

A Mon Père

A Ma Mère

A la mémoire de ma Tante Djamila

A la mémoire de mes Grands Parents

A Ma Famille ...

Abdelatif

Remerciements

Avant tout et après tout, nos remerciements ne peuvent être rendus qu'au majestueux seigneur, sans lui nul travail ne serait accompli et nul soupir ne serait soumis. Je te remercie haut seigneur, pour ce que tu m'as donné, tes bénédictions, tes faveurs que je pourrais indéfectiblement compter.

Je remercie tout d'abord mon père, lui avec son grand cœur, sa sagesse et son amour m'ayant apporté force et détermination tout au long de ma vie. Je le remercie pour tous ses sacrifices ainsi que tous les supplices qu'il enduré pour que rien ne me manque et que je ne pourrai jamais acquitter même en vivant mille vies et vies.

Je remercie ma mère, ma chère mère pour tous ses sacrifices dans cette vie afin que nous vivons du meilleur qui soit.

Je tiens aussi à remercier ma sœur SARAH pour son constant soutien durant des jours durs et si pénibles.

Je tiens aussi à remercier mes frères WALID et LAMINE pour leur soutien et aide.

Je tiens à remercier à travers ce modeste travail mon promoteur Monsieur Said nourredine pour le partage de son savoir, ses conseils et son assistance constante.

Je tiens aussi à remercier toutes les personnes travaillant au CDER Bouzaréah, et m'ont aidé ne serait ce qu'au travers d'un geste, un sourire ou un encouragement qui ont eu tout le poids au fond de mon cœur.

Je tiens à remercier M. BAHRIA attaché de recherche au CDER pour sa disponibilité, d'avoir mis en ma disposition tout le matériel nécessaire dont j'ai eu besoin durant mes expériences.

Je tiens aussi à remercier aussi M. KACI Karim ainsi que M. SIDALI, Mme MECHRI attachés de recherche au CDER pour leurs conseils et aide.

Ce modeste travail n'aurait pu aboutir sans l'aide de nombreuses personnes. Que me pardonnent celles que j'oublie ici, mais j'adresse une pensée particulière à mes amis ; Abderrahime, Abdelakarime, Abdelkader, Zakaria qui m'ont aidé et soutenu comme le doivent les bons amis.

Je tiens aussi à remercier tous les professeurs ayant assuré notre formation et ce, depuis le premier cycle universitaire, je les remercie pour leur disponibilité, soutien et compréhension.

Je m'adresse particulièrement aux professeurs responsables de notre formation au sein du département de mécanique ayant assuré notre formation avec dévouement, estime, et sacrifices.

Je tiens à adresser une pensée particulière pour Monsieur BENGUERBA, Monsieur ABDI HAMIDE, Monsieur CHETTOUH ainsi que Madame OUADJINA ; enseignants au sein du département de mécanique et avec lesquels j'ai appris tant de choses, non pas seulement sur le plan technique mais surtout sur la philosophie de la vie, à eux je leur dis merci d'avoir été des enseignants modèles à mes yeux.

Au commencement comme à la fin des fins, seigneur merci, seul toi m'ayant jamais abandonné, délaissé ou nier, te remercier serait inconcevable.

Introduction générale :

Introduction générale :

Le monde a connu et connaîtra sûrement plusieurs crises économiques principalement liées au secteur énergétique. La question pèse de plus en plus en avançant sur l'échelle temporelle humaine, en effet et si les ressources énergétiques dites conventionnelles sont suffisantes de nos jours, elles ne le seront plus d'ici quelques années. La différence commence déjà à peser sur les prix des hydrocarbures qui ne cessent de connaître des hausses significatives.

Face à cela, d'autres voies s'ouvrent à l'humanité, celles des énergies renouvelables. Même si ces dernières sont pratiquement les plus anciennes sources énergétiques qu'a pu connaître la planète terre mais leur utilisation est restée restreinte durant de longues périodes. Ceci est dû à plusieurs raisons autant économique, technologiques que politiques.

Aujourd'hui l'humanité est mise face à ses responsabilités car si la question énergétique est une question d'un grand poids, la question environnementale l'est encore plus. Soit nous continuerons à consommer l'énergie sur ce taux avec les conséquences catastrophiques que ceci engendre, soit des mesures de rigueur doivent être mises en œuvre.

L'Algérie et en parallèle à sa richesse en sources d'énergies conventionnelles représente l'un des plus importants gisements solaires du monde mais surtout au niveau du bassin méditerranéen. L'Algérie possède par ce fait le plus important gisement solaire du bassin méditerranéen avec $2.500 \text{ kWh/m}^2/\text{an}$, soit plus de 250 fois la consommation annuelle du pays.

La conversion photothermique de l'énergie solaire au niveau de l'absorbeur/récepteur peut constituer un apport d'énergie non négligeable pour un grand nombre d'applications thermiques, thermomécaniques et thermochimiques à condition que des rendements de conversion élevés puissent être atteints dans une gamme de températures relativement étendue. Quatre catégories d'applications se dégagent en fonction de la température [1] :

- 1- Applications aux basses températures solaires ($T < 60^\circ\text{C}$) : chauffage de l'eau sanitaire, ...
- 2- Applications aux moyennes températures solaires ($60^\circ\text{C} < T < 150^\circ\text{C}$) : chauffage des habitations, réfrigération, climatisation, dessalement de l'eau de mer, production d'énergie mécanique....

Introduction générale :

- 3- Applications aux hautes températures solaires ($150^{\circ}\text{C} < T < 800^{\circ}\text{C}$) : production d'énergie mécanique, production de vapeur, Dissociation de l'eau...,
- 4- Applications aux très hautes températures solaires ($T > 800^{\circ}\text{C}$) : dissociation thermique de l'eau, magnétohydrodynamique, thermo électricité).

Les systèmes à concentration solaire sont caractérisés par des hautes ou de très hautes températures. Parmi ces systèmes on trouve les concentrateurs solaires sphériques et qui représentent un certain nombre d'avantage par rapport aux autres types de concentrateurs liés principalement à la complexité de réalisation, ce qui se traduit par un coût de réalisation réduit.

Afin de caractériser les différents aspects des concentrateurs sphériques, on a étudié les différents paramètres intervenant sur tout le cycle de production énergétique des concentrateurs sphériques optiques et thermiques. On a aussi développé un programme de calcul afin d'estimer le rayonnement solaire direct sur un site donné et ce face au manque de stations météorologiques en Algérie.

Notre travail porte sur une étude expérimentale de la production d'énergie thermique à base de concentrateur sphérique. Cette étude comporte les chapitres suivants :

- **Le premier chapitre** : est consacré à une étude bibliographique du système et de tout ce qui en ressort en termes de définitions. On a présenté ensuite quelques travaux ayant déjà étudiés le même système ou du moins un angle d'approche du système que nous visons par la présente étude.

- **Le deuxième chapitre** : Traite les notions principales du gisement solaire dans une première partie, la deuxième partie est consacrée à l'étude d'un modèle pour l'estimation de l'éclairement direct (r_{sun}). Un programme de calcul a été développé afin d'établir une comparaison entre les mesures réelles de l'éclairement direct prises à partir de la station météo du CDER (centre de développement des énergies renouvelables) – réseau Chemss-

- **Le troisième chapitre** : est dédié à l'étude optique de la partie réflectrice du concentrateur sphérique (miroir sphérique). Dans cette partie on étudiera le phénomène optique de près en faisant recours aux principes de l'optique géométrique. Ceci nous permettra entre autre de caractériser théoriquement le miroir sphérique sur le plan optique. Il est à noter que les figures réalisés dans ce chapitre ont été réalisées avec le Logiciel de simulation optique ; OPTGEO.

Introduction générale :

- **Le Quatrième Chapitre** : dans ce chapitre un bilan thermique du système a été établi. L'objectif étant de mettre le point sur les différents transferts de chaleur au niveau du récepteur, mais aussi déterminer les termes appropriés à chaque équation.

- **Le cinquième chapitre** : ce chapitre a été destiné à la partie expérimentale de ce mémoire et à l'interprétation des résultats obtenus au cours des tests réalisés au niveau du CDER Bouzaréah.

La partie annexe comporte certaines définitions mais aussi les différentes propriétés de l'eau, l'air et quelques matériaux utilisés durant l'expérimentation.

Ce travail se termine avec une conclusion générale et dans laquelle on extériorisera une vue globale des différents points réalisés durant le mémoire. Le point a été fait aussi sur les différentes possibles applications du concentrateur sphérique en fonction des paramètres enregistrés dans les chapitres précédents.

Résumé

Ce travail consiste à caractériser expérimentalement un concentrateur solaire sphérique. Le but étant d'étudier la conversion de l'énergie solaire en énergie thermique au niveau du récepteur du concentrateur sphérique.

Notre étude s'est portée sur plusieurs axes, le premier axe étant l'étude optique du concentrateur sphérique où les différents phénomènes optiques agissant sur la concentration ont été étudiés.

Le deuxième axe consiste à faire un bilan thermique au niveau du récepteur afin de caractériser théoriquement ce dernier. Enfin nous sommes passés à la caractérisation expérimentale du concentrateur sphérique et durant laquelle des expériences ont été réalisées afin d'observer la distribution des températures au niveau du récepteur du concentrateur.

Nous avons pu atteindre pour notre expérience que nous avons essayé de réaliser dans des conditions climatiques dites défavorables des températures de l'ordre de 280 °C. Ceci nous prouve alors que le concentrateur sphérique peut opérer dans des conditions non optimales. On s'est aussi reposé sur des expériences déjà réalisées sur le même type de concentrateur pour en tirer les résultats optimaux obtenus par la méthode calorimétrique et les interpréter.

Summary

This work consists in characterising a spherical solar concentrator in an experimental way. In order to study the solar energy conversion into thermal energy at the spherical concentrator receptor.

Our study emphasises on several axes, the first is the optical study of spherical concentrator where the different optical phenomena acting on the concentration have been studied

The second axe consists in doing a thermal balance at the receptor in order to characterise it theoretically. At last, we carried on to the experimental characterisation of the spherical concentrator during which the experiences have been realised to observe the distribution of temperatures at the concentrator receptor.

We in fact could reach thanks to our experiment that we tried our best to realise in unfavourable climatic conditions (temperature up to 280°C). That proves to us that the spherical concentrator may operate in non-optimal conditions.

We also relied results and conclusions taken from experiences realised before with calorimetric methods on the same type of concentrator.

Liste des figures

Chapitre I : Etude Bibliographique

Fig. II-1. Phénomène de Réflexion Diffuse	6
Fig. II-3. Réflexion d'un rayon lumineux	7
Fig. II.2. Réflexion spéculaire	
Figure. II-4. Différents points caractérisant le miroir sphérique	8
Fig. II-5. Stigmatisme rigoureux (parfait) du miroir sphérique	9
Fig. II-6. Formation de la caustique de réflexion au voisinage de A' (stigmatisme rapproché)	10
Fig. II-7. Quelques systèmes de poursuite automatiques	11
Fig. II-8. Système de poursuite manuel utilisé	11

Chapitre II : Gisement Solaire

Figure II-1: sphère céleste	20
Fig. II-2: coordonnées géographiques	21
Figure. II-3. Longitude et latitude	21
Fig. II.4. Coordonnées horaires	22
Fig. II-5. Hauteur du soleil	24
Fig. II-6. Angle d'incidence	25

Chapitre III : Etude optique du concentrateur sphérique

Fig. III-1 : Convergence des rayons réfléchis dans les conditions Gaussiennes	36
Fig. III-2 : convergence des rayons inclinés par rapport à l'axe optique	37
Fig. III-3. Dimension du récepteur	38
Fig. III-4. Réflexion des rayons marginaux (bleu)	39
Fig. III-5. Distribution de l'éclairement sur différentes sections de la caustique	41
Fig. III-6. Caustique d'un miroir sphérique	41
Fig. III-7. Comparaison entre un paraboloidal et un miroir sphérique	42
Fig. III-8. Comportement d'un concentrateur sphérique comparé à un concentrateur parabolique	43
Fig. III-9. Coupe d'un miroir sphérique	43

Chapitre IV. Etude thermique du concentrateur sphérique

Fig. IV-1. Foyer à surface externe	49
Fig. IV-2. Foyer à surface interne	49
Fig. IV-3. Bilan énergétique du concentrateur	51

Chapitre V Procédure Expérimentale

Fig. V-1. Réflecteur (miroir sphérique)	59
Fig. V-2. Récepteur réalisé.....	60
Fig.V- 3. Quelques photographies du montage	61
Fig.V-4. illustration du montage réalisé	62
Fig.V-5 Thermomètre à infrarouge	63
Fig.V-6. Evolution de la température suivant l'axe optique	64
Fig.V-7. Caustique de réflexion	65
Fig. V-8. Expérience du 16/09/2013	66
Fig. V-9. Disposition des thermocouples sur la plaque réceptrice	67
Fig. V-10. Évolution de l'éclairement enregistré pour la journée du 16/09/2013	68
Fig. V-11. Evolution des températures au niveau du récepteur	69
Fig. V-12. Distribution des températures au niveau du récepteur.....	71
Fig. V-13. Prise instantanée du récepteur	72
Fig. V-14. Evolution de la température après déconcentration du concentrateur sphérique.....	73
Fig. V-15.Variation des différentes puissances pour la journée du 22/12/2008	74
Fig. V-16. Evolution de la température de l'absorbeur de la journée du 22/12/2008	75
Fig. V-17. Evolution des flux thermiques pour la journée du 22/12/2008	76
Fig. V-18. Evolution des pertes thermiques pour la journée du 22/12/2008	76
Fig. V-19. Evolution de l'efficacité du récepteur pour la journée du 22/12/2008	77

Liste des Tableaux

Tableau II.1. Estimation du facteur de trouble Link [37]	31
Tableau V.1. Plages de températures enregistrées en fonction des éclairements reçus	70

1. Introduction :

La première partie de ce chapitre comporte les différentes définitions des mots clés liés à notre système. On a essayé d'introduire toutes les définitions en relations avec notre système, pour cela on s'est reposé sur la distribution suivante afin de répartir les informations :

Notre système à savoir le concentrateur sphérique à concentration solaire comporte trois éléments essentiels ;

- 1- La source énergétique : à savoir le soleil et dont on a donné une définition assez brève pour cause de son implication dans le deuxième chapitre de ce mémoire et qui évoque le gisement solaire.
- 2- Le concentrateur solaire sphérique en lui-même comportant :
 - 2.1 . Le réflecteur : afin de bien comprendre la nature optique du réflecteur (miroir sphérique), nous avons cité quelques définitions de base de l'optique géométrique ainsi que la définition du réflecteur sphérique.
 - 2.2 . On arrive par la suite à la définition du dernier élément de notre système à savoir le récepteur solaire. On a alors procédé et d'une manière brève à la définition de dernier élément.
3. On a terminé la partie des définitions avec l'évocation de quelques logiciels utilisés pour la modélisation des concentrateurs sphériques.

La deuxième partie de ce chapitre est dédiée à la partie état de l'art et dans laquelle on met la lumière sur quelques précédents travaux ayant touché de près ou de loin de notre système. Nous présenterons ainsi un résumé, un développement et une conclusion portant sur chaque travail.

2. Définition de quelques mots clés :

2.1. La source énergétique :

La quantité totale d'énergie émise par le soleil sous forme de rayonnement est remarquablement constante, elle ne varie que de quelque millième sur une période de Plusieurs jours. Cette émission d'énergie vient des profondeurs du soleil.

Comme la plupart des autres étoiles, le soleil est constitué principalement d'hydrogène (71%), d'hélium (27%) et d'autres éléments plus lourds (2%).

L'énergie solaire est une énergie produite par la suite de réaction de fusion nucléaire. La source de la plupart des énergies disponibles sur la terre est exploitable pour la production d'électricité.

La puissance solaire disponible en tout point de la terre dépend du jour, de l'heure, et de la latitude de point de réception, de plus la quantité d'énergie solaire captée est fonction de l'orientation du récepteur.

2.2. Concentrateur Solaire sphérique :

Le concentrateur solaire comporte trois éléments essentiels :

- 1- Le miroir sphérique ou réflecteur et dont on illustre en évoquant les principes de base de l'optique géométrique avant d'évoquer le miroir sphérique et ses caractéristiques.
- 2- Système de poursuite solaire.
- 3- Récepteur solaire

2.2.1. Optique géométrique :

L'optique géométrique est une branche de l'optique qui s'appuie notamment sur la notion de rayon lumineux. Cette approche simple permet notamment des constructions géométriques d'images qui lui confèrent son nom.

L'optique géométrique est l'étude des rayons lumineux dans des milieux transparents. Cette science n'est pas seulement utilisée dans le domaine de la concentration solaire mais loin de là, elle est utilisée dans tous les systèmes optiques afin de déterminer précisément comment se font les phénomènes de réfraction, réflexion, formation des images que ce soit des miroirs plans, miroirs sphériques, lentilles...etc. Cette science est largement appliquée dans le domaine de la photographie ou de l'observation satellitaire.

2.2.1.1. Principe Fondamental de l'optique géométrique :

La lumière est constituée d'un ensemble de rayons lumineux. Les faisceaux lumineux peuvent être décomposés en une infinité de rayons lumineux que l'on peut étudier de manière indépendante [2]

Ce Principe fondamental de L'optique géométrique est juste mais pas dans tous les cas d'application. Puisque dans le cas des sténopés par exemple, il est clair que ce principe n'est pas vérifié et ou' la lumière ne se propage pas en lignes droites, donc on dira que ce principes est vrai en général sauf pour les cas particuliers.

2.2.1.2. Réflexion :

La réflexion (du latin reflexio) est le changement de direction d'un rayon ou d'une onde qui a lieu à la surface de séparation entre deux milieux, afin de revenir au milieu initial [3]

On distingue alors entre deux types de réflexions, on a ce qu'on appelle la réflexion diffuse ainsi que la réflexion spéculaire, et c'est au deuxième type que notre intérêt se portera au cours de ce mémoire.

2.2.1.3. Types de réflexions :

La réflexion se divise en deux types essentiels ; on distingue alors entre la réflexion diffuse et la réflexion spéculaire.

2.2.1.3.1. Réflexion diffuse :

La réflexion diffuse intervient sur les interfaces irrégulières, la lumière est réfléchié dans un grand nombre de directions et l'énergie du rayon incident est redistribuée dans une multitude de rayons réfléchis. Cette diffusion permet de créer, de la manière la plus simple possible, une source ponctuelle (dite isogène) à partir du simple impact d'un seul rayon lumineux sur une surface diffusante. Un exemple d'application : l'écran de cinéma. [2]

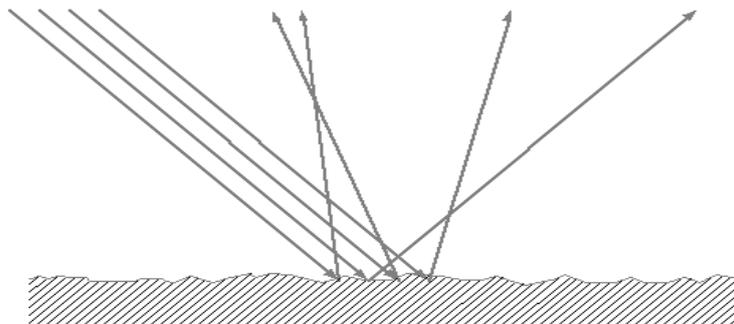


Fig. II-1. Phénomène de Réflexion Diffuse

2.2.1.3.2. Réflexion spéculaire :

La réflexion spéculaire donne naissance à un rayon réfléchi unique, dans le cas idéal l'énergie contenue dans le rayon réfléchi est totalement réfléchi. En pratique, une partie de cette énergie peut être absorbée ou diffuse au niveau de l'interface.

La qualité de la réflexion dépend alors de la qualité de l'interface et plus précisément de la taille des défauts surfaciques C'est alors à ce second type de réflexion qu'on s'intéressera pour les systèmes à concentration solaires.

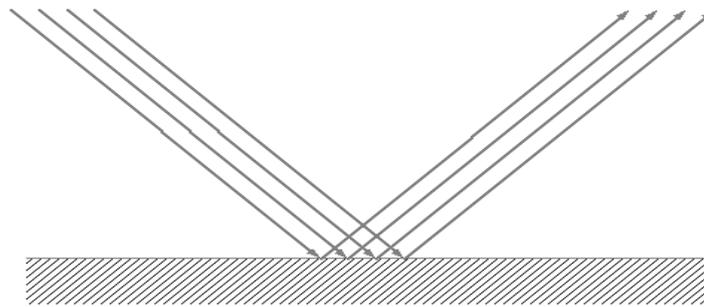


Fig. II.2. Réflexion spéculaire

2.2.1.4. Loi de la réflexion :

La réflexion des rayons lumineux obéit à deux lois [2] :

1. Le faisceau réfléchi est dans le plan d'incidence (Plan formé par la normale au dioptre (interface) et le faisceau incident)
2. L'angle du rayon incident avec la normale est égal à l'angle du rayon réfléchi et la normal

$$\ll \theta_1 = \theta_2 \gg$$

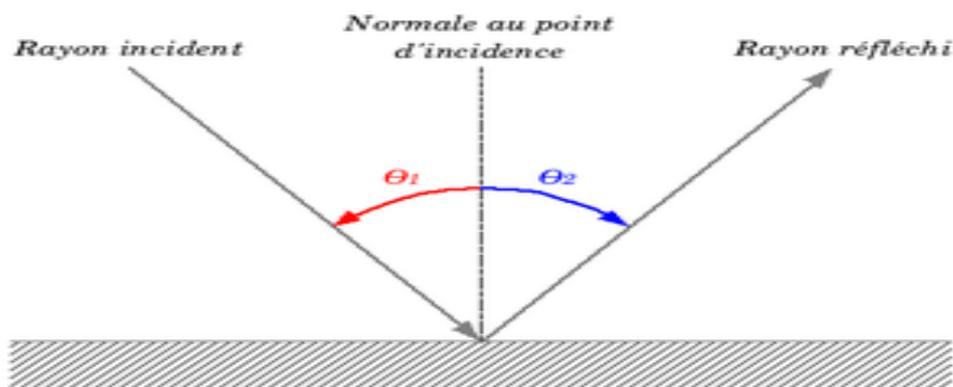


Fig. II-3. Réflexion d'un rayon lumineux

2.2.2. Miroir sphérique (réflecteur) :

2.2.2.1. **Définition** : Le miroir sphérique est une portion de sphère dont la surface a été recouverte d'une couche totalement réfléchissante. Cette couche est usuellement composée d'étain, d'argent ou d'aluminium et d'une couche protectrice transparente, selon utilisation et caractéristiques voulues. [4]

2.2.2.2. Miroir sphérique concave et convexe :

2.2.2.2.1. **Les miroirs concaves** : Appelés aussi convergents ; ce sont des calottes sphériques dont la surface réfléchissante est tournée vers le centre C.

2.2.2.2.2. **Les miroirs convexes** : appelés aussi divergents, qui eux, réfléchissent la lumière sur la surface extérieur de la sphère.

2.2.2.3. Caractéristiques du miroir sphérique :

Le miroir sphérique est caractérisé par son sommet, son rayon de courbure, son centre, diamètre d'ouverture et son axe optique. Ces derniers sont montrés sur la figure suivante :

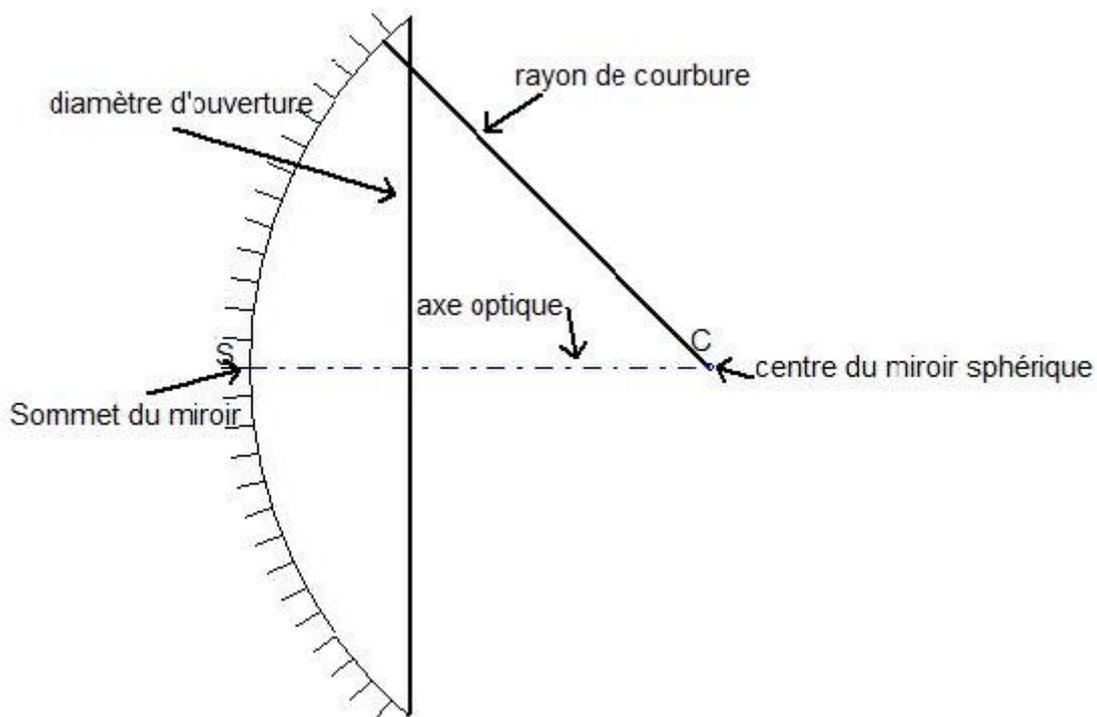


Figure. II-4. Différents points caractérisant le miroir sphérique

2.2.2.4. Stigmatisme du miroir Sphérique :

2.2.2.4.1. Stigmatisme rigoureux ou parfait :

Un système optique est dit rigoureusement stigmatique si tout rayon passant par A passe par A' après avoir traversé le système optique S. Autrement dit, un système optique S est dit rigoureux si tout objet A admet à travers S une image A' unique [2]

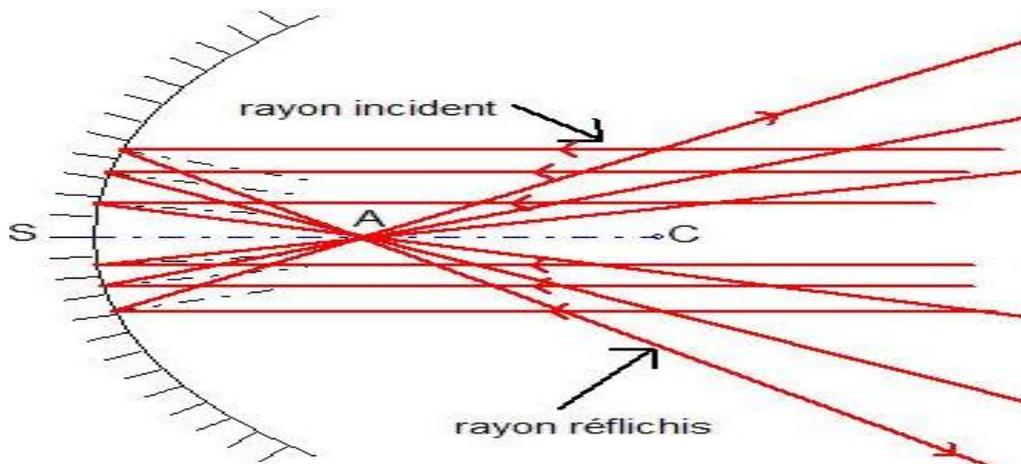


Fig. II-5. Stigmatisme rigoureux (parfait) du miroir sphérique

Avec :

C : centre du miroir sphérique.

S : Sommet du miroir sphérique

A : Foyer image (point de convergence).

- Dans ce cas on voit que les rayons lumineux convergent tous vers un seul et unique point « A » qu'on appelle foyer image.

2.2.2.4.2. Stigmatisme approché :

Les cas de stigmatisme rigoureux sont rares, c'est pour cela qu'on fait appelle à une deuxième notion qu'est le stigmatisme approché. Un système optique P est dit stigmatiquement approché si tout rayon passant par A passe au voisinage de A' après avoir traversé le système S.[5]

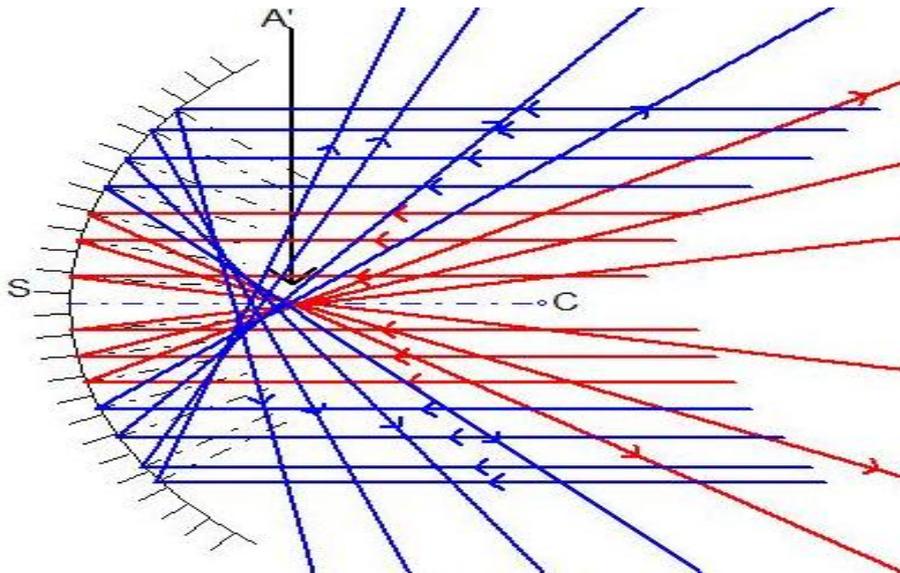


Fig. II-6. Formation de la caustique de réflexion au voisinage de A' (stigmatisme rapproché)

- On voit dans ce deuxième cas que les rayons lumineux convergent non pas vers le point A' mais vers un voisinage proche du point A' .

- on remarque aussi que les rayons lumineux réfléchis en rouge convergent parfaitement mais dès qu'on atteint un certain angle d'ouverture du miroir (rayons en bleu), ces derniers convergent vers un voisinage proche du point A' . C'est ce qu'on appelle stigmatisme rapproché.

2.3. Système de poursuite solaire :

La puissance électrique produite par un système solaire à conversion énergétique dépend de l'intensité du flux lumineux selon la position du soleil qui varie le long de la journée. C'est aussi le cas d'un système solaire thermique n'utilisant pas de conversion d'énergie, mais utilisant directement la chaleur cumulé au sein du récepteur (fusion métallurgique ...).

Afin de collecter le maximum d'énergie, on utilise des dispositifs dits systèmes de poursuite solaire '*sun tracking systems*'. Le système de poursuite solaire doit être ajusté de sorte qu'il soit toujours visé avec précision face au soleil. Les systèmes de poursuite solaire à un seul axe sont moins coûteux et leur commande est facile à mettre en œuvre, par contre leur efficacité est inférieure à celle des systèmes de poursuite solaire à deux axes [5].

Ces derniers nécessitent une commande appropriée des deux mouvements découplés et sont utilisés dans les centrales thermiques à concentration pour le guidage des héliostats [6], ainsi

que pour les installations photovoltaïques pour augmenter leur efficacité qui peut atteindre des valeurs de 30 % par rapport aux systèmes fixes [7].

Dans le cas de notre étude, le système de poursuite à deux axes sera guidé manuellement, en effet le système de poursuite automatique est beaucoup plus complexe à réaliser. Parlant de complexité, on parle de coût augmenté du système solaire.

Notre système de poursuite est un système de poursuite altazimutale, ce qui veut dire que ce dernier poursuit le soleil selon deux axes solaires, qui sont : l'azimut et la hauteur du soleil.

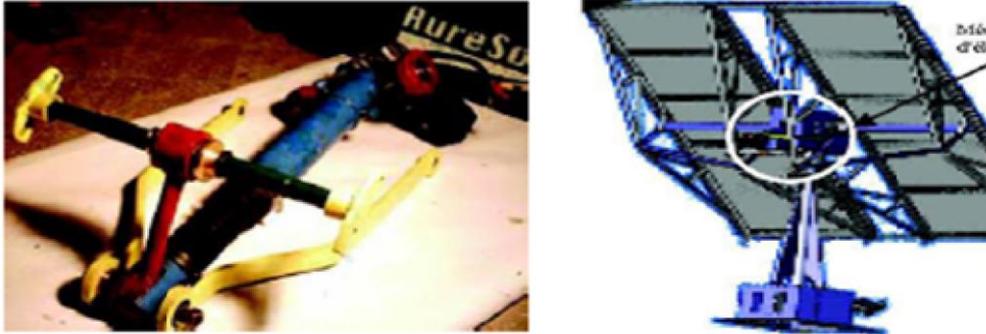


Fig. II-7. Quelques systèmes de poursuite automatiques



Fig. II-8. Système de poursuite manuel utilisé

2.4. Récepteur solaire :

Le récepteur solaire est souvent fait à base de matériau à grande inertie thermique, ceci permet de collecter l'énergie thermique dans un premier temps mais aussi de la sauvegarder pendant une longue période après accumulation. Le récepteur peut être aussi un moteur Stirling dans le cas de conversion énergétique, comme il peut être aussi une enceinte uniforme

dans le cas des fours solaires. Les rayons réfléchis à partir du miroir sphérique sont reçu par la suite au niveau du récepteur thermique pour différentes utilisations selon objectif du système.

2.5. Quelques Logiciels de simulation des concentrateurs sphériques :

2.5.1. Optgéo :

Logiciel d'optique géométrique, OptGeo permet de simuler de nombreuses activités de : réflexion, réfraction (sphères, prismes, lames, polyèdres), lentilles minces (convergentes, divergentes), miroirs (plans, sphériques, paraboliques, hyperboliques, elliptiques). OptGeo trace les rayons lumineux en utilisant les lois de Descartes. Des applications telles que le périscope, le microscope, les fibres à saut d'indice, les télescopes (Newton, Cassegrain,...) peuvent être illustrés.

2.5.2. Opticad :

Est un programme non séquentiel utilisé pour l'éclairage, l'analyse optique et la visualisation flexible, facile.

OptiCAD peut effectuer des analyses sur des composants optiques placés arbitrairement, avec la capacité de le faire sans contrainte avec le ray tracing considérant surface réflexion, réfraction, la surface et le volume diffusion et la luminance en vrac, et la polarisation .

OptiCad modélise de nombreux composants optiques, y compris les lentilles, miroirs, conduits de lumière, prismes, les surfaces CAO importées et des objets solides, les surfaces à facettes et des objets solides, et d'autres composants. Les sources lumineuses peuvent être modélisées comme des points, des lignes, des surfaces, des volumes, des bitmaps, des équations ou des tables de données. Les sources peuvent être divergentes convergentes, ou collimatées. de multiples sources peuvent être placés à n'importe quel endroit. Les sources peuvent également être définies par l'utilisateur grâce à une table ou DLL externes.

3. Partie état de l'art :

Documents consultés :

*** Etude, réalisation et simulation d'un concentrateur sphérique [35]**

Résumé :

Le but principal de ce travail est l'étude d'un concentrateur sphérique en y intégrant deux différents types de récepteurs cylindriques. Le premier étant un type cylindrique fermé et le second étant un serpentín à l'intérieur d'un récepteur cylindrique. On s'est intéressé dans ce travail à la détermination des caractéristiques de fonctionnement, la température de fonctionnement, la température de l'absorbeur, les différentes puissances et l'efficacité.

Dans ce travail, le bilan énergétique a permis de déterminer les caractéristiques thermiques de l'absorbeur afin de calculer la température concentrée au niveau de la surface captatrice. Dans le premier absorbeur, l'équation de la chaleur a été résolue implicitement.

Résultats de la publication :- On a utilisé un modèle pour la modélisation du rayonnement solaire, la différence entre le rayonnement solaire direct mesuré et théorique est de 10 %,

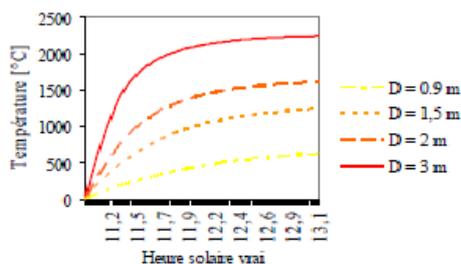


Figure.5 montre l'influence du miroir sur la température de l'absorbeur.

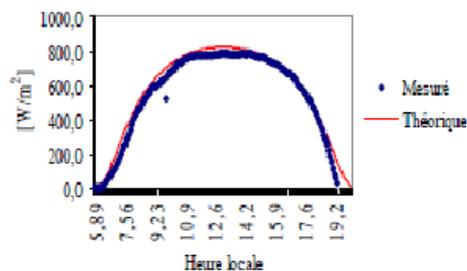


Figure.4 L'éclairement solaire direct du 27/06/2004.

ce qui valide le modèle proposé (figure 2).

- Par la suite, une étude a été faite afin d'établir une relation entre l'augmentation du diamètre du miroir et la température atteinte au niveau de l'absorbeur comme le montre la figure 5.

- Après établissement d'un bilan thermique général du système, des résultats ont été obtenues après mesures réelles en comptant sur les termes du bilan thermique en question.

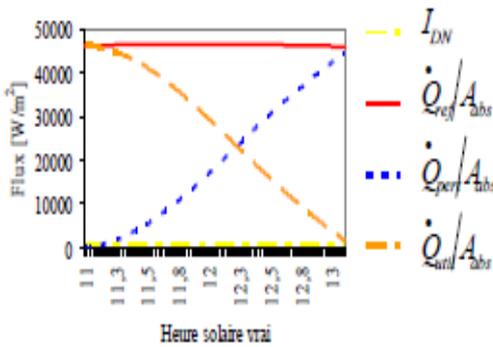


Figure.8 Variation des flux thermique du 22/07/2008 et de 22/12/2008

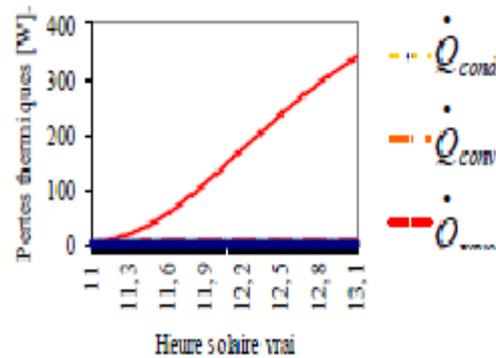


Figure.10 Variation des pertes thermique du 22/07/2008

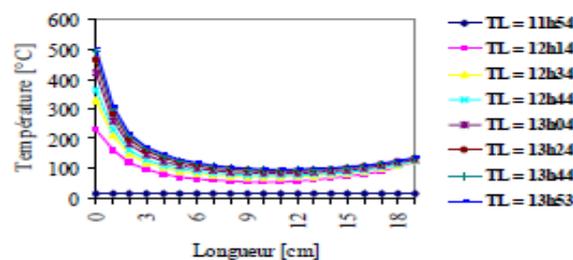


Figure.12 Distribution de la température de l'eau au niveau du récepteur

Conclusion :

Ce travail s'est intéressé à l'étude des différents transferts de chaleur au niveau du récepteur du miroir sphérique. L'énergie thermique recueillie peut être utilisée sous différents prototypes que ce soit d'une manière directe ou bien via conversion.

Au niveau du récepteur, les différents modes de transferts de chaleur sont représentés via un bilan thermique global. On remarque cependant que les pertes thermiques par rayonnement sont les plus importantes par rapport aux deux autres modes de transferts de chaleur à savoir la conduction et la convection. Ceci est une interprétation logique de la loi de Stephan Boltzman.

En ce qui concerne la partie expérimentale, on peut sortir avec les résultats suivants :

* l'augmentation du diamètre du réflecteur entraîne une augmentation de la température du fluide.

* le rendement thermique du concentrateur est d'autant meilleur quand la température du récepteur est basse.

* possibilité de prédiction de l'évolution du champ de température dans l'espace et dans le temps au niveau du récepteur.

* **Etude et réalisation d'un concentrateur solaire parabolique [36]**

Résumé :

Ce travail vise la construction et l'étude d'un concentrateur solaire parabolique (paraboloïde de révolution). Un travail qui se répartit sur quatre axes principaux, l'étude du gisement solaire et son estimation. Le deuxième chapitre est destiné à l'étude d'un système de poursuite du soleil (tracer). Le troisième chapitre évoque une étude théorique du concentrateur parabolique orientée essentiellement vers l'étude optique du parabolique. Le quatrième chapitre vise l'étude des échanges thermiques au niveau du récepteur du parabolique et c'est alors que notre intérêt se porte particulièrement par l'étude de cette thèse. Le cinquième chapitre est consacré à une étude pratique du concentrateur parabolique.

Résultats :

Pour la présente thèse notre intérêt s'est porté essentiellement à l'étude de transferts thermiques au niveau du récepteur. Les différents échanges thermiques peuvent être résumés dans ces quelques lignes.

Le rayonnement solaire incident est réfléchi par le réflecteur parabolique en enregistrement des pertes dépendantes du rendement optique du récepteur :

$$Q_a = I_a A_a \eta_{opt}$$

On évoque ensuite les différentes pertes thermiques au niveau du récepteur :

$$Q_p = Q_{p,cd} + Q_{p,cv} + Q_{p,ry}$$

On remarque alors que les pertes via rayonnement sont alors les plus importantes en vérifiant la loi de Stephan Boltzmann.

- On conclue que la puissance utile reçue au niveau du récepteur est celle reçue initialement au niveau du récepteur de laquelle sont soustraites les pertes thermiques au niveau du récepteur.

- On conclue avec l'expression de l'efficacité thermique au niveau de l'absorbeur et qui est donnée par l'expression suivante :

$$\eta = \frac{Q_a}{I_a A_a}$$

- On ajoute à cela les différents résultats obtenus lors de l'expérimentation du concentrateur parabolique :

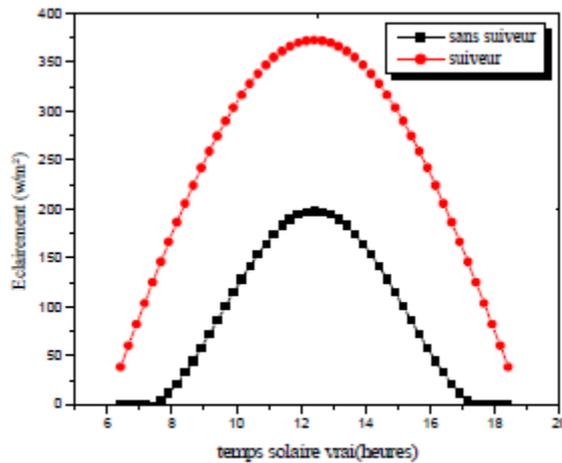


Figure V.1- Evolution théorique de l'éclairement solaire direct sans suiveur et avec suiveur durant la journée du 25 janvier 2004

- cette première figure V.1 montre l'intensité de l'éclairement direct récolté avec suiveur et sans suiveur, où la valeur est considérablement plus grande avec un système suiveur qu'avec un système qui ne possède pas de suiveur (poursuite manuelle)

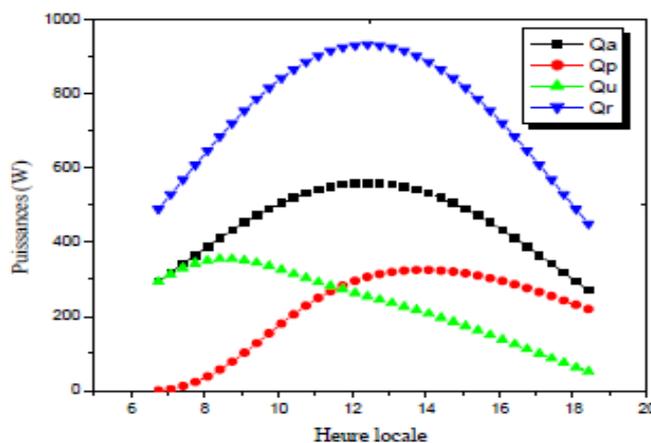


Figure V.6- Les différentes puissances en fonction du temps durant la journée du 25/7/2004

Q_r : puissance reçue à l'ouverture de la parabole

Q_a : puissance solaire absorbée par l'absorbeur

Q_u : puissance utile

Q_p : puissance correspondant aux pertes thermiques

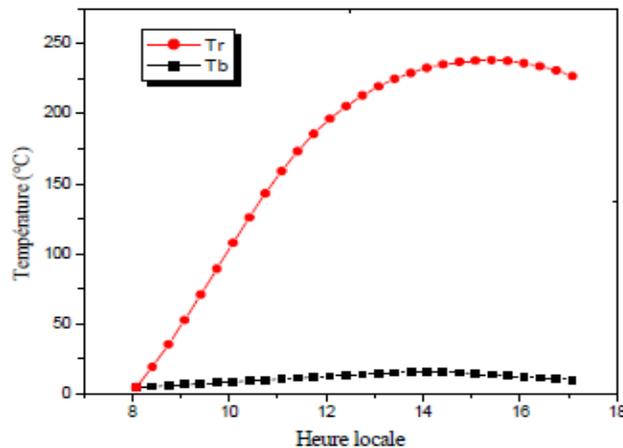


Figure V.3- Différentes températures en fonction du temps durant la journée du 25/1/2004

T_r : température au niveau du récepteur (absorbeur)

T_b : température ambiante

Conclusion :

Cette thèse traite la construction et l'étude d'un concentrateur parabolique, il est vrai que l'évaluation optique du concentrateur parabolique ne correspond pas à notre pas. Notre objectif à travers l'étude de cette thèse étant l'étude thermique du concentrateur parabolique qui correspond à l'étude thermique du concentrateur sphérique puisqu'il s'agit de concentrations dites ponctuelles dans les deux cas. On ajoute à cela l'évocation de quelques résultats de la manipulation en ce qui concerne l'importance du suiveur, les quantités de chaleurs récoltées au niveau de l'absorbeur ou bien l'évaluation de la température en fonction de l'axe horaire d'une journée de tests.

4. Conclusion :

Ce premier chapitre nous a permis de connaître les différents paramètres qui régissent notre système, nous avons ainsi pu avoir une idée globale sur le système et ses caractéristiques.

Nous avons aussi pris connaissances des différents principes de base de l'optique géométrique et sans laquelle la caractérisation de notre système serait impossible.

Aussi nous avons mis le point sur quelques travaux touchant notre sujet d'un angle ou un autre, ce qui nous a permis de construire une perspective solide sur le système dans sa globalité.

1. Introduction :

L'étude du gisement solaire est une étape très importante dans le cas des concentrateurs solaires. La source motrice d'un concentrateur solaire est le soleil, chose logique que sans toutes les données concernant le soleil (course, paramètres...Etc.) ce qu'on appelle gisement solaire, l'étude du concentrateur solaire serait impossible.

Dans le présent chapitre, notre intérêt se portera sur deux axes principaux :

- Le premier étant l'évocation de toutes les coordonnées solaires et leur compréhension, car comme déjà évoqué dans le chapitre précédent, le concentrateur solaire qu'on étudie poursuit le soleil selon deux axes, ces deux axes sont l'azimut du soleil ainsi que sa hauteur. Il est pour cela primordial d'avoir une idée claire sur toutes les données solaires.

- Le deuxième étant l'étude d'un modèle pour la modélisation du rayonnement solaire direct (unique composante à utiliser dans les systèmes à concentration). Ce modèle est le modèle r.sun, on parle alors du même modèle utilisé pour l'élaboration de l'atlas solaire européen.

Notre but avec l'élaboration de ce présent modèle est d'élaborer un programme Matlab avec lequel on pourra modéliser le rayonnement solaire pour une journée donnée. Avec ceci, on pourra alors faire une comparaison avec les données mesurées par le pyranomètre d'expérimentation ainsi que la station météorologique du CDER de Bouzaréah.

La problématique à laquelle on veut porter réponse est le manque considérable des stations météo en Algérie, il est alors nécessaire d'élaborer des modèles valables pour la modélisation du gisement solaire en Algérie. Si la modélisation est fructueuse en comparaison avec les données pratiques mesurées, le modèle établi sera alors performant et valable pour l'étude et la modélisation du gisement solaire.

1. La position du soleil :

Les ondes électromagnétiques provenant du soleil portent l'énergie, la projection de cette énergie 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.

2.1. Sphère céleste :

La sphère céleste est une sphère imaginaire, qui admet pour centre la terre, et pour rayon la Distance terre – soleil. Les différentes caractéristiques sont représentées sur la figure (II. 1) :

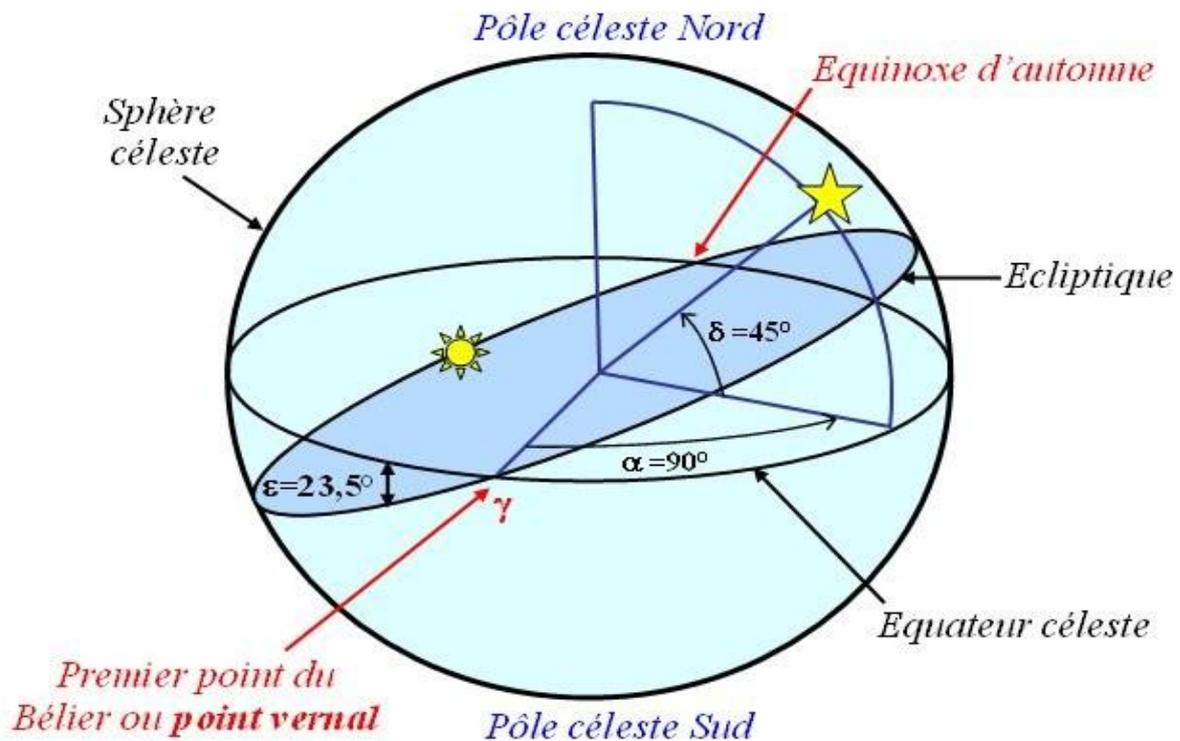


Figure II-1: sphère céleste

2.2. Les coordonnées géographiques :

Ce sont les coordonnées angulaires qui permettent le repérage d'un point sur la terre (figure 2-2) :

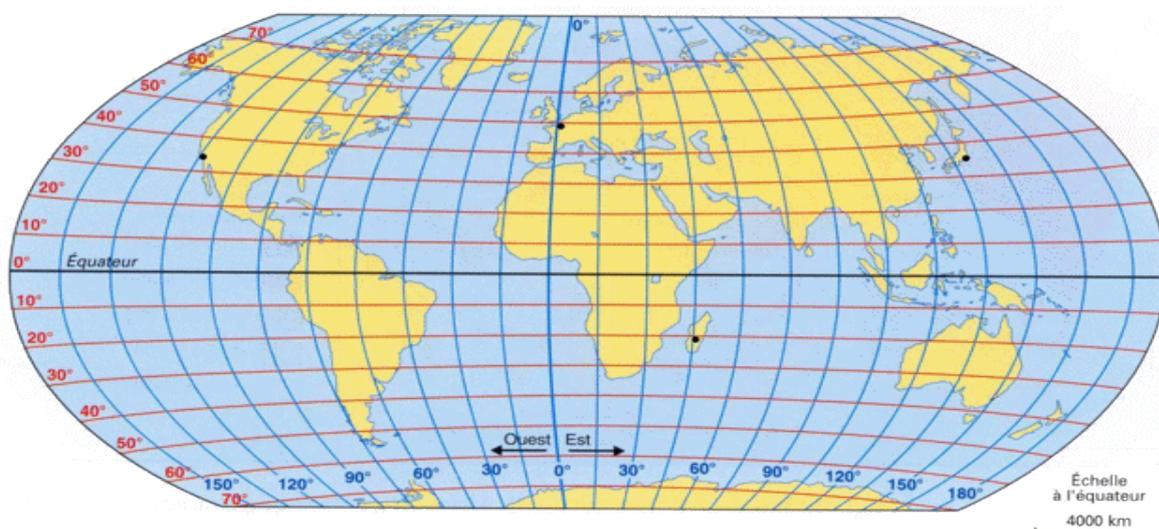


Fig. II-2: coordonnées géographiques

2.2.1. Latitude :

La latitude d'un lieu donné est l'angle formé par la verticale de ce lieu et le plan de l'équateur. Elle est exprimée en degrés, elle est comptée de 0 à 90° à partir de l'équateur vers les pôles, positivement vers le nord et négativement vers le sud.

2.2.2. Longitude :

La longitude d'un lieu donné est l'angle formé par le méridien de ce lieu avec le méridien d'origine. A partir de cette origine elle varie de 0 à 180° positivement vers l'est et négativement vers l'ouest.

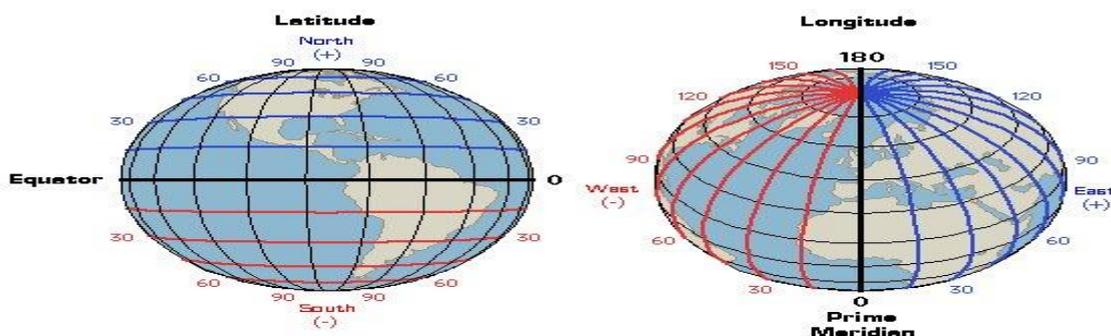


Figure. II-3. Longitude et latitude

2.2.3. L'altitude :

C'est l'altitude d'un point correspondant à la distance verticale entre ce point et une surface de référence théorique (on prend 0 pour le niveau de la mer), elle est exprimée en mètres.

2.3. Les coordonnées horaires :

2.3.1. La déclinaison :

La déclinaison étant l'angle formé par la direction du soleil avec le plan équatorial, elle varie au cours de l'année entre $-23,45^\circ$ et $+23,45^\circ$. Elle est nulle aux équinoxes (21 mars et 21 septembre), maximale au solstice d'été (21 juin) et minimale au solstice d'hiver (21 décembre). La valeur de la déclinaison peut être calculée par la valeur suivante [8] :

$$\delta = 23,45 \sin(0,98 (284 + j)) \quad \text{II. 1}$$

Avec : δ : la déclinaison mesurée en degrés

j : le numéro du jour dans l'année à partir du premier janvier (1^{er} janvier = 1)

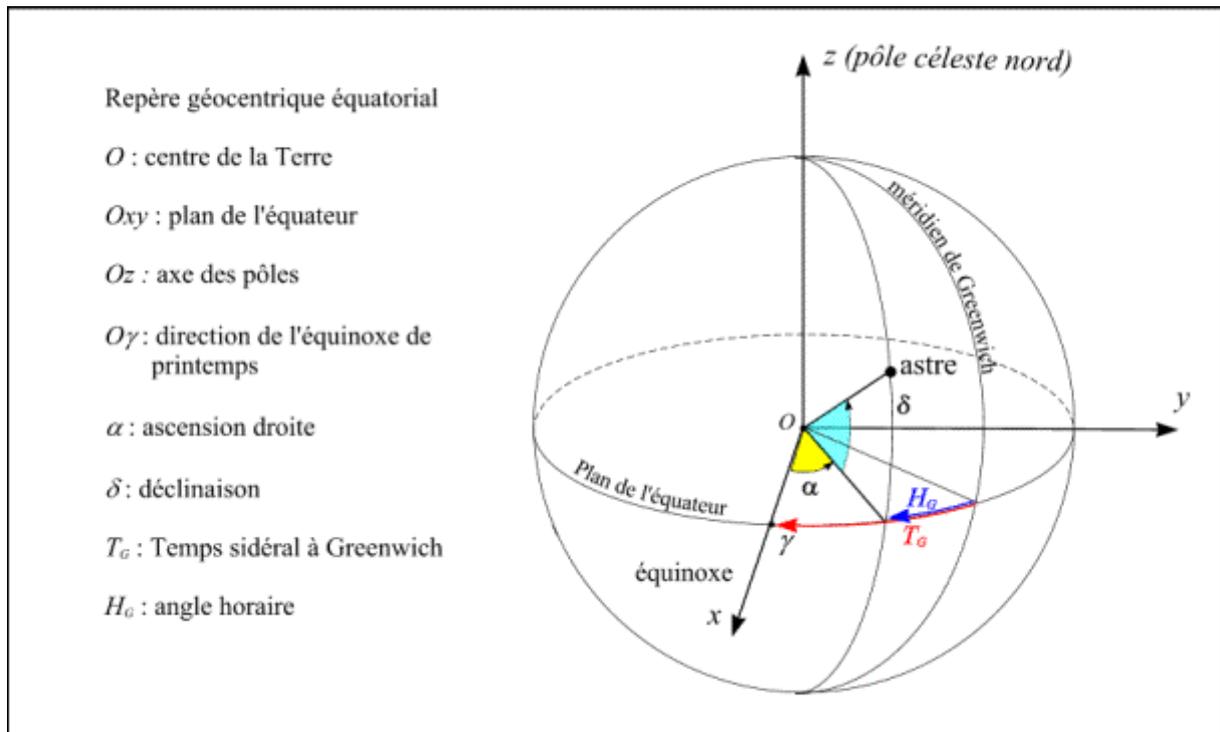


Fig. II.4. Coordonnées horaires

2.3.2. L'angle horaire ω :

C'est l'angle formé par le plan méridien du lieu et celui passant par la direction du soleil, il correspond au déplacement angulaire du soleil vers l'est ou vers l'ouest du plan méridien local. Il définit le véritable temps solaire [8]

$$\omega = 15 (TSV - 12) \quad \text{II. 2}$$

Avec :

TSV : temps solaire vrai.

2.4. Coordonnées horizontales azimutales :

Dans ce cas, le repérage du soleil se fait par l'intermédiaire deux angles : l'azimut et la hauteur du soleil.

2.4.1. L'azimut a :

C'est l'angle formé par la projection de la direction du soleil et la direction sud.

La relation de l'azimut est donnée par [8] :

$$\sin a = \frac{\sin H_G * \sin \delta}{\cos h} \quad \text{II. 3}$$

$$a = \sin^{-1} \left(\frac{\sin H_G * \sin \delta}{\cos h} \right) \quad \text{II. 4}$$

Avec :

δ : déclinaison du soleil

ω : angle horaire du soleil

h : hauteur du soleil

2.4.2. La hauteur du soleil h :

Est l'angle formé par la direction du soleil et le plan horizontal, varie entre 0 et 90°.

Au lever et au coucher du soleil, la hauteur vaut 0°.

Elle est donnée par l'expression suivante : [8]

$$\sin h = \sin \varphi \cdot \sin \delta + \cos \varphi \cdot \cos \delta \cdot \cos H_G \quad \text{II. 5}$$

$$h = \sin^{-1}(\sin \varphi \cdot \sin \delta + \cos \varphi \cdot \cos \delta \cdot \cos H_G) \quad \text{II. 6}$$

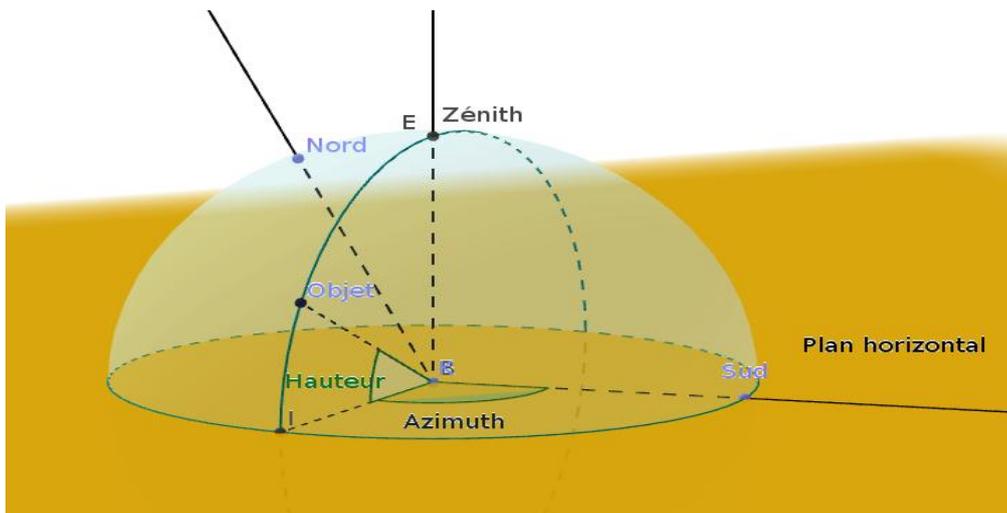


Fig. II-5. Hauteur du soleil

2.5. Position du soleil par rapport à un observateur :

L'énergie solaire que reçoit une surface quelconque est régie par des lois astronomiques et géométriques. Ces dernières faisant intervenir la latitude du lieu, la déclinaison solaire, l'heure du jour et enfin l'orientation de la surface réceptrice.

La position du soleil dépend du temps solaire, du numéro du jour dans l'année, elle est exprimée par différents angles :

2.5.1. Angle du zénith :

C'est l'angle entre la verticale d'une surface et un rayon du soleil.

2.5.2. Angle d'azimut :

C'est l'angle que fait le plan horizontal mesuré à partir du sud avec la projection horizontale de la normale sur la surface, il est également donné comme angle entre le méridien local et la projection horizontale de la normale avec la surface.

2.5.3. Angle d'incidence :

C'est l'angle entre le rayon solaire direct et la normale extérieure du la surface du plan.

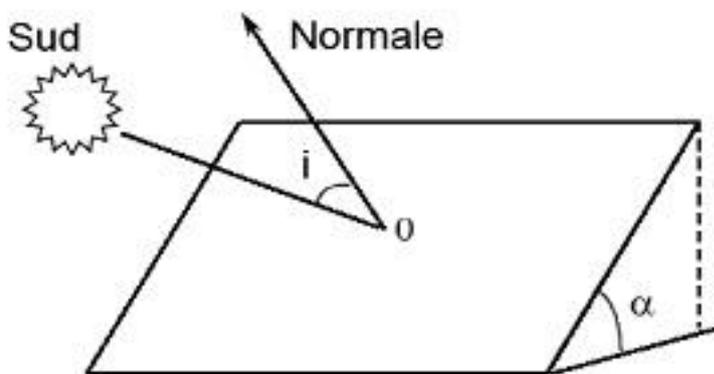


Fig. II-6. Angle d'incidence

2.6. Le temps solaire :

Pour les applications de l'énergie solaire, il faut faire intervenir le temps solaire vrai, qui se calcule en tenant compte de l'écart entre le temps solaire moyen et le temps local.

2.6.1. Temps solaire vrai :

Pour des applications solaires on doit faire intervenir le temps solaire vrai, qui se calcule en tenant compte de l'écart entre le temps solaire moyen. Le temps solaire vrai est donné par la relation suivante [9]

$$TSV = 12 + \frac{h}{15} \quad \text{II. 7}$$

TSV : 12 heures si $h = 0$

h est compté positivement l'après midi.

Le temps solaire vrai peut être donné aussi par la relation suivante [9] :

$$TSV = T_L - C + E_t + \frac{L_{ref} - L}{15} \quad \text{II.8}$$

Avec :

T_L : Temps local

C : décalage horaire

L : la longitude du lieu

E_t : l'équation du temps

L_{ref} : longitude de référence (Greenwich)

2.6.2. Temps solaire moyen :

Le temps solaire moyen diffère peu du temps solaire vrai, cette différence définit l'équation du Temps E_t [9] :

$$E_t = 9.87 \sin 2B - 7.53 \cos B - 1.5 \sin B \quad \text{II.9}$$

L'équation du temps est donnée en relation plus précise par :

$$E_t = 229.2(0.000075 + 0.001868 \cos B - 0.032077 \sin B - 0.014615 \cos 2B - 0.04089 \sin 2B) \quad \text{II.10}$$

$$B = \frac{360(j - 81)}{364} \quad \text{II.11}$$

Avec : j est le numéro du jour dans l'année, à partir du premier janvier

E_t est en minute

3. Estimation de l'éclairement solaire :

3.1. Définition :

L'éclairement solaire est défini comme étant la puissance (W/m^2) reçue par unité de surface réceptrice plongée dans un flux énergétique. L'énergie solaire (constance solaire moyenne à l'entrée de l'atmosphère, $1367 W/m^2$) subit une dégradation lorsqu'elle traverse l'atmosphère, une partie seulement de cette énergie est disponible au sol. Ce rayonnement solaire se décompose en deux parties principales qui sont le rayonnement solaire direct (I_{DN}) et le rayonnement solaire diffus (D). La somme de ces deux rayonnements est appelée : rayonnement solaire global (G).

3.2. Problématique :

Le problème du manque de station météorologique en Algérie reste un problème persistant auquel sont confortés les spécialistes dans tous les domaines qui ont recours à l'énergie solaire. En effet, afin d'évaluer les performances d'une technologie solaire, il est primordiale d'avoir des données météorologiques fiables et continues.

L'Algérie dispose de 54 stations de mesure d'éclairement du réseau de l'office national de la météorologie [11], ce qui reste très peu pour couvrir une superficie de $2\,500\,000\text{ Km}^2$, encore ces stations ne sont pas toutes en fonctionnement ce qui implique moins de superficie couverte par les mesures réelles.

Face à ces problématiques, une estimation de l'éclairement solaire s'impose. On a fait appelle à un modèle assez récent r.sun pour l'estimation de l'éclairement solaire direct par ciel clair.

Le choix de l'estimation du rayonnement solaire direct est lié au choix du système étudié, les systèmes à concentration n'utilisent que le l'éclairement direct pour la conversion photothermique.

Nous avons choisis le site de Bouzaréah pour prendre les mesures réelles pour deux raisons principales ;

La première étant la disponibilité des données mesurée, la deuxième est liée au fait que les expérimentations sur notre système se sont déroulées au sein du CDER Bouzaréah.

3.3. Modèle r.sun :

r.sun est un modèle d'estimation du rayonnement solaire développé par GRASS, c'est un système libre et source ouverte d'information géographique. Le système GIS est capable de traiter les données matricielles, vecteurs topologiques, traitements d'images et données graphiques. [12]

r.sun calcule directement l'éclairement direct, diffus et réfléchi pour le jour, la surface et les conditions atmosphériques données. La fonction r.sun est très efficace dans plusieurs domaines de l'énergie solaire pour des applications thermiques ou photovoltaïques. Le fichier historique de la carte de données enregistre plusieurs paramètres, y compris : le lever et coucher du soleil, déclinaison, irradiation extraterrestre, longueur du jour ...etc. [13]

Il est à noter que r.sun permet aussi à ses utilisateurs de spécifier une heure locale pour le calcul de l'angle d'incidence du soleil et/ou les cartes matricielles de l'éclairement ainsi que l'effet de l'observation topographique.

GRASS a commencé récemment à l'utiliser pour l'estimation des rendements potentiels des installations photovoltaïques. [14]

3.4. Développement du modèle r.sun :

3.4.1. Eclairement solaire direct par ciel clair :

L'éclairement direct par ciel clair est donné par [14] :

$$I_{DN}^* = G_0 * \exp[(-0.8862 * T * m * d_r(m))] \quad \text{II.12}$$

$$I_{DN} = h * I_{DN}^* \quad \text{II.13}$$

Avec :

T : coefficient de trouble total de Link

m : masse d'air atmosphérique

d_r(m) : épaisseur de la masse d'air optique de Rayleigh dépendant de *m*

h: hauteur du soleil

G₀: éclairement extarrestre

3.4.2. Eclairement extraterrestre :

L'éclairement extraterrestre est donné par [14] :

$$G_0 = I_0 * e \quad \text{II.14}$$

Avec :

I_0 : constante solaire = 1367 w/m²

e : facteur de correction tenant compte de la distance terre – soleil

Avec :

$$e = 1 + 0.03344 \cos (j' - 0.048869) \quad \text{II.15}$$

Avec :

$$j' = 2 \pi j / 365.25 \quad \text{II.16}$$

j' = angle du jour calculé en radians.

3.4.3. Masse atmosphérique :

On appelle masse d'air m_A 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 [6]. 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 [15] :

$$m_A = \frac{\frac{p}{P_0}}{\sin(h_0^{corr}) + 0.50572 (h_0^{corr} + 6.07995)^{-1.6364}} \quad \text{II.17}$$

$$\text{avec : } \frac{p}{P_0} = \exp\left(\frac{-z}{8434.5}\right) \quad \text{II.18}$$

h_0^{corr} : hauteur corrigée du soleil

avec : z : altitude du lieu = 345 mètres pour Bouzaréah

3.4.4. Hauteur corrigée du soleil :

$$h_0^{corr} = h + Dh \quad \text{II. 19}$$

h est la hauteur du soleil donnée par l'équation (II. 6) :

Dh est un facteur correcteur de la hauteur du soleil dont l'équation est donnée par [12] :

$$Dh_0 = \frac{0.061359 * (0.1594 + (1.123h_0) + 0.06565h_0^2)}{(1 + 28.9344 h_0 + 277.3971 h_0^2)} \quad \text{II. 20}$$

3.4.5. Epaisseur d'air optique de l'atmosphère de Rayleigh :

L'épaisseur d'air optique est donnée par [12] :

pour $m \leq 20$

$$d_r(m) = 6.6292 + (1.7513 mA) - (0.1202 mA^2) + (0.0065 mA^3) - (0.00013 mA^4) \quad \text{II. 21}$$

pour : $mA > 20$

$$d_r(m) = 10.4 + (0.718 mA) \quad \text{II. 22}$$

3.4.6. Facteur de trouble total de Link :

Le facteur de trouble atmosphérique de linke TL représente le nombre d'atmosphères idéales qui, si elles étaient superposées, entraîneraient la même atténuation que l'atmosphère réelle. 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, selon la formule de l'équation II.12.

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

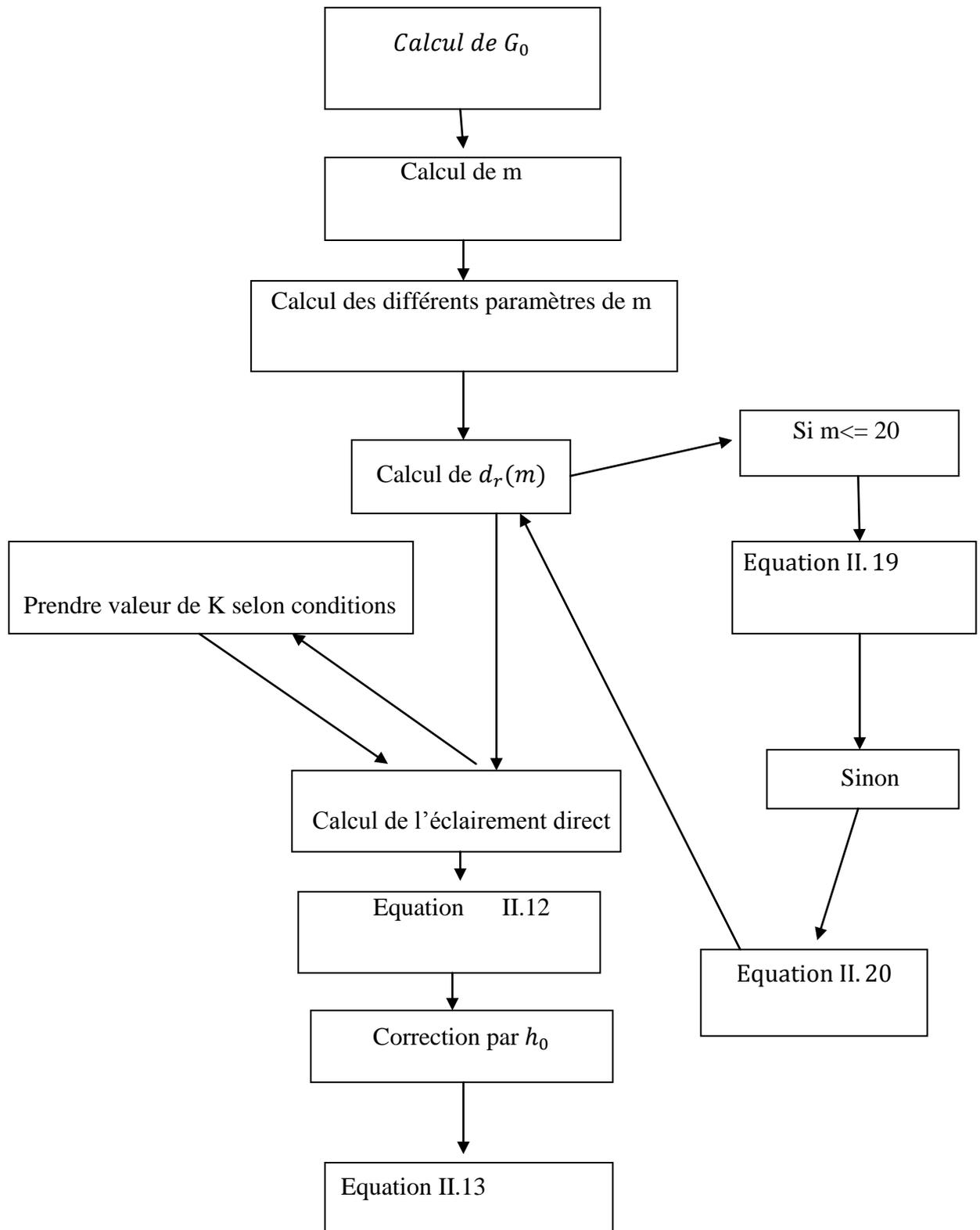
Malheureusement, ces données ne sont pas toutes disponibles, par contre des tables relatives au facteur de Linke sont très abondantes. [15]

Trouble de Link	Couleur du ciel	Bleu profond	Bleu pur	Moyen	Laiteux
	Visibilité au sol	>100 km	60 à 100	30 à 50	12 à 25
	Trouble d'Angström	0.015	0.045	0.110	0.300
Tension de vapeur d'eau t (hPa)	Hauteur d'eau condensable w (g/cm ² ou cm)	T _L	T _L	T _L	T _L
3-5	0.5	2.0	2.6	3.4	4.9
6-8	1.0	2.3	2.9	3.7	5.2
9-16	2.0	2.6	3.2	4.0	5.6
18-30	4.0	2.9	3.5	4.3	5.9

Tableau II.1. Estimation du facteur de trouble Link [37]

3.4.7. Modélisation du modèle :

3.4.7.1. Organigramme de calcul :



3.4.7.2. Résultat et discussion :

L'allure du graphe modélisé par Matlab correspond parfaitement à l'allure de l'éclairement direct mesuré. Sachant que la journée choisie est une journée ciel clair mesuré par la station météorologique du CDER Bouzaréah. L'écart se creuse d'une manière assez visible en fin de journée, ceci peut être dû à l'évaporation des particules d'eau, phénomène assez fréquent dans les journées particulièrement chaudes et que le modèle r.sun ne prévoit pas. Il est à rappeler sur ce point là que le modèle développé est destiné pour l'estimation de l'éclairement direct pour des journées à ciex clairs.

L'erreur mesurée entre les deux courbes est approximative aux 2%, ce qui donne une estimation de grande performance pour le modèle r.sun utilisé.

Avec une erreur de cette valeur, on peut compter sur le modèle en question afin d'estimer l'éclairement direct dans le cas de ciel clair. Sachant que des modèles plus connus comme le modèle de Capderou ont reçu beaucoup de critiques qui se réfèrent à la fiabilité de leurs estimations [15]

- Il faut signaler que le modèle r.sun est un modèle performant pour le cas d'un ciel très clair, dans le cas contraire la marge d'erreur se creuse rapidement pour ne plus donner des résultats d'estimations fiables.

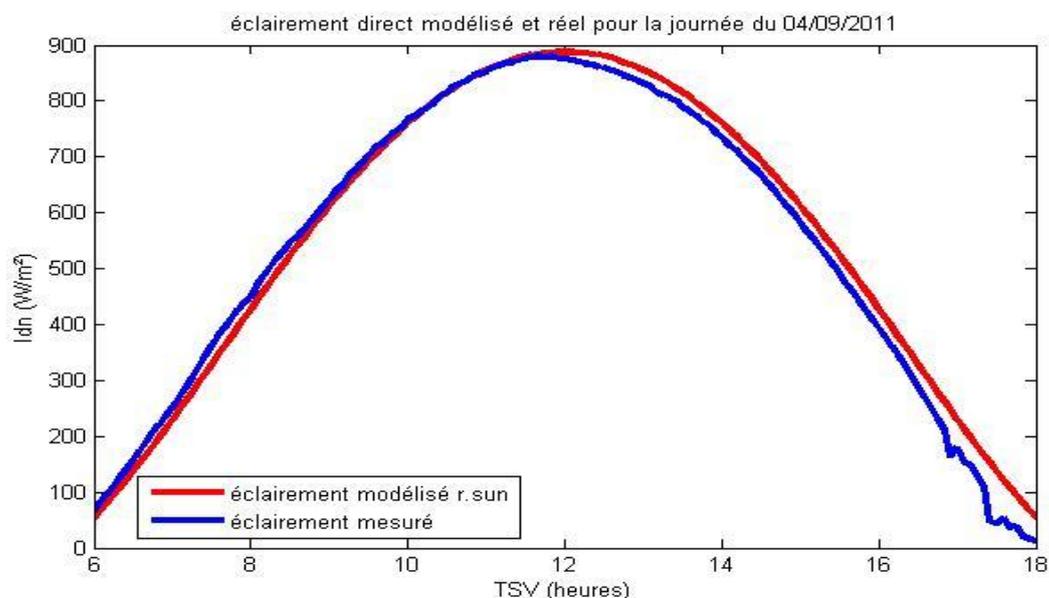


Fig. II. 7. Eclairement modélisé et mesuré pour la journée du 04/09/2011

4. Conclusion :

L'étude du gisement solaire est une étape très importante de notre travail, nous avons pu alors avec ce chapitre faire une étude globale du gisement solaire qui constitue la source énergétique de notre système.

Notre étude du gisement solaire s'est portée sur deux axes principaux ;

- Le premier étant l'étude des différentes coordonnées liées à la position du soleil, ceci est primordial afin de dimensionner plus tard notre système de poursuite altazimutal. La connaissance de ces données est d'une importance majeure dans le cas de système solaires poursuivant le soleil comme l'est le cas du notre.

- Le deuxième axe s'est porté sur la modélisation de l'éclairement solaire direct par le modèle r.sun. On a pu alors relever une très grande efficacité du modèle choisis et ce pour des conditions de ciel clair. Ceci nous mettra en porte de solution face à la problématique du manque de données météorologique en Algérie, ce qui nous permettra d'une autre part de pouvoir dimensionner différents systèmes solaires en se reposant sur un modèle proche de la mesure.

1. Introduction :

Le miroir sphérique à concentration solaire se compose de deux composantes essentielles ; le miroir sphérique enrobé d'une couche réfléchissante et le foyer où se concentrent tous les rayons lumineux réfléchis par le miroir sphérique. En fait, le côté optique représente aussi bien le miroir réfléchissant que le foyer ou bien l'image. C'est alors et pour cette raison qu'une étude optique est obligatoire afin de déterminer les propriétés optiques des miroirs sphériques.

Une étude optique nous permettrait de déterminer où se situerait notre foyer et qui représente pour rappel, le lieu où se concentrent tous les rayons solaires réfléchis et qui pourront être par la suite soit exploités en tant que chaleur (la fusion métallurgique, la cuisson solaire, les systèmes de refroidissements solaires via absorption) ou bien convertis en électricité par un moteur Stirling.

Nous étudierons le miroir sphérique sur deux points , le premier étant l'étude de l'optique géométrique et une deuxième partie dédiée aux différents paramètres de concentration du concentrateur sphérique.

- La deuxième partie de ce chapitre nous conduira à l'étude de l'optique de concentration du miroir sphérique, cette étude visera essentiellement la détermination des différents paramètres et performances optiques de notre systèmes. On s'éloigne alors de la géométrie comme était le cas pour la première partie pour entrer plus dans les différents paramètres en matière énergétique de notre système.

2. Stigmatisme du miroir sphérique :

2.1. Foyer de Gauss pour des rayons parallèles à l'axe optique :

Le cas de stigmatisme approché de Gauss est donné pour un certain nombre de rayons frappant la surface du miroir sphérique et obéissant aux conditions suivantes :

- On doit considérer que les rayons incidents sont tous parallèles les uns aux autres, pour cela et plus la source lumineuse est lointaine, plus ces derniers sont parallèles entre eux.

Pour que le foyer F' soit formé par l'ensemble des rayons réfléchis, il faut :

- Que les rayons soient proches de l'axe optique
- rayons peu inclinés par rapport à l'axe optique.

On dit alors qu'on est dans les conditions dites Gaussiennes [2]

- afin que ce stigmatisme approché soit établi, on doit utiliser de faibles ouvertures (inférieures à $1/10$), les quelles sont définies par le rapport du diamètre utile du miroir sur son rayon de courbure. [16], et qui correspondent à un angle d'ouverture de 22°

En condition de Gauss, le concentrateur sphérique se comporte comme un miroir parabolique. Le concentrateur sphérique implique dans ces conditions un stigmatisme rigoureux. Les rayons réfléchis convergent vers un seul et unique point appelé Foyer de Gauss [2]

Ce point est donné par la relation [2] :

$$F = \frac{R}{2} \quad \text{III. 1}$$

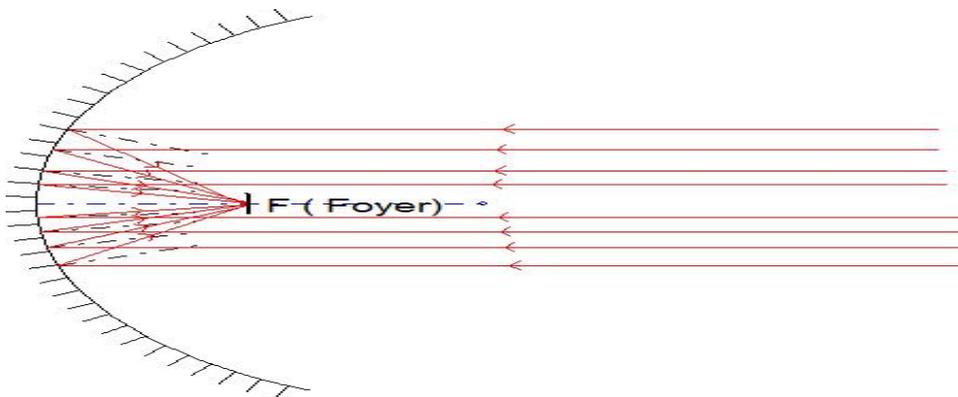


Fig. III-1 : Convergence des rayons réfléchis dans les conditions Gaussiennes

2.2. Foyer de Gauss pour des rayons inclinés par rapport à l'axe optique :

Dans le cas de rayons inclinés par rapport à l'axe optique, les rayons réfléchis convergent vers :

$$F' : \left(\frac{R}{2} \cos \theta, \frac{R}{2} \sin \theta \right) \quad \text{III. 2}$$

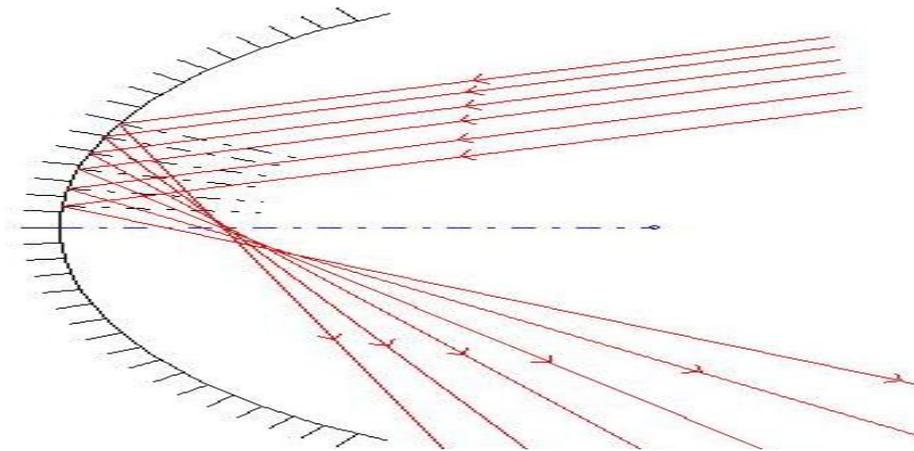


Fig. III-2 : convergence des rayons inclinés par rapport à l'axe optique

2.3. Relations de conjugaison du concentrateur sphérique :

Les relations de conjugaison sont des relations algébriques donnant la position du Foyer image dans les conditions de Gauss.

2.3.1. Relation de Descartes avec origine au centre :

$$\frac{1}{SA} + \frac{1}{SA'} = \frac{2}{SC} \quad \text{III. 3}$$

Avec :

S : sommet du miroir sphérique.

A : foyer de gauss pour des rayons parallèles à l'axe optique (paraxiaux).

C : foyer du miroir sphérique.

2.3.2. Relation de Descartes avec origine au sommet :

$$\frac{1}{CA'} = \frac{-2}{CS} \Rightarrow CA' = -2 CS \quad \text{III. 4}$$

2.4. Dimensions du foyer image :

Les rayons solaires arrivent avec un certain angle sur terre, c'est ce qu'on appelle la taille angulaire du soleil, La taille angulaire du soleil \varnothing vaut $0,5^\circ$. Cette dernière peut être définie comme étant la distance entre le point le plus haut du soleil et le point le plus bas vu par un observateur terrien. [2].

La hauteur limite que peut avoir un récepteur est donnée par [2] :

$$H = \frac{R}{2} \varnothing \quad \text{III. 5}$$

On note que cette relation est valable autant pour des relations dites Gaussiennes que non Gaussiennes.

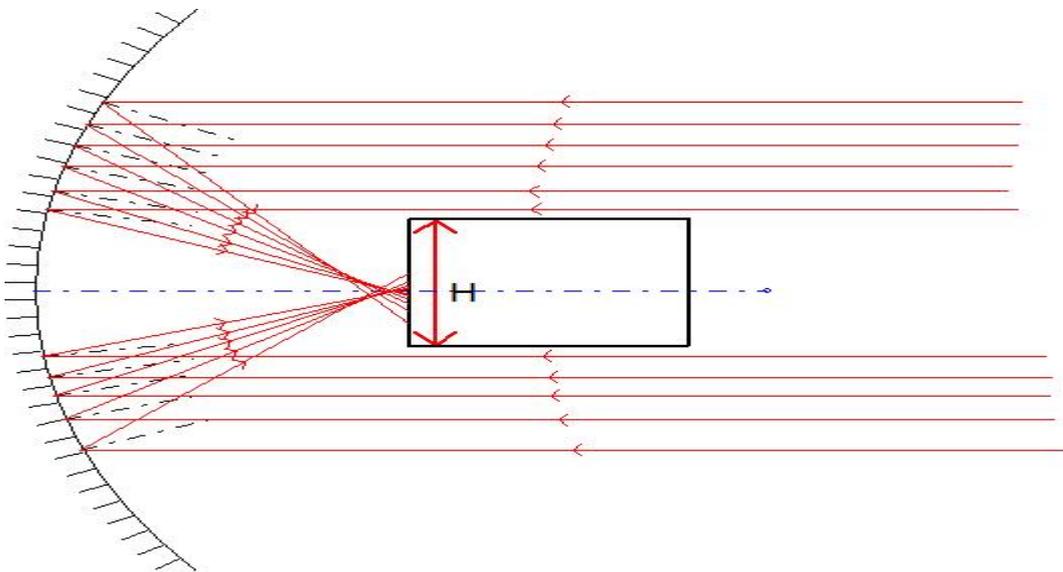


Fig. III-3. Dimension du récepteur

3. Non Stigmatisme du concentrateur sphérique :

3.1. Foyer des rayons marginaux :

Les rayons marginaux sont les rayons frappant le miroir sphérique selon un angle plus grand que celui des rayons paraxiaux, ces derniers donnent naissance à un nouvel foyer s'appelant foyer secondaire : [2] et donné par :

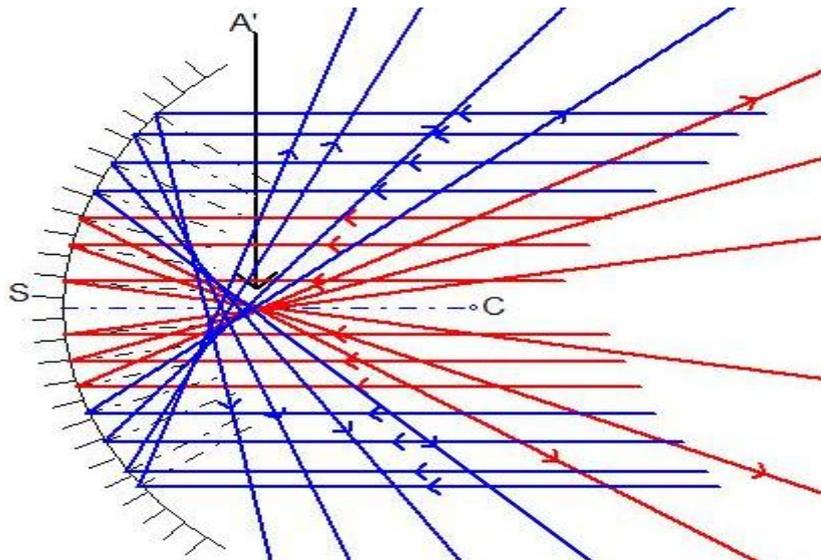


Fig. III-4. Réflexion des rayons marginaux (bleu)

Le foyer image est donné alors par :

$$F' = 1 - \frac{1}{\frac{2}{R} \sqrt{R^2 - \left(\frac{\theta_1}{2}\right)^2}} \tag{III.6}$$

Avec

θ_1 : angle d'ouverture du miroir sphérique

R: rayon de courbure du miroir sphérique

3.2. Foyer de moindre diffusion :

Ce qui est intéressant côté concentration solaire est de trouver un point intermédiaire entre le foyer de gauss et le foyer des rayons marginaux. Dans la pratique, le diamètre d'ouverture D n'étant plus petit par rapport au rayon de courbure R du miroir. Il n'ya plus de stigmatisme. Les rayons réfléchis sont tangents à une surface de révolution à deux nappes appelée **Caustique** : Un point lumineux

situé à l'infini sur l'axe optique n'a plus pour image le point F mais toute une surface. Il en résulte que la concentration est inférieure à celle d'un système stigmatique [16]

Le foyer se trouve dans ces conditions là à [16] :

$$FA = \frac{R}{2} \left(\frac{1}{\cos \theta} - 1 \right) * \tan 2\theta_1 \quad \text{III.7}$$

Avec :

θ_1 : angle d'ouverture du miroir sphérique

3.3. Aberration de sphéricité pour un point d'un axe:

Coupons le faisceau réfléchi par un écran perpendiculaire à l'axe principal. Donnons successivement à l'écran les positions 1, 2, 3, 4, 5 en partant du miroir. Les apparences observées sont indiquées par la figure III.3; les traits forts correspondent aux régions où il y a accumulation de lumière : ce sont les sections par l'écran des nappes de la caustique. Le disque de rayon minimum par lequel passent tous les rayons réfléchis sur le miroir s'appelle disque de moindre diffusion : il correspond à la position 3 de l'écran. La disposition de l'éclairement sur ce cercle est assez compliquée et présente trois maximums. Par contre dans la position 5, on a un maximum d'éclairement très aigu correspondant au foyer F [17]

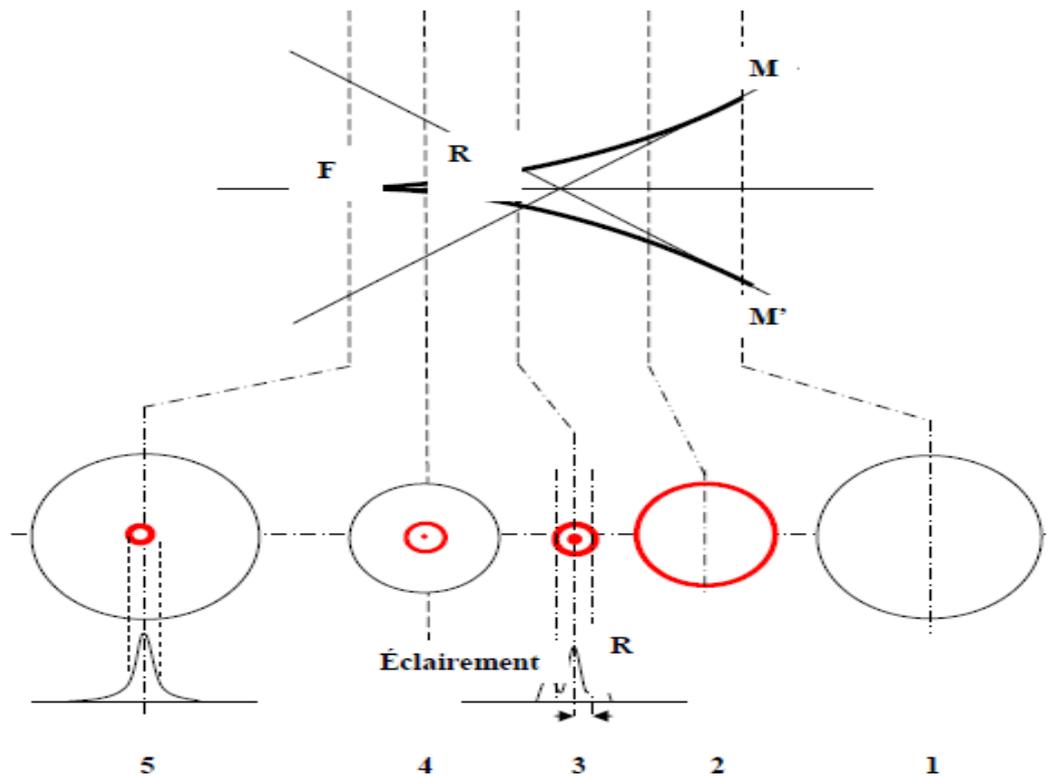


Fig. III-5. Distribution de l'éclairement sur différentes sections de la caustique [18]

3.4. Caustique du miroir sphérique :

Les zones de concentration de la lumière dans un faisceau donnent la surface caustique à deux nappes, la nappe tangentielle et la nappe sagittale qui dans ce cas est dégénérée en une portion de l'axe optique.

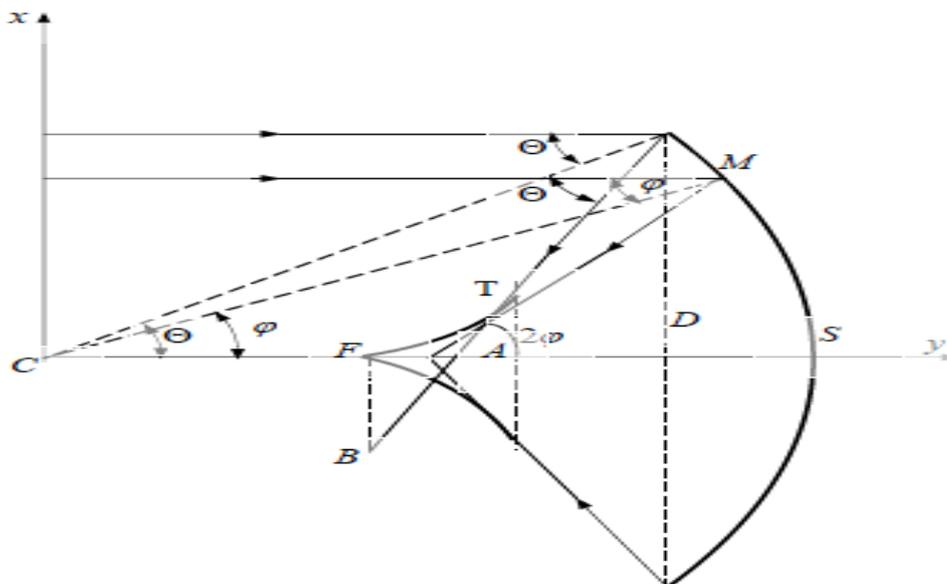


Fig. III-6. Caustique d'un miroir sphérique [18]

3.5. Comparaison entre concentrateurs sphérique et parabolique :

La différence entre un concentrateur paraboloidal et un concentrateur sphérique s'explique au niveau de la fabrication des deux types de concentrateurs. Le concentrateur paraboloidal est beaucoup plus difficile à mettre en œuvre, ajoutant que ce dernier nécessite une technique et un coût élevés.

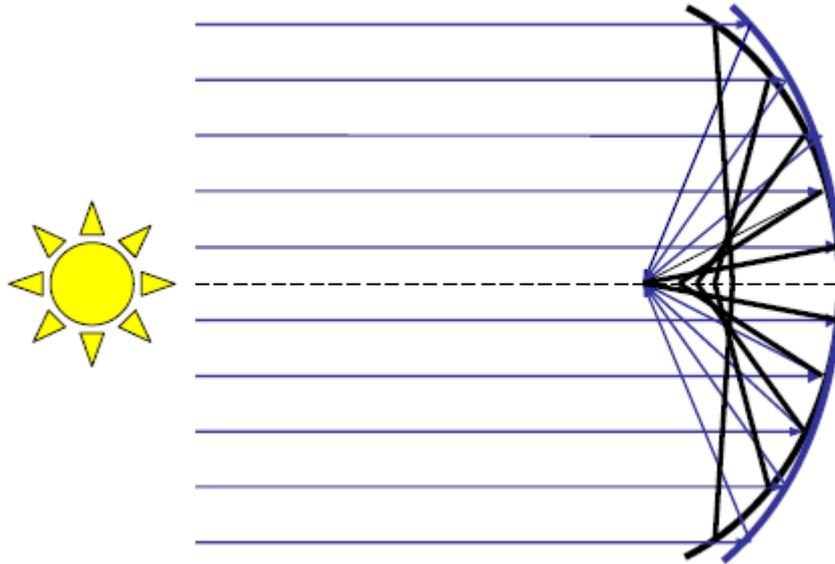


Fig. III-7. Comparaison entre un paraboloidal et un miroir sphérique [18]

La concentration du concentrateur paraboloidal est très supérieure à la concentration sphérique, la concentration d'un paraboloidal augmente avec l'angle d'ouverture du capteur, par contre le concentrateur sphérique atteint les performances du concentrateur paraboloidal pour un angle d'ouverture de 22° où la concentration est maximale [18, 29].

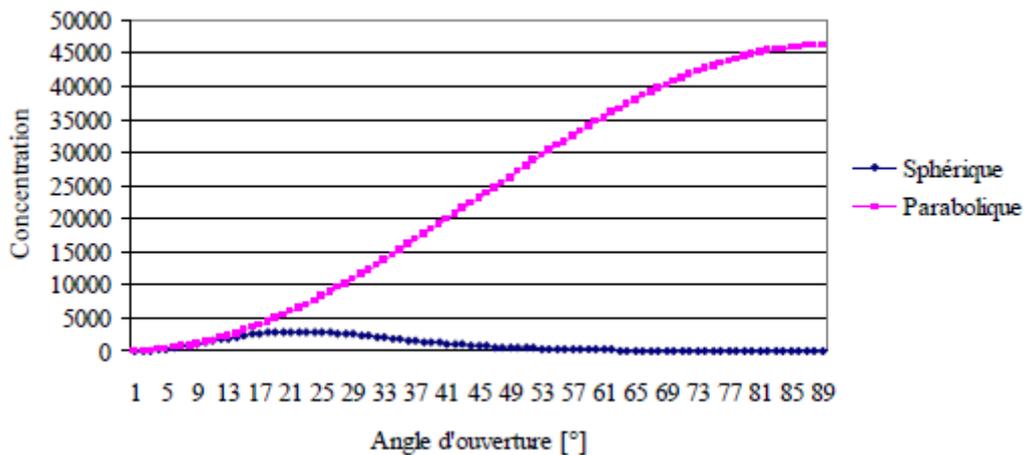


Fig. III-8. Comportement d'un concentrateur sphérique comparé à un concentrateur parabolique [18]

La figure III.8 montre l'étude du rapport (C_p/C_s), C_p concentration géométrique d'un miroir parabolique s'ouverture 30° , sur C_s concentration du miroir sphérique, en fonction d'angle d'ouverture. Pour des valeurs importantes de cet angle. Le miroir sphérique lui préférable du fait de sa grande simplicité de réalisation. Le transfert thermique au fluide caloporteur est par ailleurs facilité par une répartition énergétique plus uniforme au niveau de surface d'échange [18].

4. Relations des différentes concentrations :

4.1. Concentration idéale (Gauss) :

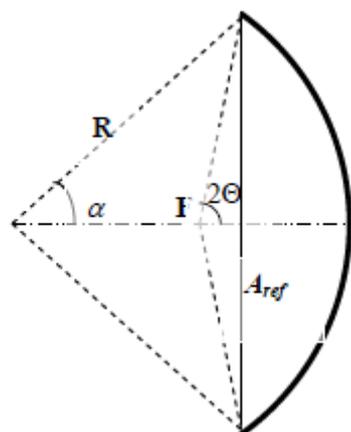


Fig. III-9. Coupe d'un miroir sphérique [17]

$$C_{id\acute{e}ale} = \frac{A_{ref}}{A_G} \quad \text{III. 8}$$

$$C_{id\acute{e}ale} = \left(\frac{4}{\varepsilon} \sin \varnothing\right)^2 \quad \text{III. 9.}$$

La concentration idéale désigne la concentration dans des conditions Gaussiennes, ce qui veut dire que seuls les rayons paraxiaux donnent un foyer image et où le concentrateur sphérique se comporte comme un paraboloïde.

4.2. Concentration géométrique :

La concentration géométrique définit le pouvoir de concentration par rapport aux dimensions à la fois du concentrateur et du récepteur d'un miroir sphérique dans les conditions générales (image gaussienne + image marginale). C'est le rapport de la surface de l'ouverture du réflecteur A_{ref} à celle du récepteur A_{rec} , elle est donnée par la formule :

$$C_g = \frac{A_{ref}}{A_{rec}} \quad \text{III. 10}$$

2.4. Concentration ponctuelle :

Définit l'intensité du pouvoir énergétique du miroir sphérique. Elle donnée par le rapport de l'éclairement solaire direct moyen reçu à l surface du récepteur sur l'éclairement solaire direct reçu à la surface de l'ouverture du réflecteur, elle est donnée par la formule [17]

$$C_0 = \frac{\frac{1}{A_{rec}} \int I_{rec} dA_{rec}}{I_{ref}} \quad \text{III. 11}$$

4.3. Formules de calcul des différentes concentrations :

On utilise les formules suivantes pour caractériser les différents types de concentrations [17] :

- Concentration idéale :

$$C_{idéal} = \frac{A_{ref}}{A_G} = \frac{\text{section du réflecteur}}{\text{Surface de Gauss}} \quad \text{III. 12}$$

- Concentration géométrique :

$$C_G = \frac{A_{ref}}{A_R} = \frac{\text{section du réflecteur}}{\text{surface image réelle du soleil}} \quad \text{III. 13}$$

- Concentration énergétique :

$$C_0 = \frac{I_G}{I_{ref}} = \frac{\text{Flux moyen en Gauss}}{\text{Flux direct en section du réflecteur}} \quad \text{III. 14}$$

- Efficacité d'un concentrateur :

$$\eta_{coc} = \frac{C_0}{C_{idéal}} = \frac{\text{Concentration énergétique}}{\text{Concentration idéale}} \quad \text{III. 15}$$

- Facteur Four :

$$FF = \frac{C_{0,effective}}{C_0} = \frac{\text{Concentration optique effective}}{\text{Concentration optique}} \quad \text{III. 16}$$

Avec :

$C_{0,effective}$: Concentration énergétique réelle d'un système, elle tient compte des pertes dues aux réflexions ; aux irrégularités géométriques et la présence de masques [17]

5. Conclusion :

Ce chapitre nous a permis de faire une étude optique globale sur le miroir sphérique. C'est grâce aux principes fondamentaux de l'optique géométrique que notre étude a pu se faire.

On peut résumer cette étude en sortant avec les points principaux suivants :

- Le miroir sphérique n'est stigmatique que pour une faible ouverture, cette ouverture est de l'ordre de 22° . Au-delà de cet angle d'ouverture, le miroir sphérique ne se comporte plus comme un parabolöide en donnant un point mais il donne alors toute une surface de réflexion.
- Des rayons plus éloignés des rayons paraxiaux, qu'on appelle rayons marginaux donnent lieu à un deuxième foyer, se situant avant le foyer de Gauss.
- Le point recherché est un point intermédiaire entre les deux foyers où se concentrent le maximum de rayons solaires réfléchis, c'est ce qu'on appelle le Foyer de moindre diffusion.

1. Introduction :

L'étude thermique au niveau du récepteur est une étape très importante au sein de notre étude. Cette dernière nous permettra entre autre d'évaluer les différents échanges, apports et pertes thermiques à la fois au niveau du réflecteur mais aussi au niveau du récepteur. Pour commencer, ce n'est pas toute l'énergie solaire qui sera captée par le réflecteur et cette dernière ne sera non plus pas totalement réfléchi.

Ensuite on évaluera la quantité d'énergie thermique reçue au niveau du récepteur, cette dernière est aussi réduite à cause des différentes pertes, et ce, via les différents types de transferts de chaleur (conduction – convection – rayonnement). On parle alors en second degré de pertes purement thermiques.

On notera alors que les pertes thermiques par conduction et convection sont en première approximation proportionnelles à la température, tandis que les pertes via rayonnement sont par contre proportionnelles à la puissance quatrième de la température, comme nous l'indique la loi de Stephan Boltzmann.

Notre but à travers ce chapitre étant alors de caractériser tous ces transferts de chaleurs, pertes et quantités d'énergies à différents niveaux de notre système. Cette étude nous donnera une vue théorique de l'efficacité de notre système, ce qui nous construira une passerelle par la suite vers la pratique qu'on verra au chapitre suivant et ce, pour une comparaison et une évaluation des différences enregistrées, mais surtout leur explication technique.

2. L'Absorbeur/ Récepteur :

L'absorbeur d'un capteur quelconque a pour rôle de transformer le rayonnement électromagnétique reçu en chaleur, mais aussi de transmettre cette chaleur au fluide (liquide, gaz) [20]

Le récepteur devrait avoir certaines propriétés pour un bon fonctionnement [20]:

- * Un facteur d'absorption thermique aussi voisin que possible de l'unité.
- * Une bonne inertie thermique.
- * Une bonne résistance chimique et corrosive vis-à-vis le fluide qu'il contient.
- * Un facteur de l'émission dans l'infrarouge aussi faible que possible.
- * Une bonne conductivité K_{rec} et diffusivité thermique D_{rec} .

Il est à noter qu'il est important que le récepteur soit de matériau métallique car seuls les métaux possèdent de bons coefficients de conduction de chaleur (cuivre : 360 w/m.k , aluminium : 200 w/m.k , acier 60 w/m.k) [17]

Les récepteurs solaires et en fonction de leur surface de transfert peuvent être classés en 2 catégories [17] :

- 1- **Surface Externe** : Il existe plusieurs configurations possibles, planes, coniques, cylindriques ou bien sphériques, dépendantes de la répartition, de l'intensité du flux, de la température et de l'application. Ce genre de récepteur s'applique généralement dans la gamme de température de l'ordre de 300- 400 °C maximum.
- 2- **Surface interne ou cavité** : Ce type de récepteur est bien adapté pour le cas où l'intensité du flux et la température de travail sont élevés. Le flux énergétique concentré entre dans l'ouverture dont la surface est généralement 5 à 10 fois inférieure à celle de la surface de transfert dans la cavité. C'est un moyen efficace pour augmenter le coefficient d'absorption et diminuer les pertes à la fois

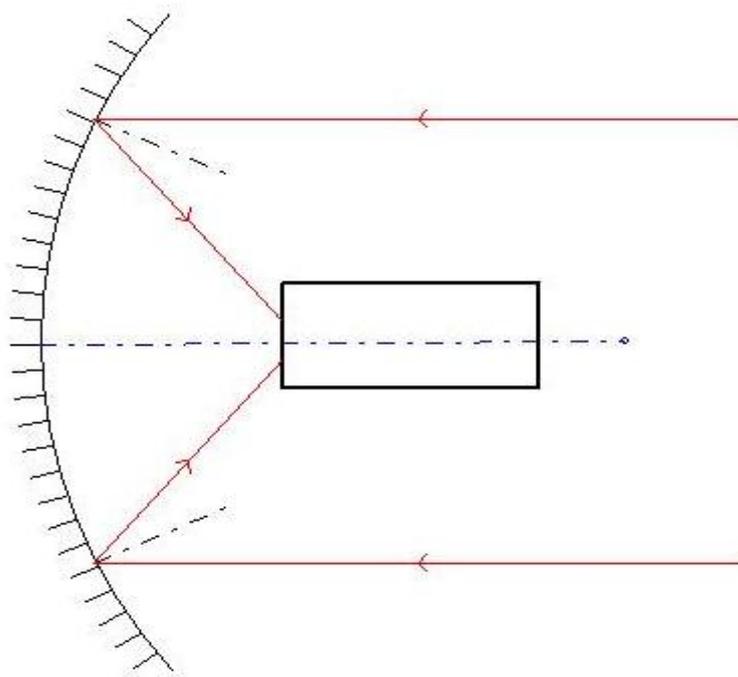


Fig. IV-1. Foyer à surface externe

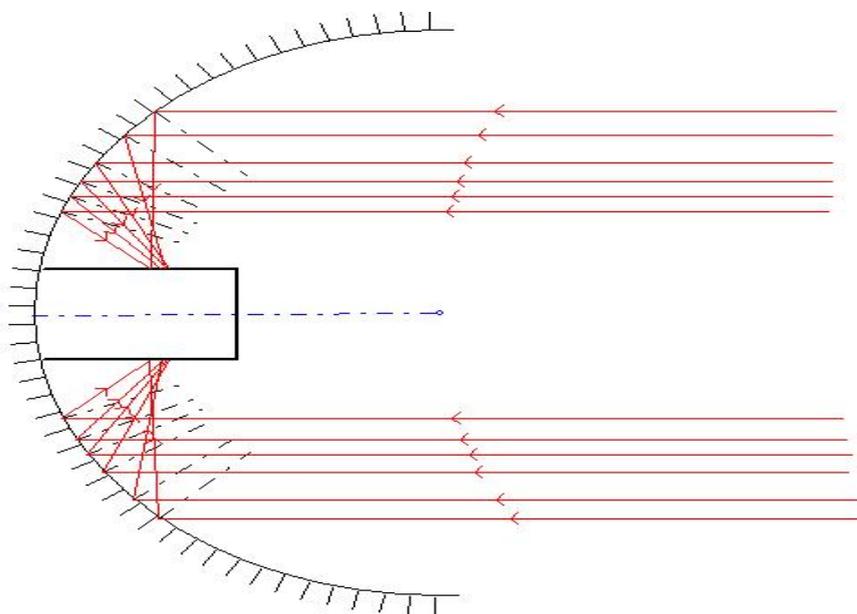


Fig. IV-2. Foyer à surface interne

- Comme on le remarque sur la figure, dans la première figure le récepteur est carrément collé à la surface du réflecteur d'où probabilité de fusion du récepteur dans le cas de hautes températures et c'est pour cette raison qu'on n'utilise ce genre de récepteur que dans le cas des basses températures, on utilise aussi ce type de construction dans le cas où c'est le récepteur qui poursuit le soleil et non pas le miroir, dans ce cas le récepteur fera une translation tout au long de la circonférence interne du miroir sphérique ou parabolique (300 – 400 °C Max).

2.1. Dimension du récepteur :

- Le récepteur devrait aussi avoir une dimension bien précise et étudiée, et c'est en fonction de la taille angulaire du soleil et qui a été abordée au sein du chapitre précédent et aboutie à la relation suivante :

$$H = \frac{R}{2} \emptyset \quad \text{IV.1}$$

2.2. Surface sélective :

Le rôle de la surface absorbante est de transformer le rayonnement de courte longueur d'onde en chaleur. La fraction du rayonnement solaire incident qui est absorbé par le capteur est appelée facteur d'absorption solaire α_{rec} de la surface. Le facteur complémentaire à 1 de cette fraction correspond au facteur de réflexion solaire ρ_{rec} , dans le cas où la plaque absorbante est opaque, le facteur de transmission τ_{rec} est nul. L'absorbeur est chauffant.

On appelle sélectivité, le rapport du facteur d'absorption solaire α_{rec} sur le facteur d'émission infrarouge ϵ_{rec} . [21], [22]

3. Bilan thermique au niveau de l'absorbeur :

3.1. Equation générale de l'équilibre thermique :

Afin de procéder à la réalisation d'un bilan thermique sur un absorbeur cylindrique, nous devons isoler la surface qui absorbe le rayonnement solaire concentré par le réflecteur (surface en contact avec le rayonnement concentré).

Le bilan énergétique au niveau de la surface absorbante peut s'écrire sous la forme suivante [23] :

$$\dot{Q}_u = (m_{rec} c_{rec} + m_f c_f) \left(\frac{dT_{rec}}{dt} \right) \quad IV.2$$

\dot{Q}_u : L'énergie utile transmise par la surface du concentrateur vers le récepteur.

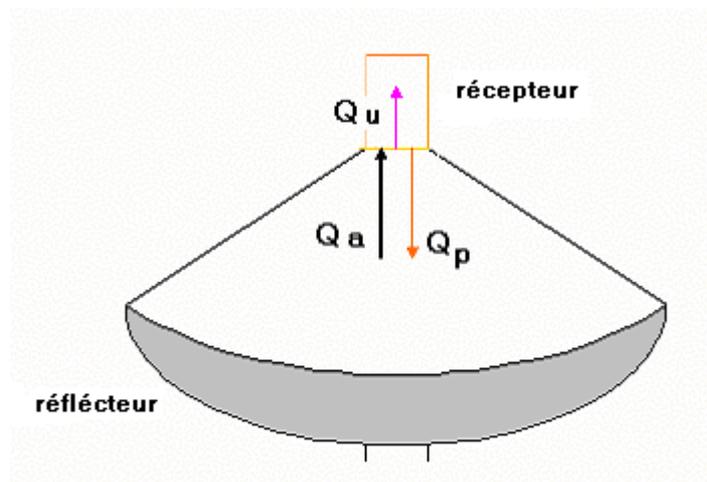


Fig. IV-3. Bilan énergétique du concentrateur

L'énergie utile pour un absorbeur solaire étant généralement définie comme l'énergie transmise au fluide de l'absorbeur par transfert thermique [23], c'est-à-dire :

$$\dot{Q}_u = \dot{Q}_{rec} - \dot{Q}_p \quad IV.3$$

\dot{Q}_{rec} : l'énergie optique qui atteint la surface plane du récepteur [23] et qui est donnée par :

$$\dot{Q}_{rec} = \eta_{opt} I_{DN}. \quad \text{IV.4}$$

$$\dot{Q}_{ref} = I_{DN} A_{ref} \quad \text{IV.5}$$

\dot{Q}_{ref} : L'énergie captée par le réflecteur.

Le rendement optique est donné par [24] :

$$\eta_{opt} = \Gamma \alpha_{rec} \tau_{rec} \rho_{ref} \quad \text{IV.6}$$

Γ : Rapport de captation (fraction de l'énergie reflétée par le réflecteur) [25]

$$\Gamma = \frac{(A_{ref} - A_{rec})}{A_{rec}} \quad \text{IV.7}$$

α_{rec} = Facteur d'absorption de la surface de l'absorbeur.

τ_{rec} = Facteur de transmission de l'absorbeur.

ρ_{ref} = Facteur de réflexion de surface du réflecteur (miroir sphérique).

3.2. Puissance correspondante aux pertes thermiques :

Lorsque l'énergie solaire arrive sur la **surface d'ouverture du récepteur**, elle relève sa température au-dessus de la température ambiante, cette modification de la température provoque un mécanisme de pertes de chaleur, et ce, via convection – rayonnement – conduction.

La puissance due aux pertes thermiques est donnée par l'équation suivante [26]

$$\dot{Q}_p = \dot{Q}_{p'cd} + \dot{Q}_{p'cv} + \dot{Q}_{p'r} \quad \text{IV.8}$$

\dot{Q}_p : Puissance correspondante aux pertes thermiques.

$\dot{Q}_{p'cd}$: Pertes via conduction.

$\dot{Q}_{p'cv}$: Pertes via convection.

$\dot{Q}_{p'r}$: Pertes via rayonnement.

3.2.1. Pertes par conduction :

Les pertes par conduction sont liées à la nature du matériel utilisé et sont données par [27]:

$$\dot{Q}_{p'cd} = K_{rec} A_{rec} (T_{rec} - T_{amb}) \Delta x$$

Les pertes par conduction

K_{rec} : Conductivité de du récepteur

Δx : épaisseur de l'absorbeur.

3.2.2. Pertes par convection :

Le phénomène convectif reste toujours un des phénomènes de transferts thermiques les moins connus, ce dernier est lié à la vitesse du vent mais aussi à sa direction sur le site en question.

Les pertes via convection sont proportionnelles à la surface du récepteur et la différence entre la température de surface de l'absorbeur et la température ambiante (air ambiant).

$$\dot{Q}_{p'cv} = h_{cv} A_{rec} (T_r - T_{amb}) \quad \text{IV.9}$$

Où :

A_{rec} : Surface d'ouverture du récepteur.

T_r : Température du récepteur.

T_{amb} : Température ambiante.

h_{cv} : Coefficient de transfert par convection est donné par [27] :

$$h_{cv} = \frac{(Nu \cdot K_{air})}{d} \quad \text{IV.10}$$

$$Nu = 0.664 Re^{1/2} Pr^{1/3} \quad \text{IV.11}$$

$$Re = \frac{V_{vent} \cdot d}{\nu} \quad \text{IV.12}$$

Avec :

V_{vent} : vitesse du vent.

K_{air} : Conductivité thermique de l'air.

ν : viscosité de l'air.

d : Diamètre du récepteur.

3.2.3. Pertes par rayonnement :

Ce type de pertes dépend de la forme géométrique du récepteur mais plus particulièrement de la température du récepteur. Ils sont proportionnelles à l'émissivité de l'absorbeur [26]. et sont données par la formule :

$$\dot{Q}_{p,r} = \varepsilon \sigma k_{rec} (T_r^4 - T_c^4) \quad \text{IV.13}$$

Où :

ε : Facteur d'émissivité de l'absorbeur.

σ : Constante de Stephan Boltzmann ($5,670 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$).

T_c : Température du ciel.

La température équivalente du rayonnement du ciel dépend de la densité d'air et de son contenu en humidité. , Quand l'humidité relative est haute où bien qu'on soit au niveau de la mer, on peut alors supposer que la température du ciel est identique à la température de l'air ambiant. Cependant, et pour une basse humidité relative ou au niveau d'altitudes élevées, la température du rayonnement du ciel peut être inférieure de 6 °C que la température ambiante [26]

$$\text{Habituellement on prend [1] } T_c = T_{amb} - 6 \quad \text{IV.15}$$

La formule de Swinbank (1963) :

$$T_c = 0,552 T_{amb}^{1,5} \quad \text{IV.16}$$

On peut écrire l'équation (9) sous la forme suivante [30] :

$$\dot{Q}_{p,r} = A_r h_r (T_r - T_a) \quad \text{IV.17}$$

Avec :

$$h_r = \varepsilon \sigma \frac{(T_r^4 - T_a^4)}{T_r - T_a} \quad \text{IV.18}$$

3.3. Expression de la température de l'absorbeur :

En combinant les équations précédentes, on obtient une équation simple et globale de l'énergie utile de notre système :,

- en remplaçant les différents termes de l'équation 2, et après calculs , l'équation devient comme suit [30] :

$$\dot{Q}_u = \eta_{opt} I_{DN} A_{ref} - A_{rec} [h_{cv} (T_{rec} - T_{amb}) + h_r (T_{rec} - T_{amb}) + h_{cd} (T_{rec} - T_{amb})] \quad IV.19$$

$$\dot{Q}_u = A_{rec} [(\eta_{opt} I_{DN} \left(\frac{A_{ref}}{A_{rec}} \right) - (h_{cv} + h_r + h_{cd}) (T_{rec} - T_{amb}))] \quad IV.20$$

$$\dot{Q}_u = \eta_{opt} I_{DN} A_{rec} - U_{glob} (T_{rec} - T_{amb}) A_{ref} \quad IV.21$$

Où U_{glob} est le coefficient global des pertes de chaleur données par :

$$U_{glob} = h_{cd} + h_{cv} + h_r \quad IV.22$$

On remplace :

$$P_{opt} = \eta_{opt} I_{DN} C_g$$

Aussi, on avait :

$$mc = m_{rec} c_{rec} + m_f c_f \quad IV.23$$

On aura alors l'équation suivante :

$$mc dT_{rec} = A_{rec} [P_{opt} - U_{glob} (T_{rec} - T_{amb})] dt \quad IV.24$$

En intégrant entre : t_0 et t , on obtient :

$$\int_{T_{abs}(t_0)}^{T_{abs}(t)} mc dT_{rec} = \int_{t_0}^t A_{rec} [P_{opt} - U_{glob} (T_{rec} - T_{amb})] dt \quad IV.25$$

On trouve au final l'équation suivante :

$$T_{abs}(t) = T_{amb} + \frac{P_{opt}}{U_{glob}} - \left(\frac{P_{opt}}{U_{glob}} - T(t_0) + T_{amb} \right) \exp \left[- \frac{U_{glob} A_{abs}}{MC} (t - t_0) \right] \quad IV.26$$

3.4. Efficacité du concentrateur sphérique :

Il est essentiel de connaître et déterminer les différentes performances du concentrateur solaire pour une étude plus précise mais plus aigüe en ce qui concerne la compréhension du fonctionnement du concentrateur solaire.

L'efficacité du concentrateur solaire se détermine par le rapport de l'énergie absorbée par le récepteur (absorbeur) et celle reçue au niveau de l'ouverture du réflecteur [31, 32].

$$\eta = \frac{Q_{util}}{I_{DN} A_{ref}} \quad \text{IV.27}$$

$$\eta = \frac{\eta_{opt} I_{DN} A_{ref} - A_{rec} U_{glob} (T_{rec} - T_{amb})}{I_{DN} A_{ref}} \quad \text{IV.28}$$

$$\eta = \eta_{opt} - \frac{A_{rec} U_{glob} (T_{rec} - T_{amb})}{I_{DN} A_{ref}} \quad \text{IV.29}$$

Cette équation peut s'écrire autrement :

$$\eta = \eta_{opt} - \frac{U_{glob} (T_{abs} - T_{amb})}{C_g I_{DN}} \quad \text{IV.30}$$

3.5. Température de stagnation :

La température dite de stagnation est atteinte à une température où les pertes thermiques sont égales aux flux du rayonnement solaire incident et donnée par la formule suivante : [32] :

$$\dot{Q}_u = \dot{Q}_{opt} - \dot{Q}_{pert} \quad \text{IV.31}$$

Aux conditions de stagnation, aucune quantité de chaleur n'est fournie au récepteur (absorbeur) $\dot{Q}_{util} = 0$. Le récepteur thermique dans ces conditions là, doit dissiper toute l'énergie qu'il reçoit, On aura alors dans ces conditions là : $\dot{Q}_{abs} = \dot{Q}_{pert}$

En remplaçant par les équations appropriées :

$$\eta_{opt} I_{DN} A_{rec} = U_{glob} (T_{rec} - T_{amb}) A_{ref} \quad \text{IV.32}$$

On déduit la température de l'absorbeur T_{abs} qui représente sa température à l'état de stagnation :

$$T_s = T_a + \frac{(\eta_{\text{opt}} I_{\text{DN}})}{U_{\text{glob}} C_g} \quad \text{IV.33}$$

3.6. Différence de température au niveau de l'absorbeur pour un fluide en circulation :

La chaleur utile \dot{Q}_{util} peut être donnée en équation en fonction du débit massique, de la chaleur spécifique du fluide C_p sous pression constante, la température d'entrée du fluide T_e , ainsi qu'en fonction de sa température de sortie T_s par la relation suivante [33] :

$$\dot{Q}_{\text{util}} = \dot{m} C_p \Delta T = \dot{m} \dot{C}_p (T_s - T_e) = \Gamma \rho_{\text{ref}} \tau_{\text{rec}} I_{\text{DN}} A_{\text{rec}} - A_{\text{rec}} [(h_{\text{cond}} + h_{\text{conv}}) (T_{\text{rec}} - T_{\text{amb}}) + \varepsilon_{\text{rec}} \sigma (T_{\text{rec}}^2 - T_{\text{amb}}^2)] \quad \text{IV.19}$$

4. Conclusion :

Ce chapitre nous a permis d'établir une étude thermique globale au niveau du récepteur, ceci nous donnera une idée claire sur l'efficacité du concentrateur mais aussi sur les différentes performances thermiques de ce dernier et ce en fonction des différents paramètres entrant en jeu (Températures, pertes thermiques, débit du fluide...etc.).

Ainsi ceci nous donnera une idée théorique de l'ensemble des performances thermiques du système avant de pouvoir passer à la pratique, une comparaison entre les deux études (théorique et pratique) nous évaluerons l'éloignement de la perfection du système, autrement dit : l'ensemble des pertes orchestrés par notre concentrateur (pertes thermiques, pertes optiques, pertes dues au système de poursuite...etc.).

1. Introduction :

Ce chapitre vise une étude expérimentale de notre système, notre but durant cette partie est de mettre en parallèle théorie et pratique et de faire une comparaison entre les résultats obtenus dans les deux cas. Il faut signaler que toutes les relations que nous avons pu démontrer ou mentionner durant les chapitres précédents seront appliquées numériquement durant ce présent chapitre.

Ces résultats qui ont été appliqués numériquement à partir d'équations théoriques seront mis en comparaison avec des résultats que nous délivrera la partie pratique. Les résultats théoriques représentent le cas parfait de notre système, ceci veut dire que les résultats obtenus pratiquement seront certainement différents des résultats que l'on pourrait obtenir théoriquement. Car la théorie donne en vérité une perfection des mesures, cette perfection n'existe malheureusement pas ou du moins comme le disait Léonard de Vinci : « Les détails font la perfection, mais la perfection n'est pas un détail »

C'est alors à ces détails que nous nous intéresseront au cours de ce chapitre, ces détails qui nous éloignent du cas parfait mais surtout à leur explication d'une manière logique et pointue.

Toutes les manipulations et étapes seront alors évoquées pas par pas durant ce présent chapitre.

2. Description générale du montage réalisé :

Notre montage est un montage en acier qui consiste en un mouvement à deux axes perpendiculaires l'un à l'autre. On parle alors d'une poursuite en altazimutale (poursuite en hauteur et poursuite suivant l'azimut). Le miroir sphérique est guidé selon le premier axe à l'aide d'un vérin, ce dernier permet la poursuite en hauteur du miroir sphérique. Le deuxième axe est un axe non mécanique, il suffit dans ce cas là de diriger le support du miroir vers la droite ou bien vers la gauche (c'est la poursuite suivant l'azimut). Cette disposition est manuelle, la disposition de poursuite automatique est assez complexe à réaliser mais aussi coûteuse.

Le concentrateur est composé de deux éléments essentiels (pratiques).

1. Un réflecteur
2. Un récepteur (absorbeur)

On peut ajouter à ses éléments un troisième élément non pratique, qui est le support sur lequel repose le concentrateur solaire.

2.1. Description du réflecteur :

Le miroir est une calotte sphérique recouverte d'argent, soutenue par un gabarit en acier (réflecteur).



Fig. V-1. Réflecteur (miroir sphérique)

2.2. Description du récepteur :

Le récepteur se compose de trois pièces essentielles :

2.2.1. Le support plus la tige de fixation :

est un disque en acier fixé sur une tige en acier , ce dernier comporte un trou en son milieu pour la fixation des autres pièces du récepteur. Le réglage en hauteur du support permet de placer le récepteur à la distance focale suivant la hauteur. La tige comporte une vice de fixation qui permet de faire pivoter la tige selon la distance de l'axe optique, pour une fixation axiale du foyer.

2.2.2. Disque Isolant :

L'isolant est un disque de meuleuse, ce dernier a pour but de minimiser les pertes mais aussi de protéger les thermocouples. En effet, lors de l'essai sans disque d'isolation, l'enveloppe en plastique des thermocouples a fondu durant l'expérience.

2.2.3. Disque récepteur en Aluminium :

Le disque final, disque récepteur est un disque en aluminium d'un diamètre $D=10$ cm. Ce dernier présente des excavations de 6 à 2 mm (selon thermocouples) pour la pose des thermocouples.

2.2.4. Thermocouples : les thermocouples utilisés sont du nombre de 06. Ces derniers sont de type k, on distingue entre 03 thermocouples avec sonde et 03 autres thermocouples avec fils (tête de soudure).

Les thermocouples sont reliés au système d'acquisition des données, ainsi qu'à un pyranomètre pour la mesure de l'irradiation solaire.



Fig. V-2. Récepteur réalisé



Fig.V- 3. Quelques photographies du montage

2.3. Caractéristiques du système :

2.3.1. Réflecteur :

Le réflecteur repose sur un support métallique perpendiculaire par rapport au sol.

Le miroir a un coefficient de réflexion d'argent poli de $\rho_{ref} = 0.85$

Tableau : Dimensionnement du réflecteur sphérique :

Diamètre	D = 59.3 cm
Angle d'ouverture	25°
Distance focale	F= 26 cm
Surface d'ouverture	S = 0.3516 m ²

2.3.2. Récepteur :

Nous avons utilisé l'aluminium comme dispositif absorbant, c'est une plaque circulaire de Diamètre $D = 10 \text{ cm}$ et d'une épaisseur $e = 0,4 \text{ cm}$

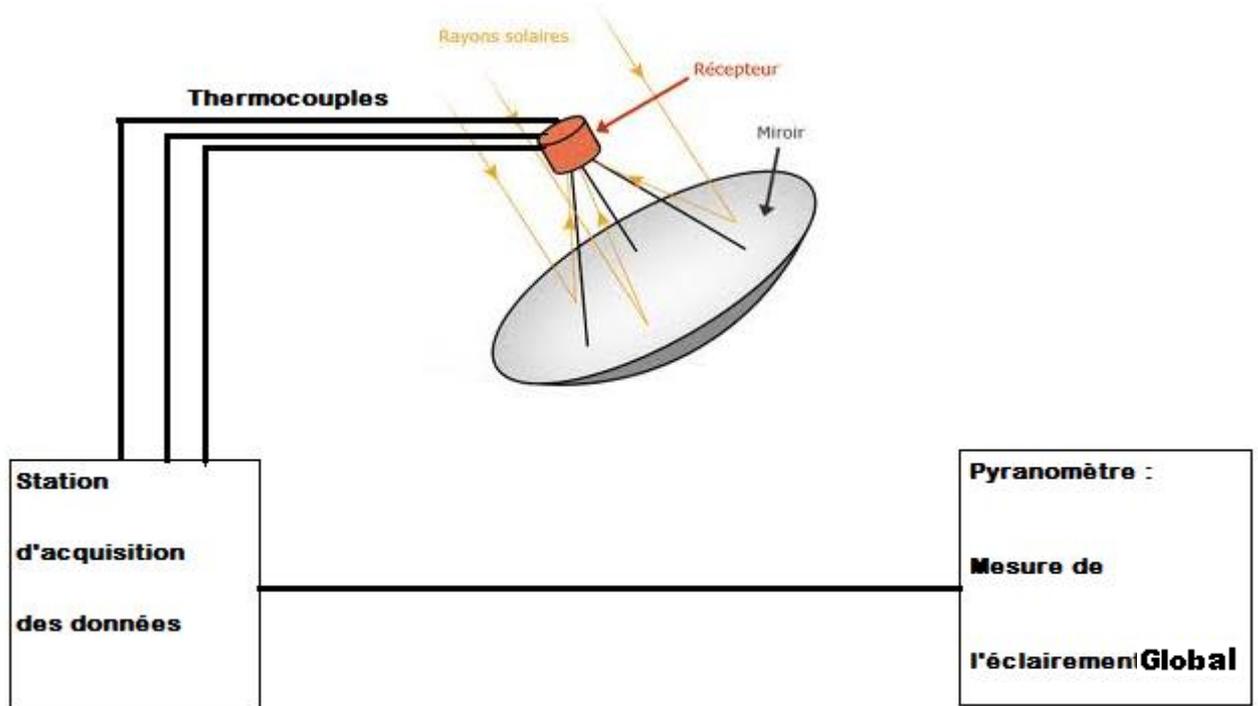


Fig.V-4. illustration du montage réalisé

3. Expérimentations :

3.1. Distribution de la température sur l'axe optique :

3.1.1. Présentation :

La première expérience qu'on a pu réaliser à l'aide du miroir sphérique étant celle de la mesure des températures tout au long de l'axe optique. Cette expérience vise à déterminer le point de moindre. Car et comme on a pu le déterminer dans le troisième chapitre ; deux foyers principaux existent, le premier étant le foyer des rayons marginaux et le deuxième étant celui que forment les rayons dans les conditions Gaussiennes.

Il était alors évident pour nous que le foyer de moindre diffusion se trouverait entre les deux points précédemment cités. Nous avons alors voulu déterminer ce présent point.

Le de confusion minimale est le point où on obtiendrait la température maximale selon l'axe optique. Pour se faire, on a utilisé un pistolet thermocouple à pointeur infrarouge (figure ...). Pour la mesure de la température tout au long de l'axe optique.



Fig.V-5 Thermomètre à infrarouge

3.1.2. Commentaire :

Lors de la réalisation de la présente expérience, on pointa une règle sur l'axe optique, cette dernière ne brûla qu'en point correspondant à 26 cm . Ceci veut dire que puissance thermique nécessaire afin d'incinérer la règle métallique ne s'est trouvé qu'au point 26 cm . Ce qui nous donne alors une fois de plus la certitude que le foyer de confusion minimale se trouve à 26 cm du sommet du miroir sphérique.

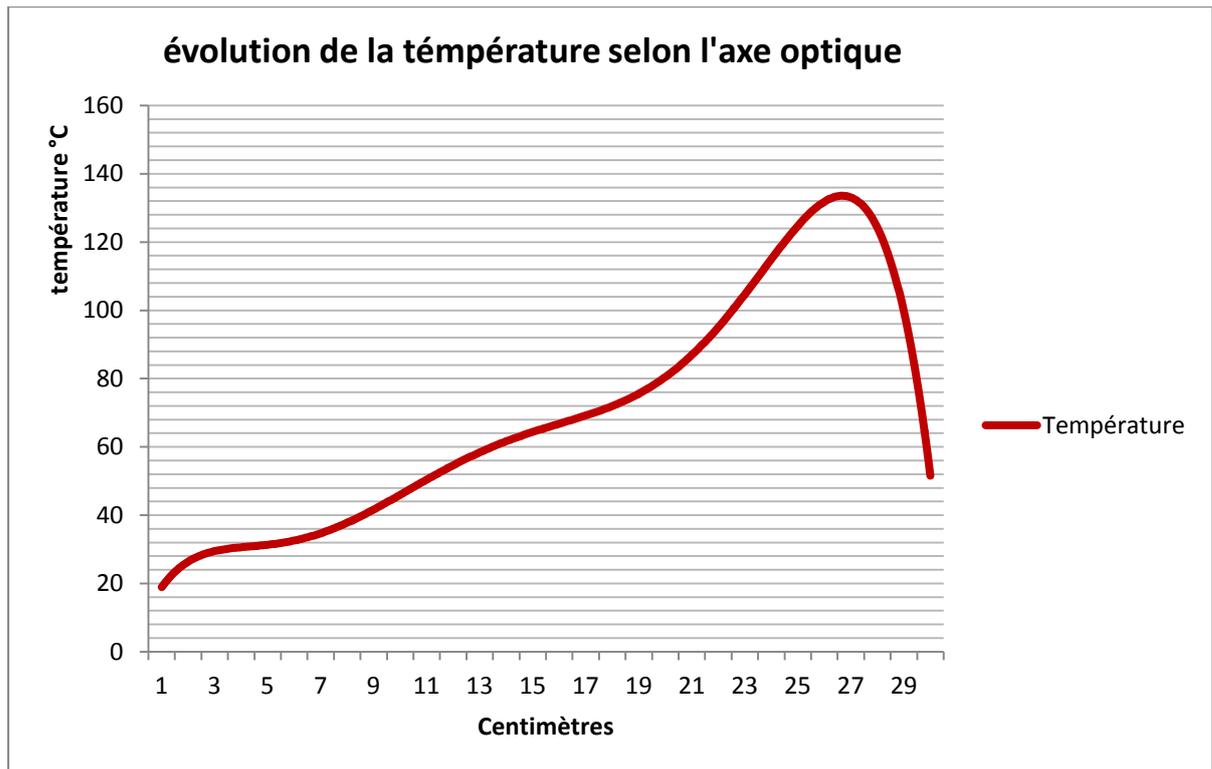


Fig.V-5. Evolution de la température suivant l'axe optique

3.1.3. Discussion :

Le point le plus chaud qu'on a pu atteindre selon l'axe optique étant le point se situant à 26 cm du sommet du miroir. Il est alors clair pour nous que le point de confusion minimale se trouve à cette distance là. Cependant, et si on suit le résonnement suivi dans le chapitre 03, plus on avance selon l'axe optique et plus la température monte jusqu'à ce qu'on atteigne le foyer des rayons marginaux et ce, à cause de la convergence de plus en plus de rayons solaires vers ce point là. Les fluctuations sont dues à différentes raisons, l'une d'elles la variation instantanée du rayonnement solaire, mais aussi à l'influence du vent sur la température atteinte au niveau du récepteur, comme on le verra plus tard.

3.2. Caustique et point de densité maximum :

3.2.1. Commentaire :

- La précédente expérimentation peut aussi s'effectuer d'une autre façon ; en mettant une feuille blanche sur l'axe optique du miroir on peut observer les différentes taches focales sur la feuille blanche.



Fig.V-6. Caustique de réflexion

3.2.2. Discussion :

- En procédant de la zone la plus proche du sommet du miroir vers la zone focale, d'un manière assez rapide qui nous laisse supposer que l'éclairement reçu est constant. On peut observer une zone circulaire lumineuse ; celle-ci converge vers son axe, en se détachant du bord le plus extérieur du miroir. C'est la caustique de réflexion.

En atteignant le foyer des rayons marginaux, un point lumineux correspondant à l'axe optique du miroir apparait sur la feuille blanche. Ce point lumineux est provoqué par les rayons marginaux qui y affluent.

En procédant encore vers l'extérieur, la circonférence lumineuse, diminue de dimension, en augmentant de luminosité dans sa partie centrale jusqu'à un maximum correspondant à la distance focale de moindre diffusion dans la zone intermédiaire entre le foyer des rayons marginaux et foyer de Gauss. [34]

On peut procéder encore vers l'extérieur afin d'observer le foyer dit de Gauss, ce qui nous donnerait un point lumineux avec une auréole autour correspondant aux rayons précédemment réfléchis.

Le point de moindre diffusion où s'est trouvée assez d'énergie afin d'incinérer le papier a correspondu au 26 cm déjà calculé

3.3. Distribution des températures au niveau du récepteur :

L'expérimentation s'est déroulée durant la journée du 16/09/2013.



Fig. V-7. Expérience du 16/09/2013

3.3.1. Problématiques rencontrées lors de l'expérimentation :

- problème des fixations des thermocouples : Il nous a été assez difficile de bien fixer les thermocouples sur la plaque réceptrice, de plus et face aux hautes températures il arrivait qu'un thermocouple se détache de sa place. Il arrivait même que certains thermocouples à fils se dessoudent, ce qui a interrompu plus d'une fois les expérimentations effectuées.
- Vent : on n'a pas pris en considération la fluctuation de la vitesse du vent pour nos expériences, cependant il faut noter que cette fluctuation influe sur les températures atteintes au niveau du récepteur.
- déplacement de la tache focale au niveau du récepteur et ce, à cause du système de poursuite manuel, ceci affecte la mesure des différents thermocouples. De plus, l'absence d'un système de poursuite manuel impliquait une manipulation manuelle constante.
- des voiles nuageux qui ont affecté le rendement du concentrateur durant les expérimentations.

3.3.1. Influence du diamètre du réflecteur sur la température du récepteur :

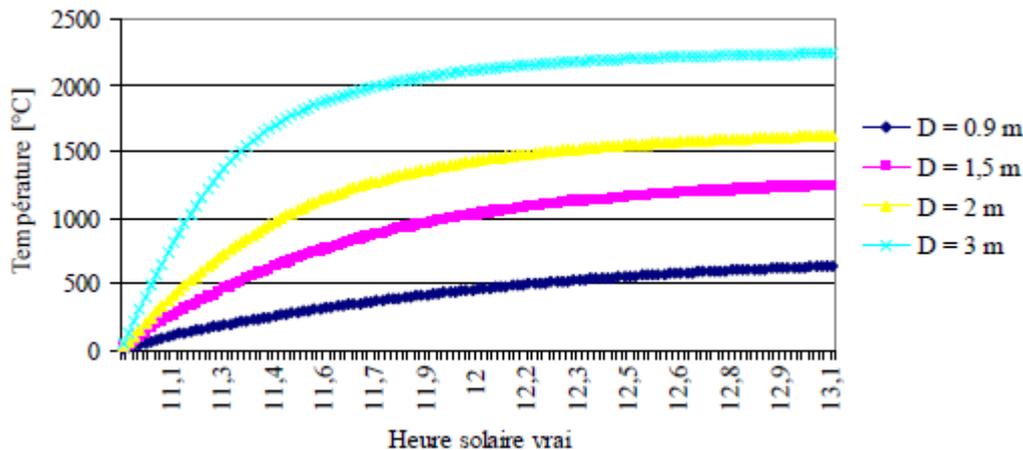


Fig. V-8 Influence du diamètre du réflecteur sur les températures de l'absorbeur

3.3.1.1. Discussion :

On constate d'après la figure que la température de l'absorbeur augmente quand le diamètre du réflecteur (miroir) augmente. Ceci peut s'expliquer par l'augmentation de la concentration géométrique quand le diamètre du réflecteur augmente, ce qui se traduit par une élévation des températures au niveau du récepteur.

- Il faut cependant préciser que les réflecteurs simulés présentent les mêmes caractéristiques optiques (état de surface). Car un réflecteur de qualité supérieure peut atteindre des

températures plus hautes qu'un réflecteur de moindre qualité optique et ce, même si ce dernier possède un diamètre plus important.

3.3.2. Disposition du thermocouple sur la plaque réceptrice :

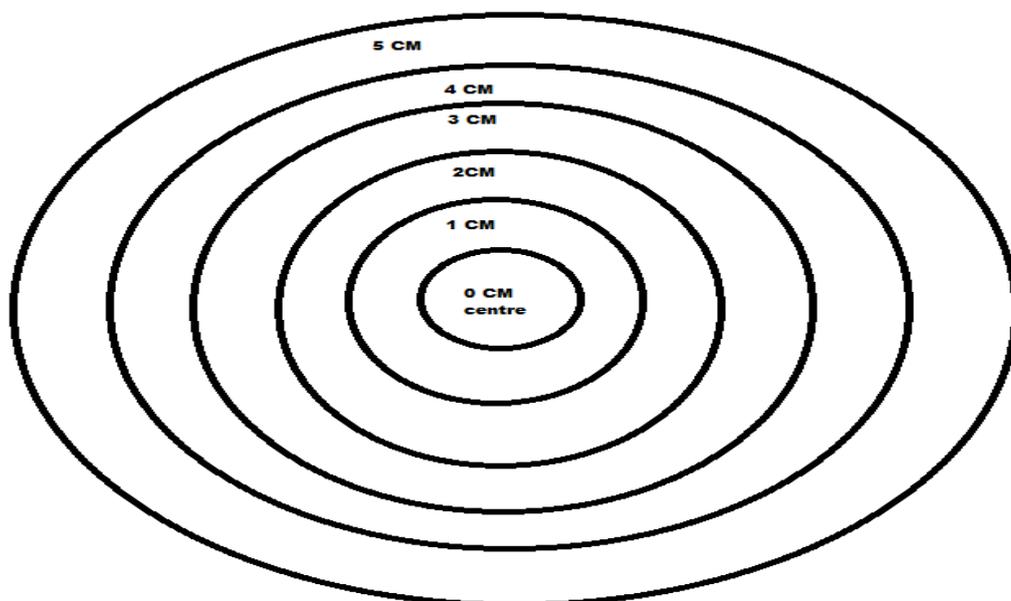


Fig. V-9. Disposition des thermocouples sur la plaque réceptrice

3.3.3. Eclairage global enregistré :

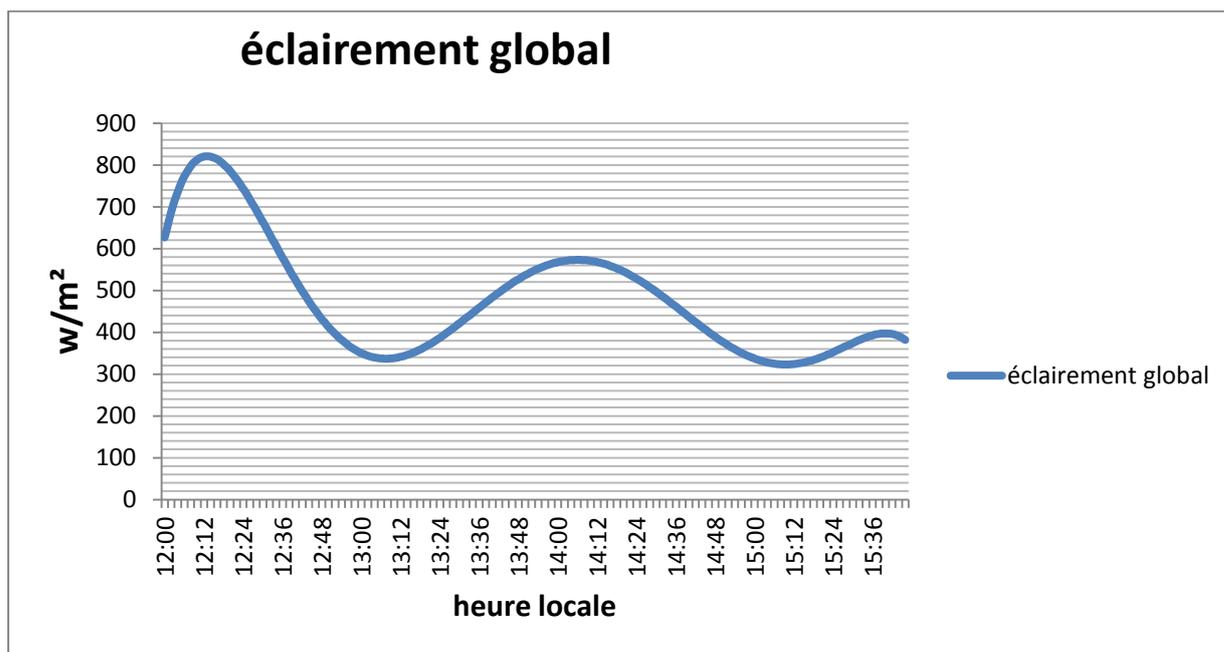


Fig. V-10. Évolution de l'éclairage enregistré pour la journée du 16/09/2013

3.3.3.1. Discussion :

- l'éclairage pour cette journée n'étant pas très uniforme ni optimal, on remarque différentes périodes et dans lesquelles l'éclairage global baisse considérablement d'une période à une autre. On prend environ 3 valeurs de l'éclairage pour voir le comportement de du concentrateur sphérique. Il est à noter qu'on n'a pas pu avoir l'éclairage direct mais sachant que ce dernier se compose de l'éclairage diffus + direct, on sait alors que l'éclairage direct est moins important en valeur que l'éclairage global. Ajoutant à cela qu'on suppose qu'une relation linéaire implique les deux types de rayonnements.

3.3.4. Evolution des températures au niveau du récepteur :

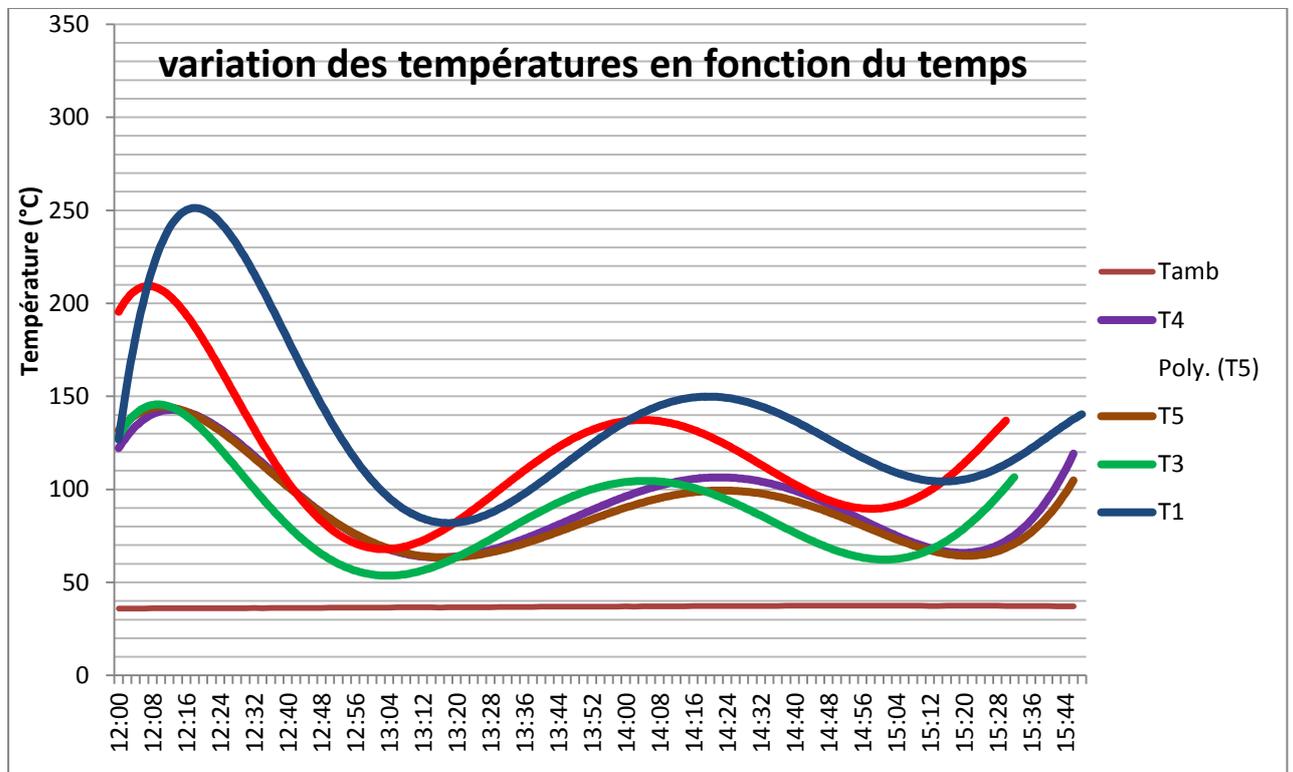


Fig. V-11. Evolution des températures au niveau du récepteur

3.3.4.1. Commentaire :

- Pour cette expérience on a placé 5 thermocouples à différentes distances du centre de la plaque réceptrice. Ceci nous permettrait de voir la distribution de la température sur la plaque comme on le verra plus tard. On note que la journée du 16/09/2013 était une journée avec passages de voiles nuageux fréquents. Malheureusement on n'a pas pu obtenir les valeurs du rayonnement direct incident, cependant on a pu mesurer le rayonnement global. On fera l'hypothèse que le rayonnement direct varie linéairement avec le rayonnement global pour

l'explication des résultats obtenus. Ce qui n'est pas vraiment juste si l'on considère des passages nuageux assez fréquents.

3.3.4.2. Discussion :

On remarque selon la figure une augmentation de la température de plaque (début après chauffage et non pas à température ambiante). Les différentes températures à différentes distances varient de la même façon mais à des valeurs inférieures les unes aux autres.

On remarque cependant, des interactions entre les courbes des différents thermocouples. Ceci peut être dû à différentes raisons dont la principale est la poursuite manuelle. Cette dernière ne permet d'avoir une focalisation constante sur le centre du récepteur. Il arrive donc que la tache solaire se délocalise du centre du récepteur.

- Notre but étant d'observer le comportement du concentrateur sphérique à travers une journée pas complètement claire, ce qui est contradictoire à ce qui est connu sur le fonctionnement des concentrateurs solaires.

éclairage	Température obtenue
600-800 w/m ²	120°C-275°C
400-600 w/m ²	70°C-160°C
350-400w/m ²	100°C

Tableau V.1. Plages de températures enregistrées en fonction des éclairements reçus

Le tableau, implique la température reçue au centre du récepteur du miroir sphérique. Les températures plus lointaines sur la plaque réceptrice sont obligatoirement moins importantes. Une uniformisation totale des températures se serait obtenue dans le cas où l'on aurait atteint une température de stagnation, mais ce dernier est difficile à atteindre pour plusieurs facteurs :

- Influence du vent.
- influence du système de poursuite manuel sur la focalisation de la tache solaire.
- Valeur de l'éclairement reçu

3.4. Dimensionnement du récepteur :

On peut dimensionner le récepteur d'une autre manière que celle qu'on a déterminé dans l'équation III.5 , celle-ci dépend de la distribution des températures. Le dernier cercle concentrique doit alors être à la température ambiante afin d'en être certains de récolter tout le flux incident et ce, comme le montre la figure :

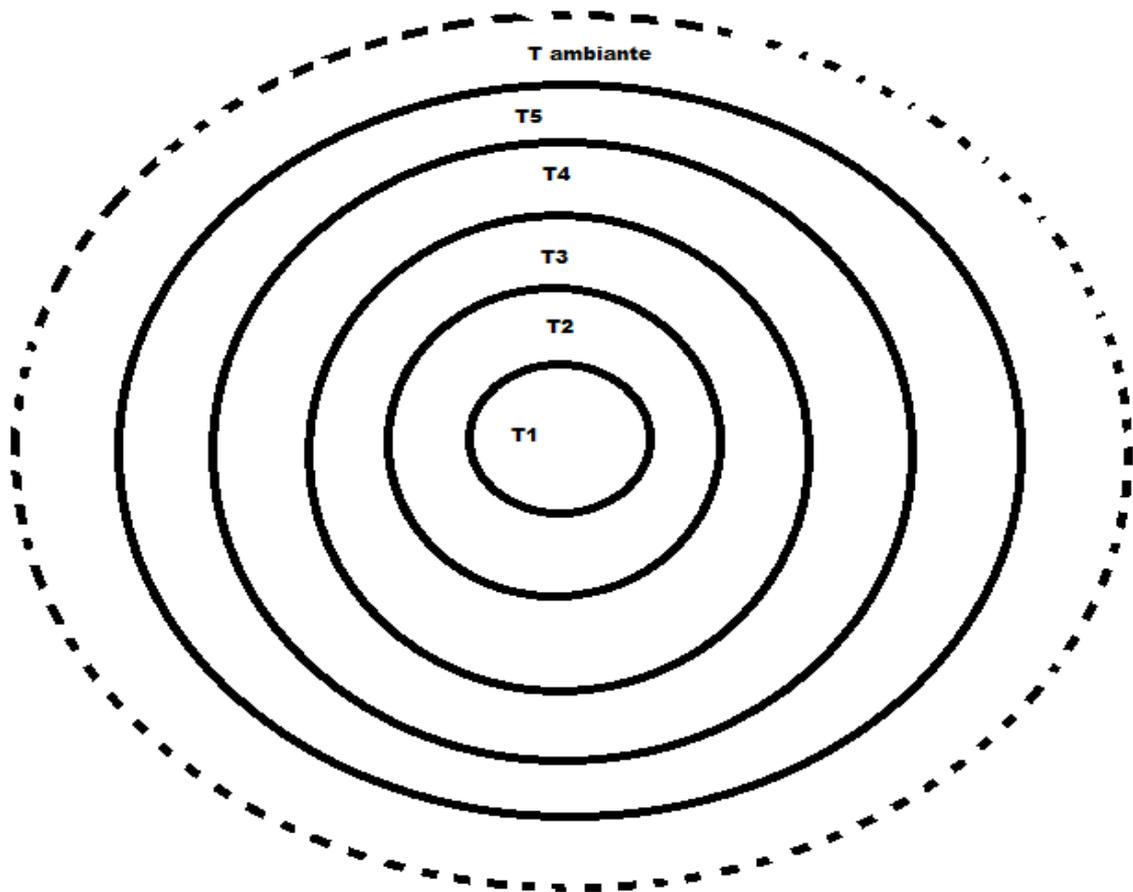


Fig. V-12. Distribution des températures au niveau du récepteur

- Il faut cependant noter que la distribution de température dépend d'une manière directe du flux solaire incident. Ceci veut dire que pour différent flux, le dimensionnement du récepteur serait différent. Ceci est bien utile dans le cas d'installations dans des endroits à flux plus au moins constants durant l'année, comme l'est le cas dans le désert Algérien.

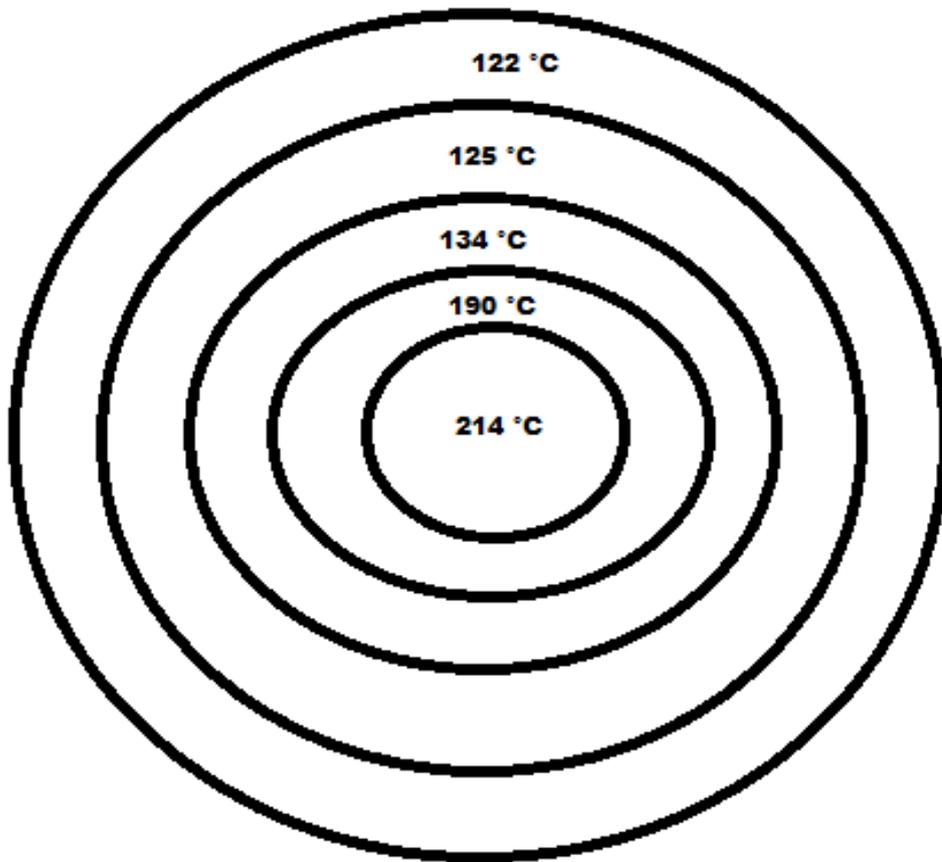


Fig. V-13. Prise instantanée du récepteur

- on remarque que pour le cas de notre récepteur, la dernière couche de température est loin d'être proche de la température ambiante. Ceci s'explique par le fait que notre récepteur a été pré-dimensionné au paravent. Ajoutant que le dimensionnement du récepteur suivant cette méthode prend un grand temps dû notamment à l'étude de l'éclairement direct sur le site choisis.

3.4. Evolution de la température après déconcentration :

3.4.1. Présentation :

Pour cette expérimentation nous avons complètement recouvert la surface réfléchissante avec un tissu épais afin d'arrêter la réflexion de la lumière. Ainsi notre but était de simuler un passage nuageux assez dense ce qui arrive fréquemment dans la réalité.

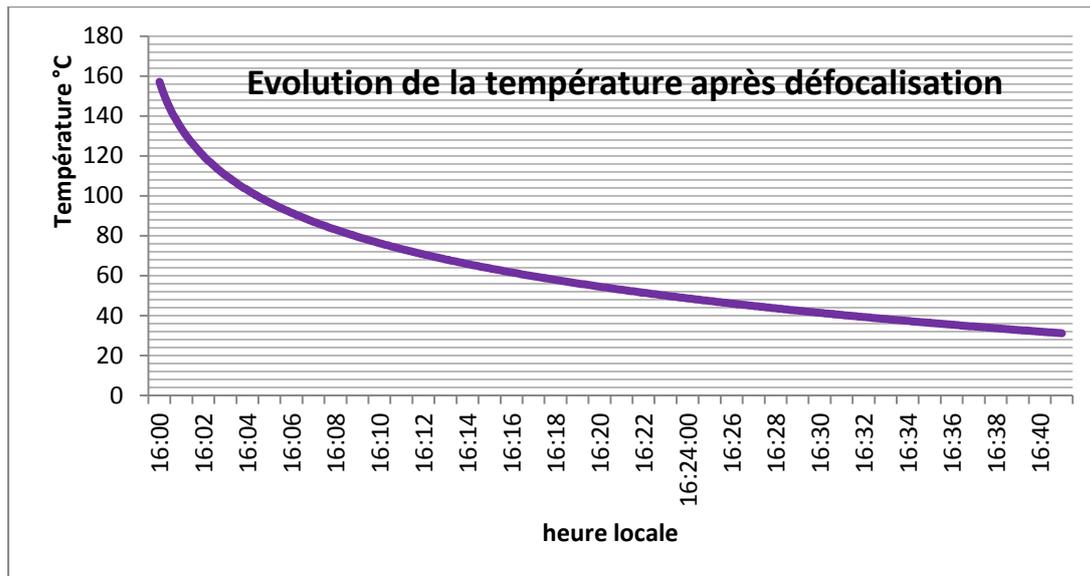


Fig. V-14. Evolution de la température après déconcentration du concentrateur sphérique

3.4.2. Discussion :

Cette expérience s'est faite après déconcentration du concentrateur solaire. Ce qui peut correspondre en réalité à un passage nuageux très dense. L'allure logarithmique que prend la courbe après déconcentration nous montre que la température au niveau du récepteur se maintient au dessus des 100°C pour environ 5 min. en sachant que la température du début de l'expérience correspond à 160 °C environ. Le cas aurait été différent pour des températures plus élevées.

- On voit aussi que la plus grande perte de température s'enregistre dans les 3 à 4 premières minutes, ceci est expliqué par le fait de l'absence soudain du flux concentré ainsi qu'à la grande différence de température entre l'air ambiant et la plaque à ce moment là.
- Encore ceci dépend d'un troisième facteur qu'est l'inertie thermique du récepteur ainsi que ses dimensions. Pour notre cas on a choisis l'aluminium comme matériau récepteur.

3.5. Système de poursuite :

- Le système de poursuite que nous avons utilisé est un système manuel qui poursuit le soleil en coordonnées azimutale. On peut différencier deux types de poursuites pour notre concentrateur. Une première poursuite que nous considérons comme efficace et avec laquelle la tache focale ne quitte pas le centre du récepteur solaire, ceci permet entre autre de garder la distribution homogène des températures au niveau du récepteur sphérique.
- La deuxième poursuite que nous pouvons considérer est une poursuite admissible et qui consiste à ce que la tache solaire ne quitte pas la surface du récepteur.

- Pour le premier type de poursuite le temps entre une fixation du réflecteur et une autre est de 08 minutes.
- pour une fixation admissible le temps entre une fixation et une autre est de 20 minutes environs.

3.6. Calorimétrie :

Pour le reste des expériences on s’est reposé sur les résultats de travaux déjà réalisés au sein du CDER [35]. Ces expériences reposent sur des tests calorimétriques pour la déduction des quantités de chaleur, puissances et flux.

3.6.1. Variation des différentes puissances en fonction du temps :

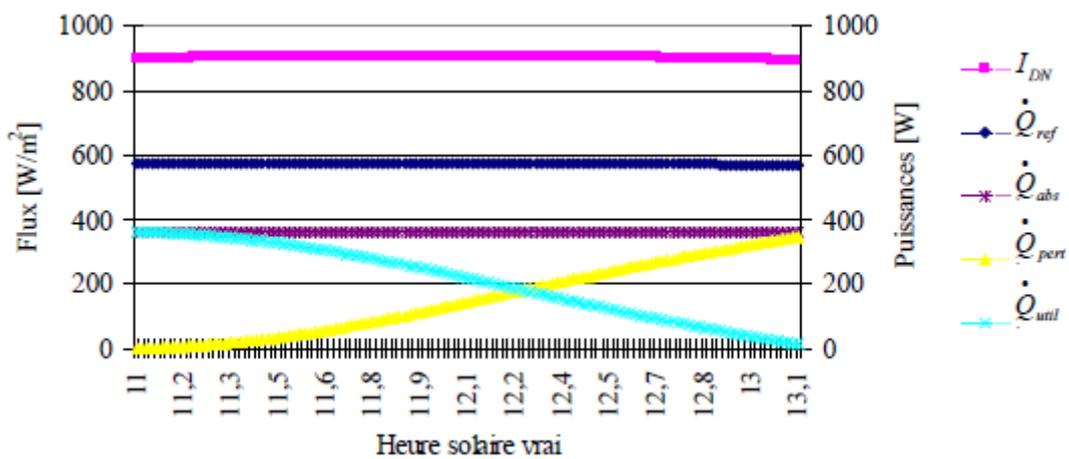


Fig. V-15. Variation des différentes puissances pour la journée du 22/12/2008 [35]

3.6.1.1. Discussion :

L’éclairement solaire direct I_{DN} est réfléchi par le réflecteur sphérique. On remarque à travers la figure que la valeur de la puissance thermique réfléchi est inférieure à l’éclairement direct, ceci se traduit par les pertes optiques au niveau du réflecteur. On rappelle sur ce point là que le facteur de réflexion du miroir sphérique varie de 0.75 à 0.95, ce qui explique la défaillance entre les deux valeurs.

Au niveau de l’absorbeur, la puissance utile reçue est inférieure à celle réfléchi, la différence est due aux pertes correspondantes aux trois modes de transferts de chaleur considérés dans le chapitre 04. Plus l’écart de température entre l’absorbeur et l’air ambiant est important plus les pertes thermiques deviennent importantes et plus la puissance utile du concentrateur diminue.

En continuant le chauffage, on atteint la température de stagnation, température que l'on ne peut plus dépasser. A ce point là, la puissance absorbée (utile) devient égale aux à la puissance perdue due aux pertes thermiques, ce qui crée un état d'équilibre entre les deux puissances.

3.6.2. Evolution de la température du récepteur :

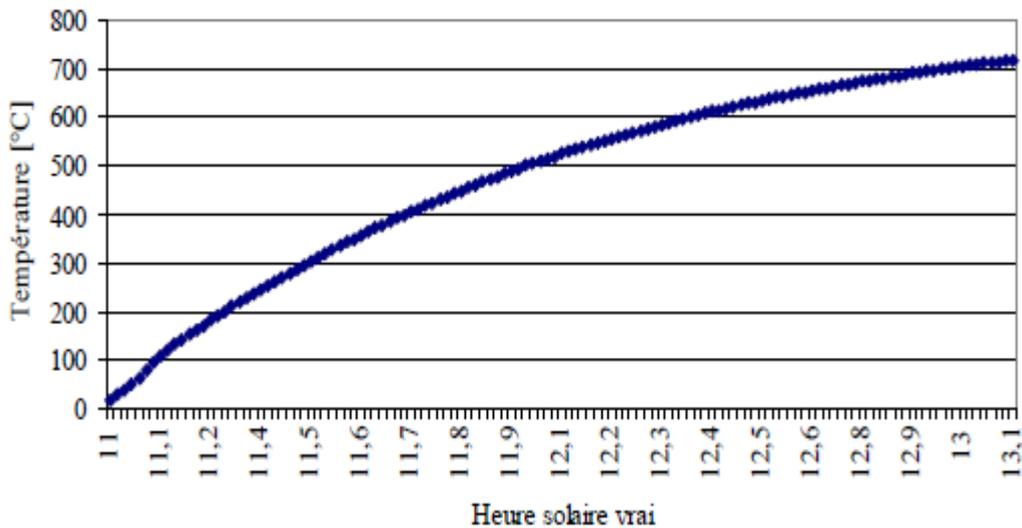


Fig. V-16. Evolution de la température de l'absorbeur de la journée du 22/12/2008 [35]

3.6.2.1. Discussion :

La température au niveau du récepteur et pour un début de chauffage est égale à la température ambiante, ce qui est normal en l'absence de chauffage. Une fois le concentrateur solaire mis en place et que les rayons solaires commencent à se focaliser, la température au niveau du récepteur croît rapidement pendant les premières 5 min de chauffage jusqu'à une température d'environ 40°C en hiver et 65 °C en été, et ce en fonction du rayonnement solaire concentré. La vitesse de croisement de la température de l'absorbeur diminue après pour atteindre un état stationnaire, c'est ce qu'on appelle une température de stagnation [33]. Cette température n'est pas atteinte dans notre cas et ce pour diverses raisons :

- Influence du vent.
- variation des conditions climatiques (température ambiante maximale non atteinte)
- déconcentration du concentrateur (imperfection du système de poursuite)
- éclairage important
- Variation de l'éclairage reçu au niveau du réflecteur

3.6.3. Evolution des flux thermiques :

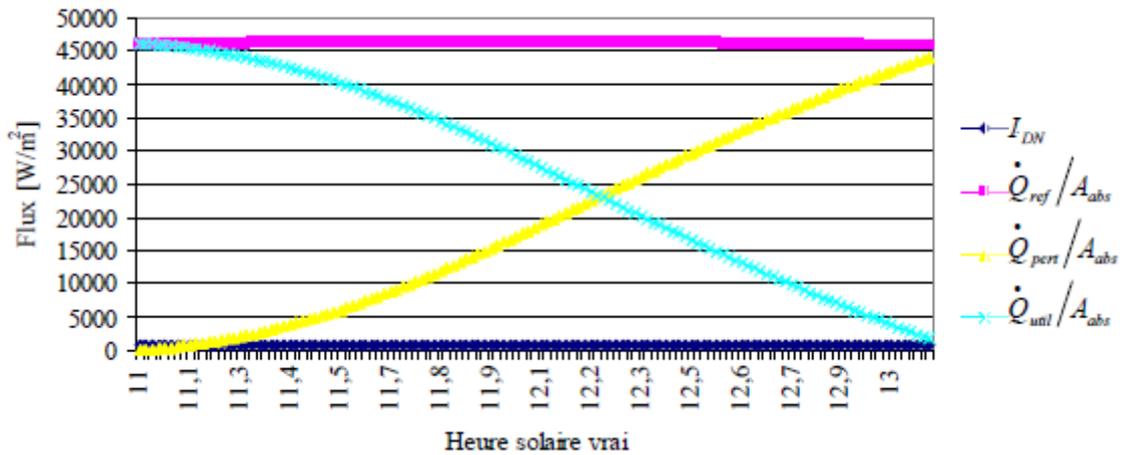


Fig. V-16. Evolution des flux thermiques pour la journée du 22/12/2008 [35]

3.6.3.1. Discussion :

L'évolution des flux thermiques évolue de la même manière que les puissances thermiques (même allure). La seule différence s'enregistre au niveau des valeurs où les flux thermique sont plus grands de l'ordre de 40 fois.

3.6.4. Evolution des pertes thermiques :

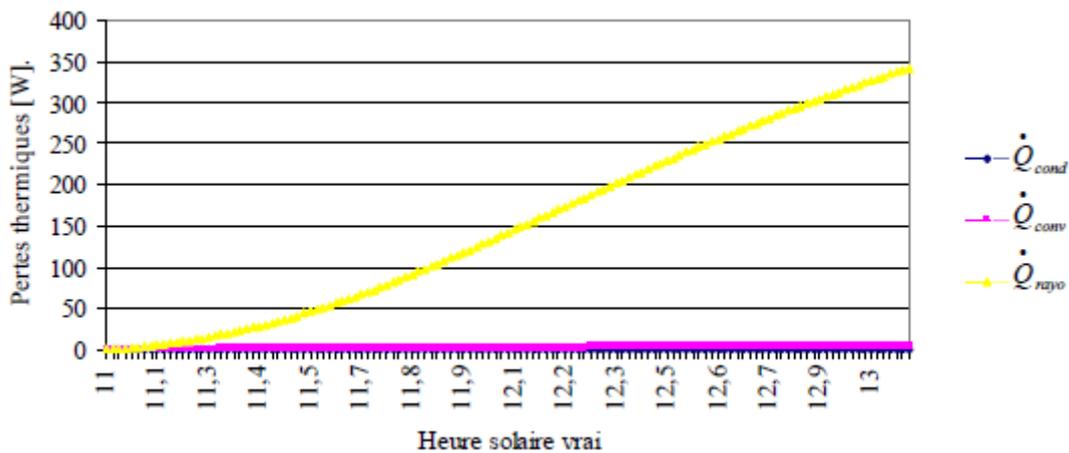


Fig. V-17. Evolution des pertes thermiques pour la journée du 22/12/2008 [35]

3.6.4.1. Discussion :

Les pertes thermiques par rayonnement sont les pertes les plus dominantes sur le système. Au début du chauffage, toutes les pertes thermiques sont nulles cependant et après 5 min l'écart commence à se creuser entre les pertes radiatives et les pertes convectives et conductrices. L'influence du vent n'est pas significative dans ce cas là puisque la surface d'échange convective et qui représente la surface de l'absorbeur est assez petite, même cas pour la conductivité thermique à cause de la modicité de l'épaisseur du récepteur/absorbeur. Ceci explique alors très bien la quatrième puissance de la loi de Stephan Boltzmann.

3.6.5. Evolution de l'efficacité de du récepteur/absorbeur :

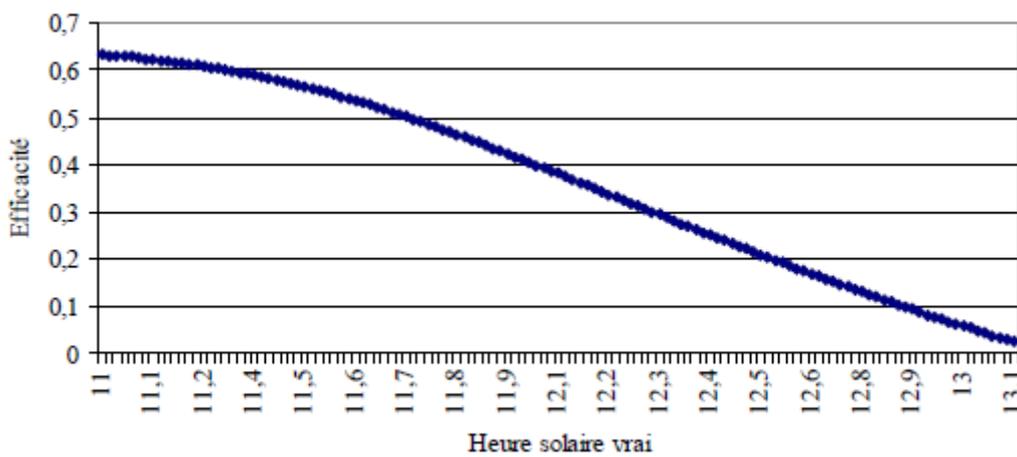


Fig. V-18. Evolution de l'efficacité du récepteur pour la journée du 22/12/2008 [35]

3.6.5.1. Discussion :

Le rendement du concentrateur sphérique est à un son maximum au début de chauffage, si on compare ce graphe avec le graphe précédent des pertes thermiques on remarque que cette période correspond à un minimum de pertes thermiques. Le rendement continue à diminuer avec le temps puisque les pertes thermiques et principalement les pertes radiatives commencent à devenir importantes. Ceci s'explique par l'écart qui se creuse entre la température du récepteur/absorbeur et la température ambiante.

On arrive après un certain temps à un rendement nul du concentrateur, ceci expliquer que toute la puissance thermique reçue est dissipée en formes de pertes thermiques.

3.6.6. Influence de sélectivité thermique :

Pour simulé l'intérêt du la sélectivité thermique, Nous prenons par exemple une couche sélective sur une surface captatrice de l'absorbeur comme Fe_3O_4 est la comparée avec une surface non sélective comme l'acier [35]

Pour les températures relativement élevées, dans les conditions des systèmes de la concentration du flux solaire, on a vu que les pertes par convection et conduction pouvaient être négligées en première approximation par rapport aux pertes radiatives, Sur les figures V-17 et V-21. on peut comparer les efficacités thermiques de conversion et thermo-énergétique d'un absorbeur sélectif ($\alpha_{rec} = 0,85$, $\varepsilon_{rec} = 0,12$) à ceux d'un absorbeur non sélective ($\alpha_{rec} = 0,8$, $\varepsilon_{rec} = 0,8$), On constate que dans tous les cas la sélectivité conduit à une augmentation de rendements mais que ce gain n'est vraiment intéressant que pour des facteurs de concentration inférieurs à 100 et pour des températures inférieures à 1 000 K (727°C) [17]

La figure suivante montre l'influence de la sélectivité sur la température atteinte au niveau du récepteur :

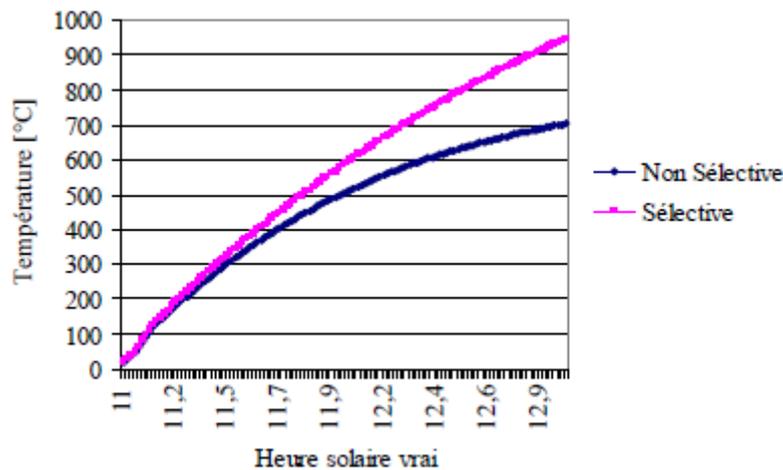


Fig. V-19. Influence de la sélectivité sur l'évolution de la température du récepteur [35]

La figure [V-20] montre l'influence de la sélectivité sur l'efficacité du concentrateur sphérique. On remarque alors une grande différence entre la surface sélective :

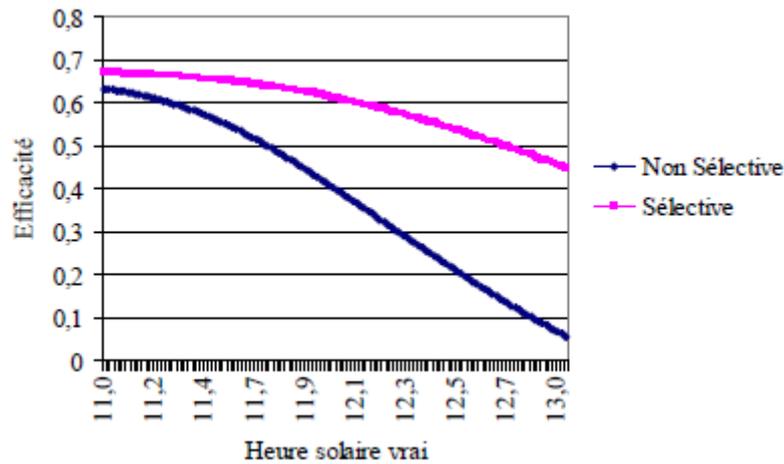


Fig. V-20. Influence de la sélectivité sur l’efficacité du récepteur [35]

L’augmentation de l’efficacité du concentrateur est due principalement à la diminution des pertes thermiques et ce, grâce à la couche sélective appliquée au niveau du récepteur. Ceci s’explique par le retardement de la température de stagnation au niveau du récepteur, donc par ce fait, la puissance utile devient plus importante.

Quand on n’atteint pas la température de stagnation ceci implique forcément une puissance utile plus grande et une évolution de cette dernière pour une durée plus importante.

Ceci nous montre alors l’intérêt des surfaces sélectives dans l’amélioration des performances du concentrateur sphérique à des hautes températures.

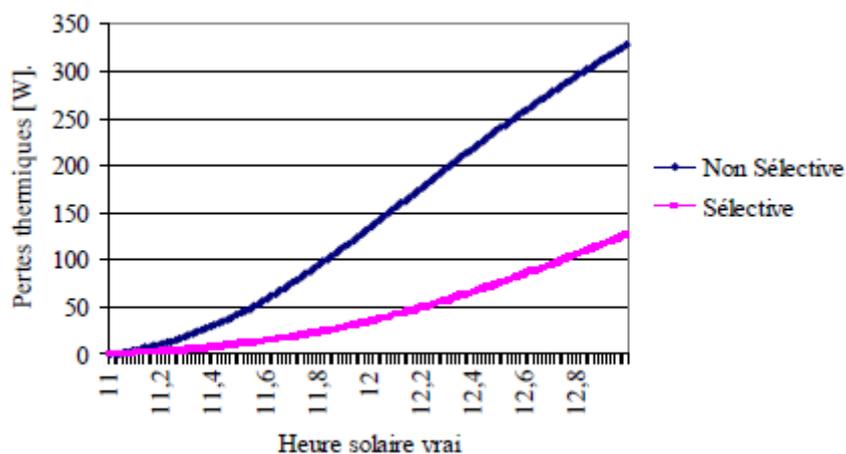


Fig. V-21. Influence de la sélectivité sur les pertes thermiques [35]

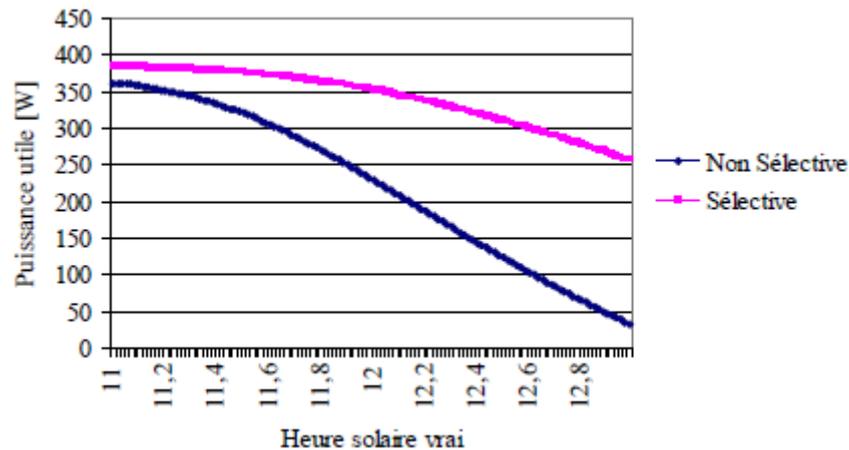


Fig. V-22. Influence de la sélectivité sur la puissance utile [35]

4. Conclusion :

A travers cette partie expérimentale nous avons mis le doigt sur les différents phénomènes de transfert de chaleur au niveau du récepteur. Ainsi nous avons pu étudier expérimentalement le comportement du récepteur du concentrateur sphérique dans différentes conditions climatiques. On a pu évaluer alors la distribution des températures à différents niveaux de la plaque réceptrice, nous avons pu voir aussi que les températures enregistrées au niveau du récepteur dépendent directement de l'éclairement enregistré.

On a pu aussi mettre le point sur l'évolution des températures après déconcentration du concentrateur sphérique, nous avons ainsi pu simuler le cas d'un passage nuageux et nous avons ainsi pu voir l'évolution de la température au niveau du récepteur. Le récepteur peut dans ces conditions maintenir sa température assez haute pour un certain temps. Ceci dépend d'une manière directe du matériau utilisé dans le récepteur sphérique et de son inertie thermique.

Une remarque importante concerne le système de poursuite, l'intervalle de temps entre un pointage et un autre varie de 08 à 20 minutes. Ceci peut être intéressant pour l'élaboration d'un système de poursuite automatique.

D'autres résultats peuvent se résumer dans les points suivants :

- On n'a pas pu mesurer l'éclairement direct mais nous avons considéré une relation linéaire entre ce dernier et le rayonnement global enregistré.
- en augmentant le diamètre du réflecteur, les températures atteintes au niveau du récepteur augmentent à leur tour aussi.

- Le rendement est à son plus haut niveau à des basses températures, ce dernier diminue quand la température de l'absorbeur augmente.
- La sélectivité améliore considérablement les performances du concentrateur solaire.
- L'inconvénient principal de la sélectivité c'est pour des températures très élevées le risque de la détérioration du matériau sera possible [1].

Conclusion générale

Conclusion générale :

Le travail que nous avons réalisé s'est porté sur la caractérisation d'un concentrateur solaire sphérique. Notre étude s'est portée sur plusieurs axes principaux que nous citerons avec les résultats obtenus sur chaque axe :

Nous avons pu développer un programme de calcul sous environnement Matlab pour l'estimation de l'éclairement solaire direct. Nous nous sommes pour cela reposés sur le modèle r.sun, nous pouvons pour cela citer les résultats suivants :

- Le modèle r.sun est valable pour des cieux très clairs, dans ces conditions là, le modèle donne des résultats que nous pouvons considérer comme très bons avec une erreur d'estimation de 2%.
- Pour des éclaircements plus ou moins perturbés, le modèle r.sun n'est plus valable et s'éloigne considérablement des valeurs mesurés.
- Le modèle r.sun a été testé pour le site de Bouzaréah sur lequel notre travail expérimental s'est déroulé.

Nous avons après cela effectué une étude optique du réflecteur sphérique, les résultats les plus importants peuvent être résumés comme suit :

- Le miroir sphérique n'est pas stigmatique, ce dernier donne lieu à plusieurs foyers images.
- Le foyer recherché, c'est-à-dire foyer de moindre diffusion se trouve entre deux foyers secondaires, ce dernier nous offre un maximum de température le long de l'axe optique que nous avons validé après dans la partie expérimentale.
- Ainsi l'étude thermique nous a permis d'établir un bilan global au niveau du récepteur solaire.

Nous avons montré que les températures atteintes au niveau du récepteur dépendent de plusieurs facteurs :

- l'éclairement reçu au niveau du réflecteur.
- Les dimensions du réflecteur

Conclusion générale

- La sélectivité du récepteur
- La nature réfléchissante du miroir sphérique.
- La nature du matériau du récepteur/absorbeur ainsi que ses dimensions.
- du positionnement du récepteur selon l'axe optique.

L'importance du système de poursuite est aussi primordiale, ce dernier augmenterait l'efficacité du concentrateur sphérique d'une manière considérable. Cependant, une étude concernant le gain et les pertes avec un tel système doit être établie.

On a aussi pu vérifier l'homogénéité de la distribution des températures au niveau du récepteur, ce qui est important pour des utilisations thermodynamiques.

L'utilisation du concentrateur sphérique peut s'étaler sur plusieurs domaines, ceci dépend directement des températures atteintes au niveau du récepteur :

- pour des températures relativement basses et ce dans des conditions climatiques assez défavorables, le concentrateur sphérique peut être utilisé pour le chauffage de l'eau chaude sanitaire, la stérilisation d'instruments médicaux ainsi que pour la pasteurisation des différents aliments (exemple du lait) mais aussi pour la climatisation par absorption.
- pour des températures plus élevées de l'ordre 100 à 350 °C, le concentrateur solaire peut être utilisé pour la cuisine solaire. Le concentrateur solaire et avec l'utilisation d'un fluide récepteur peut être utilisé pour la production de vapeur surchauffée qui peut être exploitée par la suite pour la conversion thermodynamique pour but de production d'électricité.
- On peut aussi adapter récepteur de chaleur comme c'est le cas pour le moteur Stirling.
- La dernière application concerne les hautes températures comme l'est le cas pour les fours solaires, des utilisations peuvent être alors possibles dans le domaine de la fusion métallurgique.

Il est à noter que la température atteinte au niveau du récepteur et de plus que les facteurs précédemment cités peut être contrôlée grâce au positionnement du récepteur sur l'axe optique et ce, en plus des facteurs précédemment cités.

A la fin, nous considérons la présente étude comme étant largement fructueuse du fait que nous avons pu déterminer plusieurs plages de températures pour le fonctionnement du

Conclusion générale

concentrateur sphérique. Ajoutant à ceci que nous avons pu caractériser le fonctionnement du concentrateur sphérique dans des conditions considérées comme étant défavorables pour le fonctionnement optimal des concentrateurs solaires.

Nomenclature

Nomenclature

Unités

Abréviations

CDER : centre de développement des énergies renouvelables

GRASS: Geographic Resources Analysis Support System

GIS : Geographic Information System

TSV temps solaire vrai

[heure]

TSM temps solaire moyen

[heure]

TU temps universel

[heure]

Symboles et Nomenclature

θ_1, θ_2 : angles de réflexion

[degré]

C : centre du miroir sphérique

[mètre]

S : sommet du miroir sphérique

D : diamètre efficace du miroir sphérique

[mètre]

R : Rayon de courbure du miroir sphérique

[mètre]

A : source lumineuse

A' : Foyer image correspondant à A

Aref Surface du réflecteur sphérique

[m²]

Arec Surface du récepteur/Absorbeur

[m²]

T_L Temps local

[heure]

C : *décalage horaire*

[heure]

L : *la longitude du lieu*

[degré]

E_t: *l'équation du temps*

[minute]

L_{ref}: *longitude de référence (Greenwich)*

[degré]

B: *facteur correctif*

T : coefficient de trouble total de Link

m : masse d'air atmosphérique

$d_r(m)$: épaisseur de la masse d'air optique de Rayleigh dépendant de m

h : hauteur du soleil [degré]

G_0 : éclairement extarrestre [w/m²]

I_{DN} : éclairement solaire direct [w/m²]

I_{dif} : éclairmenet solaire diffus [w/m²]

I_{glob} : éclairement solaire global [w/m²]

I_{DN}^* : éclairement solaire direct avant correction [w/m²]

I_0 : constante solaire = 1367 w/m² [w/m²]

e : facteur de correction tennat compte de la distance terre – soleil

j' = angle du jour [degré]

m_A : masse d'air atmosphérique

h_0^{corr} : hauteur corrigée du soleil [degré]

z : altitude du lieu [mètre]

$\frac{P}{P_0}$: correction de l'altitudedu lieu

Dh : un facteur correcteur de la hauteur du soleil

T : facteur de trouble de Link

F : Foyer du miroir sphérique [mètre]

\emptyset :La taille angulaire du soleil [degré]

H : hauteur du récepteur solaire [mètre]

θ_1 : angle d'ouverture du miroir sphérique [degré]

R : rayon de courbure du miroir sphérique [mètre]

$C_{id\acute{e}ale}$: concentration idéale

C_g : Concentration géométrique

A_{ref} : Surface du réflecteur [m²]

α_{rec} : facteur d'absorption solaire

ε_{rec} : facteur d'émission infrarouge

\dot{Q}_u : L'énergie utile transmise par la surface du concentrateur vers le récepteur. [w/m²]

m_f ; masse du fluide récepteur [kg]

m_{rec} : masse du récepteur [kg]

c_f : chaleur massique spécifique du fluide caloporteur [J/kg.k]

c_{rec} : chaleur spécifique massique du récepteur [J/kg.k]

T_{rec} : température au niveau du récepteur [k]

\dot{Q}_{rec} : L'énergie optique qui atteint la surface plane du récepteur [w/m²]

\dot{Q}_{ref} : L'énergie captée par le réflecteur [w/m²]

\dot{Q}_p : Puissance due aux pertes thermiques [w/m²]

η_{opt} : rendement optique du réflecteur

Γ : Rapport de captation (fraction de l'énergie reflétée par le réflecteur)

α_{rec} = Facteur d'absorption de la surface de l'absorbeur.

τ_{rec} = Facteur de transmission de l'absorbeur.

ρ_{ref} = Facteur de réflexion de surface du réflecteur (miroir sphérique).

$\dot{Q}_{p,cd}$: Pertes via conduction. [w/m²]

$\dot{Q}_{p,cv}$: Pertes via convection. [w/m²]

$\dot{Q}_{p,r}$: Pertes via rayonnement.	[w/m ²]
K_{rec} : Conductivité de du récepteur	[w/m.k]
Δx : Épaisseur de l'absorbeur/récepteur	[mètre]
A_{rec} : Surface d'ouverture du récepteur.	[m ²]
T_r : Température du récepteur.	[k]
T_{amb} : Température ambiante.	[k]
h_{cv} : Coefficient de transfert par convection	[w/m.k]
V_{vent} : vitesse du vent.	[m/s]
K_{air} : Conductivité thermique de l'air.	[w/m.k]
ν : viscosité de l'air.	[m ² /s]
d : Diamètre du récepteur.	[mètre]
A_{rec} : Surface du récepteur	[m ²]
A_G : surface de Gauss	[m ²]
I_{rec} : éclairement solaire reçu à la surface du récepteur	[w/m ²]
I_{ref} : éclairement reçu à la surface du réflecteur	[w/m ²]
A_R : image réelle du soleil	[degré]
I_G : flux moyen reçu en surface de Gauss	[w/m ²]
C_0 : concentration énergétique	
$C_{0,effective}$ Concentration énergétique réelle d'un système	
FF : Facteur four	
K_{rec} : conductivité thermique du récepteur	[w/m.k]

D_{rec} : diffusivité thermique

[m²/s]

Re Nombre de Reynolds

Pr Nombre de Prandtl

Nu Nombre de Nusselt

Indices et Exposants

G Gauss

g Géométrie

o optique (énergétique)

rec récepteur/ absorbeur

p pertes

u utile

DN Direct Normal

Ref réflecteur

Opt optique

Cond Conduction

Conv Convection

Ray Rayonnement

Amb ambiante

Glob Global

f fluide (eau)

Introduction générale.....	1
----------------------------	---

Chapitre I : Etude Bibliographique

1. Introduction :.....	3
2. Définition de quelques mots clés :.....	4
2.1. La source énergétique :	4
2.2. Concentrateur Solaire sphérique :	4
2.2.1. Optique géométrique :	4
2.2.1.1. Principe Fondamental de l'optique géométrique :.....	5
2.2.1.2. Réflexion :.....	5
2.2.1.3. Types de réflexions :.....	5
2.2.1.3.1. Réflexion diffuse :.....	5
2.2.1.3.2. Réflexion spéculaire :	6
2.2.1.4. Loi de la réflexion :.....	6
2.2.2. Miroir sphérique (réflecteur) :	7
2.2.2.1. Définition :.....	7
2.2.2.2. Miroir sphérique concave et convexe	7
2.2.2.2.1. Les miroirs concaves.....	7
2.2.2.2.2. Les miroirs convexes	7
2.2.2.3. Caractéristiques du miroir sphérique	7
2.2.2.4. Stigmatisme du miroir Sphérique	8
2.2.2.4.1. Stigmatisme rigoureux ou parfait.....	8
2.2.2.4.2. Stigmatisme approché.....	8
2.3. Système de poursuite solaire	9
2.4. Récepteur solaire	10
2.5. Quelques Logiciels de simulation des concentrateurs sphériques	11
2.5.1. Optgéo	11
2.5.2. Opticad.....	11
3. Partie état de l'art	11
4. Conclusion	16

Chapitre II: Gisement Solaire

1. Introduction.....	18
2. La position du soleil.....	19
2.1. Sphère céleste	19
2.2. Les coordonnées géographiques.....	20
2.2.1. Latitude	20

2.2.2.	Longitude.....	20
2.2.3.	L'altitude	21
2.3.	Les coordonnées horaires	21
2.3.1.	La déclinaison.....	21
2.3.2.	L'angle horaire	22
2.4.	Coordonnées horizontales azimutales	22
2.4.1.	L'azimut a.....	22
2.4.2.	La hauteur du soleil h	22
2.5.	Position du soleil par rapport à un observateur	23
2.5.1.	Angle du zénith.....	23
2.5.2.	Angle d'azimut	24
2.5.3.	Angle d'incidence.....	24
2.6.	Le temps solaire	24
2.6.1.	Temps solaire vrai	24
2.6.2.	Temps solaire moyen.....	25
3.	Estimation de l'éclairement solaire.....	26
3.1.	Définition	26
3.2.	Problématique.....	26
3.3.	Modèle r.sun.....	27
3.4.	Développement du modèle r.sun	27
3.4.1.	Eclairement solaire direct par ciel clair	27
	Eclairement extraterrestre.....	28
3.4.3.	Masse atmosphérique	28
3.4.4.	Hauteur corrigée du soleil.....	29
3.4.5.	Epaisseur d'air optique de l'atmosphère de Rayleigh	29
3.4.6.	Facteur de trouble total de Link.....	29
3.4.7.	Modélisation du modèle	31
3.4.7.1.	Organigramme de calcul	31
3.4.7.2.	Résultat et discussion	32
4.	Conclusion	33

Chapitre III : Etude optique du concentrateur sphérique

1.	Introduction	34
2.	Stigmatisme du miroir sphérique	35
2.1.	Foyer de Gauss pour des rayons parallèles à l'axe optique.....	35
2.2.	Foyer de Gauss pour des rayons inclinés par rapport à l'axe optique.....	36

2.3.	Relations de conjugaison du concentrateur sphérique	36
2.3.1.	Relation de Descartes avec origine au centre	37
2.3.2.	Relation de Descartes avec origine au sommet	37
2.4.	Dimensions du foyer image.....	37
3.	Non Stigmatisme du concentrateur sphérique	38
3.1.	Foyer des rayons marginaux	38
3.2.	Foyer de moindre diffusion	39
3.3.	Aberration de sphéricité pour un point d'un axe	39
3.4.	Caustique du miroir sphérique	40
3.5.	Comparaison entre concentrateurs sphérique et parabolique	41
4.	Relations des différentes concentrations.....	43
4.1.	Concentration idéale (Gauss)	43
4.2.	Concentration géométrique	43
4.3.	Formules de calcul des différentes concentrations.....	44
5.	Conclusion	45

Chapitre IV : Etude thermique du concentrateur sphérique

1.	Introduction.....	46
2.	L'Absorbeur/ Récepteur.....	47
2.1.	Dimension du récepteur	49
2.2.	Surface sélective :.....	49
3.	Bilan thermique au niveau de l'absorbeur	50
3.1.	Equation générale de l'équilibre thermique	50
3.2.	Puissance correspondante aux pertes thermiques.....	51
3.2.1.	Pertes par conduction.....	52
3.2.2.	Pertes par convection.....	52
3.2.3.	Pertes par rayonnement	53
3.3.	Expression de la température de l'absorbeur	53
3.4.	Efficacité du concentrateur sphérique	55
3.5.	Température de stagnation	55
4.	Conclusion	56

Chapitre V: Etude thermique du concentrateur sphérique

1.	Introduction :.....	57
----	---------------------	----

2.	Description générale du montage réalisé :	58
2.1.	Description du réflecteur :	58
2.2.	Description du récepteur	59
2.2.1.	Le support plus la tige de fixation	59
2.2.2.	Disque Isolant	59
2.2.3.	Disque récepteur en Aluminium	59
2.2.4.	Thermocouples	59
2.3.	Caractéristiques du système	60
2.3.1.	Réflecteur	60
2.3.2.	Récepteur	61
3.	Expérimentations	61
3.1.	Distribution de la température sur l'axe optique	61
3.1.1.	Présentation	61
3.1.2.	Commentaire	62
3.1.3.	Discussion	63
3.2.	Caustique et point de densité maximum	63
3.2.1.	Commentaire	63
3.2.2.	Discussion	65
3.3.	Distribution des températures au niveau du récepteur	65
3.3.1.	Problématiques rencontrées lors de l'expérimentation	66
3.3.1.1.	Discussion	66
3.3.2.	Disposition du thermocouple sur la plaque réceptrice	67
3.3.3.	Eclairement global enregistré	67
3.3.3.1.	Discussion	68
3.3.4.	Evolution des températures au niveau du récepteur	68
3.3.4.1.	Commentaire	68
3.3.4.2.	Discussion	69
3.4.	Dimensionnement du récepteur	69
3.4.	Evolution de la température après déconcentration	71
3.4.1.	Présentation	71
3.4.2.	Discussion	72
3.5.	Système de poursuite	72
3.6.	Calorimétrie :	73
3.6.1.	Variation des différentes puissances en fonction du temps :	73
3.6.1.1.	Discussion	73
3.6.2.	Evolution de la température du récepteur	74
3.6.2.1.	Discussion	74

3.6.3.	Evolution des flux thermiques	75
3.6.3.1.	Discussion	75
3.6.4.	Evolution des pertes thermiques	75
3.6.4.1.	Discussion	76
3.6.5.	Evolution de l'efficacité de du récepteur/absorbeur	76
3.6.5.1.	Discussion	76
3.6.6.	Influence de sélectivité thermique :	77
4.	Conclusion :	79
Conclusion générale		81
Références bibliographiques		84
Annexes		88