

République Algérienne Démocratique Et Populaire  
Ministère de L'enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique  
Université de -BLIDA 1-  
Faculté De Technologie  
**Département Des Energies Renouvelables**



**Mémoire présenté pour l'obtention du diplôme du Master**

**Option : Conversion Photovoltaïque**

Thème

**Etude et réalisation d'un pyrhéliomètre à base d'une cellule triple jonctions.**

Par : DOUIFI Meriem Ihssane.

MOKRANE Mazigh.

Soutenu devant le jury composé par :

Monsieur	BENAHMED.A	MCB	USDB1	Président
Monsieur	DOUMAZ.T	MAA	USDB1	Examineur
Monsieur	SAID.N	Professeur	USDB1	Encadreur
Monsieur	CHEKNANE.B	Professeur	USDB1	Co- Encadreur

**Juillet 2023**



# Remerciement

الحمد لله وكفى وصلى الله على الحبيب المصطفى

Nous remercions tout d'abord, Allah qui nous a donné la force et le courage de terminer nos études et élaborer ce modeste travail.

On adresse nos remerciements à notre professeur et notre encadreur Pr SAID Noureddine qui nous a donné « the Golden Opportunity » pour faire ce mémoire et qui nous a beaucoup aidé dans notre recherche de stage et nous a permis de postuler dans ce centre. Son écoute et ses conseils nous ont permis de cibler nos candidatures, et de trouver ce stage qui était en totale adéquation avec nos attentes. Merci pour vos précieux conseils et vos compétences techniques, vos encouragements, vos orientations. Merci pour votre gentillesse, et votre aide qui nous a permis de finaliser ce travail. Merci pour votre contribution que nous a permis de l'accomplir.

Nous remercions également notre Co-promoteur Pr CHEKNANE Benamar pour nous avoir accueillis chaleureusement dans son équipe du laboratoire et son aide.

On tient à remercier aussi notre chef d'option Mr DOUMAZ Toufik pour son aide, sa gentillesse, pour tout le matériel fourni pour élaborer notre travail, pour tous ses conseils, son encouragement et aussi d'avoir suivi alternativement et activement la progression de notre travail.

Nos remerciements sont dédiés aussi à notre chef de département Dr BOUZAKI Mohammed Moustafa pour son aide dans la simulation numérique, son soutien moral et pour faciliter les papiers administratifs pour notre stage.

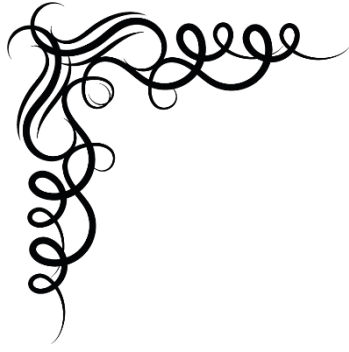
On exprime notre gratitude à notre maitre du TP Mme KACIMI Yasmine pour son soutien moral, ses conseils et son aide durant la période du stage.

Notre stage a été effectué à l'UDES, On tient à remercier vivement notre maitre de stage Dr KELLIL Nouamane pour son accueil, le temps passé ensemble et le partage de son expertise au quotidien. On remercie également toute l'équipe pour leur accueil, Leur esprit d'équipe et en particulier : Dr ABBAS Mohammed, Dr BELGROUN Zoubir, Dr BENDJEBBAS Hichem, Dr AYAD Mohammed et Dr MEFLAH Walid qui nous a beaucoup aidés à comprendre tous les phénomènes et les expériences et nous ont donné toutes les informations nécessaires, merci énormément.

Nous remercions tous les membres du jury d'examiner ce travail et de l'évaluer.

Enfin, nous remercions, également, toute personne qui a participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

DOUIFI Meriem Ihssane & MOKRANE Mazigh.



## Dédicace

الحمد لله الذي بنعمته تتم الصالحات

Tous les mots ne sauraient exprimer la gratitude, l'amour, le respect et la reconnaissance, qu'avec un énorme plaisir, un cœur ouvert et immense joie, que je dédie ce mémoire de Master :

A mes chères parents « mon père et ma mère » : mon exemple éternel, mon soutien moral et source de joie, source de mes efforts, mon bonheur et ma vie, rien au monde ne vaut les efforts fournis jour et nuit pour mon éducation et mon bien-être, Merci pour tout. J'espère que vous êtes tout simplement fiers de moi ;

A mes chers frères : Imad Eddine et Ayoub ;

A ma chère petite sœur : Zineb ;

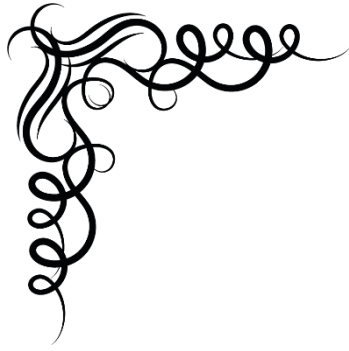
A toute ma famille paternelle et maternelle ;

A tous mes camarades de ma promotion ;

A tous les enseignants depuis la première année, leurs générosités et leurs soutiens m'obligent de leurs témoigner mon respect et ma loyale considération.

*DOUIFI Meriem Ihssane.*





## Dédicace

**Je dédie ce modeste travail :**

**A mes chers parents à qui je dois ce que je suis et qui m'ont tout donné sans rien en retour.**

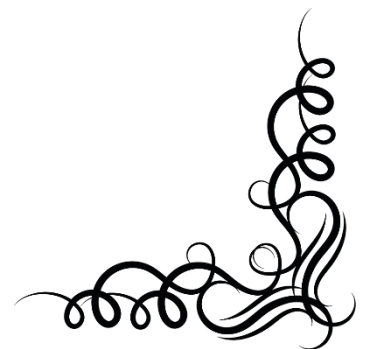
**A toute ma famille , Que dieu leur préserve longue vie**

**A tous mes amis ainsi qu'à tous ceux qui me sont chers**

**Et surtout pour Touta qui nous a beaucoup aidé dans notre parcours pour concrétiser cette idée.**

**Que ce travail soit le témoignage sincère et affectueux De ma profonde reconnaissance pour tout ce que vous avez Fait pour moi**

*Mazigh.*





## ملخص

يهدف المشروع المقترح إلى دراسة وتطوير جهاز قياس الإشعاع الشمسي المباشر بناءً على خلية ثلاثية الوصلات. يتكون الجهاز من مركز تركيز بالانكسار من نوع عدسة فريزل، وخلية ثلاثية الوصلات مزودة بوحدة تركيز ثانوي، ونظام تعقب الشمس ثنائي المحاور ووحدة تبريد.

توفر هذه التركيبة ثلاثة مزايا مقارنةً بجهاز قياس الإشعاع المباشر التقليدي: تكلفة منخفضة نسبياً، وقدرتها على قياس الإشعاع الشمسي المباشر فقط وتغطية تقريبية لكامل الطيف الضوئي.

يكرس الجزء الأول من الدراسة لتصميم وتنفيذ وتجميع الوحدة. يتم وصف وتقييم أداء كل مكون في الجهاز. يهدف الجزء الثاني إلى معايرة جهاز القياس المقترح في محطة القياس الإشعاعية بمركز تطوير الأجهزة الشمسية. تضيف النتائج الأصالة والمصادقية على هذا المشروع.

### **الكلمات المفتاحية:**

جهاز قياس سطوع الإشعاع المباشر، الإشعاع الشمسي المباشر، البرمجة، خلية شمسية ثلاثية الوصلات، تركيب قطبي، جهاز تعقب.

## Résumé :

Le projet proposé a pour objectif l'étude et la réalisation d'un pyrhéliomètre à base d'une cellule triple jonctions destiné à la mesure de l'éclairement direct. Le dispositif est constitué d'un concentrateur à réfraction de type lentille de Fresnel, d'une cellule triple jonctions munie d'un réfracteur secondaire (homogénéiseur), d'un refroidisseur passif à ailettes et d'un dispositif de suivi à deux axes.

Cette configuration offre trois avantages par rapport à un pyrhéliomètre classique : le cout relativement bas, le fait de mesurer exclusivement la composante directe du rayonnement et la couverture de presque tout le spectre lumineux.

La première partie de l'étude est consacré à la conception, la réalisation et l'assemblage du module. Mis sur un banc d'essais, chaque composant du module est caractérisé et ces performances sont évaluées. La deuxième partie a pour objectif l'étalonnage du pyrhéliomètre proposé dans la station radiométrique d'UDES.

Les résultats confèrent à ce projet une originalité et une crédibilité.

**Mots clés :** Pyrhéliomètre, DNI, programmation ( SIMULINK , MATLAB , ORIGIN , PROTEUS), cellule triple jonctions, monture polaire, traqueur.

### **Abstract:**

The proposed project aims at the study and development of a pyrheliometer based on a triple-junction cell designed for direct irradiance measurement. The device consists of a refractive concentrator using a Fresnel lens, a triple-junction cell with a secondary refractor (homogenizer), a passive finned heat sink, and a two-axis tracking system.

This configuration offers three advantages compared to a conventional pyrheliometer: relatively low cost, the ability to exclusively measure the direct component of radiation, and coverage of almost the entire light spectrum.

The first part of the study is dedicated to the design, development, and assembly of the module. Each component of the module is characterized and its performances are evaluated on a test bench. The second part aims at calibrating the proposed pyrheliometer in the UDES radiometric station.

The results provide this project with originality and credibility.

**Keywords:** Pyrheliometer, DNI (Direct Normal Irradiance), programming (SIMULINK , MATLAB , ORIGIN , PROTEUS), triple-junction cell, polar mount, tracker.



**Nomenclature**

AVR	Automatic Voltage Regulator.
CO <sub>2</sub>	Le dioxyde de carbone.
CPV	Concentrateur Photovoltaïque.
CSP	Concentrateur Solaire Parabolique.
DTIR	Dielectric Total Internal Reflection.
EEPROM	electrically erasable programmable read-only memory.
GCC	GNU Compiler Collection.
IMM	Structures métamorphique inversée.
ISO	International Organization for Standardization.
IV	Caractéristique courant tension.
LCD	Liquid Crystal Display ou Écran de cristal liquide.
LDR	Light Dependent Resistor ou Photorésistance.
LM	Lattice-Matched ou accord de maille.
MM	Structures métamorphique.
MOCVD	MetalOrganic Chemical Vapor Deposition.
NEMA	National Electrical Manufactures Association.
PEDOT : PSS	Poly(3,4-EthylèneDioxyThiophène) et le Poly (Styrène Sulfonate).
PMMA	PolyMéthacrylate de Méthyle.
PWM	Pulse Width Modulation.
RTC	Real Time Clock.
RTP	Refractive Truncated Pyramid.
S <sub>c</sub>	Surface collectrice
SoG	Silicon-on-Glass ou silicone sur verre.
S <sub>r</sub>	Surface receptive.
SRAM	Static Random Access Memory.
STC	Standard Test Conditions.
UDES	Unité de Développement des Equipements Solaires.
WMO	World Meteorological Organization.

<b><u>Symboles</u></b> <b><u>Notations</u></b>	<b><u>description</u></b>	<b><u>Unité</u></b>
$\alpha_1$	Facteur d'absorption	[-]
$\delta$	Déclinaison.	Degrés
$\varepsilon_{ciel}$	Emissivité du ciel.	[-]
$\varepsilon_l$	Emissivité de la lentille.	[-]
$\varepsilon_p$	Emissivité de la plaque.	[-]
$\varepsilon_{sol}$	Emissivité du sol.	[-]
$\theta$	Demi-angle d'ouverture.	Degrés
$\eta_{el}$	Rendement de conversion électrique.	%
$\Phi$	Latitude du lieu.	Degrés
$r_l$	Facteurs de transmission de la lentille.	[-]
$\nu$	Fréquence.	Hz
$\omega$	Angle horaire.	Degrés
$\lambda$	Longueur d'onde.	nm
$a$	Azimut.	Degrés
$A_{cell}$	Surface de la cellule.	cm <sup>2</sup>
$A_{lentille}$	Surface de la lentille.	cm <sup>2</sup>
C	Coefficient de concentration.	[-]
$e$	L'épaisseur.	cm.
$E_g$	Energie de bande interdite d'un semi-conducteur.	eV
f	Distance Focale.	cm.
FF	Facteur De Forme.	%
GNI	Global Normal Irradiance ou irradiance globale normale.	W/m <sup>2</sup>
$h$	Constante de Planck soit $6,63.10^{-34}$ .	
J.s		
h	Hauteur du soleil.	Degrés
$h_{ext}$	Coefficient de convection externe.	W m <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup>
$h_{int}$	Coefficient de convection interne.	W m <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup>
I <sub>MMP</sub>	Courant au point de puissance maximum.	Ampère.
I <sub>diode</sub>	Courant De Diode.	A/cm <sup>2</sup>
J <sub>o</sub>	Densité de courant de saturation inverse	A/cm <sup>2</sup>
J <sub>i</sub>	Densité de courant de fonctionnement par jonction.	A/cm <sup>2</sup>

$J_{RP}$	Densité de courant de résistance parallèle de dérivation.	$A/cm^2$
$J_{phi}$	Densité du courant photonique.	$A/cm^2$
$K$	Conductivité thermique.	$W/mK$
$P_{aperture}$	Puissance incidente.	Watts
$P_{flux, cell}$	Puissance délivrée par la cellule.	Watts
$P_{MMP}$	Puissance au point de puissance maximum.	Watts
$Q_{a,b}^{cond}$	Conduction thermique de a vers b.	Watts
$Q_{a,b}^{conv}$	Convection thermique de a vers b.	Watts.
$Q_{a,b}^{ray}$	Rayonnement thermique de a vers b.	Watts.
$R_s$	Résistance série.	$\Omega$
$R_{Sh}$	Résistance parallèle.	$\Omega$
$T_{amb}$	Température ambiante.	$^{\circ}C$
$T_{ciel}$	Température du ciel clair.	$^{\circ}C$
$T_l$	Température de lentille.	$^{\circ}C$
$T_p$	Température de la plaque.	$^{\circ}C$
$TSV$	Temps Solaire Vrai.	Heures.
$V_i$	Tension d'exploitation dans la cellule.	Volts
$V_{MMP}$	Tension au point de puissance maximum.	Volts
$V_{OC}$	Tension en circuit ouvert.	Volts
$X$	Concentration lumineuse effective.	Candela

# TABLE DES MATIERES

<b>INTRODUCTION GENERALE</b> .....	<b>1</b>
<b>CHAPITRE I : INTRODUCTION A LA MESURE RADIOMETRIQUE</b> .....	<b>3</b>
<b>I.1.INTRODUCTION :</b> .....	<b>4</b>
<b>I.2.CONTEXTE DE L'ETUDE :</b> .....	<b>4</b>
I.2.1 MOTIVATION : .....	4
I.2.2 INTERET DE LA MESURE RADIOMETRIQUE : .....	4
I.2.3 APPAREILS DE MESURE DU RAYONNEMENT SOLAIRE : .....	5
I.2.3.1-Le pyranomètre :.....	5
I.1.3.2 Le spectroradiomètre :.....	6
I.2.3.3 Le pyrhéliomètre : .....	6
<b>I.3 ETAT DE L'ART DU PYRHELIOMETRE :</b> .....	<b>7</b>
<b>I.4 ORIGINALITE ET AVANTAGES DU PYRHELIOMETRE PROPOSE :</b> .....	<b>9</b>
<b>I.5 STRUCTURE DU PYRHELIOMETRE PROPOSE :</b> .....	<b>10</b>
I.5.1 DESCRIPTION DETAILLE DU PROTOTYPE : .....	10
<b>I.6 CONCLUSION :</b> .....	<b>10</b>
<b>CHAPITRE II : MODELISATION D'UNE CELLULE TRIPLE-JONCTION SOUS CONCENTRATION SOLAIRE UTILISEE POUR LA MESURE DE L'ECLAIREMENT DIRECT</b> .....	<b>11</b>
<b>II.1 INTRODUCTION :</b> .....	<b>12</b>
<b>II.2 POSITION DU SOLEIL :</b> .....	<b>12</b>
II.2.1 COORDONNEES HORAIRES : .....	12
II.2.1.1. Angle horaire : .....	12
II.2.1.2. La déclinaison solaire :.....	12
II.2.2 COORDONNEES HORIZONTALES : .....	13
II.2.2.1 Hauteur du soleil :.....	13
II.2.2.2 Azimut du soleil :.....	13
<b>II.3. SYSTEMES D'ORIENTATION DU PYRHELIOMETRE :</b> .....	<b>14</b>
II.3.2 DIFFERENTS TYPES DE MONTURES : .....	14
II.3.2.1. Monture alt- azimutale : .....	14
II.2.2.2. Monture équatoriale (polaire) :.....	15
II.2.3. MODELISATION DES ELEMENTS DU PYRHELIOMETRE PROPOSE : .....	16
II.2.3.1. La cellule triple jonction : .....	16
II.2.3.2. La lentille de Fresnel : .....	21
II.2.3.3 Modélisation thermique : .....	23
<b>CHAPITRE III : ETUDE EXPERIMENTALE D'UN PYRHELIOMETRE A BASE D'UNE CELLULE TRIPLE JONCTIONS</b> .....	<b>26</b>
<b>3.1 INTRODUCTION :</b> .....	<b>27</b>
<b>3.2 MODELISATION DE LA CELLULE SOUS SIMULINK :</b> .....	<b>27</b>
3.2.1 PRESENTATION DU LOGICIEL SIMULINK : .....	27

3.2.2 SCHEMA DE LA SIMULATION DE LA CELLULE TRIPLE JONCTIONS :	28
3.2.3 RELATION DE L'ECLAIREMENT DIRECT EN FONCTION DE I, V ET T :	32
<b>3.3 MODELISATION DU SYSTEME DE SUIVI :</b>	<b>35</b>
3.3.1 PRESENTATION DE LA CARTE ARDUINO :	35
3.3.1.1 Programmation en ARDUINO :	35
3.3.2. ORGANIGRAMME DE LA CARTE ARDUINO :	36
3.3.3 MATERIEL UTILISE DANS LE SYSTEME DE SUIVI :	38
3.3.3.1. La carte ARDUINO UNO R3 :	38
3.3.3.2. Photorésistance LDR :	39
3.3.3.3. RTC (Real Time Clock):	40
3.3.3.4. Écran de cristal liquide (LCD) :	40
3.3.3.5. Moteur PAS à PAS (Stepper Motor) :	41
3.3.3.6. Thermocouple de type K avec module d'amplification MAX6675 :	41
3.3.4 SCHEMA ELECTRONIQUE DU SYSTEME DE SUIVI :	43
3.3.4 Principe de fonctionnement du système :	43
<b>3.4 DESCRIPTION DU DISPOSITIF :</b>	<b>44</b>
3.4.1 REALISATION DU PYRHELIOMETRE :	44
3.4.2 REALISATION DU TRAQUEUR :	46
<b>3.5 CONCLUSION :</b>	<b>47</b>
<b>CHAPITRE IV : ETALONNAGE DU PYRHELIOMETRE REALISE, RESULTATS ET DISCUSSIONS.</b>	<b>48</b>
<b>4.1 INTRODUCTION :</b>	<b>49</b>
<b>4.2 ÉTALONNAGE DU PYRHELIOMETRE REALISE :</b>	<b>49</b>
4.2.1 PRESENTATION DE L'UDES (UNITE DE DEVELOPPEMENT DES EQUIPEMENTS SOLAIRES) :	49
4.2.2 BANC D'ESSAI :	50
4.2.2.1 Pyrhéliomètre de référence (KIPP & ZONEN Company) :	50
4.2.2.2 systèmes d'acquisition :	51
<b>4.3 RESULTATS ET DISCUSSIONS :</b>	<b>53</b>
4.3.1. LISSAGE DES VALEURS OBTENUES :	53
4.3.2. EQUATION FINAL DU PYRHELIOMETRE REALISE :	55
4.3.3. JUSTIFICATION DE L'UTILISATION DE LA MONTURE POLAIRE :	56
4.3.3. JUSTIFICATION DE L'UTILISATION DE LA TENSION DANS L'EQUATION FINALE :	57
<b>4.4 COUT DE NOTRE PYRHELIOMETRE :</b>	<b>57</b>
<b>4.5. CONCLUSION :</b>	<b>58</b>
<b>CONCLUSION GENERALE.....</b>	<b>59</b>
<b>BIBLIOGRAPHIES .....</b>	<b>61</b>
<b>ANNEXES.....</b>	<b>66</b>

## LISTES DES FIGURES

FIGURE I.1 : LE PYRANOMETRE.....	5
FIGURE III.2 : LE SPECTRO RADIOMETRE.....	6
FIGURE II.3 : SCHEMA DE FONCTIONNEMENT DU PYRHELIOMETRE.....	6
FIGURE II.1 : DECLINAISON SOLAIRE.....	13
FIGURE II.2 : HAUTEUR ANGULAIRE ; AZIMUT DU SOLEIL .....	14
FIGURE II.3 : MONTURE ALTAZIMUTALE .....	15
FIGURE II.4 : MONTURE EQUATORIALE (POLAIRE) .....	15
FIGURE II.5 : CARACTERISTIQUE COURANT TENSION (IV) D'UNE CELLULE SOLAIRE .....	16
FIGURE II.6 : MODELE ELECTRIQUE D'UNE CELLULE PHOTOVOLTAÏQUE.....	17
FIGURE II.7 : ILLUSTRATION DE LA REPOSE SPECTRALE DE LA CONVERSION D'ENERGIE DU SPECTRE SOLAIRE PAR UNE CELLULE TRIPLE-JONCTION GAINP/GAINAS/Ge.....	18
FIGURE II.8 : REPRESENTATION DES STRUCTURES LATTICE-MATCHED LM (EN ORANGE) ET METAMORPHIQUE MM (EN ROUGE) D'UNE CELLULE TRIPLE JONCTION GAINP/GAINAS/Ge .....	19
FIGURE II.9 : CIRCUIT EQUIVALENT DE LA CELLULE PHOTOVOLTAÏQUE TRIPLE JONCTIONS. [40].....	20
FIGURE II.10: CONCEPTION DES CELLULES A JONCTIONS MULTIPLES ET PROFONDEUR DE PENETRATION DU SPECTRE SOLAIRE ILLUSTRÉE .....	21
FIGURE II. 11 : SCHEMA DU CONCEPT DE LA LENTILLE DE FRESNEL, AVEC : LA DISTANCE FOCALE F, LE DEMI-ANGLE D'OUVERTURE $\theta$ , LA SURFACE D'OUVERTURE A APERTURE, LA SURFACE CELLULE A CELL, LA PUISSANCE INCIDENTE P APERTURE ET LA PUISSANCE DELIVREE PAR LA CELLULE P FLUX, CELL.....	22
FIGURE II.12: PROFIL DES OPTIQUES SECONDAIRE (GAUCHE) ET COURBE DE TRANSMISSION ANGULAIRE POUR CES MEMES OPTIQUES (DROITE). LES DISPOSITIFS SONT : PAS D'OPTIQUES SECONDAIRE (NOIR), PYRAMIDE REFLECTIVE (ROUGE), PYRAMIDE REFRACTIVE (VERT), DIELECTRIQUE A REFLEXION INTERNE TOTALE(JAUNE), DOME A (BLEU)EU DOME B(ORANGE).....	23
FIGURE II. 13 : BILAN THERMIQUE DES TROIS NŒUDS1,2 ET 3.....	24
FIGURE III.1 : OUVERTURE DE LA FENETRE DU SIMULINK EN CLIQUANT SUR L'ICONE DE SIMULINK DANS LA BARRE D'OUTILS DU HAUT DANS LA FENETRE PRINCIPALE DE MATLAB. ....	28
FIGURE III.2 : FENETRE BLOCS DE BASE DE SIMULINK. ....	28
FIGURE III.3 : LE SPECTRE LUMINEUX COUVRE PAR LA CELLULE TRIPLE JONCTIONS (GAINP/GAINAS/Ge).....	29
FIGURE III.4 : CARACTERISTIQUE (I-V) DE LA CELLULE TRIPLE JONCTIONS (GAINP/GAINAS/Ge).....	29
FIGURE III.5 : PRESENTATION DU BLOCK DU CELLULE SOLAIRE SOUS SIMULINK. ....	30
FIGURE III.6 : LA SELECTION DE LA CELLULE SOLAIRE SOUS SIMULINK. ....	30
FIGURE III.7 : CHOIX DE LA CELLULE SOLAIRE SOUS SIMULINK .....	31
FIGURE III.8 : PARAMETRES DE LA CELLULE TRIPLE JONCTIONS (GAINP/GAINAS/Ge). ....	31
FIGURE III.9 : SCHEMA DE LA SIMULATION DE LA CELLULE TRIPLE JONCTIONS (GAINP/GAINAS/Ge) DANS L'ENVIRONNEMENT SIMULINK. ....	32
FIGURE III.10 : CARACTERISTIQUE I(V) A 25°C POUR DES NIVEAUX D'ECLAIREMENTS DIFFERENTS. ....	33
FIGURE III.11 : CARACTERISTIQUE I(V) A 1000 W/M <sup>2</sup> AVEC DES TEMPERATURES DIFFERENTES (5°C A 50°C). ....	33
FIGURE III.12 : COURBE DE L'INTENSITE EN COURT-CIRCUIT (A) OBTENUE EN FONCTION DE L'ECLAIREMENT ET LA TEMPERATURE.....	34

FIGURE III.13 : COURBE DE LA TENSION EN CIRCUIT OUVERT (V) OBTENUE EN FONCTION DE L'ECLAIREMENT ET LA TEMPERATURE.....	34
FIGURE III.14 : LA CARTE ARDUINO.....	35
FIGURE III.15 : INTERFACE D'ARDUINO.....	36
FIGURE III.16 : ORGANIGRAMME DU SYSTEME DE SUIVI.....	37
FIGURE III.17 : LA CARTE ARDUINO UNO.....	38
FIGURE III.18: SYMBOL LDR.....	39
FIGURE III.19: RTC (REAL TIME CLOCK).....	40
FIGURE III.20 : AFFICHEUR LCD.....	40
FIGURE III.21 : VUE D'ENSEMBLE D'UN MOTEUR PAS A PAS (STEPPER MOTOR).....	41
FIGURE III.22 : THERMOCOUPLE DE TYPE K AVEC UN AMPLIFICATEUR MAX6675.....	42
FIGURE III.23 : SCHEMA DE SUIVEUR SOLAIRE (SOUS PROTEUS).....	43
FIGURE III.24 : LENTILLE DE FRESNEL (OPTIQUE PRIMAIRE).....	45
FIGURE III.25 : L'HOMOGENEISEUR (OPTIQUE SECONDAIRE).....	45
FIGURE III.26 : LE PYRHéliOMETRE REALISE SUIVI D'UN DISSIPATEUR THERMIQUE.....	45
FIGURE III.27 : SYSTEME COMPLET (PYRHéliOMETRE SYSTEME DE SUIVI).....	46
FIGURE IV.1 : UNITE DE DEVELOPPEMENT DES EQUIPEMENTS SOLAIRES (UDES).....	50
FIGURE IV.2 : PYRHéliOMETRE KIPP & ZONEN CHP1.....	50
FIGURE IV.3 : FICHE TECHNIQUE DU PYRHéliOMETRE KIPP & ZONEN CHP1.....	51
FIGURE IV.4 : (EN HAUT) LE PYRHéliOMETRE DE REFERENCE ET (EN BAS) LE PYRHéliOMETRE PHOTOVOLTAÏQUE.....	51
FIGURE IV.5 : L'APPAREIL KEITHLEY : LE SYSTEME D'ACQUISITION DES DONNEES D'ECLAIREMENT DIRECT, DU VOLTAGE ET DE LA TEMPERATURE.....	52
FIGURE IV.6 : THERMOCOUPLE DE TYPE K.....	52
FIGURE IV.7 : SYSTEME D'ACQUISITION RELIE AU PC.....	53
FIGURE IV.8 : VARIATION DES DEUX PYRHéliOMETRES (EN ROUGE LE PYRHéliOMETRE DE REFERENCE ET EN BLEU LE PYRHéliOMETRE TESTE).....	54
FIGURE IV.9 : COURBE D'ECLAIREMENT DIRECT EN FONCTION DE LA TENSION.....	55
FIGURE IV.10 : EQUATION OBTENUE DU PYRHéliOMETRE REALISE (SOUS ORIGIN).....	56

## **LISTE DES TABLEAUX**

TABLEAU III.1 : LES CARACTERISTIQUES TECHNIQUE D'ARDUINO UNO .....	39
TABLEAU IV.1 : DETAILS DU COUT DU PYRHéliOMETRE REALISE. ....	57
TABLEAU IV.2 : DETAILS DU COUT DU SYSTEME DE SUIVI REALISE. ....	57



---

# **Introduction Générale**

---

L'énergie est indispensable pour toute activité humaine et représente également l'un des piliers de l'économie moderne. Ses sources se sont diversifiées au cours du temps afin de satisfaire les besoins en termes d'énergie de plus en plus élevés dans le monde. Les sources d'énergies conventionnelles (charbon, pétrole, gaz, nucléaire) sont les plus exploitées et elles sont limitées en termes de réserve. De plus, les risques en matière environnementale liés aux rejets de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère engendrant le phénomène de l'effet de serre et le risque de détruire la couche d'ozone. Cela a encouragé la recherche d'une solution économique et non polluante pour la production d'énergie. Ce sont les énergies renouvelables naturelles et de manière illimitée sous leurs multiples formes (Eolienne, solaire thermique, photovoltaïque, hydroélectrique, biomasse, et géothermique).[1]

Et parmi ces énergies, il y a l'énergie solaire qui arrive au sommet de la liste en raison de son abondance, et également par sa distribution dans la nature plus que tous les autres types d'énergies renouvelables. En effet la terre reçoit du soleil une énergie équivalente à 5000 fois les besoins mondiaux, c'est donc un fort potentiel et une solution pratique devant les défis de plus en plus croissants dans le domaine énergétique et environnemental. C'est là un objectif principal urgent et commun à toute l'humanité afin de préserver un environnement sain pour les générations futures. [2]

Le rayonnement solaire est probablement la magnitude la plus influente sur le système climatique de la terre et sur son équilibre énergétique. Les chercheurs du monde entier travaillent d'arrache-pied pour comprendre les mécanismes qui régissent le climat de la terre, et ils réclament des données plus précises sur le rayonnement. Les systèmes de surveillance des centrales solaires photovoltaïques et thermiques et le développement de ces applications nécessitent des appareils de mesure plus performants et plus fiables et des données de longue durée sur l'irradiation solaire. La disponibilité et la qualité de ces données sont obtenues dans les régions munies de stations radiométriques ; ces dernières mesurent les paramètres météorologiques, la durée d'insolation et l'irradiation solaire. Cela est dû aux importantes conséquences économiques qui découlent d'une évaluation précise de la production et des performances énergétiques dans ces centrales. De toute évidence, une instrumentation adéquate étalonnée et calibrée est nécessaire pour répondre à ces exigences.

Dans les systèmes solaires à concentrations (CPV, CSP), on focalise l'étude sur le rayonnement direct qui est reçue directement du soleil, sans diffusion par l'atmosphère. Ses

rayons sont parallèles entre eux. Il est mesuré par « le pyrhéliomètre » qui Il est généralement constitué par une thermopile peinte en noir, donc très absorbante, montée sur un système de suivi. Le tube est fixé sur une monture altazimutale ou équatoriale.

La calibration des pyrhéliomètre s'effectue régulièrement tous les deux ans à DAVOS, la Suisse pour permettre une mesure précise et fiable des données d'éclairement.

Les problèmes posés par le pyrhéliomètre standard sont : le cout élevé, d'ailleurs, il est l'un des instruments de mesure les plus chères, de plus, il mesure l'éclairement circumsolaire qui est un éclairement diffus qui rendent les données moins précises. Malgré le passage au pyrhéliomètre photovoltaïque en remplaçant la thermopile par une cellule photovoltaïque à base de silicium afin de minimiser le cout mais au détriment de la qualité de la mesure car le silicium ne couvre pratiquement que la partie visible du spectre lumineux.

L'objectif de notre travail est la réalisation d'un pyrhéliomètre à base d'une cellule triple jonctions, cette réalisation offre 3 avantages : le cout bas, la mesure de seulement la composante directe de l'éclairement avec la lentille de Fresnel et à la fin la couverture de presque tout le spectre lumineux de 300 nm à 1250nm.

Ce document qui décrit notre travail est réparti en quatre chapitres :

- Le premier chapitre présente l'intérêt de la mesure radiométrique en citant les appareils de mesure dédiés pour ça et en insistant sur le pyrhéliomètre et son état de l'art.
- Le deuxième chapitre est un rappel des notions astronomiques.
- Le troisième chapitre est consacré pour la modélisation de la cellule triple jonctions et la réalisation de notre dispositif (le pyrhéliomètre et le système de suivi)
- Le dernier chapitre traite les résultats d'étalonnage de notre pyrhéliomètre à l'UDES.

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

---

# **CHAPITRE I**

## **Introduction à la mesure radiométrique**

---

## **I.1.Introduction :**

Ce chapitre est une introduction pour notre projet, il traite l'importante de la mesure radiométrique et quelques instruments qui existent en citant l'état de l'art du pyrhéliomètre et à la fin la description de notre prototype proposé.

## **I.2Contexte de l'étude :**

### **I.2.1 Motivation :**

Les pyrhéliomètres sont un type d'instrument utilisés pour mesurer l'éclairement solaire, c'est-à-dire la quantité de rayonnement solaire direct reçue sur une surface donnée. Ils sont largement utilisés dans les applications de la concentration solaire notamment dans les centrales photovoltaïques à concentration (CPV) et les centrales thermodynamiques (CSP). Cependant, l'un des principaux problèmes des pyrhéliomètres est qu'ils mesurent également l'éclairement circumsolaire, qui est un rayonnement solaire diffus. Un autre problème de taille est leur coût est élevé, ce qui les rendent inaccessible aux laboratoires à faible budget.

### **I.2.2 Intérêt de la mesure radiométrique :**

Mesurer l'éclairement est important dans les applications des énergies renouvelables pour plusieurs raisons, notamment :

- 1-Prévisions énergétiques : des mesures précises de l'éclairement peuvent aider à prévoir la quantité d'énergie pouvant être produite par un système d'énergie solaire, tel qu'une centrale solaire. C'est important pour la planification et la gestion de l'énergie.
- 2-Performance du système : la production d'un système d'énergie renouvelable est fortement liée à la quantité d'éclairement qu'il reçoit. La mesure de l'éclairement est essentielle pour surveiller la performance d'un système d'énergie solaire et s'assurer qu'il fonctionne à son maximum d'efficacité.
- 3-Dimensionnement du système : des mesures précises de l'éclairement sont nécessaires pour dimensionner correctement un système d'énergie solaire et garantir qu'il répond aux besoins énergétiques de l'application souhaitée.

- 4-Maintenance : la mesure de l'éclairement peut aider à identifier quand un système d'énergie solaire ne fonctionne pas comme prévu et peut nécessiter une maintenance ou des réparations.

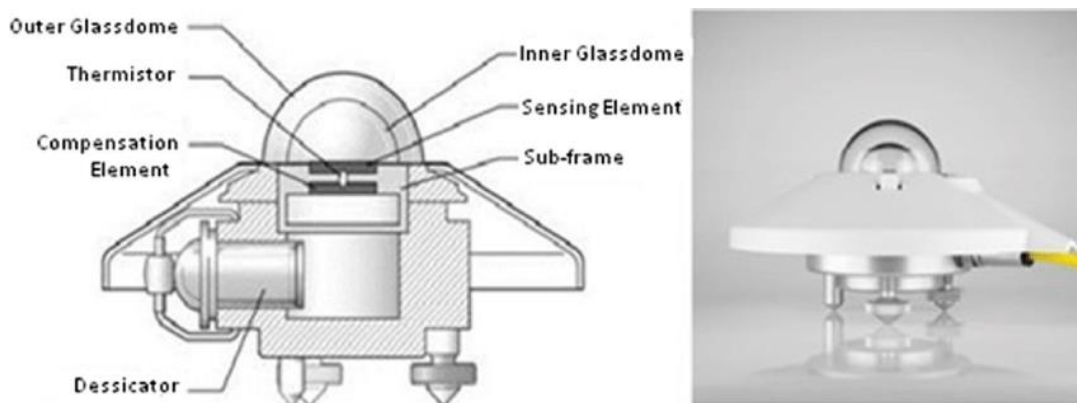
Dans l'ensemble, la mesure de l'éclairement est cruciale pour assurer une performance optimale et un fonctionnement efficace des systèmes d'énergie solaire. En mesurant avec précision la quantité d'éclairement incident, il est possible de maximiser la production d'énergie et de réduire les coûts associés à la production d'énergie.

### **I.2.3 Appareils de mesure du rayonnement solaire :**

#### **I.2.3.1-Le pyranomètre :**

C'est le capteur le plus fréquemment utilisé pour mesurer le rayonnement global ou diffus. Il se compose d'une thermopile composée d'une série de thermocouples avec alternance des soudures chaudes et soudures froides. Les soudures chaudes sont en contact thermique avec la surface absorbante « noire » avec une capacité thermique faible. Les soudures froides sont en contact avec un matériau ayant une capacité thermique relativement élevée et reste à la température ambiante. Lorsque le rayonnement solaire tombe sur la surface absorbante (noire) la quasi-totalité du rayonnement incident est absorbé. Il en résulte une augmentation de la température à la « jonction chaude » proportionnelle à l'intensité du rayonnement. Une tension est alors générée par la thermopile, qui est proportionnelle à la différence de température entre le « chaud » et le « froid ».

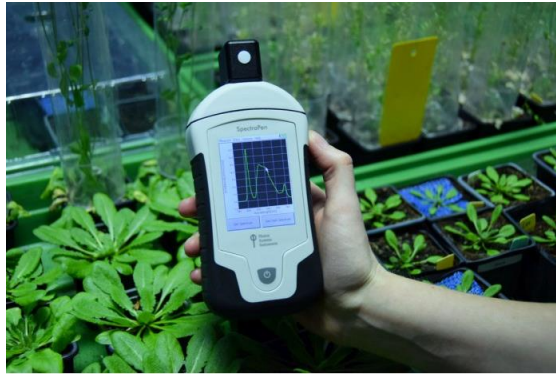
Cette tension de sortie est convertie Watts/mètre<sup>2</sup> par l'utilisation d'un facteur de sensibilité. Les pyranomètres ont une réponse spectrale comprise entre 335 et 2200 nm qui incluent la bande de longueur d'onde du visible.[3]



**Figure I.1 :** le pyranomètre.[4]

### I.1.3.2 Le spectroradiomètre :

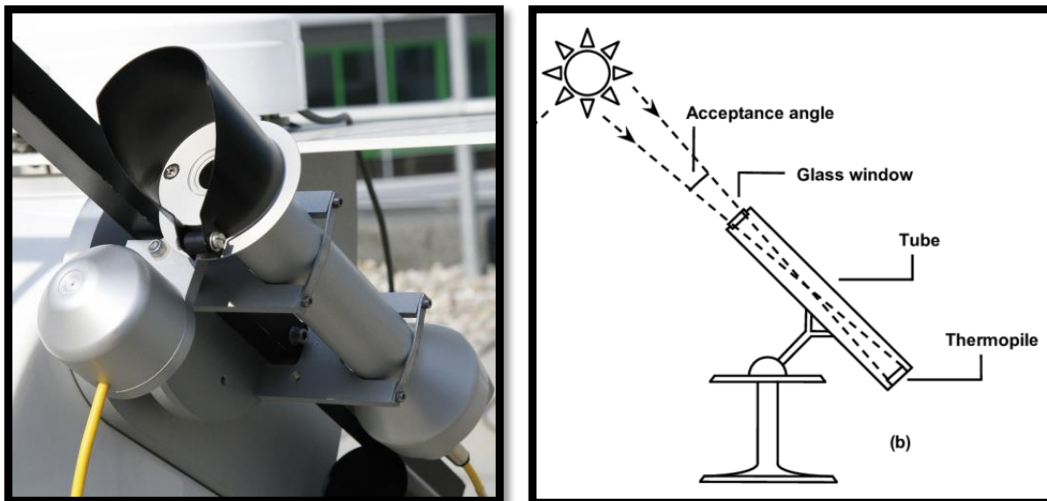
Un spectroradiomètre est un instrument scientifique utilisé pour mesurer la distribution spectrale de la radiation électromagnétique émise ou réfléchie par un objet ou une surface. Il est capable de mesurer la quantité de radiation à différentes longueurs d'onde dans le spectre électromagnétique, généralement de l'ultraviolet à l'infrarouge.



**Figure III.2 :** le spectro radiomètre.[5]

### I.2.3.3 Le pyréliomètre :

L'éclairement solaire directe à incidence normale (Direct Normal Irradiance – DNI) est reçu directement du soleil, sans diffusion par l'atmosphère. Il est mesuré par le pyréliomètre [6]. Il comporte une ouverture réduite et une surface réceptrice qui doit être maintenue normale au rayonnement par un système de poursuite automatique. La surface sensible est un disque d'argent noirci, il est donc très absorbant et placé à la base d'un tube muni d'un obturateur et d'un diaphragme limitant l'angle d'ouverture à  $2.5^\circ$ . Le tube est fixé sur un dispositif qui suit le soleil dans sa trajectoire diurne.[7]



**Figure II.3 :** Schéma de fonctionnement du pyréliomètre.[8][9]

### **I.3 Etat de l'art du pyréliomètre :**

Le premier radiomètre solaire a été développé par Pouillet en 1873, qui l'a appelé pyréliomètre. Cet instrument était basé sur la calorimétrie de l'eau, ce qui rendait les mesures très approximatives et incertaines. [10]

En 1887, ANGSTROM a amélioré le pyréliomètre en remplaçant la calorimétrie par des détecteurs électriques étalonnés. Son instrument, appelé A-pyréliomètre, utilisait deux détecteurs qui étaient alternativement ombragés et éclairés. Cette innovation a considérablement amélioré la précision absolue et a permis une estimation de la constante solaire à 2%. [11]

En 1911, ABBOT, directeur de l'Observatoire astrophysique Smithsonian, a inventé "THE ABBOT SILVER DISK pyrheliumeter". Cet instrument se composait d'un disque d'argent situé à l'extrémité inférieure d'un tube contenant un diaphragme qui sert de récepteur de rayonnement pour un calorimètre. Le rayonnement tombant sur le disque d'argent était périodiquement intercepté au moyen d'un obturateur situé dans le tube, provoquant des fluctuations de température du calorimètre qui étaient proportionnelles à l'intensité du rayonnement. [12]

En 1913, Charles F. EPPLEY a développé le pyréliomètre Eppley, qui mesurait la durée pendant laquelle la surface recevait la lumière du soleil et l'intensité du soleil. Il se composait de deux anneaux concentriques d'argent de surface égale, l'un noirci et l'autre blanchi, reliés à une thermopile. [13]

En 1932, C. G. ABBOT et L. B. ALDRICH ont utilisé une cavité noire pour absorber le rayonnement entrant et le transférer à l'eau. En mesurant l'augmentation de température de l'eau, le rayonnement entrant pouvait être calculé. Une version mise à jour du pyréliomètre d'Abbot utilisait deux chambres refroidies à l'eau de manière identique, mais seule l'une d'entre elles était exposée au rayonnement. [14]

En 1987, A. M. MUJAHID et A. R. M. ALAMOUD ont proposé un pyréliomètre photovoltaïque à incidence normale simple. Ce dispositif consistait en une cellule solaire polycristalline et un tube collimateur. Le pyréliomètre proposé ne nécessitait que la mesure du courant de court-circuit, qui était ensuite facilement converti en une valeur d'insolation en utilisant le facteur d'étalonnage de la cellule solaire. Les tests sur le terrain ont montré que le pyréliomètre proposé est comparable à celui d'Eppley. [15]

En 1997, S. X. CHENG, H. P. HU et L. CHEN ont conçu et construit deux pyréliomètres pour mesurer le rayonnement solaire. Le premier est une méthode à double capteur et le



second est une méthode à capteur unique. Les capteurs sont constitués d'une feuille d'acier inoxydable fortement oxydée formée en un disque circulaire et thermiquement jointe à un grand anneau en acier inoxydable agissant comme dissipateur de chaleur. La méthode à double capteur permet de mesurer les différences de température entre les points centraux des deux capteurs et le dissipateur de chaleur, ce qui permet de déterminer le rayonnement solaire incident et le coefficient de perte de chaleur sur la surface du capteur. Les équations d'équilibre thermique sont utilisées dans des conditions d'état stable pour calculer ces paramètres.[16]

En 2011, Michael GNOS et al décrivent un dispositif expérimental pour mesurer le rayonnement solaire qui se compose d'un système de suivi à double axe et d'un pyréliomètre. Le pyréliomètre contient une lentille à concentration, un tube de collimation, un disque récepteur et un capteur thermoélectrique. La lentille est en verre acrylique asphérique avec une transmittance d'environ 90 %. Elle est revêtue d'une couche pour réduire la réflectance à moins de 0,5 % dans la plage de rayonnement visible entre 450 et 650 nm. Cependant, la réflectivité en dehors du spectre visible augmente rapidement, ce qui diminue la transmittance totale à moins de 50%.[17]

En 2014, DANIEL et ODINAKACH ont développé un radiomètre numérique capable de mesurer l'intensité du rayonnement solaire. Ils ont construit l'appareil en utilisant une petite photocellule rectangulaire en silicone comme capteur. Lorsque la photocellule est exposée au rayonnement solaire, une force électromotrice proportionnelle à l'intensité du rayonnement est générée dans le circuit. L'appareil utilise cette tension pour mesurer l'intensité solaire disponible. Pour étalonner l'appareil, un solarimètre standard a été utilisé pour traduire l'unité de sa lecture de Volt à Watt par mètre carré. Grâce à cette calibration, le dispositif peut recueillir des données d'éclairement fiables, comparables et compatibles avec celles obtenues par un solarimètre standard. [18]

En 2016, la société KIPP & ZONEN a présenté une amélioration de son pyréliomètre CM21, le CHP1 Pyrheliometer. Celui-ci est doté d'un détecteur de thermopile et de deux capteurs de température, montés à l'arrière d'un tube de collimation. Le détecteur de thermopile absorbe la puissance totale du revêtement de surface noir, qui est une peinture non sélective, et la convertit en chaleur. Cette chaleur est ensuite dissipée à travers une résistance thermique au dissipateur thermique, également appelé corps du pyréliomètre. La différence de température à travers la résistance thermique est ensuite convertie en une tension linéaire, proportionnelle à l'irradiance solaire absorbée. En conditions atmosphériques normales, le CHP1 peut produire jusqu'à 25 mV de puissance maximale. Le

détecteur est similaire à celui utilisé dans les pyranomètres haut de gamme CMP21 et CMP22, ce qui minimise l'influence des fluctuations de température ambiante et permet une réponse rapide. Le CHP1 est également équipé de deux capteurs de température thermistance PT100 et 10K, ce qui permet d'utiliser les données de réponse de température individuelles fournies avec chaque CHP1. La conception est facile à installer et à entretenir grâce au connecteur de câble de signal et à la cartouche de dessiccation vissée. Les spécifications du CHP1 dépassent les critères de performance ISO et WMO pour les pyréliomètres à incidence normale de première classe.[19]

En 2018, BARROS et al ont étudié un radiomètre solaire à faible coût utilisant des capteurs LDR. Les capteurs les plus couramment utilisés pour mesurer les irradiances solaires sont le pyranomètre thermopile, la photodiode et le pyréliomètre. Cependant, ces instruments ont des coûts d'acquisition et de maintenance élevés. Les capteurs de résistance dépendante de la lumière (LDR) peuvent être une alternative à ces instruments. Dans cette étude, les auteurs proposent un projet à faible coût avec des mesures compatibles avec les irradiances classiques. Les analyses statistiques des régressions entre les points collectés sont effectuées à partir des données collectées via l'enregistreur de données. Différentes valeurs de résistance dans le circuit d'acquisition ont montré de meilleurs résultats pour différentes plages d'irradiance solaire. Les résultats ont montré la validité du système basé sur une analyse statistique effectuée par des erreurs relatives et une corrélation.[20]

En 2020, MOIZ et al ont utilisés un réseau de nano fils de silicium pour les cellules solaires hybrides à base de nano fils de silicium-polystyrène sulfonate (PEDOT : PSS) et cela pour améliorer les performances de captation des cellules dans les pyréliomètres photovoltaïques.[21]

#### **I.4 Originalité et avantages du pyréliomètre proposé :**

La configuration proposée offre trois avantages par rapport à un pyréliomètre classique :

- Un cout relativement bas : par rapport à un pyréliomètre à base d'une thermopile
- La mesure exclusive de la composante directe du rayonnement en utilisant la lentille de Fresnel, d'où l'absence de la composante circumsolaire.
- La couverture quasi totale du spectre solaire avec la cellule triple jonctions (InGaP/InGaAs/Ge).

## **I.5 Structure du pyréliomètre proposé :**

### **I.5.1 Description détaillé du prototype :**

Nous allons réaliser un pyréliomètre à base d'une cellule triple jonctions.

Le dispositif est constitué d'un concentrateur à réfraction de type lentille de Fresnel, d'une cellule triple jonctions muni d'un réfracteur secondaire et d'un dissipateur thermique et d'un système de suivi à un deux axes.

Nous utilisons dans notre projet une monture polaire pour suivre le soleil dans sa trajectoire diurne. Le soleil est donc défini dans le système de coordonnées équatoriales par l'angle de déclinaison et l'angle horaire. Cette monture est conçue pour maintenir l'axe optique du pyréliomètre perpendiculaire aux rayons solaires entrants, ce qui permet de mesurer avec précision l'éclairement solaire direct.

Le suiveur est équipé d'un moteur électrique pas à pas (stepper motor NEMA 23) et d'un système de contrôle électronique pour ajuster automatiquement la position de la monture en fonction de la position actuelle du soleil dans le ciel. Le suiveur réalisé avec un seul axe de rotation (angle horaire) commandé par le moteur pas à pas, l'autre axe (déclinaison) est réglé manuellement. La commande du moteur est assurée par une carte ARDUINO commandé par le PC qui contient le programme (écrit en langage C++) de pilotage.

## **I.6 Conclusion :**

Une instrumentation adéquate est nécessaire pour une mesure radiométrique fiable et pour cela notre projet est de développer un pyréliomètre plus performants à faible cout comme on a vu dans ce chapitre.

Pour mieux comprendre les concepts et les bases théoriques, on passe au chapitre suivant.

---

## **CHAPITRE II**

### **Modélisation d'une cellule triple-jonction sous concentration solaire utilisée pour la mesure de l'éclairement direct**

---

## **II.1 Introduction :**

Nous allons aborder dans ce chapitre le fonctionnement d'une cellule triple jonction soumise à un rayonnement concentré en analysant ces performances électriques, optiques et thermiques. La cellule est utilisée pour la mesure de l'éclairement direct normal et est donc dotée d'un suiveur solaire servant à la pointer à tout instant vers le soleil selon sa position géométrique dans l'espace.

## **II.2 Position du soleil :**

La position du soleil à partir de la terre peut être définie par deux systèmes de coordonnées : les coordonnées horizontales ou alt-azimutale et les coordonnées polaires ou horaires.

### **II.2.1 Coordonnées horaires :**

Les coordonnées horaires sont bien adaptées au mouvement diurne du soleil. Ils sont définis par deux angles : l'angle horaire et la déclinaison.

#### **II.2.1.1. Angle horaire :**

L'angle horaire  $\omega$  étant l'angle formé par le plan méridien passant par le centre du soleil et le plan vertical du lieu (méridien) définit le temps solaire vrai TSV, l'angle horaire s'exprime parfois en heures. Au midi solaire on a  $\omega = 0$ , ensuite chaque heure correspond à une variation de  $15^\circ$ , car la terre effectue un tour complet sur elle-même en 24h.  $\omega$  sera compté négativement le matin lorsque le soleil est vers l'est et positivement le soir. L'angle horaire est donné par l'équation suivante :

$$\omega = 15(\text{TSV}-12). \quad (\text{II.1})$$

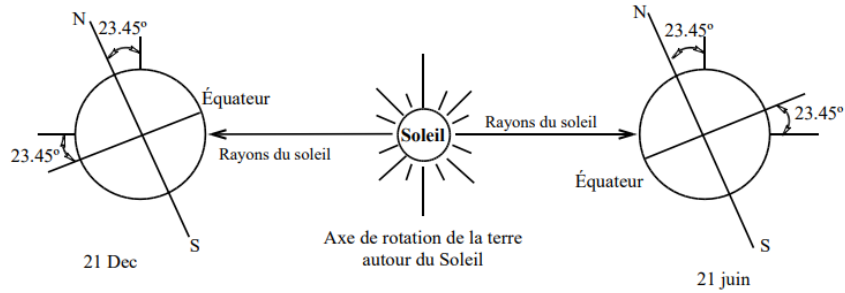
Où TSV est le temps solaire vrai exprimé en heures. [22]

#### **II.2.1.2. La déclinaison solaire :**

La déclinaison du soleil  $\delta$  est l'angle que fait, la direction du soleil avec le plan équatorial de la terre, la déclinaison varie de  $-23^\circ 27'$  au solstice d'hiver à  $+23^\circ 27'$  au solstice d'été et elle est nulle aux équinoxes. La déclinaison solaire est bien représentée par la formule en degré :

$$\delta = 23.45 \sin \left( 360 * \frac{284+n}{365} \right). \quad (\text{II.2})$$

Avec n nombre de jours écoulés depuis le 1er Janvier. [22]



**Figure II.1 :** déclinaison solaire.[23]

## **II.2.2 Coordonnées horizontales :**

Une autre façon de repérer le soleil dans le ciel est à partir des coordonnées horizontales. Ainsi, la position du soleil est déterminée en fonction de deux angles donnés en radian : l'angle entre la direction du soleil et le plan horizontal du lieu (hauteur angulaire  $h$ ) et l'angle entre le méridien du lieu et le plan vertical passant par le soleil (azimut  $a$ ).[24]

### **II.2.2.1 Hauteur du soleil :**

La hauteur du soleil, notée  $h$ , est égale à l'angle formé par la direction du soleil et le plan horizontal.

Il est donné par la relation :

$$\sin h = \sin\varphi \sin\delta + \cos\varphi \cos\delta \cos\omega. \quad (\text{II.3})$$

Où  $\varphi$ ,  $\delta$  et  $\omega$  sont respectivement la latitude du lieu, la déclinaison du soleil et l'angle horaire.

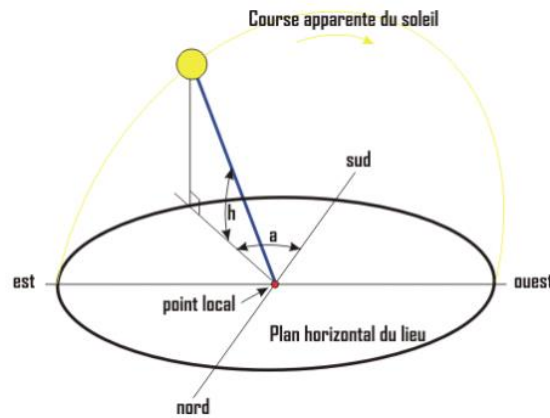
De la hauteur  $h$ , on peut déduire les heures du lever et du coucher de soleil (pour  $h=0$ ).[2]

### **II.2.2.2 Azimut du soleil :**

L'azimut du soleil, notée  $a$ , est égale à l'angle formé par la projection de la direction du soleil sur le plan horizontal et la direction sud.

Il est donné par la relation :

$$\cos a = \cos\delta \sin\omega / \cos h. \quad (\text{II.4})$$



**Figure II.2 :** Hauteur angulaire ; azimut du soleil.[25]

La relation entre l'azimut, l'angle horaire, la hauteur et la déclinaison est donnée par l'expression suivante :

$$\sin a = \sin \omega \cos \delta / \cos h. \quad (\text{II.5})$$

### **II.3. Systèmes d'orientation du pyréliomètre :**

La position du soleil dans le ciel change tout au long du jour et de l'année. Pour le pyréliomètre proposé, un suivi du mouvement apparent du soleil est nécessaire cela équivaut à orienter la cellule selon deux axes soit en coordonnées horizontales ou polaires.

#### **II.3.2 Différents types de montures :**

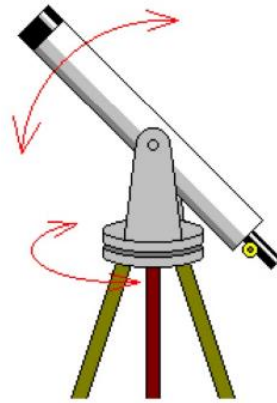
##### **II.3.2.1. Monture alt- azimutale :**

La monture al azimutale est mobile autour de deux axes perpendiculaires, l'un vertical l'autre horizontal. Le pyréliomètre tourne autour d'un axe horizontal porté par une monture qui elle-même tourne autour d'un axe vertical. Ce système est couramment utilisé pour les radars, les cinéthéodolites, les canons anti-aériens.

La rotation autour de l'axe horizontal assure la poursuite en hauteur (de haut en bas), en d'autres termes la normale du pyréliomètre suit la hauteur angulaire du soleil. Alors que l'autre axe assure le déplacement en azimut (de gauche vers la droite).

Cette disposition très simple ne pose pas de problèmes mécaniques particuliers [26]. Les mouvements en hauteur et en azimut sont difficiles à coordonner et le coût du système est

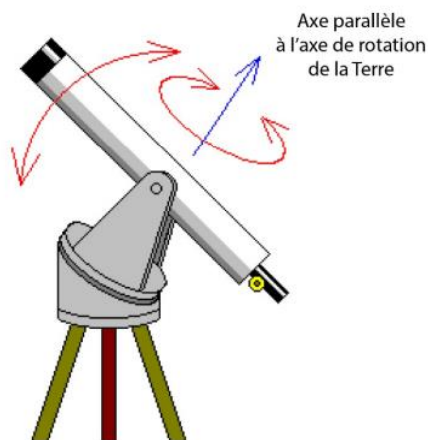
exorbitant à cause de l'apport de deux moteurs, donc d'une consommation en énergie beaucoup plus importante (figure II.3).[27]



**Figure II.3 :** Monture Altazimutale.[28]

#### II.2.2.2. Monture équatoriale (polaire) :

La monture équatoriale est la monture idéale pour assurer un suivi sidéral. Elle emploie une rotation autour d'un axe parallèle à l'axe polaire du globe terrestre (mouvement en angle horaire), et un axe orthogonal au précédent (mouvement en déclinaison). Cette solution est plus délicate sur le plan mécanique, mais le mouvement autour de l'axe polaire est pratiquement uniforme au cours de la journée. Donc la poursuite du soleil est plus facile (figure II.4).[26]



**Figure II.4 :** monture équatoriale (polaire).[28]



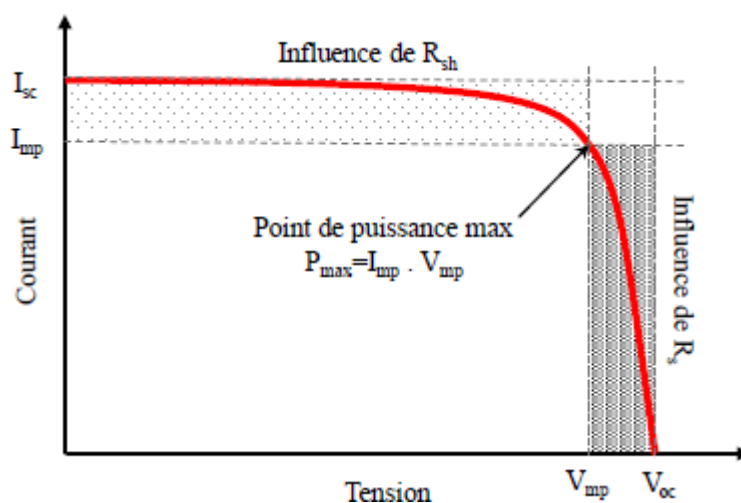
### **II.2.3. Modélisation des éléments du pyréliomètre proposé :**

Cette partie est consacrée à l'étude théorique des équipements utilisés dans la réalisation de notre pyréliomètre en définissant la méthodologie de caractérisation. Il s'agit d'une méthodologie d'investigation fine des différents phénomènes interagissant dans la conception de notre pyréliomètre à savoir les aspects électriques, optique et thermique.

#### **II.2.3.1. La cellule triple jonction :**

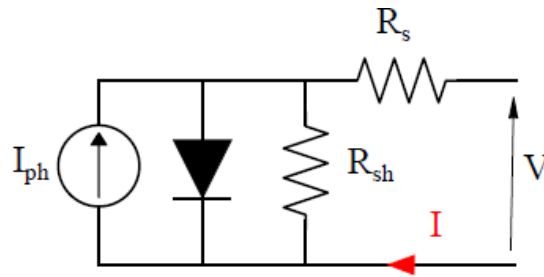
Une structure photovoltaïque est basée sur la propriété qu'ont certains matériaux, en l'occurrence les semi-conducteurs, à changer leur conductivité sous certaines excitations lumineuses dépendamment du matériau. En effet, dans un solide cristallin les niveaux énergétiques de l'ensemble des atomes sont couplés pour former des bandes d'énergie. Dans le cas des semi-conducteurs, deux bandes d'énergie séparées par une bande interdite d'énergie  $E_g$  (de l'ordre de quelques électrons-volts), sont responsables de leurs propriétés de conductivité : la bande de valence remplie d'électrons et la bande de conduction qui est totalement vide à 0 K. Les électrons contenus dans la bande de valence peuvent absorber l'énergie  $h\nu$  des photons constituant la lumière incidente pour passer dans la bande de conduction, avec la condition que l'énergie absorbée soit supérieure ou égale à l'énergie  $E_g$  de la bande interdite.[29]

D'un point de vue électrique une cellule photovoltaïque se comporte telle une diode montée en parallèle à une source de courant constant (le courant photo généré). La figure II.5 représente sa caractéristique électrique courant tension, ou courbe IV.[30]



**Figure II.5 :** Caractéristique courant tension (IV) d'une cellule solaire.[30]

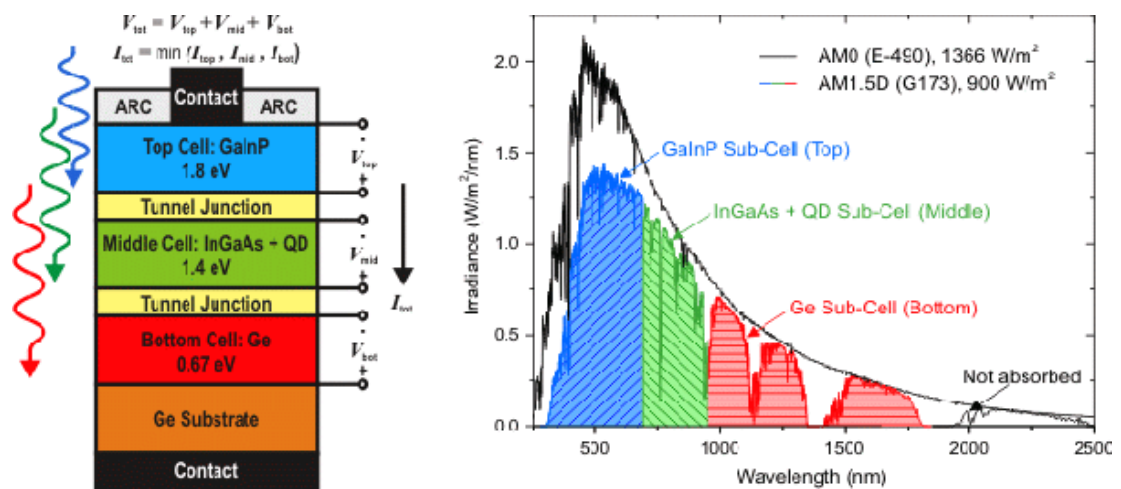
Pour tenir compte des effets ohmiques présents dans les cellules solaires réelles, deux éléments supplémentaires doivent être ajoutés au circuit, comme la montre la figure II.6. Une résistance ( $R_{sh}$ ) en parallèle avec les éléments de la modélisation idéale qui représente l'effet de la pénétration des impuretés métalliques dans la jonction ; et une résistance série ( $R_s$ ) qui modélisant les pertes ohmiques dans la structure (contacts, couches semi-conductrices, substrat...).[30]



**Figure II.6 :** Modèle électrique d'une cellule photovoltaïque.[30]

Le tracé de la courbe IV permet d'extraire les grandeurs caractéristiques du générateur solaire. On note  $I_{sc}$ , le courant de court-circuit de la cellule et  $V_{oc}$  la tension de circuit ouvert. Le point de puissance maximum est noté  $P_{MPP}$  et permet de définir le facteur de forme de la caractéristique ou « Fill Factor », noté FF, qui correspond au rapport de  $P_{MPP}$  sur le produit  $V_{oc} \times I_{sc}$ . Les notations  $I_{MPP}$  et  $V_{MPP}$  sont respectivement le courant et la tension au point de puissance maximale. Ces valeurs caractéristiques dépendent de grandeurs intrinsèques à la cellule : le matériau et la taille, mais aussi de grandeurs extrinsèques : l'illumination et la température. Une fois ces paramètres définis, nous pouvons désormais introduire la notion de rendement de conversion électrique  $\eta_{el}$  qui correspond au rapport entre la puissance électrique générée  $P_{MPP}$  et la puissance lumineuse incidente sur la jonction. On pourra également parler d'efficacité de conversion électrique. Ce rendement possède une limite théorique maximale pour chaque matériau, la limite de Queisser et Shockley [31]. Cette limite dépend de la valeur d'énergie de gap du semi-conducteur et du spectre d'illumination. Par exemple pour une cellule silicium avec un énergie de gap  $E_g = 1.12$  eV, le ratio maximal de conversion électrique est de 29 % sous un spectre solaire de  $1000$  W/m<sup>2</sup>. Cette limitation est inhérente à la réponse spectrale de la cellule qui donne la valeur de la densité de courant du court-circuit photo généré par unité de flux monochromatique incident. Seul un photon d'énergie supérieure ou égale à  $E_g$  sera capable de libérer un électron. Les photons incidents d'énergie inférieure quant à eux traverseront la jonction. L'excès d'énergie supérieure à  $E_g$

sera dissipé sous forme de chaleur. Pour dépasser cette limite de 29%, il est possible de combiner des matériaux aux énergies de gap différent afin d'optimiser la réponse spectrale du dispositif. C'est le principe de la cellule multi jonction. En 1980, Alexis de Vos a pu montrer, en se basant sur les travaux de Queisser et Shockley, qu'en assemblant un nombre infini de jonctions, la limite de conversion théorique atteint 86,8% [32]. La figure II.7 montre de quelle façon une cellule triple-jonction permet d'améliorer la conversion électrique du spectre solaire.

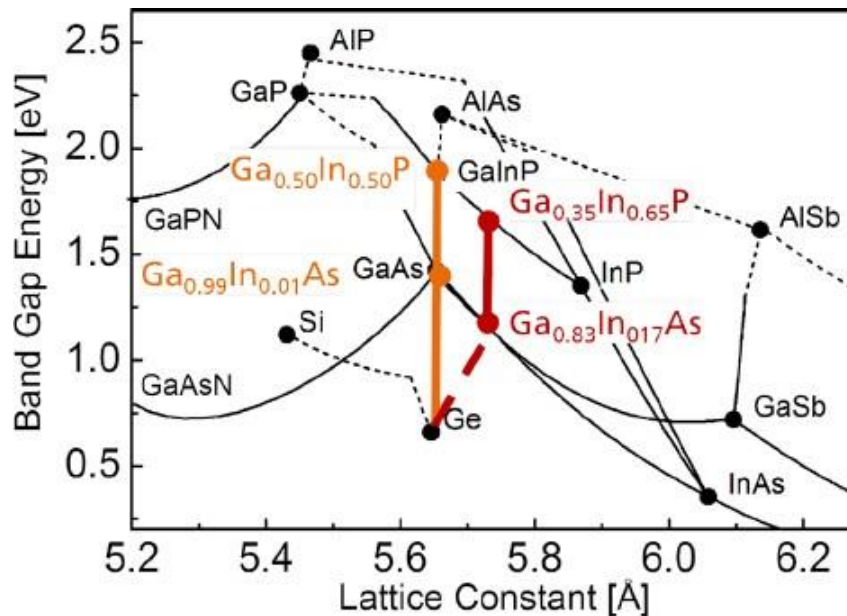


**Figure II.7 :** Illustration de la réponse spectrale de la conversion d'énergie du spectre solaire par une cellule triple-jonction GaInP/GaInAs/Ge.[33]

Aujourd'hui, les cellules les plus utilisés dans la concentration sont les cellules triples jonctions. Chaque type de semi-conducteur est caractérisé par une longueur d'onde maximale au-delà de laquelle il est incapable de convertir le photon en énergie électrique. D'un autre côté, en deçà de cette longueur d'onde, le surplus d'énergie véhiculé par le photon est perdu. D'où l'intérêt de choisir des matériaux avec des longueurs aussi proches les unes des autres que possible (en multipliant leur nombre d'autant) de manière à ce qu'une majorité du spectre solaire soit absorbé, ce qui génère un maximum d'électricité à partir du flux solaire. [34]

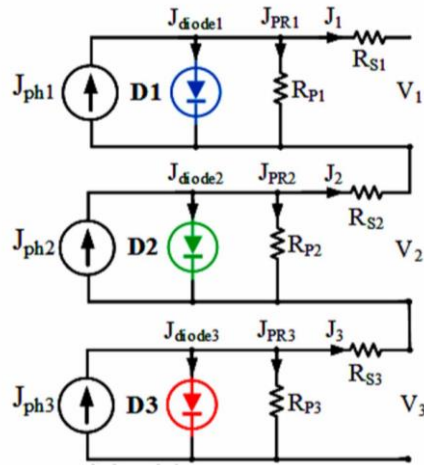
La cellule triple jonction dite à structure en accord de maille ou Lattice-Matched (LM), figure II.8. Les matériaux semi-conducteurs des jonctions de cellules LM ont des paramètres de maille très proches, ce qui permet une croissance monolithique par épitaxie. La première jonction est en phosphore d'indium gallium, noté GaInP et de bandgap 1,86eV. Le matériau

de la seconde jonction est l'arséniure de gallium, noté GaAs avec un bandgap de 1,41eV. Enfin, la troisième jonction est en germanium, noté Ge de bandgap 0,67eV. Nous nommerons ces trois jonctions respectivement Top, Middle et Bottom vis-à-vis de leur position dans l'empilement selon la direction du rayonnement incident. Cette structure a certes permis d'atteindre une efficacité de 44% à 942X [35]. Mais elle présente sous illumination solaire un excès de courant généré important sur la jonction Bottom. Afin de diminuer la perte de puissance due à cet écart de courant, souvent appelé current mismatch, entre la jonction Bottom et les deux autres, les structures métamorphique (MM) et métamorphique inversée (IMM) ont fait leur apparition dans les années 2000. Ces structures métamorphiques permettent l'empilement de matériaux avec des paramètres de mailles différents [36]. On accède ainsi à des matériaux dont les bandgap permettent une meilleure répartition de l'énergie solaire sur les jonctions et donc un meilleur optimum de puissance du dispositif. La technologie MM en croissance directe est aujourd'hui proposée par les principaux fabricants de cellules triple-jonctions pour le CPV terrestre mais également pour les applications spatiales [37] [38] et vient remplacer progressivement la cellule LM. Les matériaux des jonctions sont GaInP (1,82eV), GaInAs (1,33eV) et Ge (0,66eV).



**Figure II.8 :** Représentation des structures Lattice-Matched LM (en orange) et métamorphique MM (en rouge) d'une cellule triple jonction GaInP/GaInAs/Ge.[37]

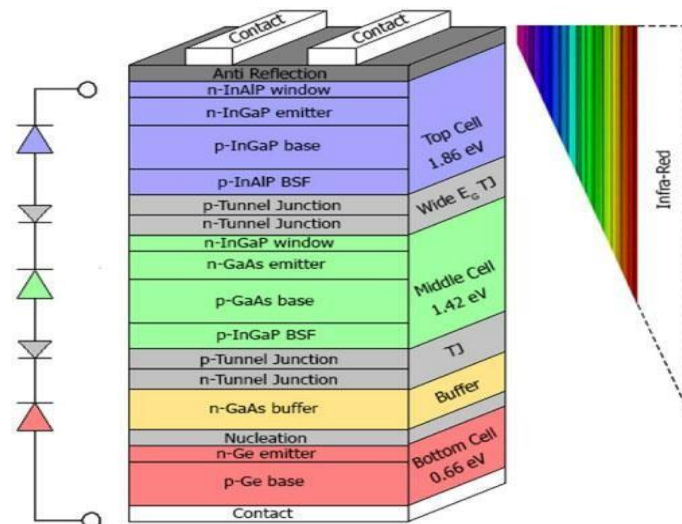
Le circuit électrique équivalent de la cellule triple jonctions est présenté dans la figure II.9 :



**Figure II.9 :** circuit équivalent de la cellule photovoltaïque triple jonctions. [40]

Où  $J_{ph_i}$ ,  $J_{diode}$ ,  $J_{RP}$ ,  $V_i$ ,  $J_i$ ,  $R_S$ ,  $R_P$ ,  $J_0$  représentent respectivement la densité du courant photonique dans la cellule en  $A/cm^2$ , courant de diode en  $A/cm^2$ , densité de courant de résistance parallèle de dérivation  $A/cm^2$ , la tension d'exploitation dans la cellule en V, densité de courant de fonctionnement par jonctions en  $A/cm^2$ , résistance de série en  $\Omega$ , résistance parallèle « Shunt »  $\Omega$  et densité de courant de saturation inverse en  $A/cm^2$ . [39]

Les cellules solaires à triple jonction III.V utilisées étaient composées de jonctions monolithiques InGaP/InGaAs/Ge en cascade connectées en séries sans revêtement antireflet. En bref, les trois couches ont toutes été appariées sur un réseau et cultivées sur un substrat de Ge de type P par dépôt en phase vapeur par un procédé organo-chimique (MOCVD). La sous-cellule InGaP est connectée à la sous-cellule InGaAs par une jonction tunnel p-AlGaAs / n-InGaP. La sous-cellule InGaAs est ensuite connectée à la sous-cellule Ge par une jonction tunnel p-GaAs / n-GaAs. Le schéma de la structure solaire à trois jonctions InGaP / InGaAs / Ge typique étudiée est représenté sur la figure II.10: [40]

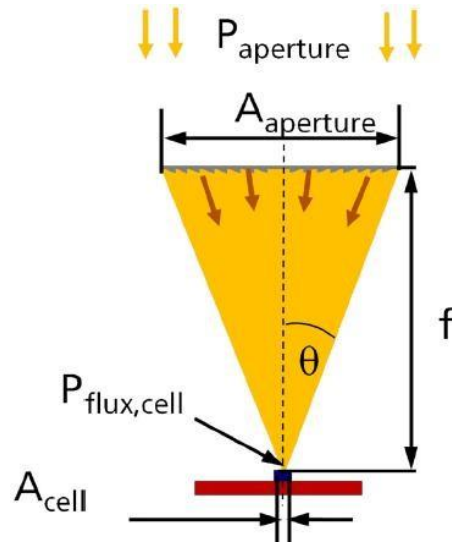


**Figure II.10:** Conception des cellules à jonctions multiples et profondeur de pénétration du spectre solaire illustrée.[40]

### II.2.3.2. La lentille de Fresnel :

Il s'agit d'une lentille plan-convexe pour augmenter la transmission comme il est présenté sur la figure II.11. C'est aujourd'hui le concentrateur le plus utilisé. Deux procédés sont utilisés actuellement pour fabriquer ces lentilles, l'un utilisant de la silicone et l'autre du plastique de type poly méthyle méthacrylate ou PMMA. Dans le cas de la silicone, celui-ci est moulé sur du verre [41]. Le côté verre fait face à l'extérieur résistant à la pluie, le vent ou la poussière. Pour le PMMA, la lentille est entièrement en plastique et fabriquée par moulage [42]. A transmittance égale, le choix entre ces deux matériaux peut se faire en fonction des problématiques suivantes :

- -Les lentilles en PMMA sont généralement moins coûteuses à fabriquer [43], mais la problématique de ce matériau est sa fiabilité à long terme, impactée par la dégradation due aux rayons ultraviolets et à l'abrasion. [44]
- -Les lentilles de type SoG (silicon on glass) se comportent mieux face aux rayons UV. L'inconvénient de cette solution provient de la différence de coefficient thermique d'expansion entre le verre et la silicone. Cette différence est source de contraintes et de déformation qui vont affecter les performances de la lentille à différentes températures.[45] [46] [47]



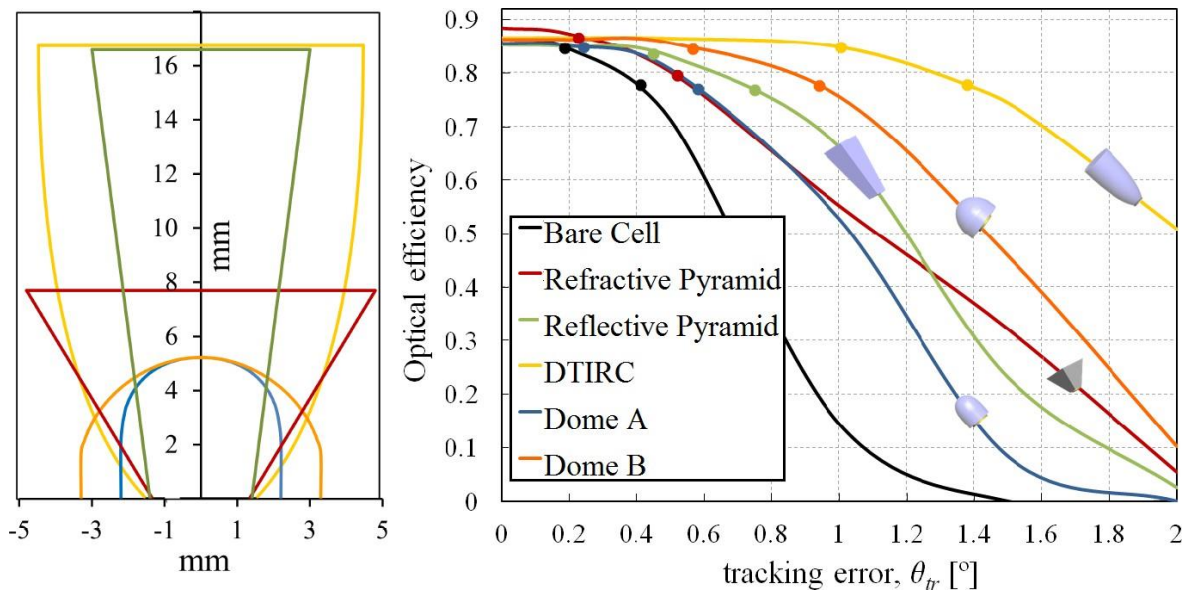
**Figure II. 11 :** Schéma du concept de la lentille de Fresnel, avec : la distance focale  $f$ , le demi-angle d'ouverture  $\theta$ , la surface d'ouverture  $A_{aperture}$ , la surface cellule  $A_{cell}$ , la puissance incidente  $P_{aperture}$  et la puissance délivrée par la cellule  $P_{flux, cell}$ . [48]

### II.2.3.3. L'homogénéiseur (optique secondaire) :

En plaçant une deuxième optique directement sur la cellule, aux abords de la focale de l'optique primaire, il est possible d'améliorer l'acceptance angulaire et la concentration du flux [49]. Ce type de dispositif homogénéise le flux sur la cellule. [50]

Dans notre cas, on a utilisé l'optique secondaire réfractive : plus répandue, elle est constituée d'un diélectrique transparent (du verre ou du plastique) qui redirige les rayons vers la cellule. Elle présente l'avantage de protéger la cellule, et montrent une bonne réflectivité interne.

La gamme d'optiques secondaires réfractives utilisées est large, on citera ainsi la pyramide réfractive inverse (RTP, pour Refractive Truncated Pyramid) [51], le dôme [52], ou encore le diélectrique à réflexion totale interne (DTIR pour Dielectric Total Internal Reflector) [53]. Pour ces deux derniers exemples, il est important de mentionner l'aspect non-imageant de ces optiques, le principe étant de maximiser l'intensité de la lumière atteignant la cellule, en s'affranchissant de la contrainte imageante des dispositifs optiques classiques [54]. La figure II.12 illustre les profils de ces optiques utilisés. Nous constatons que l'efficacité optique maximale est obtenue à incidence normale, lorsque le dispositif est aligné



**Figure II.12:** Profil des optiques secondaire (gauche) et courbe de transmission angulaire pour ces mêmes optiques (droite). Les dispositifs sont : pas d'optiques secondaire (noir), pyramide réfléchive (rouge), pyramide réfractive (vert), diélectrique à réflexion interne totale(jaune), dôme A (bleu)eu dôme B(orange).[54]

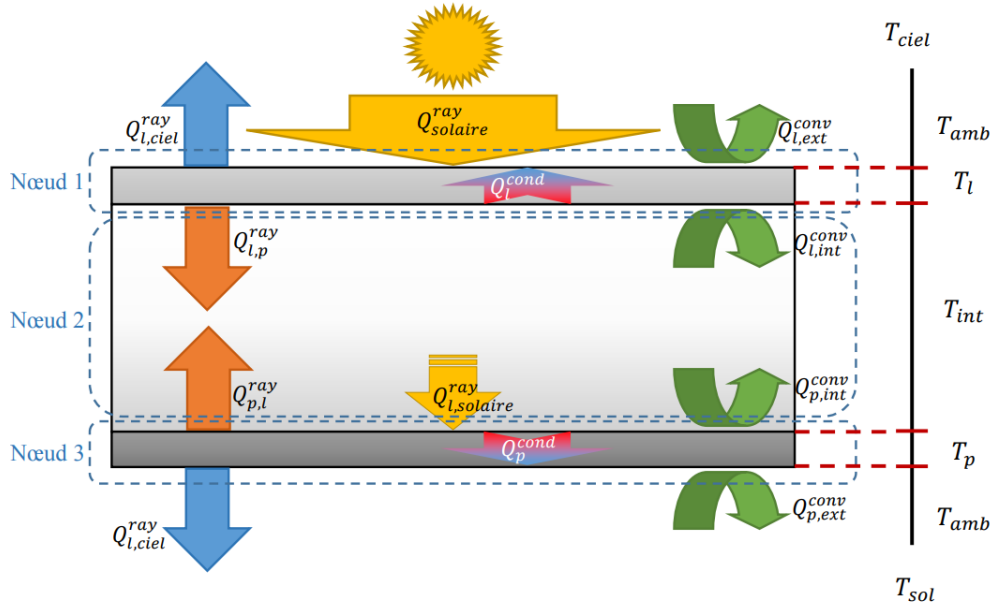
### II.2.3.3 Modélisation thermique :

Pour modéliser le comportement de notre pyréliomètre en régime stationnaire, on le discrétise fictivement par un certain nombre de nœuds. Les équations du régime stationnaire sont obtenues en écrivant les bilans énergétiques pour chaque nœud. Ce système d'équations est résolu par la méthode des variables d'état. La modélisation du module est basée sur une discrétisation nodale de celui-ci faisant apparaître 3 nœuds. Le nœud 1 correspond à la lentille de Fresnel faisant face au rayonnement incident. Le nœud 2 représente l'espace d'air entre la lentille et la plaque arrière. Le nœud 3 englobe la plaque arrière, figure II.13. Les pertes thermiques latérales sont négligeables. Le bilan thermique s'appuie sur les phénomènes suivants :

- Le rayonnement concentré par l'optique provoque l'échauffement de la cellule.
- La chaleur se dissipe via le substrat et la plaque arrière du dispositif.
- Cette plaque arrière évacue la chaleur par convection à l'intérieur et à l'extérieur du module.
- Le volume intérieur chauffé par la convection transfère une partie de cette chaleur à la lentille



- La lentille conduit cette chaleur vers l'extérieur. [48]



**Figure II. 13 :** Bilan thermique des trois nœuds 1,2 et 3.[48]

**Nœud 1 : Lentilles de Fresnel**, le transfert thermique est composé du rayonnement solaire  $Q_{solaire}^{ray}$ , du rayonnement du ciel  $Q_{l,ciel}^{ray}$ , du rayonnement de la plaque arrière  $Q_{l,p}^{ray}$ , de la convection externe avec l'air ambiant  $Q_{l,ext}^{conv}$ , de la convection interne dans la couche intérieure d'air  $Q_{l,int}^{conv}$  et de la conduction interne dans la couche intérieure de la lentille  $Q_l^{cond}$ .

$$Q_{solaire}^{ray} + Q_l^{cond} = Q_{l,ciel}^{ray} + Q_{l,p}^{ray} + Q_{l,ext}^{conv} + Q_{l,int}^{conv} \quad (II.6)$$

$$\alpha_l GNI + \frac{k_l}{e_l}(T_{int}-T_{amb}) = \frac{\sigma(T_l^4 - T_{ciel}^4)}{\frac{1}{\varepsilon_l} + \frac{1}{\varepsilon_{ciel}} - 1} + \frac{\sigma(T_l^4 - T_p^4)}{\frac{1}{\varepsilon_l} + \frac{1}{\varepsilon_p} - 1} + h_{ext}(T_l - T_{amb}) + h_{int}(T_l - T_{int}) \quad (II.7)$$

**Nœud 2 : Espace d'air**, le transfert thermique est composé uniquement par la convection avec la lentille  $Q_{int,l}^{conv}$  et la plaque arrière  $Q_{int,p}^{conv}$

$$Q_{int,l}^{conv} + Q_{int,p}^{conv} = 0 \quad (II.8)$$

$$h_{int}(T_{int} - T_l) + h_{int}(T_{int} - T_p) = 0 \quad (II.9)$$

**Nœud 3 : Plaque arrière**, le transfert thermique est composé par le rayonnement solaire Traversant la lentille  $Q_{solaire,l}^{ray}$ , le rayonnement de la lentille  $Q_{p,l}^{ray}$ , le rayonnement du sol  $Q_{p,sol}^{ray}$ , la convection externe avec l'air ambiant  $Q_{p,ext}^{conv}$ , la convection interne avec l'air

intérieur  $Q_{p,int}^{conv}$ , la conduction interne à travers la plaque  $Q_p^{cond}$  et la puissance de sortie par unité de surface  $P$ .

$$Q_{solaire,l}^{ray} + Q_p^{cond} = Q_{p,l}^{ray} + Q_{p,sol}^{ray} + Q_{p,ext}^{conv} + Q_{p,int}^{conv} + P \quad (II.10)$$

$$\alpha_{p\tau_l} GNI + \frac{k_p}{e_p} (T_{int} - T_{amb}) = \frac{\sigma(T_p^4 - T_l^4)}{\frac{1}{\varepsilon_p} + \frac{1}{\varepsilon_l} - 1} + \frac{\sigma(T_p^4 - T_{sol}^4)}{\frac{1}{\varepsilon_p} + \frac{1}{\varepsilon_{sol}} - 1} + h_{ext}(T_p - T_{amb}) + h_{int}(T_p - T_{int}) + P \quad (II.11)$$

$T_l$  est la température de la lentille,  $T_p$  est la température de la plaque arrière et  $T_{int}$  est la température de l'air intérieur.

Les facteurs de transmission de la lentille ( $\tau_l$ ), des facteurs d'absorption ( $\alpha_l$ ,  $\alpha_p$ ) et des facteurs d'émissivité ( $\varepsilon_{ciel}$ ,  $\varepsilon_l$ ,  $\varepsilon_p$ ,  $\varepsilon_{sol}$ ), la conductivité thermique ( $k_l$ ,  $k_p$ ), les épaisseurs ( $e_l$ ,  $e_p$ ) sont initialement définies en fonction des propriétés du matériau et de la géométrie du module. [48]

#### **II.2.4. Conclusion :**

Ce chapitre est un rappel des concepts dominants pour une conception du photovoltaïque sous flux concentré utilisant des cellules multi jonctions. Nous avons ainsi défini les paramètres essentiels pour ce domaine et exprimer sous forme d'équation ou de graphe les phénomènes pertinents. Le volet expérimental, il sera abordé dans le chapitre suivant.

---

## **CHAPITRE III**

### **Etude expérimentale d'un pyréliomètre à base d'une cellule triple jonctions**

---

### **3.1 Introduction :**

Dans cette partie, nous allons parler des étapes de la réalisation de notre pyréliomètre proposé ainsi que le système de suivi. Nous reportons en détail les instrumentations utilisés. Ainsi que la simulation de la cellule triple jonctions sous SIMULINK.

Dans cette partie, nous aborderons les étapes de réalisation du pyréliomètre proposé, ainsi que du système de suivi. Nous détaillerons également les instruments utilisés et la modélisation de la cellule triple jonctions sous SIMULINK.

Pour la réalisation du pyréliomètre, nous avons suivi les étapes suivantes :

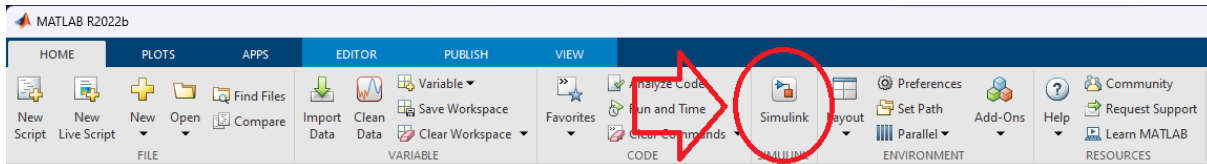
- ✓ Choix de l'optique : Nous avons opté pour une lentille de Fresnel comme optique primaire afin de concentrer le rayonnement solaire sur notre dispositif. Cette lentille a été sélectionnée en raison de ses propriétés de focalisation et de son efficacité.
- ✓ Sélection de la cellule à triple jonctions : Nous avons choisi une cellule à triple jonctions pour sa capacité à convertir efficacement la lumière solaire en énergie électrique. Cette cellule est composée de trois couches semi-conductrices, chacune optimisée pour absorber différentes longueurs d'onde du spectre solaire.
- ✓ Intégration de l'homogénéiseur : Nous avons associé un homogénéiseur à notre optique secondaire afin de garantir une répartition uniforme du rayonnement solaire sur la cellule triple jonctions. Cela permet d'optimiser la performance de la cellule en évitant les variations d'éclairement.
- ✓ Système de suivi : Pour assurer un suivi précis du soleil, nous avons utilisé un moteur pas à pas (NEMA 23) relié à une carte Arduino UNO R3. Cette configuration nous permet de contrôler avec précision les mouvements du pyréliomètre et de maintenir une orientation optimale vers la source solaire.

### **3.2 Simulation de la cellule sous SIMULINK :**

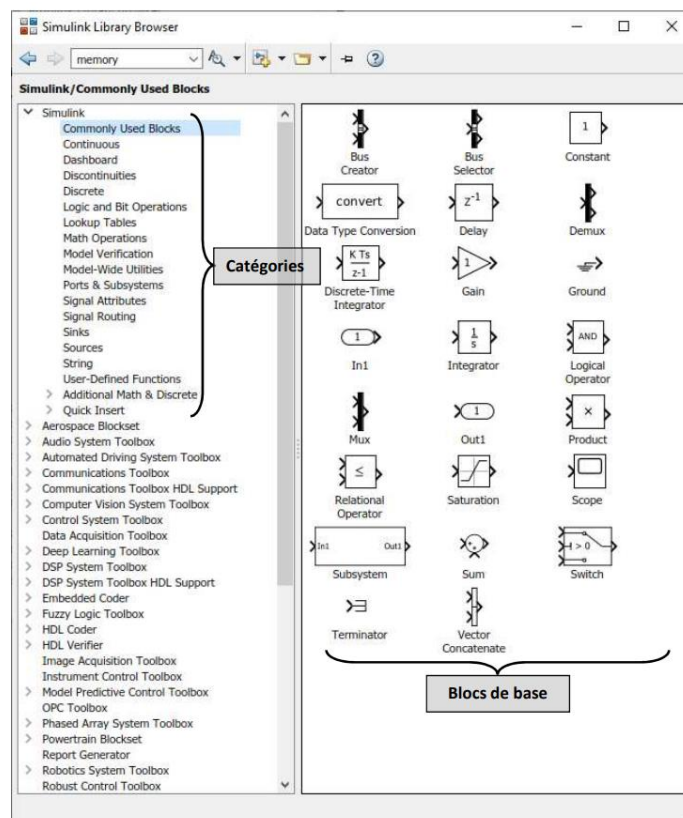
#### **3.2.1 Présentation du logiciel SIMULINK :**

Simulink est un module faisant parti de l'environnement de programmation MATLAB. Il est utilisé pour modéliser et analyser, d'une manière graphique, les systèmes dynamiques, par le biais de blocs graphiques de base. Un système dynamique est construit graphiquement en associant les différents blocs Simulink représentant les éléments de base du système.

Une fois prêt, le modèle peut être utilisé pour simuler le comportement du système dynamique et examiner ces réponses pour n'importe quelle excitation considérée.



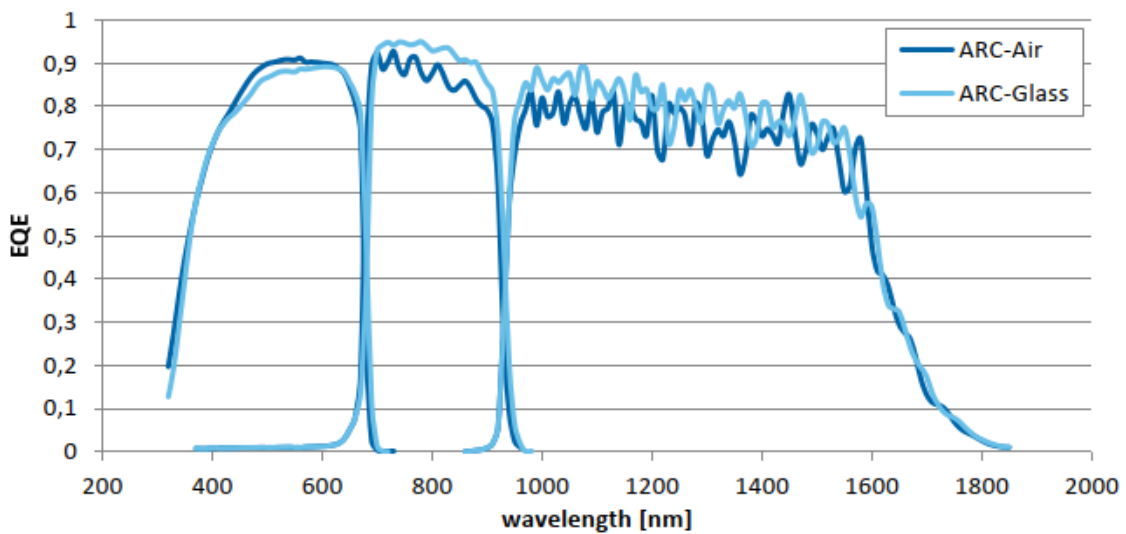
**Figure III.1 :** Ouverture de la fenêtre du Simulink en cliquant sur l'icône de Simulink dans la barre d'outils du haut dans la fenêtre principale de MATLAB.



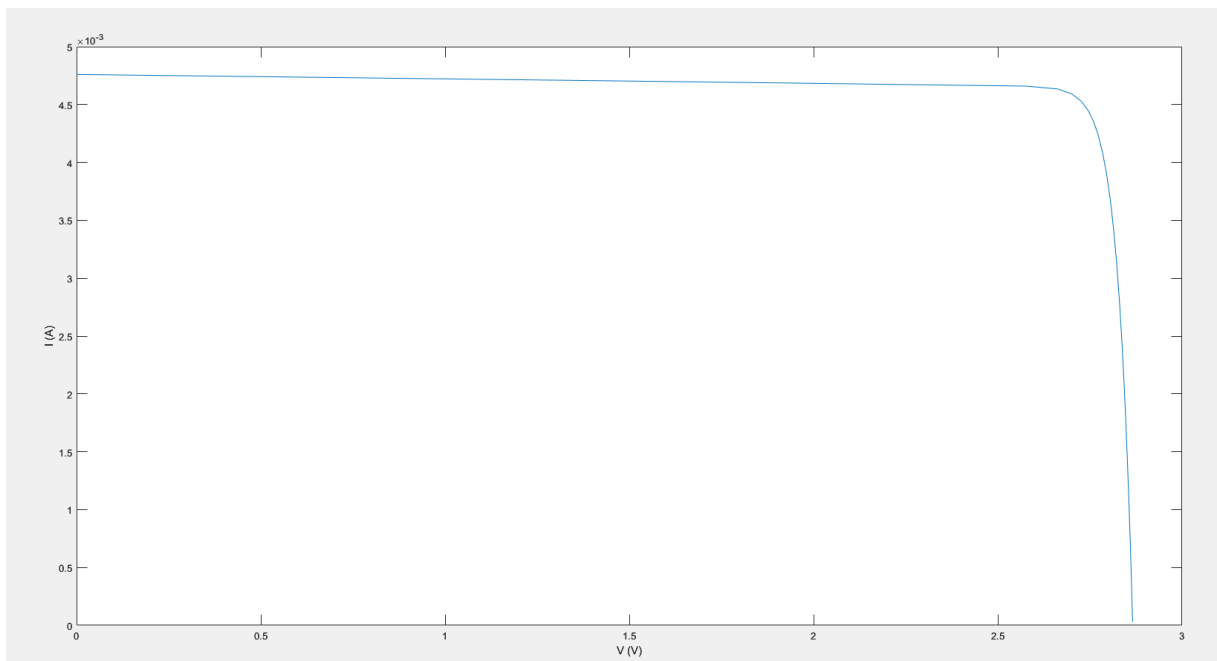
**Figure III.2 :** Fenêtre Blocs de base de Simulink.

### **3.2.2 Schéma de la simulation de la cellule triple jonctions :**

La cellule triple jonctions utilisée « AzurSpace 3C44-5.5\*5.5mm<sup>2</sup> » dans notre réalisation a un courant de court-circuit égale à 4.75 mA et une tension circuit ouverte égale à 2.8V dans les conditions STC . Le spectre qu'elle couvre est présenté dans la figure III.3, et la figure III.4 montre sa courbe (I-V).

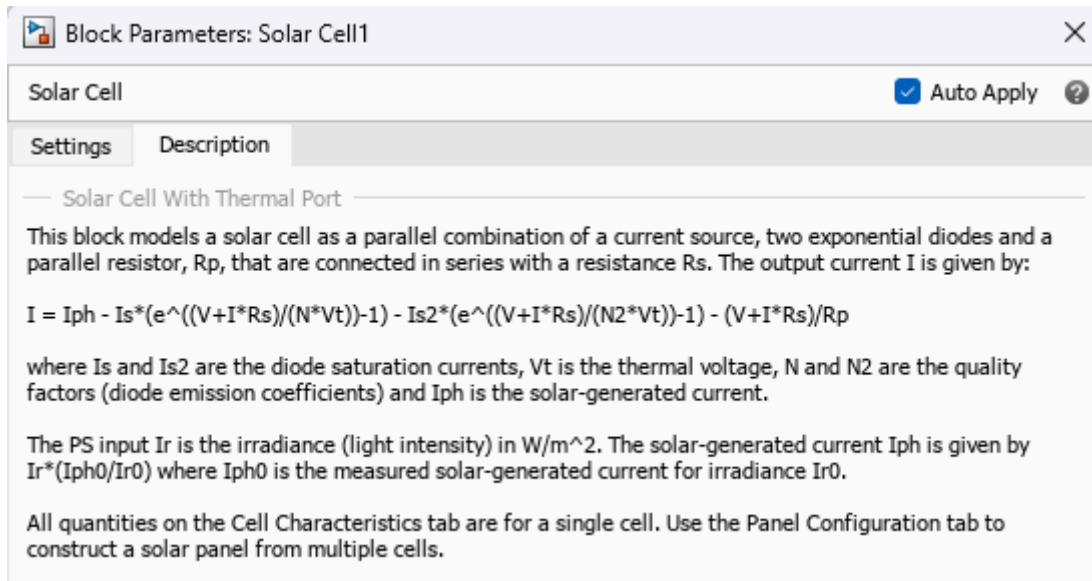


**Figure III.3 :** le spectre lumineux couvré par la cellule triple jonctions (GaInP/GaInAs/Ge).

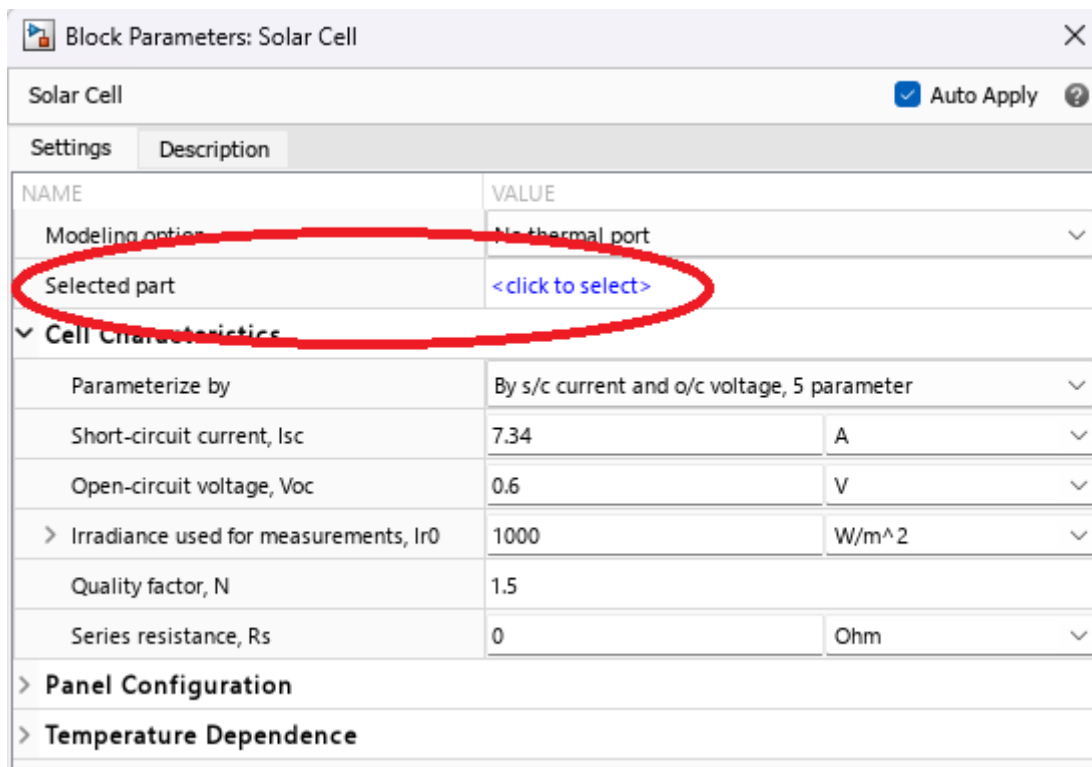


**Figure III.4 :** Caractéristique (I-V) de la cellule triple jonctions (GaInP/GaInAs/Ge).

Pour obtenir un modèle d'éclairage qui correspond à notre cellule triple jonctions, on l'a simulé pour des niveaux d'éclairages différents à une température constante et pour des températures différentes à un niveau d'éclairage constant comme est montrée dans la figure III.4 dans l'environnement Simulink. Les étapes de simulation sont présentées dans les figures suivantes ainsi que les paramètres de la cellule triple jonctions :



**Figure III.5 :** Présentation du block du cellule solaire sous SIMULINK.



**Figure III.6 :** La sélection de la cellule solaire sous SIMULINK.

Part number	Manufacturer	Physics	PanelType	Pm,W	Voc(STC),V	Isc(STC),A	Vm(STC),V	Im(STC),A
AS_0M30_HC_32	Amerisolar	Mono-crystalline Si	Half cell	320.0000	40.2000	10.1400	33.4000	9.5900
AS_0M_360W_FE	Amerisolar	Mono-crystalline Si	Full cell	355.0000	47.4000	9.6400	38.8000	9.1500
AS_6P30_HC_280W	Amerisolar	Poly-crystalline Si	Half cell	280.0000	38.6000	9.4200	31.4000	8.9200
AS_6P_HC_340W	Amerisolar	Poly-crystalline Si	Half cell	340.0000	46.2000	9.4400	38.2000	8.9100
AS_6P_HC_360W	Amerisolar	Poly-crystalline Si	Half cell	360.0000	47.0000	9.7600	39.0000	9.2400
ThinFim_AS_100W	Amerisolar	Amorphous Si	Full cell	100.0000	115.8000	1.2700	94.4000	1.0600
ThinFim_AS_85W	Amerisolar	Amorphous Si	Full cell	85.0000	114.2000	1.1900	87.5000	0.9800
CHSM5001T_110W	Astronergy	Amorphous Si	Full cell	110.0000	134.9000	1.5660	89.4600	1.2300
3C44_30sqmm	AzurSpace	GainP/GainAs/Ge	Ge substrate, at 250 concentration	12.0000	3.0000	1.1560	2.8000	1.1700
3C44_9sqmm	AzurSpace	GainP/GainAs/Ge	Ge substrate, at 250 concentration	3.9200	3.0500	0.3700	2.8000	0.3600
CX1_80_3	Calyxo	CdTe	Thin film	80.0000	88.0000	1.5400	61.0000	1.3200
CX3_85_3	Calyxo	CdTe	Thin film	80.0000	59.4000	2.3800	43.2000	2.0300
CX4_100_3	Calyxo	CdTe	Thin film	100.0000	92.1000	1.5300	72.6000	1.3800
CX4_102_3	Calyxo	CdTe	Thin film	102.5000	92.9000	1.5300	73.9000	1.3800
CX4_105_3	Calyxo	CdTe	Thin film	105.0000	93.6000	1.5300	75.1000	1.4000

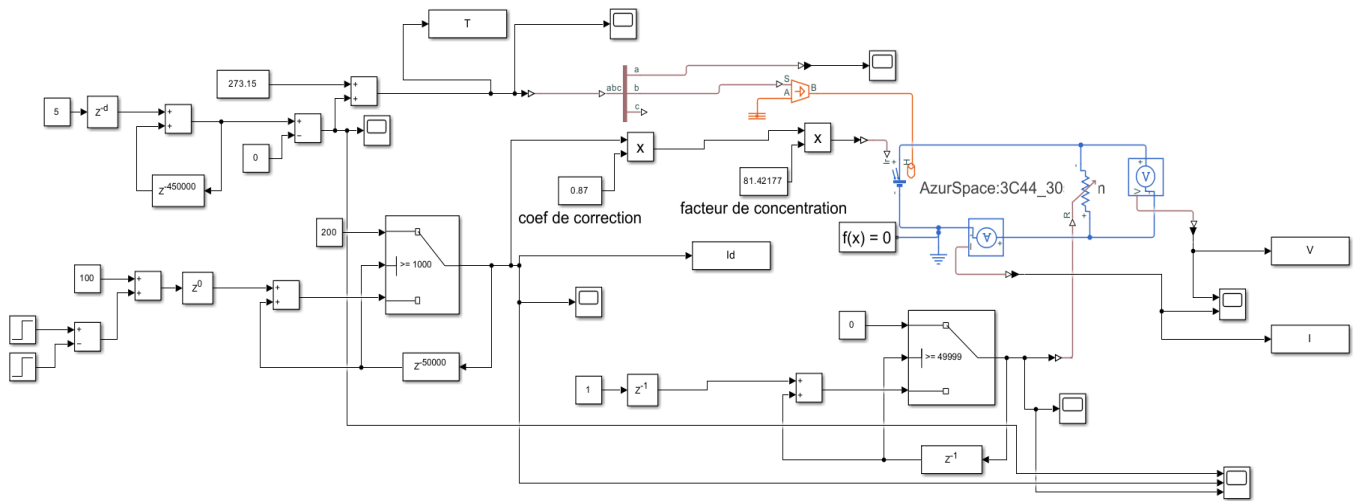
Parameter name	Parameterization	Override	Part value:3C44_...
Cell Characteristics>Short-circuit current, Isc	Datasheet derived	<input type="checkbox"/>	0.37
Cell Characteristics>Open-circuit voltage, Voc	Datasheet derived	<input checked="" type="checkbox"/>	3.05
Cell Characteristics>Diode saturation current, Is	Datasheet derived	<input type="checkbox"/>	0
Cell Characteristics>Diode saturation current, Is2	Datasheet derived	<input type="checkbox"/>	0
Cell Characteristics>Solar-generated current for measu...	Datasheet derived	<input checked="" type="checkbox"/>	0.37
Cell Characteristics>Irradiance used for measurements...	Datasheet derived	<input checked="" type="checkbox"/>	250000
Cell Characteristics>Quality factor, N	Datasheet derived	<input checked="" type="checkbox"/>	1.50364
Cell Characteristics>Quality factor, N2	Datasheet derived	<input checked="" type="checkbox"/>	1.73316
Cell Characteristics>Series resistance, Rs	Datasheet derived	<input checked="" type="checkbox"/>	0.30662
Cell Characteristics>Parallel resistance, Rp	Datasheet derived	<input checked="" type="checkbox"/>	90147.31597
Panel Configuration>Number of series-connected cells	Datasheet derived	<input type="checkbox"/>	1
Panel Configuration>Number of parallel-connected str...	Datasheet derived	<input type="checkbox"/>	1
Temperature Dependence>First order temperature coef...	Datasheet derived	<input checked="" type="checkbox"/>	0.0008
Temperature Dependence>Energy gap, EG	Datasheet derived	<input checked="" type="checkbox"/>	1.441
Temperature Dependence>Temperature exponent for I...	Datasheet derived	<input checked="" type="checkbox"/>	104.11594
Temperature Dependence>Temperature exponent for I...	Datasheet derived	<input checked="" type="checkbox"/>	5.5723

Figure III.7 : choix de la cellule solaire sous SIMULINK.

NAME	VALUE
Modeling option	Show thermal port
Selected part	AzurSpace:3C44_30sqmm
<b>Cell Characteristics</b>	
Parameterize by	By equivalent circuit parameters, 8 parameter
Diode saturation current, Is	2.73592960844769e-35 A
Diode saturation current, Is2	1.16779785679844e-37 A
Solar-generated current for measureme...	1.19000472592367 A
Irradiance used for measurements, Ir0	250000 W/m^2
Quality factor, N	1.50303550965723
Quality factor, N2	1.59525933684062
Series resistance, Rs	0.104281524604326 Ohm
Parallel resistance, Rp	26248.1045129446 Ohm
<b>Panel Configuration</b>	
<b>Temperature Dependence</b>	
First order temperature coefficient for I...	0.000799987520460482 1/K
Energy gap, EG	1.441 eV
Temperature exponent for Is, TXIS1	92.8777524632801
Temperature exponent for Is2, TXIS2	227.92622072394
Temperature exponent for Rs, TRS1	0.0216421647602992
Temperature exponent for Rp, TRP1	0 % Parameter not set
Measurement temperature	25 degC

Figure III.8 : Paramètres de la cellule triple jonctions (GaInP/GaInAs/Ge).





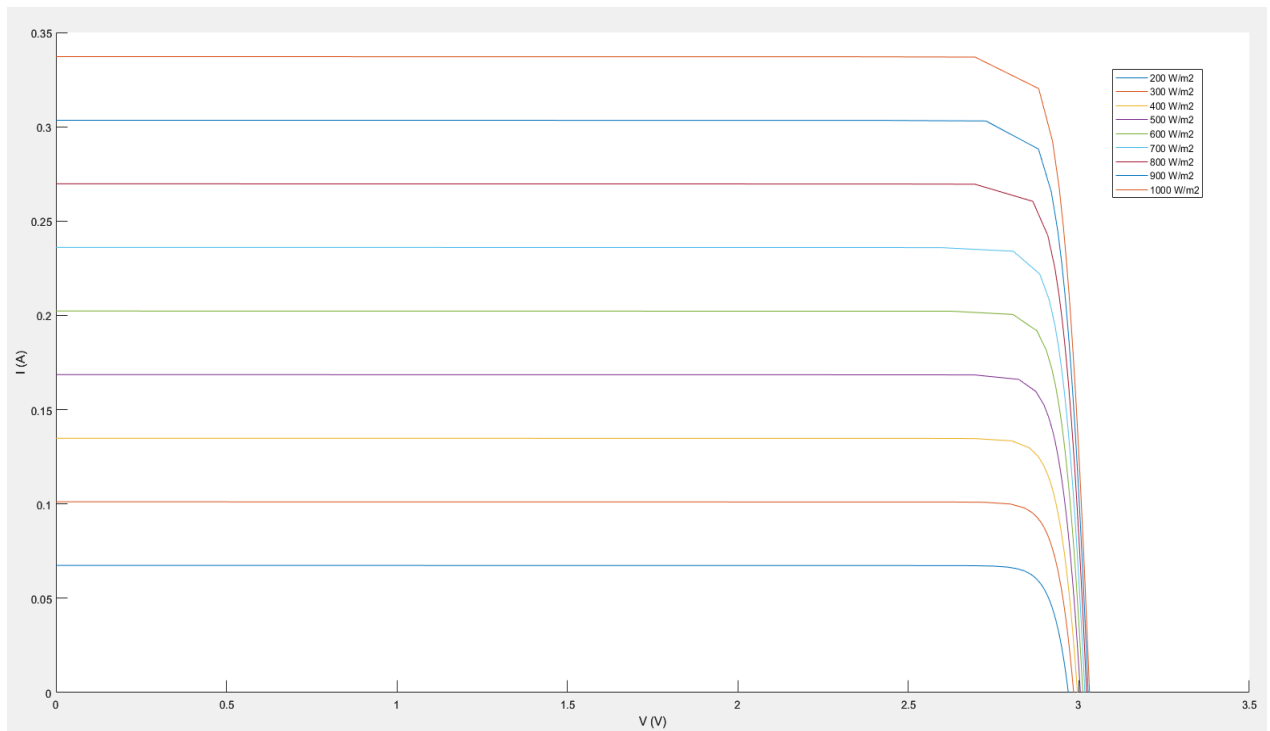
**Figure III.9 :** Schéma de la simulation de la cellule triple jonctions (GaInP/GaInAs/Ge) dans l'environnement Simulink.

### 3.2.3 Relation de l'éclairement direct en fonction de I, V et T :

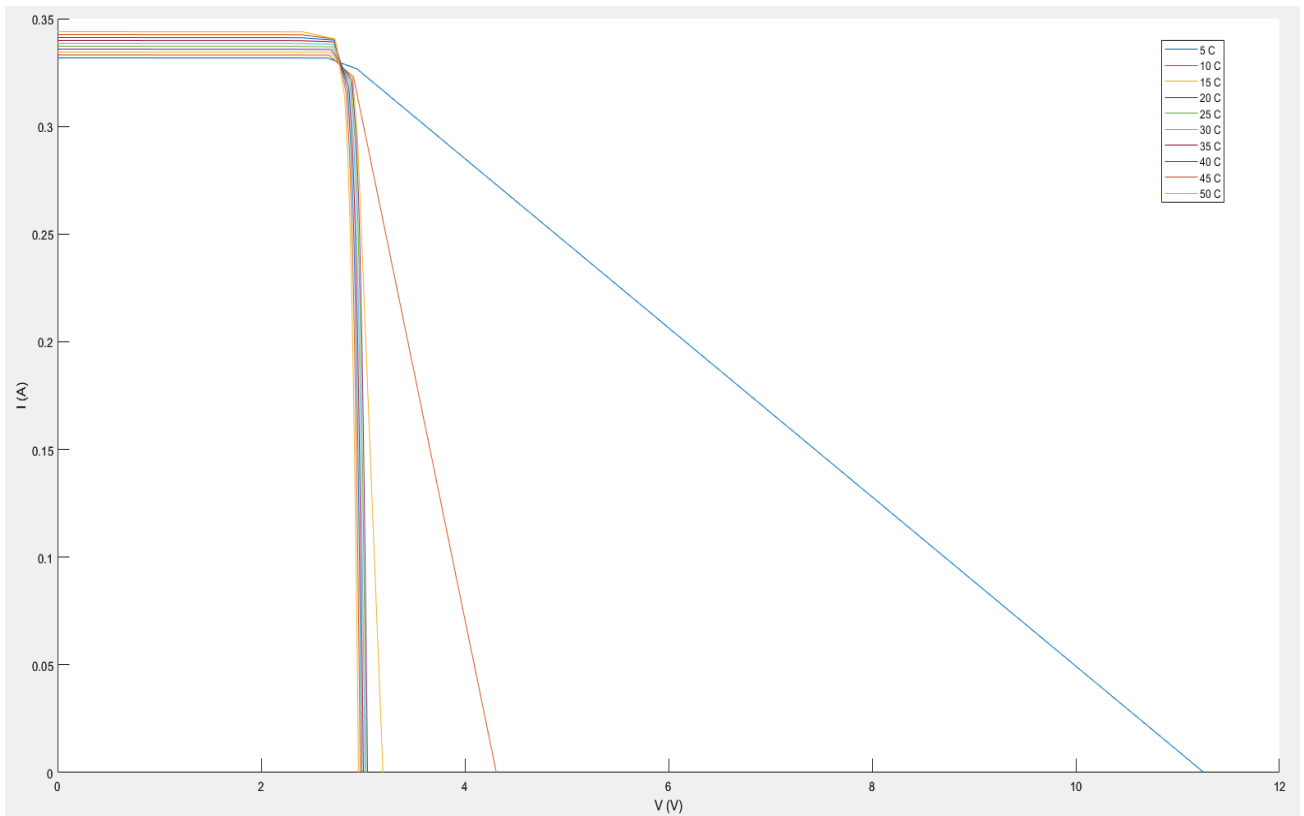
Dans notre cas, l'éclairement est concentré avec un facteur de concentration de 81.421773

$$C = \frac{S_r}{S_c} = \frac{\pi * \frac{5.6^2}{4}}{0.55 * 0.55}$$

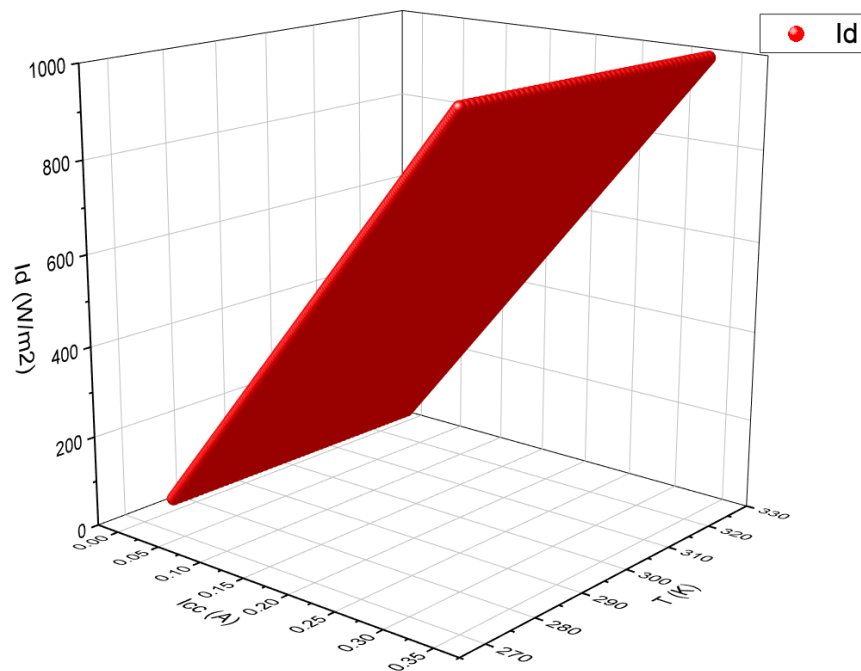
C'est inclus dans le programme de simulation donc les courants et les tensions générés seront amplifiés. Les résultats de simulation sont présentés dans les figures suivantes : la figure III.10 représente la caractéristique I(V) à une température constante (25°C) avec des niveaux d'éclairements constants, la figure III.11 représente la caractéristique I(V) à un niveau d'éclairement constant (1000 W/m<sup>2</sup>) avec des températures différentes (5°C à 50 °C, la figure III.12 représente la courbe de l'intensité en court-circuit (A) obtenue en fonction de l'éclairement et la température et la figure III.13 représente la courbe de la tension en circuit ouvert (V) obtenue en fonction de l'éclairement et la température.



**Figure III.10 :** caractéristique I(V) à 25°C pour des niveaux d'éclairéments différents.

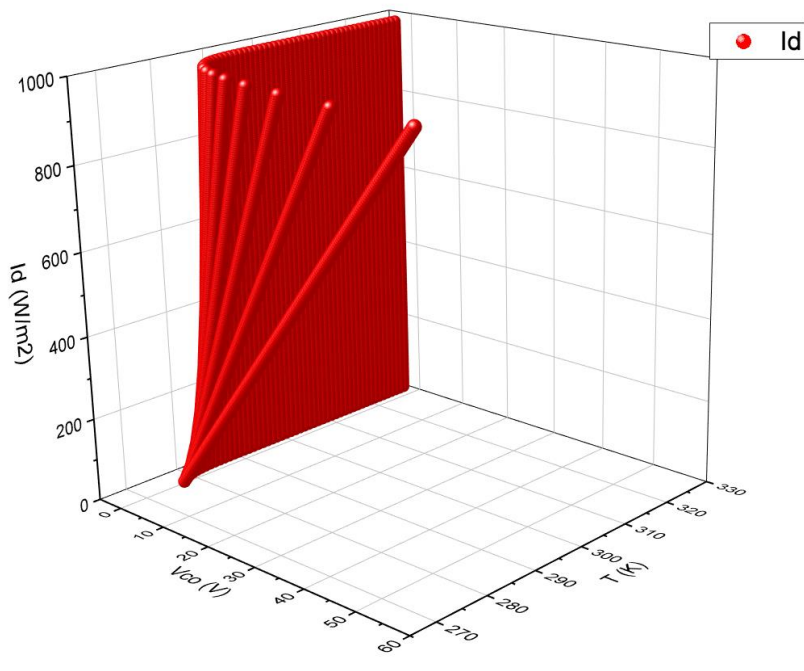


**Figure III.11 :** Caractéristique I(V) à 1000 w/m<sup>2</sup> avec des températures différentes (5°C à 50°C).



**Figure III.12 :** Courbe de l'intensité en court-circuit (A) obtenue en fonction de l'éclairement et la température (sous ORIGIN).

Cette courbe montre La variation linéaire de l'éclairement direct en fonction de courant de court-circuit quel que soit la température.



**Figure III.13 :** Courbe de la tension en circuit ouvert (V) obtenue en fonction de l'éclairement et la température (sous ORIGIN).

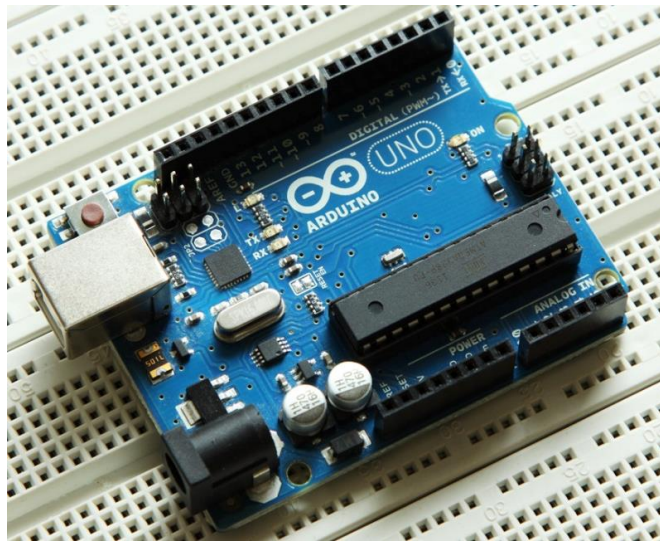
Cette courbe montre la variation de l'éclairement direct en fonction de la tension en circuit ouverte qui dépend de la température ( $T_{amb} > 20^{\circ}\text{C}$  : effet de la température sur  $V_{OC}$  négligeable,  $T_{amb} < 20^{\circ}\text{C}$  :  $V_{OC}$  dépend de  $T_{amb}$  et l'éclairement direct).

### **3.3 Modélisation du système de suivi :**

Pour que notre pyrhéliomètre soit pointé vers le soleil, il va être placé sur un système de suivi (traqueur) automatique.

#### **3.3.1 Présentation de la carte ARDUINO :**

Une carte ARDUINO est une petite carte électronique (de dimension 5,33 x 6,85 cm) équipée d'un microcontrôleur qui peut être programmé pour analyser et produire des signaux électriques. Elle permet de recevoir des informations et d'en transmettre depuis ou vers des matériels électroniques (diodes, potentiomètres, récepteurs, servomoteurs, moteurs, détecteurs...).[55]



**Figure III.14 :** La carte ARDUINO.[56]

##### **3.3.1.1 Programmation en ARDUINO :**

ARDUINO fournit un environnement de développement (IDE) avec un éditeur de source, les opérations de compilation et de chargement dans la mémoire du microcontrôleur étant ramenées à des clicks sur des boutons dans l'IDE (très simple). La communication entre le PC et la carte se fait via le port USB, moyennant installation d'un driver adapté sur le PC (fourni par ARDUINO).

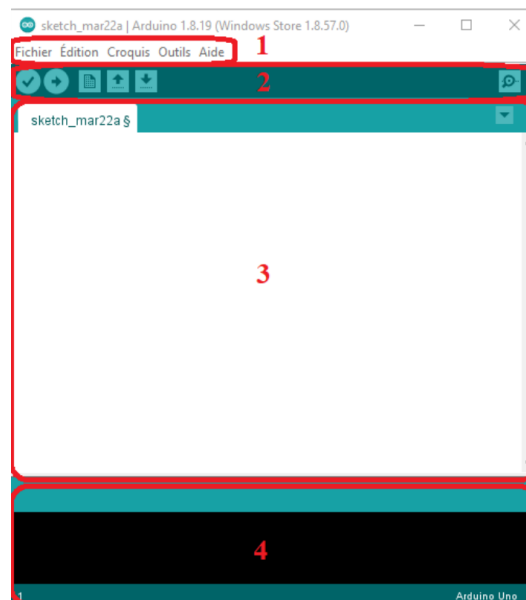
L'outil impose de structurer l'application de façon spécifique. Le compilateur utilisé est AVR GCC (compilateur C/C++ pour processeur AVR). Le programme principal est structuré en deux fonctions, dont voici les signatures ultra-simples :

- **Void setup ()**
- **Void Loop ()**

**-Setup ()** : est appelée une seule fois, au moment de la mise sous tension de la carte.

**-Loop ()** : est appelée, en boucle. Elle est lancée après setup (), et tourne à fond à l'infini (tant que la carte est alimentée en tout cas).[57]

Dans la figure qui suit à un objectif d'éclaircir la structure du logiciel, nous avons partagés la fenêtre en quatre cadres principaux :

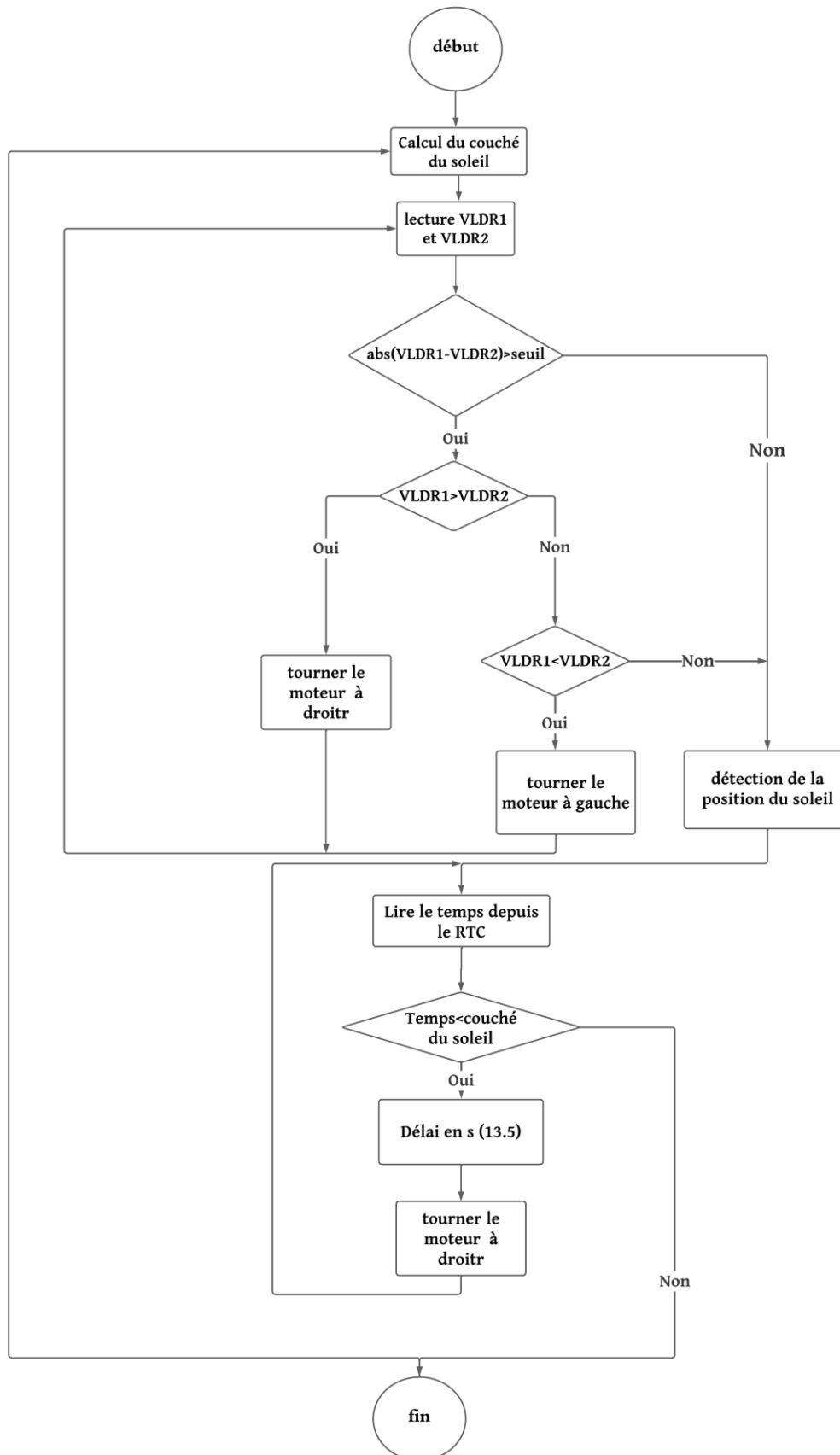


**Figure III.15 :** Interface d'ARDUINO.[58]

- **Le cadre numéro 1 :** ce sont les options de configuration du logiciel
- **Le cadre numéro 2 :** il contient les boutons qui vont nous servir lorsque l'on va programmer nos cartes
- **Le cadre numéro 3 :** ce bloc va contenir le programme que nous allons créer
- **Le cadre numéro 4 :** celui-ci est important, car il va nous aider à corriger les fautes dans notre programme. C'est le débogueur.[58]

### **3.3.2. Organigramme de la carte ARDUINO :**

Nous avons développé un organigramme du système de suivi réalisé (voir Figure III.14) :

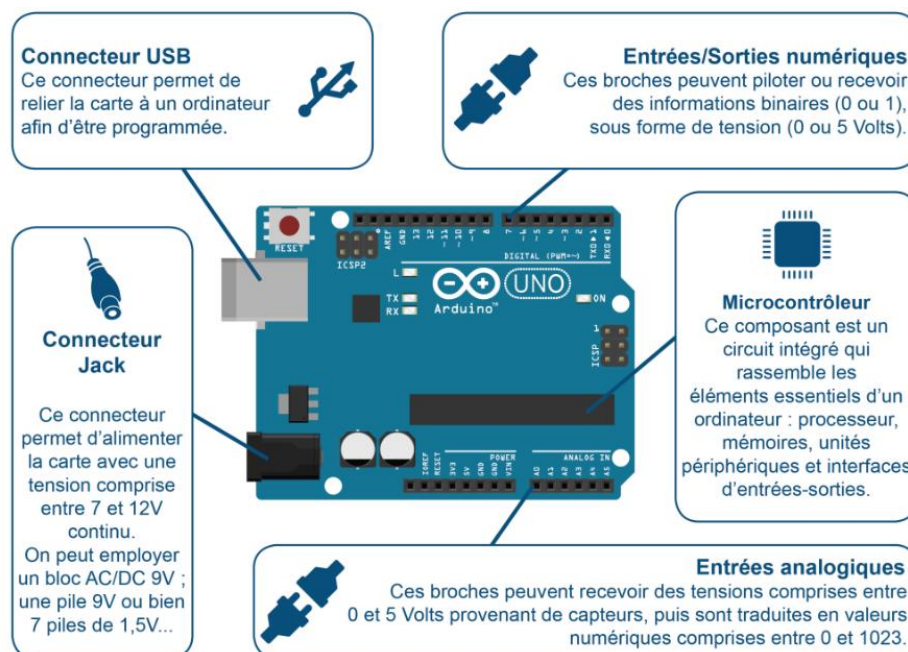


**Figure III.16 :** Organigramme du système de suivi.

### 3.3.3 Matériel utilisé dans le système de suivi :

#### 3.3.3.1. La carte ARDUINO UNO R3 :

Dans notre cas, on a utilisé une carte ARDUINO UNO qui est la première version stable de carte Arduino. Elle possède toutes les fonctionnalités d'un microcontrôleur classique en plus de sa simplicité d'utilisation. Elle utilise une puce R3 cadencée à 16 Mhz. Elle possède 32 ko de mémoire flash destinée à recevoir le programme, 2 ko de SRAM (mémoire vive) et 1 ko d'EEPROM (mémoire morte destinée aux données). Elle offre 14 pins (broches) d'entrée/sortie numérique (donnée acceptée 0 et 1) dont 6 pouvant générer des PWM (Pulse width Modulation). Elle permet aussi de mesurer des grandeurs analogiques grâce à ces 6 entrées analogiques. Chaque broche est capable de délivrer un courant de 40 mA pour une tension de 5V. Cette carte Arduino peut aussi s'alimenter et communiquer avec un ordinateur grâce à son port USB. On peut aussi l'alimenter avec une alimentation comprise en 7V et 12V grâce à son connecteur Power Jack.[59]



**Figure III.17 :** La carte ARDUINO UNO.[59]

➤ Caractéristiques techniques :

Microcontrôleur	R3
Fréquence d'horloge	16 MHz
Tension de service	5V
Tension d'entrée (recommandée)	5V
Tension d'entrée (limites)	6-20
Ports numériques	14 entrées et sorties (6 sorties commutables en MLI)
Ports-analogiques	6entrees analogiques
Courant maxi. Par broche d'E/S (c.c.)	40mA
Courant maxi. Par broche 3,3 V	50mA
Mémoire EEPROM	1 ko
Mémoire SRAM	2 ko
Mémoire FLASH	32 ko
Chargeur d'amorçage	0,5 Ko (en mémoire Flash)
Interface USB	USB

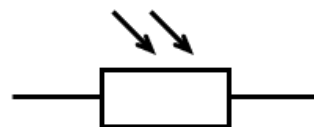
**Tableau III.1 :** Les caractéristiques technique d' ARDUINO UNO.[60]

**3.3.3.2. Photorésistance LDR :**

Une photorésistance (PhotoCells en anglais) est un composant électronique avec une résistance qui dépend du flux lumineux auquel il est exposé. Elles se nomment aussi LDR (Light Dependent Resistor) ou encore cellules photoconductrices. Elles permettent de détecter la lumière. On l'utilise principalement pour mesurer l'intensité lumineuse, la valeur de cette dernière diminue quand l'intensité de la luminosité augmente et vice-versa. Ces capteurs répondent à des lumières de longueur d'onde variant entre 400 nm (violet) et 600 nm (orange), avec un pic à environ 520 nm (vert). On peut donc les utiliser pour capter la lumière visible (dont la longueur d'onde  $\lambda$  se situe entre 400 et 600 nm). Elles sont également de petite taille (quelques centimètres carrés), économiques, tout en étant faciles à mettre en place dans un montage. [61]



Photorésistance



Symbole d'une photorésistance

**Figure III.18:** Symbol LDR.[61]



### 3.3.3.3. RTC (Real Time Clock):

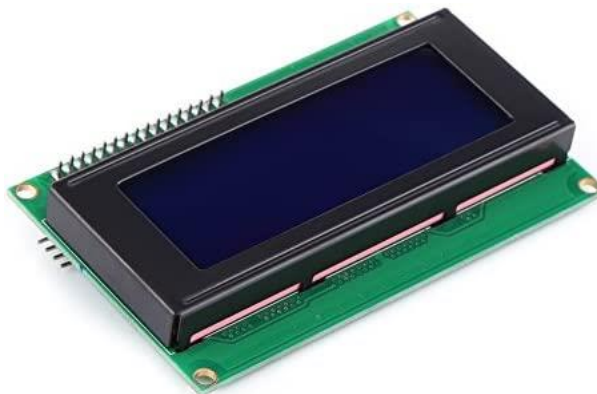
L'horloge temps réel (aussi appelé "RTC" ou bien "Real Time Clock") est une horloge numérique autonome qui donne l'heure quand on la lui demande. Ce genre d'horloge est très utile dans des projets de mesure de grandeurs physiques avec horodatage par exemple. Ce module RTC est capable de gérer l'heure (heures, minutes, secondes) et la date (jours, mois, année) tout en s'occupant des mois de 30 ou 31 jours, des années bissextiles, etc. [62]



**Figure III.19:** RTC (Real Time Clock).[62]

### 3.3.3.4. Écran de cristal liquide (LCD) :

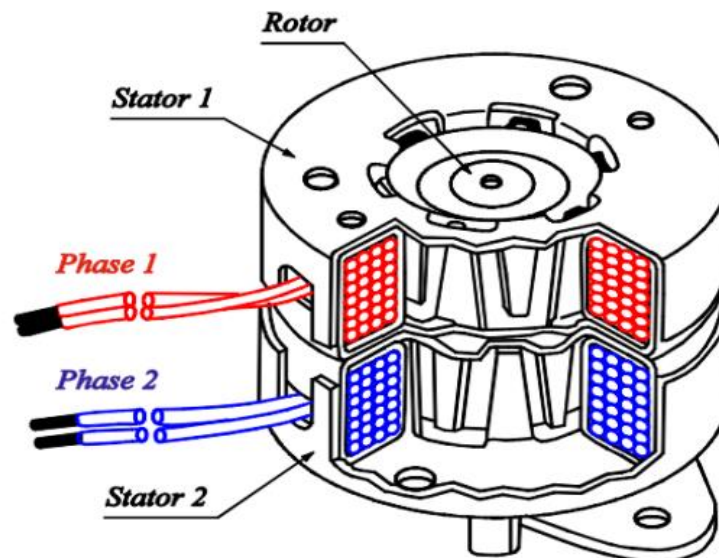
Les afficheurs à cristaux liquides, autrement appelés afficheurs LCD (Liquid Crystal Display), sont des modules compacts intelligents et nécessitent peu de composants externes pour un bon fonctionnement [63]. Ils sont très utilisés dans les montages à microcontrôleur, et permettent une grande convivialité. Ils peuvent aussi être utilisés lors de la phase de développement d'un programme, car on peut facilement y afficher les valeurs de différentes variables. Ces afficheurs marchent grâce à une alimentation. Ils existent différents types d'afficheur selon leurs caractéristiques techniques et selon leurs dimensions. Mais généralement ils accomplissent le même rôle.[64]



**Figure III.20 :** Afficheur LCD.[64]

### 3.3.3.5. Moteur PAS à PAS (Stepper Motor) :

Le moteur pas à pas est un convertisseur électromécanique qui assure la transformation d'un signal électrique impulsionnel en un déplacement mécanique (angulaire ou linéaire). Sa structure de base se présente sous la forme de deux pièces séparées mécaniquement, le Stator et le Rotor. L'interaction électromagnétique entre ces deux parties assure la rotation [65]. Chaque phase du stator reçoit tour à tour une impulsion électrique conventionnellement positive ou négative selon le sens du courant dans la bobine. Les impulsions arrivent dans un ordre prédéterminé de distribution et suivant une fréquence déterminée et réglable créant un champ magnétique qui attire le rotor pour tourner. Chacune de ces impulsions correspond à un déplacement angulaire appelé pas.[66]



**Figure III.21 :** Vue d'ensemble d'un moteur PAS à PAS (Stepper Motor).[67]

### 3.3.3.6. Thermocouple de type K avec module d'amplification MAX6675 :

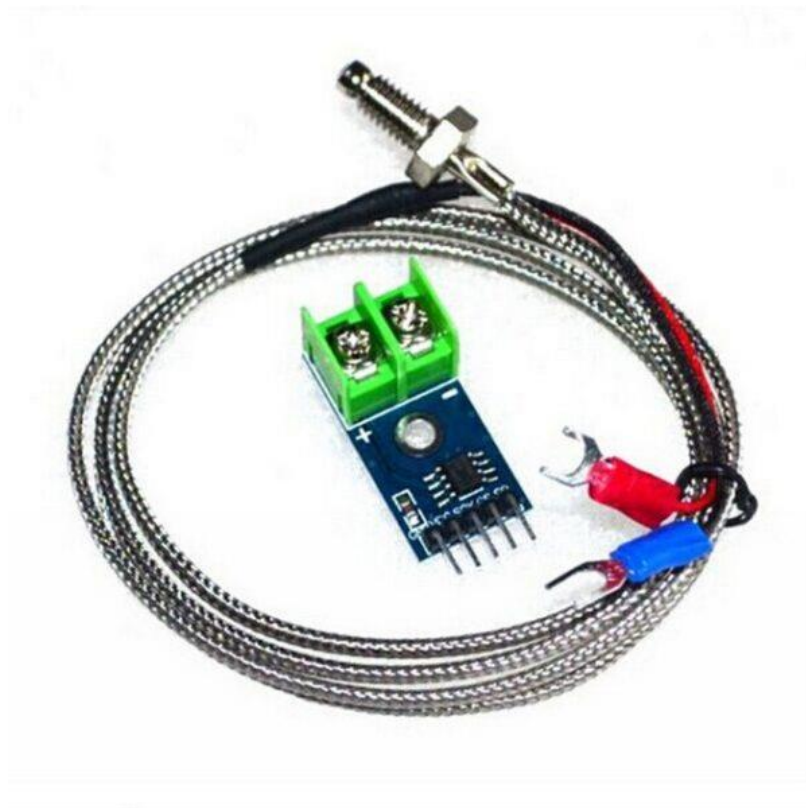
Un thermocouple utilise principalement l'effet Seebeck afin d'obtenir une mesure de la température. Si on réunit à une extrémité deux fils métalliques de natures différentes et que l'on élève la température de cette extrémité, il apparaît une tension aux extrémités restées libres. Il est possible de déterminer la température de l'extrémité chauffée à partir de la mesure de la tension.

On appelle :

- Soudure chaude : Jonction de l'ensemble thermocouple soumis à la température à mesurer : c'est la jonction Capteur.
- Soudure froide : Jonction de l'ensemble thermocouple maintenu à une température connue ou à 0 °C : c'est la jonction Référence.[68]

Le domaine d'utilisation et le prix d'un thermocouple dépendent des deux métaux utilisés. A chaque couple de métaux.

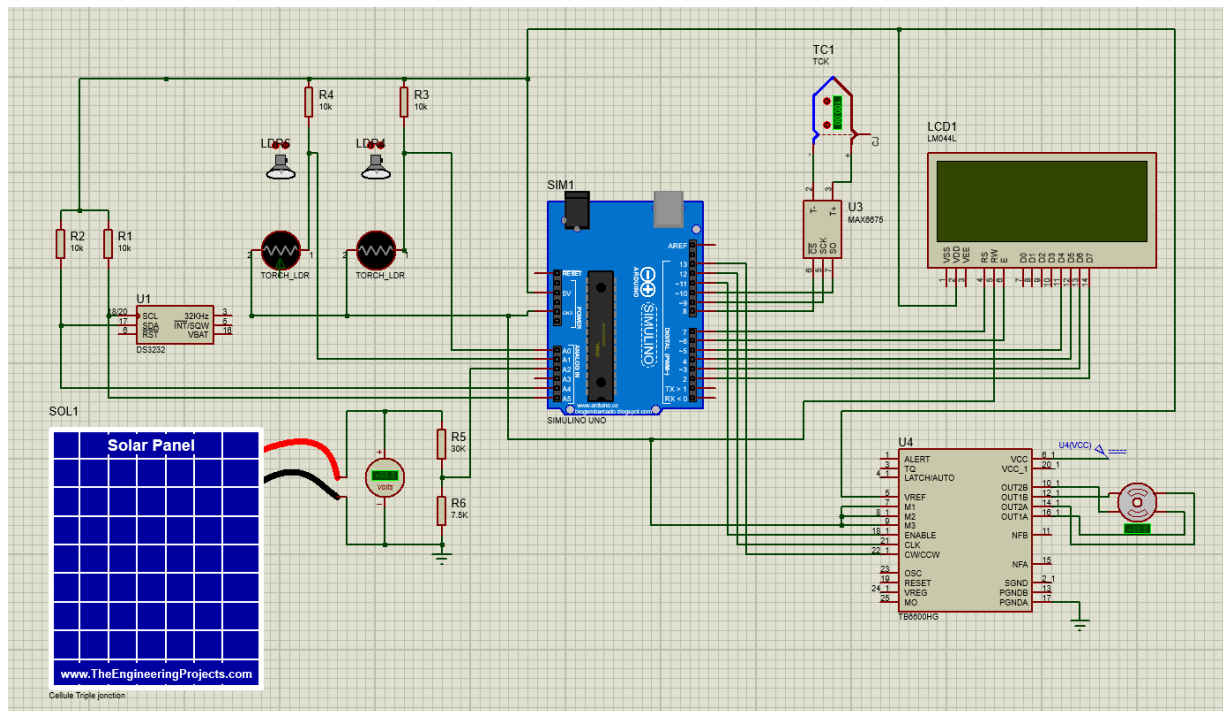
Dans notre cas, on a utilisé un thermocouple de type K qui comporte une injection entre chrome (alliage nickel +chrome) et alumelle (alliage nickel +aluminium + silicium). Une faible amplifie puis on convertit la mesure analogique en signal numérique en utilisant le module d'interface de conversion MAX6675, une liaison SPI permet de transmettre facilement à un microcontrôleur (ARDUINO) le résultat. Sa plage de température est de -40 à +1200°C. [69]



**Figure III.22 :** Thermocouple de type K avec un amplificateur max6675.[69]

### 3.3.4 Schéma électronique du système de suivi :

Le système de suivi se compose d'un stepper motor (moteur PAS à PAS bipolaire) relié avec une carte électronique. La carte électronique réalisée est composée d'une carte ARDUINO UNO, d'un driver Tb6600, de deux photorésistances, RTC (Real Time Clock), d'un afficheur LCD, et d'un thermocouple de type K avec module d'amplification MAX6675 comme est indiqué dans la figure III.23 :



**Figure III.23 :** Schéma de suiveur solaire (sous Proteus).

### 3.3.4 Principe de fonctionnement du système :

Le principe de fonctionnement du traqueur est le suivi sensible assuré par les photorésistances. Ce système basé sur la comparaison des tensions délivrées par ces photorésistances et envoyé vers la carte ADUINO UNO R3. Le programme compare ensuite ces tensions ordonnant le moteur PAS à PAS de pivoter dans la direction ou des photorésistances reçoivent le moins de lumière afin que notre pyréliomètre soit pointé vers le soleil.

### **3.4 Description du dispositif :**

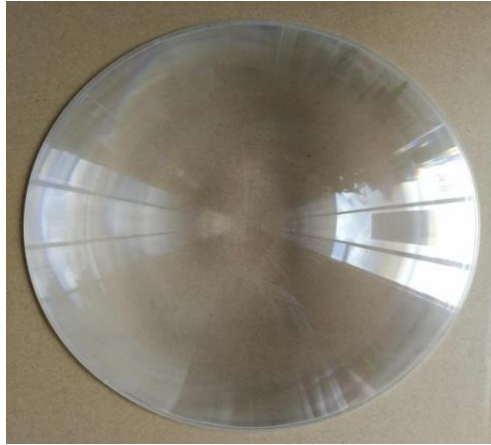
#### **3.4.1 Réalisation du pyréliomètre :**

Le pyréliomètre photovoltaïque que nous avons développé se compose des éléments suivants :

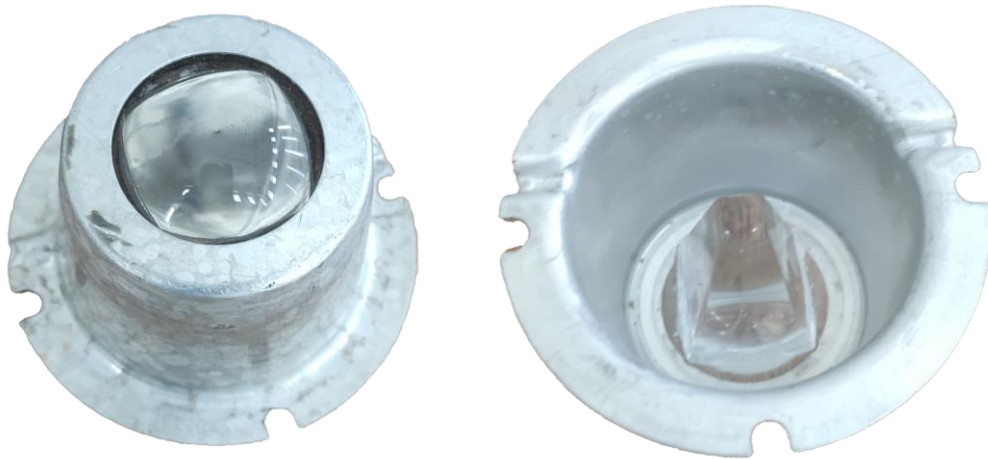
1. Objectif : La surface de concentration du flux lumineux est assurée par une lentille de Fresnel (voir figure III.24). Cette lentille permet de concentrer la lumière solaire sur la surface sensible de notre dispositif.
2. Homogénéiseur : Pour assurer une distribution uniforme de l'éclairement, nous avons placé un homogénéiseur (voir figure III.25) après l'objectif. Cet homogénéiseur permet de rendre l'éclairement solaire plus homogène sur la surface sensible.
3. Surface sensible : La partie sensible de notre pyréliomètre est constituée d'une cellule triple jonctions. Cette cellule est capable de convertir l'énergie lumineuse en énergie électrique. Afin de maintenir son bon fonctionnement, nous l'avons équipée d'un dissipateur thermique sous forme d'ailettes (voir figure III.26). Ce dissipateur thermique permet de dissiper la chaleur générée pendant le fonctionnement de la cellule.
4. Viseur : En haut du pyréliomètre, nous avons ajouté un viseur pour nous assurer que notre dispositif est correctement pointé vers le soleil. Cela garantit une mesure précise de l'éclairement solaire.

L'ensemble de ces composants permet à notre pyréliomètre de mesurer avec précision l'éclairement direct du soleil.

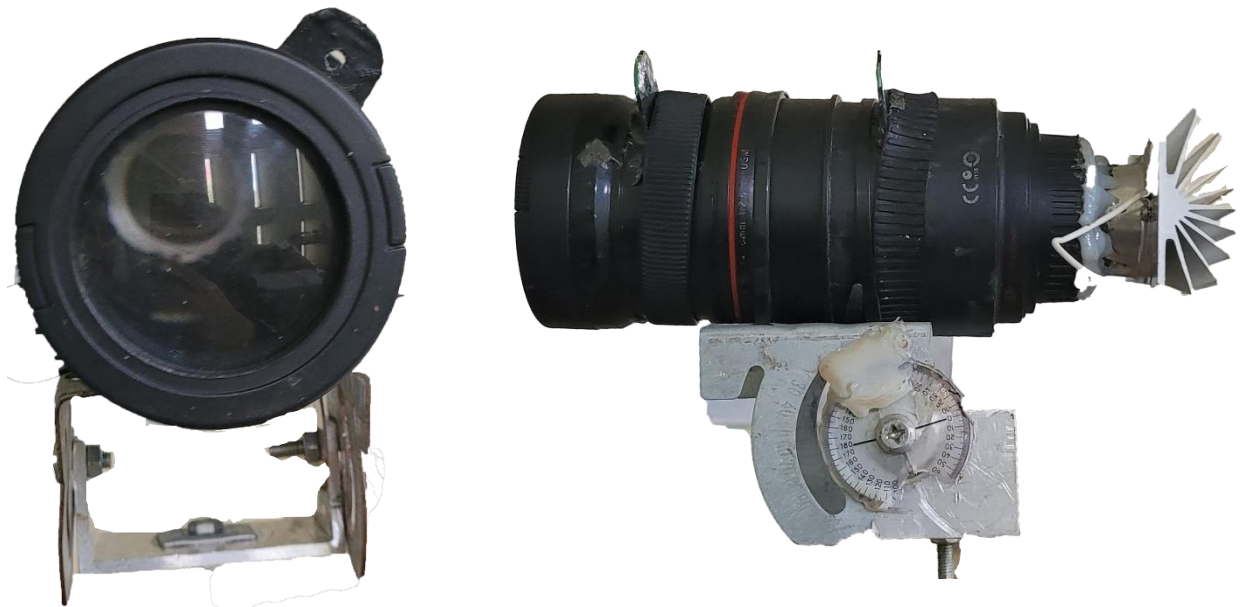
La distance focale entre la cellule photovoltaïque et la lentille est 19.8 cm qui donne un foyer de 1 cm<sup>2</sup>.



**Figure III.24 :** lentille de Fresnel (optique primaire).



**Figure III.25 :** l'homogénéiseur (optique secondaire).



**Figure III.26 :** le pyréliomètre réalisé suivi d'un dissipateur thermique.

### **3.4.2 Réalisation du traqueur :**

En nous basant sur le schéma de la figure III.23, nous avons procédé au montage de tous les composants électriques. Cela comprend la carte ARDUINO UNO R3, le driver Tb6600, deux photorésistances, le RTC (Real Time Clock) et l'afficheur LCD et le thermocouple de type K avec module d'amplification MAX6675. Nous avons assuré la connexion entre le moteur pas à pas NEMA 23 et les autres composants électriques à l'aide de fils de pins d'ARDUINO.

Pour permettre la variation du moteur, nous avons ajouté un support en bois (voir figure III.27). De plus, nous avons utilisé deux supports mécaniques en métal pour régler l'inclinaison et la déclinaison du dispositif.

Cette configuration nous permet de contrôler le mouvement du pyréliomètre et de suivre le déplacement du soleil de manière précise. Les signaux électriques et les capteurs sont interconnectés de manière à collecter les données nécessaires à la mesure de l'éclairement solaire. Tous ce système de suivi est monté sur un trépied.



**Figure III.27** : Système complet (pyrhéliomètre système de suivi).

### **3.5 Conclusion :**

Dans ce chapitre, nous avons présenté en détail la simulation et la réalisation du système comprenant le pyréliomètre et le suiveur solaire. Les résultats de cette étude nous ont permis de tirer des conclusions importantes concernant le comportement du pyréliomètre lorsqu'il est utilisé en conditions réelles en extérieur.

Il est essentiel de souligner que pour garantir la fiabilité du pyréliomètre, il est nécessaire d'effectuer une étape d'étalonnage approfondie. Cette étape sera abordée en détail dans le prochain chapitre.

Les informations recueillies grâce à cette étude nous permettront de mieux comprendre les performances du pyréliomètre et de prendre des décisions éclairées lors de l'utilisation de cet instrument pour mesurer l'éclairement solaire. Ces conclusions serviront de base solide pour la suite de notre travail.



---

## **CHAPITRE IV**

**Etalonnage du pyréliomètre réalisé,  
résultats et discussions.**

---

## **4.1 Introduction :**

L'évaluation des performances du pyrhéliomètre est essentielle pour garantir sa conformité aux normes internationales. Dans cette partie, nous aborderons l'étalonnage de notre dispositif, en prenant en compte les paramètres radiométriques de la plate-forme d'expérimentation, des conditions de tests réalisés, ainsi que les résultats obtenus. Les résultats de ces tests ont été analysés et utilisés pour ajuster et calibrer notre dispositif. Nous avons développé une équation finale qui permet de convertir les mesures de tension en valeurs d'éclairement solaire en Watts par mètre carré. Cette équation tient compte de différents paramètres, tels que l'angle d'incidence du soleil, les caractéristiques optiques du pyrhéliomètre et les corrections nécessaires pour obtenir des mesures précises.

L'étalonnage de notre dispositif garantit que les mesures de notre pyrhéliomètre sont fiables et conformes aux normes internationales. Cela nous permet d'utiliser notre dispositif en toute confiance pour des applications telles que l'évaluation de l'énergie solaire disponible et l'optimisation des installations photovoltaïques à concentration.

## **4.2 Étalonnage du pyrhéliomètre réalisé :**

### **4.2.1 Présentation de l'UDES (Unité de Développement des Equipements Solaires) :**

L'unité de développement des équipements solaires a été créée en janvier 1988 dans le cadre de l'arrêté ministériel portant création des Entreprises publiques à caractère scientifique et technique. L'UDES est intégrée dans l'EPST du Centre de développement des énergies renouvelables (CDER) et est localisée dans la région de Bou Ismail, celle-ci est située à 40 km au sud-ouest d'Alger et à environ 20 km au nord-est de Tipaza. La mission principale de l'unité de développement des équipements solaires est de : réaliser des travaux de conception, de dimensionnement et d'optimisation des équipements en énergies renouvelables pour la production de la chaleur, l'électricité, le froid et le traitement des eaux.[70]



**Figure IV.1 :** Unité de développement des équipements solaires (UDES).[70]

## **4.2.2 Banc d'essai :**

### **4.2.2.1 Pyrhéliomètre de référence (KIPP & ZONEN Company) :**

On a fait l'étalonnage du pyrhéliomètre photovoltaïque réalisé par rapport à un pyrhéliomètre KIPP & ZONEN CHP1 (secondary standard instruments).



**Figure IV.2 :** Pyrhéliomètre KIPP & ZONEN CHP1.

La fiche technique de celui-ci est donnée par la figure IV.3:

Spectral range (50% points)	200 to 4000 nm
Sensitivity	7 to 14 $\mu\text{V}/\text{W}/\text{m}^2$
Response time	< 5 s
Zero offset due to temperature change (5K/h)	< 1 $\text{W}/\text{m}^2$
Temperature dependence of sensitivity (-20 °C to +50 °C)	< 0.5 %
Field of view	$5 \pm 0.2^\circ$
Operational temperature range	-40 to +80 °C
Non-linearity	< 0.2 %
Maximum solar irradiance	4000 $\text{W}/\text{m}^2$
Classification to ISO 9060:2018	Spectrally Flat Class A

**Figure IV.3 :** Fiche technique du pyrhéliomètre KIPP & ZONEN CHP1.[71]

Dans la figure IV.4 est montré le montage des deux pyrhéliomètres, ils sont montés sur un système de poursuite automatique sensible (capteur solaire qui oriente le pyrhéliomètre vers les rayons solaires).



**Figure IV.4 :** (en haut) le pyrhéliomètre de référence et (en bas) le pyrhéliomètre photovoltaïque.

#### 4.2.2.2 systèmes d'acquisition :

Le système d'acquisition des données de l'éclairement direct est l'appareil KEITHLEY (figure IV.5) et de la température est un thermocouple de type K (figure IV.6) :



**Figure IV.5 :** L'appareil KEITHLEY : Le système d'acquisition des données d'éclairage direct, du voltage et de la température.



**Figure IV.6 :** Thermocouple de type K.

Le système d'acquisition de données est connecté à un ordinateur personnel (PC) via une interface appropriée, telle qu'un port USB. Pour faciliter la lecture et le stockage des données, nous avons installé le logiciel dédié sur le PC.

Ce logiciel offre une interface conviviale qui permet de visualiser en temps réel les mesures d'éclairage solaire effectuées par les pyréliomètres. Les données sont affichées de manière claire et compréhensible, facilitant ainsi l'interprétation des résultats.



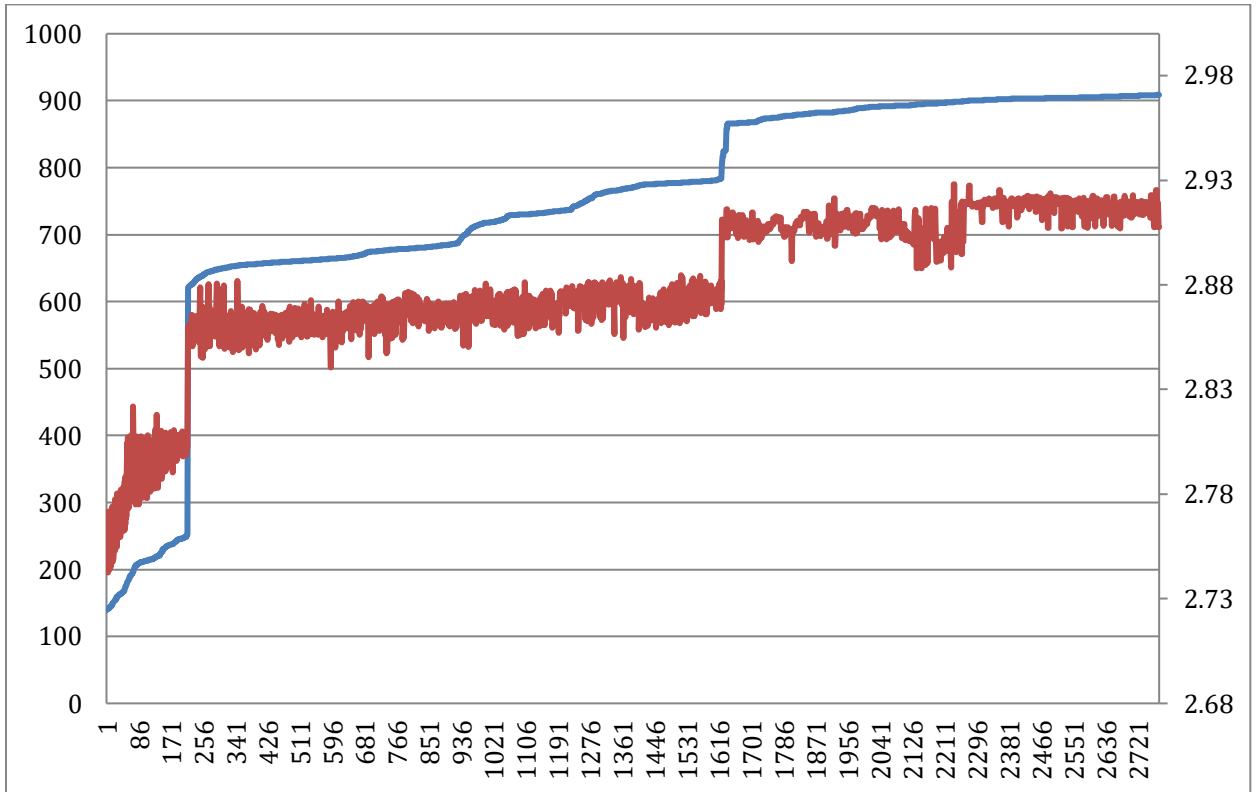
**Figure IV.7 :** Système d'acquisition relié au PC.

### **4.3 Résultats et discussions :**

Pour calibrer notre pyréliomètre, on a pris les mesures de la tension de notre dispositif et les valeurs de l'éclairement du pyréliomètre de référence (CHP1) ainsi que les valeurs de la température en suivant la trajectoire solaire pendant la journée.

#### **4.3.1. Lissage des valeurs obtenues :**

On a utilisé le théorème de CHAUVENET pour éliminer les points erronés (programme sous MATLAB), les graphes obtenus sont cités dans la figure IV :



**Figure IV.8 :** variation des deux pyréliomètres (en bleu le pyréliomètre de référence et en rouge le pyréliomètre testé).

Les résultats obtenus démontrent une concordance dans les résultats entre le pyréliomètre de référence et le pyréliomètre testé. La partie manquante entre les deux sont attribuée à la mesure de l'éclairement circumsolaire effectuée uniquement par le pyréliomètre de référence.

Il est important de souligner que le pyréliomètre photovoltaïque que nous avons développé mesure principalement la composante directe du rayonnement solaire. Cela signifie que nos données sont fiables en ce qui concerne cette composante spécifique de l'éclairement solaire. Il convient de noter que l'éclairement circumsolaire représente la lumière diffuse et le rayonnement provenant du ciel environnant, qui peut être mesuré par certains pyréliomètres de référence. Cependant, notre pyréliomètre photovoltaïque est conçu pour se concentrer principalement sur la mesure de l'éclairement direct du soleil.

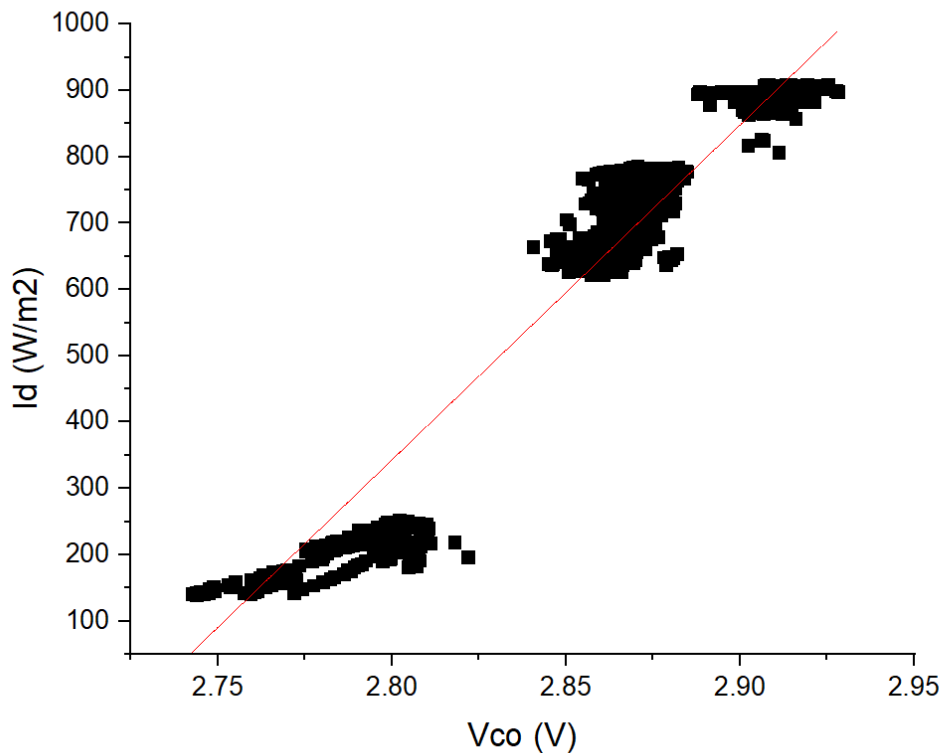
En conséquence, nous pouvons affirmer que notre pyréliomètre photovoltaïque fournit des données fiables et précises concernant la composante directe de l'éclairement solaire, offrant ainsi une mesure essentielle pour de nombreuses applications solaires.

### 4.3.2. Equation final du pyréliomètre réalisé :

À la suite de l'étalonnage, nous avons obtenu l'équation pour notre pyréliomètre en utilisant la fonction FITTING du logiciel ORIGIN. Cette équation permet de convertir les mesures de tension de notre dispositif en valeurs d'éclairement solaire en Watts par mètre carré.

L'équation obtenue est spécifique à notre pyréliomètre et tient compte des caractéristiques optiques de notre dispositif, de l'angle d'incidence du soleil et d'autres paramètres pertinents. Elle a été dérivée à partir des données recueillies lors de l'étalonnage, en utilisant des techniques statistiques et de régression.

Grâce à cette équation, nous pourrions obtenir des mesures précises de l'éclairement solaire en utilisant les tensions enregistrées par notre pyréliomètre. Il convient de noter que cette équation doit être régulièrement vérifiée et mise à jour si nécessaire, pour garantir la précision continue de notre pyréliomètre dans différentes conditions d'utilisation.



**Figure IV.9 :** Nuage des points représentant l'éclairement direct en fonction de la tension.



L'équation obtenue est :

Equation	$y = a + b \cdot x$
Plot	Id
Weight	No Weighting
Intercept	$-13792.86289 \pm 78.15754$
Slope	$5048.47423 \pm 27.13877$
Residual Sum of Squares	6.91006E6
Pearson's r	0.96217
R-Square (COD)	0.92576
Adj. R-Square	0.92574

**Figure IV.10 :** Equation obtenue du pyréliomètre réalisé (sous ORIGIN).

### **4.3.3. Justification de l'utilisation de la monture polaire :**

La monture polaire (ou équatoriale) s'est avérée être la meilleure option pour notre pyréliomètre, offrant plusieurs avantages significatifs. Tout d'abord, elle permet une meilleure réception des rayons solaires grâce à un alignement plus précis avec la position du soleil. En utilisant un moteur pas à pas contrôlé par notre carte de contrôle Tb6600, nous pouvons effectuer des mouvements précis de rotation pour maintenir le pyréliomètre aligné avec le soleil.

Ce mouvement de suivi optimise la réception des rayons solaires, ce qui se traduit par de meilleures performances globales et une mesure plus précise du rayonnement solaire. Le mouvement du pyréliomètre est justifié par le fait que la terre effectue une rotation complète sur elle-même en 24 heures, soit un déplacement angulaire de 15 degrés par heure. En utilisant notre moteur pas à pas, nous pouvons réaliser des pas précis de 1/32, ce qui correspond à un mouvement de rotation de 0,05625 degré toutes les 13,5 secondes.

De plus, la déclinaison solaire, qui est l'angle entre le plan de l'équateur céleste et la direction du soleil, ne varie pas de manière significative pendant la journée. Cela nous a permis d'éliminer le besoin d'un deuxième moteur et de simplifier le système. En utilisant une monture polaire, nous pouvons prendre en compte la déclinaison solaire fixe pour orienter le pyréliomètre de manière appropriée, sans nécessiter de mouvement supplémentaire.

En conclusion, la monture polaire s'est avérée être la meilleure option pour notre pyréliomètre, offrant des avantages tels que l'amélioration de la réception des rayons

solaires, la simplification du système en éliminant le besoin d'un deuxième moteur, et la facilitation des calculs en évitant des algorithmes complexes liés à des mouvements azimutaux.

#### **4.3.3. Justification de l'utilisation de la tension dans l'équation finale :**

Dans notre cas, l'intensité est de l'ordre des milliampères, ce qui est difficile à mesurer car il nécessite des capteurs trop chers et des résistances de haute précision, contraire à la tension qui est facilement mesurable.

#### **4.4 Cout de notre pyréliomètre :**

Comme était motionné dans notre objectif lors de la réalisation de ce dispositif est son faible cout par rapport à un pyréliomètre classique, les tableaux suivants montrent les détails :

**Tableau IV.1 :** Détails du cout du pyréliomètre réalisé.

Composant	Prix en dollar américain et en dinar algérien
Cellule triple jonctions + Homogénéiseur	30 \$ (4070 DA)
La lentille de Fresnel	10\$ (1356,73 DA)
Tube d'objectif	18,48\$ (2500 DA)
	Cout total : 58.48 \$ (7934 DA)

**Tableau IV.2 :** Détails du cout du système de suivi réalisé.

Composant	Prix en dollar américain et en dinar algérien
Carte ARDUINO UNO R3	18,48 \$ (2500 DA)
Moteur pas à pas (NEMA 23)	36,96 \$ (5000 DA)
Carte de contrôle Tb6600	28,09\$ (3800 DA)
Deux photorésistances	1,18\$ (160 DA)
Thermocouple de type K avec max6675 amplifier	11,09 \$ (1500 DA)
RTC	5,91 \$ (800 DA)
Afficheur LCD avec adaptateur (16*2)	8,87 \$ (1200 DA)
2 supports métalliques + 1 support en bois	29,57 \$ (4000 DA)
Fils de pin d'ARDUINO	4,44 \$ (600 DA)
Trépied	22,18 \$ (3000 DA)
Capteur de tension	4,44\$ (800 DA)
	Cout total : 160.12 \$ (21662,06 DA)

On voit que notre pyrhéliomètre est moins cher que le pyrhéliomètre classique qui vaut environ 1000 \$ (en dinar algérien 1 350 00) sans le système de suivi.

#### **4.5. Conclusion :**

Les résultats obtenus ont permis de valider notre pyrhéliomètre et de tirer des conclusions importantes sur le comportement de ses composants. Premièrement, la lentille de Fresnel utilisée a démontré sa capacité à permettre uniquement le passage de la composante directe du rayonnement solaire. Cela garantit une mesure précise de cette composante spécifique.

De plus, la cellule triple jonctions a montré une couverture étendue du spectre lumineux, comme en témoigne le graphe des mesures. Cela confirme la capacité de notre pyrhéliomètre à capturer efficacement une large gamme de longueurs d'onde du rayonnement solaire.

L'étalonnage de notre dispositif a été réalisé avec succès à l'UDES (Unité de Développement et d'Equipements Solaires), garantissant ainsi sa précision et sa fiabilité. L'équation finale obtenue lors de l'étalonnage permet de convertir les mesures de tension en valeurs d'éclairement solaire en Watts par mètre carré, offrant ainsi une référence précise pour les futures mesures et applications.

---

## **Conclusion Générale**

---

La mesure de l'éclairement direct est très importante pour les systèmes photovoltaïques à concentration, ce paramètre a un très important sur le rendement des installations. La valorisation de ce paramètre semble très importante pour le choix de sites de ces centrales.

Dans ce travail, nous avons proposé la réalisation d'un pyrhéliomètre photovoltaïque avec un système de suivi sensible à faible cout et à haute performance.

Le pyrhéliomètre utilise une lentille de Fresnel comme optique principale et est équipé d'une cellule à triple jonctions, qui est associée à un homogénéiseur servant d'optique secondaire. Le système de suivi est composé d'un moteur pas à pas (NEMA 23) commende par une carte Arduino UNO R3. La position du pyrhéliomètre face au soleil est assurée par des photorésistances sensibles classiques.

Nous pouvons constater à travers les courbes représentées par les figures que notre configuration répond largement aux objectifs définis. En effet, la cellule triple jonctions a bien couvert la quasi-totalité du spectre solaire. De plus, la lentille de Fresnel n'a laissé passer que le rayonnement direct. Enfin, l'estimation du cout du pyrhéliomètre nous a permis de constater que notre dispositif est beaucoup moins cher d'un pyrhéliomètre classique.

Les tests réalisés sur le dispositif ont révélé une efficacité remarquable de la mesure de l'éclairement normal direct. L'étalonnage de notre pyrhéliomètre, nous a permis d'obtenir une relation simple permettant de convertir la tension en Volts à l'éclairement direct en Watts par mètre carré avec une précision remarquable.

Dans le prolongement de ce travail, plusieurs perspectives peuvent être envisagées. Tout d'abord, il serait intéressant d'utiliser ce dispositif dans des conditions réelles afin de collecter des données spécifiques à une région donnée. Ces données pourraient être stockées dans une base de données, qui servirait ensuite d'outil d'aide à la décision pour les futures installations photovoltaïques à concentration.

En exploitant cette banque de données, il serait possible d'analyser les niveaux d'éclairement solaire dans l'ensemble du territoire national, d'identifier les zones les plus propices à l'implantation de centrales photovoltaïques à concentration et d'optimiser leur rendement énergétique. Cette approche permettrait de prendre des décisions éclairées et de maximiser l'efficacité des futures installations.

De plus, il serait également envisageable d'étendre l'utilisation de ce dispositif à d'autres applications, telles que les dispositifs et centrales solaire a concentration.

## Bibliographies

- [1] H. Abderrezek et K. Gasmi, Les énergies renouvelables, un pilier de développement de l'agriculture algérienne - Cas de l'énergie éolienne, Revue des Energies Renouvelables Vol. 19 N°3, CDER (2016).
- [2] Mme Samira MOUHOUS-CHAOUCHI, Etude statistique du rayonnement solaire sur un plan incliné, ECOLE DOCTORALE « ENERGIES RENOUVELABLES », MEMOIRE DE MAGISTER, 2012.
- [3] J.A. Duffie and W.A. Beckman, 'Solar Engineering of Thermal Processes', 3rd Ed. John Wiley and Sons, 2006.
- [4] T. Mathijssen, J. Bijma, W. Knap, Traceability of CM-11 pyranometer calibrations at KNMI, De Bilt, | Technical report; TR-367, Royal Netherlands meteorological institute. 2018.
- [6] H. E. B. Mohamed Elamine KHELIFA, « Application des modèles mathématiques pour la prédiction de la température d'un panneau photovoltaïque », MÉMOIRE DE MASTER, 2022.
- [7] Mr. ZIBOUCHE Sofiane et Mr. MEKAOUI Hamza : Etude, conception et réalisation d'un récepteur trapézoïdal pour un système solaire à concentration linéaire de Fresnel, mémoire de master, 2020.
- [9] Joakim Widen and Joakim Munkhammar, Department of Engineering Sciences Uppsala University, Solar Radiation Theory book, 2019.
- [10] Matteo De Vincenzi, Gianni Fasano CNR Institute of BioEconomy via Madonna del Piano 10 Sesto Fiorentino (Florence, Italy), MONITORING COASTAL AREAS: A BRIEF HISTORY OF MEASURING INSTRUMENTS FOR SOLAR RADIATION, article scientifique, 2020.
- [11] Ångström, The ÅNGSTRÖM Compensation-Pyrheliometer and the Pyrheliometric Scale, Astrophysical Journal, vol. 40, p.274 , 1914.
- [12] C. G. ABBOT , the silver disk pyrheliometer , SMITHSONIAN MISCELLANEOUS COLLECTIONS VOLUME 56, NUMBER 19 , 1932.
- [13] T. H. MucDONALD , SOME CHARACTERISTICS OF THE EPPLEY PYRHELIOMETER , MONTHLY WEATHER REVIEW , 1951.

- [14] C. G. ABBOT and L. B. ALDRICH, An improved water-flow pyrheliometer and the standard scale of solar radiation; scientific article, 1932.
- [15] A. M. MUJAHID and A. R. M. ALAMOUD, an easily designed and constructed photovoltaic pyrheliometer, Solar & Wind Technology Vol. 5, No. 2, pp. 127-130; 1987
- [16] S. X. CHENG, H. P. HU and L. CHEN, Department of Thermal Science and Energy Engineering, University of Science and Technology of China, TWO SIMPLE AND NOVEL PYRHELIOMETER, 1997.
- [17] Michael Gnos et al, On the Development of a Low Cost Pyrheliometer, Journal of Solar Energy Engineering, Vol 133, AUGUST 2011.
- [18] Asiegbu, A. D., Echeweozo, E. O. Design, Construction and Calibration of a Solar Radiation measuring Meter, Review of Advances in Physics Theories and Applications, vol. 1, no. 1, pp. 1-8. (2014).
- [20] De Barros, R.C., Soares, J. M., do Carmo, C. D., Caires Silva, M. W., Pereira Silva, A.M. and Pereira, H.A (2018). 13th IEEE/IAS International Conference on Industry Application (Induscon), São Paulo, pp. 1-8v, 2018.
- [21] Syed Abdul Moiz , A. N. M. Alahmadi and Abdulah Jeza Aljohani , Design of Silicon Nanowire Array for PEDOT:PSS-Silicon Nanowire-Based Hybrid Solar Cell , scientific article , 2020.
- [22] REMMA Kheira et LEHBAKI Fatiha, Etude et réalisation d'un dispositif de mesure de l'effet de la poussière dans les centrales solaires , Mémoire de MASTER , 2019/2020.
- [23] R. Yaiche , Logiciel de calcul des paramètres astronomiques à l'usage des installations solaires , Centre de Développement des Energies renouvelables , Revue des Energies Renouvelables ICRES-07 Tlemcen 343 – 348 , (2007).
- [24] Cheddad Mohammed Amine Mazouzi Omar, « Commande de deux moteurs pas à pas et moteur à courant continu via le port parallèle avec Delphi », MFE, 2013.
- [26] Zaghbi Ilhem, « Etude et réalisation d'un concentrateur solaire parabolique », Université de Constantine, 2005.
- [27] HAKIM, YAZID ET YOUNESSE CHOUKLAT "système électromécanique de poursuite pour concentration thermique " université de IBN ZOHR OUZAZATE MORCE, 2017.
- [28] Jumelles, lunette astronomique et télescope, Dossier documentaire pour collégiens, département Éducation et Formation, Avril 2020.

[29] Adama Moussa Diallo, Caractérisations optiques de structures photovoltaïques tri-jonctions , Mémoire présenté au Département de physique en vue de l'obtention du grade de maître ès sciences (M. Sc.) FACULTÉ DES SCIENCES UNIVERSITE DE SHERBROOKE, Québec, Canada, Décembre 2011.

[30] N. Pearsall, «The Performance of Photovoltaic (PV) Systems: Modelling,” *Measurement and Assessment. Woodhead Publishing*, Oct. 2016.

[31] W. Shockley and H. Queisser, “Detailed Balance Limit of Efficiency of p-n Junction Solar Cells,” *Journal of Applied Physics*, vol. 32, pp. 510–519, Mar. 1961.

[32] A. de Vos, ”Endoreversible thermodynamics of solar energy con-version. ” *Oxford University Press, New York*, p 120. 1992.

[33] Karl Young”Do solar panels collect energy from the whole light spectrum or just focus on the red? ” <https://www.quora.com/> Apr 24, 2016.

[34] SKENDER Ayoub , Etude et simulation des cellules solaires à triples-jonctions à concentration à base des semi-conducteurs III-V , memoire de Magister en électronique Option : Microélectronique , UNIVERSITE MOULOUD MAAMRI DE TIZI-OUZOU, 2016.

[35] V. Sabnis, H. Yuen, and M. Wiemer. ”High- efficiency multijunction solar cells employing dilute nitrides. ” *In AIP Conference Proceedings*, volume 1477, page 14-19. AIP, 2012.

[36] R. R. King, C. M. Fetzer, K. M. Edmondson, D. C. Law, P. C. Colter, H. L. Cotal, R. A. Sherif, H. Yoon, T. Isshiki, D. D. Krut, G. S. Kinsey, J. H. Ermer, Sarah Kurtz, T. Moriarty, J. Kiehl, K. Emery, and W. K. Metzger, “Metamorphic Iii-V Materials, Sublattice Disorder, And Multijunction Solar Cell Approaches With Over 37% Efficiency,” *in 19th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, (Paris, France)*, June 2004.

[39] Abdulrahman Babiker Hussain, Abdelrahman S. Abdalla, Abdellahi Sidi Mukhtar, M. Elamin, R. Alammari & A. Iqbal: Modeling and Simulation of Single and Triple Junction Solar Cell Using MATLAB/SIMULINK, *International Journal of Ambient Energy*, (2016).

[41] E. Lorenzo and G. Sala, “Hybrid silicone-glass fresnel lens as concentrator for photovoltaic applications,” *in Proceeding 2nd European Photovoltaic Solar Energy Conference*, 1979.



- [42] T. Luce and J. Cohen, “The path to volume production for cpv optics,” in *Proceedings of the 35th IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, 2010.
- [43] J.-T. Makinen and R. de Schipper, “How can plastics injection molding help driving down the cost of photovoltaic concentrators?” *International Workshop on Concentrating Photovoltaic Power Plants*, 2007.
- [44] D. Miller, L. Gedvilas, B. To, C. Kennedy, and S. Kurtz, “Durability of poly (methyl methacrylate) lenses used in concentrating photovoltaic modules,” in *Proceedings of the SPIE 2010 Optics and Photonics Conference*, 2010.
- [45] T. Hornung, M. Steiner, and P. Nitz, “Estimation of the influence of Fresnel lens temperature on energy generation of a concentrator photovoltaic system,” *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 99, no. 0, pp. 333–338, 2012.
- [46] M. Victoria, “New concepts and techniques for the development of high-efficiency concentrating photovoltaic modules.” *PhD thesis, Universidad politecnica de Madrid*, 2014.
- [47] P. Würfel, “Physics of Solar Cells: From Principles to New Concepts”. *John Wiley & Sons*, July 2008.
- [48] SAID Mohamed Islam, Dimensionnement et expérimentation d’un module photovoltaïque sous forte concentration (HCPV), thèse de doctorat, USTHB, Novembre 2020.
- [49] M. Victoria, C. Dominguez, I. Anton, and G. Sala, “Comparative analysis of different secondary optical elements for aspheric primary lenses,” *Optics Express*, vol. 17, no. 8, pp. 6487–6492, 2009.
- [50] M. Victoria, R. Herrero, C. Dominguez, I. Anton, S. Askins, and G. Sala, “Characterization of the spatial distribution of irradiance and spectrum in concentrating photovoltaic systems and their effect on multi-junction solar cells,” *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, vol. 21, pp. 308–318, May 2013.
- [51] K. Araki, M. Kondo, H. Uozumi, and M. Yamaguchi, “Experimental proof and theoretical analysis on effectiveness of passive homogenizers to 3j concentrator solar cells,” in *Proceedings of 3rd World Conference on Photovoltaic Energy Conversion*, pp. 53–856, 2003.
- [52] L. W. James, “Use of imaging refractive secondaries in photovoltaic concentrators,” tech. rep., NASA, 1989.

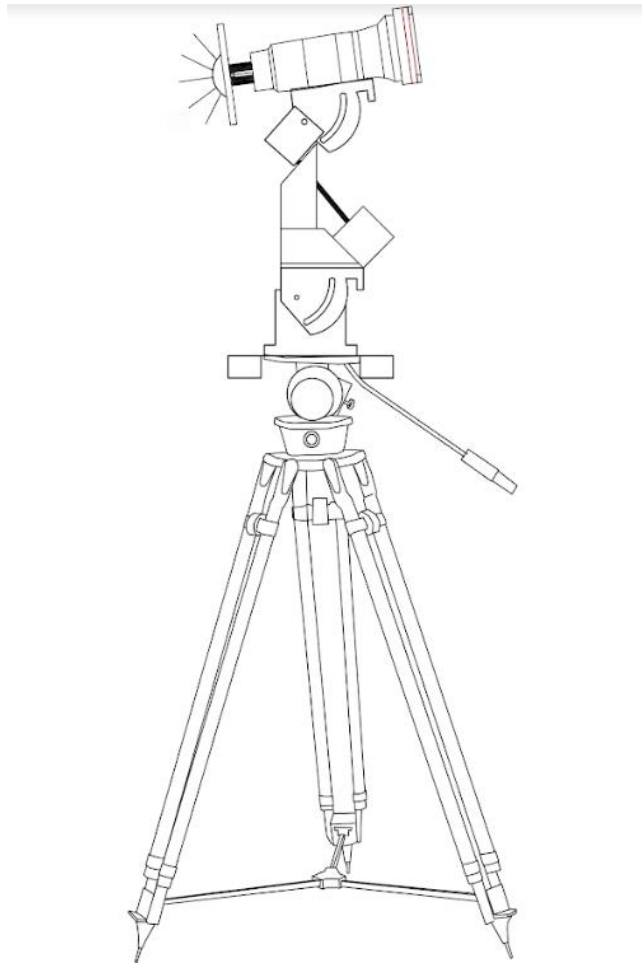
- [53] X. Ning, R. Winston, and J. O’Gallagher, “Dielectric totally internally reflecting concentrators,” *Applied Optics*, vol. 19(5), pp. 300–305, 1987.
- [54] R. Winston, J. Minano, and P. Benitez, ”Nonimaging Optics. ” Elsevier-Academic Press, 2005.
- [55] Amine, Z. M., & Riadh, N. Conception et réalisation d'un système de commande d'une habitation (Doctoral dissertation, Université Mouloud Mammeri) , 2018.
- [57] Carte ARDUINO UNO, Microcontrôleurs 3A SAGI, Polytech Angers, revue scientifique 2019-2020.
- [58] BENSOUCHA Seyf, DJLOUD Snoussi, « Réalisation d’un suiveur solaire à base d’Arduino ». Mémoire de Master, Université de M’sila, 2019/2020.
- [59] A. Ahmed Azi, « Contribution au développement d'un outil d'aide au diagnostic de performances des MPPT dans la chaîne de conversion photovoltaïque », Mémoire magister, Université de M’sila, Algérie, 2014.
- [60] Le grand livre d'Arduino, Patrick Chantreau et Erik Bartmann, 2éd. Eyrolles, 2015.
- [61] Mathieu Bour, Émilie Laurent, Marine Matton, « Les capteur », Lycée Fabert, 2016.
- [63] LATRECHE Soufiane & BOUZID Kheir eddine, Etude et Réalisation d'un système photovoltaïque à base d’une carte Arduino uno , Mémoire MASTER PROFESSIONNELLE , Mémoire MASTER PROFESSIONNELLE , 2015/2016.
- [64] A. Labouret and M. Viloz, *Energie solaire photovoltaïque*. Dunod, 2006.
- [65] Kercha Mébarka Ingenieur ; d’état en Electrotechnique de l’Université de Batna, Commande par mode de glissement d’un Moteur pas à pas à Aimant Permanent, Mémoire de magister, 2005.
- [66] LPR LA. THIONVILLE ; BEP : « cours de technologie, les moteurs pas à pas », 2013.
- [67] PATRICE, Oguic. « Moteur pas à pas et PC », Paris : Dunod, : 174 p, *Electronique et informatique* , 2004.
- [68] Lucile Daret & Elodie Collombat , cours « MESURE de TEMPERATURE par THERMOCOUPLE » , Sciences et Techniques de Laboratoire, 2020.
- [69] BOUREZG, S., & BOUBAYA, D. Etude de la dégradation d’un panneau photovoltaïque (Doctoral dissertation, Univ M'sila). (2020).

## **Webographie :**

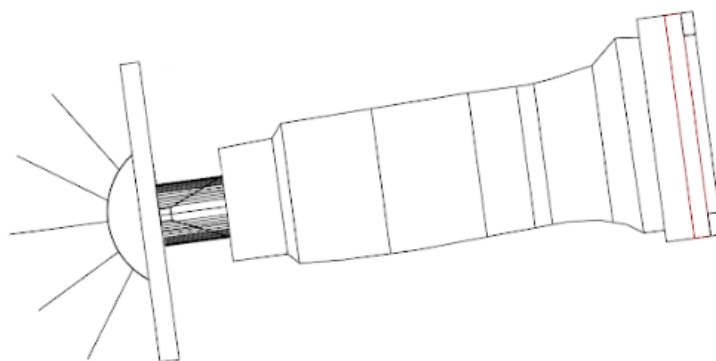
- [5] <https://www.es-france.com/7879-spectroradiometre-portable-spectrapen-lm-510.html>.
- [8] <https://www.esearth.com/product/shp1-pyrheliometer-from-kipp-and-zonen/>
- [19] <https://www.kippzonen.com/Product/18/CHP1-Pyrheliometer>.
- [25] [http://herve.silve.pagesperso-orange.fr/images/reperage\\_point\\_local.gif](http://herve.silve.pagesperso-orange.fr/images/reperage_point_local.gif) (22/10/2011)
- [37] “Spectrolab website - [www.spectrolab.com](http://www.spectrolab.com).” 2017.
- [38] “AzurSpace website - [www.azurspace.com](http://www.azurspace.com).” Sept. 2017.
- [40] <https://epress.lib.uts.edu.au/studentjournals/index.php/PAMR/article/view/1413/150>
- [56] <https://knowhow.distrelec.com/fr/electronique/guide-sur-les-circuits-imprimés-arduino/>
- [62] <https://www.carnetdumaker.net/articles/utiliser-un-module-horloge-temps-reels1307-avec-une-carte-arduino-genuino/>
- [70] : <https://www.reporters.dz/l-unite-de-developpement-des-equipements-solaires-udes-de-bou-ismail-en-quelques-mots/>.
- [71] <https://www.kippzonen.com/Product/18/CHP1-Pyrheliometer>.

## **Annexes**

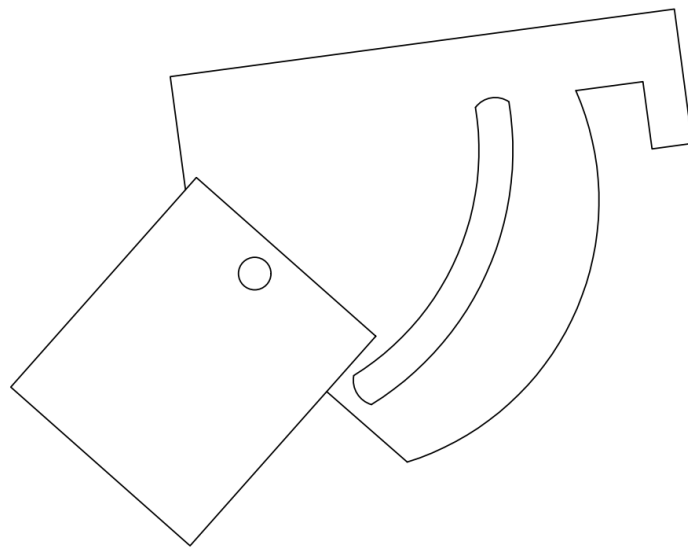
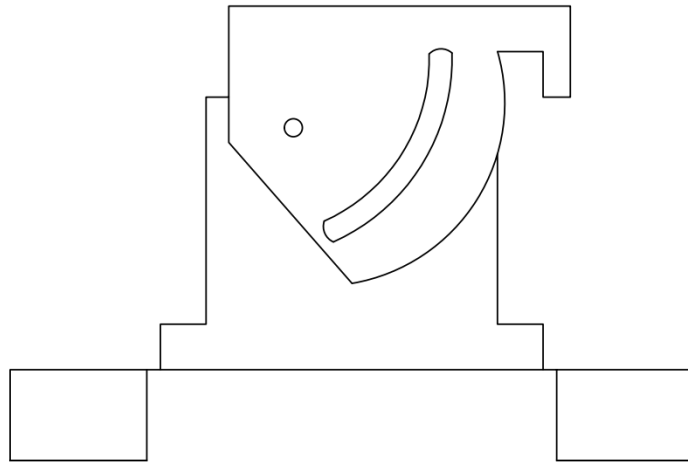
**Annexe A** : schéma du système complet.



**Annexe B** : Schéma du pyréliomètre.



**Annexe C** : Schéma des deux supports métalliques.



**Annexe D** : Schéma du support en bois pour le moteur.

