



Département d'Electronique

## Mémoire de Magister

Option : Electricité Solaire  
Présenté par : Gama Amor

### Thème

---

# Etude et Réalisation d'un banc d'essai Hybride Photovoltaïque Thermodynamique

---

Membres du Jury

M. BELOUHRANI Adel, Pr	Président
M. HADDADI Mourad, Pr	Rapporteur
M. MALEK Ali, Mr (CDER)	Rapporteur
M. LARBES Chérif, Mc	Examineur
M. AIT-CHEIKH Mohamed Salah, Cc	Examineur
M. SADOUN Rabah, Cc	Examineur



## REMERCIEMENTS

*Je tien à remercier vivement et à exprimer toute ma reconnaissance à tous ceux qui ont contribués de loin ou de près à la réalisation de ce modeste travail entre autre :*

*Mes encadreurs: le Pr.Mourad HADDADI, Chef du Laboratoire Electricité Solaire à l'Ecole National Polytechnique (ENP, Alger) et le Dr Ali MALEK Maître de Recherche et Chef du Laboratoire Electricité Photovoltaïque au Centre de Développement des Energies Renouvelables (CDER, Bouzareah), pour avoir proposer et diriger ce travail et pour leurs supports, conseils, et motivation qui m'ont apportés durant tous ce projet et tant d'autres.*

*Ce travail a été réalisé au sein de l'Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables (URAER, Ghardaïa), pour cela je tiens à remercier chaleureusement son Directeur Monsieur Lazhar SERIR , Chargé de Recherches ; pour tous son aide, sa disponibilité, son soutien ainsi que pour le matériel qu'il a mis à ma disposition tous au long de ce travail, qu'il trouve ici l'expression de ma profonde gratitude.*

*Je remercie également tout le personnels chercheurs et soutiens de l'unité de recherche pour leurs contributions à l'aboutissement de ce projet.*

*Je remercie également le Pr. Adel BELOUACHRANI, enseignant à l'Ecole Nationale Polytechnique, qui m'a fait l'honneur de présider le jury.*

*Mes remerciements vont également au Pr. Maiouf BELHAMEL, Directeur de Recherche et Directeur du Centre de Développement des Energies Renouvelables (CDER, Bouzareah), pour tout l'aide, le soutien et l'encouragement qui m'a apporté durant tout ce projet.*

*Je tien à remercié également le Dr. Chaabane HAMOUDA, Directeur de l'Unité de Recherche de l'Université de Batna, qui m'a beaucoup aider depuis mes premiers pas au solaire et qui m'a offert la possibilité de continuer dans ce domaine et qui restera toujours ma référence.*

*Mes remerciements également pour le Dr. Chérif LARBES Maître de Conférences, le Dr.Saleh AIT CHEIKH Chargé de Cours et le Dr. Rabah SAADOUN Chargé de Cours à L'ENP Alger, pour avoir acceptés d'examiner ce travail et faire partie du jury.*



## RESUME

Dans le domaine de l'électricité solaire, il semble que la technologie des concentrateurs cylindro-paraboliques soit la plus économique et la plus robuste. Nous nous sommes proposés dans ce travail de faire l'étude et la réalisation pratique d'un tel concentrateur ayant une ouverture de 4 m<sup>2</sup> et muni d'un système de poursuite solaire avec pour objectifs :

- L'acquisition d'une maîtrise de la construction des concentrateurs et des différents éléments les constituant;
- L'utilisation des systèmes de poursuites solaire aveugles et sensibles et la comparaison entre les deux types;
- L'établissement du bilan thermique du concentrateur solaire cylindro-parabolique.

Après une étude théorique du sujet, nous avons établi un dimensionnement de la courbe parabolique suivie d'une simulation de son fonctionnement. Nous avons ensuite, après réalisation, procédé au montage des différents éléments du système notamment le concentrateur cylindro-parabolique avec sa structure porteuse et le circuit fermé du fluide caloporteur ainsi que le dispositif mécanique de poursuite solaire avec ses cartes électroniques programmées. Un logiciel conçu à cet effet pilote le dispositif et permet entre autres d'assurer l'acquisition de certains paramètres par l'intermédiaire d'un enregistreur communiquant à travers le port série d'un ordinateur.

Mots clés : concentrateur cylindro-parabolique, hélioélectricité, poursuite solaire,...

## ABSTRACT

In the solar electricity, it seems that the technology of parabolic concentrator either the more economic and most robust. We intended in this work to make the survey and the practical realization of such concentrator having an opening of 4m<sup>2</sup> and provided of a sun tracking system with for objectives:

- The acquisition of a restraint of the concentrators constructions.
- The establishment of the thermal balance of the parabolic concentrator.

After a theoretical survey of the topic, we established a dimension of the parabolic curve followed of a simulation of his working. We have after realization proceeded to the installation of the different elements of the system and the closed circuit of the fluid heater as well as the mechanical device of sun tracking with his programmed electronic cards. An software conceived pilot the device and permits to assure the acquisition of some parameters through the intermediary of a recorder communicating through the serial port of a computer.

Key words: parabolic concentrator, helioelectrical, sun tracking.

## ملخص

في ميدان الكهرباء الشمسية يبدو أن تقنية المقعرات الاسطوانية لتركيز الأشعة الشمسية أكثر فاعلية وأحسنها من الناحية الاقتصادية, لذلك اقترحنا في هذا المشروع دراسته وانجازه, حيث تبلغ مساحة فتحته 4 م<sup>2</sup> ومزود بنظام تتبع للشمس وقد حددنا الأهداف التالية:

- التحكم في تقنية صناعة مركزات الأشعة الشمسية بمختلف مكوناتها.
  - استخدام أنظمة تتبع الشمس بنوعيتها التتبع الأعمى للشمس و التتبع الحساس والمقارنة بينهما.
  - انجاز موازنة حرارية للمركز المقعر الاسطواني.
- بعد دراسة نظرية كاملة للمشروع قمنا بحساب المنحنى المقعر متبوع بمحاكاة لاشتغال المشروع. وانتقلنا مباشرة إلى مرحلة صناعة وتركيب مختلف أجزاء المركز المقعر الاسطواني بما في ذلك الدارة المغلقة للسائل ناقل الحرارة وكذلك الجهاز الميكانيكي لتتبع الشمس بالإضافة إلى بطاقاته الالكترونية المبرمجة, لضمان تسيير امثل للمركز قمنا بانجاز برنامج يقود الجهاز ويضمن جمع عدة معطيات باستخدام جهاز خاص اعد لهذا الغرض متصل بالكمبيوتر عبر المنفذ المتسلسل.
- كلمات مفاتيح: مركز مقعر اسطواني, هيليوكهربائي, تتبع الشمس.

# TABLES DES MATIERES

Résumé

Table des matières

Table des figures

Nomenclatures

Introduction générale..... 01

## **CHAPITRE 1 : Généralités sur le solaire**

<b>1.1</b>	<b>L'énergie solaire.....</b>	<b>04</b>
1.1.1	Le soleil.....	04
1.1.2	Le rayonnement solaire.....	04
1.1.2.1	Le potentiel solaire dans le monde.....	05
1.1.2.2	Les ressources solaires de l'Algérie.....	05
1.1.3	Les applications de l'énergie solaire.....	06
1.1.3.1	Le solaire passif.....	06
1.1.3.2	Le solaire actif.....	06
1.1.3.3	L'électricité solaire .....	06
<b>1.2</b>	<b>Le solaire photovoltaïque.....</b>	<b>07</b>
1.2.1	L'énergie solaire photovoltaïque.....	07
1.2.1.1	L'effet photovoltaïque et la jonction PN.....	07
1.2.1.2	Les cellules photovoltaïques.....	07
1.2.1.3	Les modules photovoltaïques.....	08
1.2.2	Le système photovoltaïque.....	08
1.2.2.1	Le générateur photovoltaïque.....	09
1.2.2.2	La batterie.....	09
1.2.2.3	Le régulateur.....	09
1.2.2.4	L'onduleur.....	09
1.2.3	Les différents systèmes photovoltaïques.....	09
1.2.3.1	Les systèmes photovoltaïques Autonomes.....	10
1.2.3.2	Les systèmes photovoltaïques connectés au réseau.....	10
1.2.3.3	Les systèmes photovoltaïques hybride.....	10
1.2.3.4	Les systèmes photovoltaïques au fil du soleil.....	10
<b>1.3</b>	<b>Le solaire thermodynamique.....</b>	<b>11</b>
1.3.1	Les technologies solaires à concentration.....	11
1.3.1.1	Les centrales à tour.....	11
1.3.1.2	Les systèmes à réflecteur cylindro-parabolique.....	11
1.3.1.3	Les systèmes à réflecteur parabolique.....	12
1.3.2	Les fluides de transfert et les cycles thermodynamiques .....	12
1.3.2.1	Le cycle à vapeur .....	13
1.3.2.2	Le cycle combiné .....	13
1.3.2.3	Le cycle Stirling .....	13
1.3.3	Les configurations hybrides et le stockage d'énergie.....	13
1.3.4	Les perspectives de l'Algérie à l'avenir du thermodynamique.....	14
<b>1.4</b>	<b>Conclusion.....</b>	<b>14</b>

## **CHAPITRE 2 : Etude et réalisation d'un concentrateur solaire à réflecteur cylindro-parabolique**

<b>2.1</b>	<b>Introduction.....</b>	<b>15</b>
<b>2.2</b>	<b>Etude théorique du concentrateur cylindro-parabolique.....</b>	<b>15</b>
2.2.1	Performances optiques d'un concentrateur cylindro-parabolique.....	15
2.2.1.1	Taux de concentration.....	15
2.2.1.2	Rayonnement absorbé.....	17
2.2.1.3	Angle d'ouverture du concentrateur.....	17
2.2.1.4	Rayon local du miroir.....	18
2.2.1.5	Diamètre et largeur du récepteur.....	18
2.2.2	Performances thermiques d'un concentrateur cylindro-parabolique.....	18
2.2.2.1	Coefficient des pertes thermiques $U_L$ (tube non couvert) .....	19
2.2.2.2	Coefficient des pertes thermiques $U_L$ (tube couvert) .....	20
2.2.2.3	Facteur d'efficacité ( $F'$ ).....	20
2.2.2.4	Facteur de flux du collecteur ( $F''$ ).....	20
2.2.2.5	Puissance utile ( $Q_u$ ).....	21
2.2.2.6	Température de sortie du fluide caloporteur ( $T_{sortie}$ ).....	21
2.2.2.7	Rendement du concentrateur solaire ( $\eta$ ).....	22
<b>2.3</b>	<b>Description du concentrateur réalisé.....</b>	<b>22</b>
2.3.1	Description du prototype.....	22
2.3.2	Principe de fonctionnement.....	22
2.3.3	Schéma synoptique du système réalisé.....	23
<b>2.4</b>	<b>Réalisation du concentrateur cylindro-parabolique.....</b>	<b>24</b>
2.4.1	Dimensionnement de la courbe .....	24
2.4.2	Réalisation de la structure porteuse .....	25
2.4.3	Dispositif de poursuite solaire.....	26
2.4.4	Circuit du fluide caloporteur.....	27
<b>2.5</b>	<b>Simulation numérique .....</b>	<b>27</b>
2.5.1	Modèle mathématique du rayonnement solaire.....	27
2.5.2	Réalisation d'un programme de calcul du rayonnement par Matlab.....	27
2.5.3	Simulation du fonctionnement du concentrateur par TRANSIS.....	29
<b>2.6</b>	<b>Tests réalisés sur le concentrateur stationnaire .....</b>	<b>31</b>
<b>2.7</b>	<b>Conclusion.....</b>	<b>45</b>

## **CHAPITRE 3 : Poursuite solaire**

<b>3.1</b>	<b>Introduction .....</b>	<b>39</b>
<b>3.2</b>	<b>Etude théorique de la poursuite solaire.....</b>	<b>39</b>
3.2.1	Trajet du soleil.....	39
3.2.2	Poursuite solaire et effet cosinus.....	41
3.2.2.1	Effet cosinus et taux de concentration.....	41
3.2.2.2	Effet cosinus et axe de rotation.....	41
3.2.2.3	Effet cosinus pour différent cas de poursuite.....	42
<b>3.3</b>	<b>Réalisation d'un système de poursuite assisté par micro-ordinateur.....</b>	<b>45</b>
3.3.1	Poursuite solaire assistée par micro-ordinateur.....	45
3.3.2	Réalisation d'une carte de commande liée au port parallèle.....	46
3.3.2.1	Schéma global de la carte électronique à base du PIC16F84.....	47
3.3.2.2	Schéma global de la carte à relais réalisée .....	49

3.3.3	Organigramme général du programme d'acquisition et de commande.....	50
3.3.3.1	Concentrateur avec poursuite solaire aveugle.....	50
3.3.3.2	Concentrateur avec poursuite solaire sensible.....	52
3.3.4	Programme de régulation "GESTION_CCP".....	53
3.3.4.1	Présentation du programme.....	54
3.3.4.2	Fenêtre de poursuite solaire.....	54
<b>3.4</b>	<b>Réalisation d'une carte électronique destinée à la poursuite solaire.....</b>	<b>55</b>
3.4.1	Description de la carte électronique.....	55
3.4.2	Schéma global de la carte électronique.....	55
3.4.3	Programmation du microcontrôleur.....	57
3.4.4	Fonctionnement de la carte.....	60
3.4.4.1	Commandes.....	60
3.4.4.2	Poursuite.....	61
3.4.4.3	Lecture.....	61
3.4.5	La carte à relais.....	61
<b>3.5</b>	<b>Tests, résultats et discussions.....</b>	<b>62</b>
3.5.1	Tests établis sur le concentrateur avec poursuite solaire.....	62
3.5.1.1	Tests établis avec poursuite aveugle.....	63
3.5.1.2	Tests établis avec poursuite sensible.....	65
3.5.2	Discussion.....	68
3.5.2.1	Poursuite aveugle.....	68
3.5.2.2	Poursuite sensible.....	68
<b>3.6</b>	<b>Conclusion.....</b>	<b>69</b>

## **CHAPITRE 4 : Chaîne d'acquisition des données**

<b>4.1</b>	<b>Introduction .....</b>	<b>71</b>
<b>4.2</b>	<b>Protocole FTP.....</b>	<b>71</b>
<b>4.2.1</b>	<b>Le rôle du protocole FTP .....</b>	<b>71</b>
<b>4.3</b>	<b>Capteurs de mesure.....</b>	<b>72</b>
4.3.1	Thermocouples.....	72
4.3.2	Pyranomètre.....	73
4.4	Schéma bloc de la chaîne de mesure adoptée.....	74
<b>4.5</b>	<b>Unité d'acquisition des données.....</b>	<b>74</b>
4.5.1	Description de l'unité.....	74
4.5.2	Commandes utilisés.....	75
4.5.3	Décodage des données reçues.....	76
4.5.4	Organigramme de traitement des données.....	78
<b>4.6</b>	<b>Programme d'acquisition de données.....</b>	<b>78</b>
4.6.1	Description du programme .....	78
4.6.2	Organigramme général du programme.....	80
<b>4.7</b>	<b>Conclusion.....</b>	<b>82</b>

## **CHAPITRE 5 : Dimensionnement photovoltaïque**

<b>5.1</b>	<b>Introduction .....</b>	<b>84</b>
<b>5.2</b>	<b>Dimensionnement des systèmes photovoltaïque.....</b>	<b>84</b>
5.2.1	Etapes de dimensionnement d'un système photovoltaïque.....	84
5.2.2	Méthode de dimensionnement manuelle.....	85

5.2.2.1	Dimensionnement du champ photovoltaïque.....	85
5.2.2.2	Dimensionnement de la batterie de stockage.....	86
5.2.3	Méthode de dimensionnement adoptée.....	86
5.2.3.1	Dimensionnement du champ photovoltaïque.....	87
5.2.3.2	Dimensionnement de la batterie de stockage.....	88
<b>5.3</b>	<b>Réalisation d'un programme de dimensionnement.....</b>	<b>89</b>
5.3.1	Organigramme général du programme.....	89
5.3.2	Présentation du programme.....	91
5.2.2.1	Feuille de présentation.....	91
5.2.2.2	Feuille principale 'Dimensionnement photovoltaïque'.....	91
5.2.2.3	Fenêtre 'Nouveau'.....	93
5.2.2.4	Fenêtre 'Ouvrir'.....	93
5.2.2.5	Fenêtre 'Recherche'.....	93
5.2.2.6	Fenêtre 'Données du rayonnement solaire'.....	94
5.2.2.7	Fenêtre 'Graphes du rayonnement solaire'.....	94
5.2.2.8	Fenêtre 'Détails des charges'.....	95
5.2.2.9	Fenêtre 'Module photovoltaïque'.....	95
5.2.2.10	Fenêtre 'Batteries solaires'.....	96
5.2.2.11	Fenêtre 'Rapport de dimensionnement'.....	96
5.3.3	Principe d'utilisation du programme.....	97
<b>5.4</b>	<b>Dimensionnement des accessoires du concentrateur.....</b>	<b>99</b>
5.4.1	Données d'entrées du dimensionnement.....	99
5.4.2	Résultats du dimensionnement.....	100
5.4.3	Comparaison avec d'autres logiciels.....	101
<b>5.5</b>	<b>Conclusion.....</b>	<b>101</b>
	<b>Conclusion générale.....</b>	<b>102</b>
	<b>Bibliographie.....</b>	<b>104</b>

## LISTE DES FIGURES

1.1	La répartition spectrale du rayonnement solaire.....	04
1.2	Les ressources énergétiques solaires mondiales.....	05
1.3	Le potentiel de l'Algérie en énergie solaire.....	06
1.4	L'effet photovoltaïque et la jonction PN.....	07
1.5	Caractéristique I-V d'un module photovoltaïque (T=25°C et E=1000 W/m <sup>2</sup> ).....	08
1.6	Schéma bloc d'une installation PV autonome avec stockage d'énergie.....	08
1.7	Schéma de principe d'une centrale à tour.....	11
1.8	Schéma de principe d'un concentrateur cylindro-parabolique.....	11
1.9	Schéma de principe d'un concentrateur parabolique.....	12
1.10	Schéma d'une station thermodynamique hybride.....	12
2.1	Relation entre le taux de concentration et la température du récepteur.....	16
2.2	Dimensionnement du concentrateur et angle d'ouverture.....	17
2.3	Schéma des absorbeurs (plat, cylindrique et semi cylindrique) d'un concentrateur cylindro-parabolique.....	18
2.4	Schéma de l'absorbeur.....	19
2.5	Schéma synoptique du système réalisé.....	23
2.6	Concentration géométrique des miroirs paraboliques.....	24
2.7	La courbe parabolique du concentrateur.....	25
2.8	Schéma du concentrateur réalisé et de la structure porteuse.....	25
2.9	Vue du concentrateur réalisé.....	26
2.10	Positions du concentrateur en fonction de l'état du vérin.....	26
2.11	Schéma détaillé du vérin électrique.....	27
2.12	Comparaison entre les valeurs calculées et mesurées du rayonnement solaire...	28
2.13	Comparaison entre le rayonnement global calculé et mesuré.....	28
2.14	Schéma du système sur le logiciel TRNSYS.....	29
2.15	Résultats de la simulation du CCP avec un débit Q=10kg/h.....	30
2.16	Résultats de la simulation du CCP avec un débit Q=50kg/h.....	30
2.17	Résultats de la simulation du CCP avec un débit Q=100kg/h.....	30
2.18	Résultats de la simulation du CCP avec un débit Q=2500kg/h.....	31
2.19	Position du concentrateur stationnaire.....	31
2.20	Rayonnement solaire incident sur un plan horizontal (le 14/04/2007).....	32
2.21	Résultats obtenus pour les températures suivant le test du 14/04/2007 (Concentrateur stationnaire, angle d'inclinaison: 30°).....	33
2.22	Comparaison entre les puissances utiles (W) pour les trois inclinaisons (30°, 28°, 26°) concernant les journées du 14, 15 et 16/04/2007.....	33
2.23	Energie fournie et énergie utile du concentrateur cylindro-parabolique stationnaire réalisé le 14/04/2007.....	34
2.24	Rendement du concentrateur cylindro-parabolique Stationnaire réalisé le 14/04/2007.....	34
2.25	Rayonnement solaire incident sur un plan horizontal (le 14/05/2007).....	35
2.26	Résultats expérimentaux du concentrateur cylindro-parabolique réalisés le 14/05/2007.....	36
2.27	Résultats expérimentaux du CCP réalisés le 09/05/2007 avec un débit Q=2500kg/h.....	36
3.1	Positions du soleil dans le ciel durant l'année.....	40
3.2	Trajectoire du soleil dans le ciel pendant une année.....	40

3.3	Illustration de l'effet Cosinus dans les miroirs cylindro-paraboliques.....	41
3.4	Orientation de l'axe de rotation selon les différent cas de poursuite.....	42
3.5	Effet Cosinus sur le rayonnement concentré (cas de la poursuite intégrale).....	43
3.6	Effet Cosinus sur le rayonnement concentré (axe de rotation parallèle à l'axe du monde).....	43
3.7	Effet Cosinus sur le rayonnement concentré (axe de rotation horizontal orienté Est-Ouest).....	44
3.8	Effet Cosinus sur le rayonnement concentré (axe de rotation horizontal orienté Nord-Sud).....	44
3.9	Brochage du microcontrôleur PIC16F84A.....	46
3.10	Carte de commande réalisée liée au micro-ordinateur.....	47
3.11	Schéma global de la carte électronique réalisée.....	48
3.12	Schéma global de la carte à relais réalisée.....	49
3.13	Organigramme général du programme réalisé.....	50
3.14	Organigramme de la partie poursuite aveugle du programme réalisé.....	51
3.15	Organigramme de la partie poursuite sensible du programme réalisé.....	52
3.16	Vue de la lunette réalisée.....	53
3.17	Lunette de détection de la position du soleil.....	53
3.18	Fenêtre d'acquisition de données et de poursuite solaire.....	54
3.19	Schéma global de la carte électronique réalisée pour la poursuite sensible.....	56
3.20	Carte de commande réalisée pour poursuite solaire sensible.....	57
3.21	Organigramme du programme de la poursuite solaire du microcontrôleur.....	59
3.22	Position d'un concentrateur avec poursuite solaire.....	62
3.23	Tige utilisée pour mesurer les angles du soleil.....	62
3.24	Rayonnement solaire incident sur un plan horizontal (données du 18/08/07)....	63
3.25	Angle d'inclinaison du concentrateur et angle de soleil en fonction du temps pour une poursuite aveugle .....	63
3.26	Résultats expérimentaux du concentrateur cylindro-parabolique avec poursuite aveugle réalisés le 18/08/2007.....	64
3.27	Energie fournie et énergie utile du concentrateur cylindro-parabolique avec poursuite aveugle réalisés le 18/08/07.....	64
3.28	Rendement du concentrateur cylindro-parabolique avec poursuite aveugle réalisés le 18/08/07.....	65
3.29	Rayonnement solaire incident sur un plan horizontal données le 04/11/2007 ...	65
3.30	Angle d'inclinaison du concentrateur et hauteur du soleil en fonction du temps pour une poursuite sensiblele .....	66
3.31	Résultats expérimentaux du concentrateur cylindro-parabolique avec poursuite solaire sensible.....	66
3.32	Energies fournie et énergie utile du concentrateur cylindro-parabolique avec poursuite sensible réalisés le 04/11/07.....	67
3.33	Rendement du concentrateur cylindro-parabolique avec poursuite sensible réalisés le 04/11/07.....	67
4.1	Principe des thermocouples.....	73
4.2	Le thermocouple Type K utilisé.....	73
4.3	Vue du pyranomètre utilisé.....	73
4.4	Schéma bloc de la chaîne de mesure.....	74
4.5	Vue de l'enregistreur de données utilisé.....	75
4.6	Organigramme de traitement de données acquises.....	78
4.7	Fenêtre d'affichage des données collectées.....	79

4.8	Organigramme général du programme d'acquisition.....	80
4.9	Page d'accueil du site WEB réalisé.....	81
5.1	Organigramme général du programme 'DIM_PV_CCP'.....	90
5.2	Représentation de la feuille initiale du programme.....	91
5.3	Fenêtre principale de dimensionnement.....	91
5.4	Fenêtre 'Nouveau' du programme.....	93
5.5	Représentation de la fenêtre 'Ouvrir' du programme.....	93
5.6	Fenêtre de recherche.....	93
5.7	Fenêtre 'Données de rayonnement solaire'.....	94
5.8	Fenêtre 'Graphes de rayonnement solaire'.....	94
5.9	Fenêtre 'Détails des charges'.....	95
5.10	Fenêtre 'Module photovoltaïque'.....	95
5.11	Fenêtre 'Rechercher un module'.....	95
5.12	Fenêtre 'Batteries solaires'.....	96
5.13	Fenêtre 'Rapport de dimensionnement'.....	97
5.14	Rayonnement solaire pour la ville de Ghardaïa.....	99
5.15	Consommation des charges utilisées.....	100

## NOMENCLATURES

<b>Symbole</b>	<b>Description</b>
$\lambda$	Longueur d'onde ( $\mu$ m).
$C$	Taux de concentration.
$A_o$	Surface d'ouverture ( $m^2$ ).
$A_r$	Surface d'absorbeur ( $m^2$ ).
$Q_{r \rightarrow s}$	Energie émise par l'absorbeur et reçue par la source ( $Wh/m^2$ ).
$Q_{s \rightarrow r}$	Energie émise par la source et reçue par l'absorbeur ( $Wh/m^2$ ).
$\theta_c$	Demi-angle du cône de distribution du rayonnement solaire.
$E$	Rayonnement absorbé par unité de surface d'ouverture ( $W/m^2$ ).
$E_b$	Rayonnement incident sur le plan d'ouverture ( $W/m^2$ ).
$\tau$	Facteur optique du collecteur.
$\tau$	Facteur de transmission.
$\alpha$	Facteur d'absorption.
$f$	La longueur focale (m).
$r$	Le rayon maximum de la courbe parabolique (m).
$\phi_r$	Angle d'ouverture du concentrateur.
$D$	Le diamètre d'un récepteur cylindrique (m).
$W$	La largeur du concentrateur (m).
$F'$	Facteur d'efficacité.
$U_L$	Coefficient des pertes thermiques.
$F_R$	Facteur de la chaleur dissipée du collecteur.
$Q_u$	La puissance gagnée au niveau de collecteur (W).
$U_c$	Pertes par conduction au niveau du support.
$h_v$	Coefficient de convection du vent ( $W/m^2C$ ).
$Re$	Nombre de Reynolds.
$Nu$	Nombre de Nusselt.
$D_r$	Diamètre de tube (absorbeur ou couvert en verre) (m).
$V$	Vitesse de vent (m/s).
$\mu$	Viscosité de l'air.
$Mv$	Masse volumique ( $kg/m^3$ ).

$h_r$	Coefficient d'irradiation linéaire (W/m <sup>2</sup> C).
$\bar{T}$	Température moyenne d'irradiation (°C).
$\varepsilon$	Emissivité de surface de l'absorbeur.
$\sigma$	Coefficient de Stephan Boltzman = 5,667x10 <sup>-8</sup> W/m <sup>2</sup> K <sup>4</sup> .
$T_r$	Température au niveau de l'absorbeur.
$T_c$	Température au niveau du couvert (tube en verre).
$\varepsilon_r$	Emissivité de la surface de l'absorbeur (°C).
$\varepsilon_c$	Emissivité de verre du couvert.
$F_{rc}$	Facteur de forme entre le récepteur et le couvert; généralement il est égal à 1.
$D_e$	Diamètre externe du tube de l'absorbeur (m).
$D_i$	Diamètre interne du tube de l'absorbeur (m).
$h_{fi}$	Coefficient de transfert de chaleur à l'intérieur de l'absorbeur (W/m <sup>2</sup> °C).
$k$	Conductivité thermique (W/m°C).
$\dot{m}$	Débit massique (Kg/s).
$C_p$	Pouvoir calorifique (J/kg°C).
$T_e$	Température d'entrée du fluide caloporteur (°C).
$T_a$	Température ambiante (°C).
$V$	Volume de fluide caloporteur (m <sup>3</sup> )
$A_o$	Surface d'ouverture du concentrateur cylindro-parabolique (m <sup>2</sup> ).
$A_r$	Surface du récepteur (m <sup>2</sup> ).
$\rho$	Facteur de réflexion du miroir.
$\tau_a$	Transmission absorption.
$\gamma$	Facteur optique du collecteur.
$T_s$	Température de sortie (°C).
$\eta$	Rendement du concentrateur solaire.
$T_c$	Température sous le couvert de verre (°C).
$T_{abs}$	température de tube absorbeur (°C).
$\delta(N)$	Déclinaison solaire.
$d(N)$	Distance terre soleil.
$c(N)$	Correction distance terre soleil.
$TSM$	Temps solaire moyen.
$TSV$	Temps solaire Vrai.
$Tu$	Temps universel.

$Et$	Equation du temps.
$d$	Durée du jour.
$i$	Angle d'incidence sur un plan quelconque.
$G^e$	L'énergie reçue au cours de la journée.
$H_L$	Heure de levé de soleil.
$H_c$	Heure de coucher de soleil.
$\delta$	Déclinaison.
$H$	Angle horaire.
$\varphi$	Latitude de lieu.
$g^e$	La puissance de rayonnement, par unité de surface ( $W/m^2$ ).
$g_n^e$	La puissance de rayonnement, par unité de surface pour un plan horizontal.
$A_{he}$	Altérence hiver/été.
$T_0$	Le trouble dû à l'absorption gazeuse.
$T_1$	Le trouble dû à l'absorption par les gaz ( $O_2, CO_2, O_3$ ).
$T_2$	Le trouble relatif à la diffusion par les aerosols.
$T$	Le coefficient de trouble atmosphérique.
$s$	Rayonnement direct sur un plan horizontal ( $W/m^2$ ).
$D(h, T')$	Rayonnement diffus sur un plan horizontal ( $W/m^2$ ).
$G$	Rayonnement global sur un plan horizontal ( $W/m^2$ ).
$T_{fc}$	Température du fluide caloporteur ( $^{\circ}C$ ).
$C_j$	Energie moyenne journalière requise par la charge ( $Wh/j$ ).
$P$	Puissance électrique consommée par la charge ( $W$ ).
$h$	La durée d'utilisation quotidienne moyenne (heures).
$K$	Facteur tenant compte des diverses considérations qui affectent le rendement de l'installation.
$P_{cm}$	Puissance crête correspondant à un module ( $W$ ).
$P_c$	Puissance crête nécessaire ( $W$ ).
$N_j$	Nombre de jours d'autonomie du système.
$U$	Tension de travail de l'installation ( $V$ ).
$Cu$	Capacité de stockage ( $Ah$ ).
$N$	Nombre de module nécessaire.
$G_{cs}$	Coefficient constant; il est égal à 1000.
$R_o$	Rendement de l'onduleur (%);

$R_r$	Rendement du régulateur (%).
$E_p$	Energie journalière fournie par un module (Wh)
$U_n$	Tension nominale d'un module (V).
$N_s$	Nombre de module en série
$N_p$	Nombre de branche en parallèle
$St$	Surface totale du générateur (m <sup>2</sup> )
$C_s$	Capacité de stockage (Wh)
$C_u$	Capacité utile de stockage (Ah)
$N_{bs}$	Nombre d'élément batterie en série
$N_{bp}$	Nombre de branche d'élément en parallèle

## INTRODUCTION GENERALE

La lutte contre le changement climatique a récemment relancé les efforts de recherche pour produire de l'électricité ou d'autres vecteurs énergétiques en minimisant les émissions de carbone, ceci par le recours aux énergies renouvelables en général et aux technologies solaires à concentration en particulier. L'élargissement du « mix énergétique » est envisageable en raison des avantages spécifiques de ces filières: souplesse liée au stockage et à l'hybridation, rendement de conversion solaire-électricité élevés, possibilité de poly génération électricité-chaleur-eau potable, temps de retour énergétique court, faible impact environnemental et fort potentiel de réduction des coûts. [1]

Les centrales solaires thermodynamiques ont fait l'objet d'études à partir de la crise pétrolière de 1974, et ont abouti à des prototypes mis en service dans les années 1980 [1]. A la lumière de ces premières réalisations expérimentales, l'objectif de produire de l'électricité distribuée sur un réseau avec des unités de puissance largement supérieure au Mégawatt s'est montré techniquement accessible. Les possibilités d'hybridation de ces installations avec des systèmes conventionnels de production de chaleur permettent de garantir la production d'électricité à un niveau stable sans recourir à une centrale conventionnelle d'appoint [1].

Avec près de 2000 MWe de projet dans le monde, les concepts de centrales solaires thermodynamiques ouvrent aujourd'hui de grandes possibilités de développement, grâce notamment aux politiques incitatives qui se mettent en place dans quelques pays. L'Algérie avec son gisement solaire très important commence à penser à l'exploitation de cette énergie et à investir dans ces centrales, avec un projet hybride solaire-gaz de 150 MW qui sera réalisé à Hassi Rmel au sud du pays. Ce genre de projet nous a incité à réaliser un prototype d'un concentrateur solaire cylindro-parabolique afin de connaître et d'identifier ses différents paramètres ainsi que son rendement dans le milieu saharien, en tenant compte des effets climatiques (vents de sable, l'effet de serre, etc.). Il est à signaler que le côté hybride de ce projet ne concerne pas l'ajout d'une autre source d'énergie telle que l'éolien, le gaz ou le diesel, qui habituellement, remplacent la source d'énergie principale en cas de son absence. Dans notre cas la seule source est le soleil et elle est commune entre le thermique et le photovoltaïque, le côté hybride concerne uniquement l'alimentation des accessoires associés au concentrateur cylindro-parabolique telle que la pompe de circulation et le système de poursuite solaire.

Ce document qui décrit notre travail est architecturé en cinq chapitres :

Le premier est consacré à des notions sur l'énergie solaire et ses applications, ainsi que des généralités sur le rayonnement et le potentiel solaire de notre pays. Nous parlerons brièvement de l'énergie solaire photovoltaïque en abordant les systèmes à concentration solaire et les cycles de production d'électricité puis nous terminerons par les perspectives de l'Algérie pour le thermodynamique.

Dans le second chapitre nous nous intéresserons à l'étude et la réalisation du concentrateur solaire cylindro-parabolique, commençant par une étude théorique du système à réaliser avec une simulation du fonctionnement du concentrateur utilisant le logiciel TRNSYS, qui est un logiciel puissant utilisé pour la simulation de ce genre d'installations. La simulation du rayonnement solaire est également indispensable à ce stade. Ensuite nous passerons à partie pratique du travail où nous décrirons la réalisation du concentrateur avec sa structure porteuse et le circuit de fluide caloporteur ainsi que le dispositif mécanique de poursuite solaire. Le schéma synoptique et le principe de fonctionnement de l'ensemble y seront expliqués. Des tests sont réalisés sur le système en état stationnaire pour vérifier aussi bien le taux de concentration et le rendement du concentrateur. Nous avons pour cela mesuré les températures au niveau du foyer et le rayonnement solaire à différentes inclinaisons, ensuite nous avons calculé la puissance utile pour déterminer l'inclinaison optimale du concentrateur cylindro-parabolique, puis après avoir intégré une pompe de circulation, nous avons mesuré les températures de sortie et d'entrée du fluide caloporteur où nous avons constaté l'effet important du débit de la pompe.

Le troisième chapitre sera consacré à la poursuite solaire et nous y discuterons des deux cotés électronique et informatique des systèmes de poursuites réalisés (aveugle et sensible). Nous présenterons d'abord le programme écrit en langage Delphi, élaboré pour la gestion de la poursuite solaire et la commande du dispositif de poursuite (vérin). Cette opération aura nécessité la réalisation d'une carte de commande liée au port parallèle pour permettre l'acquisition et le traitement des données collectées. Nous parlerons également d'une autre carte électronique réalisée pour assister la poursuite solaire d'une manière autonome. Nous décrirons enfin nos tests effectués afin de connaître :

- L'utilité d'utilisation des systèmes de poursuite dans les concentrateurs solaire cylindro-paraboliques;
- L'effet de la poursuite solaire sur les températures d'entrées et de sorties et sur le rendement du concentrateur;
- Le meilleur type de poursuite parmi ceux adoptés.

Dans le quatrième chapitre, nous traiterons de la chaîne d'acquisition de données et du programme réalisé pour la gestion de l'ensemble ainsi que de la méthode adoptée pour le décodage des données collectées à partir du banc d'essai et à travers l'enregistreur utilisé. Eventuellement, un schéma bloc de la chaîne de mesure sera proposé et les instruments de mesure utilisés seront présentés à savoir: capteurs de températures, pyranomètre ...etc.

Par la suite une méthode de dimensionnement du générateur photovoltaïque sera choisie pour l'alimentation des accessoires du concentrateur. Le programme réalisé permettant d'effectuer cette tâche sera présenté et également validé, ces travaux faisant l'objet du cinquième et dernier chapitre.

Finalement une conclusion générale contenant les interprétations et les perspectives envisagées terminera ce mémoire.

## **Chapitre 1 :**

# **GENERALITES SUR LE SOLAIRE**

## 1.1. L'énergie solaire

L'énergie solaire présente certains avantages non négligeables sur les autres sources énergétiques, elle est: locale, gratuite, propre, silencieuse et durable [2]. L'énergie solaire peut être utilisée sur toute la surface de la terre ou presque, il suffit donc de capter celle-ci et de l'utiliser.

### 1.1.1. Le soleil

Le soleil exerce sur notre planète une action vitale, véritable source de vie. Bien qu'il soit le centre du système qui porte son nom, le soleil n'est qu'une étoile parmi tant d'autres dans notre galaxie ; sa lumière met 8mn et 18s pour parvenir sur terre. C'est une énorme sphère incandescente de plasma à la température voisine de 5800K [3] dont le diamètre atteint 1391000km. La puissance émise par ce dernier est estimée à  $1,7 \times 10^{23}$  kW dont une partie de l'ordre de  $8,5 \times 10^{13}$  kW atteint le globe terrestre, seuls 70% (environ  $6 \times 10^{13}$  kW) de cette puissance pénètrent l'atmosphère [3].

### 1.1.2. Le rayonnement solaire

Le soleil nous envoie de l'énergie sous forme de rayonnement électromagnétique dont la longueur d'onde varie de  $0,22\mu\text{m}$  à  $10\mu\text{m}$ , la *figure.1.1* représente la variation de la répartition spectrale de ce rayonnement. Sur ce graphe on constate que pour  $\lambda \leq 0,3\mu\text{m}$  le rayonnement est négligeable alors que pour la partie visible du rayonnement, pour des valeurs entre  $0,3$  et  $0,7\mu\text{m}$  l'absorption par l'atmosphère est faible. [4]

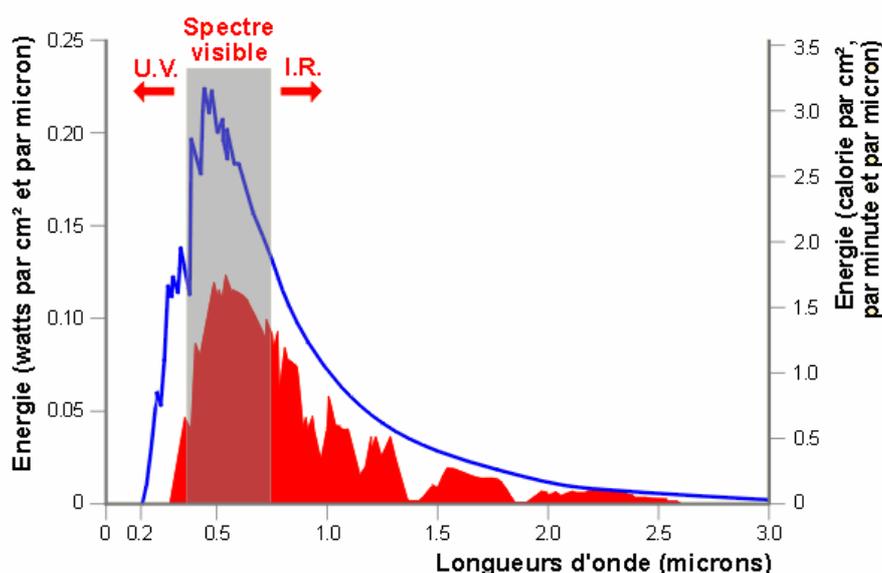
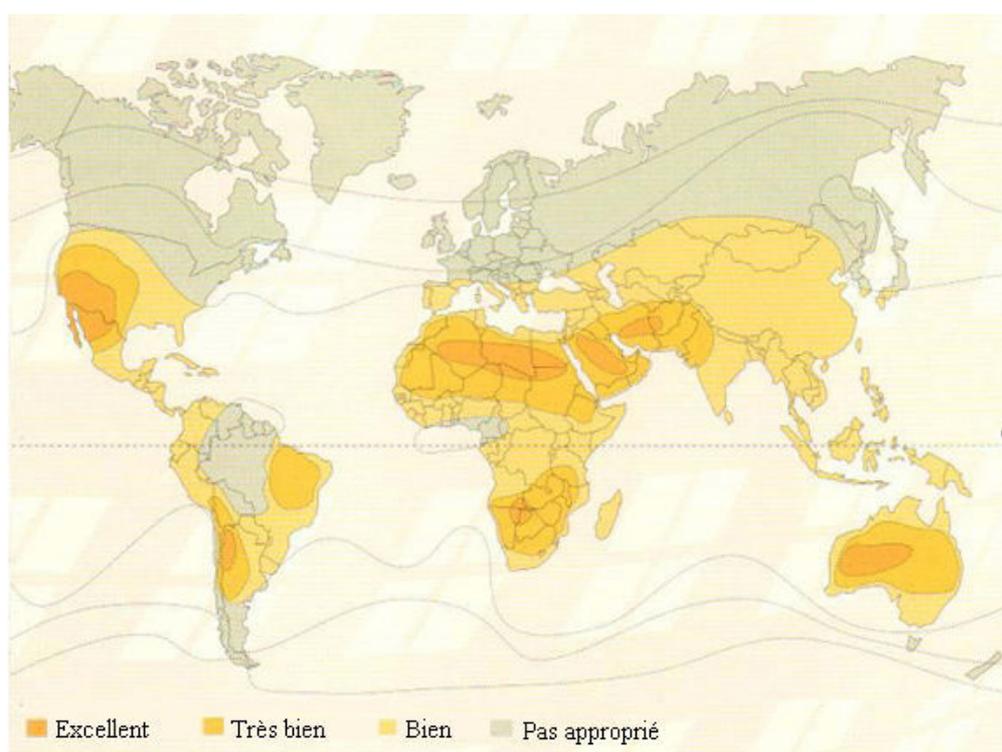


Figure.1.1. Répartition spectrale du rayonnement solaire.

### 1.1.2.1. Le potentiel solaire dans le monde

Les technologies solaires utilisant les systèmes à concentration pour la production électrique exigent l'ensoleillement normal direct. En conséquence, les endroits d'exploitation appropriés (*figure.1.2*) sont situés dans les régions arides ou semi-arides de notre planète [5]. Les sources d'énergie renouvelables dans les pays au bord de la méditerranée à elles seules peuvent faire face à la demande énergétique mondiale croissante. En effet, la ressource d'énergie la plus importante dans ces pays est l'irradiation solaire, avec un potentiel qui peut satisfaire la demande en l'électricité du monde entier. [6]



*Figure.1.2. Les ressources énergétiques solaires mondiales.*

### 1.1.2.2. Les ressources solaires de l'Algérie

Avec 2 381741 km<sup>2</sup> de surface, l'Algérie est le pays le plus vaste de la zone méditerranéenne. Selon une étude de l'agence aérospatiale allemande DLR [6], l'Algérie offre les possibilités les plus intéressantes à long terme, pour investir dans les centrales thermiques solaires. En effet, l'Algérie est l'un des pays de la méditerranée qui dispose d'un potentiel solaire énorme (*figure.1.3*) et selon les données d'ensoleillement [7] l'Algérie est comptée parmi les meilleurs pays ensoleillé dans le monde. Le potentiel des ressources solaires de notre pays est optimal pour l'exécution des projets des concentrateurs solaires.

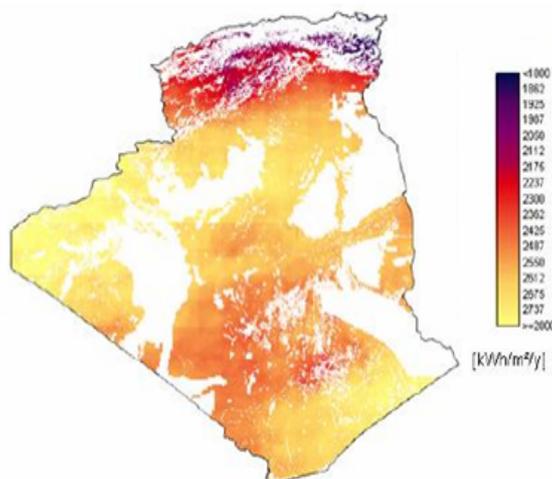


Figure.1.3. Le potentiel de l'Algérie en énergie solaire. [6]

### 1.1.3. Les applications de l'énergie solaire

Aujourd'hui, nous captions l'énergie solaire pour chauffer les maisons, l'eau et pour produire de l'électricité, et cela au moyen de trois différentes méthodes et technologies:

#### 1.1.3.1. Le solaire passif

Le terme passif renvoie aux techniques utilisées pour capter l'énergie, techniques qui misent sur la conception des immeubles et le type de matériaux utilisés pour les construire. La conception solaire passive utilise les éléments fondamentaux d'un immeuble pour contrôler la quantité d'énergie solaire absorbée ou perdue. Cette conception aide aussi à conserver la fraîcheur en été. [8]

#### 1.1.3.2. Le solaire actif

Le système d'énergie solaire active utilise des capteurs solaires pour capter l'énergie du soleil et produire de l'électricité afin d'alimenter des pompes et des ventilateurs qui distribuent de l'eau et de l'air chaud, tels que les systèmes à chauffe eau solaire qui utilisent les capteurs plans vitrés ou sous vide pour chauffer l'eau, les locaux ou pour la ventilation solaire. Un autre exemple est celui qui utilise les centrales solaires thermodynamiques. [8]

#### 1.1.3.3. L'électricité solaire

Le processus photovoltaïque transforme l'énergie solaire en courant électrique continu. Le physicien Edmond Becquerel a décrit l'effet en 1839, mais ce n'est que vers la fin des années 1950 que les cellules photovoltaïques pratiques ont été commercialisées. [8]

## 1.2. Solaire photovoltaïque

L'électrification par énergies renouvelables est une solution attractive en site isolé, à accès difficile ou éloigné du réseau électrique. Les systèmes photovoltaïques semblent bien s'imposer dans ce domaine mais ils nécessitent un raccordement de dispositifs capables de convertir l'énergie solaire en énergie électrique exploitable à des fins d'alimentation.

### 1.2.1. L'énergie solaire photovoltaïque

#### 1.2.1.1. L'effet photovoltaïque et la jonction PN

La majorité des cellules photovoltaïques sont à base de silicium dopé. Lorsqu'une cellule est exposée au rayonnement solaire (*figure.1.4*), les photons transmettent leur énergie aux atomes de la jonction, énergie qui permet aux atomes de libérer des électrons, [9] générant ainsi des paires électrons - trous qui seront séparées par le champ électrique de la barrière de potentiel. Une fois les charges  $P$  et  $N$  isolées, il suffira de fermer le circuit entre ces deux zones pour mettre en mouvement les électrons et créer ainsi un courant électrique.

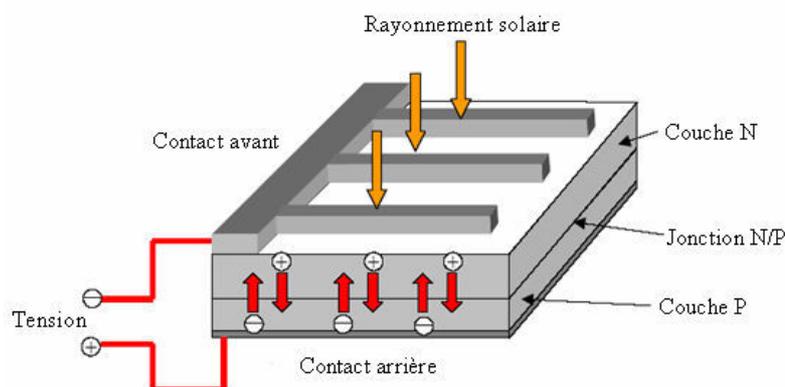


Figure.1.4. L'effet photovoltaïque et la jonction PN.

#### 1.2.1.2. Les cellules photovoltaïques

Les cellules photovoltaïques sont des composants optoélectroniques qui transforment directement la lumière solaire en électricité. Elles sont réalisées à l'aide de matériaux semi-conducteurs, c'est à dire ayant des propriétés intermédiaires entre les conducteurs et les isolants.

Le matériau de base est dans la plupart des cas le silicium. Selon le procédé de fabrication, on obtiendra des cellules, sous forme amorphe, polycristalline, ou monocristalline. [10]

### 1.2.1.3. Les modules photovoltaïques

Chaque cellule fournit fort peu d'énergie électrique, sous une tension max de l'ordre de 0.45V environ; il est donc indispensable de grouper ces cellules, pour obtenir une énergie exploitable, sous une tension pratique à utiliser. Généralement les cellules sont montées en série, la tension du module étant égale à la somme des tensions des cellules; par contre, le courant est celui d'une seule cellule. [8]

La caractéristique  $I=f(V)$  d'un module photovoltaïque est schématisée sur la *figure.1.5*:

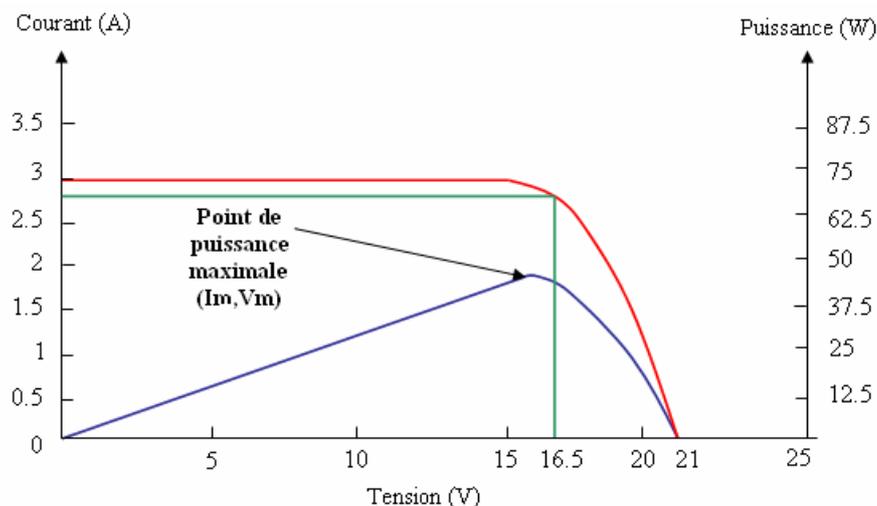


Figure.1.5. Caractéristique  $I-V$  d'un module photovoltaïque ( $T=25^{\circ}\text{C}$  et  $E=1000\text{ W/m}^2$ ).

### 1.2.2. Le système photovoltaïque

Les différents éléments constituant le système photovoltaïque (*figure.1.6*), générateur d'énergie électrique, sont essentiellement: le module ou le panneau solaire, la batterie d'accumulateur, le régulateur et l'onduleur. Ils sont représentés dans le schéma bloc suivant:

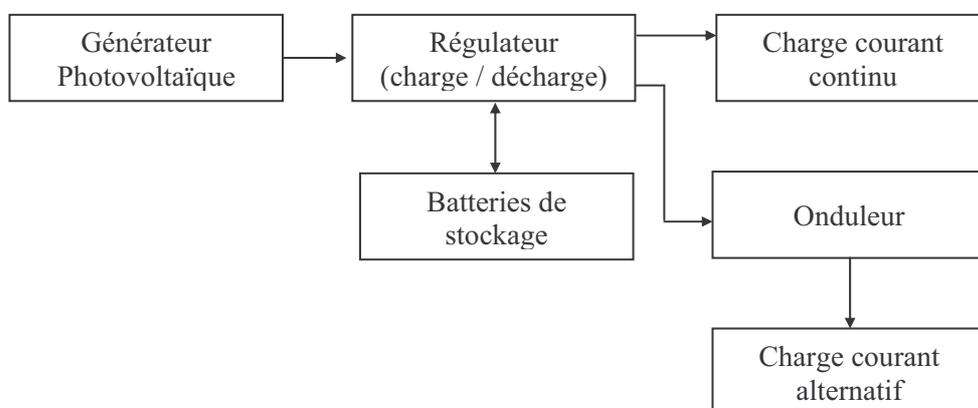


Figure.1.6. Schéma bloc d'une installation PV autonome avec stockage d'énergie.

### **1.2.2.1. Le générateur photovoltaïque**

La puissance électrique crête délivrée par un module s'avérant très insuffisante, dans la majorité des applications, il faudra donc associer plusieurs modules. Ce groupement s'effectue entre des modules ayant des caractéristiques identiques pour former des associations en série ou en parallèle ou encore série parallèle. Cette interconnexion de modules entre eux définit la notion de champ photovoltaïque.

### **1.2.2.2. La batterie**

Les caractéristiques de l'énergie solaire posent le problème du stockage au niveau des installations photovoltaïque. En effet, l'apport et les besoins en énergie ne coïncident pas, les besoins augmentent là où les apports solaires n'existent pas. Le moyen le plus adapté aux systèmes photovoltaïques est le stockage électrochimique. Le système le plus couramment utilisé est la batterie d'accumulateur électrochimique qui permet le stockage d'énergie électrique sous forme chimique pour la restituer sur demande grâce à des réactions réversibles.

### **1.2.2.3. Le régulateur**

La batterie d'accumulateurs est l'un des éléments les plus fragiles du système photovoltaïque. En effet, une charge excessive entraîne un dégagement gazeux dû aux réactions internes, ce qui provoque l'oxydation des électrodes, de même qu'une décharge profonde provoque la sulfatation des électrodes, c'est à dire une couche blanche de sulfate de plomb qui empêche toute recharge. Afin de contrôler au mieux les conditions de charge et de décharge on intercale entre le générateur et la batterie un dispositif de régulation appelé régulateur de charge et de décharge, il est l'électronique entièrement automatique à laquelle sont reliés le panneau photovoltaïque, la batterie, ainsi que les équipements destinataire de l'électricité solaire. [11]

### **1.2.2.4. L'onduleur**

Un onduleur est un dispositif électronique statique servant à convertir le courant électrique continu produit par le générateur photovoltaïque en courant alternatif (signal carré ou sinusoïdal) avec la fréquence souhaitée, dont il existe une très grande variété sur le marché.

## **1.2.3. Les différents systèmes photovoltaïques**

Il existe différents types de générateurs en fonction du service et des applications recherchées:

### **1.2.3.1. Les systèmes photovoltaïques autonomes**

Les systèmes autonomes sont complètement indépendants d'autres sources d'énergie. Ils servent habituellement à alimenter les maisons, les chalets ou les camps dans les régions éloignées ainsi qu'à des applications comme la surveillance à distance et le pompage de l'eau. Dans la majorité des cas, un système autonome exigera des batteries d'accumulateurs pour stocker l'énergie. De tels systèmes sont particulièrement utiles et rentables dans les applications estivales, lorsque l'accès à un endroit est difficile ou coûteux ou lorsque les besoins en entretien doivent être réduits au minimum. [12]

### **1.2.3.2. Les systèmes photovoltaïques connectés au réseau**

Les systèmes raccordés au réseau permettent de réduire la consommation d'électricité provenant du service public et, dans certains cas, de lui renvoyer l'énergie excédentaire. Étant donné que l'énergie est normalement emmagasinée dans le réseau même, les accumulateurs ne sont pas nécessaires, ces systèmes sont utilisés dans les immeubles, les domiciles ou les chalets déjà reliés au réseau électrique. [12]

### **1.2.3.3. Les systèmes photovoltaïques hybrides**

Les systèmes hybrides reçoivent une partie de leur énergie d'une ou de plusieurs sources supplémentaires. En pratique, les modules de systèmes photovoltaïques sont souvent alliés à une éolienne ou à une génératrice à combustible. De tels systèmes ont habituellement des accumulateurs de stockage d'énergie. Ils conviennent mieux lorsque la demande d'énergie est élevée ou lorsque l'énergie doit être fournie sur demande. [12]

### **1.2.3.4. Les systèmes photovoltaïques au fil du soleil**

L'énergie électrique produite par les modules solaires est directement utilisée par le récepteur, il n'y a donc pas de stockage électrochimique. Généralement les générateurs au fil du soleil sont destinés à alimenter des moteurs électriques en courant continu ou alternatif (dans ce cas un appareil de conversion d'énergie est requis). [13]

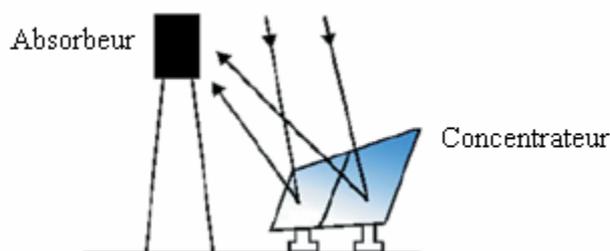
## 1.3. Solaire thermodynamique

### 1.3.1. Les technologies solaires à concentration

On désigne par "solaire thermodynamique" l'ensemble des techniques visant à transformer l'énergie rayonnée par le soleil en chaleur à température élevée, puis celle-ci en énergie mécanique à travers un cycle thermodynamique. La concentration du rayonnement solaire permet de diminuer la surface de réception et donc de minimiser l'influence des pertes thermiques du récepteur, ainsi la température atteinte après transformation en chaleur est plus élevée que pour des dispositifs à capteurs sans concentration. [14]

#### 1.3.1.1. Les centrales à tour

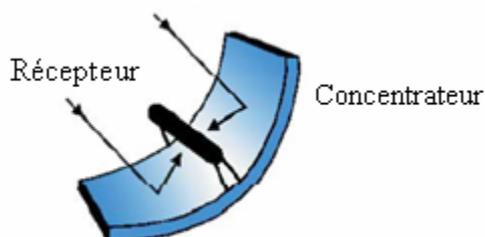
Une centrale à tour (*figure.1.7*), utilise un certain nombre de grands miroirs plats qui suivent le mouvement du soleil et qui concentrent la lumière sur un grand absorbeur situé au sommet d'une tour. Le système pompe un fluide, soit une huile synthétique à haute température ou du sel fondu, dans l'absorbeur où il est chauffé jusqu'à ( $550^{\circ}\text{C}$ ) et ensuite utilisé pour produire de l'électricité. [8]



*Figure.1.7. Schéma de principe d'une centrale à tour.*

#### 1.3.1.2. Le système à réflecteur cylindro-parabolique

Comme son nom l'indique, ce système utilise une série de longs réflecteurs cylindriques en forme de parabole (*figure.1.8*). La parabole concentre la lumière sur un tube récepteur situé le long de la ligne focale du réflecteur. Les températures du récepteur peuvent atteindre ( $400^{\circ}\text{C}$ ) et peuvent produire de la vapeur afin de fournir de l'électricité. [8]



*Figure.1.8. Schéma de principe d'un concentrateur cylindro-parabolique.*

### 1.3.1.3. Les systèmes à réflecteur parabolique

Un système à réflecteur parabolique (*figure.1.9*), utilise des miroirs paraboliques pour concentrer le rayonnement solaire sur un récepteur situé au foyer du récepteur. Le récepteur contient un fluide qui, lorsque les rayons du soleil le frappent, atteint une température de 750 à 1000°C. Ce fluide très chaud est ensuite utilisé pour produire de l'électricité dans un petit moteur fixé au récepteur. [7]

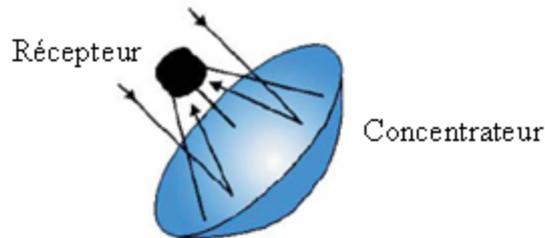


Figure.1.9. Schéma de principe d'un concentrateur parabolique.

### 1.3.2. Les fluides de transfert et les cycles thermodynamiques

Différents fluides caloporteurs et divers cycles thermodynamiques ont été proposés et testés pour convertir en électricité l'énergie solaire concentrée. [15]

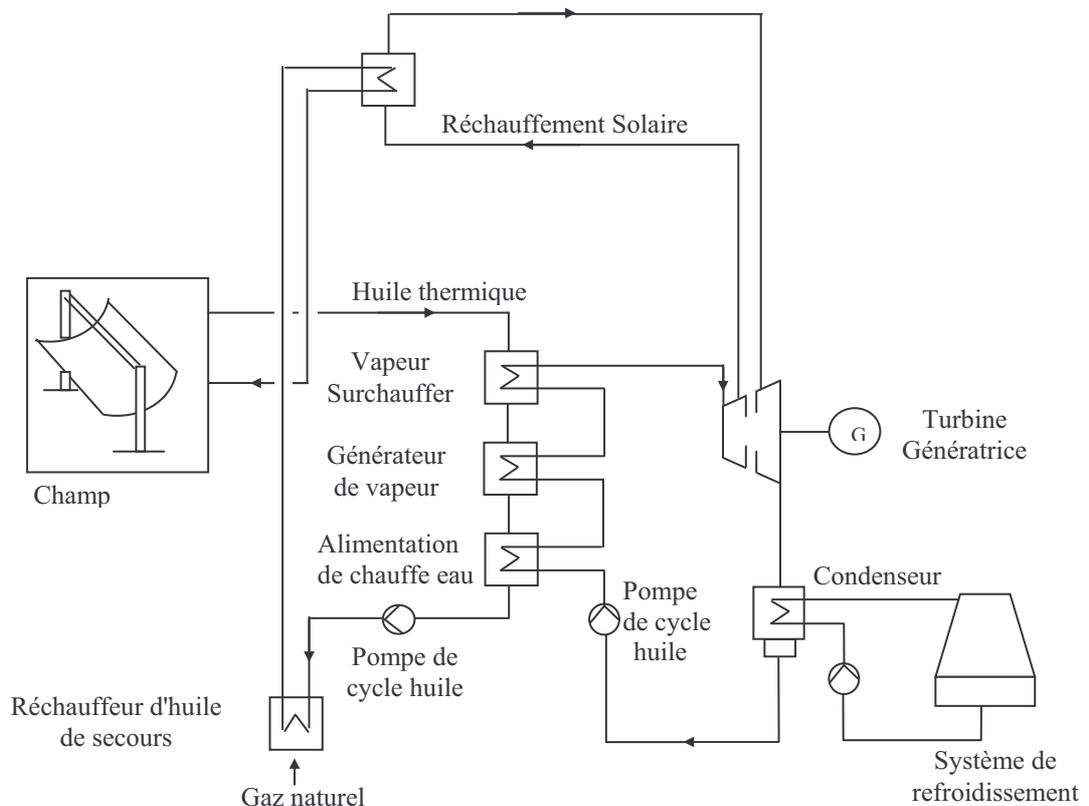


Figure.1.10. Schéma d'une station thermodynamique hybride.

### 1.3.2.1. Le cycle à vapeur

Ce cycle, généralement en eau qui est limitée en température haute à (565°C), est néanmoins capable d'excellents rendements. C'est certainement le transformateur thermomécanique le mieux connu car il est le plus anciennement mis en œuvre par l'industrie moderne mais les performances atteintes ne sont cependant pas toutes du même niveau. En effet, elles dépendent beaucoup des conditions de vapeur mises en œuvre (pression, température), de la sophistication du cycle (resurchauffé de la vapeur ou non) et encore, de la taille du groupe. [14]

### 1.3.2.2. Le cycle combiné

Le cycle combiné est constitué par une cascade des deux cycles suivants:

- Un cycle à gaz "cycle de BRAYTON" qui épuise les calories du caloporteur entre la température maximum, supposée élevée, et une température intermédiaire compatible avec les exigences du cycle suivant;
- Un cycle à vapeur "cycle de Rankine", apte à épuiser au mieux les calories restantes en même temps que de recycler les pertes du cycle de tête.

Un tel cycle est capable d'atteindre des rendements dépassant les 50% s'il dispose d'une source de chaleur à plus de (700°C). [14] [16]

### 1.3.2.3. Le cycle Stirling

Comme on le sait, ce transformateur thermomécanique est considéré depuis plus d'un siècle comme le meilleur des moteurs thermiques puisque son rendement théorique est élevé [17]. Il s'agit d'un moteur à piston à chauffage externe, utilisant couramment l'hélium ou l'hydrogène comme fluide thermodynamique. Dans la pratique, ce générateur a l'avantage de pouvoir être réalisé en petite taille sans trop perdre en rendement. C'est ce qui le rend idéal pour l'exploitation des calories récoltées avec une excellente efficacité. [14] [16]

## 1.3.3. Les configurations hybrides et le stockage d'énergie

Afin d'augmenter le facteur de capacité, certaines centrales fonctionnent en mode hybride (solaire/hydrocarbure). L'hydrocarbure fournit la chaleur d'appoint pour atteindre la puissance nominale, lorsque des besoins existent alors que l'ensoleillement est faible ou nul.

Un facteur de capacité de 100% pourra ainsi être obtenu, même avec une fraction solaire annuelle faible.

Le stockage de la chaleur d'origine solaire est un avantage significatif par rapport au stockage d'électricité, le rendement étant supérieur à 95% et le coût est faible. Par ailleurs les dispositifs de stockage de chaleur permettent de garantir une production continue avec un rendement de conversion optimum, en évitant la construction d'une centrale à ressource fossile en parallèle avec une centrale 100% solaire. [1]

#### **1.3.4. Les perspectives de l'Algérie à l'avenir du thermodynamique**

Depuis les années soixante, l'Algérie est considéré comme un important pays producteur et exportateur de gaz et de pétrole dans le monde. Actuellement l'Algérie s'est engagée pour le développement de l'énergie solaire afin de couvrir 5% des besoins nationaux de l'électricité d'ici 2010 en énergies renouvelables, étant donné que ces besoins augmentent avec un taux annuel très rapide, et cela en intégrant la technologie des concentrateurs solaires.

En Juin 2005, une première consultation a été publiée par une société, en l'occurrence NEAL (NEW ENERGY ALGERIAN), pour lancer un projet hybride de 150 MW intégrant le gaz et la technologie des concentrateurs. Il est désigné comme projet hybride solaire gaz puisqu'il comprend un champ solaire de 25 MW, qui exigera une surface d'environ 180000 m<sup>2</sup> de miroirs paraboliques. [18]

### **1.4. Conclusion**

Dans ce premier chapitre du mémoire, nous avons abordé quelques généralités sur le l'énergie solaire qui est l'origine de ce travail, puis nous avons parlé du rayonnement solaire et des ressources de l'Algérie en ce domaine. Cependant nous n'avons pas trop détaillé la partie concernant le photovoltaïque, d'une part supposé connu et d'autre part l'utilisation de cette énergie est dédiée uniquement à l'alimentation des accessoires du concentrateur. Par contre le solaire thermodynamique, qui nous importe, est bien expliqué dans ce chapitre, nous avons vu les différents types de centrales thermodynamiques et leurs principe de fonctionnement ainsi que les cycles utilisés pour l'obtention d'électricité d'origine thermodynamiques, nous avons également parlé des configurations hybrides de ces centrales et le stockage d'énergie. Après ces généralités et définitions, nous pouvons passer à la partie pratique de notre réalisation, qui fera le sujet du second chapitre.

## **Chapitre 2 :**

# **ETUDE ET REALISATION D'UN CONCENTRATEUR SOLAIRE A REFLECTEUR CYLINDRO-PRABOLIQUE**

## 2.1. Introduction

En ce début de troisième millénaire, près de deux milliards de personnes n'ont toujours pas accès à l'électricité. En effet, si dans la plupart des pays en voie de développement les réseaux électriques existent, ils concernent souvent exclusivement les grands centres urbains, les zones rurales étant donc souvent exclues, entravant ainsi leur développement. [7]

Les concentrateurs cylindro-paraboliques sont souvent utilisés pour la production d'électricité. La conception d'un concentrateur solaire est basée essentiellement sur certains paramètres très importants tels que: la réalisation de la courbe parabolique, qui doit être faite avec une grande précision afin d'assurer la meilleure concentration du rayonnement solaire au niveau du foyer récepteur. L'autre exigence est le bon choix du matériau de fabrication du miroir en question, qui détermine d'une manière directe le facteur de réflexion qui devra être le plus grand possible permettant le maximum de réflexion.

Dans ce deuxième chapitre nous nous intéresserons essentiellement à la partie pratique du travail, où nous décrivons le concentrateur cylindro-parabolique réalisé au sein de l'unité de recherche appliquée en énergies renouvelables (*URAER*) située à Ghardaïa, et cela en expliquant le principe de fonctionnement et le schéma synoptique du système en question. Nous parlerons également de la structure porteuse du système ainsi que du dispositif de vérin adopté pour la poursuite solaire.

## 2.2. Etude théorique du concentrateur cylindro-parabolique

### 2.2.1. Performances optiques d'un concentrateur cylindro-parabolique

#### 2.2.1.1. Taux de concentration

La définition la plus commune du taux de concentration est basée sur la notion de surface. Elle est donnée comme étant le rapport de la surface de l'ouverture sur la surface du récepteur [19] [20]. De ce fait le taux de concentration du flux est défini comme le rapport du flux moyen d'énergie de la surface du récepteur sur le flux d'énergie moyen de la surface de l'ouverture.

$$C = \frac{A_o}{A_r} \quad (2.1)$$

$A_o$ : Surface d'ouverture;

$A_r$ : Surface d'absorbeur.

Le paramètre concentration détermine de façon directe la température d'utilisation (*figure.2.1*), on peut distinguer: [19]

- Les faibles concentrations ( $1 < C < 10 \Rightarrow T_c \sim 150^\circ\text{C}$ );
- Les moyennes concentrations ( $10 < C < 100 \Rightarrow T_c \sim 300^\circ\text{C}$ );
- Les fortes concentrations ( $C \geq 100 \Rightarrow T_c \geq 500^\circ\text{C}$ ).

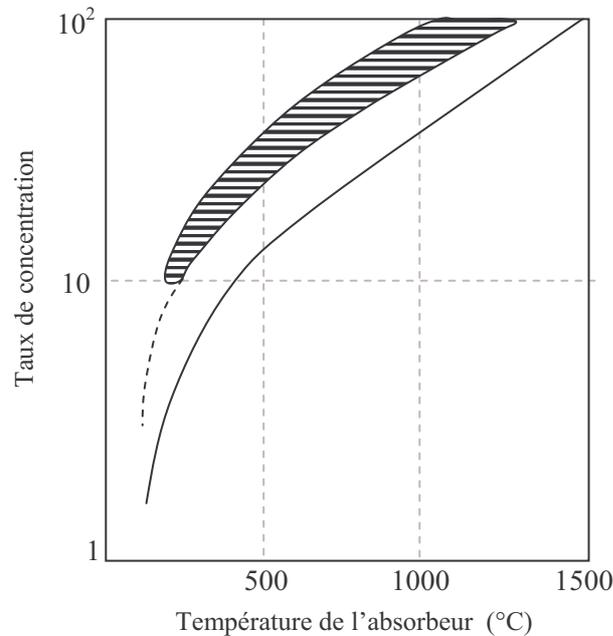


Figure.2.1. Relation entre le taux de concentration et la température du récepteur. [19]

— : La limite minimale: lorsque les pertes thermiques sont égale à l'énergie absorbée.

▨ : La zone hachurée: correspond à l'intervalle de fonctionnement du concentrateur.

On considère un concentrateur d'ouverture ( $A_o$ ) et surface de réception ( $A_r$ ) orienté vers le soleil. L'énergie émise par la source est captée par l'absorbeur. Après des réflexions ou des réfractions, elle est égale à l'énergie émise par l'absorbeur et reçue par la source. En se referant à la seconde loi de la thermodynamique, il ne peut y avoir d'échange net de chaleur entre deux corps portés à la même température. [20]

$$Q_{s \rightarrow r} = Q_{r \rightarrow s} \Rightarrow C_{Idéal} = \frac{1}{\sin(\theta_c)} \quad (2.2)$$

$Q_{r \rightarrow s}$  : Energie émise par l'absorbeur et reçue par la source en Wh/m<sup>2</sup>;

$Q_{s \rightarrow r}$  : Energie émise par la source et reçue par l'absorbeur en Wh/m<sup>2</sup>;

$\theta_c$  : Demi angle du cône de distribution du rayonnement solaire.



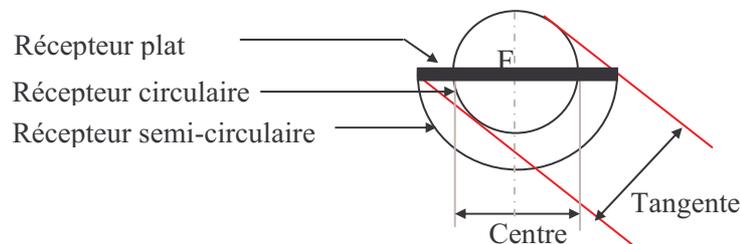
### 2.2.1.4. Rayon local du miroir

Pour n'importe quel point du réflecteur parabolique le rayon de miroir est: [19]

$$r = \frac{2 \cdot f}{1 + \cos(\phi)} \quad (2.5)$$

### 2.2.1.5. Diamètre et largeur du récepteur

La *figure.2.3* montre schématiquement comment les rayons réfléchis à partir de la tangente de la parabole déterminent la largeur de la zone focale, La largeur de l'image du soleil dans le plan focal augmente avec l'augmentation de l'angle d'ouverture ( $\phi_r$ ). Il est clair; depuis ce diagramme que l'angle d'incidence du rayonnement sur la surface de ces formes de récepteur est variable. [19]



*Figure.2.3. Schéma des absorbeurs (plat, cylindrique et semi cylindrique) d'un concentrateur cylindro-parabolique.*

Pour les réflecteurs paraboliques d'une forme et d'un alignement parfait, on peut calculer le diamètre ( $D$ ) d'un récepteur cylindrique par l'équation suivante: [19]

$$D = 2 \cdot r_r \cdot \sin(0.267) = \frac{a \cdot \sin(0.267)}{\sin(\phi_r)} \quad (2.6)$$

Pour un récepteur plat dans le plan focal de la parabole, la largeur ( $W$ ) est:

$$W = \frac{2 \cdot r_r \cdot \sin(0.267)}{\cos(\phi_r + 0.267)} = \frac{a \cdot \sin(0.267)}{\sin(\phi_r) \cdot \cos(\phi_r + 0.267)} \quad (2.7)$$

### 2.2.2. Performances thermiques d'un concentrateur cylindro-parabolique

Le calcul des performances des concentrateurs cylindro-paraboliques suit la même méthode de calcul que celui des capteurs plan. Il est nécessaire de calculer le facteur d'efficacité ( $F'$ ) et le coefficient des pertes thermiques ( $U_L$ ) ainsi que le facteur de la chaleur dissipée du collecteur ( $F_R$ ). On pourra alors calculer la puissance gagnée au collecteur ( $Q_u$ ), en connaissant les valeurs de ( $F_R$ ) et ( $U_L$ ). [21]

La *figure.2.4* présente l'absorbeur et ses différents éléments.

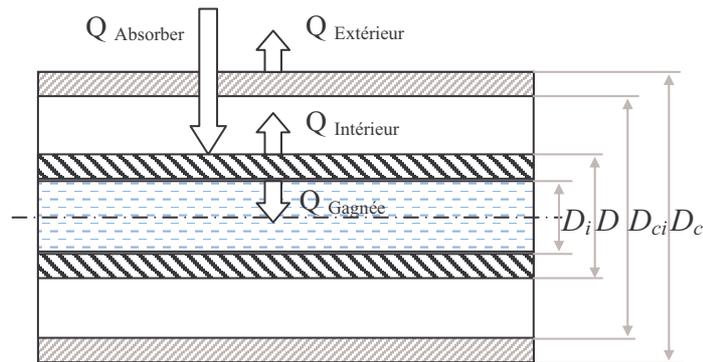


Figure.2.4. Schéma de l'absorbeur.

### 2.2.2.1. Coefficient des pertes thermiques $U_L$ (tube non couvert)

On considère l'absorbeur d'un concentrateur cylindro-parabolique non couvert (tube en verre pour réaliser l'effet de serre). Le coefficient des pertes thermiques prend en considération la convection et l'irradiation à partir de la surface et la conduction au niveau du support. [19]

$$U_L = h_v + h_r + U_c \quad (2.8)$$

$U_c$ : Coefficient des pertes par conduction au niveau du support;

$h_v$ : Coefficient de convection du vent avec:

$$Re = \frac{Mv \cdot V \cdot D_r}{\mu}$$

$D_r$ : Diamètre de tube (absorbeur ou couvert en verre);

$V$ : Vitesse de vent ( $m/s$ );  $\mu$ : Viscosité de l'air;

$Mv$ : Masse volumique.

$$Nu = 0.26 \cdot Re^{0.5} + 0.00128 \cdot Re$$

$$h_v = \frac{Nu \cdot V^{0.6}}{D_e} \quad (2.9)$$

$V$ : Vitesse de vent ( $m/s$ ).

$h_r$ : Coefficient d'irradiation linéaire avec:

$$h_r = 4 \cdot \sigma \cdot \varepsilon \cdot \bar{T}^3 \quad (2.10)$$

$\bar{T}$ : Température moyenne d'irradiation ( $^{\circ}C$ );

$\varepsilon$ : Emissivité de surface de l'absorbeur;

$\sigma$ : Coefficient de *Stephan Boltzman*  $5,667 \times 10^{-8} W/m^2K^4$ . [22]

### 2.2.2.2. Coefficient des pertes thermiques $U_L$ (tube couvert)

Maintenant si l'absorbeur est couvert avec un tube de verre de surface ( $A_c$ ), le coefficient d'irradiation entre couvert et absorbeur est différent du coefficient entre absorbeur et couvert; qui est généralement négligeable [19]. Le coefficient des pertes thermiques s'écrit comme suit:

$$U_L = \left[ \frac{A_r}{(h_v + h_{r,c-a})A_c} + \frac{1}{h_{r,a-c}} \right]^{-1} \quad (2.11)$$

$$h_v = \frac{Nu \cdot V^{0.6}}{D_{ec}} \quad , \quad h_{r,c-a} = 4 \cdot \sigma \cdot \varepsilon \cdot \bar{T}^3, \quad h_{r,a-c} = \frac{\sigma \cdot (T_r^2 - T_c^2) \cdot (T_r - T_c)}{\frac{1 - \varepsilon_r}{\varepsilon_r} + \frac{1}{F_{rc}} + \frac{(1 - \varepsilon_c) \cdot A_r}{\varepsilon_c \cdot A_c}}$$

$T_r$  : Température au niveau de l'absorbeur;

$T_c$  : Température au niveau du couvert (tube en verre);

$\varepsilon_r$  : Emissivité de la surface de l'absorbeur;

$\varepsilon_c$  : Emissivité de verre du couvert;

$F_{rc}$  : Facteur de forme entre le récepteur et le couvert; généralement il est égal à 1.

### 2.2.2.3. Facteur d'efficacité ( $F'$ )

Pour calculer ( $F'$ ) nous utiliserons l'équation suivante: [19]

$$F' = \frac{1}{U_L} \cdot \frac{1}{\frac{1}{U_L} + \frac{D_e}{h_{fi} \cdot D_i} + \left\{ \frac{D_e}{2k} \cdot \ln \left( \frac{D_e}{D_i} \right) \right\}} \quad (2.12)$$

$D_e$  : Diamètre externe du tube de l'absorbeur;

$D_i$  : Diamètre interne du tube de l'absorbeur;

$h_{fi}$  : Coefficient de transfert de chaleur à l'intérieur de l'absorbeur (W/m<sup>2</sup>°C);

$k$  : Conductivité thermique (W/m°C).

### 2.2.2.4. Facteur de flux du collecteur ( $F''$ )

A fin de calculer ce facteur nous avons utilisé l'équation suivante: [19]

$$F'' = \frac{\dot{m} \cdot C_p}{A_r \cdot U_L \cdot F'} \cdot \left[ 1 - e^{-\left\{ \frac{A_r \cdot U_L \cdot F'}{\dot{m} \cdot C_p} \right\}} \right] \quad (2.13)$$

$\dot{m}$  : Débit massique;

$C_p$  : Pouvoir calorifique (J/kg°C);

Le facteur du flux dégagé du collecteur sera:

$$F_R = F'' \cdot F' \quad F_R = \frac{\dot{m} \cdot C_p}{A_r \cdot U_L} \left[ 1 - e^{-\left[ \frac{A_r \cdot U_L \cdot F'}{\dot{m} \cdot C_p} \right]} \right] \quad (2.14)$$

### 2.2.2.5. Puissance utile ( $Q_u$ )

Maintenant on peut déterminer la puissance gagnée par le collecteur au niveau du foyer :

$$Q_u = F_R [E \cdot \rho \cdot \tau \cdot \alpha \cdot \gamma \cdot A_o - U_L \cdot A_r \cdot (T_e - T_a)] \quad (2.15)$$

$E$  : Rayonnement incident ( $W/m^2$ );

$T_e$  : Température d'entrée du fluide caloporteur (°C);

$T_a$  : Température ambiante (°C);

$A_o$  : Surface d'ouverture du concentrateur cylindro-parabolique ( $m^2$ );

$A_r$  : Surface du récepteur ( $m^2$ );

$\rho$  : Facteur de réflexion du miroir;

$\tau \cdot \alpha$  : Transmission absorption;

$\gamma$  : Facteur optique du collecteur.

### 2.2.2.6. Température de sortie du fluide caloporteur ( $T_{sortie}$ )

Pour calculer la température de sortie nous avons l'équation suivante: [22]

$$T_S = T_e + \frac{Q_u}{\dot{m} \cdot C_p} \quad (2.16)$$

$T_S$  : Température de sortie;

$T_e$  : Température d'entrée;

$\dot{m}$  : Débit massique;

$C_p$  : Pouvoir calorifique.

### 2.2.2.7. Rendement du concentrateur solaire ( $\eta$ )

Finalement pour calculer le rendement nous avons utilisé l'équation suivante: [22]

$$\eta = \frac{Q_u}{E \cdot A_o \cdot \gamma} \quad (2.17)$$

## 2.3. Description du concentrateur réalisé

### 2.3.1. Description du prototype

Le prototype réalisé pour effectuer les tests comporte essentiellement:

- Un réflecteur solaire qui est une tôle inoxydable d'indice de réflexion (0.76) sous forme de parabole cylindrique qui est l'élément essentiel du concentrateur cylindro-parabolique, et une tige de longueur de (2m) qui constituera le foyer à tube sous vide au niveau duquel se concentreront les rayons du soleil. Le concentrateur sera muni d'un vérin de commande, ce qui permettra l'orientation de l'ensemble.
- D'autre part on aura besoin d'une cuve de stockage d'une capacité de (200 litres) contenant un échangeur de chaleur; d'une longueur de 4m muni d'une pompe de circulation du fluide caloporteur à faible débit.
- L'intégration d'un générateur photovoltaïque sera nécessaire pour l'alimentation des différents accessoires. Un stockage chimique de l'énergie est également envisageable à ce stade, l'architecture de ce sous système sera déterminée par le dimensionnement en question.
- Différents capteurs seront placés au niveau du système pour permettre l'acquisition des données issues des capteurs de mesure. Une unité d'acquisition de données se chargera de les mesurer.
- L'ensemble nécessitera un micro-ordinateur contenant les deux ports: série et parallèle pour la gestion du système à travers un logiciel spécialement conçu pour cette application.
- Une carte électronique de commande à base d'un microcontrôleur élaborée à cet effet sera intercalée et servira d'interface entre le Pc et les organes du système.

### 2.3.2. Principe de fonctionnement

Le concentrateur cylindro-parabolique est orienté vers l'est dès le lever du soleil. La poursuite solaire sera assurée grâce à un vérin électrique commandé. La focalisation du rayonnement se fait sur le foyer central, le fluide caloporteur qui y circule à l'aide d'une pompe transporte sa chaleur vers un échangeur situé à l'intérieur de la cuve de stockage.

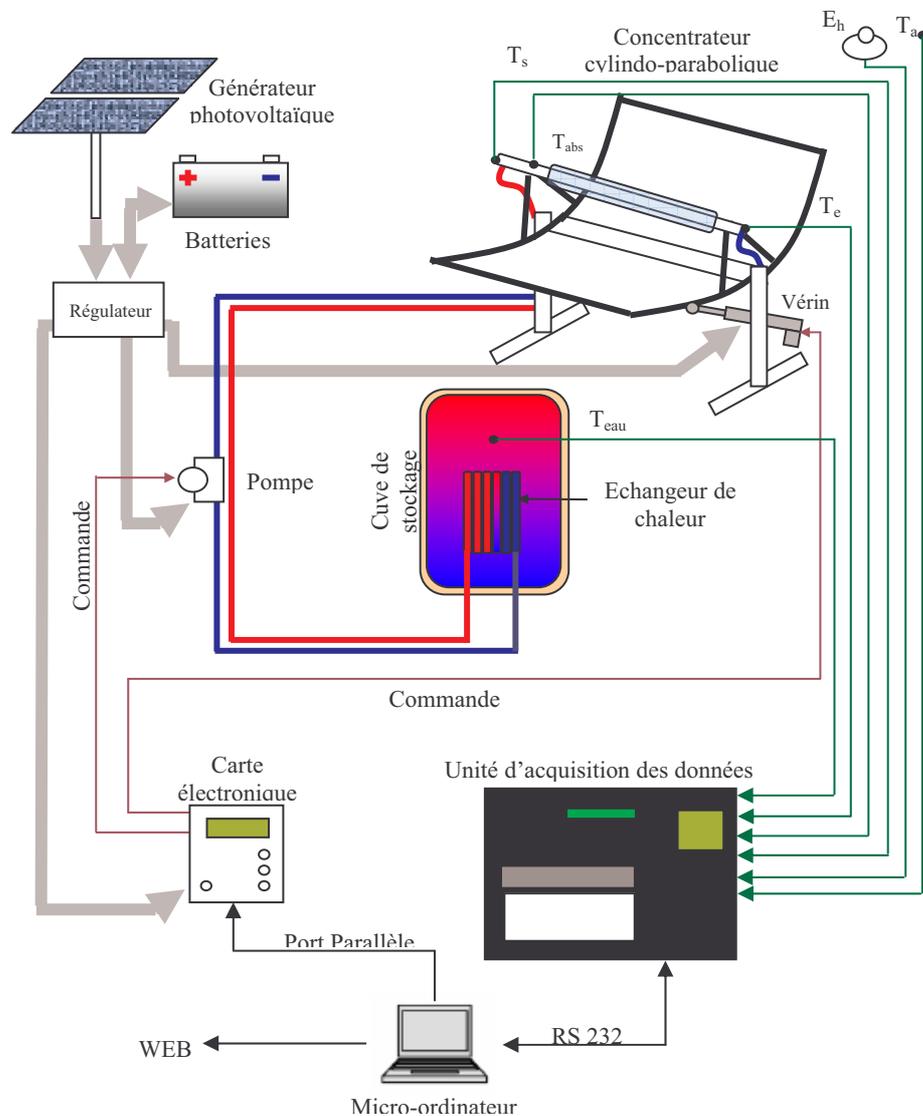
La gestion du système sera assurée soit par le logiciel réalisé qui permet une concentration optimale de l'énergie tout au long de la journée et cela par la commande d'une carte électronique via le port parallèle du micro-ordinateur, soit par une carte de poursuite solaire autonome réalisée à base d'un microcontrôleur. A cet effet l'acquisition de plusieurs paramètres sera nécessaire, et cela par l'intermédiaire d'un enregistreur de données communiquant à travers le port série RS232. Les valeurs de ces différents paramètres seront

visualisées, traitées et sauvegardées par le logiciel lui-même, et affichées en temps réel sur un site web, notamment la température ambiante ( $T_a$ ), la température d'entrée ( $T_e$ ), la température de sortie ( $T_s$ ), le rayonnement solaire ( $E_h$ ), la température de tube absorbeur ( $T_{abs}$ ), la température sous le couvert de verre ( $T_c$ ), ceci permettra de suivre le fonctionnement du système en temps réel, le logiciel intégrant un système de protection et de détection de tous problème intervenant durant le fonctionnement normal de l'installation.

L'eau étant chauffée pourra être alors utilisée pour le chauffage ou pour la production de l'électricité à travers un cycle thermodynamique.

### 2.3.3. Schéma synoptique du système réalisé

La *figure.2.5* représente le schéma synoptique du système réalisé avec le système d'acquisition, ainsi que toutes les fonctions de commande et de contrôle.



*Figure.2.5. Schéma synoptique du système réalisé.*

## 2.4. Réalisation du concentrateur cylindro-parabolique

### 2.4.1. Dimensionnement de la courbe

Avant d'entamer la phase de réalisation nous avons procédé au dimensionnement du concentrateur solaire, dans le but de déterminer les différents paramètres géométriques du concentrateur, avec la meilleure concentration possible. L'équation de la courbe parabolique a été définie pour permettre la réalisation des charpentes métalliques qui supportent les deux tôles, ainsi que le calcul du facteur de réflexion du concentrateur.

D'une manière générale, le concentrateur doit permettre de transmettre le plus de chaleur possible au fluide. Pour cela, il faut que la plaque soit métallique; car seuls les métaux ont de bons coefficients de conduction de la chaleur. En effet, plus le coefficient de conduction est faible et plus la plaque doit être épaisse, ce qui augmente le prix.

Finalement nous avons choisi des tôles inoxydables constituées de quelques alliages notamment de l'acier, de taille (*1 par 2m*) et d'épaisseur de (*2 mm*), et d'indice de réflexion mesuré de (*0.76*), et pour augmenter le facteur de concentration nous avons donné une certaine flexibilité au système permettant à la tôle d'être courbée facilement afin de rectifier les erreurs apparaissant après l'usinage et la soudure. Le prototype du concentrateur solaire aura alors les dimensions suivantes: une surface d'ouverture de (*4m<sup>2</sup>*) et un foyer de diamètre de (*0.03m*).

Un miroir parabolique a la propriété d'être stigmatique pour un point situé à l'infini sur son axe (*figure.2.6*), c'est-à-dire que l'image de ce point est un point appelé le foyer.

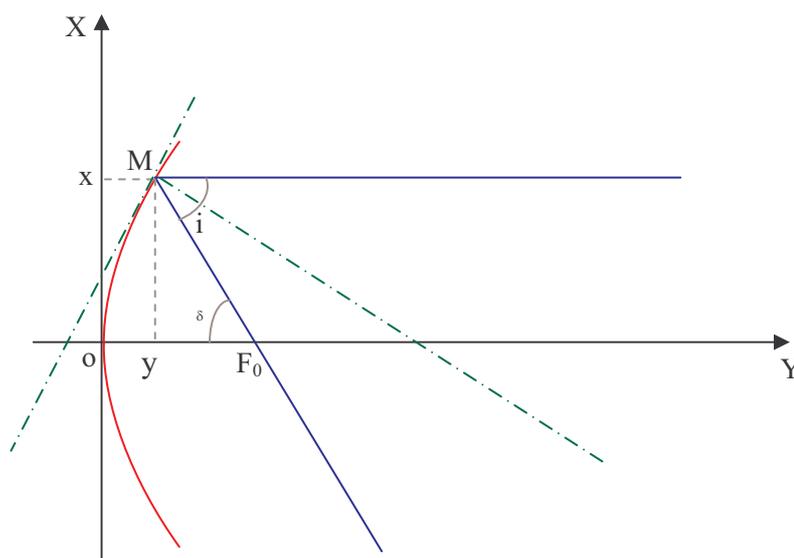


Figure.2.6. Concentration géométrique des miroirs paraboliques.

Considérons un rayon parallèle à l'axe et qui frappe le miroir en un point ( $M$ ) de coordonnées ( $x, y$ ). Il est réfléchi et coupe l'axe ( $ox$ ) en ( $F_0$ ). [21] (figure.2.7)

On a:

$$y = a \cdot x^2 \quad \text{avec} : \quad a = \frac{1}{4 \cdot F} \Rightarrow \quad y = \frac{1}{4 \cdot F} \cdot x^2 \quad (2.18)$$

L'équation de rayon de rayon du miroir est:

$$r = \frac{2 \cdot F}{1 + \cos(\varphi)} \quad (2.19)$$

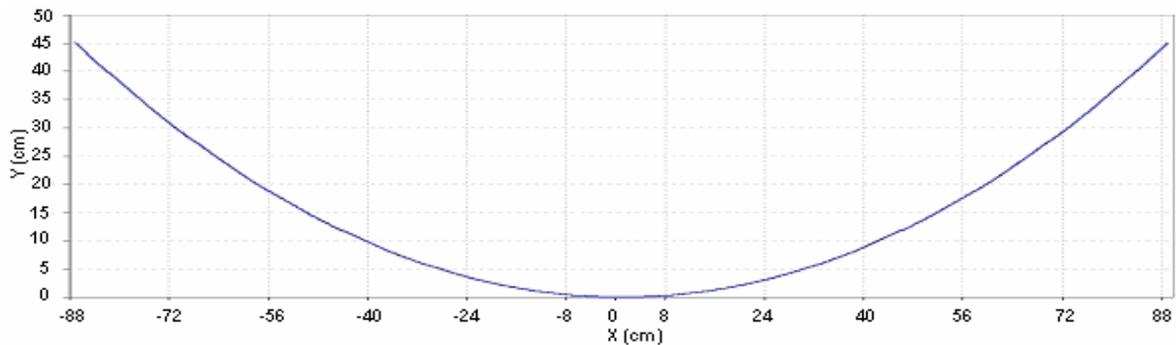


Figure.2.7. La courbe parabolique du concentrateur.

#### 2.4.2. Réalisation de la structure porteuse

D'après l'équation (2.18) et pour donner la forme parabolique à la tôle, nous avons réalisé une charpente métallique, la tôle y fixée là dessus à l'aide de rivets, et afin d'assurer la protection du système nous avons renforcé la plateforme pour supporter le poids du concentrateur et la violence des vents. La poursuite solaire est assurée par le vérin électrique qui fait tourner le concentrateur autour d'un axe à une vitesse faible.

La figure.2.8 représente le schéma du concentrateur réalisé et de la structure porteuse.

La figure.2.9 représente des photos prises du le concentrateur réalisé et de sa structure porteuse.

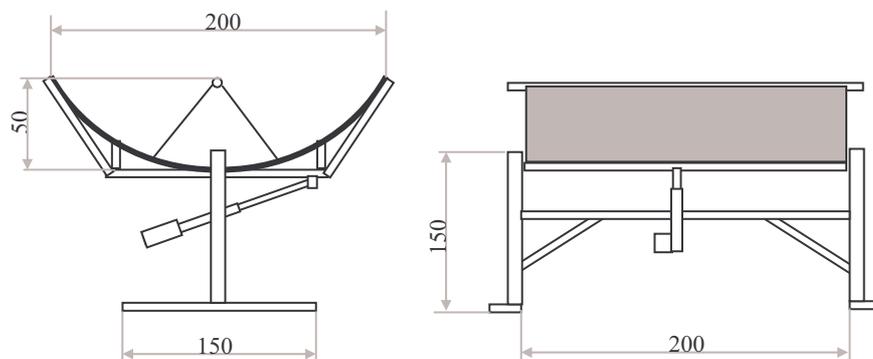


Figure.2.8. Schéma du concentrateur réalisé et de la structure porteuse.



Figure.2.9. Vue du concentrateur réalisé.

### 2.4.3. Dispositif de poursuite solaire

Généralement la meilleure solution pour une poursuite solaire est l'utilisation des moteurs pas à pas, qui assurent une très grande précision et un freinage du système très rapide [23]. Dans notre prototype nous avons choisi un vérin électrique destiné aux antennes paraboliques, ce choix étant basé sur les critères suivants: la puissance, le fonctionnement en milieu hostile, moteur à courant continu, les butées de fin de course.

Sur la *figure.2.10* on donne les positions du concentrateur en fonction de l'état du vérin, et on constate qu'il faut avoir deux articulations pour la fixation du vérin, l'une au niveau du collecteur et l'autre au niveau de la structure porteuse.

Selon la position du vérin, nous avons les différentes orientations du collecteur qui sont illustrées sur le schéma suivant:



Figure.2.10. Positions du concentrateur en fonction de l'état du vérin.

Le principe de fonctionnement du vérin (*Figure.2.11*) est simple, le mouvement de rotation du moteur (1) est transmis à l'aide des engrenages (2) aux tiges filetées (3) qui transforment le mouvement de rotation en un mouvement de translation à l'aide de l'écrou (4) solidaire du tube (5). Pour inverser le sens des translations il suffit d'inverser le courant et cela en appliquant une tension inverse aux bornes du moteur.

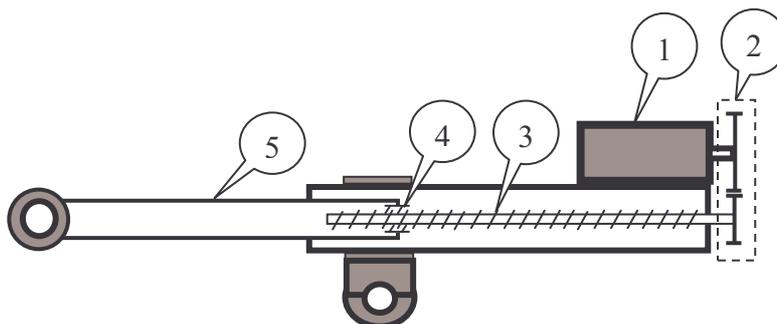


Figure.2.11. Schéma détaillé du vérin électrique.

#### 2.4.4. Circuit du fluide caloporteur

Le réflecteur cylindro-parabolique concentre les rayons solaires vers le foyer. Dans notre prototype le foyer est un tube en cuivre de diamètre égal à 20 mm, de longueur de 2m, d'épaisseur de 1mm et de couleur noire, couvert par un tube en verre ( $D=50\text{mm}$ ,  $L=1,5\text{m}$ ,  $E_p=3\text{mm}$ ) pour réaliser l'effet de serre. Et pour permettre la circulation du fluide caloporteur vers l'échangeur nous avons utilisé une pompe de circulation de type *SALMSON* munie de trois vitesses. Une fois le fluide caloporteur devenu chaud, il est acheminé vers un échangeur fixé à l'intérieur d'un réservoir de 200 litres d'eau où il transmettra sa chaleur. Et pour assurer la protection du circuit en cas de hautes pressions nous avons utilisé une soupape de sécurité. Quatre thermocouples ont été intégrés dans le circuit du fluide pour la collecte des valeurs de températures dans les différentes parties du circuit.

### 2.5. Simulation numérique

#### 2.5.1. Réalisation d'un programme de calcul du rayonnement par Matlab

En se basant sur le modèle mathématique de *Michel CAPDEROU* [24], nous avons utilisé Matlab et Simulink pour la réalisation d'un programme de calcul du rayonnement solaire direct, diffus et global et cela pour chaque site de l'Algérie, connaissant la latitude, la longitude et l'altitude du lieu.

Pour valider ce programme nous avons mesuré le rayonnement solaire pour le site de Ghardaïa (Alt=450m, Long = 3,42°, Lat = 32,23°) pour la journée du 14/04/2006 et nous avons comparé les résultats trouvés en pratique avec ceux simulés (*figure.2.12*).

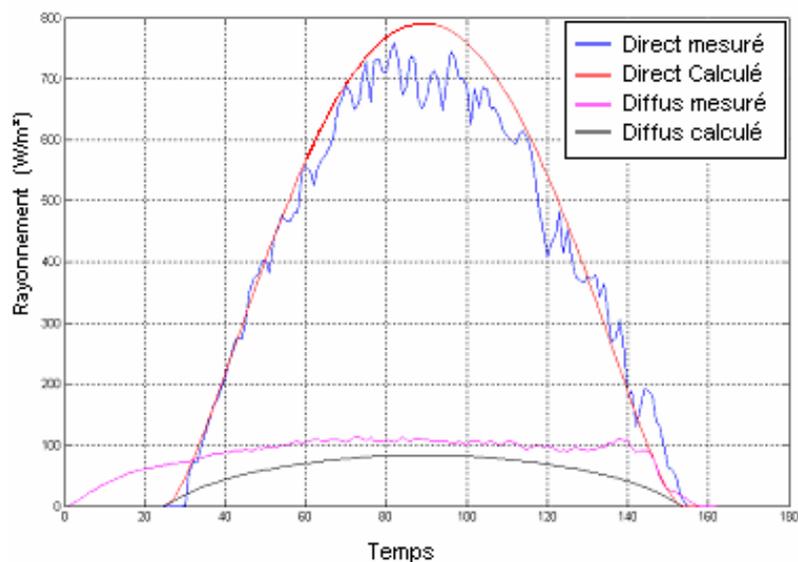


Figure.2.12. Comparaison entre les valeurs calculées et mesurées du rayonnement solaire.

Sachant que les valeurs mesurées sont celles d'une journée moyenne (avec des passages nuageux) ce qui influe sur le rayonnement, cela explique parfaitement l'écart entre les valeurs mesurées et celles simulées. En effet les passages nuageux diminuent le rayonnement solaire direct et augmentent le rayonnement diffus, le global reste inchangé (figure.2.13) du moment que même s'il y'a des nuages dans ciel une partie du direct perdu sera restauré comme étant diffus. Le rayonnement global pour un jour à ciel clair ou moyen est toujours le même.

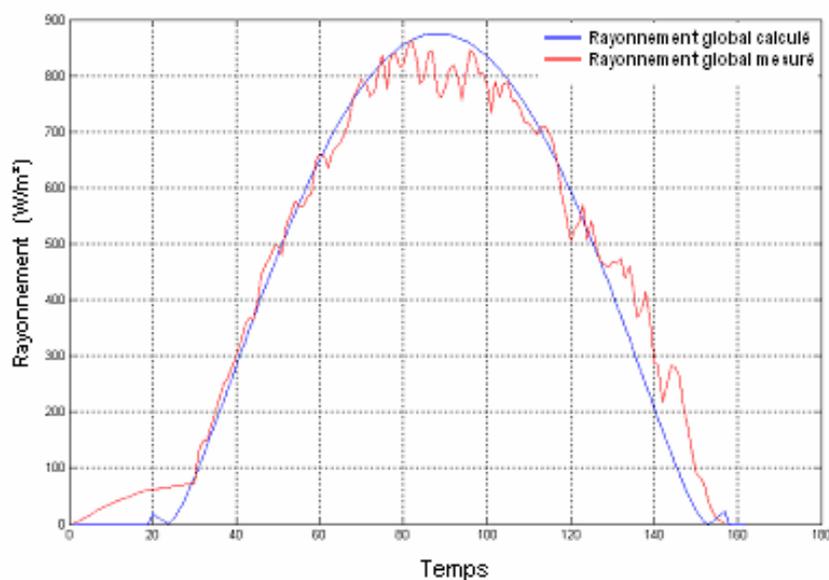
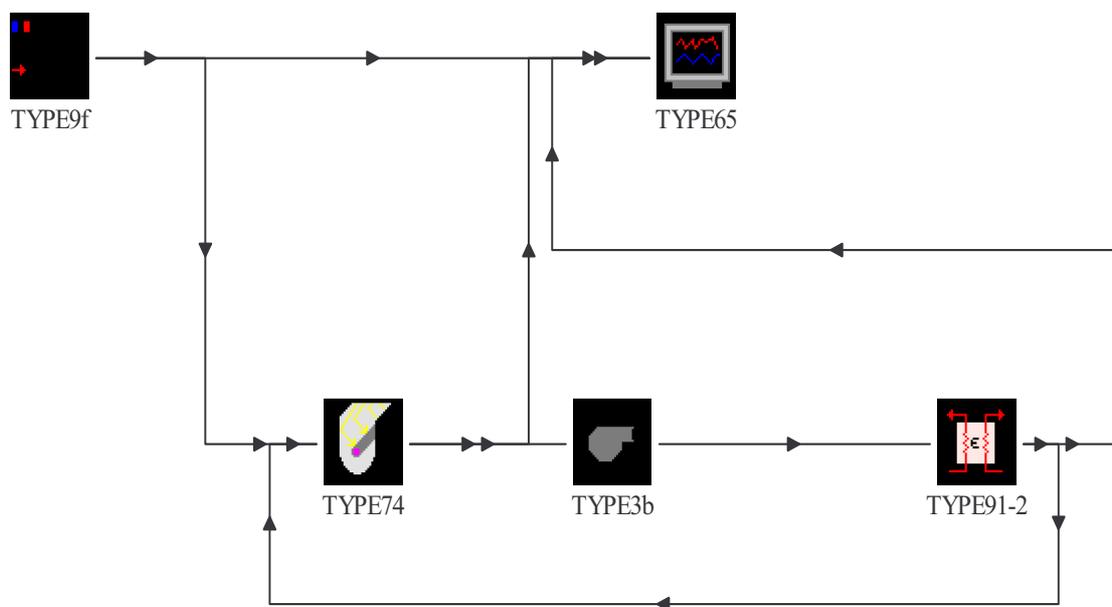


Figure.2.13. Comparaison entre le rayonnement global calculé et mesuré.

### 2.5.2. Simulation du fonctionnement du concentrateur par TRNSYS

*TRNSYS15* est un logiciel de simulation puissant, utilisé dans un premier temps pour la simulation des bâtiments (parois, isolation, ombre,...etc), les dernières versions permettent aussi de réaliser la simulation des installations solaires (photovoltaïques, thermiques, ...etc) [26]. La *figure.2.14* illustre le schéma de la simulation réalisé: TYPEE9f pour le rayonnement, TYPEE74: est le concentrateur cylindro-parabolique, TYPEE3b: la pompe de circulation, TYPEE91-2: l'échangeur de chaleur et TYPEE65: pour les résultats sous forme graphique. Après avoir lié les objets entre eux, il suffit de cliquer doublement sur chaque objet pour le configurer. Par exemple: pour le concentrateur on peut introduire la surface d'ouverture, le type du fluide caloporteur, l'indice de réflexion du miroir, le nombre de concentrateurs, l'orientation du système...etc.

Après avoir fait la simulation on a obtenu les résultats suivants: Les *figures.2.15, 2.16, 2.17* illustrent clairement l'effet du débit de la pompe sur les températures du fluide caloporteur. Du fait que ce débit est relativement important, le fluide caloporteur n'aura pas suffisamment de temps ni pour absorber suffisamment de chaleur depuis le foyer ni pour échanger cette chaleur avec l'échangeur. La *figure.2.18* montre très bien l'inconvénient d'un débit très élevé, dans ce cas les températures de sortie et d'entrées devenant égales et le rendement du système sera presque nul.



*Figure.2.14. Schéma du système sur le logiciel TRNSYS.*

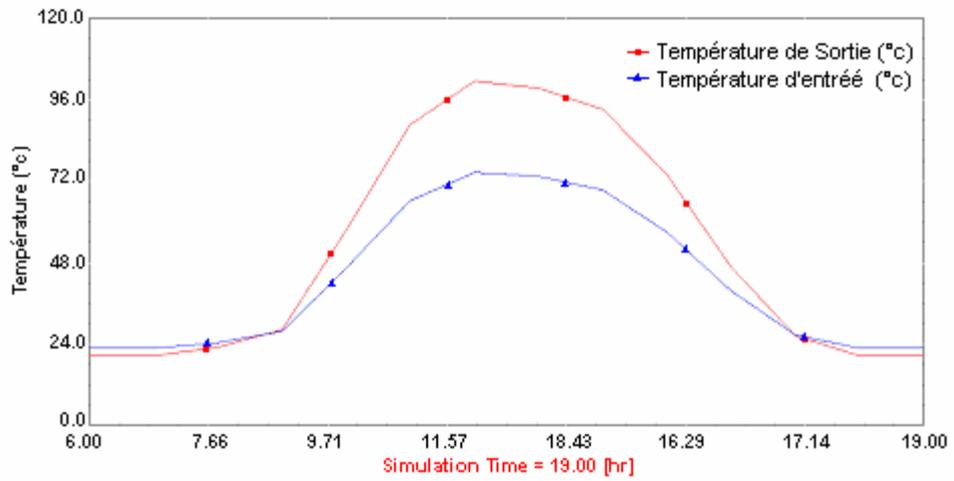


Figure.2.15. Résultats de la simulation du CCP avec un débit  $Q=10\text{kg/h}$ .

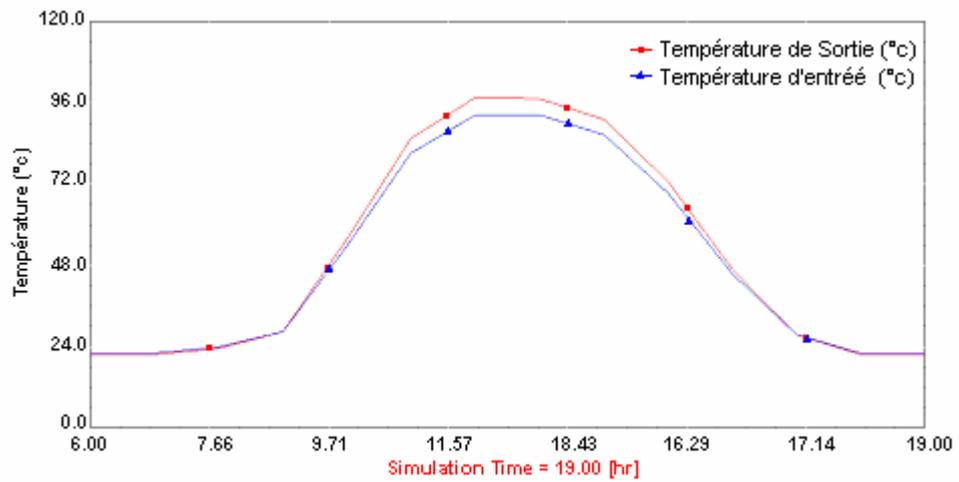


Figure.2.16. Résultats de la simulation du CCP avec un débit  $Q=50\text{kg/h}$ .

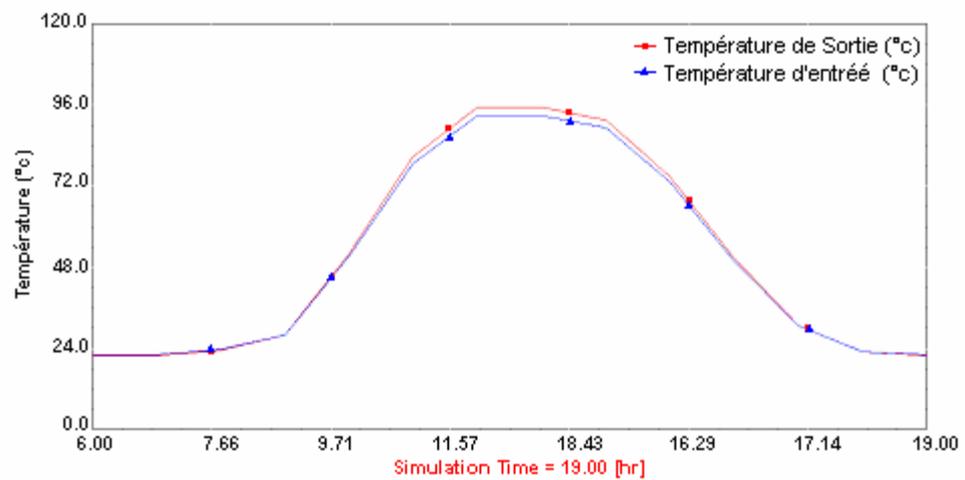


Figure.2.17. Résultats de la simulation du CCP avec un débit  $Q=100\text{kg/h}$ .

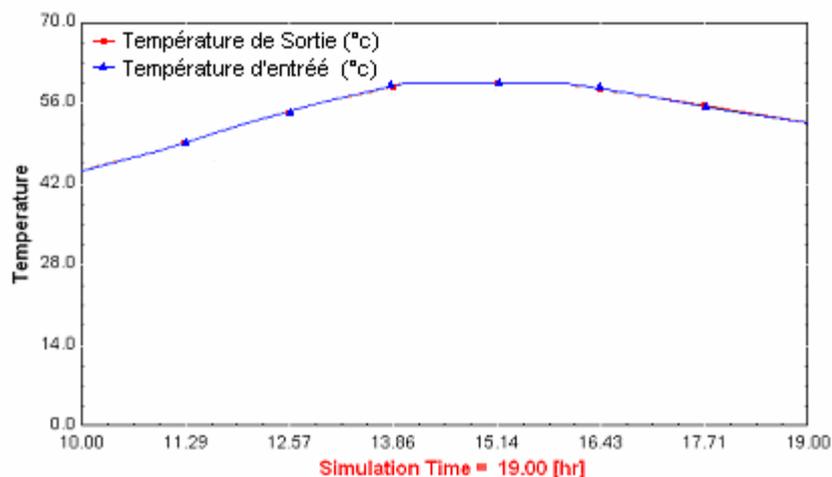


Figure.2.18. Résultats de la simulation du CCP avec un débit  $Q=2500\text{kg/h}$ .

## 2.6. Tests réalisés sur le concentrateur stationnaire

L'installation d'un concentrateur cylindro-parabolique sans dispositif de poursuite solaire exige une inclinaison optimale du concentrateur, généralement égale à latitude du lieu et une orientation vers le sud en horizontal (figure.2.19). Ce type d'installation est appelé concentrateur stationnaire.

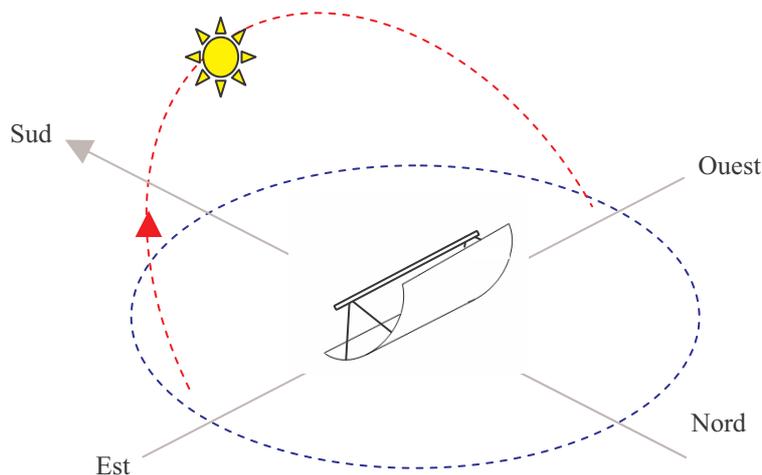


Figure.2.19. Position du concentrateur stationnaire.

Afin de connaître l'efficacité de concentration du système réalisé nous avons effectué des tests sur le concentrateur. En premier lieu, en état stationnaire (sans poursuite solaire) orienté vers le sud [25], sans pompe de circulation du fluide caloporteur et selon différentes

inclinaisons on va essayer de trouver l'angle optimal d'inclinaison du système. Durant ces tests nous avons mesuré les températures au niveau du foyer tout au long d'une journée: Température du fluide caloporteur ( $T_{fc}$ ), température du tube absorbeur ( $T_{abs}$ ), température ambiante ( $T_a$ ), et rayonnement solaire ( $E$ ).

Le fluide caloporteur étant de l'eau, l'équation utilisée pour le calcul de la puissance utile est la suivante:

$$Q_u = C_p \cdot Mv \cdot Vl \cdot (T_{fc} - T_a) \quad (2.20)$$

$C_p$ : Pouvoir calorifique du fluide caloporteur (kJ/kg°C);

$Mv$ : Masse volumique du fluide caloporteur (eau 1000 kg/m<sup>3</sup>);

$Vl$ : Volume du fluide caloporteur (m<sup>3</sup>);

$T_{fc}$ : Température du fluide caloporteur (°C);

$T_a$ : Température ambiante (°C).

Les tests entrepris pour une inclinaison de 30° et un jour clair donnent les résultats suivants:

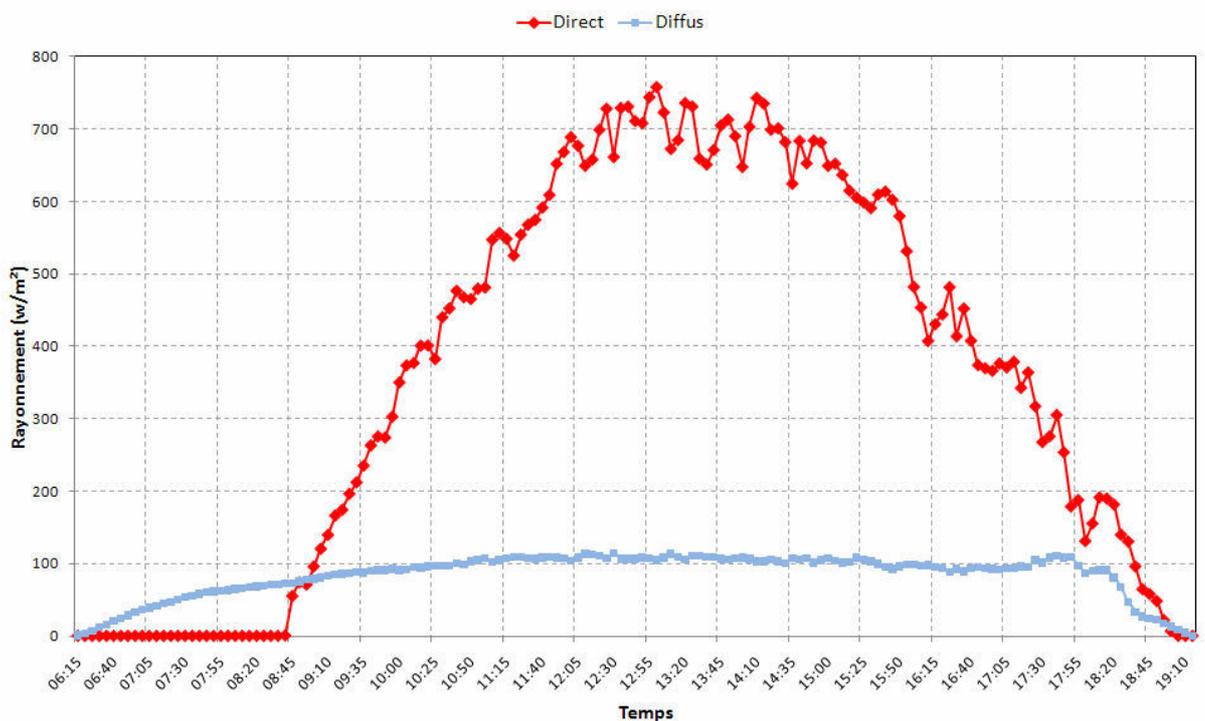


Figure.2.20. Rayonnement solaire incident sur un plan horizontal (le 14/04/2007).

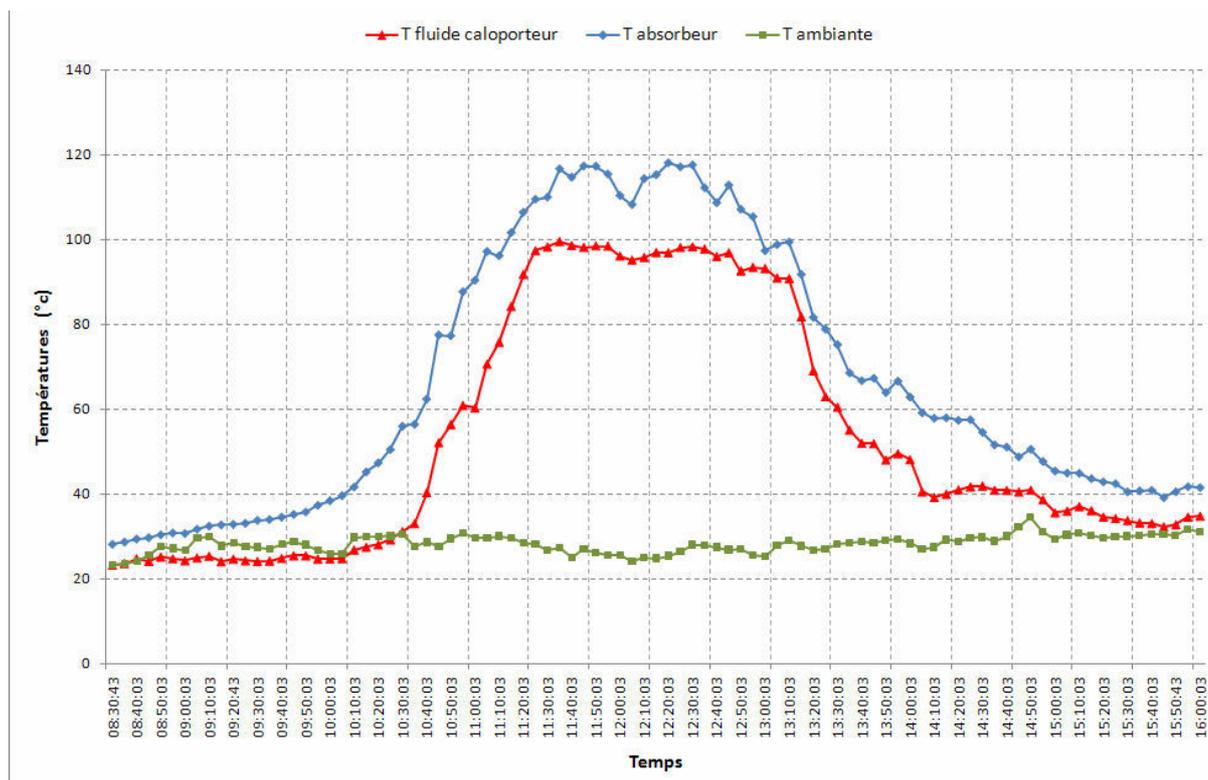


Figure.2.21. Résultats obtenus pour les températures suivant le test du 14/04/2007  
(Concentrateur stationnaire, angle d'inclinaison: 30°)

$T_f$  : température au niveau du foyer,  $T_c$  : Température du fluide caloporteur,  
 $T_a$  : température ambiante.

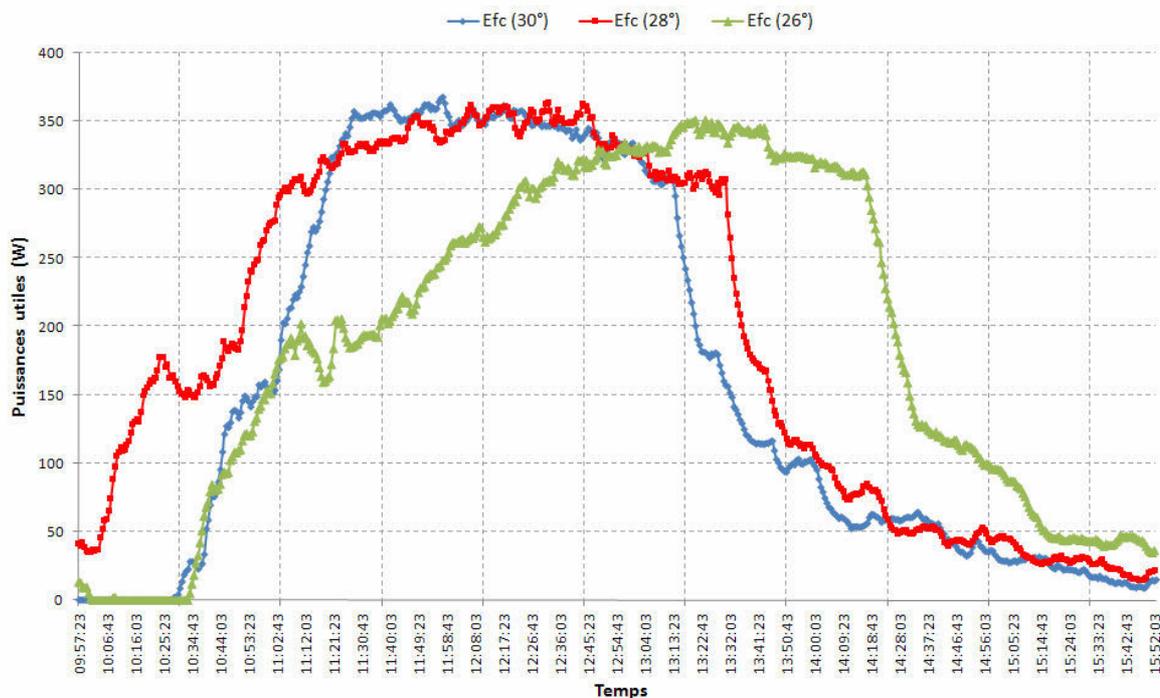


Figure.2.22. Comparaison entre les puissances utiles (W) pour les trois inclinaisons  
(30°, 28°, 26°) concernant les journées du 14, 15 et 16/04/2007.

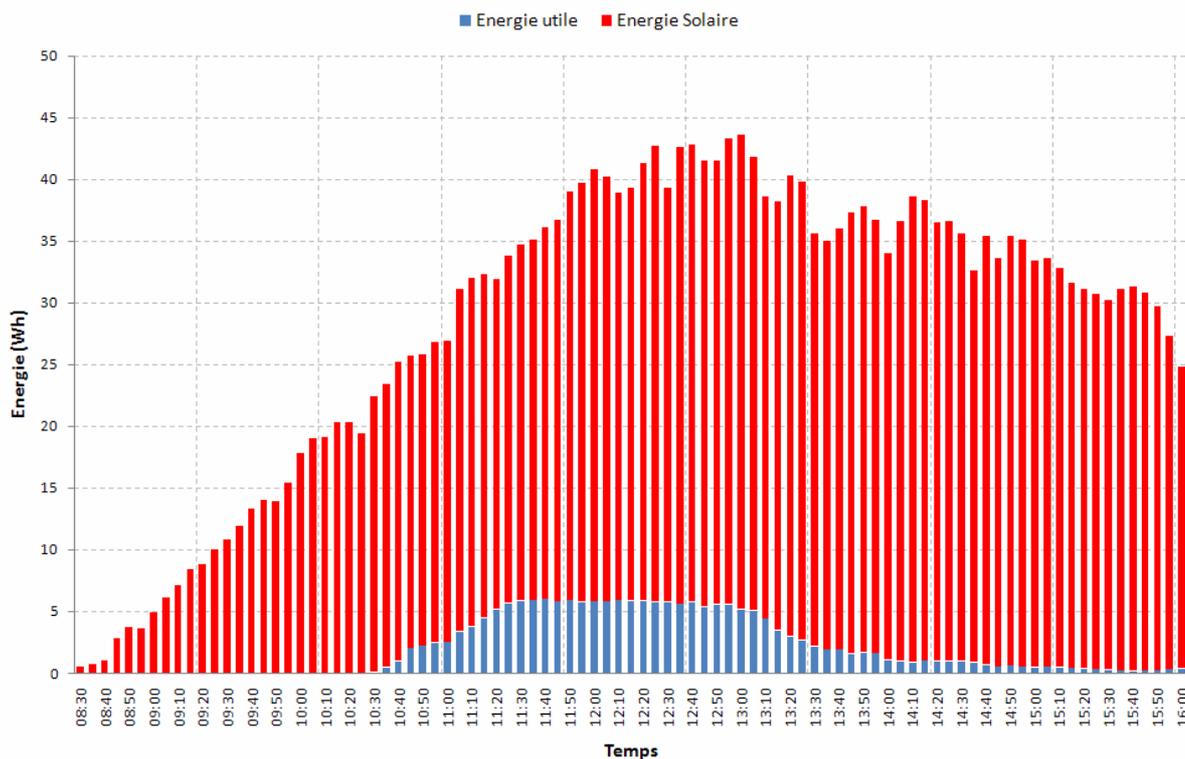


Figure.2.23. Energie fournie et énergie utile du concentrateur cylindro-parabolique stationnaire réalisé le 14/04/2007.

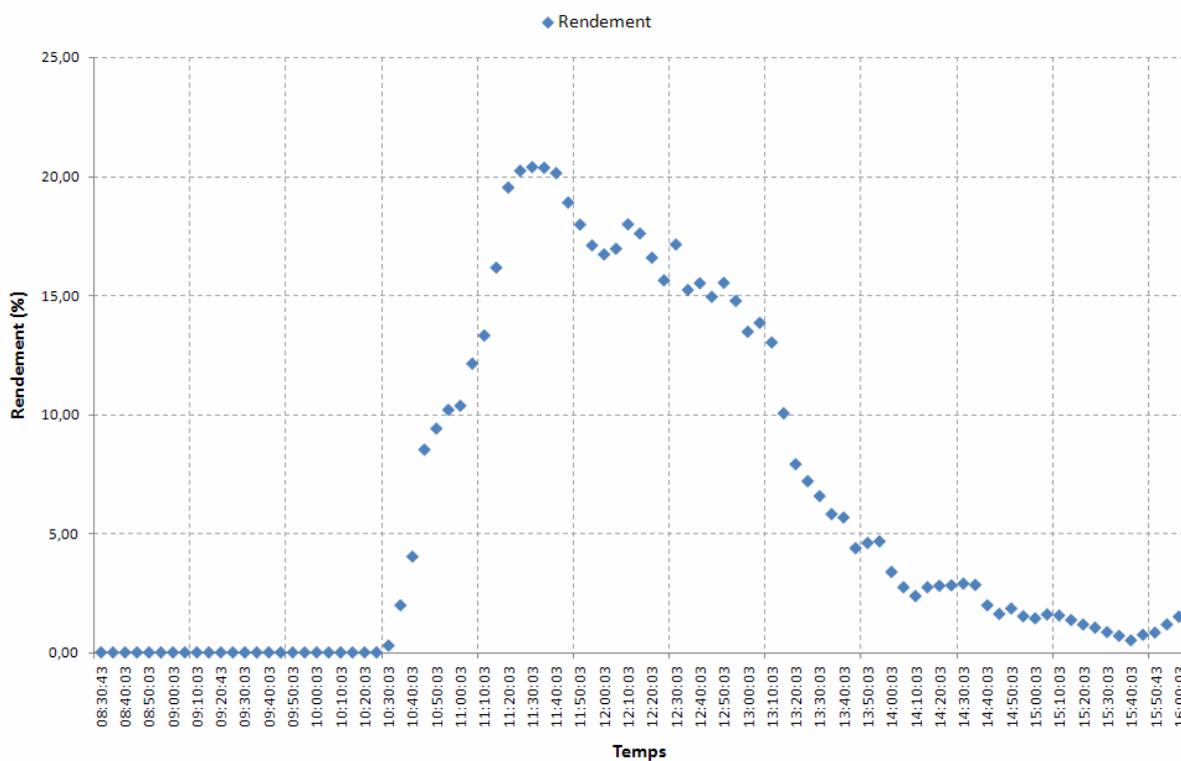


Figure.2.24. Rendement du concentrateur cylindro-parabolique Stationnaire réalisé le 14/04/2007.

On voit clairement que l'angle optimal pour le printemps est celle de  $28^\circ$ , Le rendement du prototype en position stationnaire est acceptable en se référant aux valeurs calculées.

Dans la prochaine partie on va essayer d'augmenter ce rendement en utilisant deux systèmes de poursuite solaire (aveugle et sensible) en minimisant les pertes thermiques. Pour cela nous allons utiliser un autre isolant pour les conduites avec une qualité meilleure que la précédente afin d'éliminer les pertes thermiques. Nous allons également essayer d'éviter le maximum de fuites, dues à l'augmentation de la pression dans les conduites durant la phase d'évaporation du fluide caloporteur.

Suivant l'inclinaison optimale du concentrateur, nous avons réalisé des tests sur le système et collecté les données des températures d'entrée et de sortie du fluide caloporteur. La *figure.2.25* montre la courbe du rayonnement solaire à Ghardaïa le 14/05/2007, qui est un jour moyen. La *figure.2.26* montre les résultats expérimentaux du système, et montre bien que ces résultats sont très proches de la simulation: la température de sortie ne dépasse pas les  $100^\circ\text{C}$ , car le fluide caloporteur est de l'eau c'est-à-dire la chaleur absorbée au dessus de  $100^\circ\text{C}$  est consommée pour l'évaporation de l'eau. La *figure.2.27* montre les résultats pratiques obtenus le 09/05/2007 pour un débit de  $2500\text{kg/h}$ .

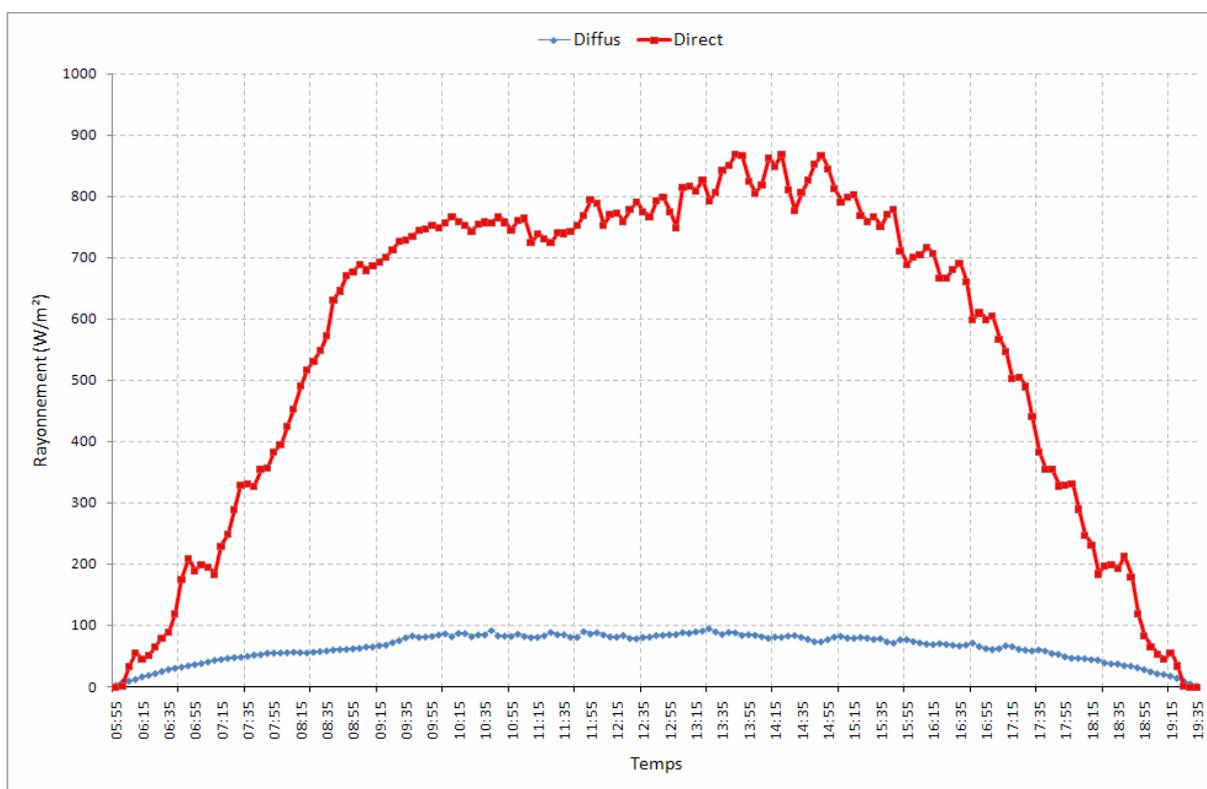


Figure.2.25. Rayonnement solaire incident sur un plan horizontal (le 14/05/2007).

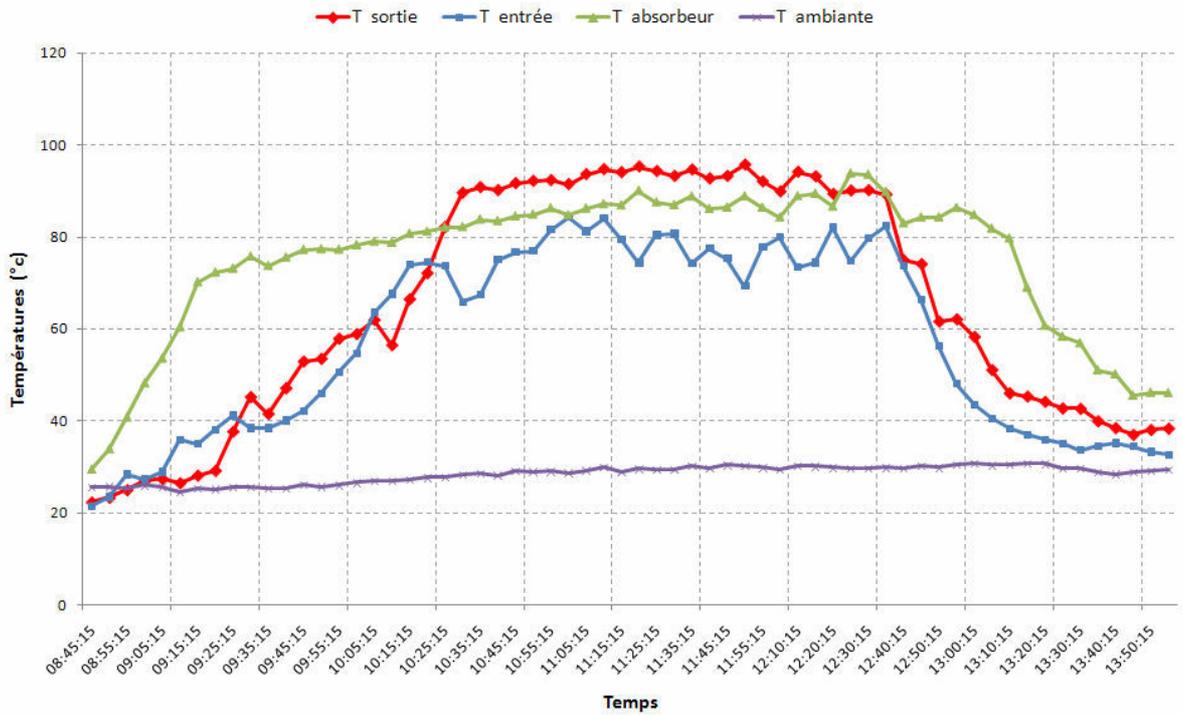


Figure.2.26. Résultats expérimentaux du concentrateur cylindro-parabolique réalisés le 14/05/2007.

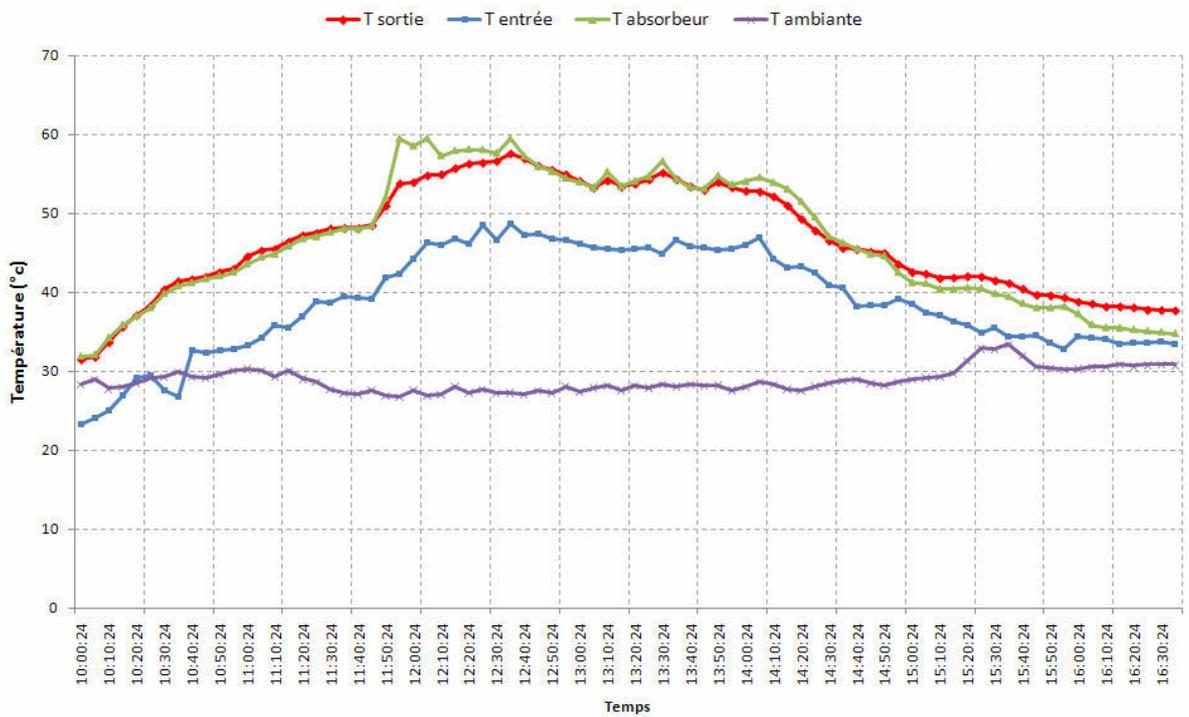


Figure.2.27. Résultats expérimentaux du CCP réalisés le 09/05/2007 avec un débit  $Q=2500\text{kg/h}$ .

## 2.7. Conclusion

Dans cette partie du mémoire, nous avons exposé la partie pratique du travail. Nous avons d'abord effectué une étude théorique sur le concentrateur cylindro-parabolique, les performances optiques et thermiques d'un concentrateur dans cette partie afin de calculer certains paramètres tels que: le taux de concentration, le rayonnement absorbé, la température du fluide caloporteur et déduire le rendement du concentrateur. Ensuite nous avons parlé du principe de fonctionnement du système réalisé et son schéma synoptique été proposé. L'étape suivante est la réalisation du système notamment:

- La structure porteuse du concentrateur cylindro-parabolique; après un dimensionnement bien étudié de la courbe;
- Le système à foyer comportant le fluide caloporteur;
- Et le système de vérin dédié pour la poursuite solaire.

A la fin de cette partie un modèle mathématique du rayonnement solaire est présenté et une simulation par *MATLAB* est faite, les résultats issus de cette dernière sont utilisés pour établir une simulation du fonctionnement du concentrateur cylindro-parabolique à l'aide du logiciel TRANSIS pour bien comprendre le comportement du système en question. Ensuite des tests ont été réalisés sur le concentrateur cylindro-parabolique dans une phase stationnaire pour plusieurs valeurs de débit, les résultats expérimentaux obtenus indiquant que ces derniers sont très proches de la simulation. La température de sortie du fluide caloporteur ne dépasse pas les 100°C, car le fluide caloporteur utilisé est de l'eau donc la chaleur absorbée au dessus de 100°C est consommée par son évaporation.

La prochaine étape consiste à établir d'autres tests sur le concentrateur dans son état de poursuite solaire dans le but de faire une comparaison entre les deux systèmes, pour cela il faudra bien connaître les systèmes de poursuites solaires utilisés pour les concentrateurs cylindro-paraboliques et les dispositifs mis en œuvre pour réaliser cette tâche, dans ce contexte intervient les thèmes du chapitre trois.

## **Chapitre 3 :**

# POURSUITE SOLAIRE

### 3.1. Introduction

Afin d'extraire et d'exploiter le maximum d'énergie incidente, le concentrateur doit impérativement poursuivre le soleil durant sa course, d'une manière très précise. La concentration en une ligne ou un point nous oblige à utiliser des systèmes de poursuite solaire réalisés avec haute fiabilité. Pour cela nous allons procéder à la réalisation de deux systèmes de poursuite solaire, différents l'un de l'autre. Le premier est dit sensible et le second est qualifié d'aveugle, chacun d'entre eux est doté de certaines spécifications que nous aurons l'occasion de découvrir durant cette partie, le but étant d'arriver à désigner le type de poursuite qui assurera le meilleur rendement. Nous discuterons des résultats obtenus coté performances du système et nous parlerons également des cartes électroniques réalisées et du programme élaboré pour cette réalisation, mais nous commençons tout d'abord par quelques notions de base sur la poursuite solaire.

### 3.2. Etude théorique de la poursuite solaire

Les systèmes de poursuite solaire permettent de suivre la course du soleil au cours de la journée, afin de minimiser l'angle d'incidence des rayons solaires sur un plan lié au système, ce plan étant le récepteur lui-même ou son support [24]. Ces systèmes sont classés selon différents critères tel que le nombre d'axes (un ou deux) et le mode de suivi (continu ou quotidien) ....etc.

#### 3.2.1. Trajet du soleil

Pour un jour donné, la course du soleil dans le ciel s'effectue dans un plan incliné de  $(\pi/2 - \varphi)$  sur l'horizontale (*figure.3.1*), la trajectoire apparente du soleil sur la voûte céleste aux solstices et aux équinoxes en un lieu situé à  $40^\circ$  de l'altitude nord est présenté sur la *figure.3.2*. On notera que le soleil ne se lève exactement à l'est et ne se couche exactement à l'ouest que lors des équinoxes.

Pour faciliter l'interpolation, on utilise un autre type de diagramme solaire toujours en coordonnées polaires mais dans lequel le rayon vecteur n'est plus proportionnel à  $\cos(h)$  mais à la distance zénithale  $(\pi/2-h)$ , l'angle polaire étant égal à  $\alpha$ . Ces diagrammes sont construits à l'aide des équations suivantes : [20]

$$\sin(h) = \cos(\delta) \cdot \sin(\varphi) + \cos(\delta) \cdot \cos(\varphi) \cdot \cos(H) \quad (3.1)$$

$$\sin(\alpha) = \frac{\cos(\delta) \cdot \sin(\omega)}{\cos(h)} \quad (3.2)$$

En un lieu donné, le soleil est à son zénith au midi solaire ( $\omega = 0$ ). Dans l'hémisphère nord, la hauteur du soleil est alors : 
$$h = \frac{\pi}{2} - \varphi + \delta \quad (3.3)$$

Finalement on peut également faire une projection stéréographique sur le plan horizontal de la trajectoire du soleil sur la voûte céleste en utilisant comme centre le nadir, on obtient ainsi un arc de cercle et les cercles horaires sont transformés également en cercles orthogonaux aux précédents. [20]

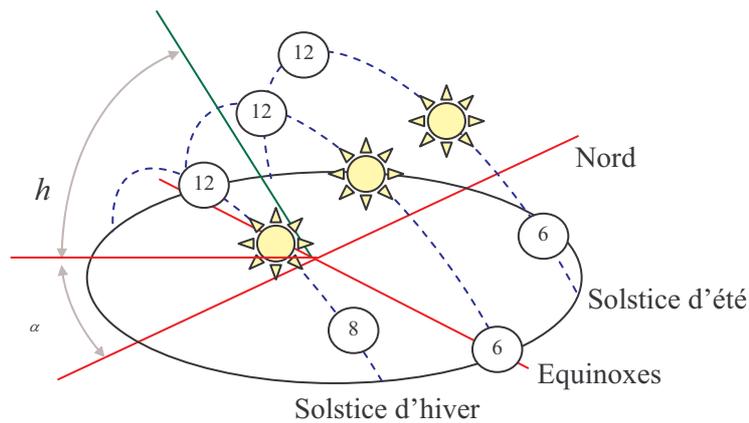


Figure.3.1. Positions du soleil dans le ciel durant l'année.

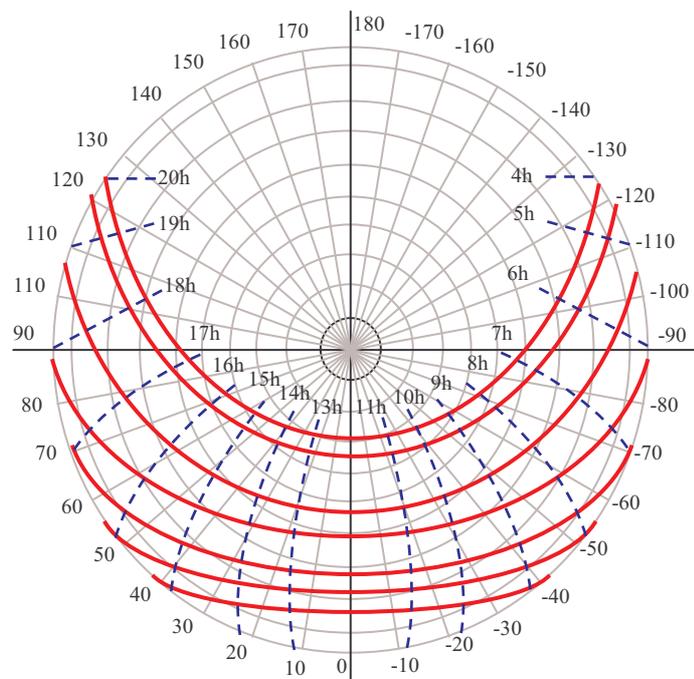


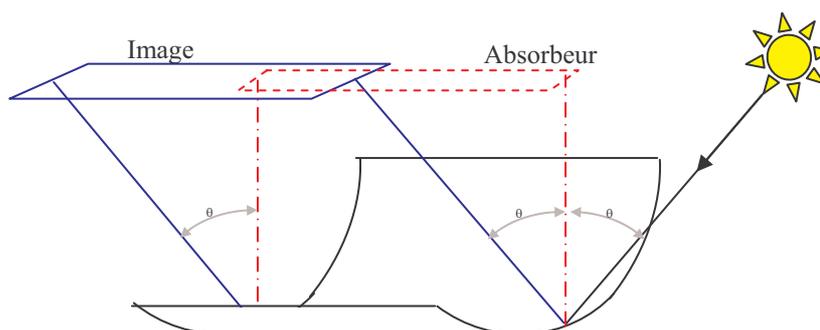
Figure.3.2. Trajectoire du soleil dans le ciel pendant une année.

### 3.2.2. Poursuite solaire et effet cosinus

#### 3.2.2.1. Effet cosinus et taux de concentration

Les systèmes de poursuite simplifiés adoptés par les concentrateurs à deux dimensions ne permettent pas pour une même surface d'ouverture, de recueillir autant d'énergie que les systèmes de poursuite intégrale et ceci est dû principalement à deux raisons:

- La réduction de la surface efficace de captation (effet Cosinus); (*Figure.3.3*)
- La réduction de la concentration en raison du déplacement de l'image.



*Figure.3.3. Illustration de l'effet Cosinus dans les miroirs cylindro-paraboliques. [20]*

Si le rayonnement direct incident ( $E_d$ ) fait un angle ( $\theta$ ) avec la normale au plan d'ouverture, le rayonnement au niveau de l'absorbeur sera : [20]

$$E_c = E_d \cdot \text{Cos}(\theta) \cdot C \quad (3.4)$$

$E_c$ : Rayonnement au niveau de l'absorbeur;

$C$ : Taux de concentration;

$\theta$  : Angle du rayonnement solaire avec la normale au plan d'ouverture du concentrateur.

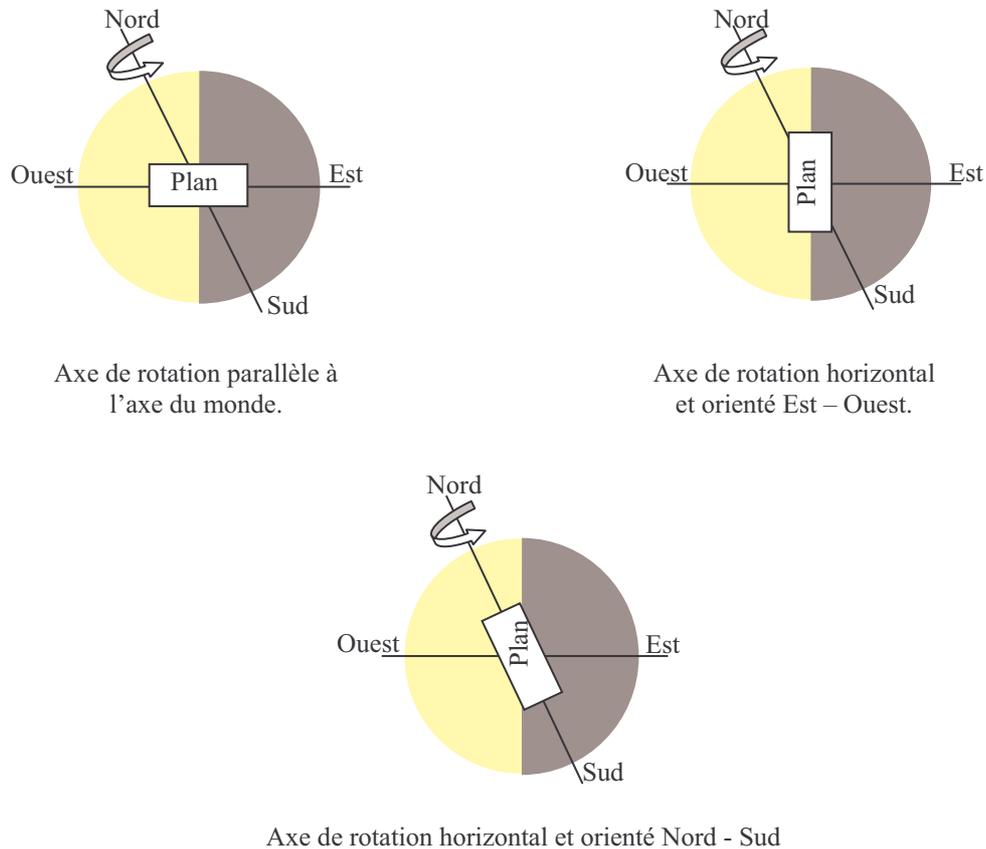
#### 3.2.2.2. Effet cosinus et axe de rotation

Le tableau ci-après résume le paramètre  $\text{Cos}(\theta)$  pour différent cas d'orientations :

Système de poursuite	$\text{Cos}(\theta)$
1 Poursuite intégrale	1
2 Axe de rotation parallèle à l'axe du monde	$\text{Cos}(\delta)$
3 Axe de rotation horizontal et orienté Est - Ouest	$(1 - \text{Cos}^2(\delta) \cdot \text{Cos}^2(\omega))^{1/2}$
4 Axe de rotation horizontal et orienté Nord - Sud	$[(\text{Sin}(\omega) \cdot \text{Sin}(\delta) + \text{Cos}(\omega) \cdot \text{Cos}(\delta) \cdot \text{Cos}(\omega))^2 + \text{Cos}^2(\delta) \cdot \text{Sin}^2(\omega)]^{1/2}$

*Table.3.1. Effet Cosinus dans les systèmes de poursuite solaire. [20]*

Selon les relations du *tableau.3.1* on voit que le type de poursuite dépend directement du  $\text{Cos}(\theta)$  et c'est ce paramètre qui détermine le taux de concentration ainsi que l'axe de rotation du concentrateur et depuis la rentabilité et l'efficacité du système.



*Figure.3.4. Orientation de l'axe de rotation selon les différents cas de poursuite.*

### 3.2.2.3. Effet cosinus pour différents cas de poursuite

Pour illustrer clairement l'effet *Cosinus* sur les différents types de poursuite nous avons utilisé *MATLAB* pour faire une simulation du problème [27]. Les résultats sont obtenus pour une valeur de rayonnement donnée et les graphes sont représentés sur les différents cas de figures ci-après :

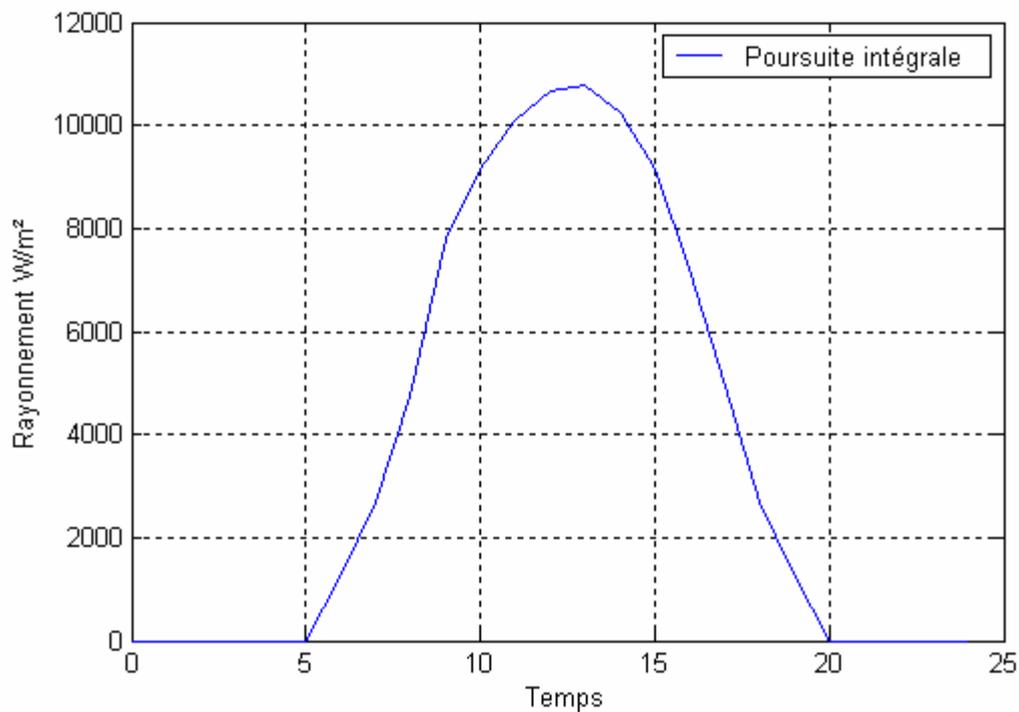


Figure.3.5. Effet Cosinus sur le rayonnement concentré (cas de la poursuite intégrale).

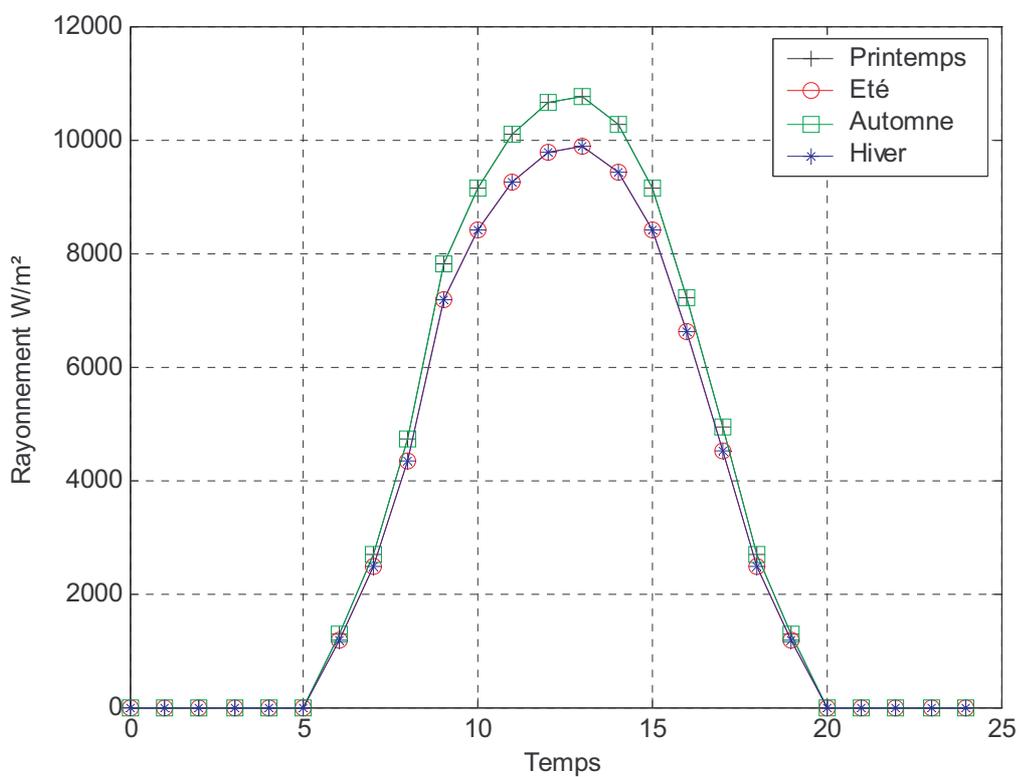


Figure.3.6. Effet Cosinus sur le rayonnement concentré (axe de rotation parallèle à l'axe du monde).

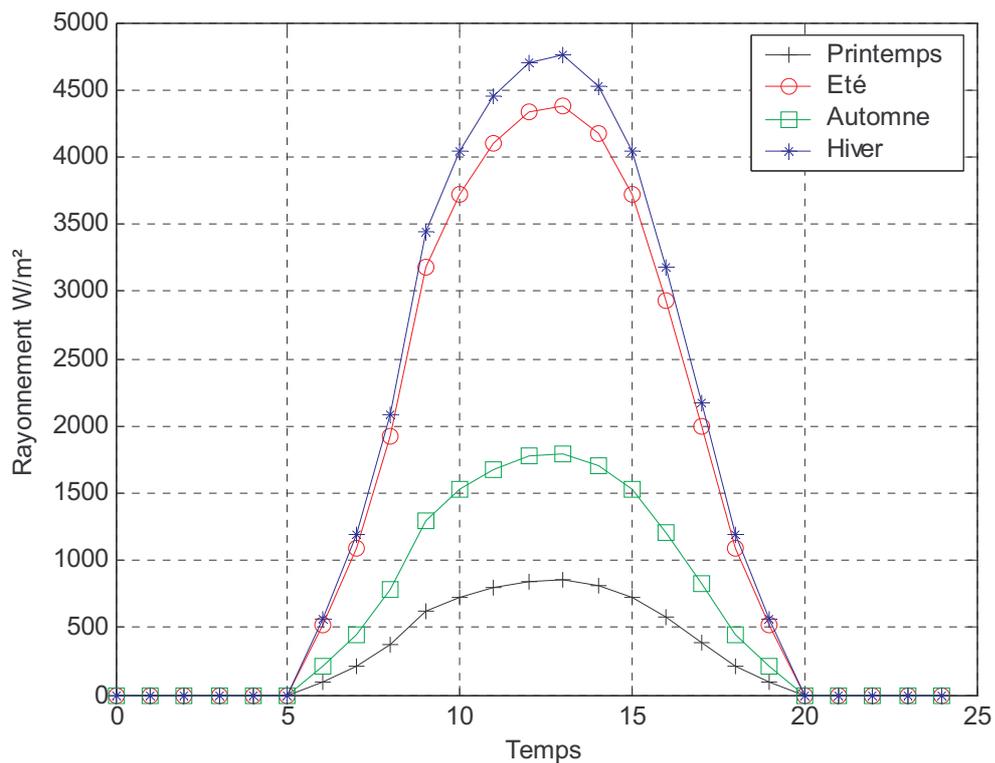


Figure.3.7. Effet Cosinus sur le rayonnement concentré  
(Axe de rotation horizontal orienté Est-Ouest).

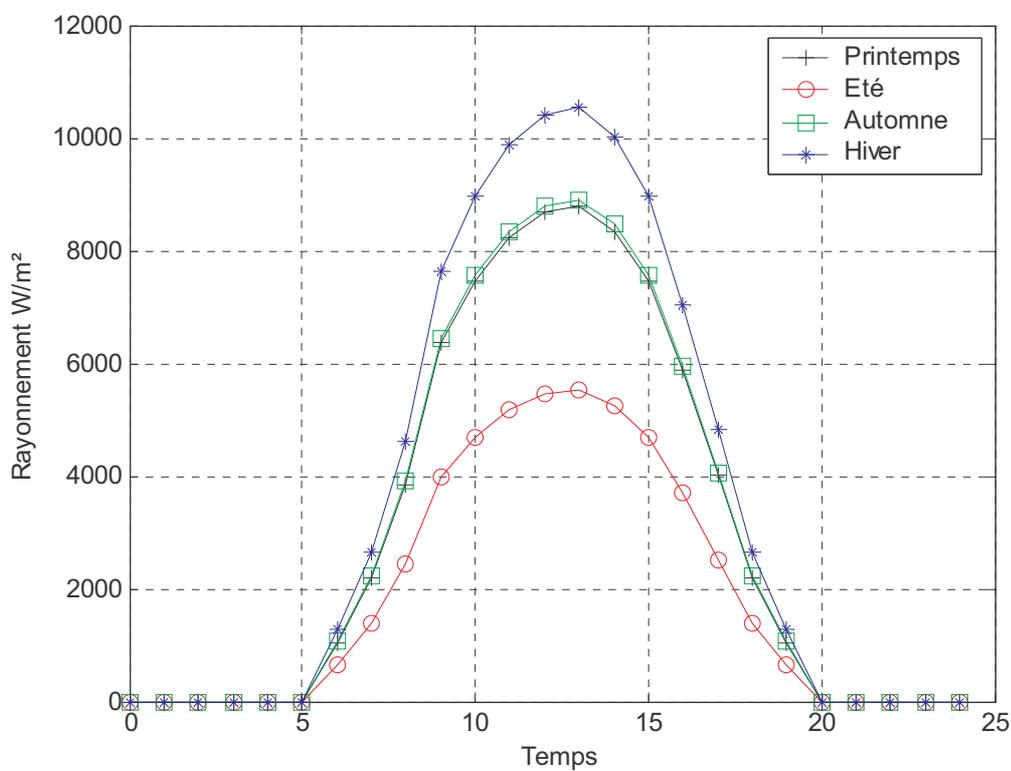


Figure.3.8. Effet Cosinus sur le rayonnement concentré.  
(Axe de rotation horizontal orienté Nord-Sud).

Pour la courbe de la poursuite intégrale (1) on remarque que cette dernière ne change pas avec les saisons, autrement dit le concentrateur capte le maximum de rayonnement solaire (*figure.3.5*) seulement pour ce cas la méthode de poursuite est réalisée avec deux axes et cela influe directement sur le coût du revient du système.

Concernant le type de poursuite (2) avec un axe de rotation parallèle à l'axe du monde, on constate toujours qu'on capte le maximum de rayonnement (*figure.3.6*), cette courbe est très proche de celle de la poursuite intégrale, le rayonnement est au maximum au printemps et à l'automne et à son minimum en hiver et en été et cela est dû directement à l'effet *Cosinus*, on conclut que cette poursuite est satisfaisante pour les systèmes à rotation avec un seul axe.

Pour la méthode de poursuite (3) avec un axe de rotation horizontal orienté Est–Ouest, la concentration atteint sa valeur maximale en hiver et en été mais elle est faible pour les deux autres saisons au printemps et en automne (*figure.3.7*) ceci à pour cause l'effet *Cosinus* sur ce type de poursuite. Il est à noter que la consommation du système d'orientation est minimale car l'angle de poursuite ( $h$ ) est généralement très petit.

Pour le type de poursuite (4) avec l'axe de rotation horizontal et orienté Nord–sud, le rayonnement sera à son max pour les saisons printemps, hiver, automne et il sera faible en été (*figure.3.8*), et ceci n'est pas très rentable en terme de poursuite.

A partir de ces résultats nous avons choisi d'utiliser pour notre prototype le type de poursuite (2) avec un axe de rotation parallèle à l'axe du monde.

### 3.3. Réalisation d'un système de poursuite assisté par micro-ordinateur

#### 3.3.1. Poursuite solaire assistée par micro-ordinateur

Afin de réaliser des tests sur le concentrateur on a commencé en premier lieu par adopter une commande de poursuite solaire via le port parallèle du micro-ordinateur, pour cela nous avons réalisé un programme d'acquisition et de commande de la poursuite solaire.

Concernant le type de poursuite solaire aveugle, le programme réalisé fait un calcul de l'azimut; qui est variable d'un moment à l'autre. Pour cela le programme utilise l'heure actuelle du *PC* pour marquer le début du fonctionnement, cette information s'utilisera comme référence pour le système de poursuite, ensuite le programme calculera la hauteur du soleil ( $h$ ) correspondant à l'heure fournit, après cela le programme effectuera également; au fur et à mesure que le soleil change de hauteur, le calcul du paramètres ( $\alpha$ ) qui est l'angle de rotation du concentrateur par rapport à sa position initiale, cet angle est converti en une durée qui commandera le vérin pour assurer la poursuite aveugle.

Pour le type de poursuite sensible, nous avons utilisé une cellule photovoltaïque dont on fait l'acquisition du courant qu'elle génère, et selon l'exposition de la cellule par rapport au soleil le programme décide d'actionner le vérin ou pas.

Nous avons choisi la broche du *PIN 4* du port parallèle pour faire orienter le concentrateur vers l'ouest et la broche du *PIN 7* pour l'orienter vers l'est, et pour la commande du port parallèle nous avons utilisé le langage Assembleur sous Delphi pour effectuer l'envoi des bits.

Par exemple pour un niveau haut du *PIN 4* on envoie (4 en hexa) qui est 00000100 en binaire et pour le niveau haut de *PIN 7* on envoie (20 en hexa) qui correspond en code binaire à 00100000, les *PIN 4* et *7* sont liés directement à la carte à base du microcontrôleur *16F84A* réalisée spécialement pour commander le vérin qui oriente à son tour le concentrateur vers l'ouest ou l'est.

### 3.3.2. Réalisation d'une carte de commande liée au port parallèle

Les commandes envoyées par le programme; à travers le port parallèle, sont reçues par une carte électronique, qui assure la fonction de la commande de la poursuite solaire et du concentrateur. La carte est réalisée à base d'un microcontrôleur *PIC16F84A* (Figure.3.9) dont les principales caractéristiques sont les suivantes : [29]

- Fonctionnement à 10 Mhz max. Chaque cycle prend 4 tops d'horloge;
- 1024 octets de mémoire FLASH pour le programme;
- 68 octets de RAM;
- 64 octets d'EEPROM;
- 1 compteur/timer 8 bits;
- 1 Watchdog intégré;
- 4 sources d'interruption;
- 13 E/S (Entrées/Sorties) configurables individuellement;
- Mode SLEEP.

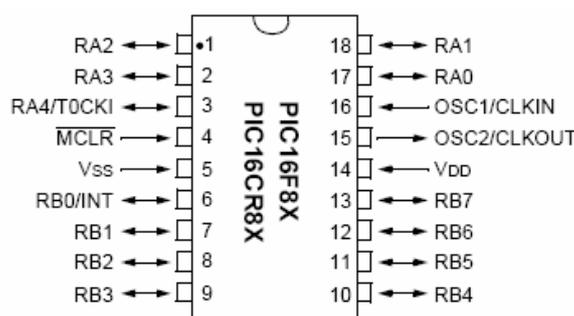


Figure.3.9. Brochage du microcontrôleur *PIC16F84A*.

La carte électronique réalisée est connectée à une autre carte réalisée à base de relais qui comporte en tous 3 relais et une bobine à faible consommation, la commande de ces relais est réalisée avec un transistor de type 2N2222.

La carte comporte trois boutons poussoirs, le premier pour la commande du vérin du côté Est, le second pour la commande du côté Ouest, et le dernier est pour la commande de l'état marche de la pompe. Trois *LED* sont associées à chaque bouton poussoir pour indiquer son état (fonctionnement ou dysfonctionnement). Une autre *LED* de couleur jaune est disposée au milieu du boîtier pour indiquer que le système de poursuite est en marche, la visualisation étant réalisée avec un afficheur *LCD 2x16* caractères.



*Figure.3.10. Carte de commande réalisée liée au micro ordinateur.*

### **3.3.2.1. Schéma global de la carte électronique à base du PIC16F84**

La *figure.3.11* illustre le schéma global de la carte électronique réalisée comportant le *PIC16F84*.

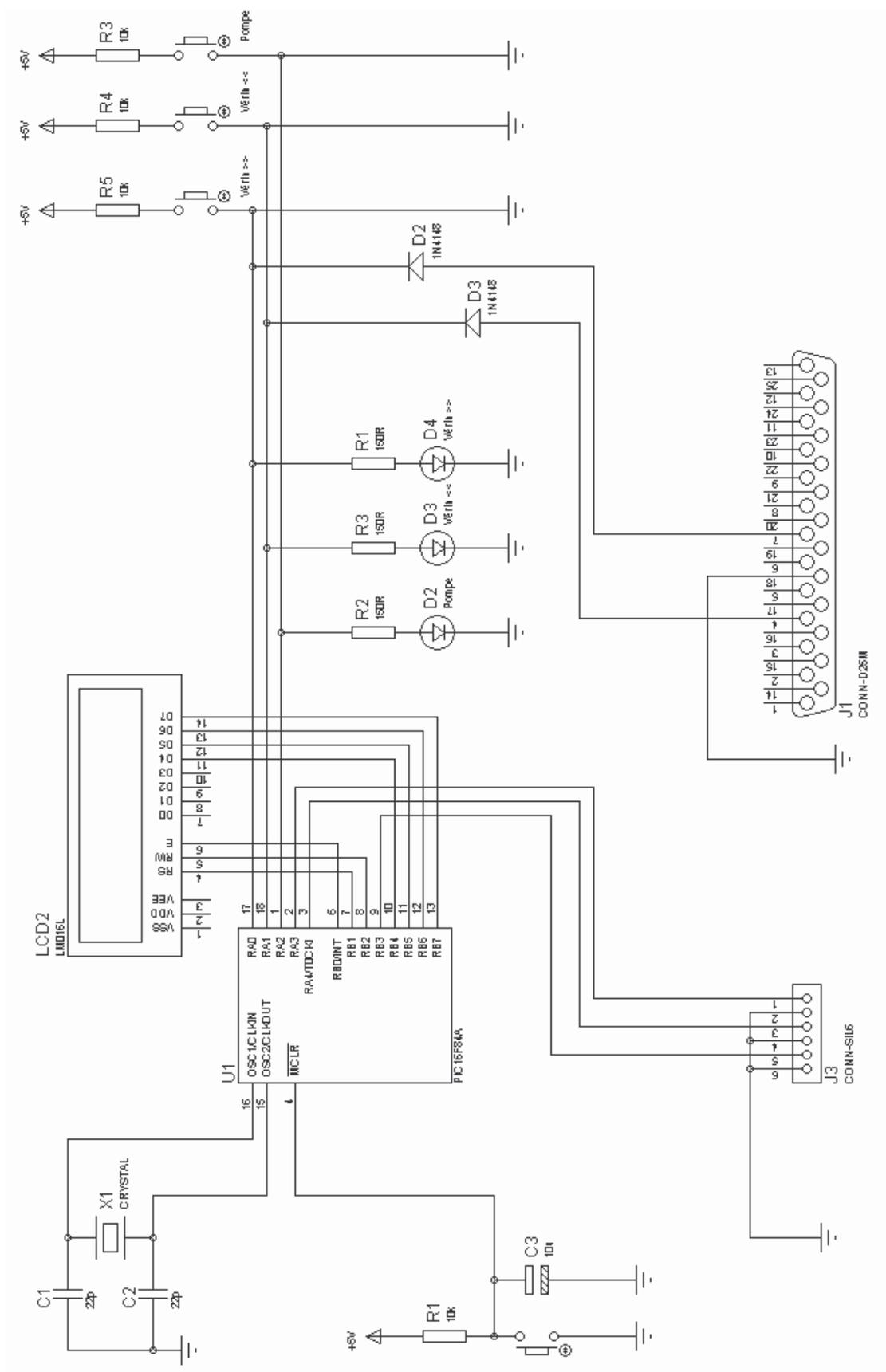


Figure.3.11. Schéma global de la carte électronique réalisée.

### 3.3.2.2. Schéma global de la carte à relais

La *figure.3.12* représente le schéma global de la carte à relais réalisée associée à la carte électronique précédente.

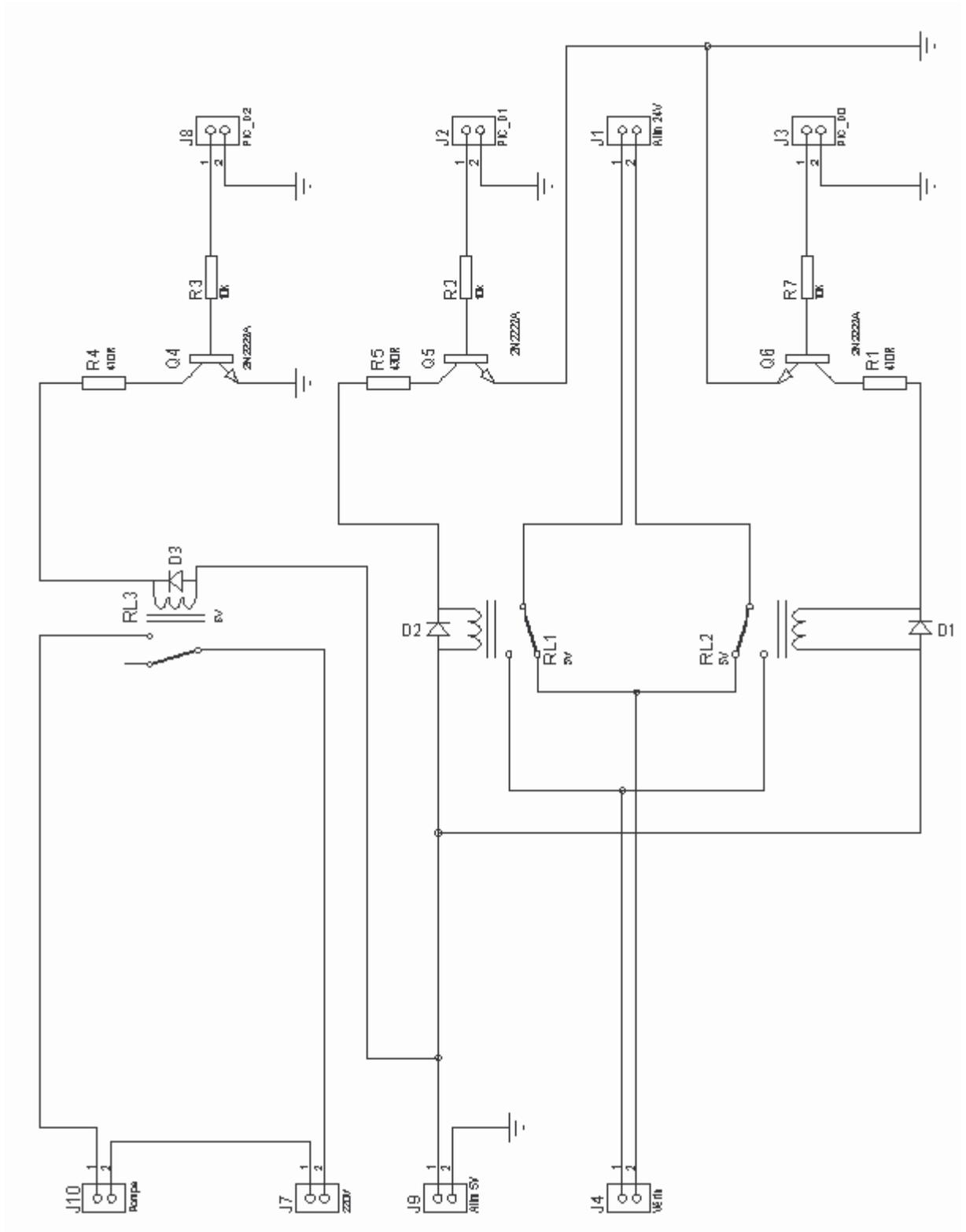
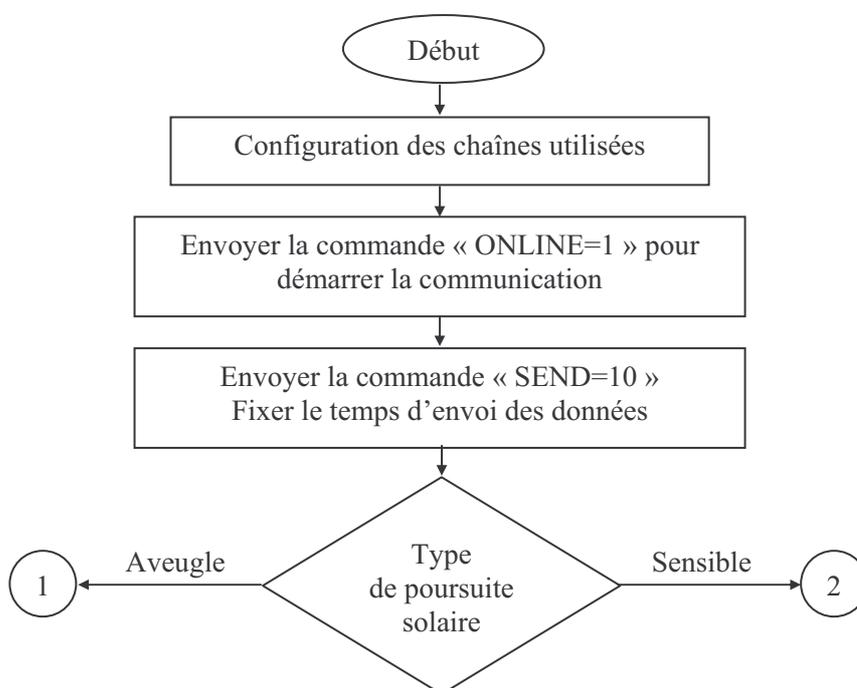


Figure.3.12. Schéma global de la carte à relais réalisée.

### 3.3.3. Organigramme général du programme d'acquisition et de commande

La commande du vérin pour la poursuite solaire aveugle ou sensible, est assurée par un programme exploitant le port parallèle, qui lui-même en associé à deux cartes électroniques que nous avons réalisées. Le programme assure également la gestion et le suivi du fonctionnement de chaque partie du système ainsi que d'autres fonctions à savoir l'acquisition, la traitement, la sauvegarde et l'affichage des données sur un site *WEB*.

Les fonctions globales de ce programme sont présentées étape par étape sur l'organigramme suivant (*figure.3.13*) qui comporte deux parties une première concernant le type de poursuite aveugle, la seconde dédié pour le type de poursuite sensible.



*Figure.3.13. Organigramme général du programme réalisé.*

#### 3.3.3.1. Concentrateur avec poursuite solaire aveugle

Concernant le type de poursuite aveugle, l'organigramme de la *figure.3.14* illustre clairement le fonctionnement.

Il est à noter que pour cette partie d'organigramme le programme dresse une sorte de table qui est une base de donnée créé au sein du programme même dont ce dernier fait appel après chaque changement de position du concentrateur pour déterminer le prochain temps de déplacement du vérin. Le recours à cette base de données vient résoudre le problème de non linéarité qui engendre ce type de poursuite solaire. Ceci est essentiellement dû à la variation non linéaire de l'angle de rotation du concentrateur et du temps de déplacement du vérin, qui

est provoqué par le poids du concentrateur qui varie selon l'inclinaison de ce dernier durant une journée. Les efforts fournis par le vérin pour effectuer le déplacement convenable influent d'une manière importante sur le temps calculé d'où le problème de non linéarité. Donc le programme pour ce cas de poursuite, doit calculer les angles ( $h$ ) et ( $\alpha$ ) ensuite consulter cette base de données pour déterminer le temps de fonctionnement du vérin correspondant.

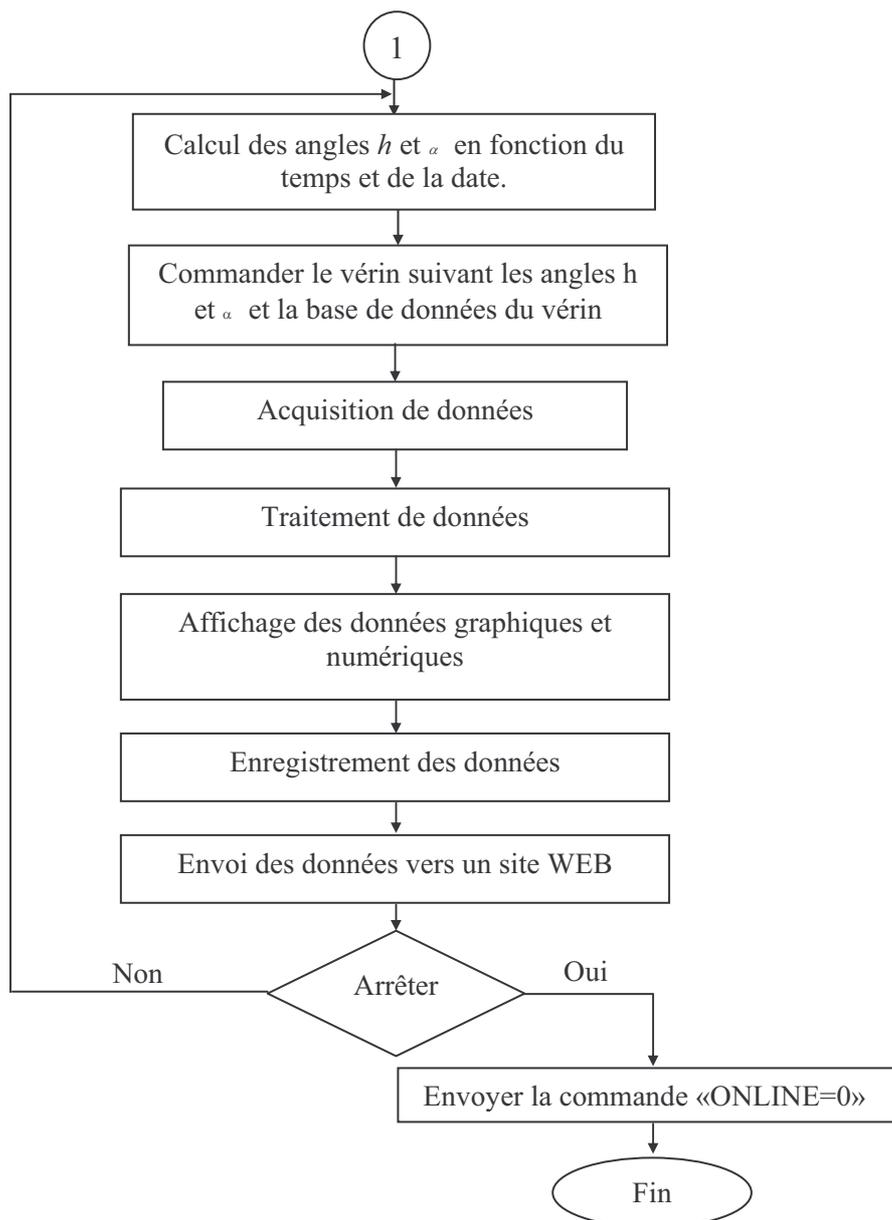


Figure.3.14. Organigramme de la partie poursuite aveugle du programme réalisé.

### 3.3.3.2. Concentrateur avec poursuite solaire sensible

L'organigramme de ce type de poursuite est donné sur la *figure.3.15* :

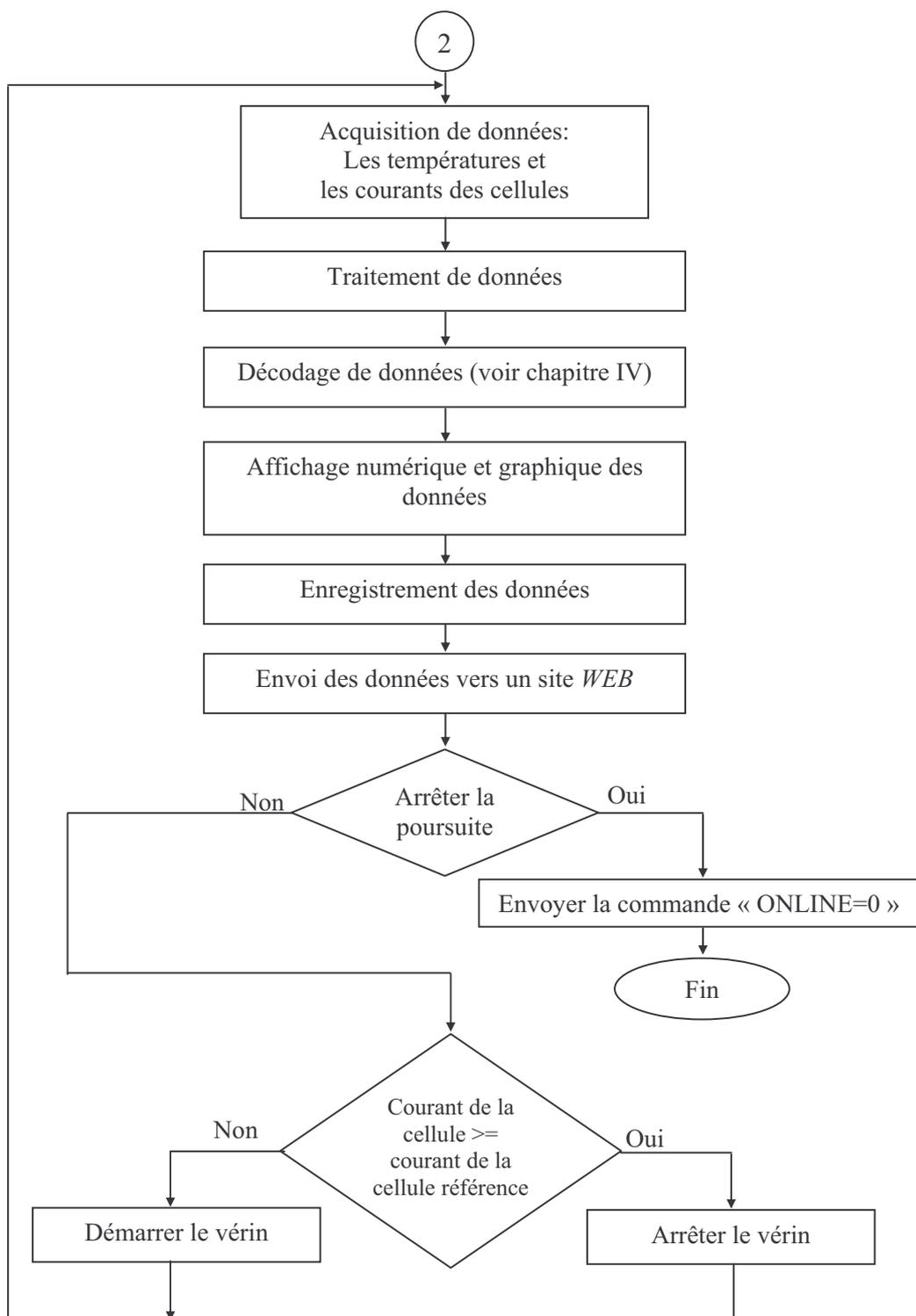
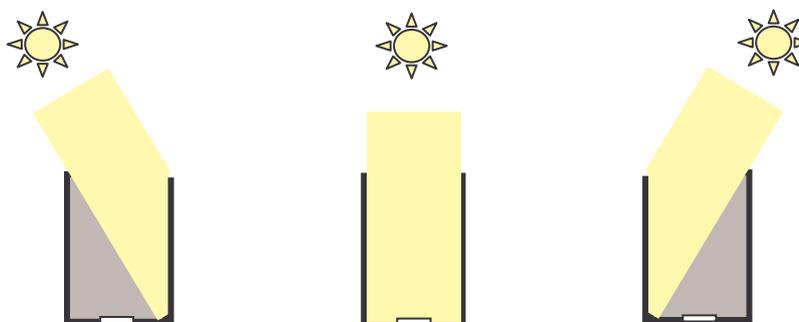


Figure.3.15. Organigramme de la partie poursuite sensible du programme réalisé.

Pour le type de poursuite solaire sensible nous avons intégré une sorte de lunette [31] (*figure.3.16*) munie de deux cellules photovoltaïques, la première posée d'une manière horizontale entre deux plaques parallèles, l'ensemble étant solidaire du concentrateur cylindro-parabolique. La manière dont elle est exposée aux rayons du soleil est représentée sur la *figure.3.17*. La deuxième cellule est identique à la première et positionnée juste à côté d'elle au même niveau, mais sans occultation et parfaitement exposée au soleil (pas d'obstacles des deux côtés). Les cellules sont connectées à l'unité d'acquisition de données, les valeurs de courant qu'elle fournissent sont traitées et comparées par le programme d'une manière instantanée pour détecter la position de la première cellule par rapport au soleil et décider de la nécessité de commander le vérin pour orienter le concentrateur.



*Figure.3.16. Vue de la lunette réalisée.*



*Figure.3.17. Lunette de détection de la position du soleil.*

#### **3.3.4. Programme de gestion du banc d'essai "GESTION\_CCP"**

Le logiciel *GESTION\_CCP* contient une fenêtre principale, qui est la fenêtre d'acquisition et de poursuite solaire (tableau de bord). Les données peuvent être visualisées numériquement et graphiquement, des rapports détaillés seront établis et les résultats obtenus pouvant être imprimés. Les données déjà enregistrées peuvent être consultées à tout moment en ouvrant la table de données.

### 3.3.4.1. Présentation du programme

Après l'exécution de *GESTION\_CCP*, la feuille de *SPLASH* est affichée dans une fenêtre qui permet de représenter le programme en question, et en arrière plan elle configure le port série et le port parallèle. Il est à noter qu'en *Windows XP* le port parallèle est protégé contre la lecture et l'écriture et pour résoudre ce problème, nous avons utilisé un programme spécial nommé "*Allowin*" [30] qui, en spécifiant l'adresse du port parallèle (*0x378*), permet d'éliminer cette protection et rend le port accessible à la lecture et à l'écriture.

### 3.3.4.2. Fenêtre de poursuite solaire

Cette fenêtre contient des boutons simples et utiles, qui permettent d'effectuer la poursuite solaire automatiquement ou la rectifier manuellement en cas d'anomalie. Elle joue le rôle d'un tableau de bord qui englobe toutes les fonctions et les paramètres de fonctionnement du système et contient des indicateurs pour le contrôle visuel de fonctionnement du vérin ainsi qu'une barre de progression pour indiquer l'état de l'acquisition de données et de poursuite solaire.

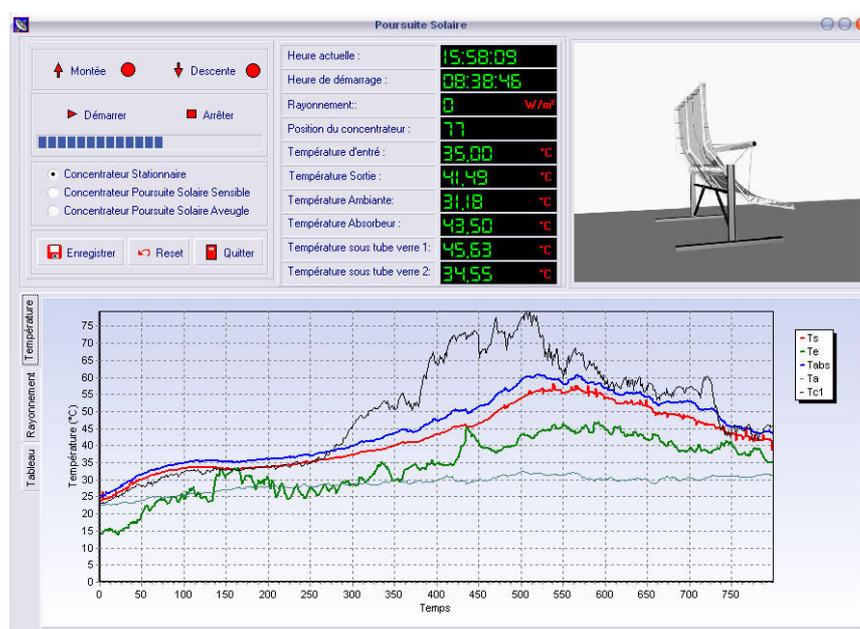
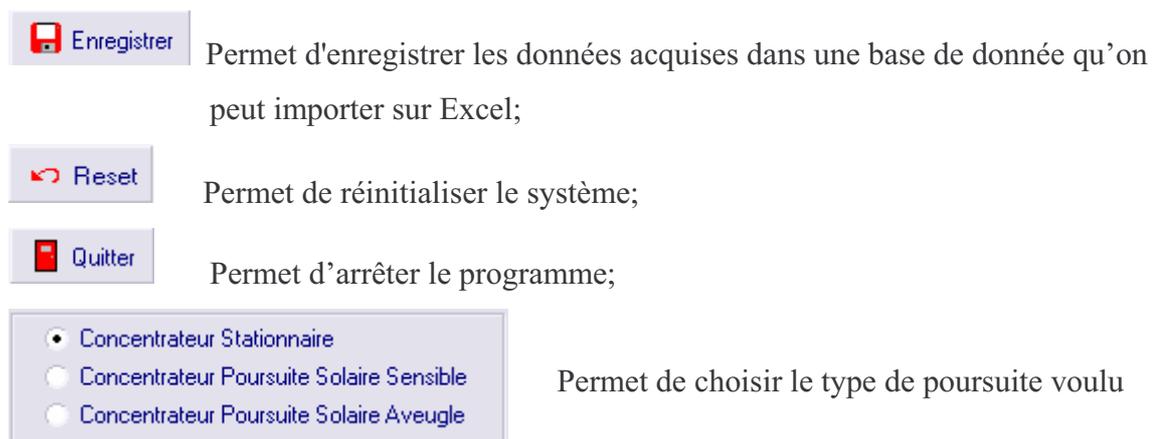


Figure.3.18. Fenêtre d'acquisition de données et de poursuite solaire.

-  **Ouest** Permet de faire orienter le concentrateur manuellement vers l'ouest;
-  **Est** Permet de faire pivoter le concentrateur manuellement vers l'est;
-  **Démarrer** Permet de démarrer la poursuite solaire automatiquement;
-  **Arrêter** Permet d'arrêter le fonctionnement du système;



### 3.4. Réalisation d'une carte électronique destinée à la poursuite solaire

#### 3.4.1. Description de la carte électronique

Afin d'assurer la liaison entre le micro-ordinateur et la carte de commande un circuit dénommé *MAX232*, permet de convertir les signaux *TTL* du micro en signaux *RS232* pour le port série. Le contrôle visuel se réalise par un afficheur *LCD 2X16* caractères, rétro éclairé ainsi que les 3 boutons de commandes (Menu, Défile, Ok) qui assure aussi bien la commande l'échange et le paramétrage.

La carte électronique dispose d'un contrôle sonore utilisant un *BUZZER*, son rôle étant génères des bips au moment de la recherche du soleil par le système. Une fois que le soleil est détecté il émet un son long pour indiquer que la poursuite est effectuée. D'autres types de bips sont entendus lorsque il y'aura des passages nuageux ou des obstacles ou encore pour indiquer la tombé de la nuit.

#### 3.4.2. Schéma global de la carte électronique

La *figure.3.19* illustre le schéma global de la carte électronique réalisée pour la poursuite solaire sensible à base du *PIC16F877*. [45]

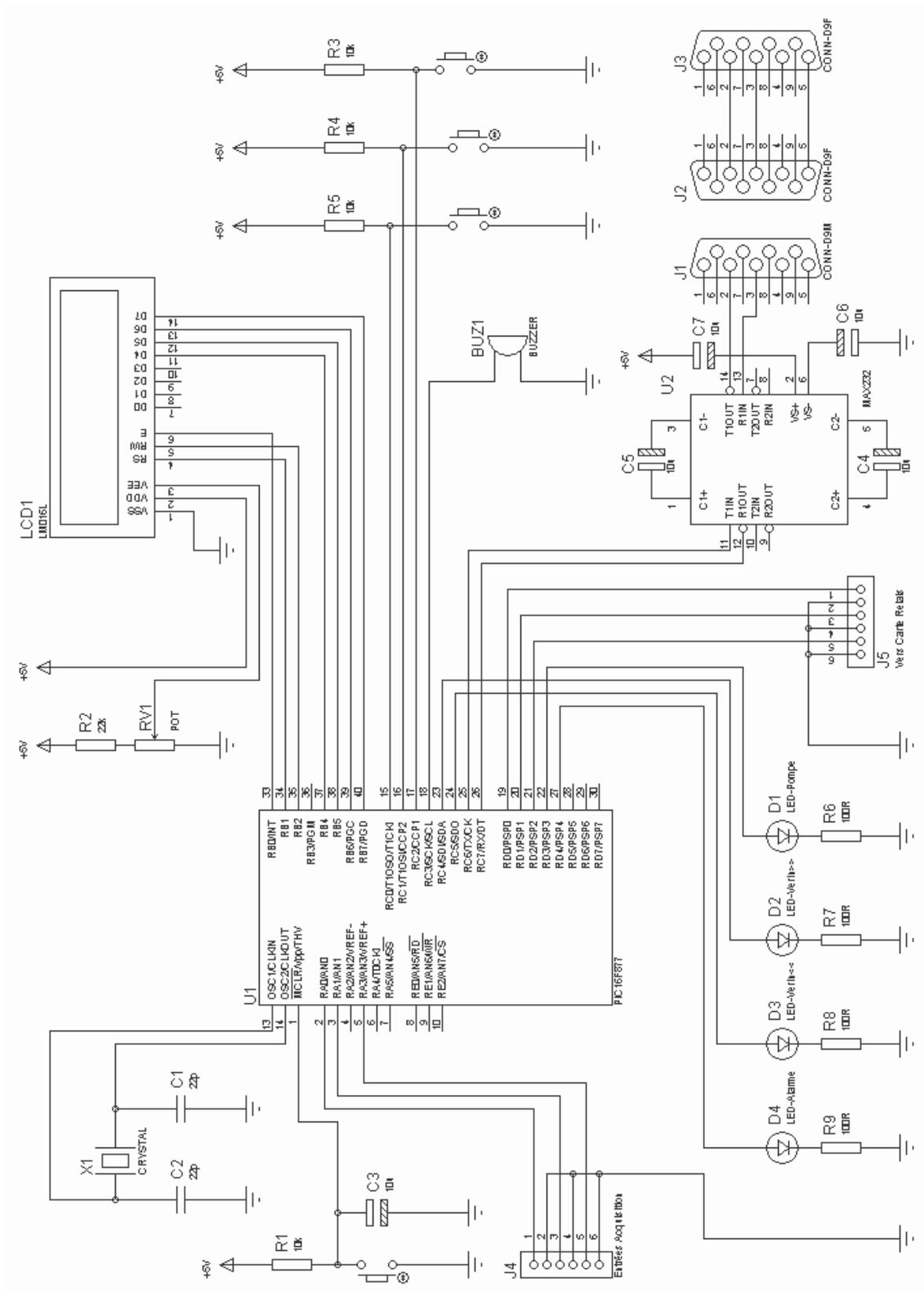


Figure.3.19. Schéma global de la carte électronique réalisée pour la poursuite sensible.

La *figure.3.20* donne une photo de la carte électronique réalisée pour la poursuite solaire sensible à base du *PIC16F877*.



*Figure.3.20. Carte de commande réalisée pour poursuite solaire sensible.*

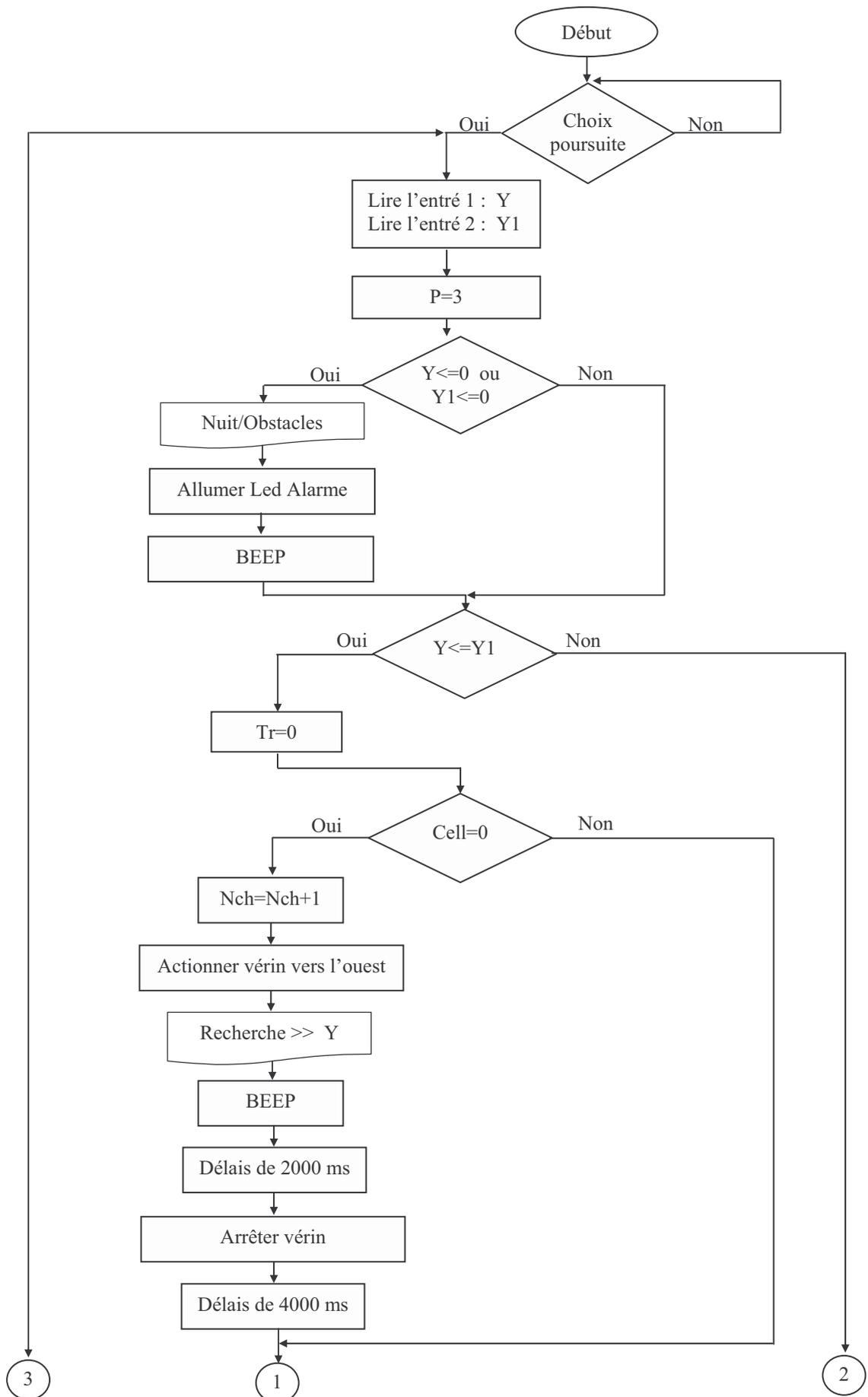
### 3.4.3. Programmation du microcontrôleur

Arrivé à ce stade, la réalisation d'un programmeur de *PIC* est indispensable pour programmer les microcontrôleurs des cartes réalisées, pour cela nous avons réalisé un chargeur de *PIC* de type *PROPIC2* (port parallèle) [47] qui communique avec le *PC* à l'aide du programme *IC-PROG*. Le programme du microcontrôleur est écrit en utilisant le *PICC CCS* version 3.222. le programme est divisé en deux parties :

La première partie pour la gestion du Menu qui comporte les sous menus suivants: "Commandes" pour forcer les sorties relais manuellement à prendre un état ou un autre et le sous menu "Lectures" pour afficher les valeurs de tension des trois entrées.

La deuxième partie concerne la gestion de la poursuite solaire, qui est le but de ce programme, basé sur l'organigramme de la *figure.3.21*.

Dans cette partie nous avons deux cellules, la cellule avec occultation et celle sans exposée au soleil. Cette dernière joue le rôle d'une cellule de référence, la carte fait la lecture des valeurs du courant des deux cellules et fait la comparaison, la commande du vérin est basée sur cette comparaison et son arrêt est réalisé dès que la valeur du courant de la cellule lunette est identique à celui de la cellule de référence. [32]



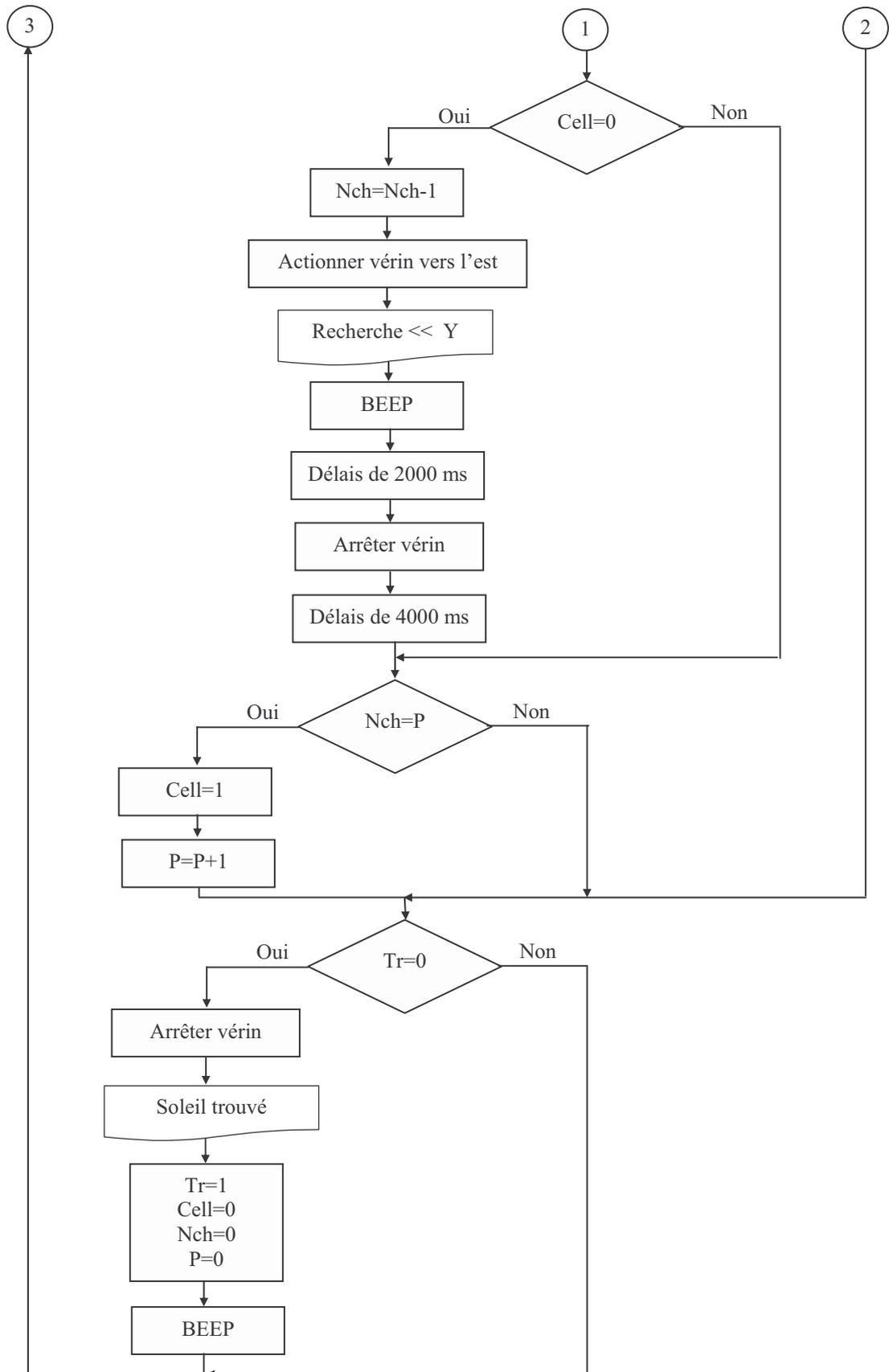


Figure.3.21. Organigramme du programme de la poursuite solaire du microcontrôleur.

### 3.4.4. Fonctionnement de la carte

A la mise sous tension, l'afficheur LCD affiche les informations suivantes :

- Ecran de démarrage :

```
URAER-ENP CCP
```

- On appuyant sur *MENU*, on obtient :

```
-MENU-  
1-Commandes
```

- L'appui sur le bouton "*DEFILE*" affiche les expressions suivantes :

```
-MENU-  
2-Poursuite
```

```
-MENU-  
3-Lecture
```

#### 3.4.4.1. Commandes

- En sélectionnant "*1-Commandes*" de l'écran précédent et on appuyer sur *OK*, on obtient:

```
-Commandes-  
1-Verin <<< ON
```

- L'appui sur le bouton "*DEFILE*" affiche l'un des écrans suivants :

```
-Commandes-  
2-Verin >>> ON
```

```
-Commandes-  
3-Pompe ON
```

```
-Commandes-  
4-Remise a zero
```

- En sélectionnant l'écran "*1-Verin >>>ON*" et on appuyer sur *OK*, on actionne le fonctionnement du vérin et on active la rotation du concentrateur vers la gauche, on obtient l'écran suivant :

```
-Commandes-  
1-Verin <<< OFF
```

- En sélectionnant l'écran "*2-Verin <<<ON*" et on appuyer sur *OK*, on actionne le déplacement du vérin vers la droite, on obtient l'écran suivant :

```
-Commandes-  
2-Verin >>> OFF
```

- En sélectionnant l'écran "*3-Pompe ON*" et on appuyer sur *OK*, on met la pompe en état de marche et on obtient l'écran suivant :

```
-Commandes-  
3-Pompe OFF
```

- En sélectionnant l'écran "*4-Remise a zéro*" et on appuyer sur *OK*, on remet le vérin à la position initiale et obtient l'écran suivant :

```
-Commandes-
Fin RESET
```

### 3.4.4.2. Poursuite

- En sélectionnant "2-Poursuite" et on appuyer sur *OK*, on obtient :

```
-POURSUITE-
Recherche >> .39
```

```
-POURSUITE-
Recherche << .39
```

- En cas d'obstacle ou de nuit, on obtient :

```
-ATTENTION-
Nuit/Obstacles
```

- En cas d'exposition au soleil de la cellule, on obtient :

```
-POURSUITE-
Soleil Trouver
```

### 3.4.4.3. Lecture

- En sélectionnant "3-Lecture" et on appuyer sur *OK*, on obtient :

```
C1= .29 C2= .39
C3= .00 Volts
```

### 3.4.5. La carte à relais

C'est une carte raccordée à la carte du microcontrôleur à travers la quelle s'effectuent toutes les commandes (commande du vérin, de la pompe...etc.). Elle dispose de trois relais avec une bobine de faible consommation pour éviter de surcharger l'alimentation. Ces relais sont commandés par un transistor de type *PNP (2N2222)* ou équivalent. [29]

Dans notre cas un contrôle visuel de la sortie relais est réalisé grâce à une diode *LED* 5mm, qui indique si le relais est actif ou pas. Afin de bien surveiller la commande, il est possible également de forcer manuellement une sortie relais à prendre un état ou un autre.

**NB** : La réalisation de cette carte est le même que celle réalisée pour la carte de commande de poursuite assistée par micro-ordinateur *figure.3.10*.

### 3.5. Tests, résultats et discussions

#### 3.5.1. Tests établis sur le concentrateur avec poursuite solaire

Avec la poursuite solaire suivante: Axe de rotation parallèle à l'axe du monde et une inclinaison est égale à la latitude de lieu, (*figure.3.22*), Nous avons effectué des tests le 18/08/2007 en activant le système de poursuite aveugle et pour contrôler le comportement du système nous avons collecté les paramètres suivants : température de sortie ( $T_s$ ), températures d'entrée ( $T_e$ ), températures d'absorbeur ( $T_{abs}$ ), températures ambiante ( $T_a$ ) ainsi que l'angle d'inclinaison du concentrateur et également l'angle du soleil (en mesurant l'ombre d'une tige verticale (*figure.3.23*)).

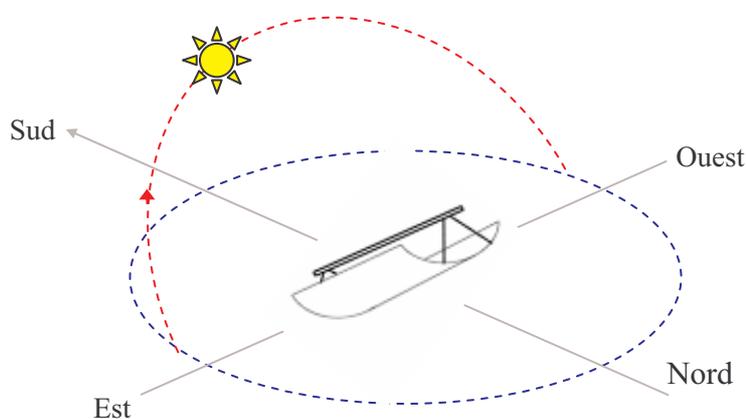


Figure.3.22. Position d'un concentrateur avec poursuite solaire.

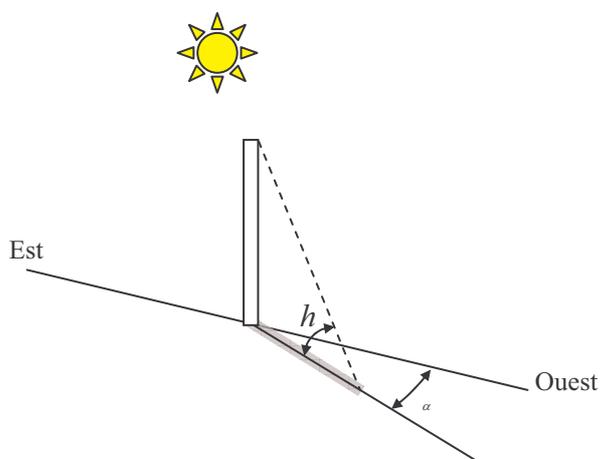


Figure.3.23. Tige utilisée pour mesurer les angles du soleil.

### 3.5.1.1. Tests établis avec poursuite aveugle

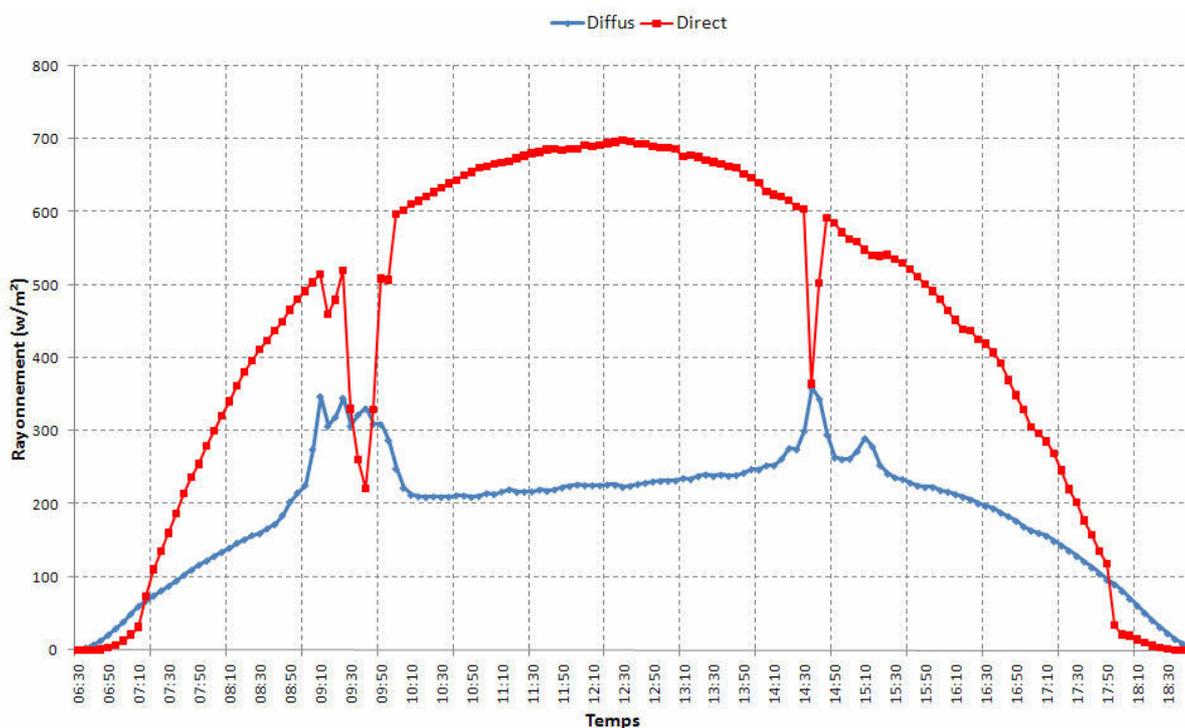


Figure.3.24. Rayonnement solaire incident sur un plan horizontal (données du 18/08/2007).

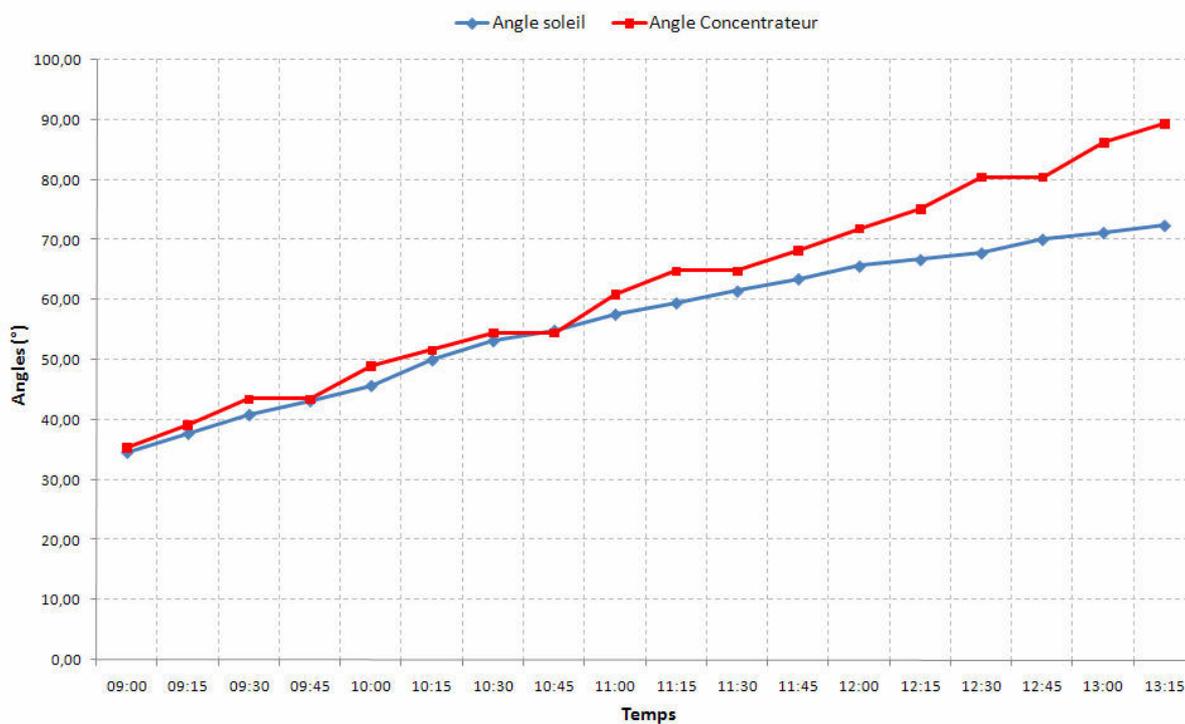


Figure.3.25. Angle d'inclinaison du concentrateur et angle de soleil en fonction du temps pour une poursuite aveugle.

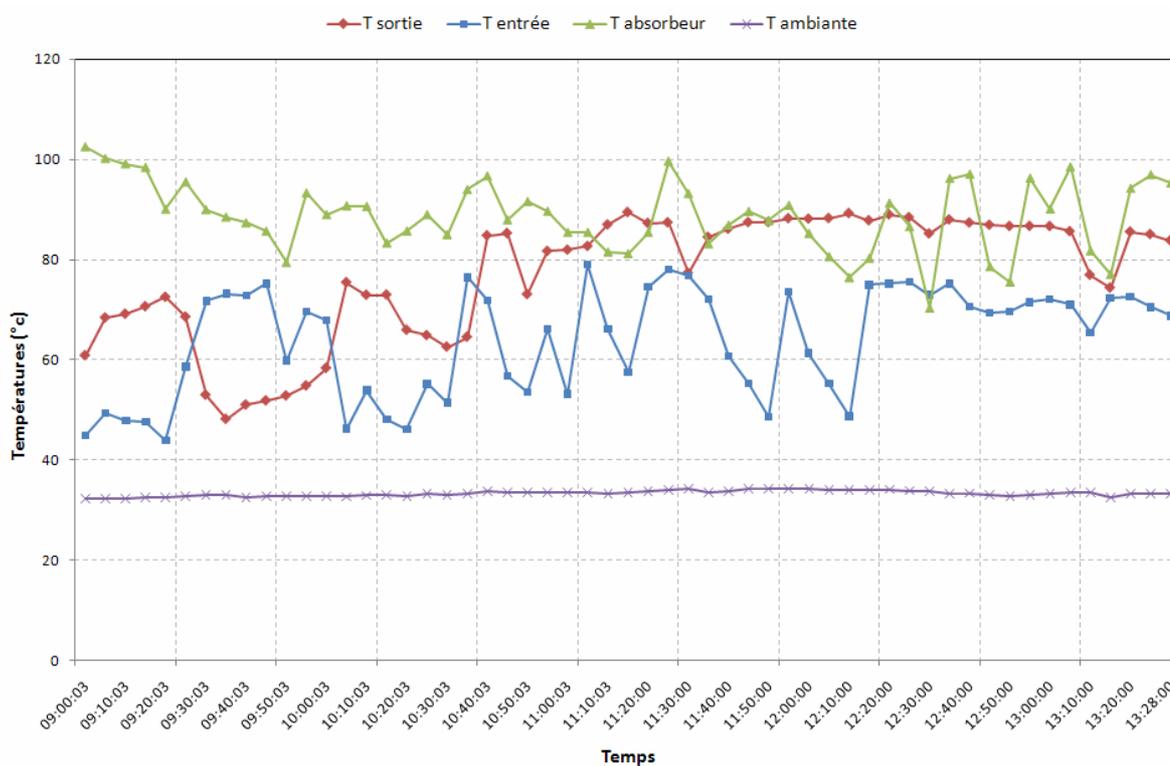


Figure.3.26. Résultats expérimentaux du concentrateur cylindro-parabolique avec poursuite aveugle réalisés le 18/08/2007.

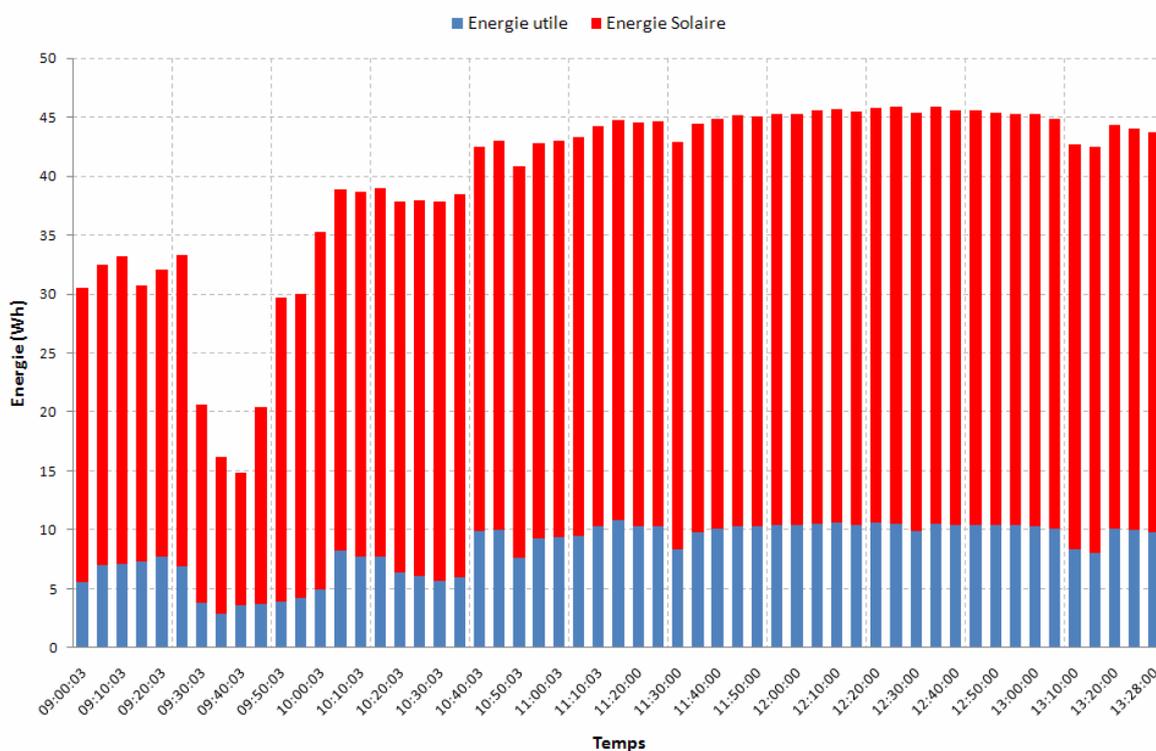


Figure.3.27. Energie fournie et énergie utile du concentrateur cylindro-parabolique avec poursuite aveugle réalisé le 18/08/2007.

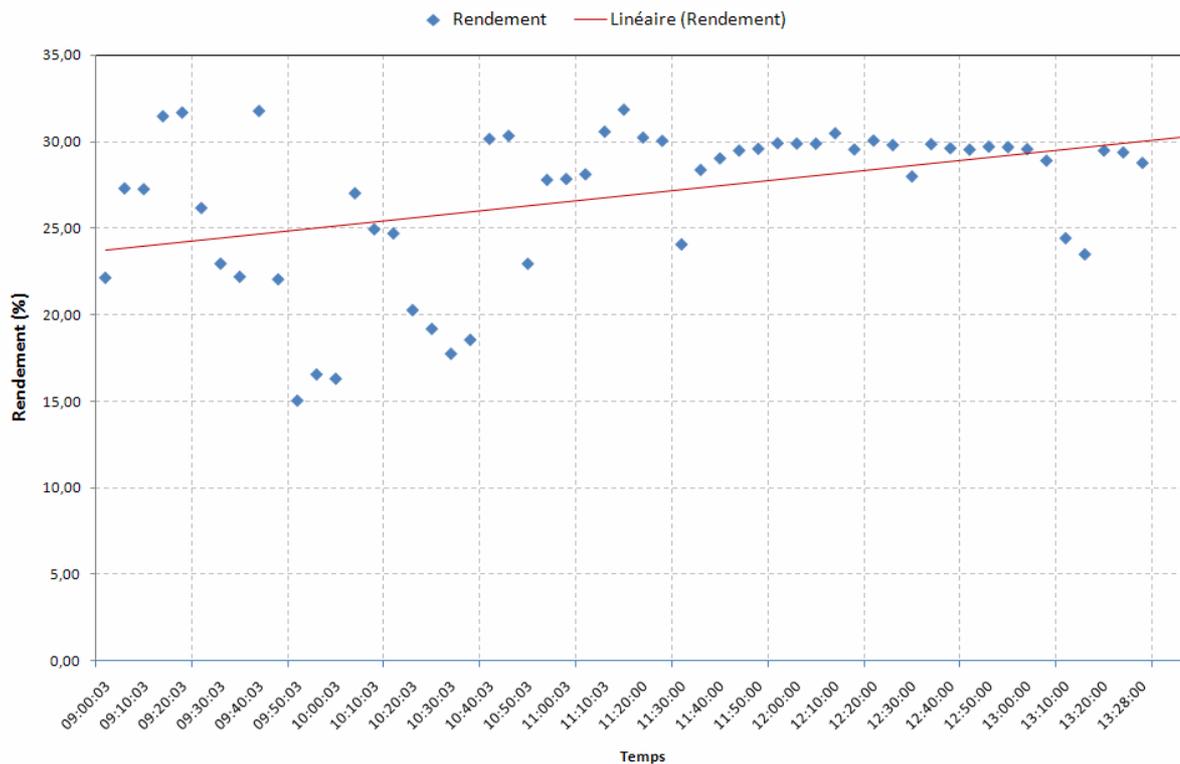


Figure.3.28. Rendement du concentrateur cylindro-parabolique avec poursuite aveugle réalisé le 18/08/2007.

### 3.5.1.2. Tests établis avec poursuite sensible

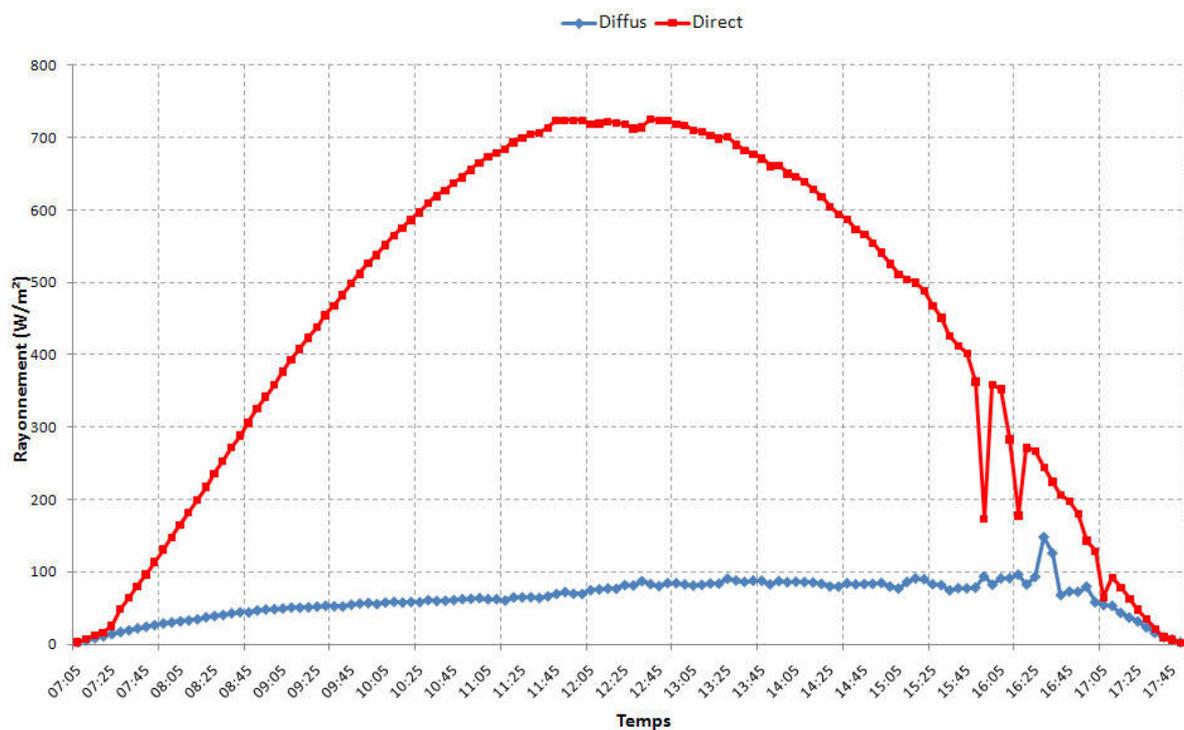


Figure.3.29. Rayonnement solaire incident sur un plan horizontal (données du 04/11/2007).

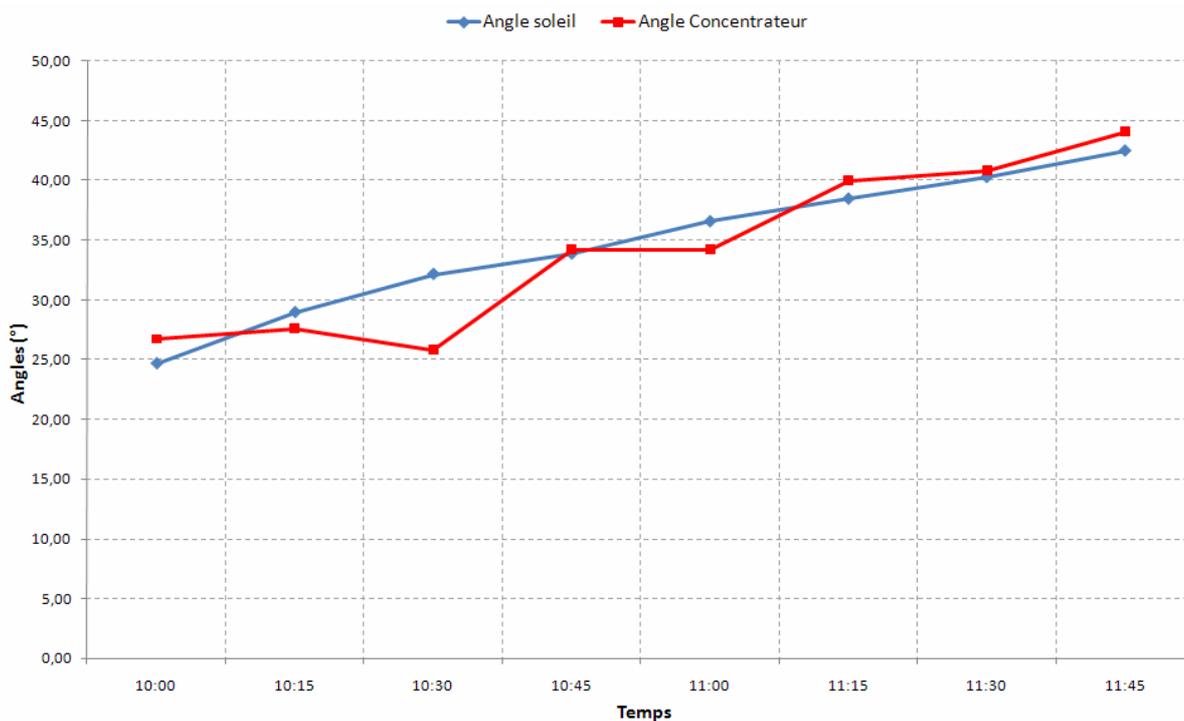


Figure.3.30. Angle d'inclinaison du concentrateur et hauteur du soleil en fonction du temps pour une poursuite solaire sensible.

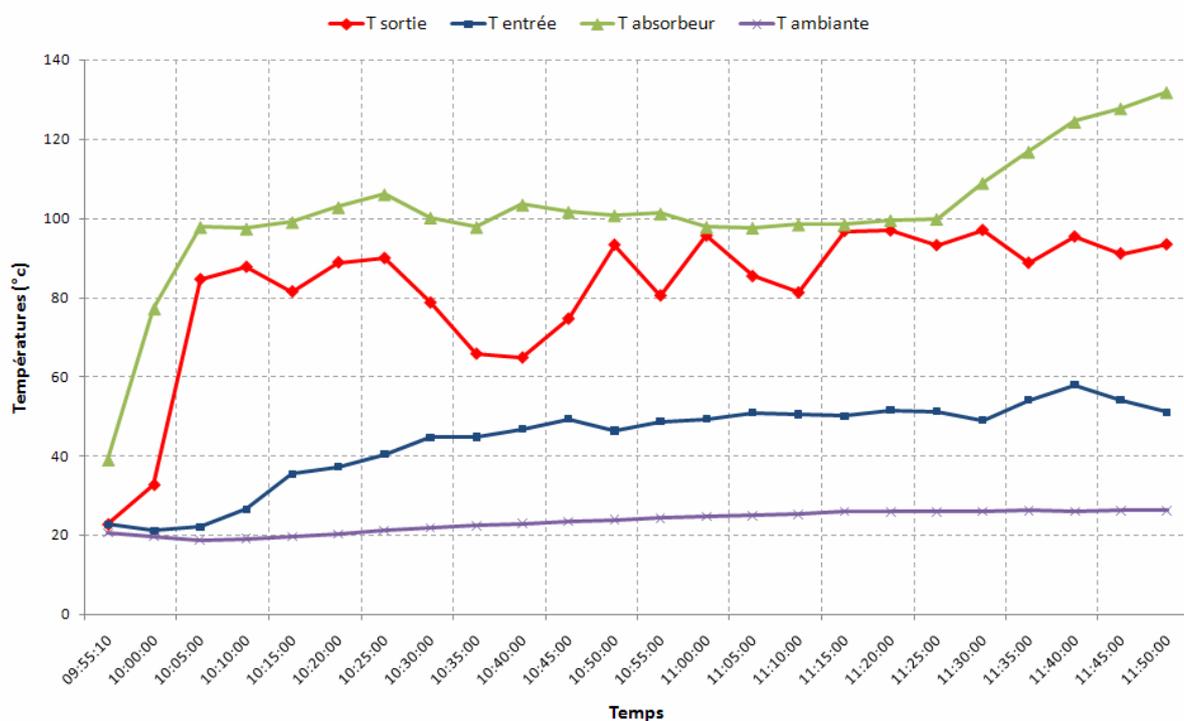


Figure.3.31. Résultats expérimentaux du concentrateur cylindro-parabolique avec poursuite solaire sensible réalisés le 04/11/2007.

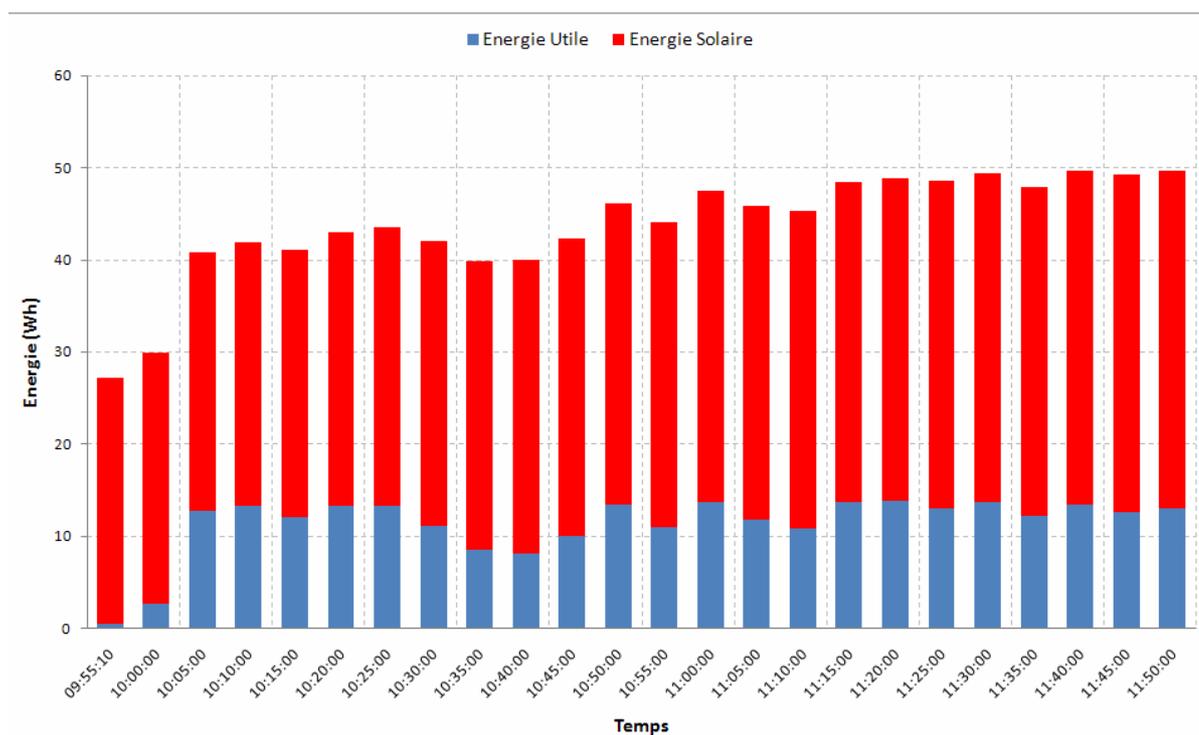


Figure.3.32.Energie fournie et énergie utile du concentrateur cylindro-parabolique avec poursuite solaire sensible réalisé le 04/11/2007.

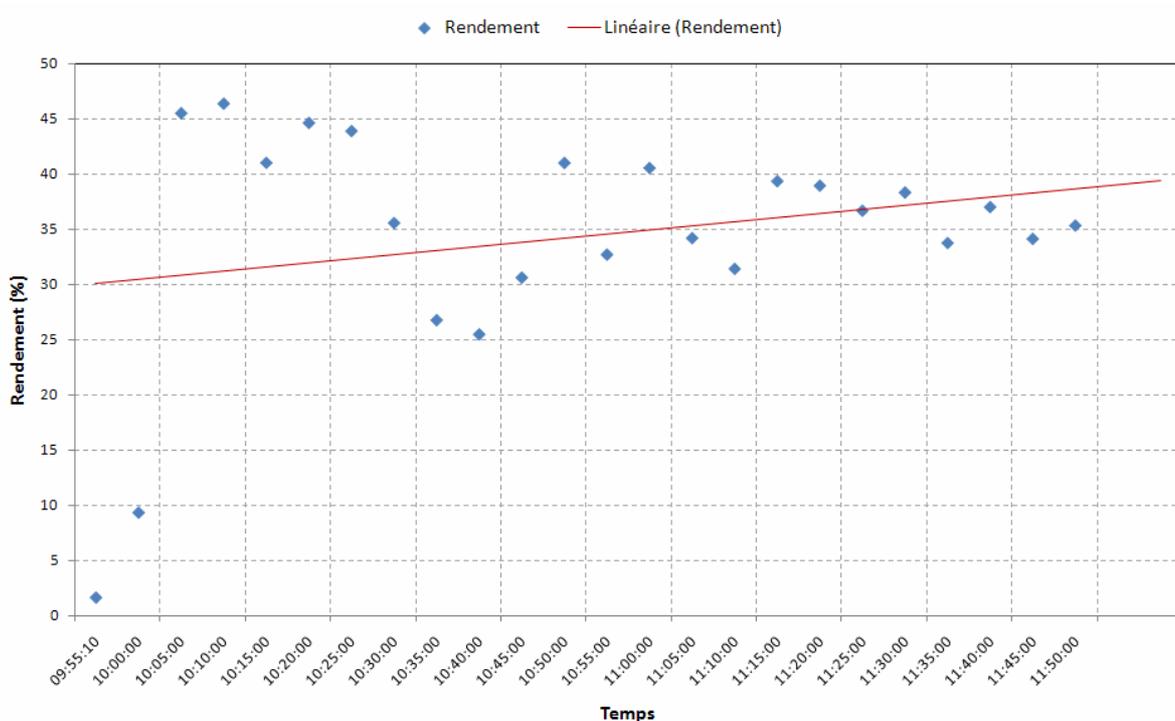


Figure.3.33.Rendement du concentrateur cylindro-parabolique avec poursuite sensible réalisé le 04/11/2007.

### 3.5.2. Discussion

#### 3.5.2.1. Poursuite aveugle

Les tests effectués le 18/08/2007 de 9h00 et 13h15, c'est un jour clair à part un passage nuageux de 9h00 jusqu'à 10h10 et entre 14h30 et 14h50. Dans ce type de test nous avons mesuré les paramètres suivants : température d'entrée et de sortie du fluide caloporteur et température ambiante, et pour connaître l'efficacité de la poursuite aveugle nous avons effectué la mesure de l'angle du soleil et l'angle d'inclinaison du concentrateur. On remarque que les valeurs des températures mesurées varient de temps à autre et cela est dû à l'évaporation du fluide caloporteur quand la température de ce dernier atteint les 100°C, cet évaporation provoque une augmentation de pression à l'intérieur du circuit comportant le fluide caloporteur et puisque les fuites sont inévitables la détente du fluide provoque une chute brusque des températures et de la pression et comme le foyer est exposé au rayonnement concentré, les températures augmenteront encore et le phénomène se répète. L'influence du passage nuageux est visible notamment sur les températures, en générale ces températures ont un intervalle fixe le long de la journée. On peut dire que ce type de poursuite est acceptable du point de vue rendement par rapport au concentrateur stationnaire, il est à noter seulement que, pour ce type de poursuite, le concentrateur poursuit le soleil avec une petite différence au démarrage ce qui est lisible sur le graphe de la *figure.3.28*, cette erreur augmente de plus en plus avec le temps.

#### 3.5.2.2. Poursuite sensible

Les tests concernant la poursuite solaire sensible sont effectués pour un jour clair (le 01/11/2007). On voit clairement qu'il y'a moins de perturbations des températures par rapport à la poursuite aveugle, on remarque aussi qu'au démarrage des tests le rendement du système est faible, ceci est dû au fait que le fluide caloporteur prend 10 minutes pour que sa température atteigne les 100°C, on constate également que la température de sortie du fluide caloporteur est maintenue beaucoup plus de temps proche des 100°C, il y'a effectivement des détentes de vapeur dans ce cas aussi mais peut être influençables. Le rendement pour ce type de poursuite est de 34 %, à cet effet on peut dire que la poursuite sensible a donné un meilleur rendement par rapport à la poursuite aveugle et beaucoup meilleur que le cas stationnaire.

### 3.6. Conclusion

Dans ce troisième chapitre du mémoire, nous avons expliqué la partie concernant la poursuite solaire, notamment les deux systèmes de poursuites solaire réalisés aveugle et sensible. Nous avons vu que pour une poursuite solaire aveugle il faut utiliser un logiciel qui pilotera le prototype, que nous avons élaboré par la suite, ce logiciel doit être associé à une carte liée au port parallèle pour permettre l'utilisation de ce dernier au moment de la commande, cette carte a été également réalisée et bien fonctionnelle, nous avons également vu que l'acquisition de certains paramètres a été nécessaire, pour effectuer cette tâche nous avons utilisé une unité d'acquisition de données, le programme de décodage de données lié à cet appareil a été également réalisé et son principe est parfaitement illustré dans ce chapitre, le logiciel déjà cité s'en chargera donc de faire l'acquisition et le traitement des données et établira la commande du vérin là où il le faut.

Pour la poursuite solaire sensible, on avait besoin de réaliser une carte électronique à base d'un microcontrôleur munie d'une lunette, la carte électronique remplacera d'une part l'enregistreur pour effectuer l'acquisition et d'autre part remplacera le micro processeur du PC pour faire le traitement et la commande du vérin, finalement on a eu un système autonome très souple à l'utiliser. Des tests ont également été effectués sur le système avec les deux types de poursuites, et la poursuite solaire sensible a prouvé son efficacité pour plusieurs points.

Durant ce chapitre nous avons constaté que les fonctions d'acquisitions, de décodage, de traitement et de sauvegarde de données évoquent une grande importance pour le bon fonctionnement du système, ces fonctions ainsi que d'autres feront l'objet du quatrième chapitre, les capteurs de mesures seront également abordés à ce stade.

## **Chapitre 4 :**

# **CHAINE D'ACQUISITION DES DONNEES**

## 4.1. Introduction

Un système d'acquisition de données peut se définir comme étant l'interface entre le monde analogique et numérique dont la liaison se fait par l'intermédiaire de ces systèmes. Il existe plusieurs systèmes d'acquisition de données dont le choix repose sur un certain nombre de critères. Il existe aussi différentes techniques d'acquisition et de restitution de données. On peut citer par exemple: [33]

- Les systèmes d'acquisition de données à une voie;
- Les systèmes d'acquisition de données à plusieurs voies;
- Les systèmes d'acquisition de données synchrones;
- Les systèmes d'acquisition de données rapides.

Depuis l'avènement de la microélectronique et le développement des nouvelles technologies, des appareils dénommés systèmes d'acquisition de données sont apparus sur le marché destinés à mesurer, traiter, surveiller et enregistrer les paramètres analogiques et numériques issus des capteurs physiques usuels (capteurs de pression, de température etc.). Ils sont souvent programmables et configurables par l'intermédiaire d'un micro-ordinateur ou compatible. Ils sont connus sous l'appellation de "*DATA-LOGGER*".

## 4.2. Protocole FTP

Le protocole FTP "File Transfer Protocol" est, comme son nom l'indique, un protocole de transfert de fichier.

La mise en place du protocole FTP date de 1971, date à laquelle un mécanisme de transfert de fichiers entre les machines du MIT (Massachusetts Institute of Technology) avait été mis au point. De nombreux RFC ont ensuite apportés des améliorations au protocole de base, mais les plus grandes innovations datent de juillet 1973. [38]

### 4.2.1. Le rôle du protocole FTP

Le protocole FTP définit la façon selon laquelle des données doivent être transférées sur un réseau TCP/IP. [38]

Le protocole FTP a pour objectifs de:

- Permettre un partage de fichiers entre machines distantes;
- Permettre une indépendance aux systèmes de fichiers des machines clientes et serveur;
- Permettre de transférer des données de manière efficace.

### 4.3. Capteurs de mesures

#### 4.3.1. Thermocouples

De toutes les grandeurs physiques, la mesure de la température est la plus fréquente. En effet, elle détermine de façon décisive les propriétés des matériaux et c'est pourquoi la mesure précise et le contrôle très strict de la température sont indispensables dans l'industrie.

Actuellement il existe plusieurs types de capteurs de température qui peuvent être utilisés. Citons par exemple:

- Les thermocouples;
- Les thermomètres à dilatation basés sur les propriétés de dilatation des corps;
- Les thermomètres électriques basés sur les propriétés de résistance électrique d'un conducteur;
- Les pyromètres optiques basés sur la relation entre la température d'un corps et le rayonnement optique qu'il émet. [40]

Les thermomètres à dilatation ne présentent pas la souplesse d'emploi nécessaire à l'acquisition numérique et les pyromètres sont d'un coût élevé. Les thermomètres électriques quant à eux, présentent l'avantage de pouvoir entrer dans un processus d'acquisition numérique, et d'être d'un coût relativement faible.

On distingue parmi eux les capteurs à variation de résistance (thermistances) et les thermocouples.

Les thermocouples ont un temps de réponse plus court et une température de fonctionnement plus élevée que les capteurs à résistance variable, ce qui justifie notre choix de capteurs concernant les mesures prises au niveau du système en question. [43]

On appelle thermocouple le système constitué de deux fils métalliques de natures différentes, soudés à l'une de leurs extrémités, et comportant à l'autre extrémité deux bornes de raccordement. Ces fils de raccordement sont à la même température ( $T_a$ ) qui est généralement la température ambiante ou celle des bornes de l'appareil de mesure. [41]

Lorsque ( $T_p$ ) est différente de ( $T_a$ ), il apparaît entre les bornes de raccordement une force électromotrice (F.E.M) qui dépend du couple métallique (A) et (B) et des températures ( $T_p$ ) et ( $T_a$ ); (*Figure 4.1*), sans être pour autant proportionnelle à ( $T_p - T_a$ ). [43]

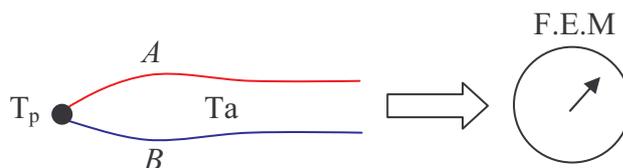


Figure.4.1. Principe des thermocouples.



Figure.4.2. Le thermocouple Type K utilisé.

### 4.3.2. Pyranomètre

Pour mesurer le rayonnement solaire nous avons utilisé un appareil de mesure dénommé pyranomètre, qui est composé d'une cellule de haute précision placée dans une sphère de verre sous vide. Le pyranomètre est souvent lié à une unité d'acquisition de données ou un appareil de mesure et puisque la cellule du pyranomètre est étalonnée on peut savoir à tout moment le facteur de conversion de la tension (tension aux bornes d'un shunt) en rayonnement.

Le pyranomètre est conçu pour la mesure du rayonnement solaire tel que reçu sur une surface plane à partir d'un hémisphère entier. On utilise un même pyranomètre pour la mesure du rayonnement direct, diffus et global. La seule différence est que pour le rayonnement direct on utilise un cône blanc (figure.4.3), alors que pour le global on enlève le cône. Pour la mesure du diffus on utilise un anneau pour créer l'ombre sur le pyranomètre le long de la journée et ainsi éliminer le rayonnement direct.

Le pyranomètre qu'on a utilisé durant ce travail est le "CM11" qui possède un facteur de conversion de (12.71), lié à une unité d'acquisition de données. [19]



Figure.4.3. Vue du pyranomètre utilisé.

#### 4.4. Schéma bloc de la chaîne de mesure adoptée

Le schéma de la *figure.4.4* représente le bloc fonctionnel du système réalisé, qui est un prototype d'un concentrateur cylindro-parabolique. On désire obtenir une concentration maximale de l'énergie solaire au niveau de l'absorbeur et pour cela on doit utiliser une poursuite solaire fiable qui ajuste le concentrateur en orientant vers le soleil qui devra être perpendiculaire au foyer.

La poursuite solaire sera assurée par une carte électronique ou par un micro ordinateur qui recevra les données acquises (températures et rayonnements) de l'enregistreur "LPD12III" à travers le port série RS232 et qui commandera à partir d'un programme spécialement conçu pour cette application la carte électronique par l'intermédiaire du port parallèle, en agissant sur le vérin.

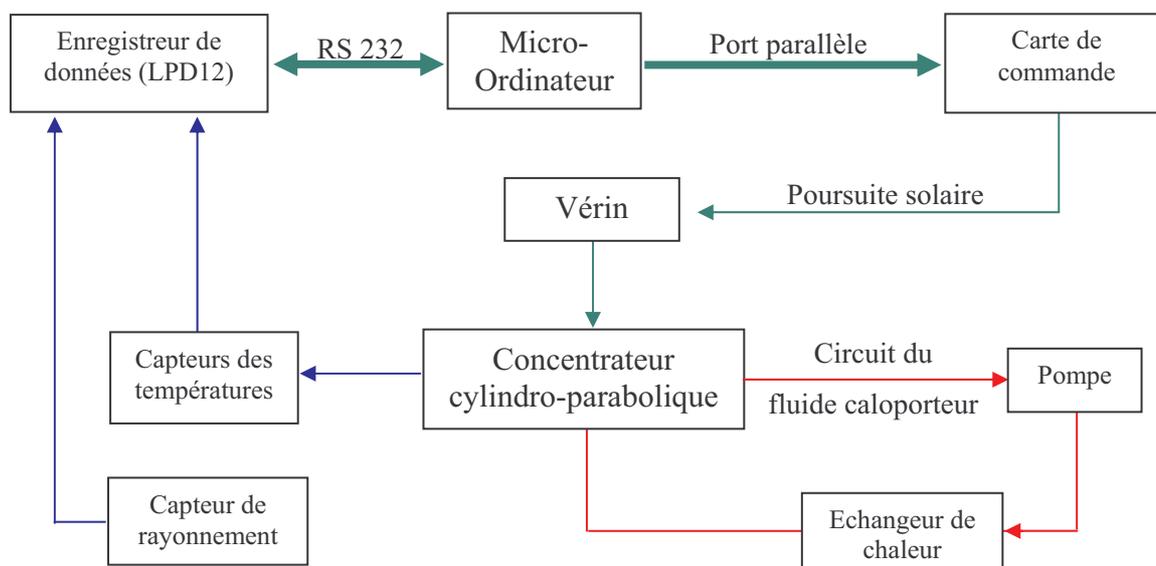


Figure.4.4. Schéma bloc de la chaîne de mesure.

#### 4.5. Unité d'acquisition des données

##### 4.5.1. Description de l'unité

Pour l'acquisition des paramètres de notre système nous avons utilisé un enregistreur de données LPD12III de type LINSEIS (*figure.4.5*), comportant 12 voies pour différents capteurs de mesure. Cette unité d'acquisition mesure la tension, le courant et la température pour 20 types de thermocouples, l'enregistreur est muni de deux afficheurs utilisables pour l'affichage des données ainsi qu'une imprimante et un lecteur de disquette d'une capacité de (1.44 MB) servant à l'enregistrement des données acquises. S'agissant de la communication avec d'autres

appareils, l'enregistreur dispose d'un port série RS232C. Le seul inconvénient de cet appareil est que les données envoyées vers le port série sont les coordonnées d'un stylo traçant d'une imprimante externe. [42]



Figure.4.5. Vue de l'enregistreur de données utilisé.

#### 4.5.2. Commandes utilisés

Toutes les fonctions manuelles de l'enregistreur LPD12III se trouvent comme commande qu'on peut envoyer à travers le port série RS232. Nous précisons ci-dessous les commandes principales utilisées dans notre programme: [42]

- INPUT

Syntaxe: INPUT n [=Limite MIN, Limite MAX, Nbr]

Fonction: Donner le type de capteur lié à la chaîne choisie;

*n*: Le numéro de chaîne;

Limite Min: La valeur minimale que peut mesurer le capteur;

Limite Max: La valeur maximale que le capteur peut mesurer;

Nbr: Type de capteur comme l'indique le tableau suivant:

- NAME

Syntaxe: NAME n [= "Nom de la chaîne"]

*n*: Le numéro de chaîne;

Pour le nom de la chaîne il ne faut pas dépasser un nombre de 21 caractères.

- USER

Syntaxe: USER n [=Limite MIN, Limite MAX, "Unité"]

Fonction: Donner l'unité de mesure de la chaîne choisie;

*n*: Le numéro de chaîne;

Limite Min: La valeur minimale que le capteur peut mesurer;

Limite Min: La valeur maximale que le capteur peut mesurer;

Unité: Il ne faut pas dépasser 10 caractères.

- TIME

Syntaxe: TIME [=Heures: Minute: Second]

Fonction: Réglage du temps de l'enregistreur.

- DATE

Syntaxe: DATE [=Mois / Jours / Années]

Fonction: Réglage de la date de l'enregistreur.

- PORT

Syntaxe: PORT [=Type]

Fonction: Réglage du type de communication avec d'autres périphériques;

Type: Il existe trois types: Port série RS232, Port GPIB, Modem.

- SEND

Syntaxe: SEND [=Taux].

Fonction: Réglage du temps d'envoi des données;

Taux: Le temps en seconde;

0 : Est le mode automatique de l'enregistreur.

- ONLINE

Syntaxe: ONLINE [=Statut]

Fonction: Démarrage de la communication Entrée / sortie;

Statut: 0 : Arrêter la communication;

1 : Démarrer la communication.

### 4.5.3. Décodage des données reçues

L'enregistreur utilisé contient un port série RS232C ce qui permet de se relier à une imprimante externe et c'est pourquoi l'enregistreur envoie les données issues des capteurs de mesure sous forme de coordonnées relatives au stylo lié à l'imprimante sur les 15 voies, et cela pose le problème de la compréhension des données transmises, pour cela un décodage de ces informations (coordonnées) est nécessaire afin de connaître les valeurs exactes des grandeurs mesurées.

La forme des données envoyées vers l'ordinateur est comme suit:

-12738,-12856,-12786,+00089,+00247,-19976,+00007,+00007,+00007,+00010,+00005,+00010
---

Pour chaque type de thermocouple nous avons deux limites: une limite maximale et une autre minimale. Par exemple dans le cas du thermocouple type K utilisé ( $Lim\_min = -270^{\circ}C$ ,  $Lim\_max = 1372^{\circ}C$ ), le programme réalisé doit en premier lieu effectuer le traitement par caractère (*Figure 4.14*), ensuite il trouvera la valeur pour chaque voie:

$$(CH1 = -12738, CH2 = -12856, CH3 = -12786, \dots).$$

Sachant que l'imprimante de l'enregistreur fonctionne suivant l'échelle (-20000, +20000) c'est-à-dire que la taille du papier de l'imprimante est de (40000). De ce fait on peut donc dire que la taille globale du papier est égale à la marge entre  $Lim\_min$  et  $Lim\_max$ :

$$40000 \rightarrow Lim\_max + |Lim\_min| \quad (4.1)$$

On peut calculer le facteur entre la valeur réelle et la valeur envoyée par l'enregistreur de la manière suivante:

$$A = \frac{40000}{Lim\_max + |Lim\_min|} \quad (4.2)$$

Ex: dans notre cas :  $A = 40000 / (1372 + 270) \Rightarrow A = 24,3605$

Mais la valeur positive du papier de l'imprimante (+20000) est égale à la valeur absolue du coté négatif autrement dit le zéro est au milieu du papier. Par contre la limite maximale est supérieure à la valeur absolue de la limite minimale et pour résoudre ce problème nous allons calculer un facteur spécifique afin de récupérer la différence entre les repères du coté négatif (-20000 et -270).

$$B = -20000 - (A \cdot Lim\_min) \quad (4.3)$$

Ex: Dans notre cas :  $B = (-20000) - (24,3605 * (-270)) \Rightarrow B = -13422,665$ .

Enfin on peut calculer la valeur mesurée en utilisant l'équation suivante:

$$T = \frac{Ch - B}{A} \quad (4.4)$$

Exp: Dans notre cas:  $Ch = CH1 = -12738$ ,  $T = (-12738 - (-13422,665)) / 24,3605 \Rightarrow T = 28,10^{\circ}C$ .

$Ch = CH2 = -12856$ ,  $T = (-12856 - (-13422,665)) / 24,3605 \Rightarrow T = 23,26^{\circ}C$ .

$Ch = CH3 = -12786$ ,  $T = (-12786 - (-13422,665)) / 24,3605 \Rightarrow T = 27,37^{\circ}C$ .

#### 4.5.4. Organigramme de traitement des données

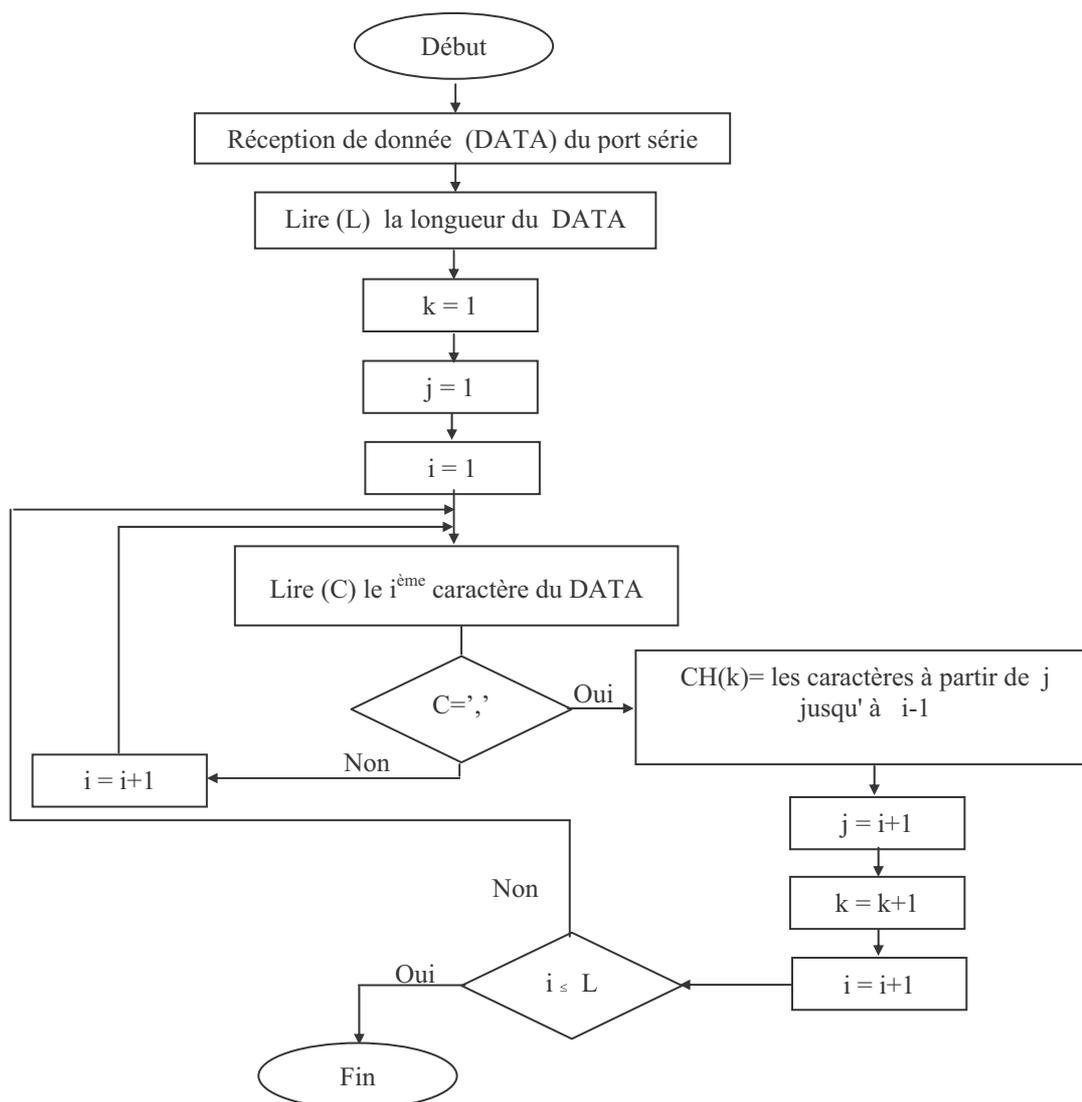


Figure.4.6. Organigramme de traitement de données acquises.

### 4.6. Programme d'acquisition de données

#### 4.6.1. Description du programme

Le programme écrit en langage *Delphi5.0* permet de communiquer entre le micro-ordinateur et l'enregistreur *LPD12III*. D'une manière générale; ce programme envoie des commandes et reçoit les données collectées des différents capteurs de mesure. Le programme permet également l'affichage en temps réel des données et le sauvegarde de ces données sur un fichier qu'on peut importer sur Excel.

Sur cette fenêtre et à l'extrême droite nous pouvons apercevoir une zone qui montre la position du concentrateur cylindro-parabolique réalisé et une seconde zone pour l'affichage graphique des valeurs de températures et de rayonnement ainsi que l'affichage numérique sur un tableau de toutes les données; (figure.4.15).

Une autre zone permet l'affichage en temps réel des paramètres suivants:

- Affichage de l'heure actuelle: déroulement de la poursuite solaire en temps réel;
- Affichage de l'heure de démarrage de l'acquisition et de la poursuite solaire;
- Affichage du positionnement du concentrateur par rapport au soleil;
- Affichage de la valeur du rayonnement solaire en  $W/m^2$ ;
- Affichage de la valeur de température de sortie du fluide caloporteur en  $^{\circ}C$ ;
- Affichage de la valeur de la température d'entrée du fluide caloporteur en  $^{\circ}C$ ;
- Affichage de la valeur de la température ambiante en  $^{\circ}C$ ;
- Affichage de la valeur de la température au niveau de l'absorbeur en  $^{\circ}C$ ;
- Affichage de la valeur de la température sous le tube en verre (effet de serre) en  $^{\circ}C$ .

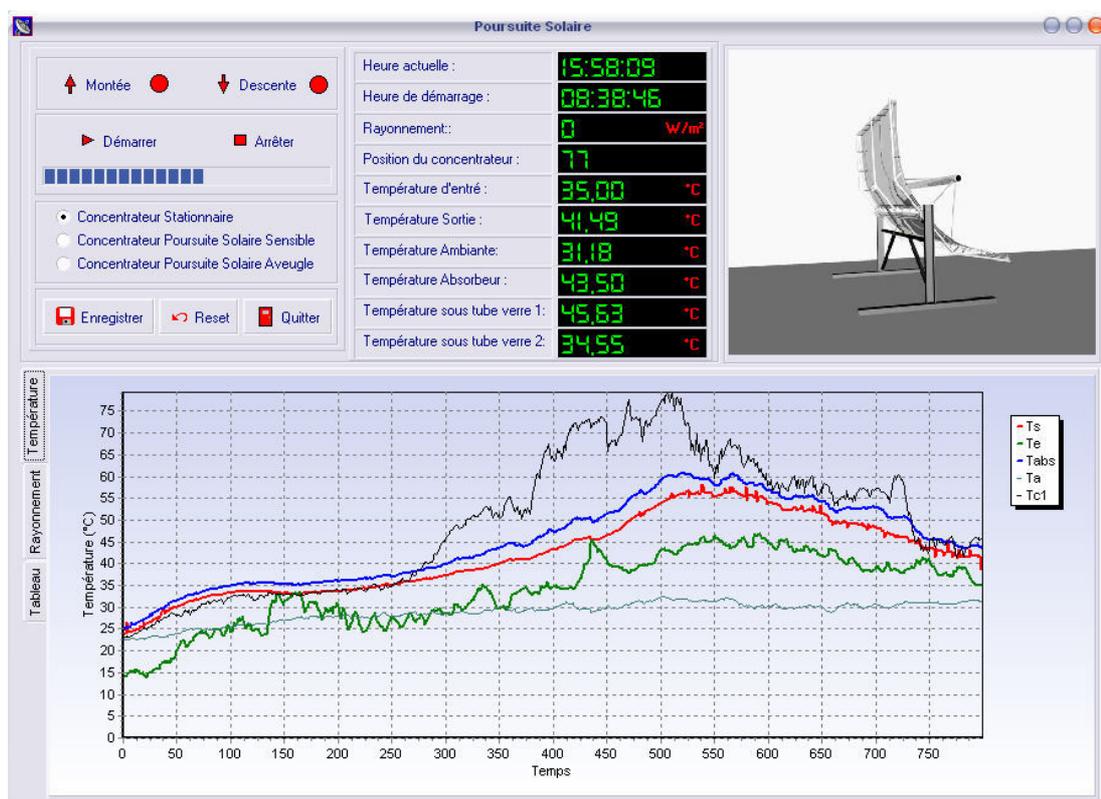


Figure.4.7. Fenêtre d'affichage des données collectées.

### 4.6.2. Organigramme général du programme

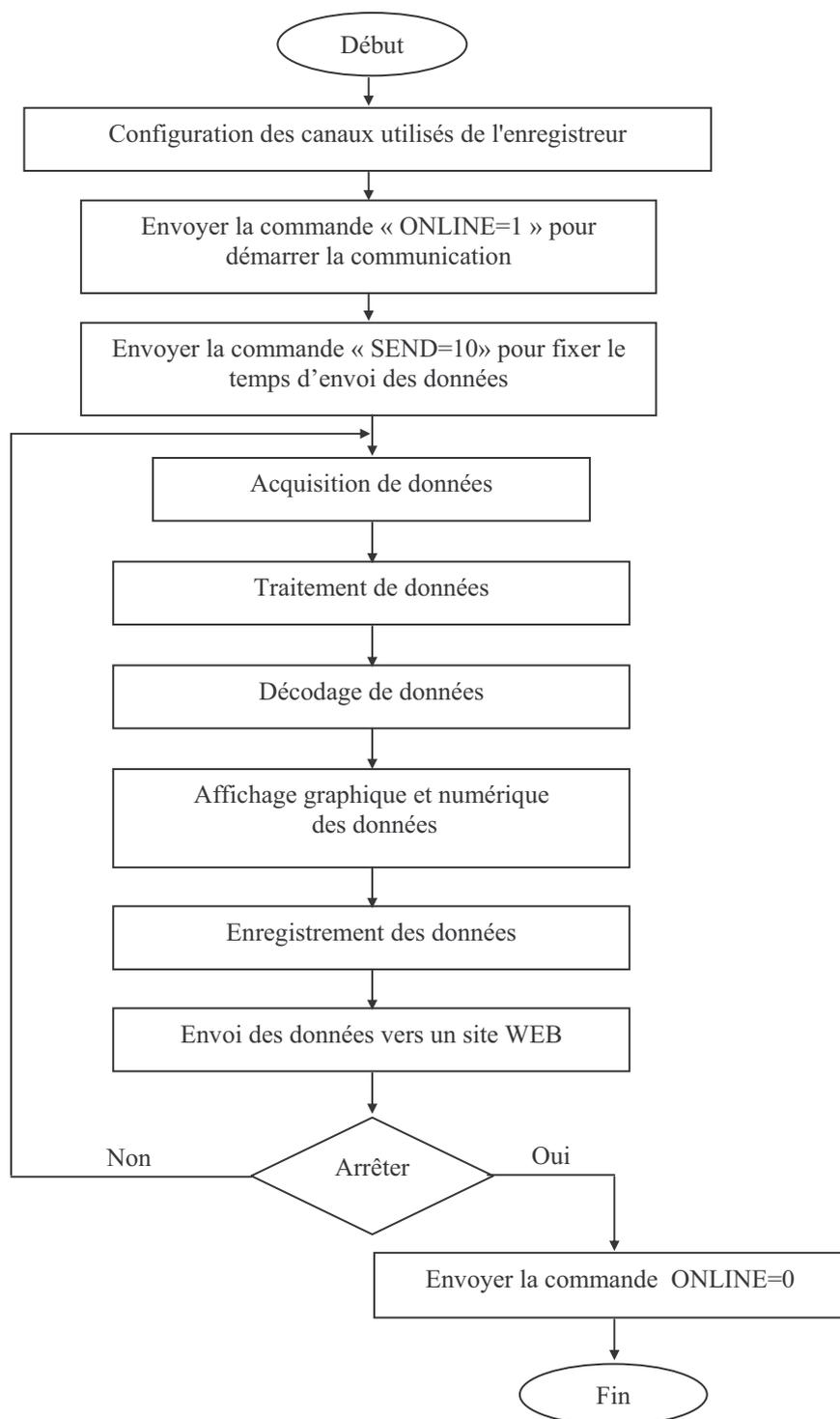


Figure.4.8. Organigramme général du programme d'acquisition.

Le programme réalisé utilise le protocole *FTP* pour l'affichage; en temps réel, des données collectées sur un site *WEB* réalisé à cet effet.

Après avoir collecté et décodé les données, le programme va créer un fichier *HTML* contenant une table qui comporte tous les paramètres collectés, ensuite le programme utilise le protocole *FTP* pour envoyer le fichier *HTML* au serveur du site Internet déjà créé, l'actualisation de cette opération se fait chaque cinq minutes. Le programme réalisé est également équipé d'un sous programme de protection fonctionnant comme superviseur du programme principal, qui doit également intervenir en cas d'anomalie ou de problème technique intervenant.

Pour consulter le site *WEB* réalisé et suivre le fonctionnement du concentrateur ainsi que les données affichées en temps réel sur ce site, il suffit de taper l'adresse du site dans la case d'adresse de Internet Explorer et la page d'accueil du site va s'afficher à l'écran; (figure.4.9). L'adresse du site à taper est: « gamasolar.ifrance.com »

J'ai souhaité utiliser une *WEBCAM* pour filmer le concentrateur durant son fonctionnement en temps réel et intégrer ces vidéos sur le site réalisé, mais malheureusement le problème du débit d'Internet qui est relativement faible pour ce genre d'application, fait que cette tâche ne peut pas être réalisée.



Figure.4.9. Page d'accueil du site WEB réalisé.

## 4.7. Conclusion

Durant cette partie du mémoire on donne le schéma bloc de la chaîne de mesure adoptée pour le concentrateur réalisé, on a constaté que pour un meilleur fonctionnement du concentrateur il a fallu un bon système de poursuite et pour cela il faut un bon système d'acquisition et de commande, dans ce contexte vient ce quatrième chapitre qui a bien illustré le principe du programme réalisé pour l'acquisition et la commande et son organigramme général de fonctionnement, les systèmes d'acquisitions ont été également un des objet de ce chapitre où on a fini par l'utilisation d'une unité d'acquisition spécifique avec la nécessité d'un programme de décodage des données reçus, nous avons parlé aussi des capteurs de mesures utilisés dans notre système pour l'acquisition tels que les thermocouples *type "K"* et le pyranomètre *"CMI1"*. L'envoi et l'affichage des données sur un site Web, qu'on a réalisé à l'aide des protocoles TCP/IP et FTP, été également signalé à la fin de cette partie.

Arrivant à ce stade on a bien déterminé et définis chaque partie du système à savoir: le concentrateur cylindro-parabolique, le circuit du fluide caloporteur, le système de poursuite solaire et le système d'acquisition ainsi que les capteurs et les dispositifs utilisés, à présent il nous reste qu'a parler de la partie photovoltaïque utilisée pour l'alimentation des accessoires du concentrateur et le programme développé à cet effet, nous discuterons de cette partie au prochain chapitre.

## **Chapitre 5 :**

# DIMENSIONNEMENT PHOTOVOLTAÏQUE

## 5.1. Introduction

Les systèmes photovoltaïques semblent bien s'imposer comme moyen de conversion de l'énergie solaire en énergie électrique. Cependant ces systèmes nécessitent un dimensionnement de l'installation tenant compte de la localisation, du besoin et de l'autonomie de la batterie ainsi qu'un système de régulation du fonctionnement des différents équipements, ce qui assure une bonne gestion.

## 5.2. Dimensionnement des systèmes photovoltaïque

Le dimensionnement d'un générateur photovoltaïque (PV) a pour objectif la détermination de la puissance crête du champ de modules solaires et la capacité de la batterie associée à partir des données d'ensoleillement du site d'une part et des besoins électriques de l'utilisateur d'autre part. Cette détermination des différents éléments doit permettre de garantir une fourniture d'énergie électrique tout au long de l'année ou éventuellement sur une période déterminée. [48]

Les données de rayonnement pour une région déterminée sont généralement disponibles, mois par mois, et correspondent à l'irradiation quotidienne moyenne sur un plan horizontal.

Pour déterminer l'énergie quotidienne (journalière) moyenne incidente sur le plan des modules, on effectue un calcul assez complexe à partir des données d'ensoleillement sur le plan horizontal et de l'inclinaison donnée aux modules.

### 5.2.1. Etapes de dimensionnement d'un système photovoltaïque

Dimensionner une installation solaire photovoltaïque consiste à déterminer les caractéristiques de l'installation, cela passe par:

- Une identification précise des besoins en électricité de l'utilisateur;
- Une connaissance des ressources solaires locales (énergie solaire disponible du site par unité de surface);
- Un calcul du nombre et de la taille de modules photovoltaïques en fonction des ressources solaires et répondant aux besoins de l'utilisateur;
- Une recherche des caractéristiques des autres composants de l'installation solaire (capacité des batteries, section des câbles, puissance de l'onduleur...etc.);
- Une consultation des fournisseurs pour une estimation de l'investissement à considérer.

Un bon choix de matériel, associé à un dimensionnement approprié garantit le bon Fonctionnement de l'installation, sa durée de vie et la rentabilité de l'investissement.

### 5.2.2. Méthode de dimensionnement manuelle

Cette simple méthode de dimensionnement qui consiste à calculer la taille du générateur et du stockage d'une manière manuelle, généralement cette méthode nécessite la connaissance de la valeur d'irradiation solaire globale moyenne quotidienne du mois le moins ensoleillé de l'année (mois le plus défavorable, généralement décembre).

On calculera alors l'énergie consommée par les divers équipements  $C_j$  ensuite on pourra calculer la puissance crête du module  $P_c$ ; ainsi le nombre de modules nécessaire est obtenu par simple calcul on connaissant la puissance crête d'un seul module  $P_{cm}$ . La détermination du parc batterie est réalisé à partir de nombre de jours d'autonomie  $N_j$  dans cette méthode ce nombre doit être compris entre 4 et 10 jours [9] [48], en plus on doit disposer de la valeur de la tension de travail  $U$ .

Nous présenteront dans ce qui suit les étapes qui permettent de réaliser ce dimensionnement.

#### 5.2.2.1. Dimensionnement du champ photovoltaïque

- Evaluation de l'énergie moyenne journalière requise par la charge ( $Wh/j$ ) :

$$C_j = \sum_{Charges} P \cdot h \quad (5.1)$$

-  $P$  : La puissance électrique consommée par la charge ( $W$ );

-  $h$  : La durée d'utilisation quotidienne moyenne ( $h$ ).

- Estimation de la puissance crête nécessaire ( $Wc$ ) : [49]

$$P_c = \frac{C_j}{K \cdot E} \quad (5.2)$$

$E$  : Le rayonnement solaire global journalier minimal reçu sur le plan des modules  
(en  $Wh/m^2/j$ );

$K$  : Facteur tenant compte des divers considérations qui affectent le rendement de l'installation, en général il est égal à 0,56.

- Calcul du nombre de module nécessaire (*modules*) :

$$N = \frac{P_c}{P_{cm}} \quad (5.3)$$

$P_{cm}$  : La puissance crête correspondant à un module ( $W$ ).

### 5.2.2.2. Dimensionnement de la batterie de stockage

- Choix de la tension de travail du système ( $U$ ) :

La tension de travail est choisie selon la valeur de la puissance crête de la manière suivante: [48]

- Pour  $P_c < 150 W_c \Rightarrow U = 12 V$
- Pour  $150 W_c < P_c < 1000 W_c \Rightarrow U = 24 V$
- Pour  $P_c > 1000 W_c \Rightarrow U = 48 V$

- Estimation de la capacité de stockage ( $Ah$ ) :

$$C_u = \frac{C_j \cdot N_j}{U} \quad (5.4)$$

Avec :  $C = C_j \cdot N_j$  ( $Wh$ ) ;

$N_j$  : Le nombre de jours d'autonomie du système;

$U$  : La tension de travail de l'installation ( $V$ ).

### 5.2.3. Méthode de dimensionnement adoptée

Cette méthode a pour but de déterminer la puissance crête du générateur solaire et la capacité de la batterie, à partir des données d'ensoleillement du site d'une part, et des besoins électriques de l'utilisateur d'autre part. Le choix des composantes du système solaire doit permettre à l'utilisateur d'utiliser les équipements requis durant la période demandée (c'est-à-dire tout au long de l'année ou pour une période déterminée) [50], et ce avec une disponibilité prédéterminée.

Les étapes suivantes permettront de dimensionner approximativement un système photovoltaïque. Il faut, en premier lieu, estimer les besoins en électricité et établir la durée de la période d'ensoleillement minimale de la région où le système sera installé; une fois le gisement solaire du site est effectué, il nous reste à choisir les éléments constituant le système PV (modules, régulateur de charge de batterie, onduleur). Les formules de calculs ci-après permettront ensuite de dimensionner la puissance du champ photovoltaïque et la capacité de la batterie. [9] [48]

La détermination du parc batterie est réalisée à partir de la prise en compte d'un certain nombre de jours d'autonomie à assurer la relève quand la production du champ PV est nulle. Ce nombre de jours varie suivant les auteurs mais également suivant les applications et la situation géographique (généralement entre 3 jours et 3 semaines). [48]

### 5.2.3.1. Dimensionnement du champ photovoltaïque

- Evaluation de l'énergie journalière fournie par un module (Wh):

Sous les conditions standards de température et de l'éclairement ( $T=25^{\circ}\text{C}$  et  $G_{cs}=1000$ ); l'énergie délivrée par un module est exprimée sous la forme suivante:

$$E_p = P_{cm} \cdot \left( \frac{E_{min}}{G_{cs}} \right) \cdot k \quad (5.5)$$

$P_{cm}$  : Puissance du module exprimée (W);

$E_{min}$  : Irradiation moyenne journalière annuelle minimale ( $\text{Wh}/\text{m}^2$ );

$k$  : Facteur de correction global, contenant les divers rendements ainsi qu'un coefficient de sécurité; il est exprimé en (%);

$G_{cs}$  : Coefficient constant; il est égal à 1000.

- Estimation du nombre total de modules constituant le générateur (*module*) :

$$N = \frac{C_j}{R_o \cdot R_r} \cdot \frac{I}{E_p} \quad (5.6)$$

$R_o$  : Rendement de l'onduleur en (%);

$R_r$  : Rendement du régulateur en (%);

$C_j$  : Energie journalière consommée par la charge en (Wh).

- Estimation du nombre de modules en série (*module*) :

$$N_s = \frac{U}{U_n} \quad (5.7)$$

$U$  : Tension d'installation en V;

$U_n$  : Tension nominale d'un module en V.

- Estimation du nombre de branches en parallèle (*branches*) :

$$N_p = \frac{N}{N_s} \quad (5.8)$$

- Calcul de la puissance du générateur (Wc) :

$$P_c = N_s \cdot N_p \cdot P_{cm} \quad (5.9)$$

- Calcul de la surface totale du générateur ( $\text{m}^2$ ) :

$$S_t = N \cdot S_m \quad (5.10)$$

$S_m$  : C'est la surface d'un module ( $m^2$ ).

### 5.2.3.2. Dimensionnement de la batterie de stockage

- Détermination de la capacité de stockage ( $Wh$ ) :

$$C_S = \frac{C_j \cdot N_j}{P_f \cdot R_h} \quad (5.11)$$

$N_j$  : Autonomie en jours;

$P_f$  : Profondeur de décharge en %;

$R_h$  : Rendement de la batterie en%.

- Détermination de la capacité utile de stockage ( $Ah$ ) :

$$C_u = \frac{C}{U} \quad (5.12)$$

- Détermination du nombre d'éléments batteries en série (éléments) :

$$N_{bs} = \frac{U}{U_b} \quad (5.13)$$

$U_b$  : Tension de l'élément batterie donnée par le constructeur ( $V$ ).

- Détermination du nombre de branches en parallèle (*branche*) :

$$N_{bp} = \frac{C_u}{C_e} \quad (5.14)$$

$C_e$  : Capacité d'un élément batterie donnée par le constructeur exprimée en  $Ah$ .

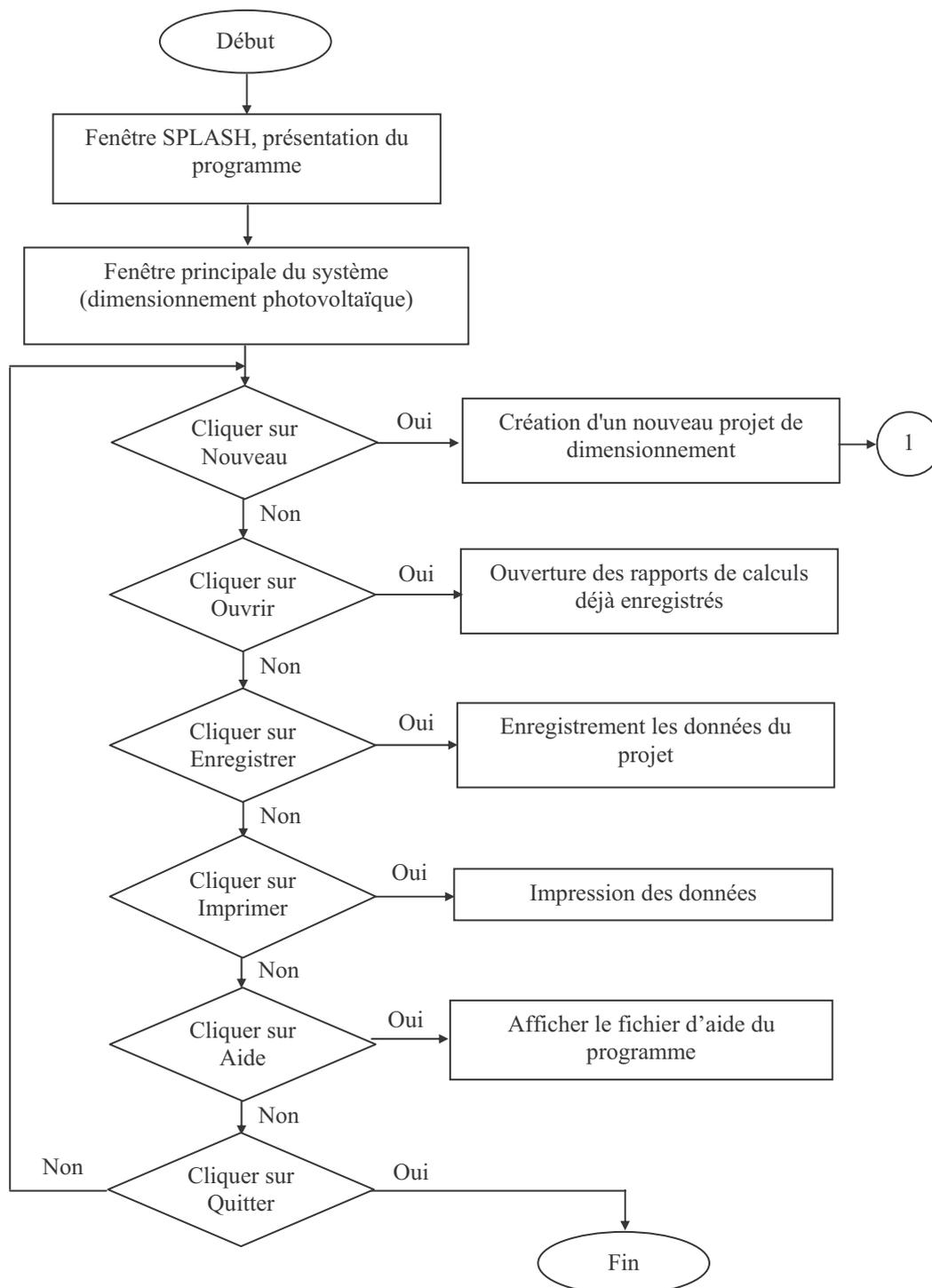
- Détermination du nombre total d'éléments batterie (*élément*) :

$$N_b = N_{bp} \cdot N_{bs} \quad (5.15)$$

### 5.3. Réalisation d'un programme de dimensionnement

#### 5.3.1. Organigramme général du programme

L'organigramme général (*figure.5.1*) représentant les fonctions du programme réalisé 'DIM\_PV\_CCP' est décrit comme suit:



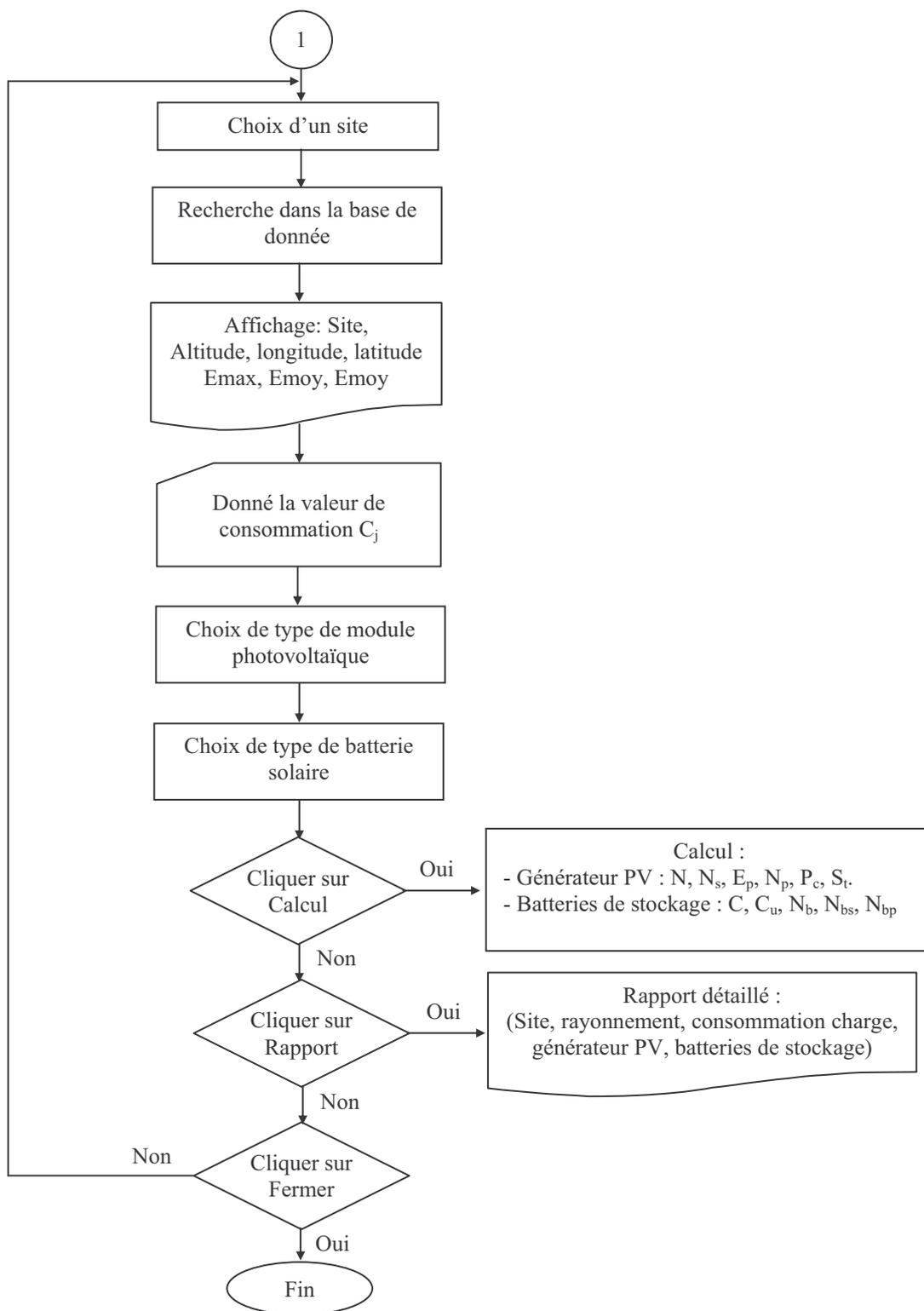


Figure.5.1. Organigramme général du programme 'DIM\_PV\_CCP'.

### 5.3.2. Présentation du programme

Le programme 'DIM\_PV\_CCP' a pour but la réalisation du dimensionnement des accessoires du concentrateur solaire cylindro-parabolique.

#### 5.3.2.1. Feuille de présentation

Comme tous les programmes visuels, le programme 'DIM\_PV\_CCP' commence par une fenêtre de présentation générale (figure.5.2) qui s'affiche juste après le lancement de l'exécution. Cette fenêtre présente l'auteur et la version du programme.



Figure.5.2. Représentation de la feuille initiale du programme.

#### 5.3.2.2. Feuille principale 'Dimensionnement photovoltaïque'

C'est une fenêtre qui contient une barre d'outils principale, chaque bouton et icône possède une action spécifique (figure.5.3). Cette fenêtre permet également d'introduire les données d'un nouveau projet à dimensionner ou d'ouvrir un projet existant.

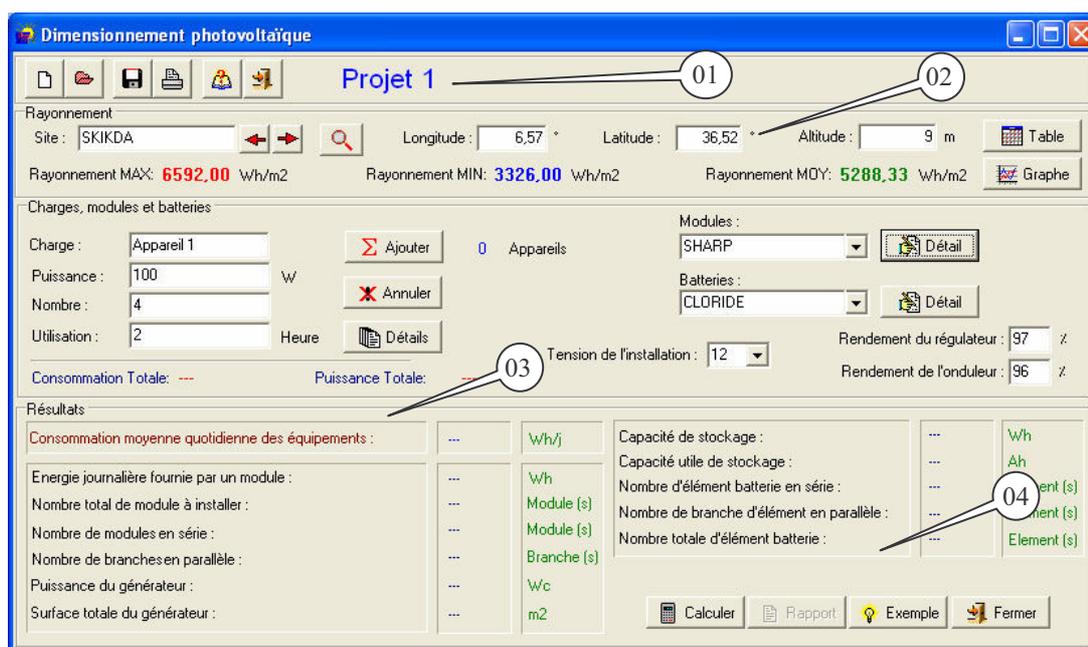


Figure.5.3. Fenêtre principale de dimensionnement.

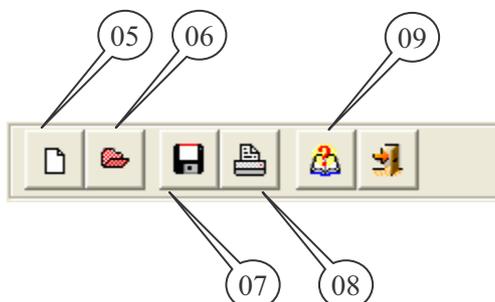
### a). Description du programme

Cette fenêtre contient quatre zones de travail :

- (1) : C'est la zone du menu principal du programme;
- (2) : Cette zone est consacrée au rayonnement solaire: recherche et choix d'un site, consultation des données et visualisation graphique et numérique;
- (3) : Réservée pour la saisie des entrées et des paramètres nécessaires pour le calcul du générateur et de la batterie de stockage, cette opération est dédiée à l'utilisateur;
- (4) : C'est la partie concernant l'affichage des résultats calculés par le programme.

### b). Barre de menu principal

Le menu principal de cette fenêtre contient les boutons suivants :



- 05 Le bouton 'Nouveau' permet de créer un nouveau projet de dimensionnement;
- 06 Le bouton 'Ouvrir' permet d'ouvrir la fenêtre 'Ouvrir' à fin de consulter des rapports de calculs déjà établis et enregistrés ou les fichiers des entrées sauvegardées ;
- 07 Le bouton 'Enregistrer' permet d'ouvrir la fenêtre 'Enregistrer' permettant l'enregistrement des données relatives au système;
- 08 Le bouton 'Imprimer' permet d'ouvrir la fenêtre 'Impression' et la configuration des imprimantes;
- 09 Le bouton 'Aide' permet de consulter la rubrique 'Aide' et de donner des informations concernant l'application;
- 10 Le bouton 'Quitter' permet la fin d'exécution.

### 5.2.2.3. Fenêtre 'Nouveau'

Dans cette fenêtre (*figure.5.4*) l'utilisateur donne le nom du projet à dimensionner, pour afficher cette fenêtre cliquez sur le bouton  de la fenêtre principale.

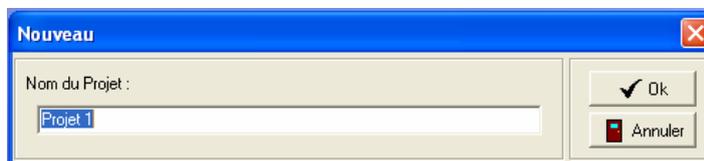


Figure.5.4. Fenêtre 'Nouveau' du programme.

### 5.2.2.4. Fenêtre 'Ouvrir'

Dans cette fenêtre (*figure.5.5*) l'utilisateur a le choix d'ouvrir soit un rapport de calcul déjà enregistré soit un fichier concernant les données d'entrées d'un projet à dimensionner, pour afficher cette fenêtre cliquez sur le bouton  de la fenêtre principale.

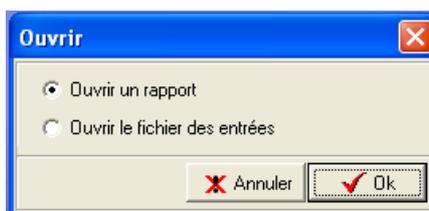


Figure.5.5. Représentation de la fenêtre 'Ouvrir' du programme.

### 5.2.2.5. Fenêtre 'Recherche'

Cette fenêtre (*figure.5.6*) rend la recherche d'un site plus facile en écrivant ces initiales dans la zone de texte, en cliquant sur le bouton 'valider' de la fenêtre en cours le choix est enregistré et l'affichage des valeurs du rayonnement minimal, maximal, et moyen est effectué. Pour afficher cette fenêtre cliquez sur le bouton  de la fenêtre principale.



Figure.5.6. Fenêtre de recherche.

### 5.2.2.6. Fenêtre 'Données du rayonnement solaire'

Cette fenêtre (figure.5.7) contient des boutons simple et utiles, on peut les utilisés pour accéder aux données de rayonnement solaire se trouvant dans une base de données, On a la possibilité d'ajouter, de supprimer ou de modifier les données du rayonnement solaire de chaque site, le bouton 'Enregistrer' sert à sauvegarder les nouvelles informations saisîtes, le bouton 'annuler' c'est pour abandonner les modifications.

Pour afficher cette fenêtre cliquez sur le bouton  Table de la feuille principale.

Données de rayonnement solaire (ALGER)												
SITE	IG_JAN	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Aout	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre
BERKA	3644	4726	5662	5780	6070	6078	6592	6534	6200	5042	3806	3326
ANNABA	3230	4438	5132	5272	5706	5684	6254	6164	5440	4556	3454	2842
BECHAR	3650	4050	4664	5046	5660	5350	5964	7386	6220	5444	4450	3522
ALGER	3706	4802	5560	5786	6182	5988	6266	6434	6050	5006	3878	3488
BLIDA	4226	4382	4932	5728	6334	6140	6858	6918	6384	5018	4928	4172
CONSTANTINE	3856	4174	5782	5824	6304	6214	6724	6724	6284	5218	3946	3498
SETIF	4494	5728	6160	6422	6762	6394	7024	6878	6568	5546	4528	4114
BOUJ	4306	4982	5196	5552	6016	6022	6356	6286	6060	5020	4256	3658
ORAN	4058	4702	5854	5946	6108	5912	6390	6430	5998	5302	4066	3780
BATNA	4728	5210	5782	6012	6570	6734	7092	7058	6520	5856	5516	4610
TERENSA	4352	4932	5476	5642	6358	6316	6570	6736	6082	5490	5112	3918
SIDI BELABES	4096	4614	5886	6024	6198	5908	6300	6286	5510	4976	4562	3782
TIEMLEN	5054	5006	5232	5822	6244	6204	6616	6736	6256	5794	4910	4810

Figure.5.7. Fenêtre 'Données de rayonnement solaire'.

### 5.2.2.7. Fenêtre 'Graphes du rayonnement solaire'

Cette fenêtre (figure.5.8) permet l'affichage graphique des valeurs de rayonnement solaire pour chaque site choisi, Pour afficher cette fenêtre cliquez sur le bouton  Graphe.

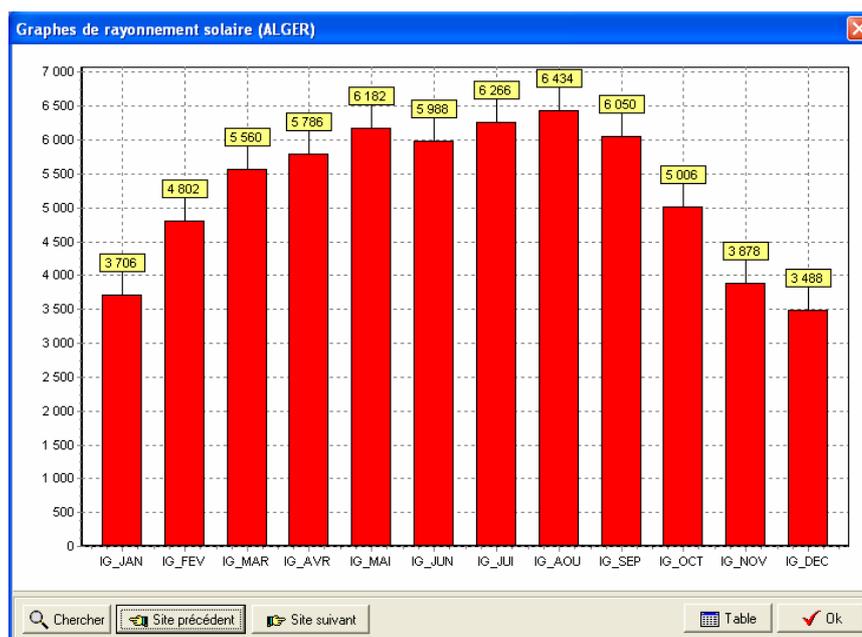
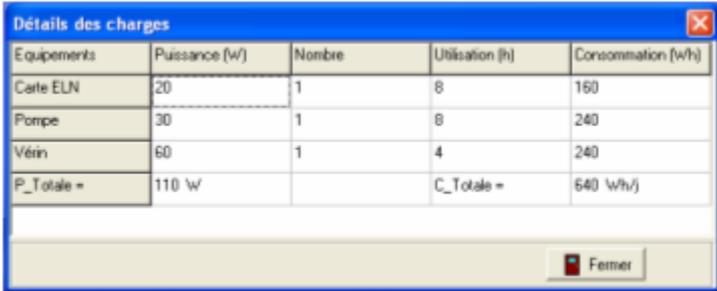


Figure.5.8. Fenêtre 'Graphes de rayonnement solaire'.

### 5.2.2.8. Fenêtre 'Détails des charges'

Cette fenêtre (*figure.5.9*), comme son nom l'indique, permet de donner des détails des charges choisîtes, leurs consommations et utilisation par jour, elle permet également un calcul de la puissance totale consommée des charges.

Pour afficher cette fenêtre cliquez sur le bouton  de la feuille principale.



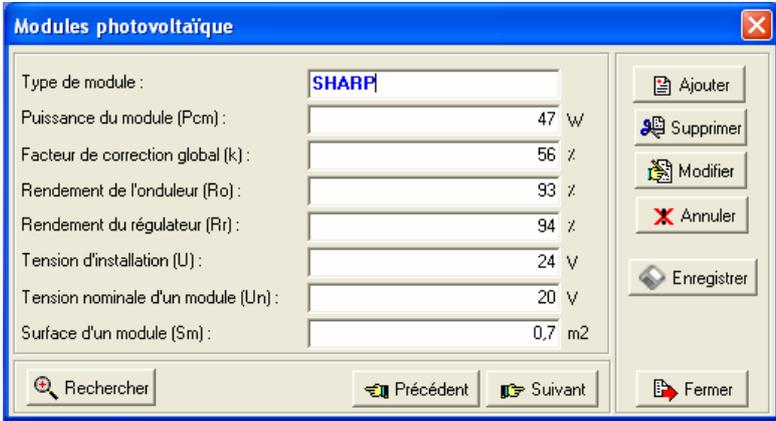
Equipements	Puissance (W)	Nombre	Utilisation (h)	Consommation (Wh)
Carte ELN	20	1	8	160
Pompe	30	1	8	240
Véin	60	1	4	240
P_Totale =	110 W		C_Totale =	640 Wh/j

*Figure.5.9. Fenêtre 'Détails des charges'.*

### 5.2.2.9. Fenêtre 'Module photovoltaïque'

Les fonctions de cette fenêtre (*figure.5.10*) sont simples, on a la possibilité d'ajouter, de supprimer ou de modifier les données concernant des modules photovoltaïques.

Pour afficher cette fenêtre cliquez sur le bouton  de la feuille principale.



*Figure.5.10. Fenêtre 'Module photovoltaïque'.*

Le bouton  de cette fenêtre permet d'afficher la fenêtre de *figure.5.11* qui à permet la recherche d'un type de module qu'on peut utiliser pour le dimensionnement.



*Figure.5.11. Fenêtre 'Rechercher un module'.*

### 5.2.2.10. Fenêtre 'Batteries solaires'

Cette fenêtre (*figure.5.12*) permet la recherche d'un type de batterie solaire; l'ajout, la modification et la suppression de données est également possible dans ce cas.

Pour afficher cette fenêtre cliquez sur le bouton  de la fenêtre principale.



Figure.5.12. Fenêtre 'Batteries solaires'.

### 5.2.2.11. Fenêtre 'Rapport de dimensionnement'

Le rapport (*figure.5.13*) est une page de format A4 représentant tous les paramètres des entrées et les résultats de calcul obtenus, cette fenêtre permet d'afficher les informations suivantes:

- Le site choisit pour l'exécution du projet;
- Affichage sous forme de graphe des valeurs de rayonnement solaire;
- La puissance exigée par la charge sur laquelle est basé le dimensionnement;
- Le nombre de module à installer;
- La capacité de stockage requise et le nombre d'éléments batteries nécessaire.

Pour afficher cette fenêtre cliquez sur le bouton  de la fenêtre principale.

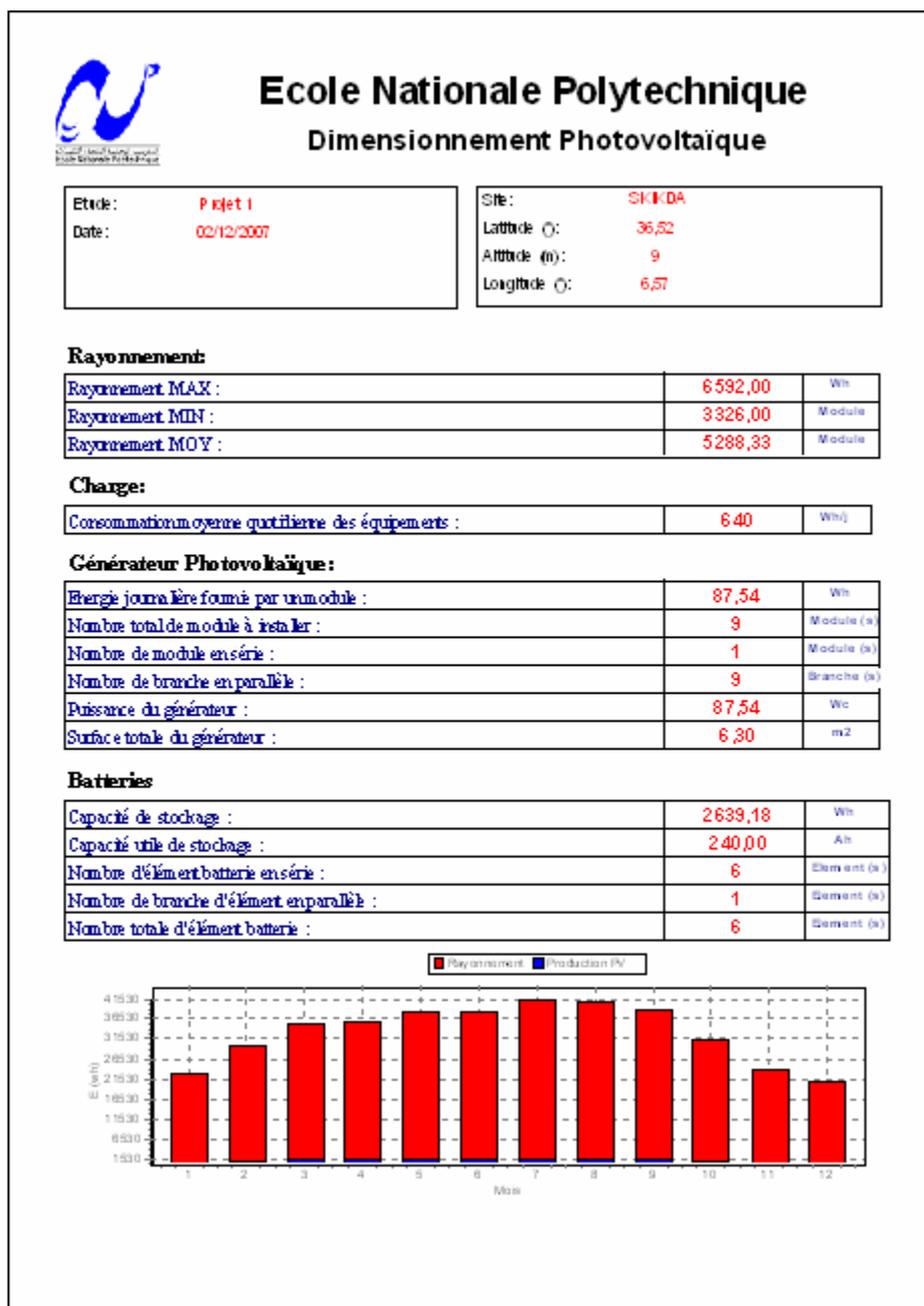


Figure.5.13. Fenêtre 'Rapport de dimensionnement'.

### 5.3.3. Principe d'utilisation du programme

Le programme 'DIM\_PV\_CCP' est un programme de calcul simple à utilisation, d'une manière générale il faut saisir les données d'entrées qui permettront au programme d'effectuer les calculs du générateur et du stockage dont il affichera par la suite un rapport complet des résultats trouvés, pour faciliter la manipulation du programme réalisé, l'utilisateur peut suivre les étapes suivantes :

· Afficher la fenêtre de la *figure.5.4* à partir de bouton  de la fenêtre principale, puis donner un nom au projet, l'utilisateur entre le nom du projet à titre de référence seulement, en appuyant sur le bouton 'Ok' de cette feuille le nom choisi est automatiquement copié dans la feuille de calcul;

· Choisir un nom du site d'exécution du projet soit à partir des flèches défilantes  

où à partir de bouton  de la fenêtre en cours, les paramètres du site (altitudes, longitude, latitude, rayonnement minimal, maximal et moyen) seront automatiquement affichés. L'accès aux données et aux graphes du rayonnement solaire est également possible à partir des boutons  Table  Graphe de cette fenêtre;

· Passer à la partie '*Charges, modules et batteries*' de cette fenêtre et choisir la puissance, le nombre et l'utilisation par jour de la charge, le programme calculera sa consommation quotidienne *en (Wh/j)*, si vous avez plusieurs appareils vous pouvez les ajoutés en appuyant

chaque fois sur , le programme additionnera la consommation de ces charges, un détail des charges introduites vous est donné sur une table en appuyant sur le bouton  ;

· Choisissez le type de module que vous souhaiteriez utiliser pour le dimensionnement, vous pouvez ajouter d'autres modules en affichant la fenêtre de la *figure.5.10* à partir du bouton

 ;

Ensuite choisir le type d'élément batterie parmi la liste proposée par le programme ou en ajoutant un type bien définit. La tension de l'installation doit être également introduite;

· Une fois les données d'entrées sont introduites vous pouvez les enregistrées sur un fichier,

pour cela il suffit d'appuyer sur le bouton . Finalement en appuyant sur 

vous aurez le calcul du générateur et du stockage affichés sur la partie '*Résultats*' de la fenêtre principale, le programme donnera le nombre total de module à installer ainsi que la puissance et la surface du générateur, la capacité de stockage est également calculée ainsi que le nombre d'éléments batteries. Un rapport détaillé est établi par le programme à la fin de chaque calcul,

il est affichable en appuyant sur le bouton , ce rapport est sous format A4 qui est également imprimable.

· Le programme est accompagné de certaines fonctions permettant de faciliter son utilisation tell que l'exemple de dimensionnement associé au programme et affichable à partir du bouton

 Exemple, des rapports de calculs tous faits sont également enregistrés et accessibles en affichant le fenêtre ouvrir à partir de bouton , un fichier d'aide est associé au programme et accessible en cliquant sur le bouton .

## 5.4. Dimensionnement des accessoires du concentrateur

Nous passons maintenant au dimensionnement du générateur PV et de la batterie du stockage pour les accessoires du concentrateur solaire cylindro-parabolique de notre réalisation, pour cela nous allons lancer l'exécution du programme et introduire les données relatives aux accessoires utilisés, ensuite on recueillera les résultats au niveau du programme.

### 5.4.1. Données d'entrée du dimensionnement

Considérons le concentrateur cylindro-parabolique réalisé, ses accessoires travaillant sous une tension de 24V et implanté dans la région de Ghardaïa située au Sud d'Alger, sous une latitude  $32.23^\circ$  et un éclairement journalier minimal de  $5,038 \text{ kWh/m}^2$  (figure.5.14) pour le mois de novembre et avec une inclinaison des modules égale à la latitude.

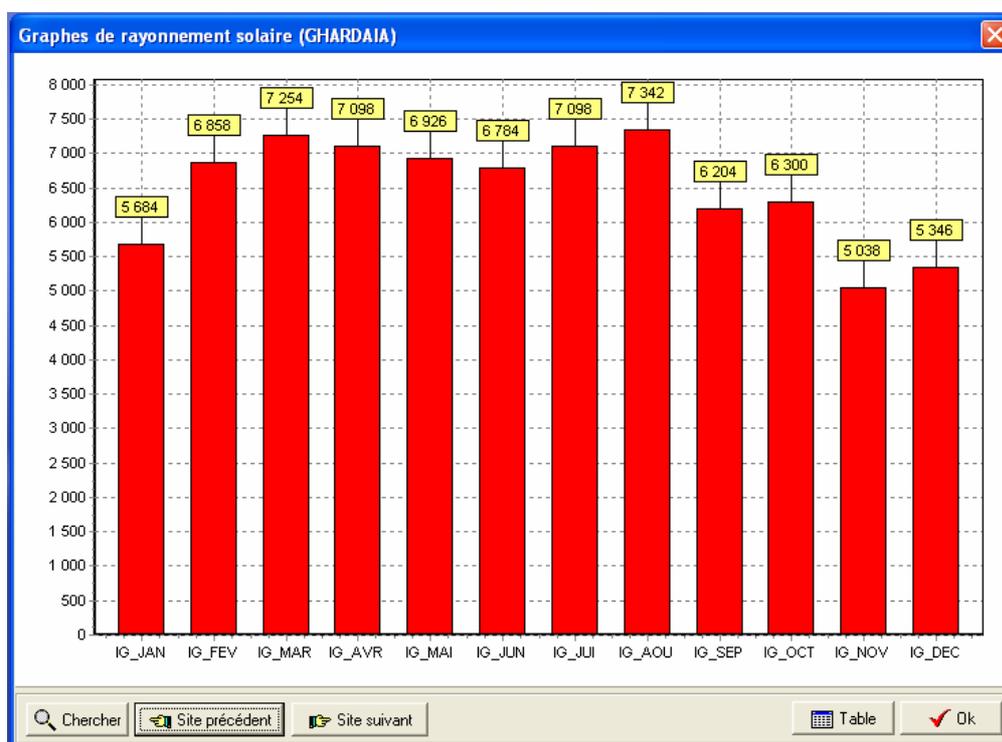


Figure.5.14. Rayonnement solaire pour la ville de Ghardaïa.

Les charges utilisées sont :

- Une pompe de circulation du fluide caloporteur d'une puissance de 30W fonctionnant durant toute la demi-journée (8 heures);

- Un vérin électrique commandé qui consomme 75W et qui fonctionne durant des intervalles de temps estimés à 1h par jour.
- Une carte électronique consommant 10W et fonctionnant toute la demi-journée (8 heures);  
La consommation totale des charges s'élèvera donc à 395Wh/jour.

Un détail des charges utilisées est donné sur la *figure.5.16* :

Equipements	Puissance [W]	Nombre	Utilisation (h)	Consommation [Wh]
Pompe	30	1	8	240
Vérin	75	1	1	75
Carte ELN	10	1	8	80
			Totale =	395

*Figure.5.15. Consommation des charges utilisées.*

Les modules utilisés sont de type SHARP sur lesquels on peut lire les informations suivantes : [51]

- Puissance du module:  $P_{cm} = 47 \text{ W}$  ;
- Tension nominale d'un module:  $U_n = 20 \text{ V}$  ;
- Surface d'un module:  $S_m = 0,7 \text{ m}^2$ ;
- Rendement du module  $R_m = 14\%$  ;

Nous avons choisi les batteries de type CLORIDE dont les caractéristiques sont les suivantes : [52]

- Profondeur de décharge:  $P_f = 50 \%$ ;
- Rendement de la batterie:  $R_b = 97 \%$ ;
- Tension de l'élément batterie:  $U_b = 2 \text{ V}$ ;
- Capacité d'un élément batterie:  $C_e = 2000 \text{ Ah}$ ;

#### 5.4.2. Résultats du dimensionnement

En tenant compte d'un nombre de jours d'autonomie  $N_j = 2$  et d'un facteur de correction global  $k = 56\%$  et en prenant le rendement de l'onduleur  $R_o = 93\%$  et le rendement du régulateur  $R_r = 94\%$  on aura comme résultats:

Pour le générateur photovoltaïque :

- Energie journalière fournie par un module  $E_p = 132,60 \text{ Wh}$ :
- Nombre total de module à installer  $N = 4$  modules
- Nombre de module en série  $N_s = 2$  modules
- Nombre de branches en parallèle  $N_p = 2$  branches
- Puissance du générateur  $P_c = 188 \text{ Wc}$

- Surface totale du générateur  $St = 2,80 \text{ m}^2$   
Pour la batterie de stockage :
- Capacité de stockage  $C = 1628,87 \text{ Wh}$
- Capacité utile de stockage  $Cu = 67,87 \text{ Ah}$
- Nombre d'éléments batterie en série  $Nbs = 12$  éléments
- Nombre de branches d'élément en parallèle  $Nbp = 1$  élément
- Nombre total d'éléments batterie  $Nb = 12$  éléments

### 5.4.3. Comparaison avec d'autres logiciels

Afin de valider notre programme nous allons comparer les résultats obtenus avec ceux d'un autre logiciel, on a choisi pour cela le logiciel 'RETscreen' qui est très connu, il se présente sous forme de fichier Excel, pour; exactement, les même données d'entrées et pour la ville de Ghardaïa nous avons obtenus les résultats suivants :

	DIM_PV_CCP	RETSCREEN
Nombre des modules	4	5
Surface de générateur PV ( $\text{m}^2$ )	2.8	2.2
Puissance du générateur	188	200
Energie journalière fournie	132.6	155
Nombre des Batteries	12	12
Capacité de stockage (Wh)	1628,87	2000
Capacité utile de stockage (Ah)	67,87	74

## 5.5. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté une méthode de dimensionnement simple et efficace pour le dimensionnement du générateur photovoltaïque pour l'alimentation des accessoires de notre système, utilisant Delphi 5 nous avons réalisé un programme de dimensionnement tenant compte des données de rayonnement pour plusieurs sites en Algérie. Le programme réalisé nous a permis de dimensionner le système photovoltaïque qui couvrira la charge des accessoires liés au concentrateur cylindro-parabolique.

## CONCLUSION GENERALE

Dans le domaine de l'électricité solaire, il semble que la technologie des concentrateurs cylindro-paraboliques soit la plus économique et la plus robuste. Nous nous sommes proposés dans ce travail de faire l'étude et la réalisation pratique d'un tel concentrateur ayant une ouverture de 4 m<sup>2</sup> et muni d'un système de poursuite solaire.

Après une étude bibliographique sur le sujet, et l'analyse de la documentation, des équipements à utiliser, nous avons effectué le dimensionnement de la courbe parabolique du concentrateur cylindro-parabolique suivie d'une simulation de son fonctionnement utilisant le logiciel TRNSYS, en tenant compte de l'effet du rayonnement solaire, la simulation a bien révélé le fonctionnement de ce genre de système.

Dans la partie principale de notre travail, nous avons procédé à la réalisation du système notamment la structure porteuse du concentrateur cylindro-parabolique, le système à foyer comportant le fluide caloporteur et le système de vérin dédié à la poursuite solaire. Ensuite nous avons réalisé des tests sur le concentrateur dans un état stationnaire et ceci pour plusieurs valeurs de débit. Nous avons alors remarqué que la température de sortie du fluide caloporteur ne dépasse pas les 100°C, car le fluide utilisé est de l'eau.

La partie suivante du projet concerne le système de poursuite solaire. Dans ce cadre nous avons réalisé deux sortes de système: le système de poursuite aveugle et le système de poursuite sensible. Nous avons vu que pour une poursuite solaire aveugle il faut utiliser un logiciel qui pilotera le prototype. Nous avons élaboré ce logiciel ainsi qu'une carte associée et liée au port parallèle pour permettre la commande du vérin électrique. Nous avons également vu que l'acquisition de certaines données était nécessaire et pour cela nous avons utilisé une unité d'acquisition de donnée et un programme de décodage. Le logiciel conçu se chargera de faire l'acquisition et le traitement des données et établir la commande du vérin. Pour la poursuite solaire sensible, il était nécessaire de réaliser une carte électronique à base d'un microcontrôleur et une lunette, la carte électronique remplaçant d'une part l'unité d'acquisition et d'autre part le micro processeur du PC pour faire le traitement et la commande du vérin. Finalement on obtient un système autonome très souple à l'utiliser. Durant cette partie nous avons compris que la maîtrise des fonctions d'acquisition, de décodage, de traitement et de sauvegarde de données a une très grande importance pour le bon fonctionnement du système.

Enfin des tests ont également été effectués sur le système avec les deux types de poursuite, la poursuite solaire sensible avant prouvée sa meilleure efficacité sur plusieurs plans.

La dernière étape concerne la partie photovoltaïque utilisée pour l'alimentation des accessoires du concentrateur et le programme développé à cet effet. Il est à noter que le côté hybride du projet concerne uniquement l'alimentation des accessoires associés au concentrateur tels que la pompe de circulation et le système de poursuite solaire, la source d'énergie qui est le soleil étant commune au thermique et au photovoltaïque.

Cette étude nous a permis d'atteindre les objectifs suivants :

- L'acquisition d'une maîtrise de la construction des concentrateurs et des différents éléments les constituants;
- L'utilisation des systèmes de poursuite solaire aveugles et sensibles et la comparaison entre les deux types par le biais des tests réalisés;
- L'établissement du bilan thermique du concentrateur solaire cylindro-parabolique.

Dans la perspective d'une meilleure maîtrise des concentrateurs solaire cylindro-parabolique on se propose que ce travail soit complété notamment par l'association d'un moteur STIRLING lié à une génératrice pour la production de l'électricité et l'utilisation d'une huile de synthèse comme fluide caloporteur.

Ce travail a été le sujet des communications suivantes :

1. Congrès International sur les Energies Renouvelables et l'Environnement 6-8 Novembre, 2006, Mhdia, Tunisie.
2. ICRESO\_07,21-24 Mai 2007 Tlemcen.
3. CER2007, 4 et 5 mai 2007, Ouajda Maroc.
4. Congrès International Energie et Environnement, 19-20 Octobre 2007, Agadir Maroc.

## BIBLIOGRAPHIE

- [1] : A.FERRIERE, Les centrales solaires thermodynamiques: l'état de l'art et les perspectives mondiales, Colloque de l'Institut ENSAM de Corse, Bastia, mars 2005.
- [2] : Site Internet : <http://www.Planete-energies.com>, 2007.
- [3] : Site Internet : <http://www.futura-sciences.com/>, 2007.
- [4] : R.Bernard, G. Menguy, M. Schwartz, Le rayonnement solaire, Conversion thermique et applications, Technique & documentation LAVOISIER, France, 250 pages, 1983.
- [5] : J. BENEMANN, Status Report on Solar Trough Power Plant, Pilkington Solar International GmbH, Germany, 1996.
- [6] : Rapport, Concentrating Solar Power for the Mediterranean Region, Germany Aerospace Center (DLR), Germany, A-4, 2005.
- [7] : M.Geyer, Report on the SolarPACES, START Mission to Algeria, IEA SolarPACES, USA, 2003.
- [8] : K. Ogilvie, L'abc des technologies de l'énergie renouvelable, Pollution Probe, Canada, septembre 2003.
- [9] : A. Labouret, Energie solaire photovoltaïque, DUNOD, France, 302 pages, 2003.
- [10] : Y. Jautard, T. Boudol, L'électricité photovoltaïque, AME, France, Mai 2000.
- [11] : Site Internet : <http://www.cipcsp.com/pages/053.html>, 2007.
- [12] : Document, Introduction aux systèmes photovoltaïques, RETScreen, Canada, 2001.
- [13] : Document, Informations techniques sur le photovoltaïque, BPSolar, France, 2000.
- [14] : B.Rivoire, Le solaire thermodynamique, CNRS, France, avril 2002.
- [15] : A. Khedim, L'énergie solaire utilisation thermique et photovoltaïque, ANEP, Algérie, 359 pages, 2005.
- [16] : A.Ferriere, G.Flamant, Captation, transformation et conversion de l'énergie solaire par les technologies à concentration, *IMP-CNRS, Centre du Four Solaire*,
- [17] : S. Bonnet, Moteurs thermiques à apport de chaleur externe : étude d'un moteur STIRLING et d'un moteur ERICSSON, Thèse doctorat, Université de pau et des pays de l'adour, 2005.
- [18] : Site Internet : <http://www.solarpaces.org>, 2007.
- [19] : John A. Duffie & William A.Beckman, Solar Engineering of Thermal processes, 2<sup>nd</sup> Edition, John Wiley & sons inc, New York, 916 pages, 1991.
- [20] : J-M. Chasseriau, Conversion thermique du rayonnement solaire, Dunod, France, 273 pages, 1984.

- [21] : W. Chekirou & all, Analyse thermique pour l'absorbeur d'un concentrateur solaire cylindro-parabolique, 12<sup>ème</sup> journées internationales de thermique, Maroc, 2005.
- [22] : M. Li & L.L. Wang, Investigation of evacuated tube heated by solar trough concentrating system, Energy conversion & Management, Avril 2006.
- [23]: P. Roth, A. Georgiev, H. Boudinov, Design and construction of a system for sun-tracking, Renewable Energy, N 29, pages 393-402, June 2003.
- [24] : M. Capderou, Atlas solaire d'Algérie, Tome 1, Volume 1, EPAU, Algérie, 375 pages, 1987.
- [25] : R. LEUTZ & all, Reverse ray-tracing model for the performance evaluation of stationary solar concentrators, Solar Energy, N 81, pages 761-767 juin 2007.
- [26] : Document, TRNSYS 14.2 The transient system simulation program, SEL University of Wisconsin-Madison, USA, 1997.
- [27] : S. Balac, Débuter avec matlab, INSA de Lyon, France, 2001.
- [29] : J. Schmitt, Automate de gestion d'aquarium marin, document, France, Novembre 2002.
- [30] : Site Internet : [http://perso.wanadoo.fr/bernard.dalstein/K2\\_porttalk.html](http://perso.wanadoo.fr/bernard.dalstein/K2_porttalk.html)
- [31] : I. Palavras, G.C. Bakos, Development of a low-cost dish solar concentrator and its application in zeolite desorption, Renewable Energy, N 31, pages 2422-2431 Jan 2006.
- [32] : F.R. Rubio & all, Application of new control strategy for sun tracking, Energy conversion & Management, 24 décembre 2006.
- [33] : G. Asch, Acquisition de données / Du capteur a l'ordinateur, Dunod, France, 515 pages, Février 2003.
- [34] : S. Leibson traduit par M. Jacoub, Manuel des Interfaces, McGRAW-HILL, France, 269 pages, 1984.
- [35] : J. Ögren, The Hardware Book, WinHelp, 1997.
- [36]: Site Internet: <http://www.laissus.fr/cours/node6.html>, 2005.
- [37]: Site Internet: <http://sebsauvage.net/comprendre/tcpip/index.html>, 2007.
- [38]: Site Internet: <http://www.commentcamarche.net/>, 2007.
- [39]: S. Henry, Y. HIROU, FTP (File Transfer Protocol), Exposé, l'Ecole des Mines de Nancy, France, 1997.
- [40] : Recknagel & all, Manuel pratique du génie climatique, PYC Edition, France, 760 pages, Janvier 1995.
- [41] : G. Asch, Les capteurs en instrumentation industrielle, Dunod, France, 852 pages, 1982.
- [42] : Manuel d'utilisation du LPD 12III, Bedienungshandbuch LSB36III-LPD12III, Linseis, Germany, 90 Pages, 1995.

- [43] : Site Internet: <http://www.iut-lannion.fr/LEMEN/MPDOC/NTPF2/SERIE1/therrath.htm>.  
2007.
- [45]: P. Roth, A. Georgiev, H. Boudinov, Cheap two axis sun following device, Energy conversion & Management, N 46, 1179-1192, 25 Août 2004.
- [46] : Site Internet: <http://www.ic-prog.com/>, 2000.
- [47] : Site Internet: <http://www.propic2.com/>, 1990.
- [48] : Site Internet: <http://www.cipcsp.com/tutorial/dimensionnement-solaire.html>, 2007.
- [49]: T. Markvart, A. Fragaki, J.N. Ross, PV system sizing using observed time series of solar radiation, Solar Energy, N 80, pages 46-50, 8 Août 2005.
- [50] : Site Internet: <http://www.retscreen.net/>, 2007.
- [51] : Site Internet: [http://www.sharp.fr/produits/modules\\_photovoltaiques/ne80e2e.html](http://www.sharp.fr/produits/modules_photovoltaiques/ne80e2e.html),  
2003.
- [52] : Site Internet: <http://www.oldham.ca/vw/fs/p001.html>, 2005.