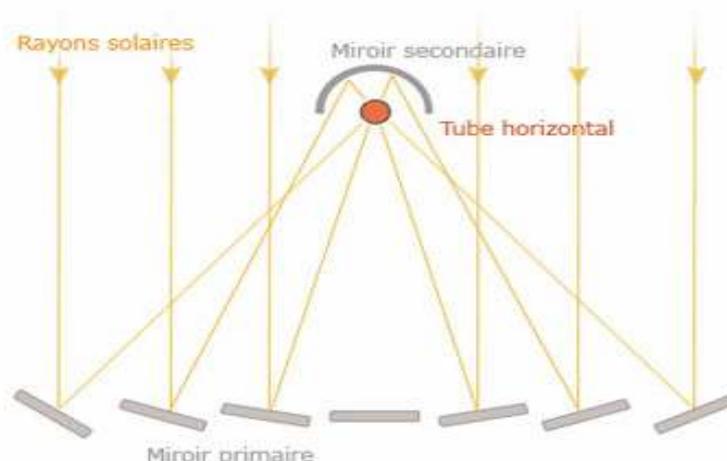


Figure 2.3: Principe de fonctionnement des miroirs de Fresnel.

2.3 Premier Prototype de 2500m² utilisant la technologie des miroirs de Fresnel

Un tout premier prototype de 2500m² utilisant la technologie des miroirs de Fresnel a été réalisé à Liège en 2001 par la société belge Solarmundo.



Figure 2.4: Prototype de 2500 m² à Liège.

Selon Solarmundo, cette technologie pourrait mener à une réduction des coûts de production de 50% par rapport à aux réflecteur traditionnels. Une étude a été réalisée en 2002 par plusieurs instituts de recherche allemands sur les avantages d'un tel type d'installation. Le projet étudié était l'implémentation d'un système à miroir de Fresnel sur le site d'Hurguada en Egypte.

L'étude conclut que les performances thermiques des collecteurs de Fresnel sont inférieures de 30% aux systèmes classiques, mais qu'un coût de production au kWh inférieur est obtenu : 0.075 €/kWh contre 0.0845 €/kWh pour les collecteurs classiques (Häberle et Al, 2002).

2.4 Position du miroir par rapport au temps solaire

2.4.1 Matin



Figure 2.5 : Position du miroir en matin

2.4.2 Après midi



Figure 2.6 : Position du miroir en après midi

2.5 Avantages et Inconvénients

Les avantages sont :

1. Plus simple à réaliser
2. Coûts plus faible
3. Résistent mieux au vent
4. Nécessitent moins d'espace

Les inconvénients sont:

1. Performances plus faible que les cylindro-parabolique
2. Températures moins élevées

2.6 Le moteur Ericsson: Présentation et Modélisation

2.6.1 Introduction

Après avoir connu un grand essor au XIX^ele moteur Ericsson est tombé en désuétude du fait du développement des moteurs à combustion interne et des moteurs électriques. Les machines volumétriques alternatives sont une des meilleures solutions technologiques pour des applications de petites puissances dans la gamme de 1 à 10 kW. Cet intervalle de puissances est celui de la micro-cogénération et de la conversion thermodynamique de l'énergie solaire de faible puissance. Vu les avantages qu'il présente sur le moteur Stirling [38] (une des rares solutions à apport de chaleur externe disponibles commercialement pour des applications de petites puissances) et les moteurs à combustion interne, le moteur Ericsson à cycle de Joule est en train de connaître un regain d'intérêt de la part de la communauté des ingénieurs et des chercheurs. Dans ce chapitre, nous faisons une présentation historique de ce moteur et un état de l'art sur les recherches actuelles à travers le monde.

Le moteur Ericsson fait partie de la famille des moteurs thermiques. Le rôle de ces moteurs est de transformer l'énergie thermique en énergie mécanique. Pour cela, il faut que le fluide de travail, généralement l'air, reçoive de la chaleur d'une source chaude, cède de la chaleur à un puits froid et fournisse du travail mécanique à son environnement.

Le diagramme entropique (Ts) de la figure (2.8) présente qualitativement un cycle moteur. Le fluide de travail subit une compression au cours de laquelle il passe d'une pression faible p_{\min} à une pression élevée p_{\max} , à un niveau de température faible. Il subit ensuite une détente pour passer de p_{\max} à p_{\min} , à un niveau de température plus élevée. Tous les moteurs thermiques ont donc besoin pour fonctionner de:

- La compression d'un fluide froid;
- L'apport de chaleur d'une source chaude;
- Le rejet de chaleur d'une source chaude vers un puits froid.

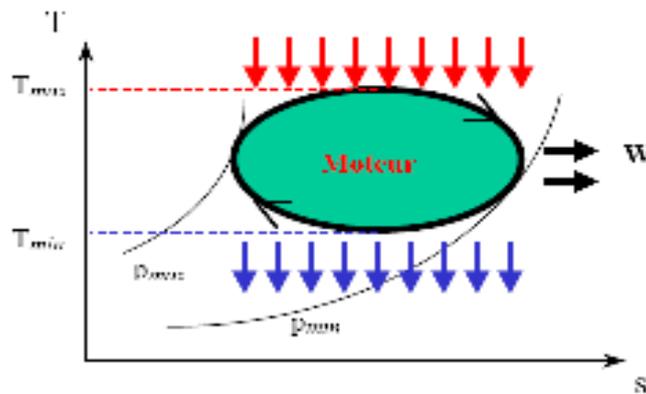


Figure 2.7 : Représentation qualitative d'un cycle moteur dans un diagramme entropique.

2.6.2 Présentation et historique

L'ingénieur Ericsson (figure 2.9) conçoit et réalise dès 1826, un moteur (appelé moteur calorique) initialement sans régénérateur avec des enceintes séparées pour le réchauffage de l'air et une autre pour le refroidissement.



Figure 2.8 : John Ericsson
(1803-1889)

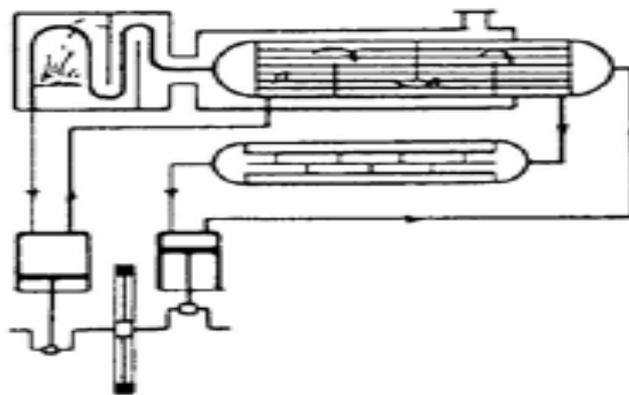


Figure 2.9 : Premier moteur d'Ericsson (1833)

En 1833, Ericsson construisit un moteur à "air chaud" à soupapes avec récupérateur, en cycle fermé (figure 2.9). Et en 1853, il inventa un moteur fonctionnant en cycle ouvert (figure 2.10). Une machine à "air chaud" d'Ericsson a été utilisée comme moteur pour le vaisseau 'Ericsson' lancé en 1853. C'était un moteur marin développant une puissance de 220 kW avec un rendement global de 13,3 %. La vitesse de rotation valait 6,5 tr/min, la pression maximale de l'air dans le moteur, 0,16 MPa, la course des pistons, 1,8 m, l'alésage des cylindres, 3,5 m pour le cylindre de compression et 4,3 m pour le cylindre de détente [39].

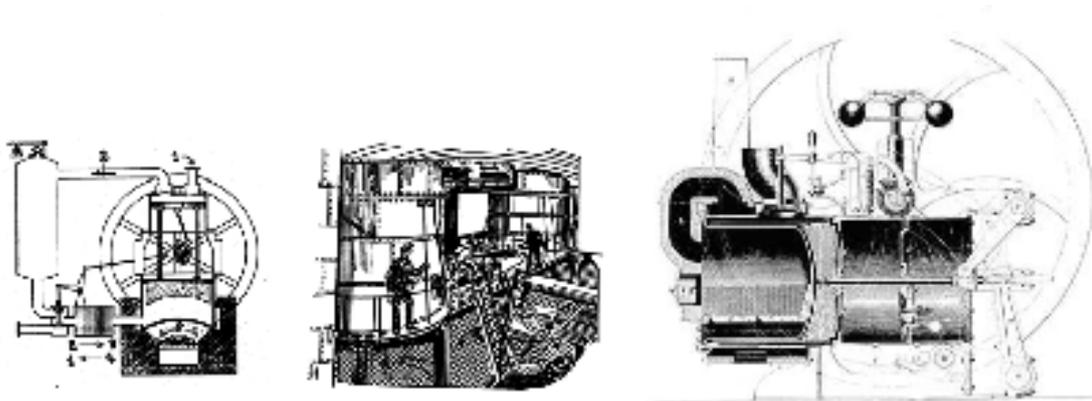


Figure 2.10 : Respectivement: Moteur Ericsson (1853), Moteur thermique d'Ericsson pour propulsion navale (1853) et Moteur Ericsson (1855-1860).

Le moteur Ericsson qui propulse le bateau transatlantique en 1853 a fait l'objet, de même que ses dérivés, d'une production à plusieurs milliers d'exemplaires installés sur des navires américains et dans des ateliers de manufactures. Mais plus tard, les moteurs de ces navires vont être remplacés par des machines à vapeur classiques.

Entre 1855 et 1860, près de 3000 exemplaires de moteurs Ericsson de faible puissance, environ 600 W, furent vendus et mis en service aux États-Unis, en Allemagne, en France et en Suède. Sur ces moteurs, les pistons de compression et de détente sont situés dans le même cylindre (figure 2.10) et c'est le premier modèle de moteur à "air chaud" à avoir été produit en grande série. Sa fiabilité et sa robustesse étaient avérées car un de ces moteurs a été installé sur un phare y est resté en fonctionnement 30 ans après sa mise en service.

2.7 État de l'art du moteur Ericsson

Il existe très peu de publications scientifiques sur le moteur Ericsson fonctionnant selon le principe du cycle de Joule. Parmi les quelques références bibliographiques disponibles, on pourrait distinguer:

1. Les études portant sur des moteurs Ericsson à "combustion interne";
2. Les études portant sur des moteurs à cycle théorique d'Ericsson;
3. Les études portant sur des moteurs Ericsson à apport de chaleur externe.

2.7.1 Travaux de recherche sur les moteurs à cycle théorique d'Ericsson

Une étude expérimentale a été menée sur un prototype de moteur à cycle d'Ericsson par J. Hussey à l'Université de Cap en Afrique du Sud. [40] Il s'agit d'une tentative de développement d'un prototype de moteur à apport de chaleur externe à cycle d'Ericsson.

Les 5 kW escomptés ont été loin d'être atteints, du fait des frottements mécaniques (nombreux joints, bagues et segments), des fuites d'air, des pertes de charge, et d'une vitesse de rotation maximale trop faible (192 tr/mn).

David A. Blank et Chih Wu [41] ont fait une étude thermodynamique en temps fini d'un moteur à cycle théorique d'Ericsson solaire pour des applications spatiales, dont le but est d'optimiser la puissance et le rendement thermiques. C'est une étude théorique qui a permis d'établir un critère de base d'évaluation de la performance et de la conception de tels moteurs.

Les auteurs ont bien cité les nombreux avantages du moteur à cycle théorique d'Ericsson et affirment qu'il gagnerait à être mieux connu et utilisé dans les applications de conversion d'énergie. Ces mêmes auteurs ont fait une étude d'optimisation de puissance d'un moteur à cycle d'Ericsson endoreversible avec régénération parfaite. [42] Le cycle endoreversible est celui dans lequel les processus de transferts thermiques externes sont les seuls processus irréversibles du cycle. La puissance maximale et le rendement correspondant sont obtenus sur la base des températures extrêmes (la plus élevée et la plus basse). Les résultats obtenus fournissent des critères supplémentaires utiles à l'étude et à l'évaluation des performances des moteurs à cycle théorique d'Ericsson.

Miroslav Golub[43] a étudié un moteur à cycle théorique d'Ericsson. A partir de mesures expérimentales, l'auteur a pu établir une relation empirique qu'il appelle l'équation de la courbe géométrique ou la fonction de puissance du moteur à cycle d'Ericsson:

$$P = 0,03663 d^{2,57} \quad (2.1)$$

Avec **P**, la puissance du moteur en Watts et **d**, le diamètre du cylindre de détente en cm. La majorité des informations sur le moteur à cycle Ericsson étudié sont tirées du livret de **Delameter** [44] datant de 1890.

Jincan Chen et Jan A. Schouten [45] ont étudié théoriquement l'influence des irréversibilités suivantes sur un moteur à cycle théorique d'Ericsson:

4. Transfert thermique en temps fini;
5. Les pertes de charge dans le régénérateur;
6. Les pertes thermiques.

Une étude de l'influence des ces irréversibilités sur les performances (puissance délivrée et rendement correspondant) du moteur a été faite, le fluide de travail étant l'air considéré

comme un gaz parfait.

S.C. Kaushik et S. Kumar [46] se sont intéressés à la thermodynamique en temps fini qu'ils ont utilisée pour faire une étude d'optimisation des performances (puissance et rendement) d'un moteur à cycle théorique d'Ericsson et d'un moteur à cycle théorique de Stirling. Leur étude prend en compte les débits de capacité thermique en temps fini de la source de chaleur et du puits de chaleur, le transfert thermique en temps fini, les pertes de chaleur dans le régénérateur et les pertes thermiques directes de la source et du puits de chaleur. Ils ont montré que les moteurs à cycle d'Ericsson et de Stirling équipés d'un régénérateur idéal (efficacité égale à 1) sont aussi efficaces qu'un moteur thermique endoreversible de Carnot fonctionnant dans les mêmes conditions. Cependant, cela est difficile à mettre en œuvre dans la pratique car un régénérateur idéal exige une surface de régénérateur infinie ou un temps de régénération infiniment long.

2.7.2 Travaux de recherche sur le moteur Ericsson à apport de chaleur externe, à cycle de Joule

Une grande partie de la production scientifique actuelle concernant le moteur Ericsson provient du LaTEP. Ainsi, **Stouffs et al.** [38 47 48 54] ont présenté les nombreux avantages du moteur Ericsson comparé au moteur Stirling qui lui, est plus connu et disponible dans le commerce.

Bonnet et al. [56] ont fait l'étude énergétique, exergetique et l'étude de coût d'un moteur Ericsson de micro-cogénération. L'étude énergétique a permis de concevoir et de dimensionner le système et d'analyser l'influence des surfaces des échangeurs de chaleur sur le rendement de la machine et sur les coûts des matériaux destinés à la construction de ces échangeurs. L'analyse a montré qu'il est possible de trouver un bon compromis entre le rendement, les surfaces de transfert de chaleur et le coût des échangeurs de chaleur. L'étude exergetique a permis de tracer le diagramme de Grassmann et d'observer à la fois les flux d'énergie et les destructions d'exergie dans le système. Quant à l'étude économique, elle a permis de calculer le coût de la chaleur et de l'électricité produite et de conclure quant à la rentabilité d'un tel système comparé aux prix de l'énergie domestique fournie par les entreprises françaises. Malgré des hypothèses de calcul très sévères (rendement mécanique pas très élevé, pertes de charge aux soupapes importantes, quantité de chaleur rejetée à la cheminée importante), ce travail a permis de montrer l'intérêt d'utiliser un moteur Ericsson pour des applications de micro-cogénération.

Alaphilippe et al. [48 55] Ont présenté une méthode innovante de conversion thermodynamique de l'énergie solaire en électricité à l'aide de systèmes hybrides. L'étude théorique qui a été menée a montré qu'il est possible de produire de l'énergie électrique avec des rendements parfois supérieurs à ceux de systèmes disponibles actuellement dans le commerce. L'étude réalisée a concerné cinq sites géographiques situés en Afrique et en France, choisis en fonction de leur ensoleillement.

2.8 Conclusion

Pour conclure ce chapitre nous signalons qu'il peut être intéressant d'associer plusieurs technologies à concentration dans une même centrale solaire. On peut alors tirer les bénéfices de chaque système concentrateur, dimensionné de manière optimale.

Par exemple, il peut être faisable du point de vue économique d'utiliser un concentrateur CLFR ou cylindro-parabolique en premier étage de chauffage où on a besoin d'une forte puissance à température à modérée, puis de transférer le fluide préchauffé vers le récepteur central d'un concentrateur à tour pour y élever encore sa température avec un complément de puissance délivrée sous haut flux.

Le moteur Ericsson s'avère être une solution technologique pertinente pour la conversion d'énergie solaire en électricité et pour des applications de micro-cogénération.

Il y a un réel regain d'intérêt pour le moteur Ericsson et plusieurs travaux de recherche sont menés à travers le monde sur les moteurs à cycle théorique d'Ericsson et les moteurs à cycle de joule à combustion interne. Il existe très peu des travaux récents sur les moteurs d'Ericsson à cycle de joule à apport de chaleur externe.

Chapitre 3
Modélisation Théorique

4 Etude de Cas : Etablissement de santé

4.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous allons établir un cahier des charges dans lequel nous allons déterminer toutes les caractéristiques de la centrale à étudier et à l'aide du logiciel 'Matlab' nous allons calculer les performances de cette centrale solaire à concentration de Fresnel de 40 kWe dans le site d'IIIizi.

4.2 Présentation et description du site:

In s'agit d'un établissement de santé de proximité à vocation généraliste. Ses activités concernent **l'urgence médicale, la petite chirurgie, la chirurgie dentaire et un service femme-enfant.**

Le patrimoine immobilier du site est composé de :

1. Une salle d'attente
2. Une salle de soins
3. Un cabinet de médecin
4. Un cabinet petite chirurgie
5. Un cabinet chirurgie dentaire
6. Une salle de consultation femme-enfant
7. Des sanitaires
8. Et un entrepôt de stockage.

Le site d'implantation est dans la région d'IIIizi dont les caractéristiques sont les suivantes :

Latitude = $26,5^\circ$

Longitude = $8,47^\circ$

Altitude=572 mètres

Irradiation Direct Normale Annuelle = 2340 kWh/m²/an

Durée d'insolation = 3200 h

4.3 Le tableau et les figures ci-dessous donnent la radiométrie du site.

4.3.1 Système d'information géographique photovoltaïque

Site : 26°30'33'' Nord, 8°28'23'' Est, Elévation : 572 m

Irradiation annuelle perdue à cause des ombres (horizontale) : 0.0%

Tableau 4.1 : Les informations concernant la radiométrie du site.

Mois	Hh	Hopt	H(90)	DNI	lopt	TL	D/G
Janvier	4330	6020	5510	5870	54	3.1	0.32
Février	5240	6650	5180	6500	45	3.1	0.30
Mars	6560	7340	4390	6370	31	3.5	0.38
Avril	6770	6800	2760	6280	14	3.6	0.35
Mai	7240	6700	1840	6540	-1	3.8	0.35
Juin	7460	6620	1430	6880	-8	3.7	0.33
Juillet	7850	7070	1540	7730	-5	3.6	0.29
Août	7340	7110	2310	7300	8	3.8	0.29
Septembre	6330	6800	3520	6260	25	3.7	0.34
Octobre	5440	6520	4610	5760	40	3.6	0.36
Novembre	4520	6100	5330	5880	51	3.0	0.32
Décembre	3990	5700	5430	5550	56	3.1	0.33
Année	6090	6620	3660	6410	26	3.5	0.33

Où :

Hh : Irradiation sur un plan horizontal ($\text{wh/m}^2/\text{jour}$)

Hopt : Irradiation sur un plan avec inclinaison optimale ($\text{wh/m}^2/\text{jour}$)

H(90) : Irradiation sur un plan incliné 90deg ($\text{wh/m}^2/\text{jour}$)

DNI : Irradiation Direct Normal ($\text{wh/m}^2/\text{jour}$)

Lopt : Inclinaison optimale (deg)

TL : Turbidité de Link (*)

D/G : Proportion entre irradiation diffuse et globale(*)

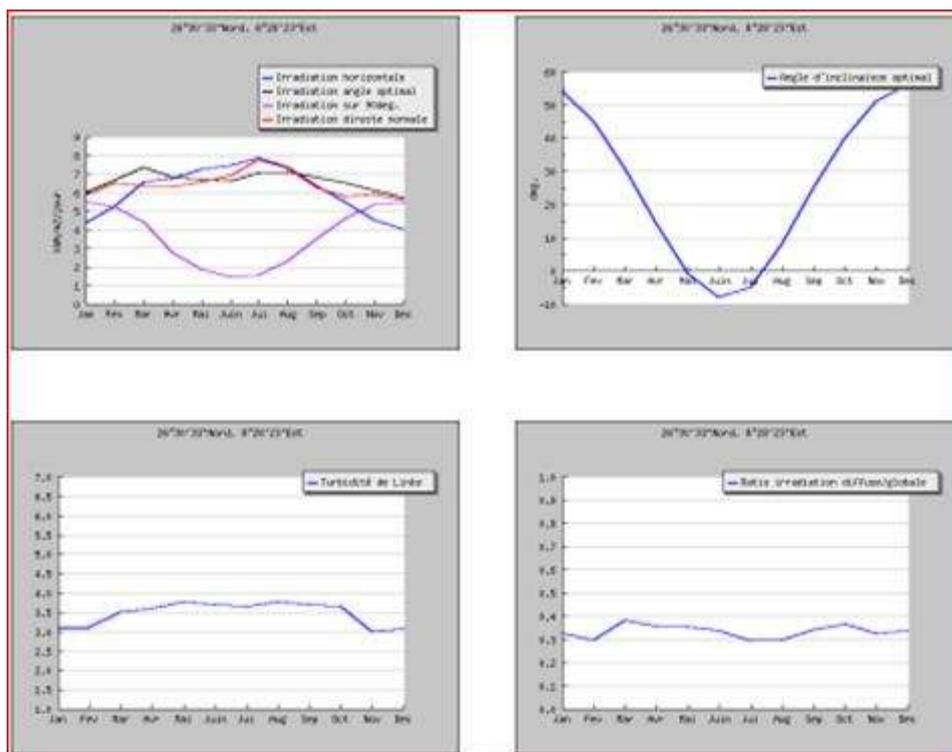


Figure 4.1 : Les informations concernant la radiométrie du site.

4.4 Bilan prévisionnel des consommations :

4.4.1 Besoins en électricité :

Les besoins en électricité s'expriment comme suit :

1. Eclairage 5 000 W
2. Equipements électriques 5 000 W
3. Equipements médicaux 10 000 W
4. Climatiseurs 16 000 W
5. Divers 4 000 W

Soit un total de 40 000 W ou 40 kWe.

4.4.2 Besoins en eau chaude :

Les besoins en eau chaude sanitaire sont estimés à 1000 l/jour.

4.4.3 Puissances appelées ou courbe de charge :

La courbe de charge typique d'un établissement de santé en milieu rural est habituellement composée d'une demande importante le matin et l'après-midi, et d'une

base. La base concerne généralement les premières heures du jour, mais peut parfois inclure une consommation nocturne. Dans bien des cas, la puissance pendant la journée est quatre à cinq fois plus élevée que la plus forte puissance appelée en période de base. La demande énergétique nocturne est assez limitée dans les zones rurales (ou même inexistante dans le cas des petits centres de santé) : la puissance appelée est donc d'ordinaire très basse la nuit, comparée à la journée. La figure suivante présente une courbe de charge type au site considéré.

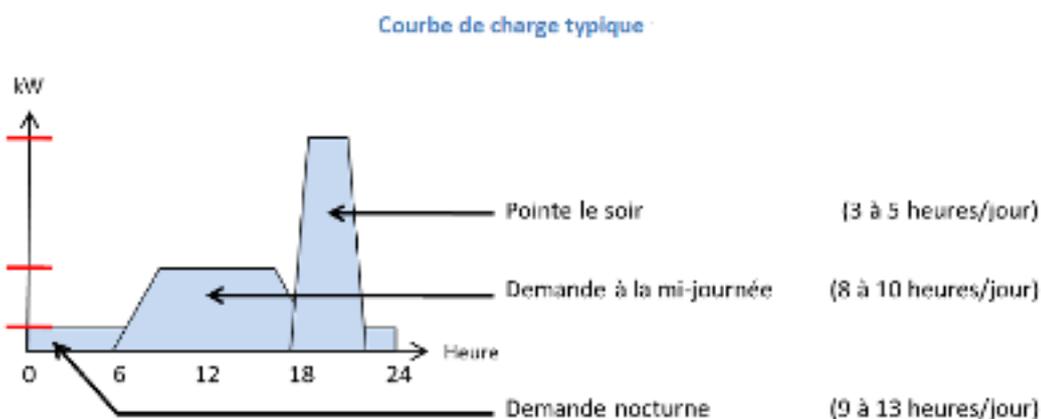


Figure 4.2 : courbe de charge type au site considéré.

4.5 Dimensionnement de l'installation :

Les établissements de santé sont de gros consommateurs en énergie. L'enjeu ici est de dimensionner un dispositif solaire pouvant fournir toute ou une grande partie des besoins énergétiques à un centre de santé situé dans un milieu aride et isolé près de la ville d'Illizi. Nous préconisons une solution solaire composée d'un champ de miroir de Fresnel, d'un absorbeur linéaire couplé à un moteur Ericsson.

4.5.1 Paramètres de dimensionnement :

Les paramètres de dimensionnement sont obtenus en moyennant sur une année type les performances de notre système.

- Eclairement annuelle moyen = $DNI/durée\ d'insolation = 2340/3200 = 731\ W/m^2$
- Puissance électrique produite = 40 kWe.
- Rendement optique du champ solaire = 55 %

- Rendement thermique du récepteur = 82 %
- Rendement du Moteur avec régénérateur = 42 %

Les rendements des échangeurs huile/air et air/eau sont fixés à 90% volontairement pour raison de simplicité.

4.5.2 Calcul de la surface du champ :

$A_{\text{champ}} = \text{Puissance de sortie} / (\text{DNI} \times \text{Rendement Global})$

Rendement global = Produit des rendements de chaque poste=
 $0,55 \times 0,82 \times 0,42 \times 0,9 \times 0,9 = 0,1534$ soit 15,34 %

$A_{\text{champ}} = 40000 / (731 \times 0,1534) = 357 \text{ m}^2$ nous prenons une surface de 360 m².

Puissance incidente = $A_{\text{champ}} \times E_d = 360 \times 731 = 263160 \text{ W} = 263,16 \text{ kW}$

Puissance Optique = $263,16 \times 0,55 = 144,7 \text{ kW}$

Puissance Thermique = $144,7 \times 0,82 = 118,7 \text{ kW}$

Puissance Thermique à l'entrée du moteur = $118,7 \times 0,9 = 106,8 \text{ kW}$

Puissance thermique moteur = $106,8 \times 0,42 = 44,87 \text{ kW}$

Puissance qui sert à produire de l'eau chaude = $44,87 - 40 = 4,87 \text{ kW}$

La durée moyenne annuelle du jour = $3200/365 = 8,8 \text{ h}$

L'énergie servant à produire de l'eau chaude $Q_{th} = 4,87 \times 8,8 = 42,85 \text{ kWh} = 15426 \text{ kJ}$

$$Q_{th} = m C_p \Delta T$$

Supposons que $\Delta T = (70 - 20) = 50$ on a :

$m = \frac{Q_{th}}{C_p \Delta T} = 740 \text{ l}$ d'eau à 70°C, pour se conformer avec le cahier des charges, on peut produire 1000 l à 57 °C.

L'énergie électrique pouvant être produite en une journée moyenne annuelle = $40 \times 8,8 = 352 \text{ kWh}$.

En conclusion, le dispositif dimensionné produit en une journée (moyenne annuelle) 352 kWh et 1000 litres d'eau chaude à 57 °C.

4.6 Présentation du logiciel 'Matlab/Simulink' :



Figure 4.3 : Page de démarrage du logiciel.

Le logiciel Matlab est un logiciel de manipulation de données numériques et de programmation dont le champ d'application est essentiellement les sciences appliquées. Son objectif, par rapport aux autres langages, est de simplifier au maximum la transcription en langage informatique d'un problème mathématique, en utilisant une écriture la plus proche possible du langage naturel scientifique. Le logiciel fonctionne sous Windows et sous Linux. Son interface de manipulation HMI utilise les ressources usuelles du multi-fenêtrage. Son apprentissage n'exige que la connaissance de quelques principes de base à partir desquels l'utilisation des fonctions évoluées est très intuitive grâce à l'aide intégrée aux fonctions. Une alternative à Matlab est Scilab, logiciel libre, dont la version 5 présente de nombreux points communs avec Matlab. De nombreuses entreprises (EDF, ...) ont fait le choix de passer sous Scilab. Le passage d'un logiciel à l'autre n'est cependant pas direct, certaines fonctions ayant des comportements différents (ce ne sont pas des erreurs mais des choix scientifiques différents). Tous les logiciels de calcul réutilisent des savoir-faire scientifiques anciens et éprouvés, développés dans les années 1960.

4.7 Modélisation :

Nous nous proposons dans cette partie de simuler notre système, Fresnel-Ericsson, pendant deux journées significatives de l'année. Il s'agit de la journée la plus **favorable** ou d'été et de la journée la plus **défavorable** ou d'hivers.

Les courbes de charge durant ces journées sont représentées par la figure suivante.

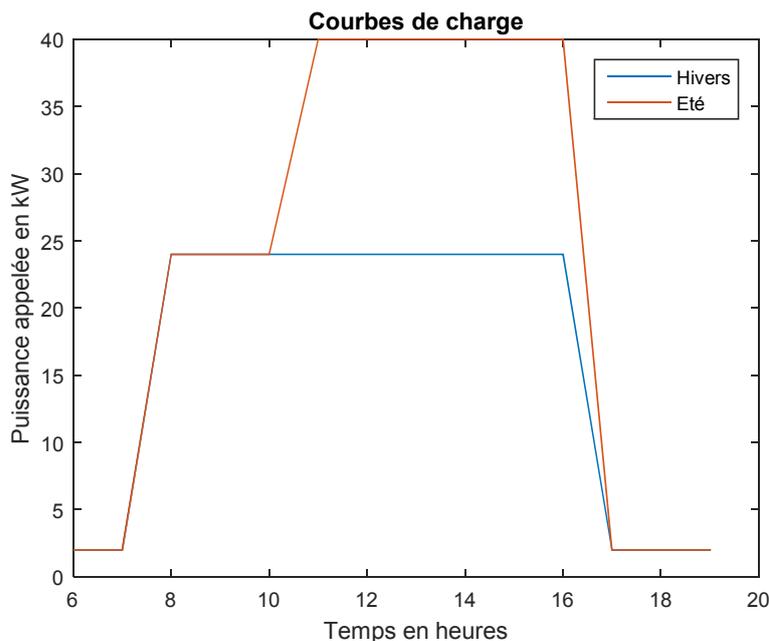


Figure 4.4 Courbes de charge durant les journées d'été et d'hiver.

Les journées de **22 Juillet** et de **01 Janvier** ont été choisies.

4.7.1 Journée 22 juillet

Tableau 4.2 : Les valeurs des températures maximales et les puissances en fonction du TSV pour une journée de 22 juillet

TSV (h)	DNI (W/m ²)	Tmax (k)	Puissance (kW)
6	104	375	9
7	312	390	13
8	523	427	23
9	710	485	33

10	856	558	44
11	949	638	53
12	980	718	59
13	949	790	64
14	856	851	68
15	710	901	71
16	523	939	72
17	312	965	73
18	104	980	74

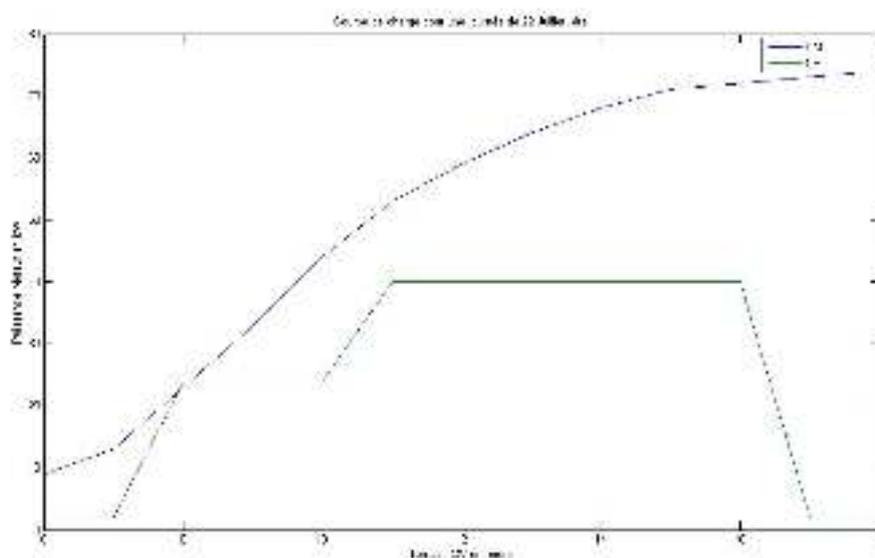


Figure 4.5 : Courbe de charge pour une journée de 22 juillet.

On remarque que pour cette journée, la demande des besoins énergétiques est très élevée. On note une croissance de puissance linéairement en fonction du temps, de 6h00 à 8h00 il y a pas encore trop d'appareils allumés, raison pour laquelle on obtient une puissance de 23kW mais qu'au de-là de 8h00 la consommation est très élevée et on observe une croissance de puissance jusqu'à 17h00.

4.7.2 Etude de la journée la plus défavorable soit Journée 01 Janvier

Tableau 4.3 : Les valeurs des températures maximales et les puissances en fonction du TSV pour une journée de 01 janvier

TSV (h)	DNI (W/m ²)	Tmax (k)	Puissance (kW)
7	11	99	8
8	153	106	10
9	315	127	16
10	450	158	23
11	537	192	30
12	567	223	35
13	537	248	39
14	450	265	41
15	315	277	43
16	153	283	43
17	11	286	44

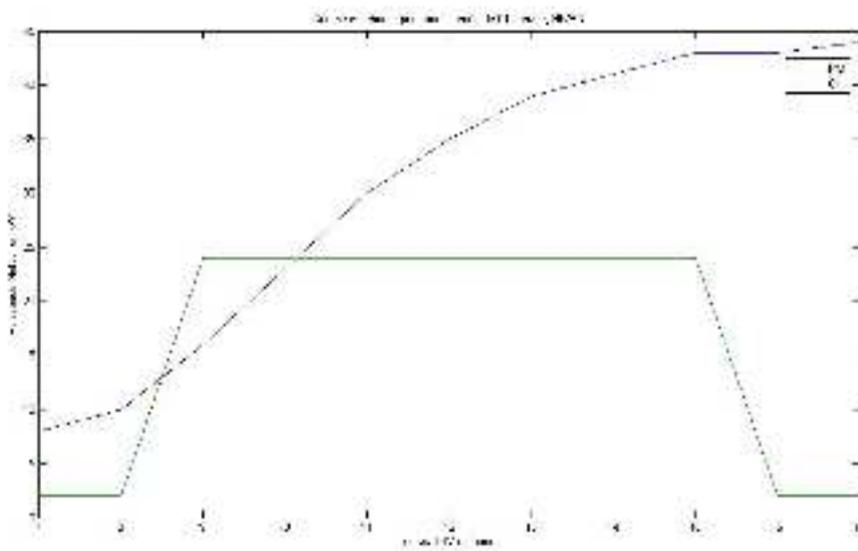


Figure 4.6: Courbe de charge pour une journée de 1 janvier

Pour celle-ci, on ne constate pas le même comportement par rapport à l'été, ici la demande énergétique est réduite à cause d'utilisation des certains appareils électriques. On note une très grande importance de la puissance pour une journée comme celle-ci.

La croissance est en fonction d'utilisation des appareils électriques, plus est l'utilisation des appareils plus grande devient la puissance.

4.8 Conclusion :

L'étude du cas montre l'importance du couplage d'un concentrateur de Fresnel et d'un moteur d'Ericsson pour la production de l'électricité et de l'eau chaude à un établissement de santé dans une région aride et désenclavée. Ce petit montage a montré la faisabilité technique de ce type d'application qui peuvent être une solution très adaptée à des régions très ensoleillées mais souffrant d'un tissu industriel important. Le dispositif proposé ne fait appel qu'à une technologie relativement accessible au pays en développement.

Chapitre 4
Etude des cas

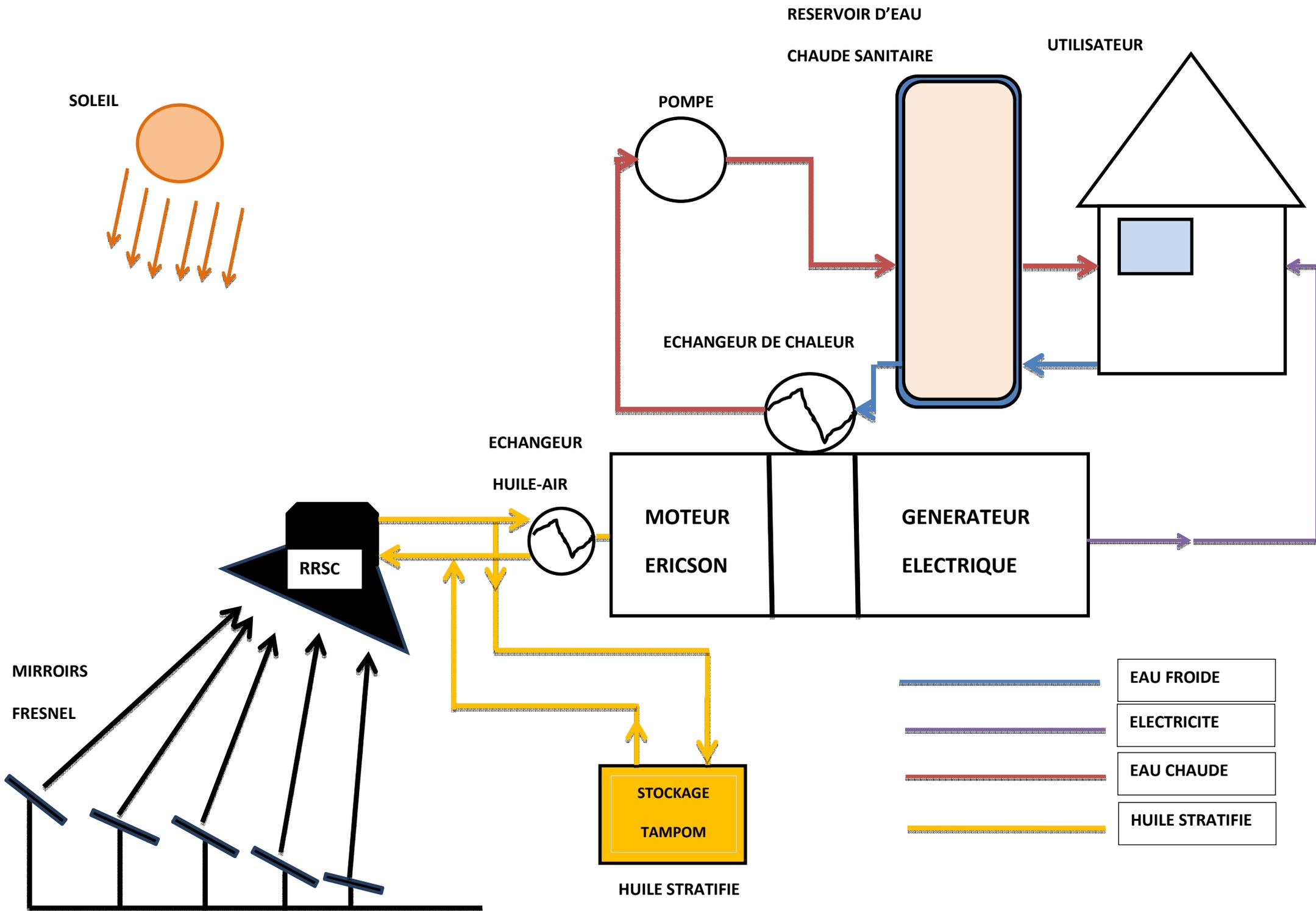
SOMMAIRE

LISTE DES TABLEAUX ET DES FIGURES	03
INTRODUCTION GENERALE	05
<u>Chapitre 1. Généralités sur l'énergie solaire</u>	07
1.1 Introduction.....	08
1.2 Les paramètres de position.....	08
1.2.1 Les coordonnées géographiques terrestres.....	08
a) Latitude φ	08
b) Longitude L.....	08
1.2.2 Les coordonnées horaires.....	09
a) La déclinaison solaire (δ).....	09
b) L'angle horaire (ω).....	10
1.2.3 Les coordonnées horizontales.....	10
a) Hauteur angulaire du soleil (h).....	10
b) L'Azimut du soleil (a).....	11
1.3 Les paramètres de temps.....	11
1.3.1 Le temps solaire vrai.....	11
1.3.2 Equation du temps.....	11
1.3.3 Durée du jour, décalage et fuseau horaire.....	12
1.4 L'éclairement solaire.....	13
1.4.1 Définition.....	13
1.4.2 Angle d'incidence.....	13
1.4.3 Estimation de l'éclairement solaire.....	14
1.5 Le rayonnement solaire.....	14
1.5.1 Le rayonnement solaire direct.....	16
1.5.2 Rayonnement solaire diffus.....	16
1.5.3 Le rayonnement solaire global.....	16
1.6 Masse Atmosphérique.....	18
1.7 Epaisseur Optique de l'Atmosphère.....	19
1.8 Modèle R. Sun.....	20
1.8.1 Facteur de trouble de Linke.....	20
1.8.2 Eclairement direct incident sur un plan horizontal par Ciel clair.....	20
1.8.3 Eclairement diffus incident sur un plan horizontal par ciel clair.....	20
1.8.4 Eclairement direct incident sur un plan incliné par ciel clair.....	21
1.8.5 Eclairement diffus incident sur un plan incliné par ciel clair.....	23
1.9 Conclusion.....	24
<u>Chapitre 2. Etat de L'art</u>	29
2 Introduction.....	29

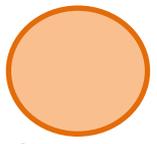
2.1 Miroir de Fresnel.....	29
2.1.1 Les systèmes à capteurs linéaires de Fresnel (CLFR).....	29
2.2 Principe de fonctionnement des miroirs de Fresnel.....	30
2.3 Premier Prototype de 2500m ² utilisant la technologie des miroirs de Fresnel.....	31
2.4 Position du miroir par rapport au temps solaire.....	31
2.4.1 Matin.....	31
2.4.2 Après midi.....	32
2.5 Avantages et Inconvénients.....	32
2.6 Le moteur Ericsson: Présentation et Modélisation.....	32
2.6.1 Introduction.....	32
2.6.2 Présentation et historique.....	33
2.7 État de l'art du moteur Ericsson.....	34
2.7.1 Travaux de recherche sur les moteurs à cycle théorique d'Ericsson.....	35
2.7.2 Travaux de recherche sur le moteur Ericsson à apport de chaleur externe, à cycle de Joule.....	36
2.8 Conclusion.....	37
<u>Chapitre 3. Modélisation Théorique</u>	40
3 Introduction.....	40
3.1 Les systèmes solaires à concentration.....	40
3.2 Modélisation du Concentrateur Fresnel.....	40
3.2.1 Hypothèses.....	41
3.3 Analyse optique.....	41
3.4 Les paramètres d'un miroir.....	42
3.4.1 La position.....	42
3.4.2 Le Décalage.....	42
3.4.3 L'angle d'inclinaison.....	42

3.4.4 La puissance Solaire Q_{SC}	44
3.5 Analyse thermique.....	44
3.5.1 Equation du Bilan Thermique.....	45
3.5.2 Calcul de la Puissance utile Q_u	46
3.5.3 Recalcul de la température moyenne de l'absorbeur T_p	46
3.5.4 Calcul de la Température moyenne du fluide T_f	46
3.6 Analyse paramétrique.....	47
3.7 Modélisation du Moteur Ericsson.....	56
3.7.1 Principe de fonctionnement du moteur Ericsson.....	56
3.7.2 Les quatre phases élémentaires.....	56
3.7.3 Premier mouvement : une aspiration d'air frais et une évacuation d'air chaud.....	56
3.7.4 Deuxième mouvement : compression de l'air frais, remplissage du cylindre inférieur puis détente de l'air chaud.....	56
3.7.5 Le diagramme Pression-Volume.....	57
3.8 Théorie du moteur Ericsson.....	58
3.8.1 Détermination du diamètre D_2	59
3.8.2 Calcul du travail effectué au cours d'un cycle.....	60
3.8.3 Rendement du cycle.....	62
3.8.4 Travail net récupéré.....	62
3.8.5 Energie calorifique fournie.....	62
3.8.6 Rendement du cycle.....	62
3.8.7 Rendement d'un moteur Ericsson avec un régénérateur.....	63
3.8.8 Avantages du moteur Ericsson.....	63
3.8.9 Inconvénients du moteur Ericsson.....	64
3.9 Simulation et discussion des résultats.....	64

3.10 Conclusion.....	70
Chapitre 4. Etude des Cas	71
4 Etude de Cas : Etablissement de santé.....	71
4.1 Introduction.....	71
4.2 Présentation et description du site.....	71
4.3 Le tableau et les figures ci-dessous donnent la radiométrie du site.....	72
4.3.1 Système d'information géographique photovoltaïque.....	72
4.4 Bilan prévisionnel des consommations.....	73
4.4.1 Besoins en électricité.....	73
4.4.2 Besoins en eau chaude.....	73
4.4.3 Puissances appelées ou courbe de charge.....	73
4.5 Dimensionnement de l'installation.....	74
4.5.1 Paramètres de dimensionnement.....	74
4.5.2 Calcul de la surface du champ.....	75
4.6 Présentation du logiciel 'Matlab/Simulink'	76
4.7 Modélisation.....	77
4.7.1 Journée 22 juillet.....	77
4.7.2 Etude de la journée la plus défavorable soit Journée 01 Janvier.....	79
4.8 Conclusion.....	80
CONCLUSION GENERALE	81
Références Bibliographiques	
Nomenclature et Abréviations	



SOLEIL



MIRROIRS

FRESNEL

RRSC

ECHANGEUR

HUILE-AIR

MOTEUR
ERICSON

GENERATEUR
ELECTRIQUE

STOCKAGE
TAMPOM

HUILE STRATIFIE

RESERVOIR D'EAU

CHAUDE SANITAIRE

UTILISATEUR

POMPE

ECHANGEUR DE CHALEUR

EAU FROIDE

ELECTRICITE

EAU CHAUDE

HUILE STRATIFIE

Référence

- [1]. J. Bernard, "Energie solaire calculs et optimisation", Ellipse Edition Marketing. (2004).
- [2]. J.A. Duffie, and J.W. Beckman, "Solar Engineering of Thermal Processes", 2nd edition, Inc, 1991
- [3]. <http://fr.wikipedia.org/wiki/soleil>
- [4]. Z. Sen. Solar energy fundamentals and modeling techniques, Springer. (2008)
- [5]. S.Saadi, effet des paramètres opérationnels sur performances d'un capteur solaire plan, 2010
- [6]. J. Bonal; P. Rossetti. Les énergies alternatives, Omniscience. (2007)
- [7]. D. K. Edwards. Capteurs solaires, Edition SCM, Paris. (1979)
- [8]. Abbas Mohamed, modélisation dynamique d'un système autonome de production d'électricité form du couplage d'un capteur solaire a concentration ponctuelle d'un moteur a cycle stirling, Blida, Novembre 2011.
- [9]. R. Bernard, G. Menguy, M. Schwartz, Le rayonnement solaire, conversion thermique et application. Technique et Documentation, Paris, 1979
- [10]. J.M. Chassériaux, Conversion thermique du rayonnement solaire, Bordas Paris. 1984
- [11]. B. Jennifer, Krvstal Roaers, Parabolic solar cookers, Campus Center For Appropriate technology Humboldt State University. 2002
- [12]. R. Benchrif, D. Zejli, A. Bennouna, Potentiel de l'introduction de la Technologie Dish /Stirling au Maroc, forum international sur les énergies Renouvelables 8-10 mai 2002, Tétouane-Maroc
- [13]. A.M. Patnode "Simulation and Performance Evaluation of Parabolic Trough Solar Power Plants ", Master of Science thesis, university of Wisconsin, (2006), USA
- [14]. Pierre GARCIA, "Outils d'évaluation technico-économique et d'aide à la conception des centrales solaires thermodynamiques du futur", Thèse de doctorat, université de Perpignan, 2007.
- [15]. R. Bernard, G. Menguy, M. Schwartz, Le rayonnement solaire, conversion thermique et application. Technique et Documentation, Paris, 1979
- [16]. Anne Labouret, Michel Viloz, Energie solaire photovoltaïque. Edition Dunod Paris, 2005.
- [17]. Retscreen, Photovoltaic Background, International Renewable energy decision support centre, Resources Canada 2001-2002.
- [18]. D.R. di Valdalbero : 'La recherche énergétique européenne : pont de coopération sur la Méditerranée'. Liaison Énergie-Francophonie, N°71 (Énergie et développement durable en Méditerranée), 2e Trimestre 2006, Pages 71-76.
- [19]. Y. Jannot, Cours de Transferts thermiques, Thermique solaire, Octobre 2003.
- [20]. M. Capderou. Atlas solaire de l'Algérie, O.P.U, Alger. (1985)

- [21]. A. Mefti; M, Y, bouroubi; H, Mimouni. Evaluation du potentiel énergétique solaire, Bulletin des Energies Renouvelables, N°2, p 12, décembre. (2002)
- [22]. M. Capderou, Atlas Solaire de l'Algérie, Tome1, vol1 et 2 : Modèles Théoriques et Expérimentaux, Office des Publications Universitaires, Algérie, 1987.
- [23]. F. Linke, Transmissions, Koeffizient and Trübungs faktor, Beiträge Zur Physik Der Atmosphäre, Vol. 10, pp. 91 - 103, 1922.
- [24]. L. Diabaté, J. Remund, L. Wald, Linke Turbidity Factors for Several Sites in Africa, Solar Energy, 75, 2003, 111-119.
- [25]. R. Dogniaux, L'influence de L'estimation du Facteur Total de Trouble Atmosphérique sur L'évaluation du Rayonnement Solaire Direct par Ciel Clair, Application aux Données Radiométriques de l'IRM à Uccle, Institut Royal Météorologique de Belgique (IRM), Miscellanea, Serie C, N_20, 1984.
- [26]. F. Yettou , A. Malek , M. Haddadi, et A. Gama, Etude Comparative De Deux Modèles De Calcul du Rayonnement Solaire Par Ciel Clair en Algérie , Revue des Energies Renouvelables Vol. 12 N_2 (2009) 331 - 346.
- [27]. M. Capderou, Atlas Solaire de l'Algérie, Tome1, vol1 et 2 : Modèles Théoriques et Expérimentaux, Office des Publications Universitaires, Algérie, 1987.
- [28]. B. Gschwind, L. Ménard, M. Albuison and L. Wald, Converting a Successful Research Project Into a Sustainable Service, The Case of the Soda Web Service, Environmental Modelling a Software, Vol, 21, N_11, pp, 1555 - 1561, 2006.
- [29]. E. R. Bird, R.L. Hulstrom, A Simplified Clear Sky Model for Direct and Diffuse Insulation on Horizontal Surfaces, Seri Tr -642-761 February 1981.
- [30]. J. Hofierka, M. Suri, The Solar Radiation Model for Open Source GIS: Implementation and Applications, Proceedings of the Open Source GIS - GRASS Users Conference 2002 - Trento, Italy, 11-13 September 2002.
- [31]. A. Ricaud, Gisement Solaire, Cythelia Sarl, Septembre 2009.
- [32]. E. Torlaschi, Phénomènes Radiatifs dans L'atmosphère Terrestre, cours de Physique de L'atmosphère, 2003.
- [33]. S.M.A. Bekkouche, Modélisation du Comportement Thermique de Quelques Dispositifs Solaires, Thèse de Doctorat en Physique Electronique, Université de Tlemcen., Mai 2009.
- [34]. R.G. MORGAN, D.R. MILLS, *Carrizo plain 177 MW project*, Proceeding of the 14th SolarPACES International Symposium, Las Vegas, USA, Mars 2008
- [35]. J. DERSCH, M. GEYER, U. HERRMANN, S. A. JONES, B. KELLY, R. KISTNER, W. ORTMANN, R. PITZ-PAAL, H. PRICE, *Trough integration into power plants - a study on the performance and economy of integrated solar combined cycle systems*, Energy 29, 947-959, 2004
- [36]. www.abengoasolar.com
- [37]. E. ZARZA, M. ESTHER ROJAS, L. GONZALES, J.M. CABALLERO, F. RUEDA, *INDITEP, The first pre-commercial DSG solar power plant*, Solar Energy 80, 1270-1276, 2006
- [38].
- [39]. [50] S. Bonnet, M. Alaphilippe, and P. Stou_s. Study of a small Ericsson
- [40]. engine for household micro_cogeneration.

- [41]. [51] P. Stou_s, M. Tazerout, and P. Wauters. Thermodynamic analysis of reciprocating compressors. *Int. J. Therm. Sci.*, 40 :52_66, 2001.
- [42]. [52] Si-Ying Sun and Ting-Rong Ren. New method of thermodynamic for a reciprocating compressor : computer simulation of working process. *Int. J. Mech. Sci.*, 37, N_4 :343_353, 1995.
- [43]. [53] J.A. McCovern and S. Harte. An exergy method for compressor performance analysis. *Int. J. Refrig.*, 18, N_6 :421_433, 1995.
- [44]. [1] Negi B S, Mathur S S, et Kandpal T C. 1989 "Optical and thermal performance evaluation of linear Fresnel reflector solar concentrator". *Solar and Wind Technology*, Volume 6, page 589-593
- [45]. [2] Bliss R et Whillier. 1959 "The derivation of several, plate efficiency factors, useful in the design of the flat plat solar heat collector". *Solar Energy*. Vol 4. Pages 55-64
- [46]. [3] Panna L S, Sarvia R M et Bhagoria J L 2009. "Thermal performace of linear Fresnel reflecting solar concentrator with trapezoidal cavity absorbers". *Applied Energy*, Volum 87, Pages 541-550
- [47]. [4] S. Flores Larsen, M. Altamirano, A. Hernández 2011 "Heat loss of a trapezoidal cavity absorber for a linear Fresnel reflecting solar concentrator", *Volum 39*, Pages 198 -206
- [48]. [5] Site web [http //www.Novatec_solaire.com](http://www.Novatec_solaire.com). Consulté en Juin 2012
- [49]. [6] Site web [http //www.Nrel.Gov/Analysis/Sam](http://www.Nrel.Gov/Analysis/Sam). Consulté en Juin 2012
- [50]. [7] Décret exécutif n° 04-92 du 4 Safar 1425 correspondant au 25 mars 2004 relatif aux coûts de diversification de la production d'électricité. Ministère de l'énergie et des mines, mars 2004

Nomenclature et Abréviation

Abréviation

description

ASA	Agence Spatiale Allemande
(CLFR)	capteurs linéaires de Fresnel
ISCC	System: International Sustainability & Carbon Certification
LATEP	Laboratoire de Thermique, Energétique et Procédés
SEGS	Solar Electricity Generating Systems
CCP	Collecteur cylindro-parabolique
PT	Parabolic Trough
PTC	Parabolic Trough Concentrator
RRSC	Récepteur de Rayonnement Solaire Concentré

Nomenclature:

L	: La longitude d'un lieu.....[degrés]
φ	: La latitude d'un lieu.....[degrés]
δ	: La déclinaison du soleil.....[degrés]
n	: Nombre de jours écoulés depuis le premier Janvier.
ω	: L'angle horaire ω du soleil.....[degrés]
TSV	: est le temps solaire vrai exprimé en heure.....[heure]
TL	: Le temps solaire local.....[heure]
Dj	:Durée de jour.....[heure]
TS	: est le temps solaire[heure]
ET	:Equation du temps.....[minutes]
Δt	: Ecart entre le temps solaire vrai et le temps solaire local.....[minutes]
B	: Facteur en relation avec le nombre de jours.
h	: La hauteur du soleil.....[degrés]
α	: L'angle d'azimut.....[degrés]
θ	: L'angle d'incidence.....[degrés]
I_0	: La constante solaire.....[W/m ²]

I : rayonnement solaire global[W/m²]
 L_{std} : Longitude standard servant de référence au temps légal[degrés]
 C : le décalage horaire par rapport au méridien de Greenwich.....[heure]
 DNI : Rayonnement solaire direct[Wh/m²]
 c_p : Chaleur spécifique[J/Kg]
 \dot{m} : Flux massique[Kg/s]
 T_{pm} : Température moyenne d'absorbeur[°K]
 R_D : Rayonnement direct[W/m²]
 B_{oc} : Eclairement direct incident sur un plan horizontal par Ciel clair.....[Wm²]
 D_{hc} : Eclairement diffus incident sur un plan horizontal par ciel clair.....[Wm⁻²]
 B_{ic} : Eclairement direct incident sur un plan incliné par ciel clair.....[Wm⁻²]

Liste des Tableaux

Tableau 3.1 : Les valeurs des températures et les rendements en fonction du TSV pour une journée de 352.

Tableau 3.2 : Les valeurs des températures et les rendements en fonction du TSV pour une journée de 77.

Tableau 3.3: Les valeurs des températures et les rendements en fonction du TSV pour une journée de 202.

Tableau 3.4: Les valeurs des températures et les rendements en fonction du TSV pour une journée de 262.

Tableau 3.5: Les valeurs des Températures maximales, Puissance et les rendements du moteur en fonction du TSV pour une journée de 352.

Tableau 3.6: Les valeurs des Températures maximales, Puissance et les rendements du moteur en fonction du TSV pour une journée de 77.

Tableau 3.7: Les valeurs des Températures maximales, Puissance et les rendements du moteur en fonction du TSV pour une journée de 202.

Tableau 3.8: Les valeurs des Températures maximales, Puissance et les rendements du moteur en fonction du TSV pour une journée de 262.

Tableau 4.1 : Les informations concernant la radiométrie du site.

Tableau 4.2 : Les valeurs des températures maximales et les puissances en fonction du TSV pour une journée de 22 juillet.

Tableau 4.3 : Les valeurs des températures maximales et les puissances en fonction du TSV pour une journée de 01 janvier

Figure 3.5 : Distribution de l'Eclairement pour une journée 77.

Figure 3.6 : Effet sur la Température de sortie et le Rendement pour une journée 77.

Figure 3.7 : Distribution de l'Eclairement pour une journée 202

Figure 3.8 : Effet sur la Température de sortie et le Rendement pour une journée 202

Figure 3.9 : Distribution de l'Eclairement pour une journée 262

Figure 3.10 : Effet sur la Température de sortie et le Rendement pour une journée 262

figure 3.11 : Diagramme **Pression-Volume** représentant le cycle thermodynamique

Figure 3.12 : Les dimensions permettant de calculer un moteur Ericsson

Figure 3.13 : Le diagramme PV du moteur Ericsson

Figure 3.14: Effet sur la Puissance du Moteur et le Rendement pour une journée 352

Figure 3.15: Effet sur la Puissance du Moteur et le Rendement pour une journée 77.

Figure 3.16: Effet sur la Puissance du Moteur et le Rendement pour une journée 202.

Figure 3.17: Effet sur la Puissance du Moteur et le Rendement pour une journée 262.

Figure 4.1 : Les informations concernant la radiométrie du site.

Figure 4.2 : courbe de charge type au site considéré.

Figure 4.3 : Page de démarrage du logiciel

Figure 4.5 : Courbe de charge pour une journée de 22 juillet

Figure 4.6: Courbe de charge pour une journée de 1 janvier

Conclusion générale

Les recours aux énergies renouvelables, comme alternatives aux énergies fossiles et nucléaires, est incontournable, surtout en terme de disponibilité et d'inépuisabilité, mais toujours soient ils nécessitent encore plus d'encouragement et de développement, pour arriver à produire de l'énergie électrique à l'échelle économique.

Parmi les sources d'énergie renouvelables, l'énergie solaire se présente comme étant facilement exploitable. Des centrales solaires thermodynamiques sont mises en œuvre partout dans le monde, ce qui montre une politique sérieuse envers les énergies renouvelables.

Dans notre mémoire, une étude des performances d'un mini central à miroir de Fresnel a fut l'objectif de notre travail.

Pour cela, nous avons consacré notre étude à modéliser et simuler le mini central solaire.

Dans le chapitre 1, une description détaillée concernant les généralités sur l'énergie solaire, son origine, l'éclairement solaire et quelques détails concernant le modèle de R-SUN.

Dans le chapitre 2, nous avons détaillées un peu plus l'état de l'art du concentrateur de Fresnel et du moteur Ericsson, nous avons montré quelques travaux qui ont été déjà fait, un bref historique concernant le moteur Ericsson.

Dans le chapitre 3, une modélisation théorique a été établie. Etant donné que la centrale se compose d'un champ de capteurs solaires de Fresnel relié à un moteur Ericsson. Ces deux derniers ont été bel et bien modélisés.

Le champ solaire modélisé est le modèle de R-SUN qui est le même modèle intégré dans le logiciel MATLAB.

Le logiciel de simulation MATLAB est l'un des meilleurs logiciels dans le domaine des centrales solaires, c'est pour cela il nous a servi comme outil de simulation pour notre système et bien sur une présentation de ce logiciel a été incluse dans le mémoire.

Pour notre simulation nous avons choisis le site d'IIIizi qui se situe au **sud ouest de l'Algérie**, les données météorologiques de ce site ont été générées par le **système d'information géographique**.

La simulation a été réalisée pour deux journées de l'année, c'est-à-dire : Il s'agit de la journée la plus **favorable** ou d'été (22 Juillet) et de la journée la plus **défavorable** ou d'hivers (01 Janvier).

La simulation a été basée sur les performances de la centrale :

1. L'influence du rayonnement direct sur la quantité de chaleur absorbée par le fluide caloporteur.
2. Le rendement du champ solaire.

3. La variation de la quantité de chaleur stockée en fonction du rayonnement direct.
4. L'influence de l'ensoleillement sur la puissance électrique produite.
5. Le rendement global de la centrale.

Les courbes et les résultats obtenus ont été interprétés et commentés.

Nous avons prouvé que la journée d'été apporte une nette amélioration des performances du mini central à miroir de Fresnel en termes de production électrique et d'eau chaude. Elle assure la continuité de la production électrique pendant la nuit.

En conclusion, on peut dire que les mini centrales à miroir de Fresnel ont des bonnes performances pour le site choisi et assurent plusieurs heures de production électrique en continu.

Conclusion Générale

3 Introduction:

Dans ce chapitre nous allons modéliser un mini central solaire à miroir de Fresnel couplée à un moteur Ericsson dans un premier temps, nous allons modéliser le concentrateur de Fresnel. Dans cette étude, nous nous intéressons à l'effet des paramètres de conception sur les performances thermiques d'un capteur solaire avec effet de concentration de type Fresnel, finaliser avec l'étude théorique et interpréter les résultats, notamment l'évolution du rendement thermique et de la température de sorties.

L'objectif de ce travail est de mettre en évidence les performances d'un capteur solaire de la famille des collecteurs solaires à conversion thermodynamique de l'énergie solaire, cette technologie récente qui a vu un développement rapide par les chercheurs du monde entier.

Dans un deuxième temps, nous allons modéliser le moteur Ericsson, voir son principe de fonctionnement, sa théorie et les dimensions permettant de calculer le moteur. A la fin, nous allons terminer la simuler et discuter ses résultats.

3.1 Les systèmes solaires à concentration

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 500 °C et le rendement de conversion est élevé généralement. On exploite seulement le rayonnement solaire direct, considéré comme la ressource principale.

Dans cette étude, nous nous intéressons à l'effet des paramètres de conception sur les performances thermiques d'un capteur solaire avec effet de concentration de type Fresnel, notamment l'évolution du rendement thermique et de la température de sorties.

L'objectif de ce travail est de mettre en évidence les performances d'un capteur solaire de la famille des collecteurs solaires à conversion thermodynamique de l'énergie solaire, cette technologie récente qui a vu un développement rapide par les chercheurs du monde entier.

3.2 Modélisation du Concentrateur Fresnel

Pour bien détailler la théorie de conception du concentrateur Fresnel, nous avons suivi le travail réalisé par les auteurs [1,2], qui ont développé les équations en considérant certaines hypothèses essentielles pour déterminer l'énergie solaire concentrée, le taux de concentration et bien évidemment tous les détails de conception.

3.2.1 Hypothèses :

1. Le concentrateur est parfaitement orienté de manière à suivre le mouvement apparent du soleil d'Est en Ouest,
2. Les éléments de miroirs sont à réflexion spéculaire,
3. Les rayonnements solaires sont incidents perpendiculairement sur les miroirs.

La figure (3.1) montre le schéma de principe en coupe linéaire d'un capteur Fresnel avec un système de réflecteur et absorbeur en forme de cavité ; dont la largeur (w) est constante pour chaque miroir constituant. L'inclinaison de chaque miroir a été calculée de telle sorte que le rayonnement solaire soit incident sur le plan d'ouverture. D'autre part, une distance appropriée a été maintenue entre deux miroirs consécutifs pour que chaque miroir ne manifeste pas d'effet d'ombrage par rapport au miroir adjacent. Chaque miroir (n) peut être caractérisé par trois paramètres, à savoir, l'emplacement (Q_n), l'inclinaison (θ_n), et le décalage entre deux miroirs adjacents (S_n) comme illustré ci-dessous. Les expressions suivantes ont été utilisées pour obtenir ces paramètres en utilisant de simples relations géométriques optiques.

3.3 Analyse optique

Le dispositif présenté d'après la figure (2.1) montre le schéma de principe en coupe linéaire d'un capteur de Fresnel avec un système réflecteur et absorbeur de forme de cavité, dont la largeur (W) est constante pour chaque miroir.

L'inclinaison de chaque miroir a été calculée de telle sorte que le rayonnement solaire soit incident sur le plan s'ouverture.

D'autre part, une distance appropriée a été maintenue entre deux miroirs consécutifs pour que chaque miroir ne fasse pas d'ombre par rapport au miroir adjacent. En effet tous ces paramètres ont été calculés à l'aide des équations (3.3) et (3.2).

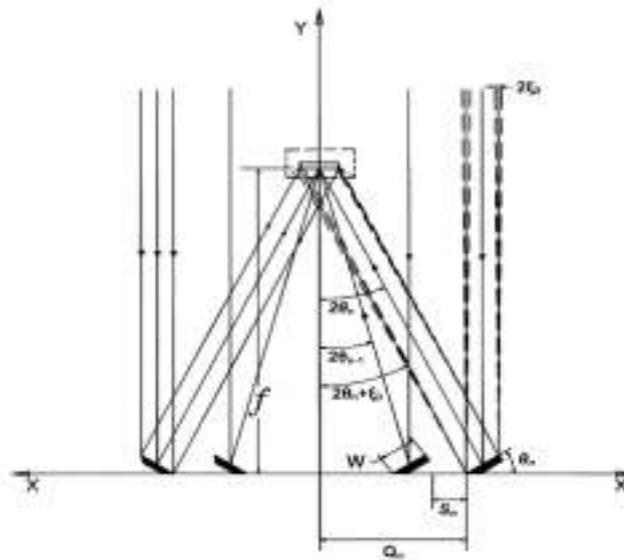


Figure 3.1 : Schéma d'un capteur solaire Fresnel avec absorbeur en forme de cavité. [3,4]

3.4 Les paramètres d'un miroir :

3.4.1 La position

$$S_n = W * \sin(\theta_{n-1}) * \tan(2\theta_n + \xi_o) \quad (3.1)$$

3.4.2 Le Décalage

$$Q_n = Q_{n-1} + W * \cos(\theta_{n-1}) + S_n \quad (3.2)$$

3.4.3 L'angle d'inclinaison

$$\theta_n = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left[\frac{\{Q_n + (W/2) \cdot \cos\theta_{n-1}\}}{\left\{f - \left(\frac{W}{2}\right) \cdot \sin\theta_{n-1}\right\}} \right] \quad (3.3)$$

Avec :

W : Est la largeur de chaque miroir plan

ξ_o : La moitié de l'angle apparent du soleil en un point quelconque sur la terre [8,18], égale à $16' = 0.26^\circ$.

f: Est la distance entre l'absorbeur jusqu'au miroir central.

Des valeurs initiales des différents paramètres de conception sont données *Mathur* [18]:

$$\theta_o = 0, S_1 = 0, Q_o = -\frac{W}{2}, Q_1 = \frac{W}{2}$$

Où : $n= 1,2,\dots,m$, avec m est le nombre des miroirs placé dans chaque côté de la moitié du capteur .Pour positionnerles miroirs dans la structure du concentrateur de Fresnel il faut résoudre les équations ci-dessus et calculer les paramètres comme la position (Q), l'inclinaison θ et la distance entre miroirs (S) du miroir primaire centrale jusqu'au dernier miroir.

Si le nombre de miroirs est paire alors: $n= (n-1)/2$ si non $n=n/2$.

Le taux de concentration (CR) du collecteur Fresnel expérimentale a été obtenu en additionnant la contribution de concentration des (n) miroirs (Cl_n) donnée par les expressions suivantes:

$$CR = 2 \sum_{n=1}^{n=m} Cl_n \quad (3.4)$$

$$Cl_n = \frac{W * \cos \theta_n}{U_n + D_n + I_n} \quad (3.5)$$

Où, les valeurs des rayons solaires réfléchis sur l'absorbeur U_n , D_n , et I_n sont calculés par les expressions suivantes:

$$U_n = \frac{(f - W \sin \theta_n) * \sec 2\theta * \sin \xi_o}{\cos (2\theta_n - \xi_o)} \quad (3.6)$$

$$D_n = W * \cos \theta_n \sec 2\theta \quad (3.7)$$

$$I_n = \frac{f * \sec 2\theta_n * \sin \xi}{\cos (2\theta_n - \xi_o)} \quad (3.8)$$

Remarque : $\sec(a) = 1/\cos(a)$; La sécante de (a) notée $\sec(a)$, c'est l'inverse du cosinus de (a), $1/\cos(a)$, c'est-à-dire que, le rapport de la longueur de l'hypoténuse par la longueur du côté adjacent.

Alors avec l'aide des équations de (3.4)-(3.8) nous pouvons estimer le taux de concentration (CR) du collecteur de Fresnel pour différents jeux des miroirs réfléchissants.

3.4.4 La puissance Solaire Q_{SC}

Le rayonnement solaire incident absorbé par l'absorbeur est calculé avec l'équation suivante:

$$Q_{SC} = (\tau\alpha)I_b\rho_o\gamma \quad (3.9)$$

Où γ est le facteur de forme en raison de l'orientation inexacte du concentrateur (dans notre cas est supposé proche de 1, cas idéal).

3.5 Analyse thermique :

Les approches mathématiques adoptées sont basés sur les méthodes de modélisation des capteurs solaires plans, la seule différence réside à la concentration du rayonnement solaire par un jeu de plusieurs miroirs *figure (3.2)*.

L'objectif principal de notre étude sera consacré à la détermination des performances thermiques, plusieurs modèles qui décrivent le comportement thermique des paramètres de performances, tel que le rendement thermique, l'écart de température entre l'entrée et la sortie du conduit, le coefficient global d'échange en fonction du nombre de Reynolds et le débit massique ou volumique de l'air caloporteur seront adoptés.



Figure 3.2: Capteur solaire avec effet de concentration avec miroirs de Fresnel.

3.5.1 Equation du Bilan Thermique

Cette méthode globale a été élaborée par **Hottel, Whillier et Bliss (1955-1959)**[20], elle ne prend pas en considération des effets de l'inertie thermique, elle suppose que le régime est quasi-permanent et que les éléments de l'absorbeur se trouvent chacun à une température moyenne constante.

Pour la modélisation des performances, on a recourt à cette méthode pour décrire globalement les comportements thermiques et des paramètres de performances du conduit absorbeur considéré, puisque, où la variation de la température à l'entrée du capteur est faible, d'autre part les performances sont instantanées.

En introduisant le coefficient global des pertes thermiques de l'absorbeur vers l'ambiance U_L , l'expression de la puissance utile apportée par l'air à la sortie du conduit s'écrit comme suit :

$$P_u = A Q_u = A [(\tau_v \alpha_p \rho \gamma I_g C R - U_L (T_f - T_a))] \quad (3.10)$$

En fait, la condition $T_f = T_p$ n'est jamais satisfaite, on est donc amené à définir un coefficient d'efficacité local qui caractérise de transfert le transfert thermique entre l'air et l'absorbeur noté « F' », qui représente le rapport de la puissance utile à la puissance récupérée par l'absorbeur lorsque la température de l'absorbeur est précisément celle du fluide, ce coefficient serait désigné par le rapport suivant :

$$F' = \frac{\tau_v \alpha_p \rho \gamma I_g C R - U_L (T_p - T_a)}{\tau_v \alpha_p \rho \gamma I_g C R - U_L (T_f - T_a)} \quad (3.11)$$

Par conséquent la puissance utile véhiculée par le fluide serait :

$$P_u = A F' [(\tau_v \alpha_p \rho \gamma I_g C R - U_L (T_f - T_a))] \quad (3.12)$$

En introduisant le débit massique $\dot{m} = \rho V_f$, l'équation de la chaleur s'écrit comme suit :

$$\dot{m} C_p \frac{\partial T_f}{\partial x} = l F' [(\tau_v \alpha_p \rho \gamma I_g C R - U_L (T_f - T_a))] \quad (3.13)$$

Il est pratique d'exprimer la puissance utile en termes de conditions d'entrée, en définissant un autre coefficient global de transfert par la relation suivante :

$$F_R = \frac{\tau_v \alpha_p \rho \gamma I_g C R - U_L (T_p - T_a)}{\tau_v \alpha_p \rho \gamma I_g C R - U_L (T_{fe} - T_a)} \quad (3.14)$$

En définit le débit massique par m^2 de surface de captation de l'absorbeur :

$$H_c = \frac{\dot{m}}{l \times L} \quad (3.15)$$

La puissance Q_u récupérée par le fluide par m^2 de surface de l'absorbeur deviendra alors :

$$Q_u = F_R [\tau_v \alpha_p \rho \gamma I_g CR - U_L (T_{fe} - T_a)] \quad (3.16)$$

Avec :

$$F_R = \frac{H_c Cp}{U_L} \left(1 - \exp\left(\frac{F' U_L}{H_c Cp}\right) \right) \quad (3.17)$$

En introduisant la surface A de l'absorbeur, le coefficient F_R s'écrit :

$$F_R = \frac{\dot{m} Cp}{AU_L} \left(1 - \exp\left(\frac{F' U_L A}{\dot{m} Cp}\right) \right) \quad (3.18)$$

3.5.2 Calcul de la Puissance utile Q_u

L'énergie thermique utile fournie par l'absorbeur est décrite par la relation suivante :

$$Q_u = F_R [\tau_v \alpha_p \rho \gamma I_g CR - U_L (T_{fe} - T_a)] \quad (3.19)$$

3.5.3 Recalcul de la température moyenne de l'absorbeur T_p

L'équation suivante nous permet de calculé la température moyenne de l'absorbeur(1) :

$$T_{pm} = T_{fe} + \frac{Q_u}{F_R U_L} (1 - F_R) \quad (3.20)$$

3.5.4 Calcul de la Température moyenne du fluide T_f

$$T_f = T_{fe} + \frac{Q_u}{F_R U_L} \left(1 - \frac{F_R}{F'} \right) \quad (3.21)$$

3.5.5 Rendement thermique du concentrateur solaire η_{th}

Le rendement thermique du concentrateur solaire représente le rapport de la puissance utile à la puissance incidente reçu par la surface active du concentrateur solaire, qui est exprimé

par le rapport de la puissance utile à l'énergie solaire concentrée par les miroirs du concentrateur :

$$\eta_{th} = \frac{Q_u}{(\tau_v \alpha_p \rho \gamma I_g CR) \times S_{captation}} \quad (3.21)$$

Avec :

$S_{captation}$: C'est la surface d'ouverture moins la surface de l'absorbeur.

3.6 Analyse paramétrique :

Sur la base des équations citées précédemment, nous avons établi un programme informatique sous l'environnement Matlab permettant l'évaluation optique et thermique du concentrateur de Fresnel et facilitant ainsi une étude paramétrique de sensibilité.

Nous avons ainsi caractérisé notre concentrateur pour le site de Blida pour plusieurs journées de l'année et pour différentes orientations des miroirs à savoir l'orientation Est-Ouest et l'orientation Nord-Sud.

Quatre journées types ont été retenues pour l'analyse paramétrique, il s'agit des journées du 18 mars, du 21 juillet, du 11 septembre et du 18 décembre correspondant aux numéros du jour 77, 202, 262 et 352 respectivement. Pour chaque jour sont évaluées les distributions des éclairagements obtenus à partir du modèle r.sun et les variations instantanées des températures de sortie collecteur et des rendements.

Cas de la journée du 18 décembre :

Le tableau 3.1 reprend les valeurs des éclairagements directs, des températures de sorties ainsi que des rendements instantanés pour les deux types possibles d'orientation du concentrateur.

Tableau 3.1 : Les valeurs des températures et les rendements en fonction du TSV pour une journée de 352

TSV	Eclairement	Températures		Rendements	
		Est-Ouest	Nord-Sud	Est-Ouest	Nord-Sud
8	58	374	375	0.4	0.4
9	176	385	385	0.5	0.5
10	282	403	398	0.5	0.5
11	353	425	414	0.5	0.5
12	378	443	430	0.5	0.5
13	353	456	445	0.5	0.5
14	282	464	460	0.5	0.5
15	176	470	468	0.5	0.5
16	58	470	471	0.4	0.4

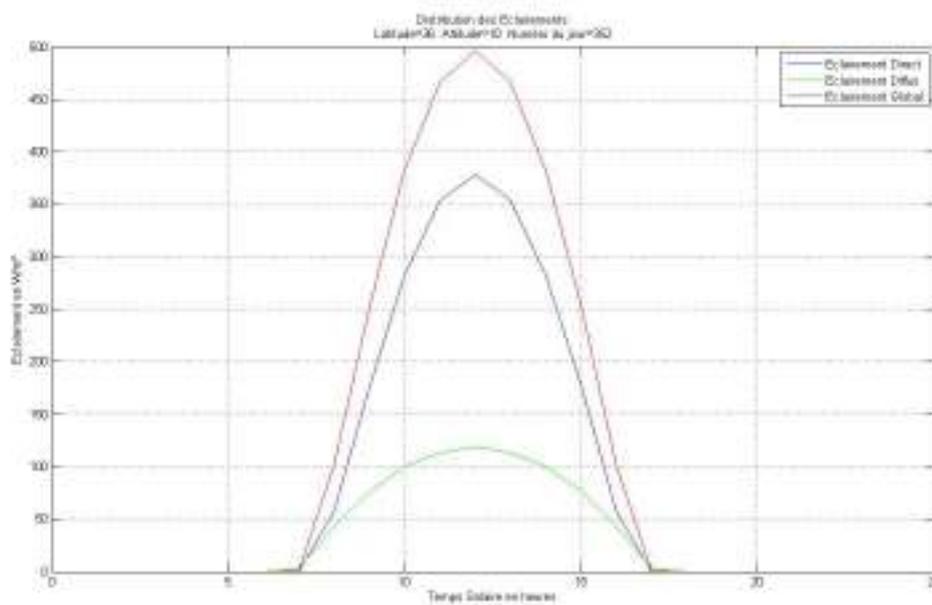


Figure 3.3 : Distribution de l'Eclairement pour une journée 352.

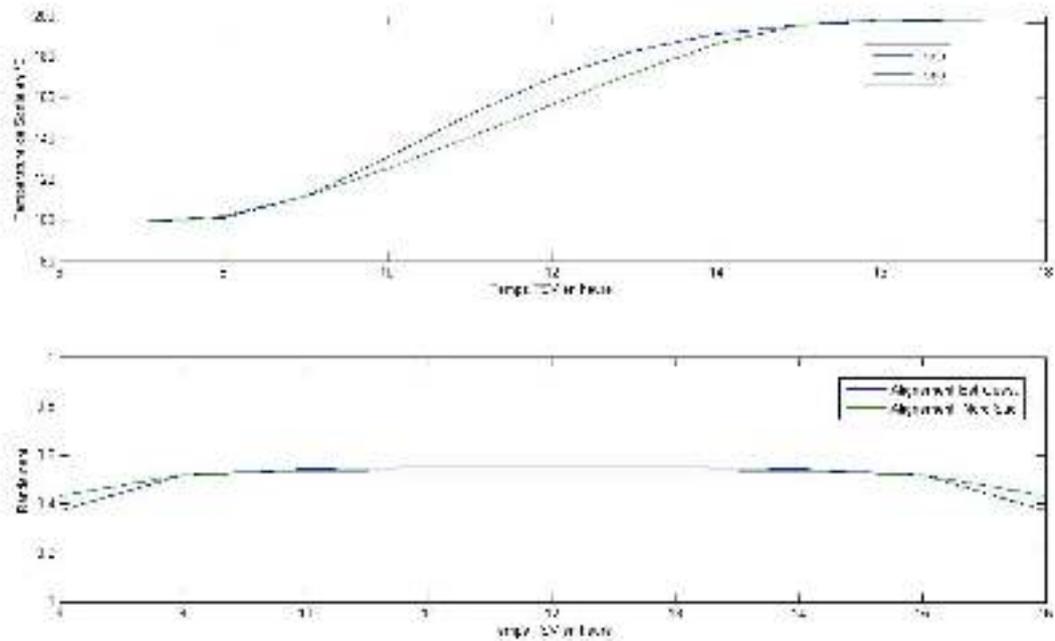


Figure 3.4 : Effet sur la Température de sortie et le Rendement pour une journée 352

Températures.

Au départ nous constatons que les températures varient proportionnellement au cours du temps, cette variation est linéaire et croissante jusqu'à la température de 190°C, cela due à :

1. La valeur très importante de l'intensité solaire qui a été 353 W/m² à 11h00 du matin et atteint à 12h00 la valeur maximale de 378 W/m².
2. Une surface collectrice de 50m² (bonne concentration) nous a aidés à obtenir ces résultats.

Après la valeur de 190°C, la variation de la température devienne réduite, la température maximale ne dépasse pas la valeur 190°C quelque soit le temps d'exposition, cela signifie que nous avons atteint l'état de stagnation à 190°C. De cette valeur on ne passe plus, cela est dû aux pertes thermiques qu'égalise l'énergie incidente.

Rendements :

On constate au départ, à 08h00 jusqu'à 09h00 que le **rendement Nord Sud** est plus fort que le **rendement Est Ouest**, ensuite de 10h00 jusqu'à 14h00 **l'alignement Est Ouest** devient plus importante que **l'alignement Nord Sud**. A la fin, les deux commencent à décroître avec l'avantage du **rendement Nord Sud**. Cela est dû à cause d'angle d'incidence.

Cas de la journée du 18 mars :

Tableau 3.2 : Les valeurs des températures et les rendements en fonction du TSV pour une journée de 77

		Températures		Rendements	
TSV	Eclaircement	Est-Ouest	Nord-Sud	Est-Ouest	Nord-Sud
7	107	376	380	0.4	0.5
8	277	392	397	0.5	0.5
9	440	422	422	0.5	0.5
10	571	461	451	0.5	0.5
11	655	500	480	0.5	0.5
12	684	534	509	0.5	0.5
13	655	560	539	0.5	0.5
14	571	578	567	0.5	0.5
15	440	593	592	0.5	0.5
16	277	604	610	0.5	0.5
17	107	612	616	0.4	0.5

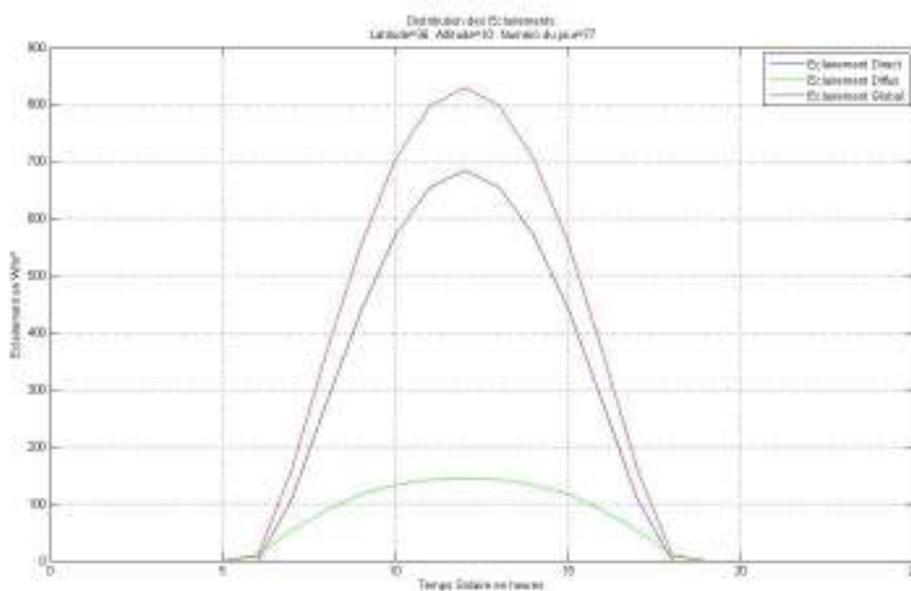


Figure 3.5 : Distribution de l'Eclaircement pour une journée 77.

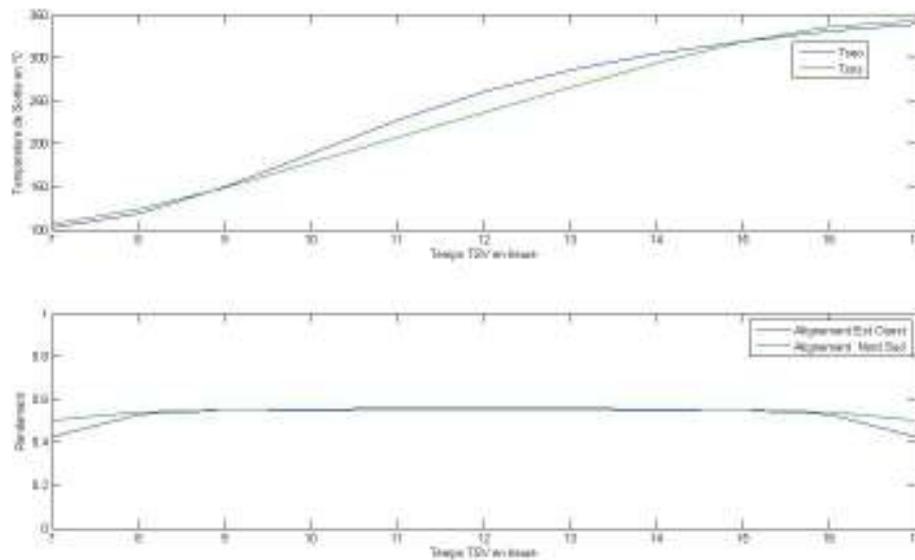


Figure 3.6 : Effet sur la Température de sortie et le Rendement pour une journée 77.

Températures :

Pour cette journée, nous constatons qu'à 07h00 les températures sont déjà à 100°C pour un éclairage de 107W/m^2 , alors que quand il atteint 683W/m^2 à 12h00 pour les deux températures ne cessent de monter jusqu'à atteindre un maximum de 339°C / 340°C.

Rendements :

Nous remarquons que pour **l'alignement Nord Sud**, l'importance du rendement est très grande. A 07h00, on commence déjà à obtenir de bons résultats, puis il devienne un palier comme pour **l'alignement Est Ouest**.

Cas de la journée du 21 juillet :

Tableau 3.3: Les valeurs des températures et les rendements en fonction du TSV pour une journée de 202

TSV	Eclaircement	Températures		Rendements	
		Est-Ouest	Nord-Sud	Est-Ouest	Nord-Sud
5	2	372	372	--	--
6	138	376	382	0.4	0.5
7	324	393	406	0.5	0.5
8	511	430	446	0.5	0.5
9	677	486	499	0.5	0.5
10	806	555	561	0.5	0.5
11	888	629	629	0.5	0.5
12	916	701	699	0.5	0.5
13	888	767	767	0.5	0.5
14	806	823	830	0.5	0.5
15	677	870	883	0.5	0.5
16	511	906	922	0.5	0.5
17	324	933	947	0.5	0.5
18	138	950	956	0.4	0.5
19	2	955	956	--	--

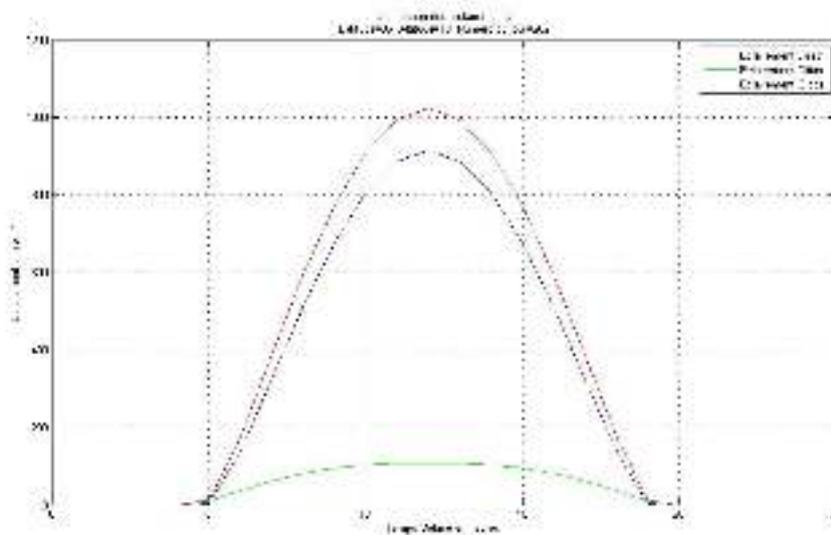


Figure 3.7 : Distribution de l'Eclaircement pour une journée 202

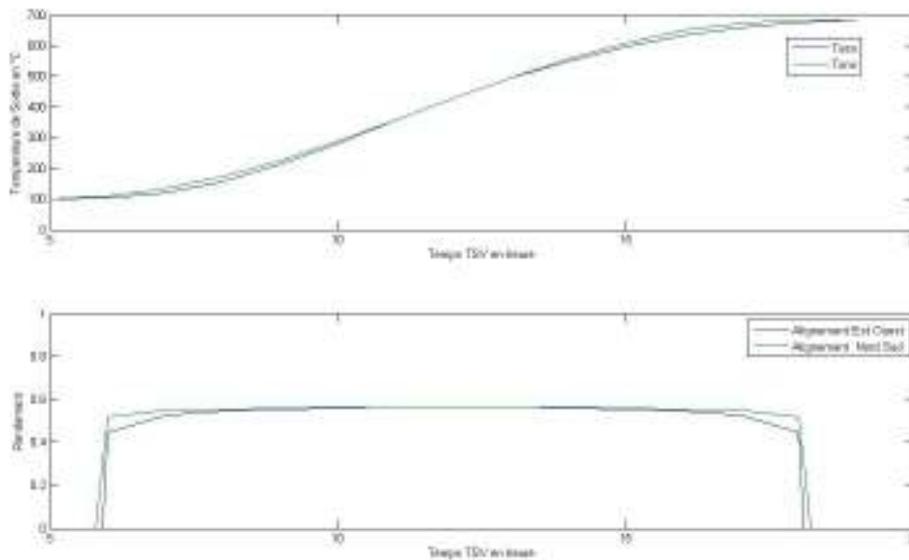


Figure 3.8 : Effet sur la Température de sortie et le Rendement pour une journée 202

Températures :

Dans cette journée, le soleil se lève à 05h00 du matin avec une faible intensité d'éclairement de 2W/m^2 mais avec une importante température de sortie du fluide de la veille de $99\text{ }^\circ\text{C}$. A midi TSV et avec une éclairement de 915 W/m^2 , la température a atteint une valeur maximale de $682\text{ }^\circ\text{C}$.

Rendements :

Nous constatons une croissance rapide du rendement pour les deux cas, on le voit rapidement atteindre $52,43\%$ et il ne chute qu'à partir de 19h00.

Toujours avec le bon rendement est constaté pour **l'alignement Nord Sud.**

Cas de la journée du 11 septembre :

Tableau 3.4: Les valeurs des températures et les rendements en fonction du TSV pour une journée de 262

TSV	Eclaircement	Températures		Rendements	
		Est-Ouest	Nord-Sud	Est-Ouest	Nord-Sud
6	2	372	372	--	--
7	121	376	380	0.4	0.5
8	289	393	398	0.5	0.5
9	449	433	423	0.5	0.5
10	577	462	450	0.5	0.5
11	660	500	478	0.5	0.5
12	688	532	506	0.5	0.5
13	660	556	534	0.5	0.5
14	577	573	561	0.5	0.5
15	449	588	586	0.5	0.5
16	289	599	604	0.5	0.5
17	121	607	611	0.4	0.5
18	2	611	611	--	--

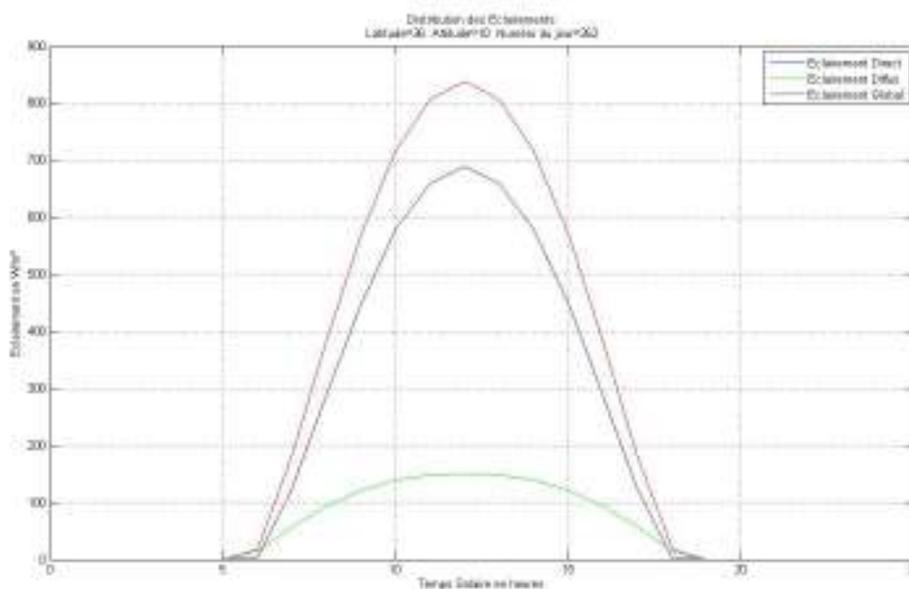


Figure 3.9 : Distribution de l'Eclaircement pour une journée 262

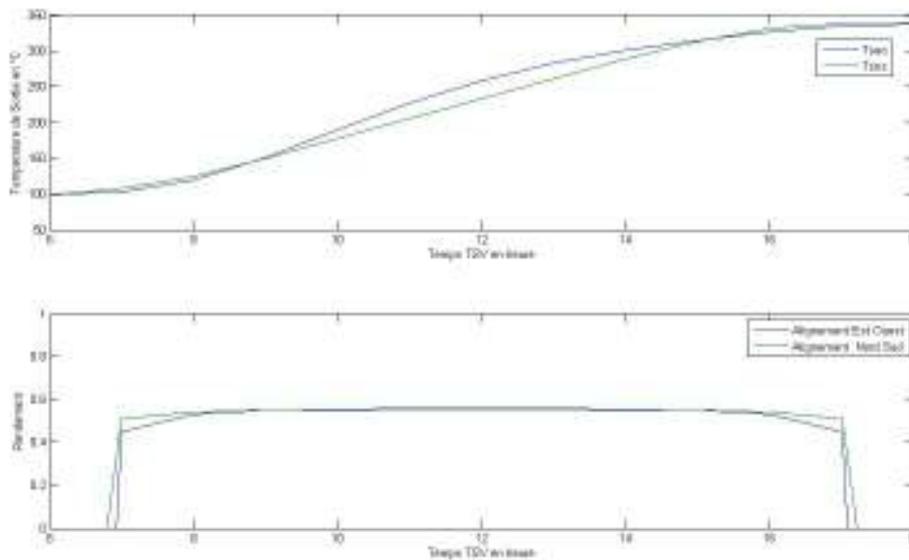


Figure 3.10 : Effet sur la Température de sortie et le Rendement pour une journée 262

Températures :

Pour ce dernier, en fonction du temps toujours, on remarque qu'à 06h00 on commence à avoir déjà une température de 99°C à un faible éclairement de $2\text{W}/\text{m}^2$. On obtient une augmentation de la température jusqu'à environ de 337°C .

Rendements :

Pour le rendement, nous constatons qu'il vaut mieux choisir l'**alignement Nord Sud** que l'**Est Ouest**, parce que, à partir du lever du soleil on commence déjà à obtenir des résultats importantes et ce jusqu'au coucher du soleil.

3.7 Modélisation du Moteur Ericsson

3.7.1 Principe de fonctionnement du moteur Ericsson

Dans sa description la plus simple, le moteur Ericsson est constitué d'un premier cylindre où est comprimé l'air et d'un deuxième cylindre moteur où l'air est dilaté par chauffage.

Cette page propose de découvrir le principe de fonctionnement de ce moteur. Ceci se fait progressivement en étudiant les étapes suivantes :

- les quatre phases élémentaires.
- le diagramme Pression-Volume

Première observation : le gaz utilisé, l'air, est renouvelé au cours des différentes phases de fonctionnement. **C'est un moteur "ouvert"**.

Deuxième observation : l'énergie calorifique est fournie à l'extérieur du cylindre. Le moteur Ericsson peut donc être qualifié de "**moteur à air chaud**" ou "**moteur à combustion externe**".

3.7.2 Les quatre phases élémentaires :

Le cycle thermodynamique du moteur Ericsson est dans son principe très simple : il comprend deux mouvements pendant lesquels se produisent 4 phases. Le gaz utilisé subit les transformations suivantes :

3.7.3 *Premier mouvement* : une aspiration d'air frais et une évacuation d'air chaud.

De l'air rentre dans le cylindre supérieur qui est mis en dépression par le mouvement du piston se déplaçant vers le bas. Le clapet de gauche est ouvert alors que celui de droite est fermé. La pression à l'intérieur du cylindre supérieur est égale à la pression atmosphérique.

Première phase : pendant cette même descente de piston, l'air chaud contenu dans le cylindre inférieur est évacué à l'atmosphère car le tiroir met en relation le piston inférieur avec l'extérieur. Au cours de cette phase, l'air est à la pression atmosphérique, sa température devient progressivement celle de l'air extérieur.

3.7.4 *Deuxième mouvement* : compression de l'air frais, remplissage du cylindre inférieur puis détente de l'air chaud. :

Deuxième phase : pendant toute la remontée du piston le gaz frais est mis en pression à température constante. Le clapet de gauche est alors plaqué fermé, le clapet de droite s'ouvre dès que la pression du gaz est égale à celle du réservoir d'air.

Troisième phase : pendant la première partie de la remontée du piston, de l'air frais est envoyé dans le cylindre inférieur. Cet air reste à la pression du réservoir d'air mais se met à la température de la source chaude.

On voit que pour que cela se produise ainsi, il a fallu mettre le tiroir en position haute pour que le cylindre inférieur du moteur soit mis en relation avec le réservoir d'air.

Quand la phase de remplissage est terminée, le tiroir descend légèrement pour obstruer le passage de l'air entre réservoir et piston inférieur.

Quatrième phase : le piston termine sa course vers le haut, l'air dans le cylindre inférieur se dilate à température constante : celle de la source chaude.

Dans le cylindre supérieur, l'air frais est toujours comprimé à température constante

3.7.5 Le diagramme Pression-Volume :

On peut tracer un diagramme **Pression-Volume** représentant le cycle thermodynamique. Ce diagramme est présenté ci-dessous avec le diagramme entropique.

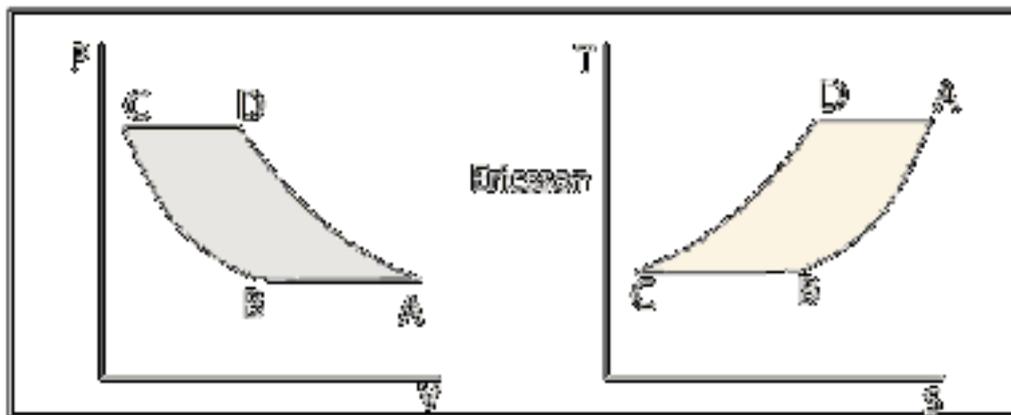


figure 3.11 : Diagramme **Pression-Volume** représentant le cycle thermodynamique

Les différentes phases, décrites dans le chapitre précédent, se retrouvent sur ce diagramme :

- **première phase AB** : évacuation de l'air chaud vers l'atmosphère.
- **deuxième phase BC** : compression de l'air frais à température constante.
- **troisième phase CD** : chauffage isobare de l'air.
- **quatrième phase DA** : détente à température constante.

Le travail fourni au cours d'un cycle est proportionnel à la surface grise du diagramme PV.

3.8 Théorie du moteur Ericsson

Nous allons nous fixer comme objectif de dimensionner simplement un moteur Ericsson. Cette étude est purement théorique. Elle suppose que le cycle du moteur répond parfaitement au diagramme étudié à la page définissant **les principes de fonctionnement de ce moteur**.

En particulier, nous considérons comme acquis que la compression et la détente se réalisent à des températures strictement constantes, ce qui est peut-être difficile à respecter lors de la conception du moteur. Au fur et à mesure de cette petite étude, nous allons utiliser des notions de **thermodynamique**, de **cinématique**, d'**échange de chaleur**.

Les dimensions permettant de calculer un moteur Ericsson sont les suivantes :

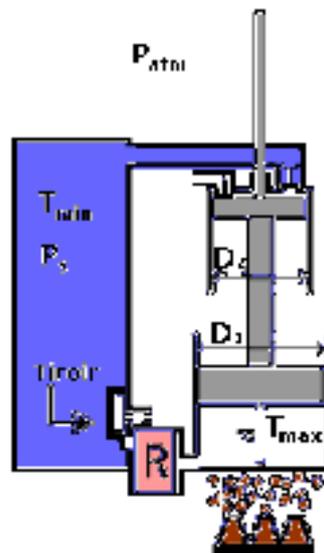


Figure 3.12 : Les dimensions permettant de calculer un moteur Ericsson

- La course du piston : d
- Le diamètre du piston moteur : D_1

En choisissant :

- La température de la source chaude T_{max}
- La température de la source froide T_{min}
- La pression du réservoir d'air stocké P_s

On pourra déterminer :

- Le diamètre du compresseur : D_2
- Le travail effectué au cours d'un cycle : W
- Le rendement du moteur : η

Nous déterminerons également à quel moment le tiroir doit cesser de mettre en relation le réservoir d'air avec le cylindre moteur ou, autrement dit, à quelle valeur de la course d_{inter} la quantité d'air de travail nécessaire a été introduite dans le cylindre moteur et quelle est, à ce moment là, la valeur du volume V_1 correspondant V_{inter} .

3.8.1 Détermination du diamètre D_2 :

Lorsque le piston est en position haute, le cylindre moteur est rempli d'air à la température T_{max} . Cet air est aussi à la pression atmosphérique juste avant que le tiroir ne mette en relation ce cylindre avec l'atmosphère. On peut donc écrire:

$$P_{atm} V_{1max} = nRT_{max} \quad (3.22)$$

Dans cette expression, toutes les valeurs sont déterminées, elles nous permettent donc de connaître le nombre de molécules-grammes mises en jeu à chacune des phases de ce cycle d'Ericsson.

$$n = P_{atm} V_{1max} / RT_{max}$$

La valeur de n étant la même au cours des 4 phases du cycle, nous allons pouvoir dimensionner le cylindre de compression de l'air frais.

Quand le piston est en position basse, pour le cylindre supérieur, nous pouvons écrire:

$$P_{atm} V_{2max} = nRT_{min} \quad (3.23)$$

En associant les équations (3.22) et (3.23) on obtient:

$$V_{2max} = V_{1max} T_{min} / T_{max} \quad (3.24)$$

Connaissant la valeur de la course d , nous pouvons calculer D_2 .

$$D_2 = 2 [V_{1max} T_{min} / (T_{max} \pi d)]^{1/2} \quad (3.25)$$

Nous allons maintenant préciser la valeur de V_1 qui correspond au déplacement du tiroir afin d'interrompre le remplissage du cylindre moteur :

$$n = P_{\text{atm}} V_{1\text{max}} / RT_{\text{max}} = P_s V_{1\text{inter}} / RT_{\text{max}}$$

$$V_{1\text{inter}} = V_{1\text{max}} P_{\text{atm}} / P_s \quad (3.26)$$

La valeur de la course à ce moment-là est;

$$d_{\text{inter}} = d P_{\text{atm}} / P_s \quad (3.27)$$

De même, nous allons calculer le volume $V_{2\text{min}}$ qu'occupe l'air amené à la pression du réservoir P_s par le piston compresseur.

$$n = P_{\text{atm}} V_{1\text{max}} / RT_{\text{max}} = P_s V_{2\text{min}} / RT_{\text{min}}$$

$$V_{2\text{min}} = V_{1\text{max}} P_{\text{atm}} T_{\text{min}} / P_s T_{\text{max}} \quad (3.28)$$

3.8.2 Calcul du travail effectué au cours d'un cycle :

Nous allons réexaminer le diagramme PV du cycle Ericsson et porter sur celui-ci les valeurs décrites ci-dessus

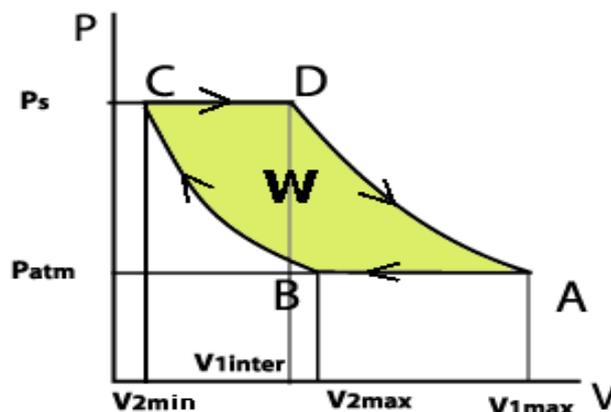


Figure 3.13 Le diagramme PV du moteur Ericsson

Nous voyons que nous connaissons maintenant toutes les valeurs qui apparaissent sur ce diagramme.

En application des notions de **thermodynamique** que nous avons acquises, nous allons calculer le travail récupéré au cours d'un cycle.

Pour cela, nous allons calculer l'intégrale $\mathbf{W} = \int \mathbf{p} \, d\mathbf{V}$ pour chacune des 4 phases.

- *phase de mise à l'atmosphère AB* :

$$W_1 = P_{\text{atm}} (V_{2\text{max}} - V_{1\text{max}}) \quad (3.29)$$

- *phase de compression BC* :

$$W_2 = \int p \, dV = \int (nRT_{\text{min}} / V) \, dV = nRT_{\text{min}} \ln (V_{2\text{min}} / V_{2\text{max}}) \quad (3.30)$$

- *phase de remplissage CD* :

$$W_3 = P_s (V_{1\text{inter}} - V_{2\text{min}}) \quad (3.31)$$

- *phase de détente DA* :

$$W_4 = nRT_{\text{max}} \ln (V_{1\text{max}} / V_{1\text{inter}}) \quad (3.32)$$

Si on cumule l'ensemble des travaux élémentaires, on obtient:

$$W = \sum W_i \text{ pour } i \text{ allant de } 1 \text{ à } 4.$$

On remarquera que \mathbf{W}_1 et \mathbf{W}_2 sont négatifs et que \mathbf{W}_3 et \mathbf{W}_4 sont positifs.

En développant \mathbf{W}_1 et \mathbf{W}_3 en fonction des données d'entrée, on trouvera que:

$$W_1 = -W_3 = -P_{\text{atm}} V_{1\text{max}} (1 - T_{\text{min}} / T_{\text{max}}) \quad (3.33)$$

Ceci était prévisible car la quantité de chaleur à fournir à l'air pour le chauffer de T_{min} à T_{max} est identique à la quantité de travail récupérée quand cet air passe de T_{max} à T_{min} .

L'expression du travail récupéré au cours d'un cycle se simplifie pour devenir:

$$W = W_2 + W_4 \quad (3.34)$$

En développant, on obtiendra :

$$W = nRT_{\text{max}} (1 - T_{\text{min}} / T_{\text{max}}) \ln(P_s / P_{\text{atm}}) \quad (3.35)$$

3.8.3 Rendement du cycle :

Le rendement du moteur est égal au rapport entre l'énergie mécanique nette effectivement récupérée et l'énergie calorifique qu'il est nécessaire de fournir au moteur. Cette dernière est fournie au cours du chauffage isochore et au cours de la détente isotherme.

3.8.4 Travail net récupéré :

Ce travail W a été calculé ci-dessus et vaut:

$$W = nRT_{\max} (1 - T_{\min} / T_{\max}) \ln(P_s / P_{\text{atm}}) \quad (3.36)$$

3.8.5 Energie calorifique fournie :

Au cours d'une détente isotherme, la quantité de chaleur fournie au système est égale au travail récupéré au cours de cette même phase:

$$Q_{\text{det}} = \int_{\text{det}} PdV = W_4 \quad (3.37)$$

$$Q_{\text{det}} = nRT_{\max} \ln(V_{1\max} / V_{1\text{inter}}) \quad (3.38)$$

Au cours du chauffage isobare, il a fallu fournir l'énergie suivante:

$$Q_{\text{chauf}} = nC_p (T_{\max} - T_{\min}) \quad (3.39)$$

Où C_p est la chaleur molaire du gaz considéré pour un chauffage, à pression constante, d'une température T_{\min} à une température T_{\max} .

La quantité totale d'énergie calorifique fournie est donc de:

$$Q_{\text{totale}} = nC_p (T_{\max} - T_{\min}) + nRT_{\max} \ln(V_{1\max} / V_{1\text{inter}}) \quad (3.40)$$

Ou

$$Q_{\text{totale}} = nC_p (T_{\max} - T_{\min}) + nRT_{\max} \ln(P_s / P_{\text{atm}}) \quad (3.41)$$

3.8.6 Rendement du cycle :

On peut donc écrire la valeur du rendement d'un cycle d'Ericsson :

Rendement d'un cycle d'Ericsson:

$$\eta = [RT_{\max} (1 - T_{\min} / T_{\max}) \ln(P_s / P_{\text{atm}})] / [C_p (T_{\max} - T_{\min}) + RT_{\max} \ln(P_s / P_{\text{atm}})] \quad (3.42)$$

En effet, le cycle de Carnot a pour valeur : $\eta_{\text{Carnot}} = 1 - T_{\min} / T_{\max}$ ce qui est différent de la formule propre au rendement du cycle d'Ericsson.

Par contre, si on suppose que l'énergie nécessaire au réchauffage isobare (pendant le remplissage du piston moteur) est entièrement récupérée au cours du refroidissement isobare (pendant la mise à l'atmosphère, après la détente), c'est le rôle du régénérateur, alors l'efficacité

du moteur Ericsson sera égale au rendement d'une machine de Carnot, jamais conçue, ayant les mêmes températures extrêmes de fonctionnement.

En effet, dans l'équation définissant le rendement η , le terme correspondant à l'énergie utile au chauffage isobare $C_p (T_{\max} - T_{\min})$ disparaît.

L'expression du rendement du moteur devient:

$$\eta = [RT_{\max} (1 - T_{\min} / T_{\max}) \ln(P_s / P_{\text{atm}})] / [RT_{\max} \ln(P_s / P_{\text{atm}})] \quad (3.43)$$

Ou encore, après simplification :

3.8.7 Rendement d'un moteur Ericsson avec un régénérateur:

$$\eta = 1 - T_{\min} / T_{\max} \quad (3.44)$$

Maintenant, on peut dire que le rendement d'un moteur Ericsson équipé d'un régénérateur est égal à celui du cycle de Carnot. Dans la réalité, l'hypothèse faite, récupérer totalement la chaleur du refroidissement isobare pour la restituer au cours du chauffage isobare, est très optimiste pour ne pas dire impossible à réaliser sur un plan pratique. Il faudrait pour ça que le régénérateur ait une efficacité de **100%**. Concevoir un tel échangeur est une vraie gageure.

Il ne faut pas oublier que le régénérateur est l'invention de **Robert Stirling**. Son principe est expliqué sur le site relatif au moteur Stirling à la page "**le régénérateur ou économiseur du moteur Stirling**". Le lecteur devra remplacer les expressions "**chauffage isobare**" et "**refroidissement isobare**" par les expressions "**chauffage isochore**" et "**refroidissement isochore**" mais dans les deux cas le but recherché est le même.

3.8.8 Avantages du moteur Ericsson

1. **la multitude de "sources chaudes" possibles** : combustion de gaz divers, de bois, sciure, déchets, énergie solaire ou géothermique...
2. **l'aptitude écologique** à répondre le mieux possible aux exigences environnementales en matière de pollution atmosphérique. Il est plus facile de réaliser dans ce type de moteur une combustion complète des carburants.
3. **la fiabilité et la maintenance aisée** : la relative simplicité technologique permet d'avoir des moteurs d'une très grande fiabilité et nécessitant peu de maintenance.
4. **la durée de vie importante** du fait de sa "rusticité".
5. **les utilisations très diverses** du fait de son autonomie et son adaptabilité au besoin et à la nature de la source chaude.
6. **le rendement intéressant** : fonction, il est vrai, des températures des sources chaudes et froides. Il paraît judicieux de le faire fonctionner en cogénération (puissances mécanique et calorique) en récupérant les calories rejetées à l'échappement du moteur. Le rendement global est alors élevé.

3.8.9 Inconvénients du moteur Ericsson

1. **le prix** : le frein à son développement est aujourd'hui probablement son coût, non encore compétitif par rapport aux autres moyens bien implantés. Une généralisation de son emploi devrait pallier ce problème inhérent à toute nouveauté.
2. **la méconnaissance de ce type de moteur** par le grand public. Il faut donc en faire la promotion.
3. **les échanges de chaleur** avec un gaz sont délicats et nécessitent souvent des appareils volumineux.
4. **le manque de souplesse** : les variations rapides et efficaces de puissance sont probablement difficiles à obtenir avec un moteur Ericsson. Celui-ci est plus apte à marcher à puissance nominale constante.
5. **le bruit lié à son fonctionnement** : le rejet à l'atmosphère de l'air chaud après détente peut provoquer un bruit gênant.

3.9 Simulation et discussion des résultats

Comme pour le champ, nous avons réalisé un programme sous Matlab pour évaluer le comportement du moteur Ericsson sous différentes températures. Nous avons testé ses performances pour différentes journées dans l'année.

Pour toutes les journées d'analyse, on a obtenu les meilleures températures maximales pour l'**alignement Est Ouest**.

Cas de la journée du 18 décembre :

Tableau 3.5: Les valeurs des Températures maximales, Puissance et les rendements du moteur en fonction du TSV pour une journée de 352

TSV (h)	T_{\max} (K)	Puissance (kW)	Rendement	
			Avec Régénérateur	Sans Régénérateur
8	374	4	0.08	0.07
9	385	6	0.1	0.09
10	403	8	0.1	0.1
11	425	10	0.2	0.1
12	443	12	0.2	0.2
13	456	13	0.2	0.2

14	464	13	0.3	0.2
15	470	14	0.3	0.2
16	470	14	0.3	0.2

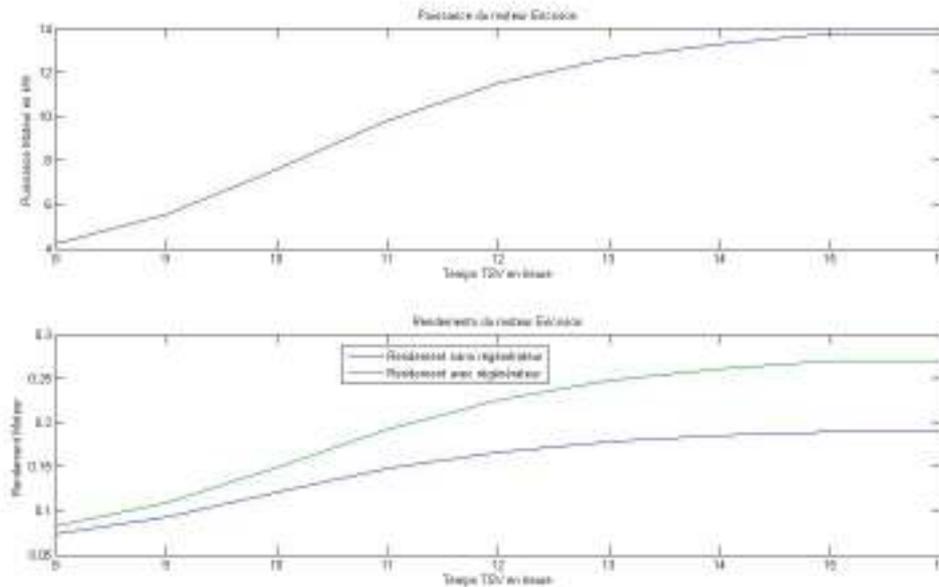


Figure 3.14: Effet sur la Puissance du Moteur et le Rendement pour une journée 352

Puissance du Moteur :

Nous constatons une croissance de puissance qui varie proportionnellement au cours du temps, à midi on obtient une puissance de 12 kW et atteint au maximum à 16h00 soit 14 kW. Cela due à l'influence de l'éclairément produit par le concentrateur.

Rendement du Moteur :

Pour le rendement, on remarque que le rendement avec générateur est plus important par rapport au rendement sans générateur.

On note un faible rendement pour les deux cas à 8h00, mais après on observe une forte croissance du rendement avec régénérateur qui a atteint un maximum de 0.2 (20%) à 16h00.

Cas de la journée du 18 mars :

Tableau 3.6: Les valeurs des Températures maximales, Puissance et les rendements du moteur en fonction du TSV pour une journée de 77.

TSV (h)	T_{\max} (K)	Puissance (kW)	Rendement	
			Avec Régénérateur	Sans Régénérateur
7	376	4	0.08	0.07
8	392	6	0.1	0.1
9	422	10	0.2	0.1
10	461	13	0.2	0.2
11	500	16	0.3	0.2
12	534	18	0.3	0.2
13	560	20	0.4	0.2
14	578	21	0.4	0.2
15	593	22	0.4	0.2
16	604	22	0.4	0.2
17	612	22	0.4	0.2

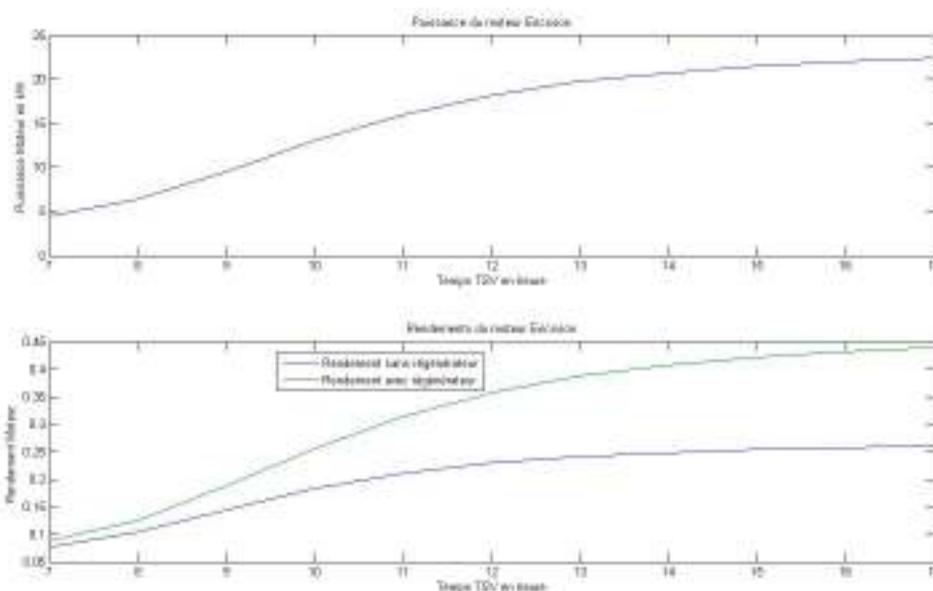


Figure 3.15: Effet sur la Puissance du Moteur et le Rendement pour une journée 77.

Puissance du Moteur :

Nous remarquons dans ce cas une puissance de 6 kW à 8h00, mais qu'à partir de 10h00 on commence déjà à avoir une puissance intéressante. Elle ne cesse pas de monter jusqu'à qu'il atteint au son maximum de 22 kW à 17h00.

Rendement du Moteur.

Pour le cas du rendement, on note que le rendement avec régénérateur est meilleur que celui sans régénérateur. D'après la figure, on ne reçoit rien à 7h00 pour les deux cas, mais qu'à 10h00 on remarque déjà un changement important pour le rendement avec régénérateur tandis que pour le rendement sans régénérateur continue à être faible. A la fin, nous constatons un rendement avec régénérateur très important de 0.4 (40%) tandis que pour le rendement sans régénérateur atteint aussi son maximum de 0.2 (20%).

Cas de la journée du 21 juillet :

Tableau 3.7: Les valeurs des Températures maximales, Puissance et les rendements du moteur en fonction du TSV pour une journée de 202.

TSV (h)	T_{\max} (K)	Puissance (kW)	Rendement	
			Avec Régénérateur	Sans Régénérateur
5	372	4	0.07	0.07
6	376	4	0.08	0.07
7	393	6	0.1	0.1
8	430	10	0.2	0.1
9	486	15	0.3	0.2
10	555	19	0.3	0.2
11	629	23	0.4	0.2
12	701	26	0.5	0.2
13	767	28	0.5	0.3
14	823	30	0.6	0.3
15	870	31	0.6	0.3
16	906	32	0.6	0.3

17	933	32	0.6	0.3
18	950	32	0.6	0.3
19	955	33	0.6	0.3

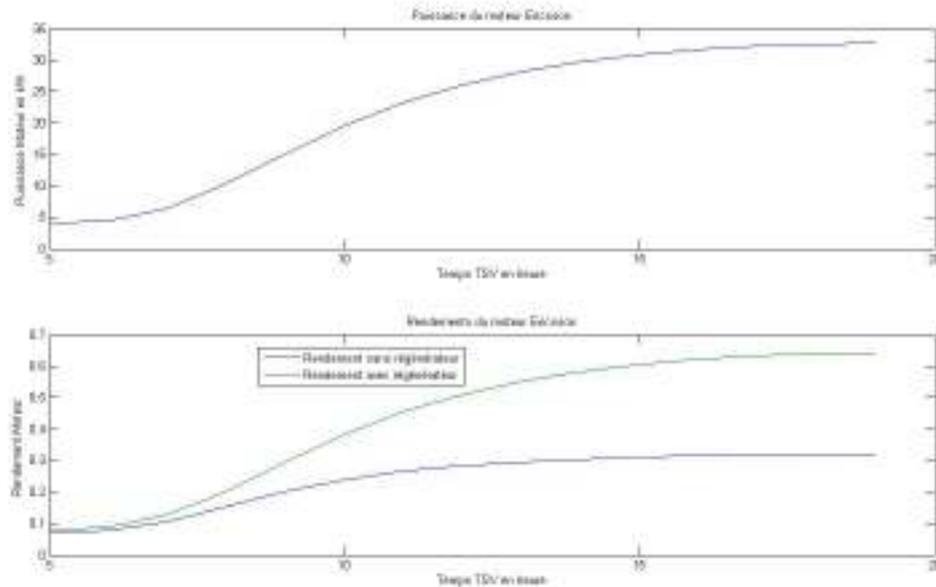


Figure 3.16: Effet sur la Puissance du Moteur et le Rendement pour une journée 202.

Puissance du Moteur :

Toujours en fonction du temps, on remarque que pour cette journée, au lever du soleil à 5h00, on obtient une puissance est de 4 kW mais qu'elle commence à monter d'une manière rapide qu'à 12h00. Elle continue à monter jusqu'à qu'elle atteint à son maximum de 33 kW à 19h00.

Rendement du Moteur.

Pendant le lever du soleil, c'est-à-dire à 5h00, le rendement est trop faible, mais après il commence à monter très rapidement surtout pour le moteur avec régénérateur et atteindre 30% à 10h00. Il atteint son maximum de 0.6 (60%) à 19h00.

Cas de la journée du 11 septembre :

Tableau 3.8: Les valeurs des Températures maximales, Puissance et les rendements du moteur en fonction du TSV pour une journée de 262.

TSV (h)	T_{max} (K)	Puissance (kW)	Rendement	
			Avec Régénérateur	Sans Régénérateur
6	372	4	0.07	0.07
7	376	4	0.08	0.07
8	393	6	0.1	0.1
9	433	10	0.2	0.1
10	462	13	0.2	0.1
11	500	16	0.3	0.2
12	532	18	0.3	0.2
13	556	19	0.3	0.2
14	573	20	0.4	0.2
15	588	21	0.4	0.2
16	599	21	0.4	0.2
17	607	22	0.4	0.2
18	611	22	0.4	0.2

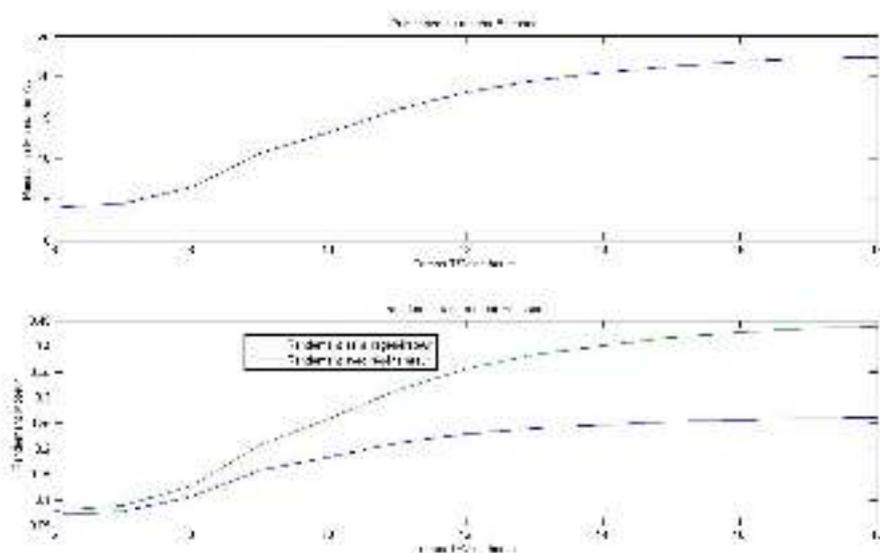


Figure 3.17: Effet sur la Puissance du Moteur et le Rendement pour une journée 262.

Puissance du Moteur :

Pour cette journée du 11 septembre, à 6h00 la puissance apparait la même que la journée précédent, l'effet qu'il n'a pas un grand écart des journées. L'influence sur l'éclairement fait que la croissance soit aussi rapide. A midi, la puissance commence à devenir très important jusqu'à qu'il atteindre un maximum de 22 kW à 18h00.

Rendement du Moteur.

Pareils aussi pour les rendements, toujours le rendement avec régénérateur est plus avantageux que celui sans régénérateur. A 6h00, un rendement faible des deux cas avec ou sans régénérateur, mais la différence commence à exister à partir de 10h00. Le moteur avec régénérateur atteint un rendement important de 0.4 (40%), alors que le rendement sans régénérateur atteint au son maximum de 0.2 (20%).

3.10 Conclusion

Pour ce chapitre, on a constaté que pour l'analyse paramétrique du concentrateur de Fresnel, les températures de sortie et les rendements sont toujours mieux en fonction de la journée choisie. Raison pour laquelle on a préféré de simuler notre centrale pour l'orientation Est en Ouest, parce que le concentrateur est parfaitement orienté de manière à suivre le mouvement apparent du soleil. Les résultats sont obtenus et commentés selon les quatre journées de l'année.