



ⵜⴰⵎⴰⵣⵓⵔⴰ ⵜⴰⵎⴰⵏⴰ ⵜⴰⵖⴰⵏⴰⵏⵜ
جامعة بجاية
Université de Béjaïa

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Abderrahmane Mira -Bejaia
Faculté de Technologie
Département Génie Electrique

Mémoire de fin d'étude

En vue de l'obtention du Diplôme de master en électrotechnique
Option : Electromécanique

Thème

**Etude et amélioration du concentrateur parabolique
avec une poursuite automatique
(remplacement d'un vérin par un moteur)**

Presenté par:

Mr. HADDAD Amazigh

Mr. HAMDIKENE Mohamed

Encadré par:

Mr. Y. MEBARKI

2021/2022

Remerciements

Avant tout, on remercie le bon DIEU, le tout puissant de nous avoir donné la force nécessaire pour mener à terme ce travail.

Nous remercions tout personne nous ayant soutenu et aidé lors de la réalisation de ce modeste travail. On cite en particulier :

Notre promoteur Mr Mebarki Youcef qui nous a encadrés et orientés tout le long de notre travail.

Tous nos enseignants qui nous ont accompagnés durant notre parcours universitaire, en particulier Mr TAZERART et Mr AOUZELLAG.

Les membres du jury qui ont acceptés d'examiner notre modeste travail.

Les membres du personnel du hall de technologie de l'université de Bejaia, en particulier, Mr Yousfi Rachid et Mr Noureddine.

Sans oublier Mr Lyes DIKIMECHE qui nous a emprunté son garage pour finaliser notre projet, et l'association scientifique LEFNAR de El kseur pour leur soutien et leur encouragement.

HAMDIKENE Mohamed

HADDAD Amazigh

Dédicaces

Je dédie ce travail :

A Mon père et ma mère et ma sœur

Mon binôme Mohammed et sa famille

A tous mes amis

*(Khelaf, Yanis, Fafou, Kakou, Ali, Bilal,
Josef, Yacine, Hamid, Ahcene, Dalila, Lyly)*

A mes camarades (Hansi, Farid, Borhane, Hakim)

*A Mes grands-parents, mes oncles et mes tantes, mes cousins et cousines et leurs
familles*

A la famille Hammaoui

AMAZIGH

Dédicaces

Je dédie ce travail :

A mes très chers parents et à mon cher frère Yanis, votre courage et vos sacrifices étaient pour moi le meilleur soutien durant cette longue épreuve.

A toutes ma famille, mes grands-parents, mes tantes, mes oncles, mes cousins et cousines.

A la mémoire de ma grand-mère Aicha, que DIEU l'accueille dans son vaste paradis.

A mon binôme Amazigh et sa famille.

A tous mes amis et collègues (Farid, Hasni, Hakim, Borhane, Fares, Bihou, Houhou, Rahim, Mouloud et Mami)

Mohamed

Résumé

Ce travail consiste à étudier un concentrateur solaire parabolique, et porter des améliorations sur un prototype déjà réalisé.

Dans ce travail, nous avons porté des modifications majeures au concentrateur réalisé au part avant pour améliorer sa fiabilité et son efficacité. Cela est fait en remplaçons un vérin électrique par un moteur électrique et une chaîne d'entraînement, tout en modifiant son aspect mécanique pour une meilleur fiabilité et stabilité, et en réalisant un nouvel absorbeur.

L'ancien programme Arduino est modifié de telle sorte à éliminer les perturbations pendant la poursuite automatique du soleil.

Après ces améliorations, nous avons fait des tests expérimentaux et comparé les résultats obtenus avec les résultats de l'anciens prototype réalisé en 2020. Les modifications effectuées ont amélioré ce prototype puisque nous avons remarqué des progrès remarquables, en effet le modèle amélioré conduit à des températures avoisinantes les 400°C à la surface d'ouverture de l'absorbeur.

Mots clés: rayonnement solaire, concentrateur parabolique, récepteur, Absorbeur, réflecteur, fluide caloporteur.

Summary

This work consists in studying a parabolic solar concentrator, and making improvements on a prototype already made.

In this work, we made major modifications to the concentrator made on the front part to improve its reliability and efficiency. This is done by replacing an electric cylinder with an electric motor and a drive chain, while modifying its mechanical aspect for better reliability and stability, and by making a new absorber

The old Arduino program is modified in such a way as to eliminate disturbances during Automatic sun tracking.

After these improvements, we did experimental tests and compared the results obtained with the results of the old prototype made in 2020. The modifications made have improved this prototype since we have noticed remarkable progress; indeed the improved model leads to temperatures around 400°C at the opening surface of the absorber.

Keywords: solar radiation, parabolic concentrator, receiver, absorber, reflector, heat transfer fluid.

Sommaire

Introduction générale.....	1
Chapitre I Généralité sur le rayonnement solaire	
1.1 Introduction	2
1.2 Le soleil	2
I.3 Rayonnement solaire.....	3
1.3.1 Le rayonnement direct.....	4
1.3.2 Rayonnement diffus	4
1.3.3 Le rayonnement réfléchi ou l'albédo	4
1.3.4 Le rayonnement solaire global	4
1.4 L'énergie solaire	5
1.4.1 Les avantages et les inconvénients de l'énergie	5
1.4.1.1. Les avantage	5
1.4.1.2 Les inconvénients	5
15. Les types d'exploitation de l'énergie solaire	6
I.5.1 L'énergie solaire photovoltaïque	6
1.5.2 L'énergie solaire thermique	6
1.5.3 L'énergie solaire thermodynamique	7
I.6 Le potentiel solaire dans le monde	8
I.7 Le potentiel solaire de l'Algérie	9
I.8 Le mouvement de la terre autour du soleil (orbite terrestre)	10
I.9 Coordonnées géographiques.....	10
I.9.1 L'altitude.....	11
I.9.2 La longitude	11
I.9.3 La latitude	11
I.10 Les coordonnées horaires	12
I.10.1 La déclinaison solaire	12
I.10.2 L'angle horaire	12
I.11 Les coordonnées horizontales	13
I.11.1 La hauteur angulaire solaire	13
I.11.2 L'azimut	13

I.12 Conclusion	14
Chapitre II : Etude du concentrateur parabolique	
II.1 Introduction	15
II.2 Définition et principe de fonctionnement	15
II.3 Propriétés et caractéristiques du concentrateur parabolique	16
II.3.1 La géométrie du concentrateur parabolique	16
II.3.2 Angle d'ouverture d'une parabole	17
II.3.3 Dimensions d'une parabole	18
II.3.3.1 Taille d'une parabole	18
II.3.3.2 Surface d'une parabole	18
II.3.3.3 Longueur d'arc d'une parabole	18
II.3.4. Système optique d'une surface parabolique	18
II.3.4. Système optique d'une surface parabolique	18
II.3.5 Les composants d'un concentrateur solaire parabolique	19
II.3.5.1 Réflecteur (paraboloïde)	19
II.3.5.2 Récepteur (absorbeur)	20
II.3.5.2.1 Surface externe	20
II.3.5.2.2 Surface interne ou cavité	20
II.3.5.2.3 Dimension du récepteur	21
II.4 Concentration	22
II.4.1 Concentration géométrique	22
II.4.2 Concentration optique	22
II.5 L'énergie reçue à l'ouverture d'un paraboloïde.....	23
II.5.1 Puissance solaire absorbée par l'ouverture du récepteur	24
II.5.2 Puissance correspondant aux pertes thermiques	24
II.5.2.1 Pertes par convection	24

II.5.2.2 Pertes par rayonnement	25
II.5.2.3 Pertes par conduction	25
II.6 Conclusion	26

Chapitre III : Réalisation du concentrateur parabolique

III.1 Introduction	27
III.2 Modélisation des éléments du concentrateur solaire parabolique.....	27
III.3 Système de poursuite automatique.....	28
III.4 Présentation des matériels utilisés.....	28
III.4.1 Partie électronique.....	28
III.4.1.1 Capteur LDR (Light Dépendent Résistor)	29
III.4.1.2 Résistance.....	29
III.4.1.2 LED (Light Emitting Diode).....	30
III.4.1.3 Thermocouple.....	30
III.4.1.4 Multimètre.....	30
III.4.1.5 Circuit de commande	31
III.4.1.5.1 ARDUINO MEGA 2560	31
III.4.1.5.2 Logiciel de programmation.....	32
III.4.1.5.3 Câble USB	33
III.4.1.5.4 fils pin.....	33
III.4.1.5.5 Plaque d'essai	33
III.4.1.6 Circuit de puissance.....	34
III.4.1.6.1 Module relais Arduino.....	34
III.4.1.6.2 Moteur à courant continu	35
III.4.1.6.2.1 Modélisation du moteur à courant continu.....	35
III.4.1.6.2. Les moteurs choisis.....	36
III.4.1.6.3 Alimentation	37

III.4.1.6.4 variateur de vitesse.....	37
III.4.2 Partie mécanique.....	37
III.4.2.1 Le réflecteur.....	37
III.4.2.2 L'absorbeur.....	38
III.4.2.3 Bras d'absorbeur	39
III.4.2.4 Arbres de la parabole.....	39
III.4.2.5 Support de rotation verticale	39
III.4.2.6 Cadre de la parabole	40
III.4.2.7 Support de rotation horizontal	41
III.4.2.8 Le socle	41
III.4.2.9 support de stabilité	42
III.5 Propriétés sur les réducteurs utilisés.....	42
III.5.1 Réducteur horizontal.....	42
III.5.2 Réducteur vertical.....	43
III.5 Conclusion.....	44
 Chapitre IV Expérimentations et résultats	
IV.1 Introduction.....	45
IV.2 Modifications apporté.....	45
IV.2.1 Mécanisme de poursuite.....	45
IV.2.2 Absorbeur.....	46
IV.2.3 Programme.....	46
IV.3 Déroulement de l'expérience.....	47
IV.3.1 Premier essaie.....	47
IV.3.1.1 Résultats du premier essai.....	47
IV.3.2 Deuxième essaie.....	48
IV.3.2.1 Résultats du deuxième essaie.....	48
IV.4 Résultats et discussions.....	49
IV.4.1 Premier essai.....	49
IV.4.1.1 Représentation graphique des résultats.....	49
IV.4.1.2 Commentaires.....	49

IV.4.1.3 Interprétation.....	49
IV.4.2 Deuxième essai.....	50
IV.4.2.1 Représentation graphique des résultats.....	50
IV.4.2.2 Commentaires.....	50
IV.4.2.3 Interprétation.....	50
IV.5 Température à la surface et l'entrée l'absorbeur sans écoulement d'eau.....	51
IV.6 Conclusion.....	51
Conclusion générale.....	52

Liste des figures

Chapitre I

Figure I.1 : l'image la plus proche du soleil prise par Solar orbitale le 30 Mai 2020.....	2
Figure I.2 : Répartition spectrale du rayonnement solaire.....	3
Figure I.3 : les rayonnements solaires.....	4
Figure I.4 : panneaux solaire photovoltaïques.....	6
Figure I.5 : panneaux solaires thermiques.....	6
Figure I.6 : Principaux systèmes de collecteurs solaires à concentration.....	7
Figure I.7 : Le potentiel solaire dans le monde.....	8
Figure I.8 : le potentiel solaire en Algérie.....	9
Figure I.9 : l'orbite de la terrestre.....	10
Figure I.10 : les coordonnées géographiques.....	10
Figure I.11 : Longitude.....	11
Figure I.12 : la latitude.....	11
Figure I.13 : Coordonnées horaires.....	12
Figure I.14 : la déclinaison du soleil en fonction des jours.....	12
Figure I.15 : les coordonnées horizontales.....	13

Chapitre II

Figure II.1 concentrateur parabolique.....	15
Figure II.2 Propriétés géométrique de la parabole.....	16
Figure II.3 Section d'une parabole possédant un foyer commun F et le même diamètre d'ouverture d	17
Figure II.4 Distance focale en fonction de l'angle d'ouverture d'une parabole $d = 1m$	17
Figure II.5 Système optique d'une surface parabolique.....	18
Figure II.6 Paraboloïde de révolution.....	19
Figure II.7 élément différentiel de surface parabolique.....	19
Figure II.8 catégories des récepteurs.....	20

Figure II.9 l'image d'ellipse.....	21
Figure II.10 distance axiale arrière du point focal.....	21
Figure II.11 concentration géométrique à différentes valeurs du récepteur (d2).....	22
Figure II.12 réflexion d'un rayon parallèle.....	23
Chapitre III	
Figure III.1 modélisation du prototype réalisé.....	27
Figure III.2 Schémas synoptique de la poursuite solaire.....	28
Figure III.3 Capteur LDR.....	29
Figure III.4 résistance 10k Ohms.....	29
Figure III.5 résistance 220 Ohms.....	29
Figure III.6 LED.....	30
Figure III.7 Symbol d'une LED.....	30
Figure III.8 Thermocouple	30
Figure III.9 Multimètre.....	30
Figure III.10 carte Arduino MEGA 2560.....	31
Figure III.11 Structure d'un logiciel Arduino.....	32
Figure III.12 Câble USB.....	33
Figure III.13 Fils pin.....	33
Figure III.14 Plaque d'essai.....	33
Figure III.15 Circuit de puissance du moteur.....	34
Figure III.16 Module relais Arduino.....	34
Figure III.17 Schéma électrique équivalent du MCC.....	36
Figure III.18 Moteur essuie glaces.....	36
Figure III.19 Batterie 12V.....	37
Figure III.20 Variateur de vitesse 12v.....	37
Figure III.21 réflecteur.....	37

Figure III.22 l'absorbeur.....	38
Figure III.23 Bras de l'absorbeur.....	39
Figure III.24 Arbres de la parabole.....	39
Figure III.25 Arbres de la parabole.....	40
Figure III.26 Cadre de la parabole	40
Figure III.27 Support de rotation horizontale.....	41
Figure III.28 Le socle.....	41
Figure III.29 Support de stabilité.....	42
Figure III.30 Réducteur de module 2 et de rapport 2/3.....	42
Figure III.31 chaine d'entraînement.....	43

Chapitre IV

Figure IV.1 Le concentrateur avant et après les modifications.....	45
Figure IV.2 L'absorbeur avant et après les modifications.....	46
Figure IV.3 fonctionnement du programme Arduino	46
Figure IV.4 Graphe d'évolution de la température en fonction du temps le 22/08/2022.....	49
Figure IV.5 Graphe d'évolution de la température en fonction du temps le 08/09/2022.....	50
FigureIV.6 Température à la surface et à l'intérieur de l'absorbeur.....	51

Liste des tableaux

Chapitre I

Tableau I.1 Caractéristiques physiques du soleil.....3

Tableaux I.2 Composition de la photosphère.....3

Chapitre III

Tableau III.1 Fiche technique du motoréducteur pour essuie-glaces.....36

Tableau III.2 Caractéristiques physique du réflecteur.....37

Tableau III.3 Caractéristiques physiques de l'absorbeur.....38

Chapitre IV

Tableau IV.1 Résultat de mesures du 22/08/2022.....47

Tableau IV.2 Résultat de mesures du 08/09/2022.....48

Nomenclature

A : Latitude.

δ : Déclinaison solaire.

ω : Angle horaire.

ε : Facteur émissivité de l'absorbeur.

σ : Constante de Stefan – Boltzmann.

α : Azimut.

h : Hauteur angulaire du soleil

f : La distance focale (FV) entre le foyer (F) et le sommet (V).

p : Rayon parabolique; distance (RF) entre le foyer (F) et la courbe de la parabole.

Ψ : Angle mesuré à partir de ligne (FV) et le rayon parabolique (p).

Ψ_p : Angle d'ouverture d'une parabole.

A_a : Surface d'ouverture d'un paraboloïde

A_x : Surface d'une parabole.

s : Longueur d'arc d'une parabole.

S_f : Petit rayon de l'ellipse.

r_f : Grand rayon de l'ellipse.

C_g : Concentration géométrique.

C_o : Concentration optique.

C_{max} : concentration maximale.

ds : longueur différentielle d'arc de la parabole

I_r : L'énergie reçue à l'ouverture du récepteur.

I_o : L'énergie reçue à l'ouverture du paraboloïde.

Q_a : Puissance solaire absorbée par l'ouverture du récepteur.

η_{op} : Rendement optique du concentrateur.

I_b : Energie reçue à l'ouverture du concentrateur.

τ : Coefficient de transmission du récepteur.

α : Coefficient d'absorption du récepteur.

ρ : Coefficient de réflexion de la parabole.

Q_p : Puissance correspondant aux pertes thermiques.

$Q_{p,cv}$: Pertes par convection.

$Q_{p,r}$: Pertes par rayonnement.

$Q_{p,cd}$: Pertes par conduction.

A_γ : Surface d'ouverture du récepteur.

T_r : Température du récepteur.

T_a : Température ambiante.

T_{sk} : Température du ciel.

h_{cv} : Coefficient de transfert par convection.

N_u : Nombre de Nusselt

R_e : Nombre de Reynolds.

P_r : Nombre de Prandtl.

V : Vitesse du vent.

λ : Conductivité thermique de l'air.

ν : Viscosité de l'air.

$U(t)$: La tension appliquée aux bornes du moteur.

$i(t)$: Le courant.

$E(t)$: La force électromotrice.

$C_m(t)$: Le couple moteur.

$C_r(t)$: Le couple résistant.

$\omega(t)$: La vitesse de rotation du moteur.

R : = La résistance des armatures du moteur.

L : L'inductance des armatures du moteur.

J : = L'inertie du moteur.

f : Le coefficient de frottement.

K' : La constante du couple moteur et de force électromotrice

Ph : Capteur haut

Pb : Capteur bas

Pg : Capteur gauche

Pd : Capteur droit.

INTRODUCTION GENERALE

Introduction générale

A l'heure actuelle, plusieurs pays européens vivent une crise sans précédent dans la satisfaction de leurs besoins en produits énergétiques, tel le pétrole ou le gaz naturel, à cause de la guerre en Ukraine. Le souci majeur de ces pays est la production de l'électricité et le chauffage.

Pour minimiser cette dépendance aux énergies fossiles, tous les pays du monde se sont mis à investir dans les énergies renouvelables, notamment les éoliennes et/ou la photovoltaïque communément appelée l'énergie solaire. Toutefois, l'investissement dans cette dernière dépend principalement du taux d'ensoleillement dans l'année.

D'ailleurs, comme l'Algérie est l'un des pays les plus ensoleillés au monde, plusieurs études de recherches et de fin de cycles ont été faites à travers les universités algériennes dont la notre « Abderrahmane Mira de BEJAIA ». [10]

Généralement les études déjà réalisées concernent essentiellement la capture des rayons solaires et leur transformation en énergie électrique.

Cependant, il existe des études de recherche qui avaient pour objectif la réalisation d'un concentrateur de rayons solaires dont l'énergie thermique produite sera utilisée à des fins autres que la production de l'électricité.

Les études menées ces dernières années concernant ces concentrateurs étaient soit des modifications ou des améliorations de celles qui les ont précédées.

La dernière étude en date remonte à 2020, quand un concentrateur parabolique a été réalisé sur vérin électrique, mais celui-ci a connu des défaillances.

Nous avons trouvé en ce projet l'occasion parfaite de mettre en œuvre nos connaissances acquises. Pour cela, notre travail consiste à améliorer ce concentrateur parabolique sur lequel nous avons apporté des modifications majeures.

Ainsi, nous avons devisé notre travail en quatre chapitres, ces chapitres sont partagés de la manière suivante :

Le chapitre 1 est consacré aux généralités sur le rayonnement solaire et ses relations avec le concentrateur

Au chapitre 2, nous avons présenté les propriétés et les caractéristiques du concentrateur parabolique et ses composants afin de nous permettre de bien comprendre son fonctionnement.

Dans le chapitre 3, nous avons étalé les procédures que nous avons suivies pour la réalisation du concentrateur parabolique.

Le chapitre 4 a concerné les expérimentations et les résultats obtenus.

Enfin, nous clôturant ce mémoire par une conclusion générale.

Chapitre I

Généralités sur le rayonnement solaire

I.1 Introduction

Le soleil, c'est cette grande étoile qui brille dans l'espace et l'élément indispensable et incontournable de la vie sur Terre. Il est la source de base la plus importante des énergies renouvelables.

Cet astre lumineux nous envoie une énergie considérable qui, à la fois, nous réchauffe, nous illumine et fait développer la faune et la flore de la Terre. Le soleil est à l'origine des vents, du cycle de l'eau et des énergies fossiles.

Nous entamons donc le présent chapitre par un aperçu général autour du soleil, en enchaînant avec des définitions de certains concepts fondamentaux liés à notre recherche qui se base sur l'énergie solaire et les différentes façons par lesquelles on peut l'exploiter ; sans omettre de faire une présentation de l'énergie solaire en Algérie.

I.2 Le soleil

Formé il y a 4,6 milliards d'années, cette énorme sphère incandescente de plasma est un véritable réacteur nucléaire naturel. Le Soleil fournit de la lumière et de la chaleur aux différents éléments du système solaire [1].

L'astre Soleil est de constitution gazeuse, de forme sphérique de 1 392 000 km de diamètre. Sa masse est de l'ordre de $1,9891 \times 10^{30}$ kg. Il se compose de 73,46 % d'hydrogène, de 24,85 % d'hélium, les 1,69% restants sont un mélange de plusieurs éléments. [2]

Située à 150 millions de kilomètres de la Terre, c'est l'étoile la plus proche de notre planète. Sa lumière met 8 minutes et 18 secondes à nous atteindre. Sa luminosité totale, qui est la puissance émise sous forme de photons, est à peu près égale à 4×10^{26} W, mais seuls $1,74 \times 10^{17}$ W sont captés par la terre. Cette lumière nous arrive principalement sous forme d'ondes électromagnétiques dont 30% de cette puissance sont réfléchis vers l'espace, 47% sont absorbés par la terre et 23% sont utilisés comme source d'énergie pour le cycle d'hydrologique. [2]

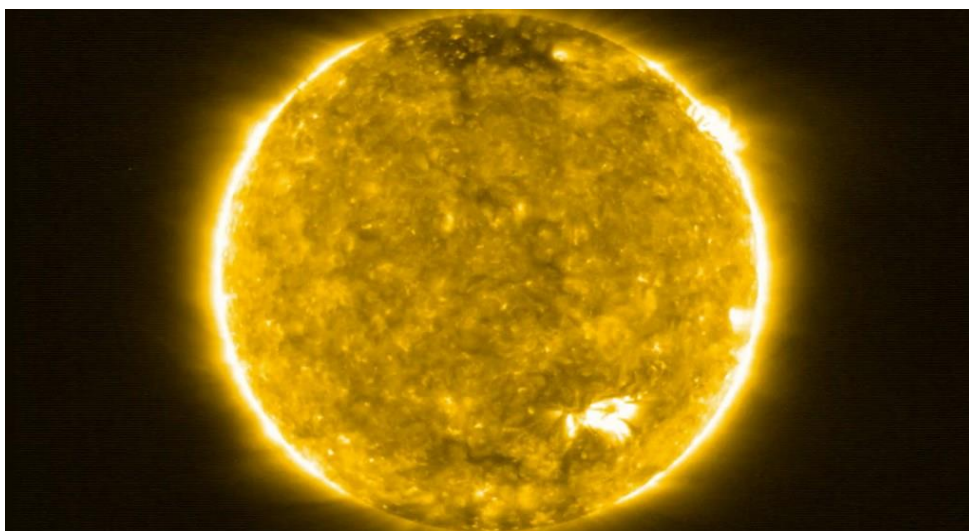


Figure 1 : L'image la plus proche du soleil prise par Solar orbitale [2]

Les tableaux ci-dessous regroupent les caractéristiques principales du soleil [2] :

Caractéristiques physiques		
Aplatissement aux pôles		9×10^{-6}
Surface		$6,09 \times 10^{12}$ km ²
Volume		$1,41 \times 10^{18}$ km ³
Masse		$1,9891 \times 10^{30}$ kg
Densité	moyenne	1 408 kg/m
	au centre	150 000 kg/m ³
Vitesse de libération		617,54 km/s
Température	au centre	14 MK
	à la surface	5800 K
	couronne	5 MK
Luminosité		$3,826 \times 10^{26}$ W

Composition de la photosphère (pourcentage en masse)	
Hydrogène	73,46 %
Hélium	24,85 %
Oxygène	0,77 %
Carbone	0,29 %
Fer	0,16 %
Néon	0,12 %
Azote	0,09 %
Silicium	0,07 %
Magnésium	0,05 %
Soufre	00,04 %

Tableau I.1 :
Caractéristiques physiques du soleil

Tableau I.2 :
Composition de la photosphère

I.3 Rayonnement solaire

Le rayonnement solaire représente l'ensemble des ondes électromagnétiques émises par le Soleil. Il est composé d'ultraviolets, de la lumière visible, d'ondes radio et de rayons cosmiques. Le rayonnement solaire se présente comme celui d'un corps noir à 5 800°K.

En dehors de l'atmosphère, l'énergie solaire reçue par la terre est environ 1 370 W/m² [3,4]. Cette grandeur est appelée constante solaire. En traversant l'atmosphère, le rayonnement solaire est absorbé et transmis.

La Figure I.2 montre la répartition spectrale du rayonnement solaire.

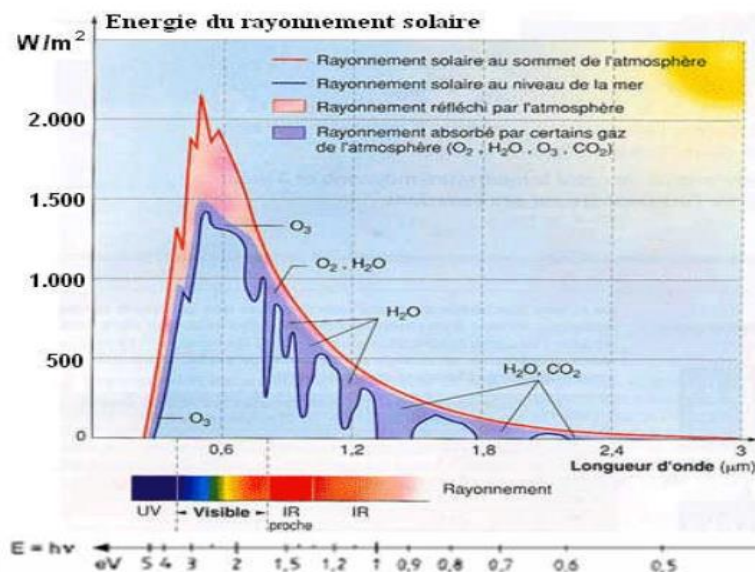


Figure I.2 : Répartition spectrale du rayonnement solaire

Le rayonnement solaire est caractérisé par les composants suivants :

I.3.1 Le rayonnement direct

C'est le rayonnement qui atteint directement le sol depuis le soleil. Il dépend de l'inclinaison des rayons par rapport au sol et de l'épaisseur de l'atmosphère que la radiation solaire doit traverser. Il est donc nul lorsque le soleil est obscurci par les nuages.

Pour mesurer l'intensité de ce rayonnement on utilise un pyréliomètre constamment orienté vers le soleil [5].

I.3.2 Rayonnement diffus

Le rayonnement diffus apparaît lorsque le rayonnement solaire direct se dissipe dans les nuages et les particules atmosphériques. Le rayonnement diffus résulte de la déflexion de la lumière par les nuages et les différentes molécules en suspension dans l'atmosphère, et de sa réflexion par le sol. Il s'agit donc d'un rayonnement qui ne suit pas une direction définie par le soleil vers un point d'observation à la surface de la Terre, et qui n'est donc nul que la nuit. Ce rayonnement est mesuré à l'aide d'un pyranomètre associé à un écran destiné à recouvrir le disque solaire [5].

I.3.3 Le rayonnement réfléchi ou l'albédo

C'est la partie d'un rayonnement incident diffusée ou réfléchi par un obstacle, soit les sols et les nuages. L'albédo varie de 0 à 1, pour un corps noir sans aucune réflexion, il est nul, alors que pour un miroir parfait qui diffuse dans toutes les directions sans absorption de rayonnement, il est de 1 [5].

I.3.4 Le rayonnement solaire global

Est alors la somme des trois types de rayonnements direct, diffus et réfléchi. L'intensité de ce rayonnement est variable d'un endroit à un autre et d'une heure à l'autre.

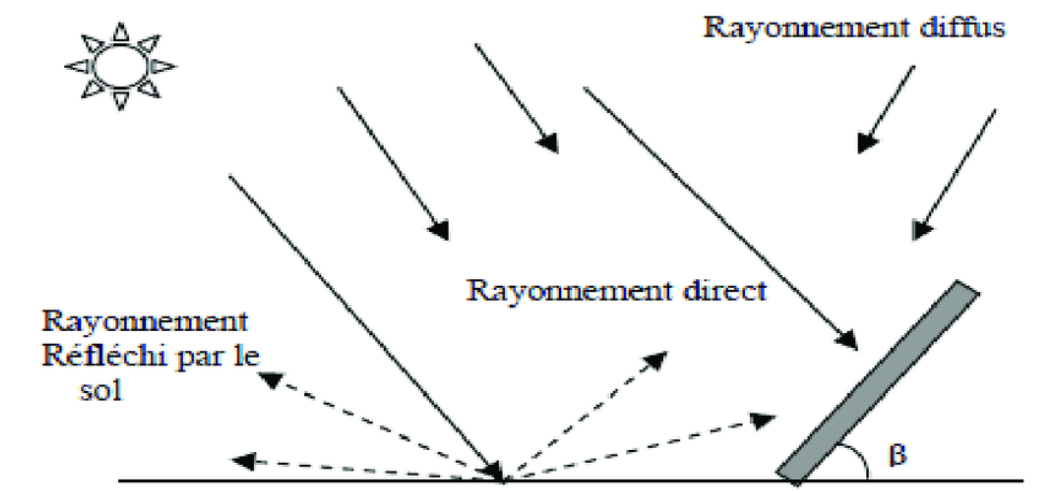


Figure I.3 : es rayonnements solaires

I.4 L'énergie solaire

L'énergie solaire se place dans la catégorie des énergies renouvelables par excellence puisqu'on la considère comme inépuisable car elle est générée grâce aux rayonnements électromagnétiques produits par le soleil et transmis sous forme de lumière et de chaleur.

Présente presque sur toute la surface de la terre, cette énergie offre certains avantages non négligeables comparés aux autres sources énergétiques, puisqu'elle est locale, gratuite, propre et durable. Elle est dite énergie 100% verte car sa production n'émet pas directement de CO₂.

1.4.1 Les avantages et les inconvénients de l'énergie solaire [6]**I.4.1.1. Les avantages:**

- Non polluante et inépuisable (énergie renouvelable) et propre, elle ne dégage pas de gaz à effet de serre.
- L'énergie solaire thermique fournit une partie des besoins en eau chaude sanitaire et en chauffage. Les panneaux thermiques peuvent réaliser des économies considérables.
- Les couts d'entretien et d'exploitation d'une centrale thermique sont relativement faibles.
- L'efficacité énergétique est positive : prend 3 à 4 ans en moyenne pour que les panneaux génèrent l'énergie nécessaire à la fabrication. Tandis que les panneaux solaires sont en moyenne entre 9 à 14 fois l'énergie consommée pour sa fabrication.
- Elle est une source d'énergie électrique silencieuse contrairement aux autres énergies.

I.4.1.2 Les inconvénients

- L'installation solaire thermique, les panneaux et les concentrateurs solaires coûtent trop chers.
- L'énergie solaire est une énergie intermittente. Il faut donc un système de chauffage d'appoint.
- Pour un temps non ensoleillé, il n'est pas possible d'utiliser cette énergie.
- Il faut pouvoir stocker la chaleur dans des ballons ou des dalles chauffantes.
- La durée de vie d'une installation photovoltaïque n'est pas éternelle. Elle dure entre 20 et 30 ans. Le rendement des cellules photovoltaïques diminue avec le temps.
- Les panneaux thermiques sont sensibles à la grêle et au gel.

1.5. Les types d'exploitation de l'énergie solaire

Il faut dire que les techniques d'exploitation de l'énergie solaire n'ont cessé d'être améliorées au fil des années. Aujourd'hui, on compte trois types d'énergie solaire catégorisés selon leurs méthodes de production.

1.5.1 L'énergie solaire photovoltaïque

L'une des méthodes les plus courantes dans l'exploitation de l'énergie solaire est l'utilisation des systèmes photovoltaïques qui produisent directement de l'électricité à partir de la lumière du soleil.

Cela est rendu possible grâce à l'installation de panneaux solaires photovoltaïques qui sont composés d'une superposition de couches de cellules de silicium dont l'une est chargée négativement et l'autre positivement. Lorsque le rayonnement du soleil entre en contact avec l'une des faces, une différence de tension électrique se produit ; ce qui fait circuler les électrons d'une face à une autre, générant ainsi un courant électrique. Pour exploiter l'électricité produite, un fil est raccordé à la borne négative et un autre à la borne positive [7].



Figure I.4 : Panneaux solaire photovoltaïques

1.5.2 L'énergie solaire thermique

Ce type d'énergie est produit à partir des panneaux solaires thermiques qui absorbent la chaleur du soleil. Ces panneaux contiennent des fluides caloporteurs, qui une fois chauffés par le soleil, chauffent à leur tour le ballon d'eau chaude. L'énergie thermique solaire ainsi obtenue peut être utilisée sous différentes façons tels les chauffages solaires, les chauffe-eau, les cuisinières, ...etc.



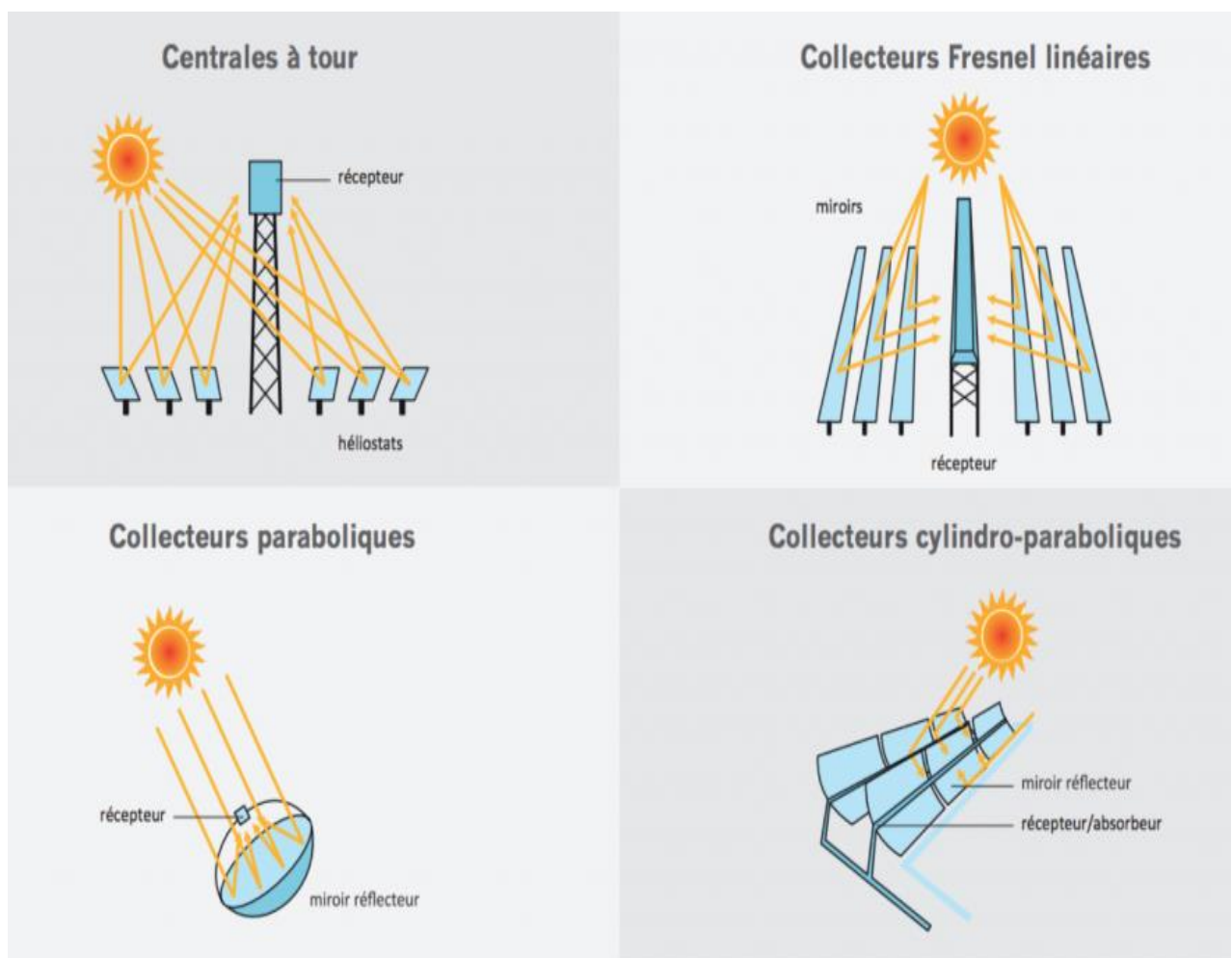
Figure I.5 : Panneaux solaires thermiques

1.5.3 L'énergie solaire thermodynamique

Cette énergie est produite par des centrales solaires thermodynamiques, aussi appelés centrales solaires à concentration. Ces équipements sont composés de miroirs, qui transforment l'énergie collectée par les rayons du soleil en chaleur.

Ces miroirs sont placés de façon à converger les rayons solaires vers un fluide caloporteur chauffé à haute température, bien supérieure à celle collectée, elle peut aller de 600°C à 1000°C selon la technique employée. Le fluide produit de l'électricité via des turbines à gaz ou à vapeur [8].

Il existe quatre types majeurs de centrales solaires, les centrales solaires à miroirs de Fresnel, les centrales à tour, les centrales à miroirs cylindro-paraboliques et enfin les centrales à miroir parabolique Dish-Stirling [8].



Concentration ponctuelle

Concentration linéaire

Figure I.6 : Principaux systèmes de collecteurs solaires à concentration

I.6 Le potentiel solaire dans le monde

L'énergie solaire satisfait en premier lieu les zones isolées, tels que les montagnes, les îles, les zones rurales particulièrement en Afrique et en Asie. Depuis les années 2000, l'énergie solaire prend un développement mondial croissant, suite au réchauffement climatique et à la nécessité de développer les énergies renouvelables non émettrices de CO₂.

L'exploitation de 0,01% de l'énergie solaire est suffisante pour couvrir les besoins de la planète. Chaque année, la quantité d'énergie reçue par la terre est estimée à 1.070.000 PWh qui représentent 8000 fois la consommation énergétique mondiale annuelle qui est de 133 PWh en 2005. Malgré cela, cette exploitation est freinée à cause de l'ensoleillement et la difficulté de stockage que ce soit thermique ou électrique [9].

Cependant, il est nécessaire de le rappeler que c'est l'énergie solaire qui est à l'origine des différentes énergies (hydropique, éolienne, marine, biomasse, ...), par le transfert de chaleur ou la photosynthèse qui les génère. Pourquoi donc ne pas en profiter directement de cette énergie solaire qu'on considère actuellement la plus importante ?

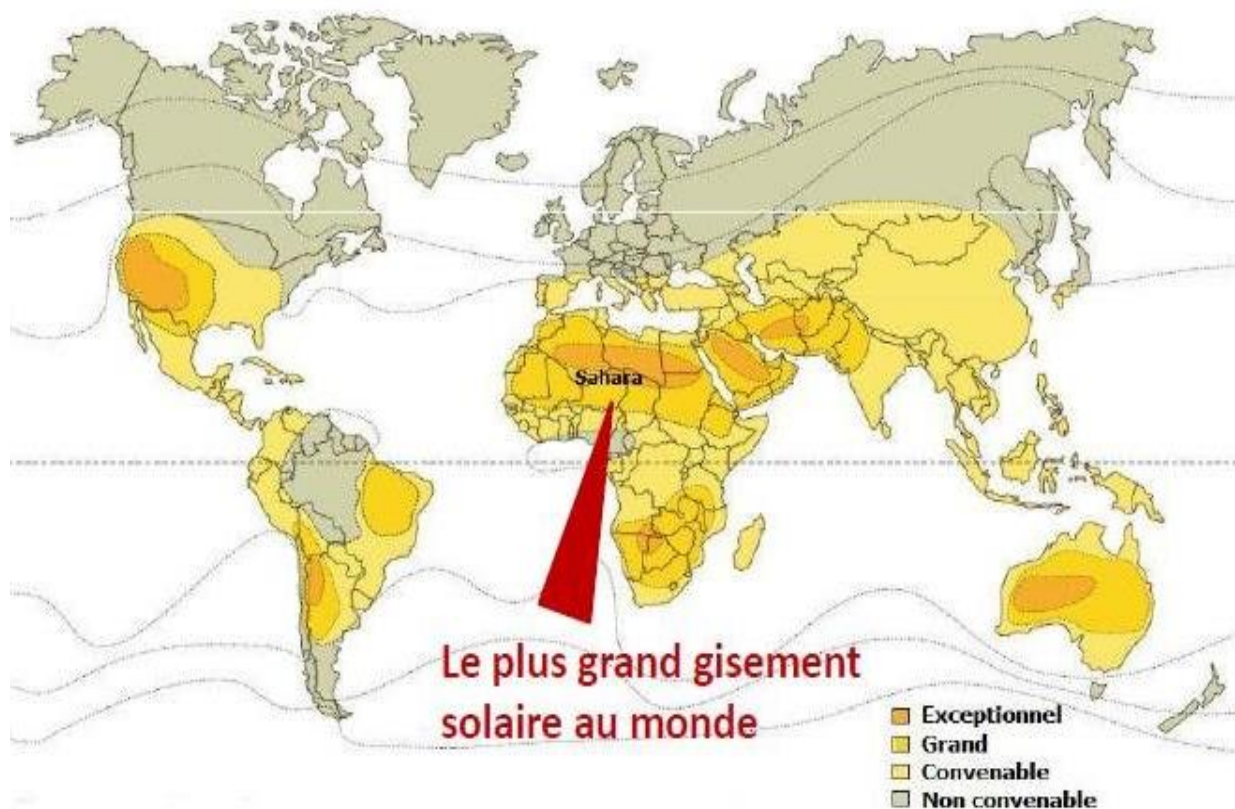


Figure I.7 : Le potentiel solaire dans le monde

1.7 Le potentiel solaire de l'Algérie

Avec une surface de plus de 2 millions km², l'Algérie est le plus vaste pays du bassin méditerranéen. Pour 169.000 TWh/an en thermique et 13,9 TWh/an en photovoltaïque, l'agence spatiale allemande (ASA) conclue par une évaluation satellite que le potentiel solaire de l'Algérie est le plus important dans toute la zone méditerranéenne [10]. La durée d'ensoleillement dans la quasi-totalité du pays dépasse les 2000 h/an et peut atteindre les 3900 h/an [11].

Pour pouvoir préserver les énergies fossiles et apporter des solutions globales et durables aux défis environnementaux, l'Algérie, par le biais de son ministère de l'énergie, s'engage dans la voie des énergies renouvelables en s'appuyant sur la mise en valeur des ressources inépuisables tel le solaire, et leur utilisation pour diversifier les sources d'énergies et préparer l'Algérie de demain [12].

Actuellement, la seule centrale thermodynamique à concentration solaire installée en Algérie qui est située à Hassi R'mel. Au niveau de cette centrale hybride (solaire-gaz) d'une puissance de 150 MW dont 30 MW solaire, on utilise des collecteurs cylindro-paraboliques pour la concentration solaire [13].

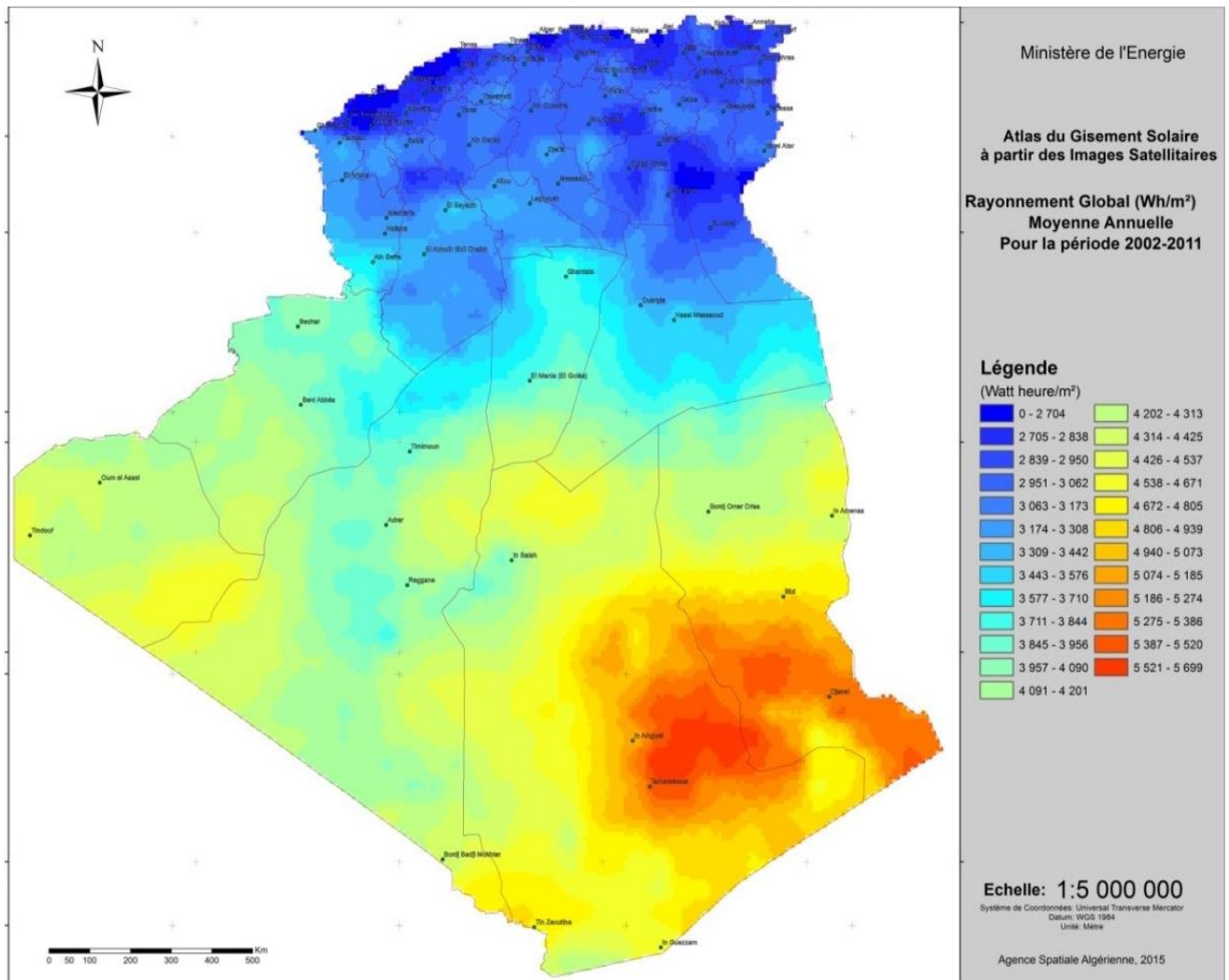


Figure I.8 : Le potentiel solaire en Algérie

1.8 Le mouvement de la terre autour du soleil (orbite terrestre)

La terre met 23 heures 56 minutes 41 secondes pour faire un tour complet sur elle-même par une vitesse angulaire de $7,292\ 115 \times 10^{-5}$ rad/s ; et pour une orbite elliptique complète autour du soleil, elle met environ 365 jours avec une vitesse linéaire de 465,1 m/s [14].

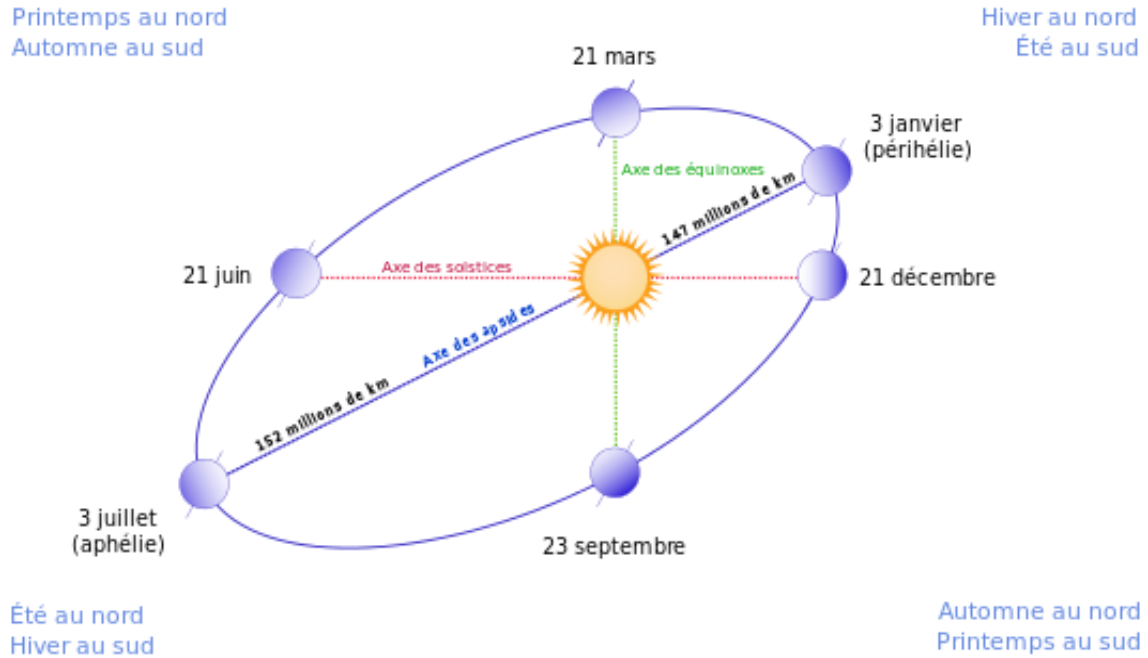


Figure I.9 : L'orbite terrestre

1.9 Coordonnées géographiques

Ce sont des coordonnées qui permettent de repérer et localiser un lieu sur terre, grâce à trois mesures : l'altitude ; la longitude ; la latitude. Elles sont notamment utilisées par les GPS.

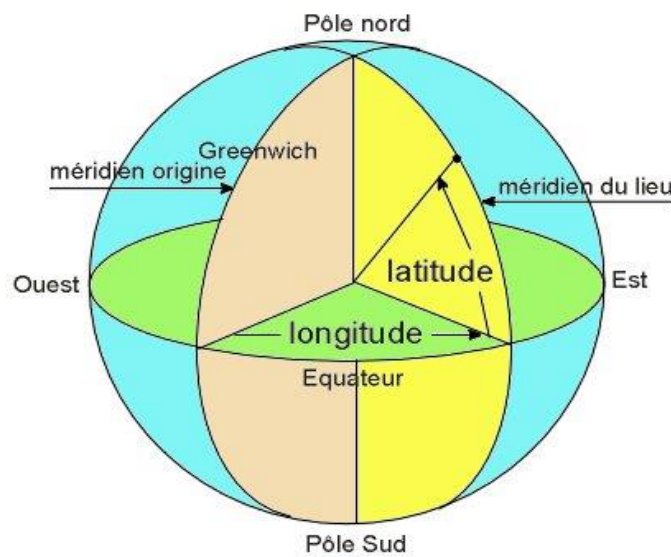


Figure I.10 : les Coordonnées géographiques

1.9.1 L'altitude

L'altitude est l'élévation verticale d'un objet par rapport au niveau de la mer. Cette distance est mesurée en mètres et en pied (dans l'aviation en générale). Elle agit sur plusieurs phénomène physique tel que la température, la pression atmosphérique, les rayonnements solaires, ...etc.

1.9.2 La longitude

La longitude est une coordonnée géographique qui permet de déterminer la position verticale d'un point sur le globe terrestre.

Une longitude donnée, matérialisée par un cercle appelé méridien, est l'angle formé entre le plan du méridien d'un lieu et le plan du méridien de Greenwich (méridien origine, de longitude 0 degré). Elle varie de + 180 degrés vers l'ouest à - 180 degrés vers l'est [15].

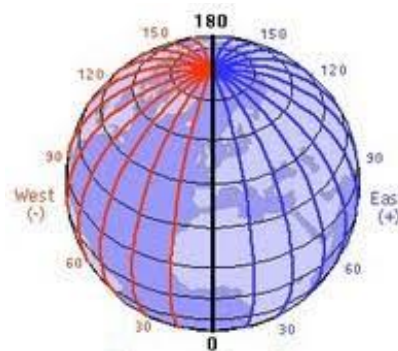


Figure I.11 : Longitude

1.9.3 La latitude

La latitude est une coordonnée géographique qui permet de repérer un point à la surface de la Terre.

Une latitude donnée, matérialisée par un cercle appelé parallèle, est l'angle formé entre la verticale d'un lieu et le plan de l'équateur. Elle varie de + 90 degrés vers le pôle Nord à - 90 degrés vers le pôle Sud [16].

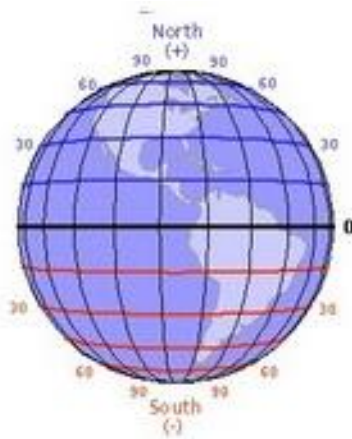


Figure I.12 : La latitude

1.10 Les coordonnées horaires

Le système de coordonnées horaires est dérivé du système de coordonnées horizontales en tournant autour de l’axe est-ouest dont l’amplitude est de 90° moins la latitude. Cette rotation ramène le zénith de ce lieu vers l’axe des pôles [9].

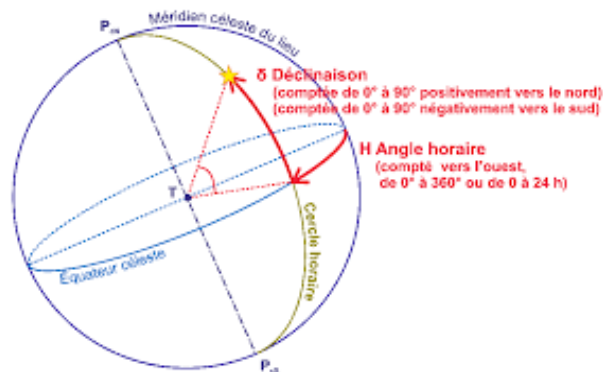


Figure I.13 : Coordonnées horaires

1.10.1 La déclinaison solaire

L’angle formé par la direction du soleil et le plan équatorial terrestre est appelé la déclinaison solaire. Elle varie entre -23°27’ et +23°27’, et elle s’annule aux équinoxes de printemps et d’automne [17].

Sa valeur peut être calculée par cette formule :

$$\delta = 23,45 \cdot \sin\left(360 \cdot \frac{284+n}{365}\right) \tag{I.1}$$

n : Nombre de jours dans l’année.

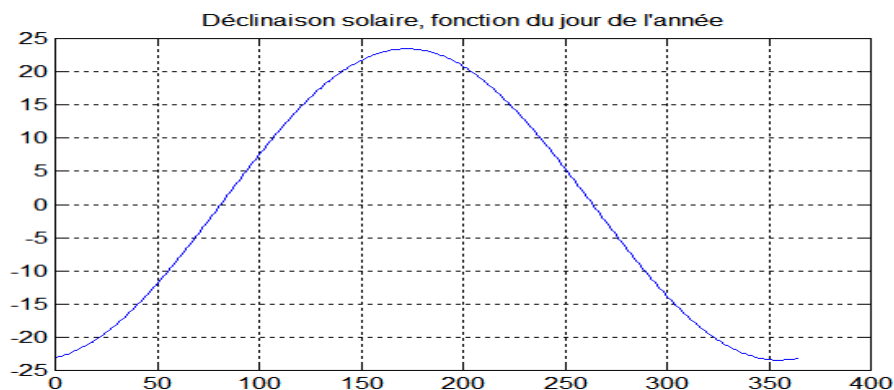


Figure I.14 : Déclinaison du soleil en fonction des jours

1.10.2 L’angle horaire

L’angle horaire du soleil est l’angle entre le plan méridien du lieu et celui qui passe par la direction du soleil si l’on prend comme origine le méridien de Greenwich. Il est compris entre 0° et 360°, et il est nul à midi, négative le matin, positive dans l’après-midi. Il peut augmenter de 15° par heure. [18,19]

1.11 Les coordonnées horizontales

Dites aussi système local, utilisés en astronomie attaché à un observateur terrestre. Son plan de référence est le plan horizontal qui est perpendiculaire à la verticale du lieu. Le repère d'un point est fait deux angles : la hauteur et l'azimut. Son plan de référence est le plan horizontal, perpendiculaire à la verticale du lieu.

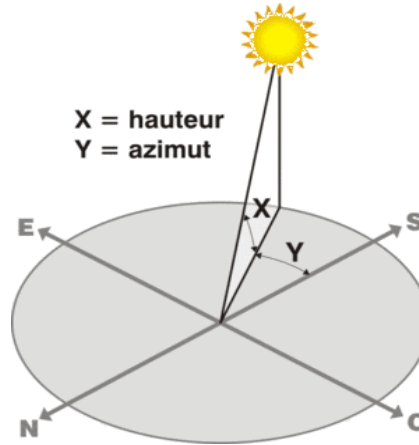


Figure I.15 : Coordonnées horizontales

1.11.1 La hauteur angulaire solaire

Cet angle est compris entre la direction du soleil et le plan Horizontale. Compris entre 0° à 90° vers le zénith et de 0°vers - 90° vers le nadir. Il est exprimé en fonction de la latitude du lieu, la déclinaison et l'angle horaire du soleil [18,19] :

$$\mathbf{Sin(h) = cos(A).cos(\delta).cos(\omega) + sin(A).sin(\delta)} \quad \mathbf{(I.2)}$$

A : La latitude.

δ : Déclinaison solaire.

ω : L'angle horaire.

1.11.2 L'azimut

L'azimut est l'angle compris entre le méridien du lieu et le plan vertical passant par le soleil. Il est mesuré depuis le nord en degré de 0° à 360° dans le sens rétrograde (sens des aiguilles d'une montre) : ainsi l'est est au 90°, le sud au 180° et l'ouest au 270°. Exprimé en fonction de la hauteur angulaire du soleil, la déclinaison et l'angle horaire du soleil [18,19] :

$$\mathbf{sin(\alpha)= sin(\delta).sin(\omega)/cos(h)} \quad \mathbf{(I.3)}$$

On peut l'exprimer aussi indépendamment de la hauteur :

$$\mathbf{tang(\alpha)=sin(\omega)/(sin(A).cos(\omega)-cos(A).tang(A)} \quad \mathbf{(I.4)}$$

Conclusion

Pour conclure, nous dirons que notre objectif dans ce chapitre était de faire un récapitulatif de quelques notions de base et de faire la lumière sur les différentes méthodes d'exploitation de l'énergie solaire qui existe dans le monde, ainsi que sur le potentiel solaire en Algérie qui s'engage sur la voie des énergies renouvelables.

Chapitre II
Etude du concentrateur
parabolique

II.1 Introduction

Parmi les types d'exploitation de l'énergie solaire, le concentrateur est peut-être le mieux indiqué pour transformer l'énergie collectée des rayons solaires en chaleur, qui peut aisément dépasser les 600°C.

Ainsi, dans le présent chapitre nous avons présenté les propriétés et les caractéristiques du concentrateur parabolique et ses composants.

II.2 Définition et principe de fonctionnement

C'est un système à réflecteur parabolique qui concentre tout le rayonnement solaire en un seul point afin d'obtenir des températures élevées.

Son fonctionnement est basé sur l'exploitation de la réflexion des rayons solaires à travers des surfaces réfléchissantes. Il s'agit généralement d'un assemblage de miroirs paraboliques. Le but est de concentrer les rayonnements solaires dans un récepteur de taille confinée placé à son foyer. Ce dernier contient un fluide qui en absorbe le rayonnement réfléchi, atteint des températures très élevées, allant jusqu'à 1000°C. Ce fluide très chaud est ensuite utilisé pour produire de l'électricité [20].

Ce système présente plusieurs avantages dont on cite les suivants :

- Source d'énergie inépuisable et abondante ;
- Pas de combustible ni d'émission polluante ;
- Bon rendement ;
- Petites unités indépendantes.

La figure II.1 montre le principe de fonctionnement du concentrateur parabolique :

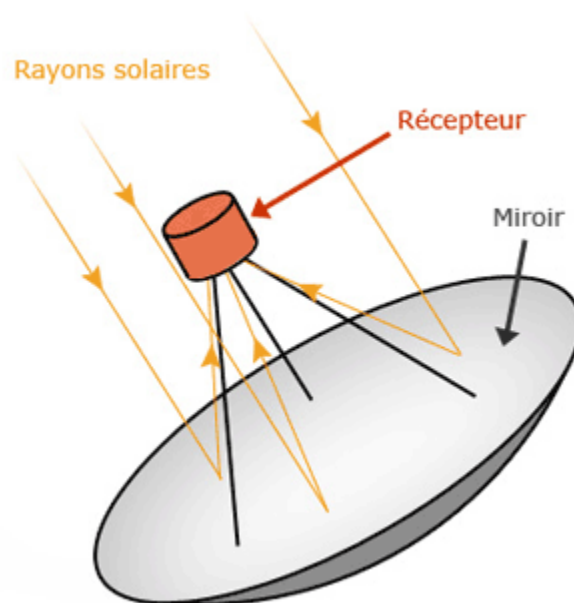


Figure II.1 Concentrateur parabolique

II.3 Propriétés et caractéristiques du concentrateur parabolique

II.3.1 La géométrie du concentrateur parabolique

Une parabole est le parcours d'un point qui se déplace de façon à ce que la distance d'une ligne fixe et d'un point fixe soit égale.

La ligne fixe (D) est appelée directrice, le point fixe (F) est appelé foyer et la ligne perpendiculaire à la directrice (D) et passant par le foyer (F) est appelé l'axe de la parabole. Le point d'intersection de la parabole et de son axe est appelé le sommet (V), qui est exactement l'intermédiaire entre le foyer et la directrice. Ceci est illustré sur la figure (II.2) [21].

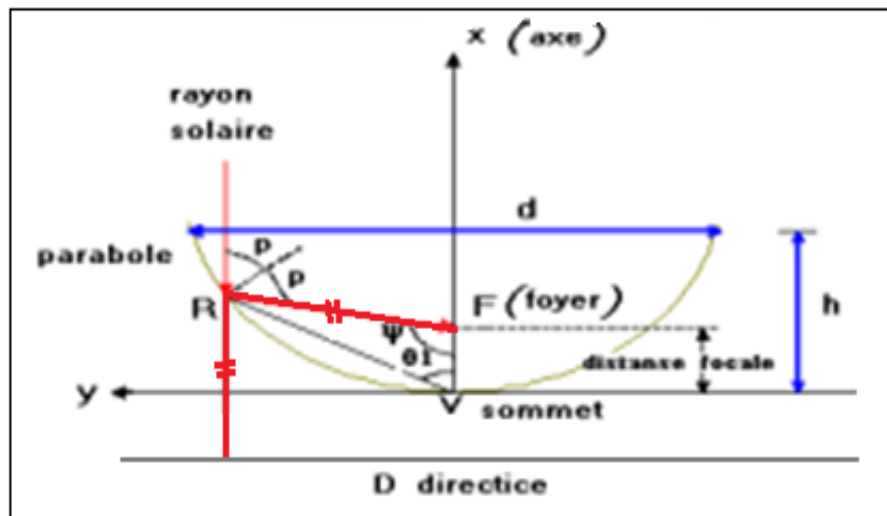


Figure II.2 Propriétés géométrique de la parabole

Si on prend l'origine au sommet (V) et l'axe des abscisses le long de l'axe de la parabole, on aura :

L'équation de la parabole est [22] :

$$Y^2 = 4. f. x \tag{II.1}$$

L'équation de rayon parabolique :

$$p = \frac{2.f}{1+\cos \psi} \tag{II.2}$$

f : La distance focale (FV) entre le foyer (F) et le sommet (V).

p : Rayon parabolique; distance (RF) entre le foyer (F) et la courbe de la parabole.

ψ : Angle mesuré à partir de ligne (FV) et le rayon parabolique (*p*).

II.3.2 Angle d'ouverture d'une parabole

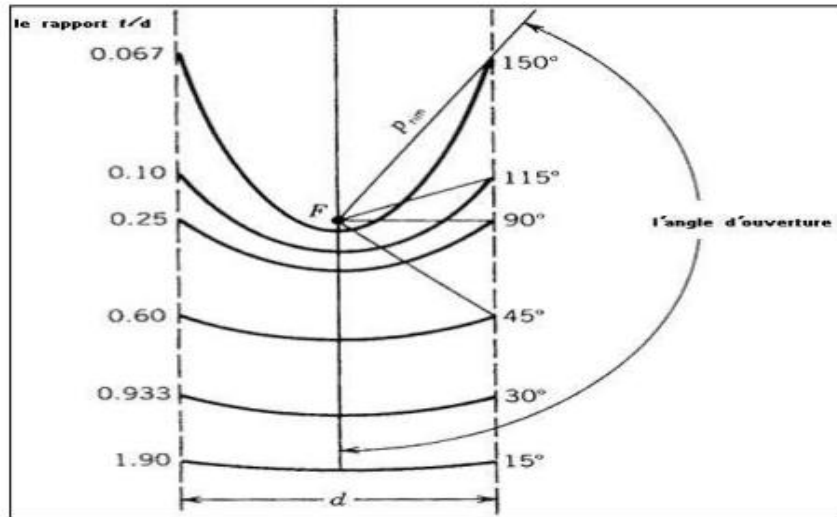


Figure II.3 Section d'une parabole possédant un foyer commun F et le même diamètre d'ouverture d [23].

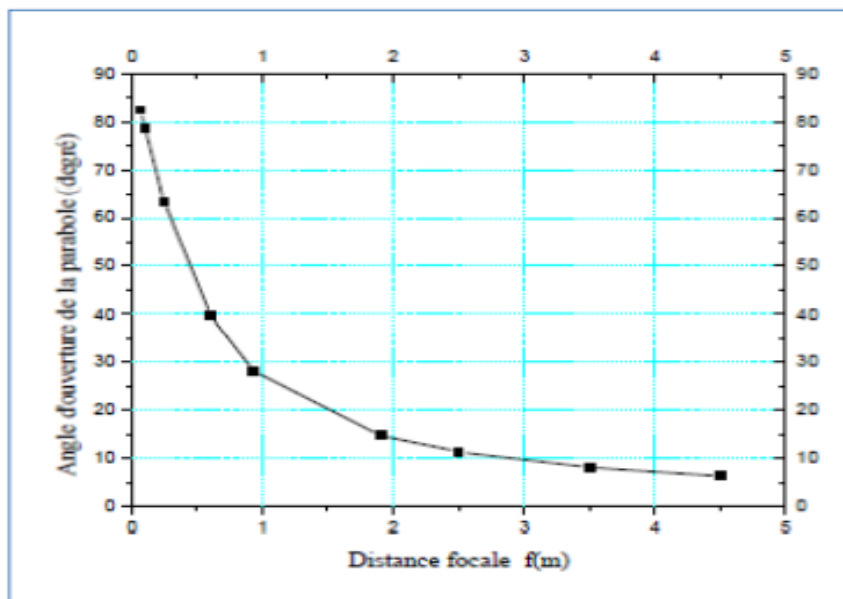


Figure II.4 Distance focale en fonction de l'angle d'ouverture d'une parabole d =1m

A partir des figures (II.3) et (II.4), on constate que pour un petit angle d'ouverture, on aura une parabole relativement plate et une distance focale plutôt élevée. L'augmentation de cet angle donnera une parabole plus courbée et diminuera la distance focale.

L'équation (II.3) permet d'obtenir l'angle d'ouverture en fonction des dimensions d'une parabole.

$$\tan \psi_p = \frac{f/d}{2 \cdot (f/d)^2 - \frac{1}{8}} \tag{II.3}$$

II.3.3 Dimensions d'une parabole

II.3.3.1 Taille d'une parabole

La taille h de la parabole peut être définie comme la distance maximale du sommet à la ligne droite à travers l'ouverture de la parabole, elle est définie par [24] :

$$h = \frac{d^2}{16.f} \tag{II.4}$$

En fonction de ces dimensions on peut calculer l'angle d'ouverture :

$$\tan \psi_p = \frac{1}{\frac{d}{8h} - \frac{2h}{d}} \tag{II.5}$$

II.3.3.2 Surface d'une parabole

C'est l'espace entre la parabole et la droite passant par son ouverture. Elle est exprimée comme suit [23] :

$$A_x = \frac{2}{3} \cdot d \cdot h \tag{II.6}$$

II.3.3.3 Longueur d'arc d'une parabole

Celle-ci peut être trouvée en intégrant l'équation de la parabole (II.1), en appliquant les limites : $X=h$ et $Y=d/2$. On trouve [26] :

$$s = \left[\frac{d}{2} \sqrt{\left(\frac{4h}{d}\right)^2 + 1} \right] + 2 \cdot f \cdot \ln \left[\frac{4h}{d} + \sqrt{\left(\frac{4h}{d}\right)^2 + 1} \right] \tag{II.7}$$

II.3.4. Système optique d'une surface parabolique

Selon les lois de réflexion, tout rayon lumineux parallèle à l'axe de la parabole est réfléchi suivant une droite passant par le foyer. Donc tous les rayons réfléchis par la parabole sont focalisés en un point appelé « foyer » [22].

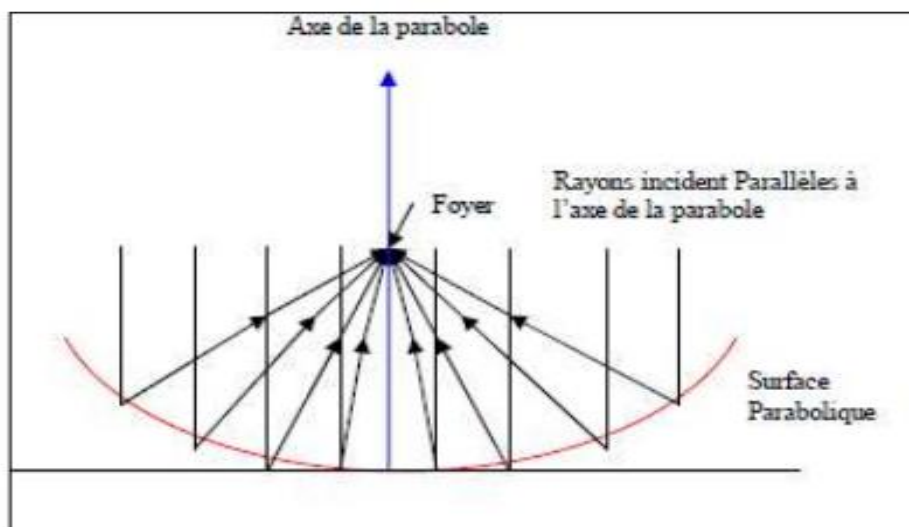


Figure II.5 Système optique d'une surface parabolique

II.3.5 Les composants d'un concentrateur solaire parabolique

Un concentrateur solaire parabolique se compose de :

II.3.5.1 Réflecteur (paraboloïde)

Un paraboloïde est obtenu avec une rotation de la parabole autour de son axe. L'équation qui représente le paraboloïde de révolution en coordonnées rectangulaires avec l'axe (Z) comme axe de symétrie est la suivante : [24,21]

$$X^2+Y^2=4.f.Z \tag{II.8}$$

$$Z = \frac{a^2}{4f} \tag{II.9}$$

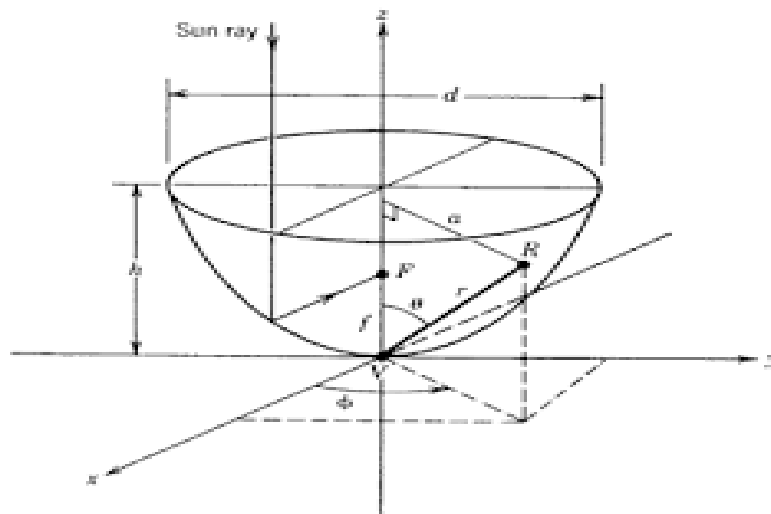


Figure II.6 Paraboloïde de révolution

On peut trouver la surface du paraboloïde en intégrant l'équation (II.11) :

$$dA_s = 2. \pi. a. \sqrt{dz^2 + da^2} \tag{II.10}$$

Nous pouvons donc définir une bande différentielle circulaire d'une surface sur le paraboloïde :

$$dA_s = 2. \pi. a. \sqrt{\left(\frac{a}{2f}\right)^2 + 1} da \tag{II.11}$$

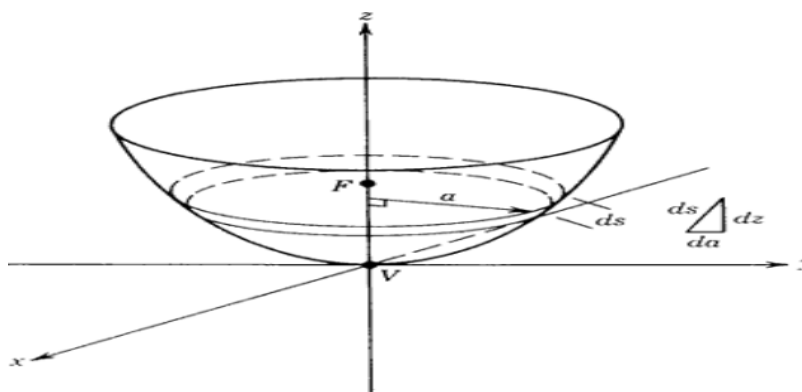


Figure II.7 Élément différentiel de surface parabolique

La surface d'un paraboloïde dont la distance focale **f** et le diamètre d'ouverture **d**, devient [21] :

$$A_s = \int_0^{d/2} dA_s = 8 \cdot \pi \cdot f^2 \left[\left(\left(\frac{d}{4f} \right)^2 + 1 \right)^{3/2} - 1 \right] \quad (\text{II.12})$$

La surface d'ouverture d'un paraboloïde :

$$A_a = \frac{\pi d^2}{4} \quad (\text{II.13})$$

En utilisant l'équation (II.2), ça devient :

$$A_a = \frac{\pi d^2}{4} (2 \cdot \pi \cdot \Psi_p)^2 \quad (\text{II.14})$$

$$A_a = 4 \cdot \pi \cdot f^2 \frac{\sin^2 \Psi_p}{1 + \cos \Psi_p} \quad (\text{II.15})$$

II.3.5.2 Récepteur (absorbeur)

Le récepteur doit absorber plus de flux solaire possible concentré et le convertir en énergie thermique, qui est transférée au fluide caloporteur (liquide ou gaz). On classe les récepteurs solaires en fonction de leurs surfaces de transfert en deux catégories :

II.3.5.2.1 Surface externe

Elle peut être sous plusieurs formes : cylindrique, plane, conique, sphérique. Elle dépend de la répartition, de l'intensité du flux, et de la température d'application. La gamme de température de ce genre de récepteur varie entre 300°C et 400°C.

II.3.5.2.2 Surface interne ou cavité

Ce type de récepteur est adapté pour le cas où l'intensité du flux et la température de travail sont élevés. Le flux énergétique concentré entre dans le récepteur par l'ouverture, sa surface est typiquement 5 à 10 fois plus petite que la surface de transfert de la cavité. [25]

C'est un moyen efficace pour améliorer le coefficient d'absorption et réduire les pertes. Cette surface doit avoir les caractéristiques suivantes :

- Un facteur d'absorption très proche de l'unité.
- Une bonne résistance chimique en fonction du fluide utilisé.
- Une bonne conductivité et diffusion thermique.

Les métaux sont les seuls à avoir un bon coefficient de conduction de chaleur (cuivre : 360 w/m.k, aluminium : 200 w/m.k, acier : 60 w/m.k) [20]. Pour cela, il faut que le récepteur soit métallique. Si le coefficient de conduction de chaleur est faible l'absorbeur doit être épais ce qui augmente son prix.



Figure II.8 Catégories des récepteurs.

II.3.5.2.3 Dimension du récepteur

Une parabole réfléchit tous les rayons parallèles à son axe au point foyer. Pour une taille angulaire finie du disque solaire, on peut affirmer que le diamètre apparent du disque solaire Θ_s est égal à 0,0093 rad soit 0,531° [26].

Quand l'angle d'ouverture d'une parabole en parfait état est aligné vers le soleil, les rayons réfléchis forment une image circulaire (tache noir) centrée au point focal sous forme d'ellipse. Le petit rayon Sf et le grand rayon rf de l'ellipse sont indiqués comme suit : [26,27]

$$Sf = \frac{f \cdot \theta_s}{1 + \cos \Psi} \tag{II.16}$$

$$rf = \frac{f \cdot \theta_s}{(1 + \cos \Psi) \cos \Psi} \tag{II.17}$$

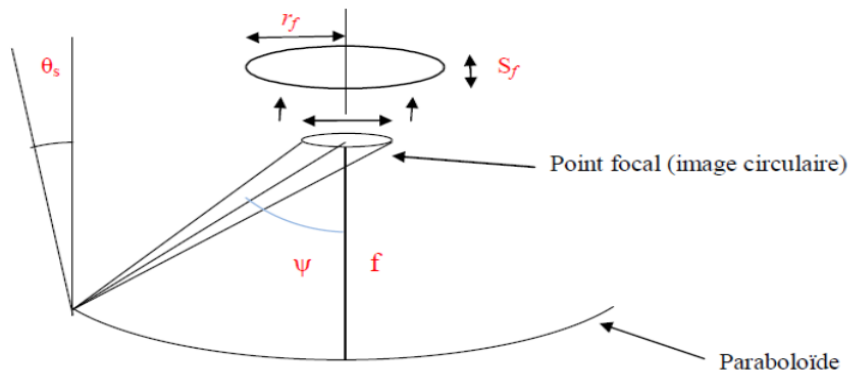


Figure II.9 l'image d'ellipse

rf : Diamètre minimum de l'image circulaire centrée au point focal en ignorant l'erreur de focalisation de l'absorbeur et l'erreur de la poursuite solaire. Pour que l'ouverture du récepteur puisse recevoir tous les rayons du champ arrivant au foyer, il doit avoir un rayon faible égal à la taille de la tache solaire. Ce diamètre peut être modifié en variant la distance axiale arrière du point focal (L). Le diamètre d'ouverture du récepteur est donné par :

$$d_2 = \frac{d \cdot L}{f - h} \tag{II.18}$$

d_2 : Diamètre d'ouverture du récepteur.

L : Distance axiale arrière du point focal.

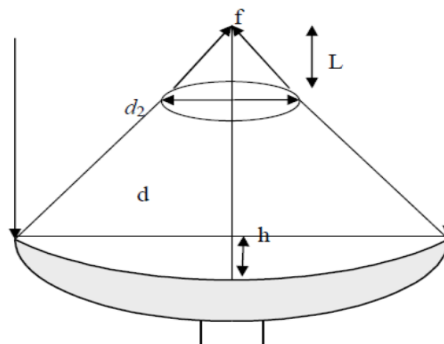


Figure II.10 distance axiale arrière du point focal

II.4 Concentration

Ce paramètre indique la quantité d'énergie concentré au collecteur. En distingue deux types de la concentration solaire : la concentration géométrique (surface) et la concentration optique (flux).

II.4.1 Concentration géométrique

Définie par le rapport de la surface de l'ouverture du collecteur (A_a) et celle du récepteur A_r :

$$C_g = \frac{A_a}{A_r} \tag{II.19}$$

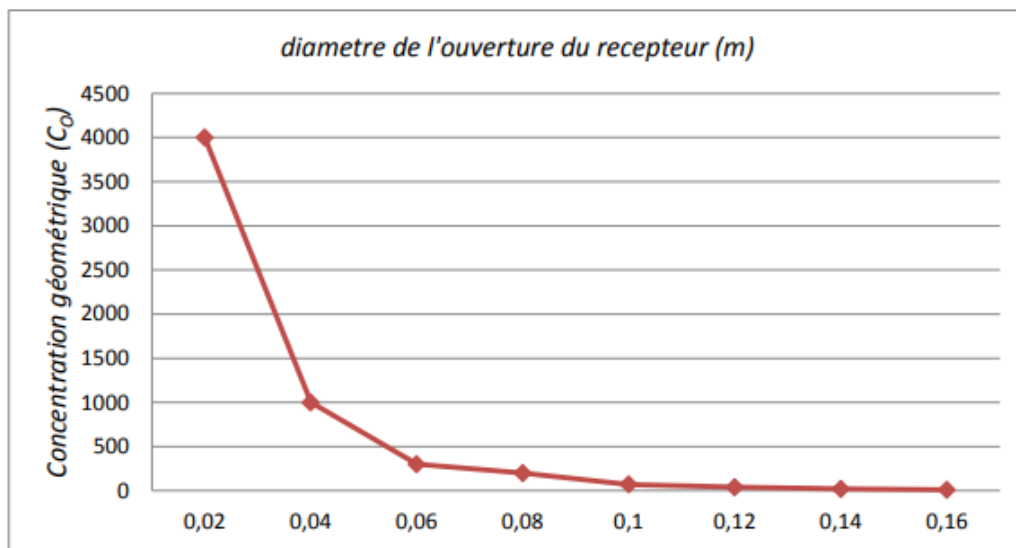


Figure II.11 concentration géométrique à différentes valeurs du récepteur (d2)

Plus la concentration géométrique est élevée plus la température augmente.

II.4.2 Concentration optique

C'est le rapport entre l'énergie sur la surface de l'absorbeur et l'énergie de l'ouverture du paraboloïde [26] :

$$C_o = \frac{I_r}{I_a} \tag{II.20}$$

I_r : L'énergie reçue à l'ouverture du récepteur.

I_o : L'énergie reçue à l'ouverture du paraboloïde.

La concentration d'un concentrateur parabolique est donnée par [26] :

$$C = 4 \cdot \frac{\sin^2 \psi}{\theta^2} \tag{II.21}$$

La concentration maximale $C_{max} = 46250$ pour $\psi = 90^\circ$

II.5 L'énergie reçue à l'ouverture d'un paraboloïde

Cette énergie étant la quantité de lumière réfléchiée par toute la surface de la parabole, il nous faut considérer une région différentielle intégrable sur toute la surface de la parabole.

La surface différentielle est [21] :

$$dA_s = I \cdot ds \tag{II.22}$$

ds : longueur différentielle d'arc de la parabole.

I : longueur d'une bande différentielle sur la surface d'une cuvette parabolique.

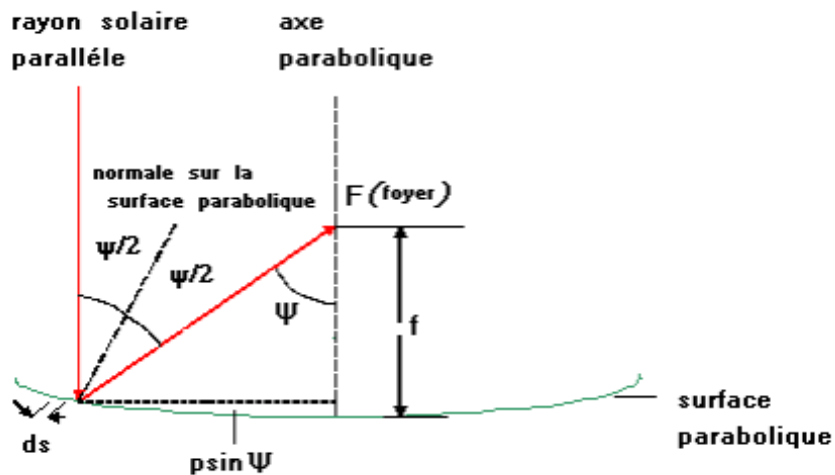


Figure II.12 réflexion d'un rayon parallèle

$$ds = \frac{p \sin(d\psi)}{\cos(\frac{\psi}{2})} \tag{II.23}$$

L'angle dψ est petite, on pose sin dψ = dψ l'équation devient :

$$ds = \frac{p(d\psi)}{\cos(\frac{\psi}{2})} \tag{II.24}$$

$$dA_s = \frac{I \cdot p \cdot d\psi}{\cos(\frac{\psi}{2})} \tag{II.25}$$

Tout le flux radiant reflète (dI_a) de ce secteur différentiel au point de foyer est [21] :

$$dI_a = dA_s \cdot I_b \cdot \cos\left(\frac{\psi}{2}\right) = I \cdot p \cdot I_b \cdot d\psi \tag{II.26}$$

En remplace p par sa valeur, on trouve :

$$dI_a = \frac{2 \cdot f \cdot I \cdot I_b \cdot d\psi}{(1 + \cos\psi)} \tag{II.27}$$

$$I = \frac{4 \cdot \pi \cdot f \cdot \sin\psi}{(1 + \cos\psi)^2} \tag{II.28}$$

L'énergie reçue à l'ouverture d'un paraboloïde est : [22]

$$I_a = \int \frac{8 \cdot \pi \cdot I_b \cdot f^2 \sin\psi \cdot d\psi}{(1 + \cos\psi)^2} \tag{II.29}$$

II.5.1 Puissance solaire absorbée par l'ouverture du récepteur

Arrivant à l'ouverture, cette puissance est réduite à cause des pertes. Elle est donnée par la formule suivante [21] :

$$Q_a = I_b \cdot A_a \cdot \alpha \cdot \rho \cdot \tau \quad (\text{II.30})$$

D'ou :

$$\eta_{op} = A_a \cdot \alpha \cdot \rho \cdot \tau \quad (\text{II.31})$$

L'équation (II.30) devient :

$$Q_a = \eta_{op} \cdot I_b$$

η_{op} : Rendement optique du concentrateur.

I_b : Energie reçue à l'ouverture du concentrateur.

τ : Coefficient de transmission du récepteur.

α : Coefficient d'absorption du récepteur.

ρ : Coefficient de réflexion de la parabole.

II.5.2 Puissance correspondant aux pertes thermiques

Une fois que l'énergie solaire arrive à la surface d'ouverture du récepteur, sa température est au-dessus de la température ambiante, cette variation provoque des pertes de chaleur, définie par convection, par rayonnement et par conduction. La puissance correspondant aux pertes thermiques est donnée par l'expression suivante [30] :

$$Q_p = Q_{p,cv} + Q_{p,r} + Q_{p,cd} \quad (\text{II.32})$$

Q_p : Puissance correspondant aux pertes thermiques.

$Q_{p,cv}$: Pertes par convection.

$Q_{p,r}$: Pertes par rayonnement.

$Q_{p,cd}$: Pertes par conduction.

II.5.2.1 Pertes par convection

C'est la perte de chaleur vers l'air ambiant lorsque l'air entre en contact avec la surface du corps. La vitesse de diminution de la chaleur par contact avec l'air froid est de plus liée à la vitesse de l'air et de sa direction sur le site. Ces pertes sont proportionnelles à la surface du récepteur et à la différence entre la température de surface d'absorbeur et l'air ambiant [31].

$$Q_{p,cv} = h_{cv} \cdot A_\gamma \cdot (T_r - T_a) \quad (\text{II.33})$$

A_γ : Surface d'ouverture du récepteur

T_r : Température du récepteur

T_a : Température ambiante

h_{cv} : Coefficient de transfert par convection

Le coefficient de transfert par convection est donné par [32]

$$h_{cv} = \frac{N_u \cdot \lambda}{d^2} \quad (\text{II.34})$$

$$N_u = 0.664(R_e)^{1/2}(P_r)^{1/3} \quad (\text{II.35})$$

$$R_e = \frac{v \cdot d^2}{\nu} \quad (\text{II.36})$$

V : Vitesse du vent.

λ : Conductivité thermique de l'air.

ν : Viscosité de l'air.

d^2 : Diamètre du récepteur.

II.5.2.2 Pertes par rayonnement

Ces pertes dépendent de la forme du récepteur mais plus particulièrement de la température du récepteur. Ils sont proportionnels à l'émissivité de l'absorbeur [33].

$$Q_{p.r} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot A_\gamma (T_r^4 - T_{sk}^4) \quad (\text{II.37})$$

ε : Facteur émissivité de l'absorbeur.

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

T_{sk} : Température du ciel.

Habituellement on prend la température du rayonnement du ciel inférieur de 6°C que la température ambiante [1].

$$T_{sk} = T_a - 6 \quad (\text{II.38})$$

II.5.2.3 Pertes par conduction

Ces pertes sont liées à la nature du matériel utilisé, généralement petites comparées aux pertes par convection ou par rayonnement, on peut les associer avec les pertes par convection dans la plupart des cas.

$$Q_{p.cd} = \lambda \cdot A_\gamma \cdot (T_r - T_a) \quad (\text{II.39})$$

λ : Conductivité thermique de l'air

II.6 Conclusion

Grace à ce chapitre nous avons pu identifier les principaux paramètres caractérisant et gouvernant le concentrateur parabolique. Les différentes dimensions de ce dernier influence son efficacité.

Nous avons aussi constaté que la dimension et la position de l'absorbeur sont aussi importants que la précision du mécanisme de poursuite automatique, car en effet l'erreur de positionnement et de poursuite influent considérablement sur le rapport de concentration.

On en conclue donc que l'efficacité du concentrateur dépend de ces dimensions, du matériau utilisé comme réflecteur et de son orientation par rapport au soleil. De même pour l'absorbeur qui lui aussi dépend du matériau utilisé, de ses dimensions et de son positionnement

Chapitre III

Réalisation du concentrateur parabolique

III.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous avons présenté les différentes étapes de la réalisation du concentrateur solaire parabolique conçu suivant les propriétés et critères du modèle théorique étudié au chapitre précédent.

Après que nous y ont fait la modélisation et la conception des différents éléments du dispositif en question sur le logiciel SolidWorks, nous sommes passés à la réalisation de chacune de ses pièces, au niveau du hall de technologique de l'Université Abderrahmane MIRA de Bejaïa, en exploitant les différentes machines qui s'y trouvent (tour, fraiseuse, perceuse ...etc.) et en utilisant principalement des pièces et composants de récupération.

On présentera dans ce qui suit l'utilité et le rôle de chaque pièce réalisée et de chaque composant.

III.2 Modélisation des éléments du concentrateur solaire parabolique

La modélisation des éléments du système a été réalisée à l'aide du logiciel de conception et fabrication mécanique SolidWorks, l'assemblage de ces éléments est fait en respectant les contraintes données afin d'obtenir le mécanisme souhaité. Les plans et les vues en 3D de toutes les pièces et leur assemblage sont présentés dans l'annexe de ce mémoire.



Figure III.1 Modélisation du prototype réalisé

III.3 Système de poursuite automatique

Notre prototype est conçu de manière à avoir une poursuite sur les deux axes, verticale et horizontale, nous avons dimensionné et usiné des pièces et mécanismes qui assurent ces mouvements.

L'automatisation est assurée grâce à des moteurs actionnés par des contacteurs (Module relais Arduino) qui sont commandés par une carte Arduino qui reçoit et convertie les signaux des capteurs de lumière que nous avons fixés sur le réflecteur.

La figure III.3 est un schéma synoptique qui généralise la réalisation de notre travail. Des photorésistances donnent une valeur analogique qui sera comme entrée pour la carte Arduino, en suite ce dernier fait une comparaison grâce au programme téléversé. La carte Arduino commande l'ouverture et la fermeture des modules relais Arduino, qui permet d'actionner les deux moteurs pour avoir une orientation idéale au soleil.

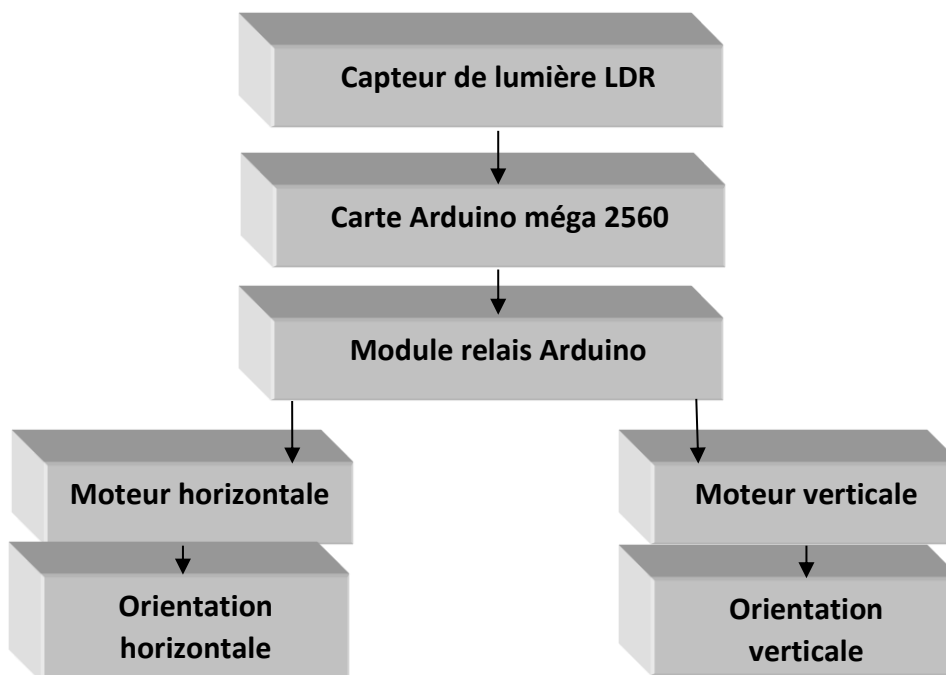


Figure III.2 Schémas synoptique de la poursuite solaire

III.4 Présentation des matériels utilisés

Ce prototype est devisé en deux parties, La partie électronique et la partie mécanique.

III.4.1 Partie électronique**III.4.1.1 Capteur LDR (Light Dépendent Résistor)**

La LDR (résistance dépendante de la lumières) ou photorésistance est un composant électronique dont la résistance varie en fonction de la lumière perçue. La valeur de la luminosité est convertie en résistance pour être acquise à l'aide de la carte Arduino comme une entrée analogique. Dans notre travail nous avons utilisé la LDR 5mm 5549 [31].

Nous avons mis ces capteurs dans des tubes cylindriques noirs en plastique pour avoir une bonne précision lorsqu'ils seront fixés sur le concentrateur. Nous avons utilisé quatre capteurs dont deux capteurs placés en horizontale et deux autres en verticale sur la parabole



Figure III.3 Capteur LDR

III.4.1.2 Résistance

On a utilisé deux types de résistances :

Des résistances de 10k ohm pour les photorésistances et des résistances de 220 ohms pour protéger les LED.



Figure III.4 Résistance 10k Ohms



Figure III.5 Résistance 220 Ohms

III.4.1.2 LED (Light Emitting Diode)

DEL en français (Diode électroluminescente), est un composant (opto) électronique qui fonctionne comme une diode : elle laisse passer le courant dans un sens et le bloque dans l'autre sens avec un signal lumineux. [32]



Figure III.6 LED

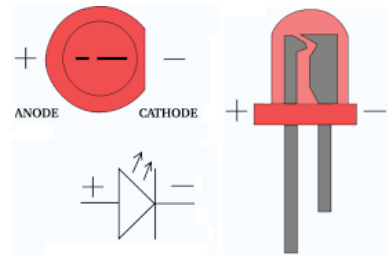


Figure III.7 Symbol d'une LED

III.4.1.3 Thermocouple

Le thermocouple est un instrument de mesure thermique. Il permet de mesurer la température grâce à deux matériaux différents soudés à l'extrémité. Ce dernier se base sur une propriété physique appelé l'effet Seebeck.

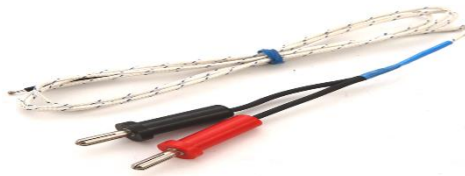


Figure III.8 Thermocouple

III.4.1.4 Multimètre

Un multimètre est un appareil de mesure polyvalent. On peut mesurer plusieurs grandeurs électriques (tension, courant, résistance, continuité ...). Il peut aussi servir à mesurer la température à l'aide d'un thermocouple.



Figure III.9 Multimètre

III.4.1.5 Circuit de commande

Notre circuit de commande est basé sur un circuit programmé dit Arduino, qui a pour avantage de minimiser la surface des cartes électroniques et son cout réduit.

III.4.1.5.1 ARDUINO MEGA 2560

L'Arduino est un microcontrôleur qui permet de commander un circuit électrique pour diverses utilisations. Il se constitue de [33] :

- 54 entrées et sorties dont 14 peuvent être utilisées en sorties largeur d'impulsion modulée.
- 16 entrées analogiques
- 4 UART (port série matériel).
- Un quartz 16 Mhz.
- Une connexion USB.
- Un connecteur d'alimentation jack.
- Un connecteur ICSP (programmation "in-circuit"), et un bouton de réinitialisation (reset).
- une tension d'entrée « VIN » utilisée pour une source d'entrée externe.
- une tension régulée utilisé pour alimenter les microcontrôleurs.
- Une tension de 3,3 volts générer par le régulateur embarqué.
- Une broche au sol « GND ».

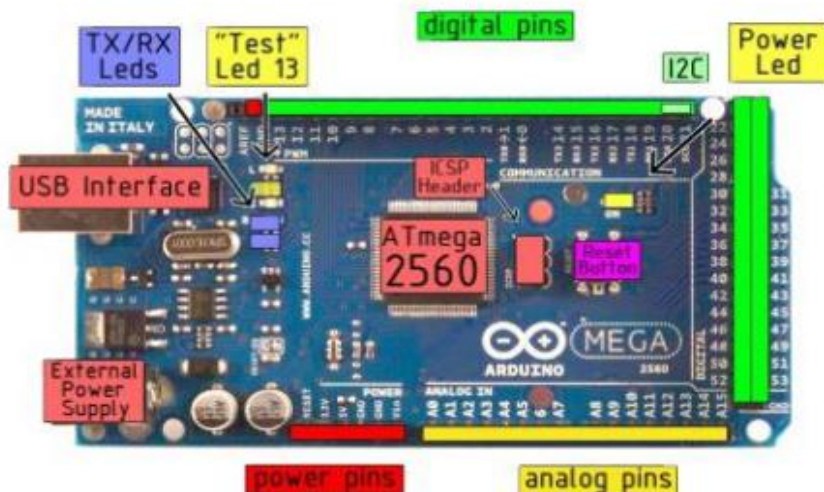


Figure III.10 Carte Arduino MEGA 2560

Elle contient tout ce qui est nécessaire pour le fonctionnement du microcontrôleur ; Pour pouvoir l'utiliser et se lancer, il suffit simplement de la connecter à un ordinateur à l'aide d'un câble USB (ou de l'alimenter avec un adaptateur secteur ou une pile, mais ceci n'est pas indispensable, l'alimentation étant fournie par le port USB).

III.4.1.5.2 Logiciel de programmation

Le logiciel de programmation des modules Arduino est une application Java, libre et multiplateformes, servant d'éditeur de code et de compilateur, et qui peut transférer le FIRMWARE et le programme à travers une liaison série (RS-232, Bluetooth ou USB selon le module). [33]

Le langage de programmation utilisé est le C++, compilé avec avr-g++ 3, et lié à la bibliothèque de développement Arduino, permettant l'utilisation de la carte et ses entrées/sorties.

La mise en place de ce langage standard facilite le développement de programmes sur les plates-formes Arduino, à toute personne maîtrisant le C ou le C++.

Un programme utilisateur Arduino est une suite d'instructions élémentaires sous forme textuelle, ligne par ligne. La carte lit puis effectue les instructions les unes après les autres, dans l'ordre défini par les lignes de code.

Structure d'un programme
Il y a trois phases consécutives:

- 1/La définition des constantes et des variables
- 2/La configuration des entrées et sorties
`void setup()`
- 3/La programmation des interactions et comportements
`void loop()`

Une fois la dernière ligne exécutée, la carte revient au début de la troisième phase et recommence sa lecture et son exécution des instructions successives. Et ainsi de suite.

Cette **boucle** se déroule des milliers de fois par seconde et anime la carte.

```

/* Ce programme fait clignoter une LED branchée sur la broche 13
 * et fait également clignoter la diode de test de la carte
 */
int ledPin = 13; // LED connectée à la broche 13

void setup()
{
  pinMode(ledPin, OUTPUT); // configure ledPin comme une sortie
}

void loop()
{
  digitalWrite(ledPin, HIGH); // met la sortie à l'état haut (led allumée)
  delay(3000); // attente de 3 secondes
  digitalWrite(ledPin, LOW); // met la sortie à l'état bas (led éteinte)
  delay(1000); // attente de 1 seconde
}
    
```

Done compiling.

22

Figure III.11 Structure d'un logiciel Arduino

III.4.1.5.3 Câble USB

Ce câble USB permet l'alimentation de la carte Arduino ainsi la connexion avec un ordinateur pour enregistrer le programme.



Figure III.12 Câble USB

III.4.1.5.4 fils pin

Ces fils permettent la connexion de commande entre l'Arduino et les autres composants.



Figure III.13 Fils pin

III.4.1.5.5 Plaque d'essai

Cette plaque permet la connexion entre les éléments d'un circuit électronique.

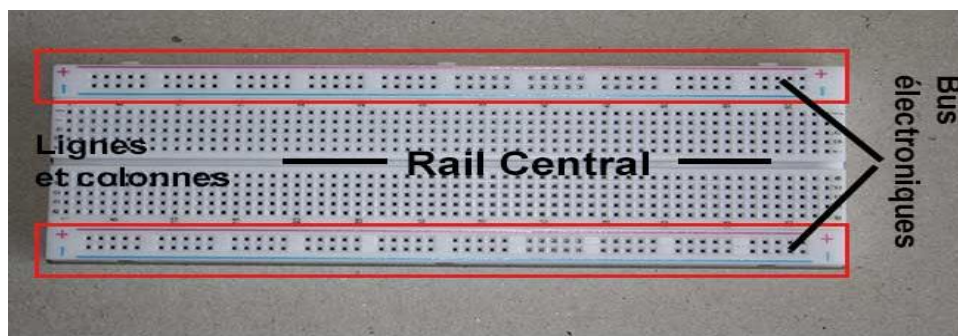


Figure III.14 Plaque d'essai

III.4.1.6 Circuit de puissance

Pour le circuit de puissance nous avons utilisé quatre modules relais Arduino pour commander les moteurs ainsi leur sens de rotation. La Figure III.15 montre le circuit de puissance pour deux sens de rotation d'un moteur.

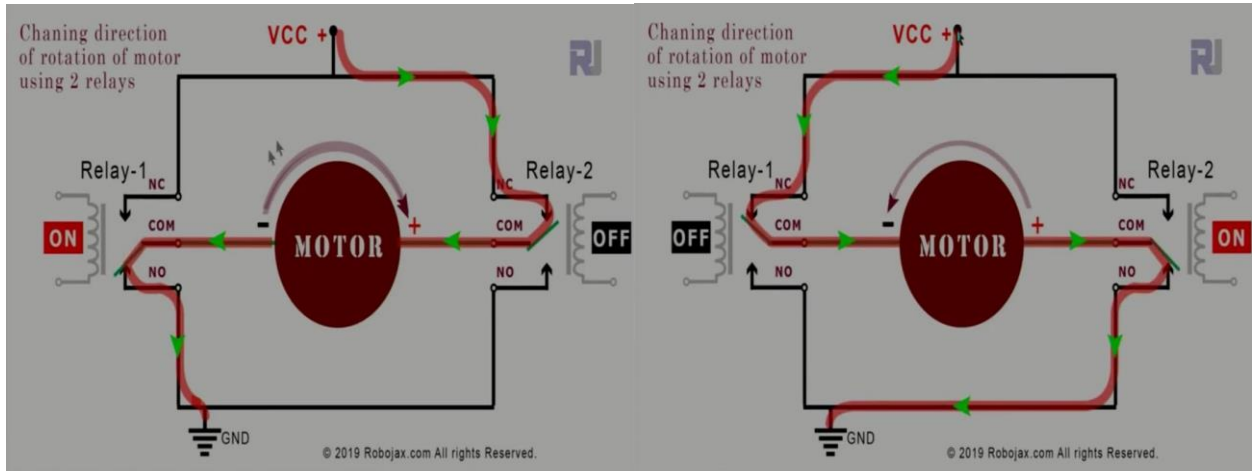


Figure III.15 Circuit de puissance du moteur

III.4.1.6.1 Module relais Arduino

Un module relais est un interrupteur pilotable qui permet de faire une liaison entre la partie commande et la partie puissance. Il permet de fermer ou d'ouvrir un contacteur sur un circuit de puissance en fonction d'un signal entre 0 et 5V.

Le relais est constitué d'un électroaimant et d'un contacteur mécanique. Lorsque le courant est suffisamment important sur la borne d'entrée, le solénoïde se magnétise ce qui force le contacteur à fermer le circuit de puissance. Comme il n'y a pas de liaison mécanique entre le circuit de commande et le circuit de puissance (actionnement magnétique), il y a une isolation galvanique entre les deux circuits ; ce qui permet de protéger le circuit de commande.

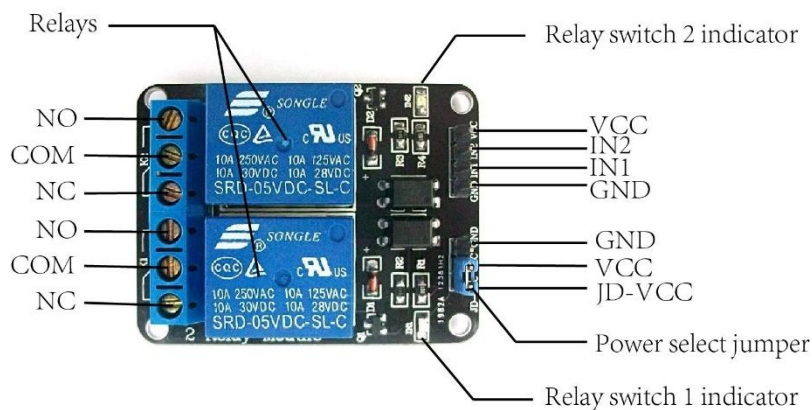


Figure III.16 Module relais Arduino

III.4.1.6.2 Moteur à courant continu

Un moteur à courant continu est une machine électrique qui permet de convertir l'énergie électrique en énergie mécanique prête à être utilisée.

Il se compose d'un stator appelé « inducteur » qui est à l'origine de la circulation d'un flux magnétique longitudinal fixe créé par des enroulements statoriques ou des aimants permanents. Ce dernier est l'élément fixe du moteur [34].

L'élément tournant de ce moteur est un rotor bobiné appelé « induit » relié à un collecteur rotatif inversant la polarité de chaque enroulement rotorique au moins une fois par tour pour faire circuler un flux magnétique transversal en quadrature avec le flux statorique [34].

Il existe cinq types de moteurs à courant continu, à savoir moteurs à excitations indépendantes, moteurs à excitations en dérivation ou shunt, moteurs à excitations en série, moteurs à excitations composées et les moteurs à aimants permanents.

III.4.1.6.2.1 Modélisation du moteur à courant continu

➤ Les équations du MCC sont données ci-dessous [35]

$$\left\{ \begin{array}{l} U(t) = R \cdot i(t) + L \frac{di}{dt} + E(t) \\ J \frac{d\omega}{dt}(t) = C_m(t) - C_r(t) - f \cdot \omega(t) \\ E(t) = K' \cdot \omega(t) \\ C_m(t) = K' \cdot i(t) \end{array} \right. \quad \text{(III.1)}$$

U(t) : La tension appliquée aux bornes du moteur

i(t) : Le courant

E(t) : La force électromotrice

C_m(t) : Le couple moteur

C_r(t) : Le couple résistant

ω (t) : La vitesse de rotation du moteur

R : La résistance des armatures du moteur

L : L'inductance des armatures du moteur

J : L'inertie du moteur

f : Le coefficient de frottement

K' : La constante du couple moteur et de force électromotrice

➤ Schéma électrique

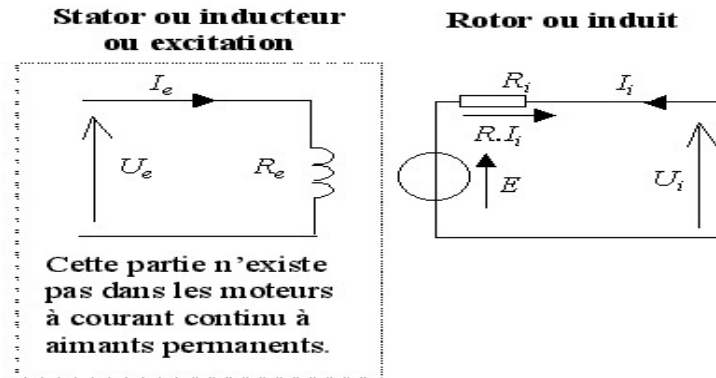


Figure III.17 Schéma électrique équivalent du MCC

III.4.1.6.2. Les moteurs choisis

Pour assurer la rotation horizontale et verticale nous avons choisis deux motoréducteur d'essuie glaces que nous avons récupéré d'une casse autos. Ces moteurs quasiment identiques comportent un système de transmission de puissance de type engrenage à roue et vis sans fin, ce qui permet la transmission de mouvement irréversible, c'est-à-dire que la tige du moteur est menante et ne peut pas être menée.

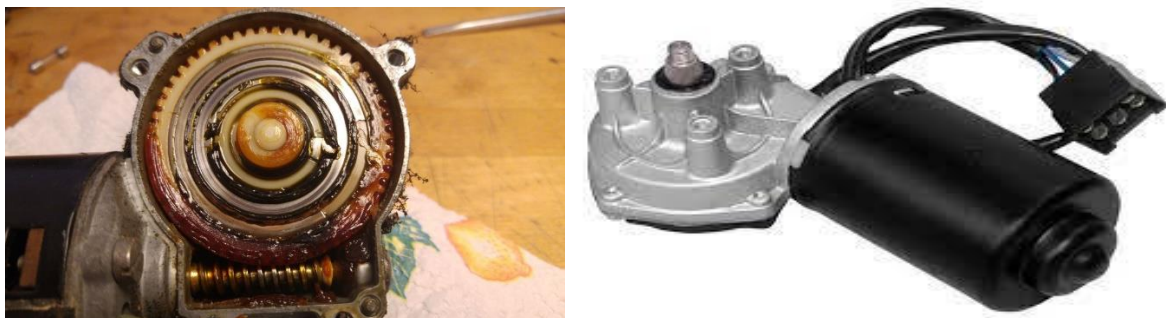


Figure III.18 Moteur essuie glaces

Le tableau suivant regroupe les caractéristiques principales du moteur :

Tension nominale	12V
Courant nominal	2A
Courant maximum	12
Vitesse nominale	35 RPM
Couple nominal	4Nm

Tableau III.1 Fiche technique du motoréducteur pour essuie-glaces [34]

III.4.1.6.3 Alimentation

Comme nous l’avons vue ci-dessus, nos moteurs ont besoin d’une tension continu pour les alimenter, c’est pour cela que nous avons pris une batterie de 12V, de 7 Ah de capacité et capable de fournir 135A au démarrage.



Figure III.19 Batterie 12V

III.4.1.6.4 Variateur de vitesse

Pour éviter les balancements verticaux de la parabole nous avons utilisé un variateur de vitesse pour diminuer la vitesse du moteur.



Figure III.20 Variateur de vitesse 12v

III.4.2 Partie mécanique

III.4.2.1 Le réflecteur

Nous avons pris une parabole satellite, sur laquelle nous avons collé, avec de la colle thermique, des miroirs qu’on a découpés en petits carrés pour qu’ils épousent la forme arrondie de la surface intérieure de la parabole. Ces miroirs ont leurs côtés brillants face au soleil.

Nous avons choisi des miroirs car leur taux de réflexion est de 99.9%.

Caractéristiques physique du réflecteur.	
Grand diamètre	$d = 0.9 \text{ m}$
Petit diamètre	$h = 0.08\text{m}$
L’angle d’ouverture	$\Psi_p = 38.95^\circ$
Distance focale	$f = 0.6328 \text{ m}$
Surface d’ouverture	$A_a = 0.6361 \text{ m}^2$
Masse sans miroir	$m = 4.3\text{kg}$



Figure III.21 réflecteur

Tableau III.2 Caractéristiques physique du réflecteur

III.4.2.2 L'absorbeur

L'absorbeur doit avoir une bonne conductivité thermique et un bon point de fusion ou dégradation, c'est pour cela que nous avons donc choisi le cuivre comme matériaux du dispositif absorbant (conductivité thermique 386 W/m.K, point de fusion 1083 °C) [36].

Nous avons pris un tube de cuivre de 6mm de diamètre et 1m de longueur, nous l'avons modelé de façon à avoir un serpentín de 60mm de diamètre et de 15cm de longueur, ce dernier et mis dans un tube de conduite de cheminée de 80mm de diamètre et de 20cm de long, le tout est mis dans un autre tube de même matériau mais de 110mm de diamètre et de 20cm, entre eux nous avons mis de la laine de verre pour assurer une bonne isolation.

L'emplacement et la position de l'absorbeur sont déterminés en utilisant les équations que nous avons présentés dans le deuxième chapitre.

La concentration géométrique de ce modèle est de :

$$C_g = \frac{A_a}{A_r} = \frac{0.6361}{0.00282} = 225.008 \tag{III.2}$$

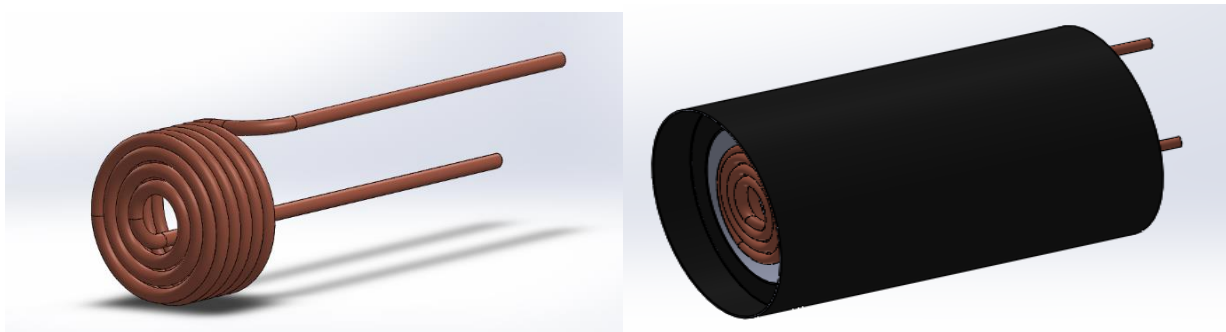


Figure III.22 l'absorbeur

Caractéristiques de l'absorbeur	
Diamètre du serpentín	$d_2 = 0.06 \text{ m}$
Longueur du serpentín	$l_2 = 0.15 \text{ m}$
Surface de captation	$A_r = 0.002827 \text{ m}^2$
Masse de l'adsorbeur vide	$M_a = 0.5 \text{ Kg}$

Tableau III.3 Caractéristiques physiques de l'absorbeur

III.4.2.3 Bras d'absorbeur

Ce bras est composé de deux pièces, un tube carre en forme de Y et une tige de fer plat, reliés comme le montre la figure ci-dessous, il assure le positionnement exact de l'absorbeur au point focal.

La position du point focal de notre parabole est trouvée en exploitant les équations présentées précédemment dans le deuxième chapitre.

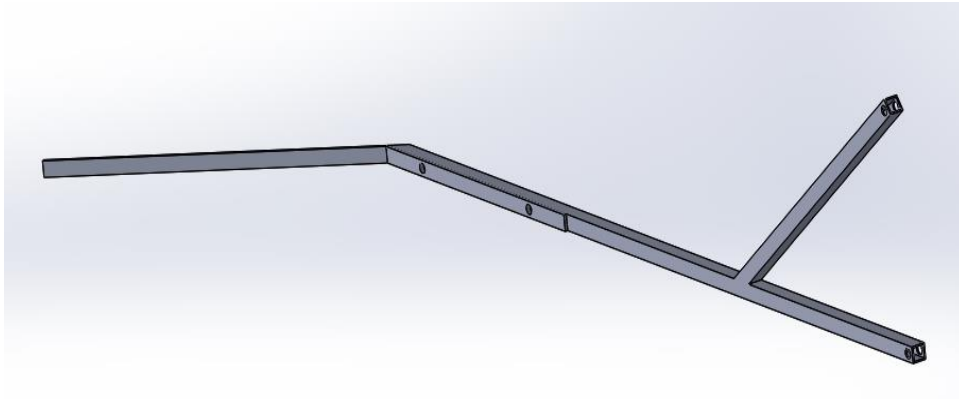


Figure III.23 Bras de l'absorbeur

III.4.2.4 Arbres de la parabole

Pour avoir une rotation verticale de la parabole nous avons réalisé deux pattes en fer plat, dont la forme épouse les bordures de la parabole, sur lesquelles nous avons soudé deux axes comme le montre la **figure III.23**, ces axes sont réalisés avec l'usinage de deux arbres récupérés au niveau du hall de technologie. L'un des deux arbres est munit d'une poulie qui assure la liaison avec le moteur vertical à l'aide d'une chaîne métallique.

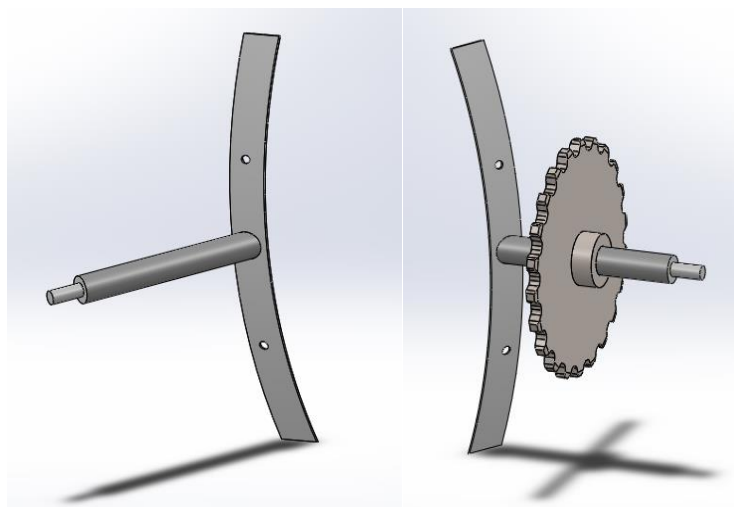


Figure III.24 Arbres de la parabole

III.4.2.5 Support de rotation verticale

Nous avons réalisé deux pièces à l'aide d'usinage, elle représente l'alésage sur lequel pivote l'arbre de la parabole par l'intermédiaire d'un roulement.

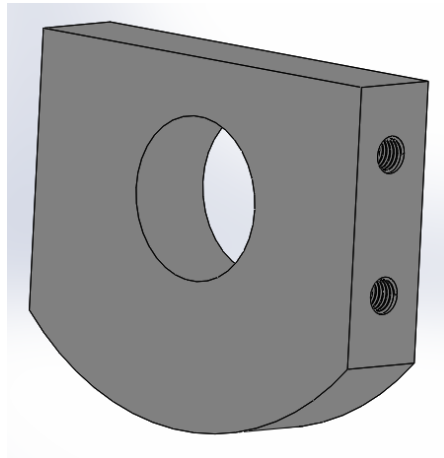


Figure III.25 Support de rotation verticale

III.4.2.6 Cadre de la parabole

Réalisé à partir des chutes de fer que nous avons récupérées au hall de technologie, cette pièce est sous forme de « U », c'est sur elle qu'on fixe les supports de rotation verticale et horizontale, les deux moteurs, la batterie, la carte et les modules relais Arduino.

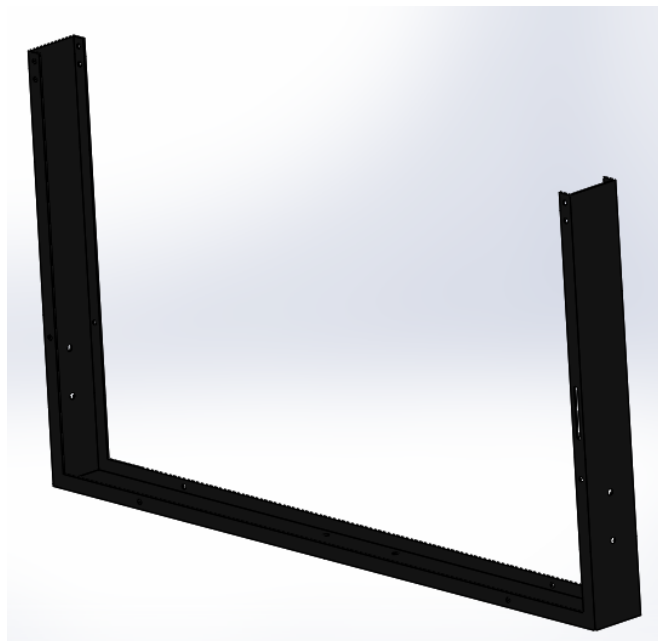


Figure III.26 Cadre de la parabole

III.4.2.7 Support de rotation horizontal

Ce support est constitué de deux pièces qui assurent la rotation horizontale du réflecteur. Reliées entre elles grâce à un roulement de co-axialité et d'une buté à bille, l'une de ces pièces est équipée d'une roue dentée qui forme un engrenage avec la roue dentée du moteur horizontal, cette pièce est fixée au socle tandis que l'autre est fixée au cadre de la parabole

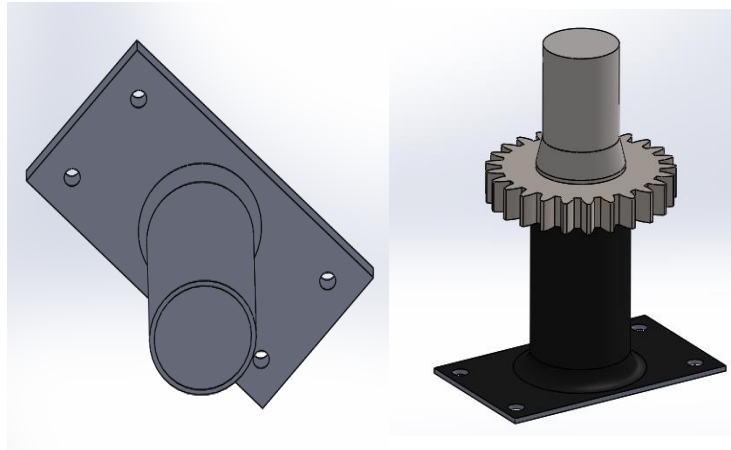


Figure III.27 Support de rotation horizontale

III.4.2.8 Le socle

Cette pièce est conçue et réalisée pour poser et maintenir le prototype sur terre.

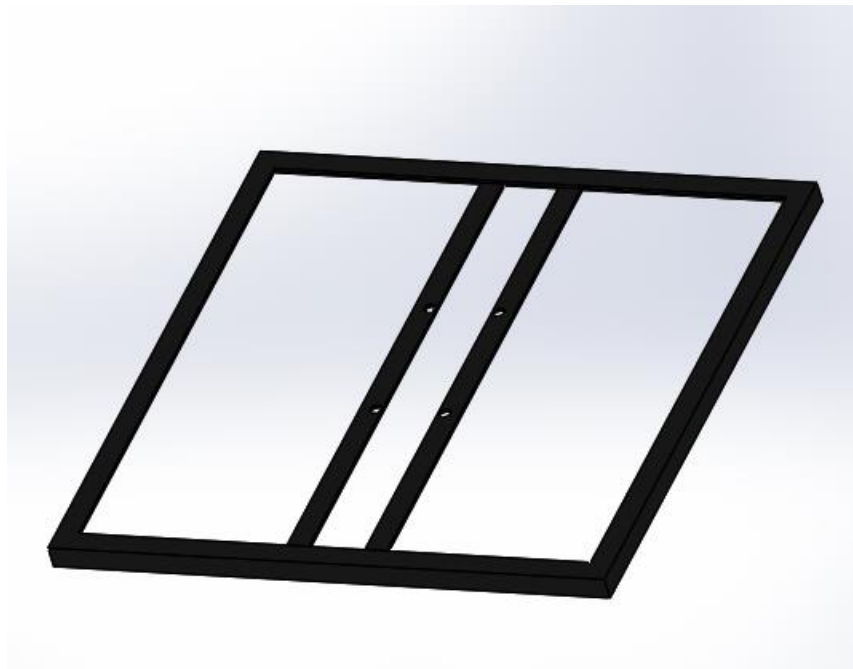


Figure III.28 Socle

III.4.2.9 support de stabilité

Deux supports sous forme de « T » assurent la stabilité du cadre en minimisant les balancements.



Figure III.29 Support de stabilité

III.5 Propriétés sur les réducteurs utilisés

Leur objectif est de transmettre le mouvement en réduisant à la fois le couple appliqué sur l'arbre du moteur et la vitesse de rotation de la pièce concernée.

Pour notre système nous avons utilisé deux types de réducteur, le premier est un engrenage droit à denture droite qu'on nommera réducteur horizontal, le deuxième est un système de transmission de puissance de type roue dentée avec chaîne, celui-ci est nommé réducteur verticale.

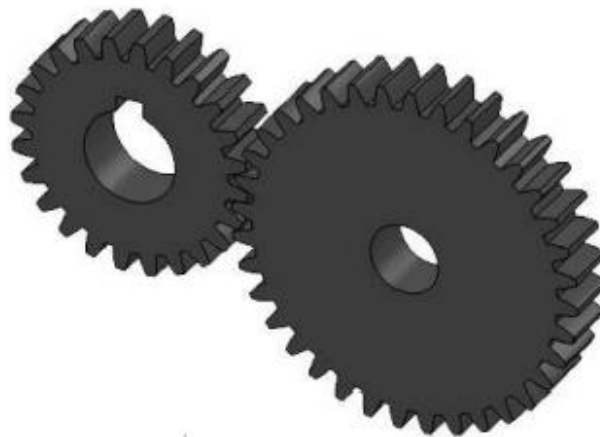
III.5.1 Réducteur horizontal

Figure III.30 Réducteur de module 2 et de rapport 2/3

➤ **Caractéristiques**

- Rapport de réduction $r_h = 2/3$
- Diamètre du pignon 26.
- Diamètre de la roue 39.
- Angle de pression 20° .
- Module $m = 1.08$.
- Nombre de dents du pignon $Z_1 = 24$.
- Nombre de dents de la roue $Z_2 = 36$.
- Le rendement de l'engrenage $\eta_h = 99\%$.

Ce rapport de réduction est suffisant car le couple sur l'arbre est très petit puisque la force exercée est parallèle à l'axe de rotation.

III.5.2 Réducteur vertical



Figure III.31 chaîne d'entraînement

➤ **Caractéristiques**

- Diamètre de la petite roue 70 mm
- Diamètre de la grande roue 140 mm
- Nombre de dents de la petite roue 16 dents
- Nombre de dents de la grande roue 32 dents
- Rapport de réduction $r_v = 1/2$
- L'entraxe 280 mm
- Le rendement de la chaîne d'entraînement $\eta_v = 90\%$ (cette valeur est une estimation).

Pour vérifier que le réducteur est suffisant pour un bon fonctionnement du moteur, nous avons fait les calculs suivants :

1. Calculer le couple sur l'arbre de la parabole

$$C_p = m_{ab} \cdot g \cdot VF \tag{III.3}$$

$$C_p = (1.9,8) \cdot 0,637 = 6,24 \text{ Nm}$$

2. En tenant compte du rendement de la chaîne d'entraînement, on multiplie le couple de l'arbre de la parabole par le rapport de réduction pour trouver le couple de charge ramené sur l'arbre du moteur

$$C_{rm} = \frac{C_p \cdot r_v}{\eta_v} \tag{III.4}$$

$$C_{rm} = \frac{6,24 \cdot 0,5}{0,9} = 3,46 \text{ Nm}$$

3. On compare le couple de charge ramenée sur l'arbre du moteur par rapport au couple nominale du moteur.

$$C_N = 4 \text{ Nm} , C_{rm} = 3.46 \text{ Nm}$$
$$C_N > C_{rm}$$

Comme on peut le constater, le couple nominal du moteur est supérieur à celui de la charge ramenée sur son arbre, donc le réducteur vertical satisfait les conditions de bon fonctionnement du moteur.

III.6 Conclusion

Ce chapitre est dédié à la procédure suivie pour la réalisation du concentrateur solaire parabolique selon notre perception, c'est un compte rendu de notre travail technique, mécanique et électrique.

Nous avons présenté les différents composants et pièces utilisés pour la réalisation de notre prototype, et cela en fournissant les dimensions, les matériaux, les caractéristiques et la configuration de chaque élément tout en expliquant leurs rôles et leurs fonctions.

Grace aux connaissances acquise lors de notre parcours universitaire, notamment celles concernant la construction mécanique, nous avons pu réaliser au niveau du Hall de technologie de l'université tous les pièces conçus sur le logiciel SolidWorks.

Après que nous nous sommes familiarisés avec l'environnement de programmation de l'Arduino, nous avons écrit petit un programme, qu'on a televersé vers la carte Arduino, qui va assurer au prototype une poursuite automatique du soleil.

Chapitre IV

Expérimentations et résultats

IV.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous avons d'abord exposé les modifications apportées au modèle déjà existant (réalisé par la promotion de 2020), plus les raisons et l'intérêt de ces modifications et l'influences de ces dernières sur les performances de notre prototype.

Nous avons ensuite présenté les résultats obtenus lors des tests de mesure de températures que nous avons effectués durant les journées du 22/08/2022 et 07/09/2022, ainsi que l'influence de certains paramètres sur la variation de ces résultats.

IV.2 Modifications apporté

Notre travail a porté des modifications majeures à ce qui était fait au part avant, ce qui a donné des résultats meilleurs. Les modifications apportées sont les suivantes :

IV.2.1 Mécanisme de poursuite

L'aspect mécanique a étai complètement changé, le mécanisme avant la modification utilisé un moteur pour une rotation horizontale et un vérin électrique pour un pivot vertical. Nous avons apporté des modifications majeures sur le système de rotation vertical en utilisant un moteur électrique munit d'une chaine d'entraînement au lieu du vérin électrique qui manqué de fiabilité et de rentabilité, car il tombait en panne à plusieurs reprises et sa réparation était couteuse.

Ces modifications ont notamment apporté une meilleure stabilité et résistance contre les balancements causés par le vent.



Figure IV.1 Le concentrateur avant et après les modifications

IV.2.2 Absorbeur

L'absorbeur a été modifié de telle façon à avoir des résultats meilleurs. Nous avons changé l'ancien absorbeur encastré dans une brique réfractaire par un absorbeur constitué d'un serpentin en cuivre qui est mis dans un tube de conduite de cheminée, isolé avec de la laine de verre, nous avons ensuite ajoutés des bouts de papiers d'aluminium entre l'absorbeur et la paroi intérieure du tube pour profiter du cumule de température.

Nous avons effectué ces modifications car l'ancien absorbeur était plutôt lourd à cause de la brique réfractaire et n'était pas bien isolé.



Figure IV.2 L'absorbeur avant et après les modifications

IV.2.3 Programme

La Figure IV.5 résume le fonctionnement notre programme.

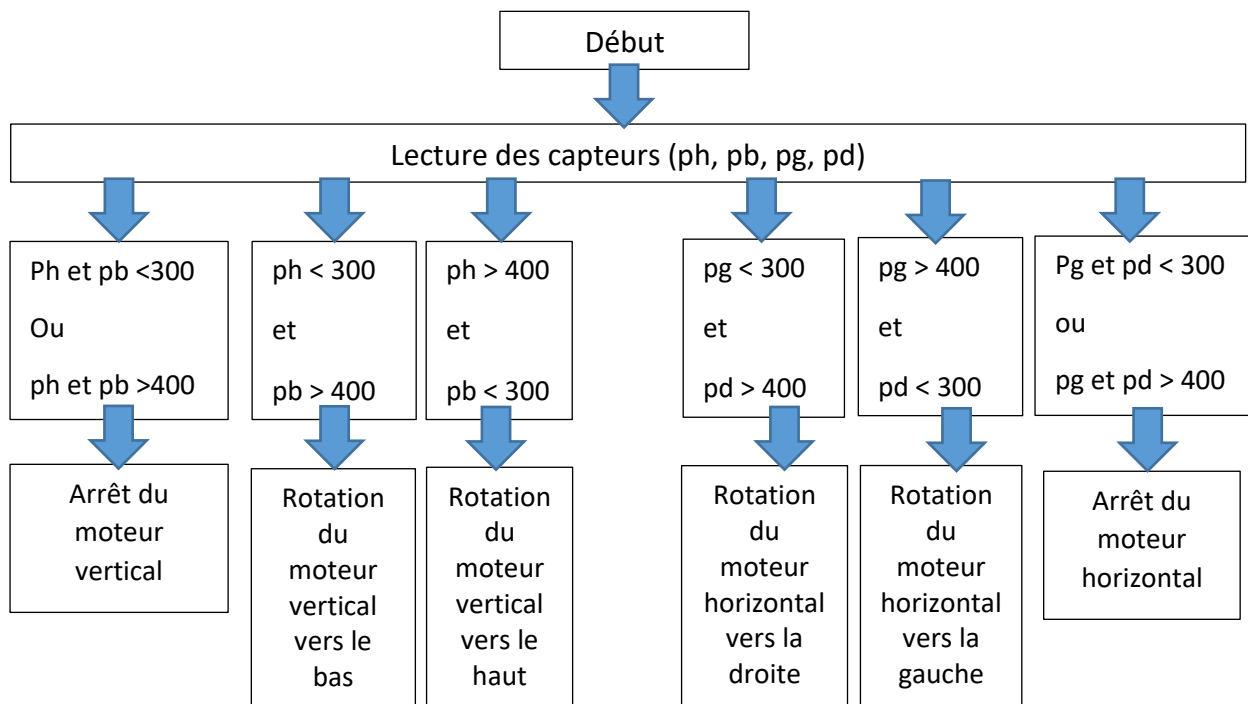


Figure IV.3 fonctionnement du programme Arduino

IV.3 Déroulement de l'expérience

En utilisant des thermocouples et à l'aide des multimètres, nous avons relevé au même moment cinq températures différentes, à savoir, la température ambiante, la température à l'intérieur et à la surface d'ouverture de l'absorbeur, la température du fluide à l'entrée et à la sortie de l'absorbeur

Nous avons utilisé de l'eau comme fluide caloporteur pour effectuer les essais, ceux-ci se sont déroulés dans deux lieux différents et chacun ces conditions.

IV.3.1 Premier essaie

Celui-ci est effectuer le 22/08/2022 à El kseur, Algérie, de 10:45 jusqu'à 11:45. Les mesures sont prises chaque 5min avec un débit de de 0.0016 l/s. le ciel était plutôt claire et le vent était fort.

- **Les coordonnées géographiques d'El kseur [36]**
 - Latitude : 36°40'45" Nord
 - Longitude : 4°51'19" Est
 - L'altitude par rapport au niveau de la mer : 84 m

IV.3.1.1 Résultats du premier essai

Heur	T ambiante	T entrées	T sorties	T absorbeur	T intérieur
10 :49	32	28	39	76	55
10 :54	35	26	40	80	71
10 :59	35	26	42	85	79
11 :04	36	28	47	110	83
11 :09	37	31	48	114	86
11 :14	37	32	50	114	88
11 :19	37	31	54	125	87
11 :24	38	31	50	120	87
11 :29	38	33	51	116	84
11 :34	38	33	53	109	81
11 :39	39	34	53	125	82
11 :44	40	34	52	104	80
11 :49	40	34	50	112	82
11 :54	40	34	51	103	81

Tableau IV.1 Résultat de mesures du 22/08/2022

IV.3.2 Deuxième essai

Cet essai était fait le 08/09/2022 à l'université de Bejaia de 12:00 et 14:05. Les mesures sont prises chaque 10 min avec un débit de 0.0022 l/s. Le ciel était partiellement couvert et le vent était modéré.

- Les coordonnées géographiques de la ville de Bejaia [36] :
 - Latitude : 39°54'26" Nord
 - Longitude : 116°23'50" Est
 - L'altitude par rapport au niveau de la mer : 49 m

IV.3.2.1 Résultats du deuxième essai

Heur	T ambiante	T entrées	T sorties	T absorbeur	T intérieur
12:05	30	32	38	102	43
12:15	32	26	38	100	70
12:25	33	32	47	124	80
12:35	30	29	50	116	84
12:45	31	30	50	113	85
12:55	31	32	52	110	83
13:05	32	36	56	113	86
13:15	33	34	62	126	85
13:25	33	34	63	116	86
13:35	34	34	68	121	99
13:45	34	36	57	105	84
13:55	34	36	62	127	81
14:05	35	36	61	122	87

Tableau IV.2 Résultat de mesures du 08/09/2022

IV.4 Résultats et discussions

IV.4.1 Premier essai

IV.4.1.1 Représentation graphique des résultats

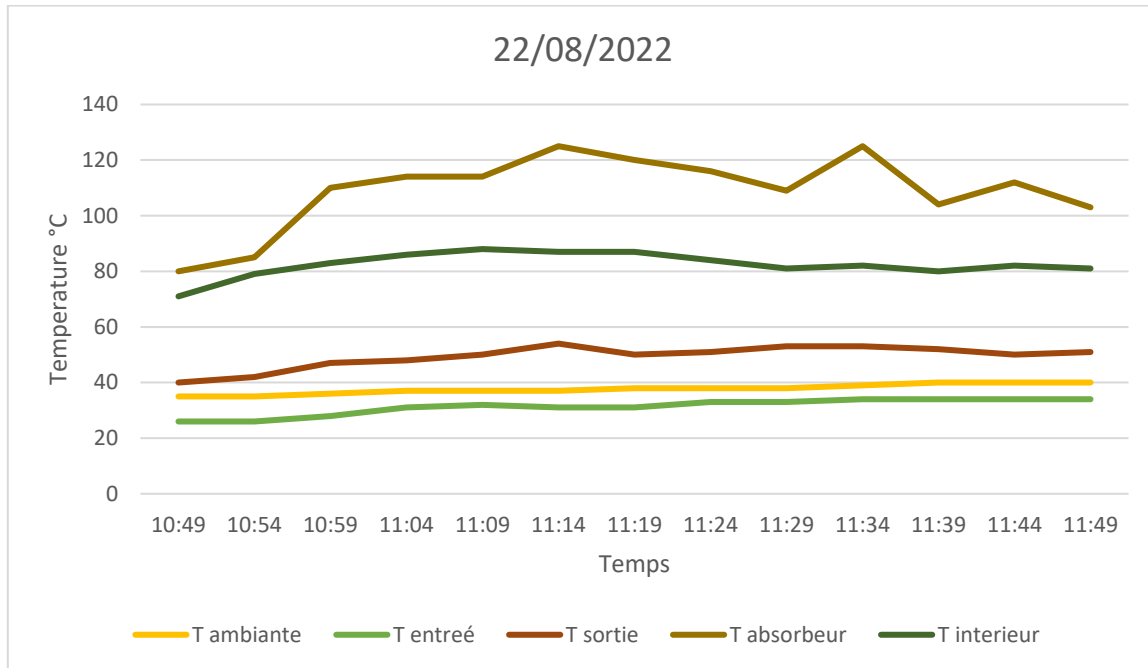


Figure IV.4 Graphe d'évolution de la température en fonction du temps le 22/08/2022

IV.4.1.2 Commentaires

La figure IV.5 montre l'évolution des différentes températures en fonction du temps, on remarque que la variation de la température ambiante et celle de l'entrée de l'eau est quasiment constante.

Après 30 secondes d'exposition aux rayons solaires, la température à la surface d'ouverture de l'absorbeur atteint 76°C, à l'intérieur 55°C, quand a la température de sortie de l'eau arrive à 39°C.

Après 30 minutes, ces températures atteignent leurs valeurs maximales, soit 125°C à la surface d'ouverture, 88°C à l'intérieur de l'absorbeur et 54°C pour l'eau à la sortie. Ensuite elles subies des perturbations, plus exactement la température à la surface d'ouverture.

IV.4.1.3 Interprétation

Nous avons remarqué que les températures relevées sont perturbées après 30 min de l'expérience, cela est dû au vent fort présent cette journée malgré l'ensoleillement. Les conditions défavorables et les résultats obtenus ne sont pas satisfaisant, ce qui nous a amené à faire un autre essai.

IV.4.2 Deuxième essai

IV.4.2.1 Représentation graphique des résultats

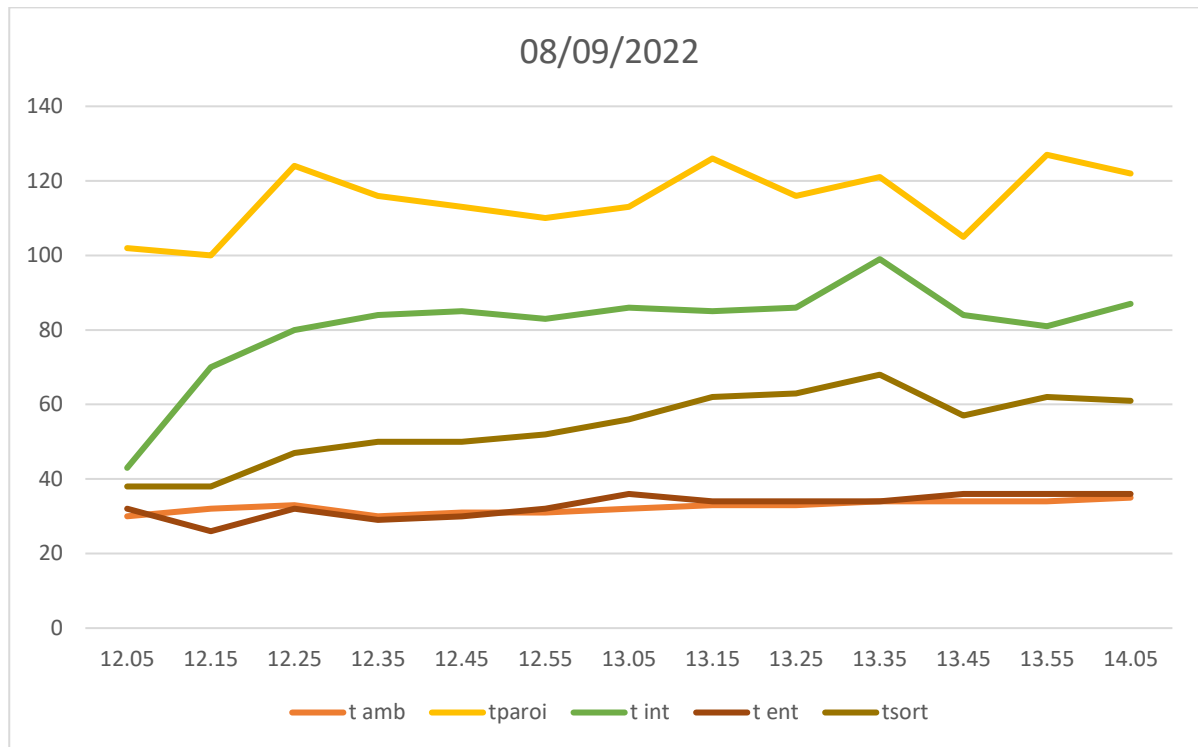


Figure IV.5 Graphe d'évolution de la température en fonction du temps le 08/09/2022

IV.4.2.2 Commentaires

La température ambiante et la température d'entrée de l'eau suivent une allure proche au linéaire.

Pour 30 secondes d'exposition aux rayons solaires, la température à la surface d'ouverture atteint 102°C, 43°C à l'intérieur de l'absorbeur et 38°C à la sortie d'eau.

Les meilleures températures obtenues sont les suivantes :

- 127°C à la surface d'ouverture.
- 99°C à l'intérieur de l'absorbeur.
- 68°C à la sortie d'eau.

IV.4.2.3 Interprétation

Ce dernier essai nous a apporté des meilleurs résultats malgré le ciel partiellement couvert. Cela nous amène à dire que ce système est plus sensible au vent qu'au rayonnement diffus.

IV.5 Température à la surface et l'entrée de l'absorbeur sans écoulement d'eau

La température à la surface d'ouverture est arrivée à 382°C qui est plus importante que celle mesuré au part avant qui atteint 333°C . La température à l'intérieur de l'absorbeur est arrivée à 241°C .



FigureIV.6 Température à la surface et à l'intérieur de l'absorbeur

IV.6 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons parlé de la structure générale de notre travail, en présentant les modifications majeures effectuées au concentrateur solaire parabolique réalisé en 2020. Ces modifications consiste a amélioré le mécanisme de poursuite solaire, le programme ainsi que l'absorbeur.

Pour prouver ces améliorations nous avons fait des tests en relevant cinq températures dont trois importantes (température à la surface et l'intérieur de l'absorbeur et la température à la sortie d'eau).

Nous avons abouti à des résultats meilleurs et satisfaisants. La température au point focale est arrivée à 382°C qui est plus importante à celle mesuré en 2020 qui est à 333°C [37].

CONCLUSION GENERALE

Conclusion générale

L'étude que nous avons fait sur le concentrateur parabolique, nous a permis de comprendre le fonctionnement de ce système, et les paramètres qui influent sur son efficacité.

Notre projet de fin d'étude s'intitule étude et amélioration d'un concentrateur parabolique pour un absorbeur, avec poursuite automatique. Le but était de mettre en œuvre un système qui permet de rendre un suiveur solaire manuel un suiveur solaire automatique et de réaliser un absorbeur qui permettra d'améliorer le rendement du système.

Les améliorations apportées étaient sur un modèle réaliser par la promotion de 2020. Les objectifs majeurs étaient le remplacement du vérin par un moteur électrique, la réalisation d'un nouvel absorbeur plus performant et l'écriture d'un nouveau programme qui offre une meilleure stabilité et suivi des rayonnements solaires.

Nous avons choisi de faire ces modifications car, le vérin était défectueux et coutait cher pour le réparer, puisqu'ils étaient introuvables dans le marché. L'absorbeur n'était pas convenable a notre système de plus le programme qui gérait la poursuite automatique était très sensible aux variations des rayonnements solaires et donc il était instable.

Nous avons montré, Suite au expériences effectuer dans différentes conditions et avec différents paramètres que ces systèmes dépendent de plusieurs facteurs, dont les plus importants sont la variation de l'éclairement solaire, la géométrie du réflecteur, le matériau utilisé comme réflecteur, les dimensions et le matériau de l'absorbeur et l'efficacité de son isolement ainsi que le positionnement par rapport au point focal du concentrateur. Nous avons aussi déduit que la température de sortie du fluide caloporteur est inversement proportionnelle au débit, plus ce dernier est petit plus la température de sortie est grande.

Les résultats obtenus étaient assez satisfaisants, puisque, la poursuite automatique est plus stable et plus précise, et les valeurs de températures obtenus sont excellentes. En effet les températures de l'absorbeur sont proches de 400°C, par comparaison aux résultats des années précédentes ils sont améliorées : on a commencé avec une température de l'absorbeur de 288°C pour le mémoire de fin d'étude 2017, ensuite 333°C pour celui de 2020 [37] net en fin on a atteint 382°C. Ainsi les températures de sorties du fluide caloporteur sont améliorées.

Le programme de calcul proposé dans cette étude est général et peut être utilisé pour n'importe quel système optique à concentration. Toutefois, quelques modifications doivent être apportées au programme si les concentrateurs paraboliques ne sont pas utilisés.

Ce projet de fin d'études était pour nous l'occasion précieuse de faire un travail multidisciplinaire, associant l'électronique, l'automatique, le transfert thermique, la construction mécanique et la programmation.

En perspective, on souhaite améliorer notre suiveur on lui ajoutant des systèmes de protection contre le changement brusque du climat, de couvrir la surface parabolique du récepteur par un miroir qui la corresponde à fin d'amélioré le rendement.

Nous souhaitons concevoir un absorbeur plus performant au niveau de la surface d'échange avec le fluide caloporteur afin d'augmenter le débit.

Bibliographie

Références bibliographies

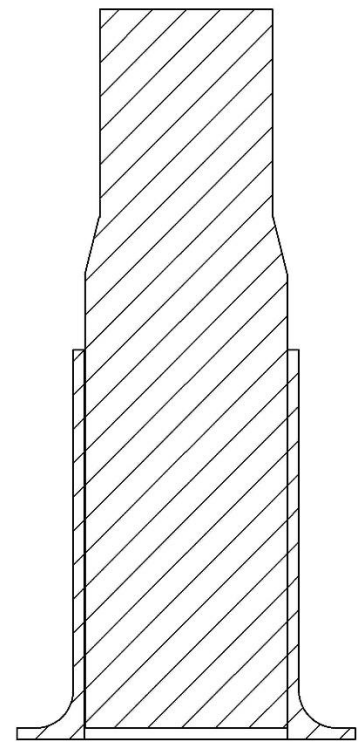
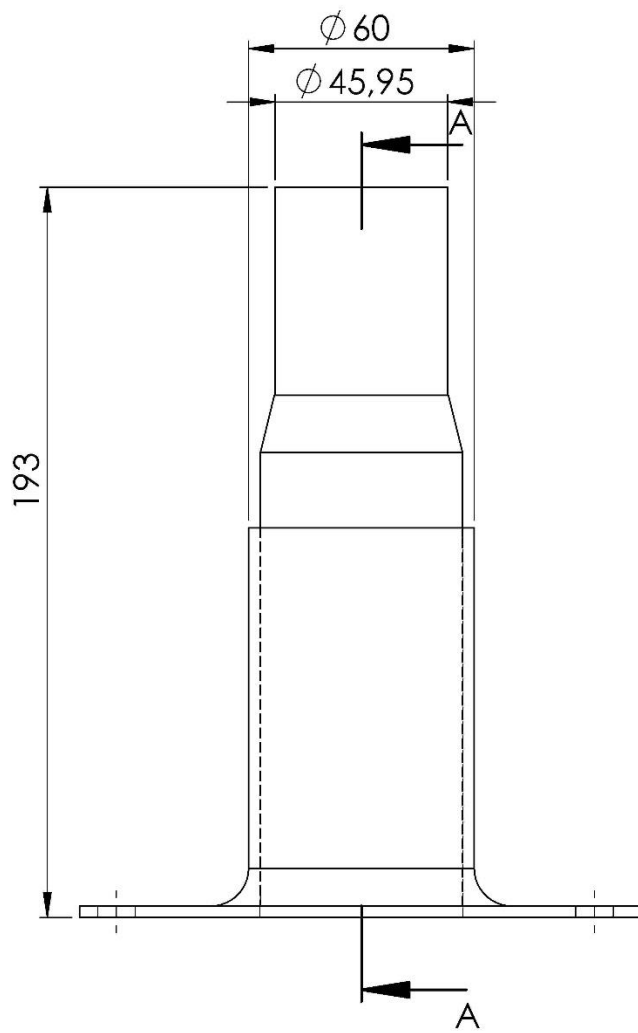
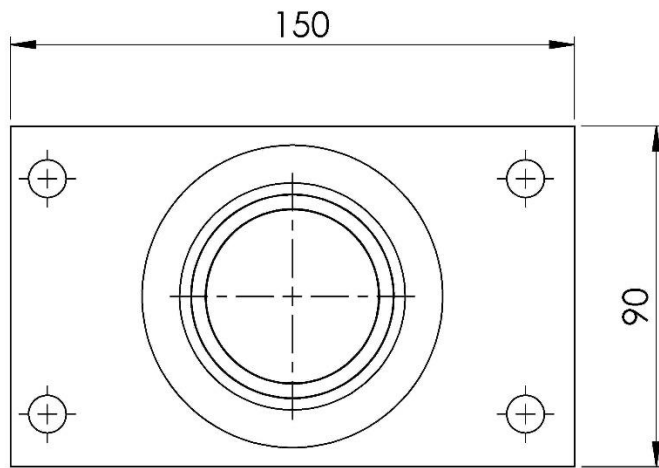
- [1] www.cea.fr
- [2] www.technoscience.net
- [3] Goody et Yung 1989, p. 482, 484
- [4] William M. Haynes, CRC Handbook of Chemistry and Physics, vol. 97, CRC Press/Taylor and Francis, 2016, 2652 p. (ISBN 1498754287), « Solar irradiance at the Earth », p. 2403 (14-18).
- [5] Z. Boudries, 'contribution à l'étude et la conception d'une poursuite automatique du soleil destinée au four solaire', Mémoire de magister, université de Béjaia p 4, 1995
- [6] www.calculeo.fr
- [7] Dirk Jordan et Teresa Barnes, Build solar-energy systems to last billions», Nature, décembre 2021, p. 215-217
- [8] eduscol.education.fr
- [9] www.futura-sciences.com
- [10] Document, Liaison Energie-Francophonie. 'Energie et Développement Durable en Méditerranée', N°71, p. 95, 2ème Trimestre 2006.
- [11] M. Salmi, «Contribution à La Quantification De L'irradiation Solaire Globale En Algérie Et Applications Aux Générateurs Photovoltaïques», Thèse de doctorat en Sciences, Université Ferhat Abbas de Sétif (2012).
- [12] www.energy.gov.dz
- [13] www.cder.dz/
- [14] Microsoft encarta 2009
- [15] Dominique, Michele Frémy, Le monde et Astronomie, quid 2001, France Loisir Paris 2001.
- [16] J.M.chassériaux, Conversion thermique du rayonnement solaire, bordas Paris. 1984
- [17] Selected Astronomical Constants, 2015 [archive] [PDF], US Naval Observatory, 2014, K6-K7
- [18] Document, "Contrôle des Systèmes DEGERtraker", DEGERenergie GmbH, 72160 Horb Germany, <http://www.degerenergie.de>
- [19] European office: Solenergy Europe St. Petersburg, Russia, Universal solar tracker Sunflower St.
- [20] K. Ogilvie. "L'abc de technologie de l'énergie renouvelable, pollution probe", Canada, septembre 2003.
- [21] B.Stine. Michael Geyer, «< Power from the sun », Lyle centre for regenerative studies 2001.
- [22] UHKurzweg IP.Benson."Iso-Intensity absorber Configurations For parabolic Concentrators, Solar energy Vol 29 No.2.pp167-174,1982.

Références bibliographies

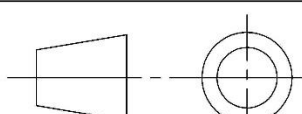
- [23] Dan dye. Byard Wood, "Non-imaging devices for uniform irradiation on Planar Surface For parabolic Concentrators". Semi-Annual Technical Progress Report August 2002-April 2003. Nevada Report 41164R03.
- [24] M.Srinivasan, L.VKulkarni "A simple technique of fabrication of parabolic Concentrators Solar energy, volume 22, pp 463-465 Novembre 1978.
- [25] M. Kayouche.....système de poursuite du soleil, bilan énergétique et optimisation de Réglage Thèse de Magister. Université de Constantine 1996.
- [26] D. Kedwards, L. Marlot. "Capteurs Solaires", Edition S CM Paris 1979.
- [27] JE Braun et J.C Mitchell, "Solar geometry for fixed and tracking surface" Solar Energy, vol.31 N° pp394-444 (1983).
- [28] Paul De Neyer....Energie solaire thermique, Guide des Energies Renouvelables, mai 2003.
- [29] D.Kedwards, L.Marlot, Capteurs Solaires, Edition S CM, Paris 1979.
- [30] S.Bonned et A Alaphilippe, Conversion thermodynamique de l'énergie solaire dans des installations de faible ou de moyenne puissance. Energ. ren 11 eme journées internationaux de thermique. pp. 73-80. 2003.
- [31] boutique.semageek.com
- [32] Éclairage led: 5 points-clés et 4 nouveautés », Le moniteur, 5 mars 2020 (lire en ligne [archive], consulté le 26 juin 2020).
- [33] Résumé de la norme IEC 60584-1 sur les thermocouples, partie tables et fonctions de B référence»
- [34] clubinfovalsaone.e-monsite.com
- [35] pedagogie.ac-toulouse.fr
- [36] www.tibtech.com
- [37] www.univ-bejaia.dz/xmlui/handle/123456789/14779

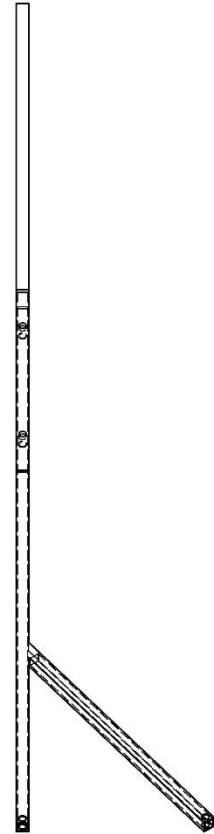
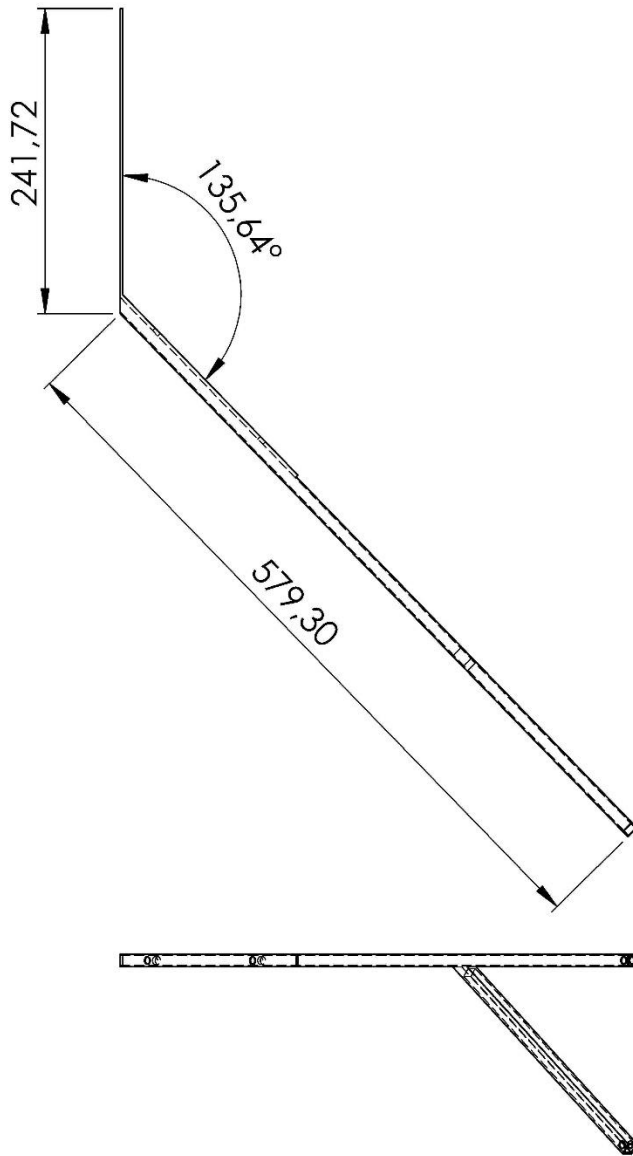
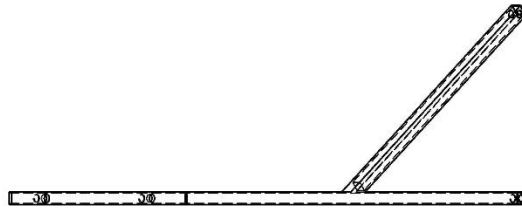
Annexes

Mise en plan des pièces réaliser sur SolidWorks



COUPE A-A
ECHELLE 1 : 2

UNIVERSITE A/MIRA_BEJAIA		25/08/2022
Echelle 1:2	Axe de rottation horizontal	PFE
Matière: Acier		M2 ELM
		Dessiné par: HAMDIKENE Mohamed et HADDAD Amazigh



UNIVERSITE A/MIRA_BEJAIA

25/08/2022

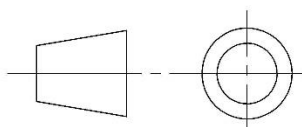
Echelle: 1:6

Bras de l'absorbeur

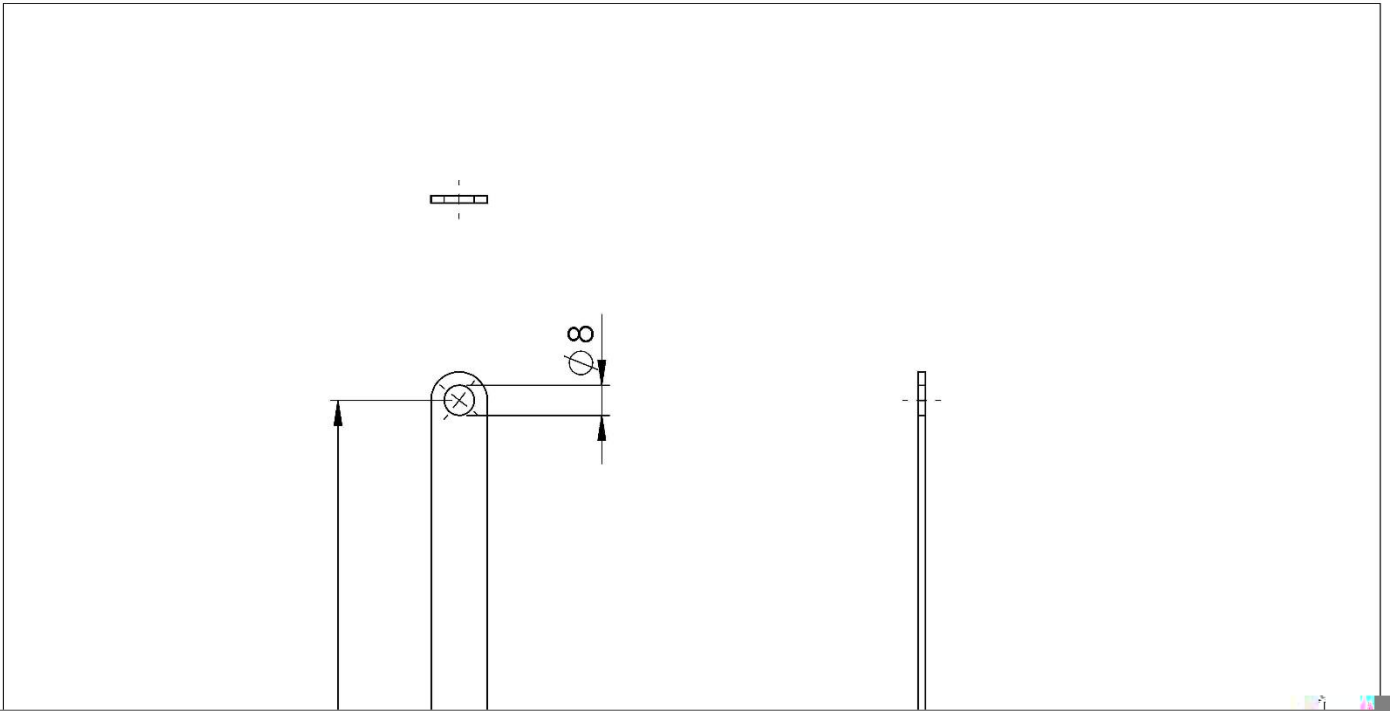
PFE

Matière: Acier

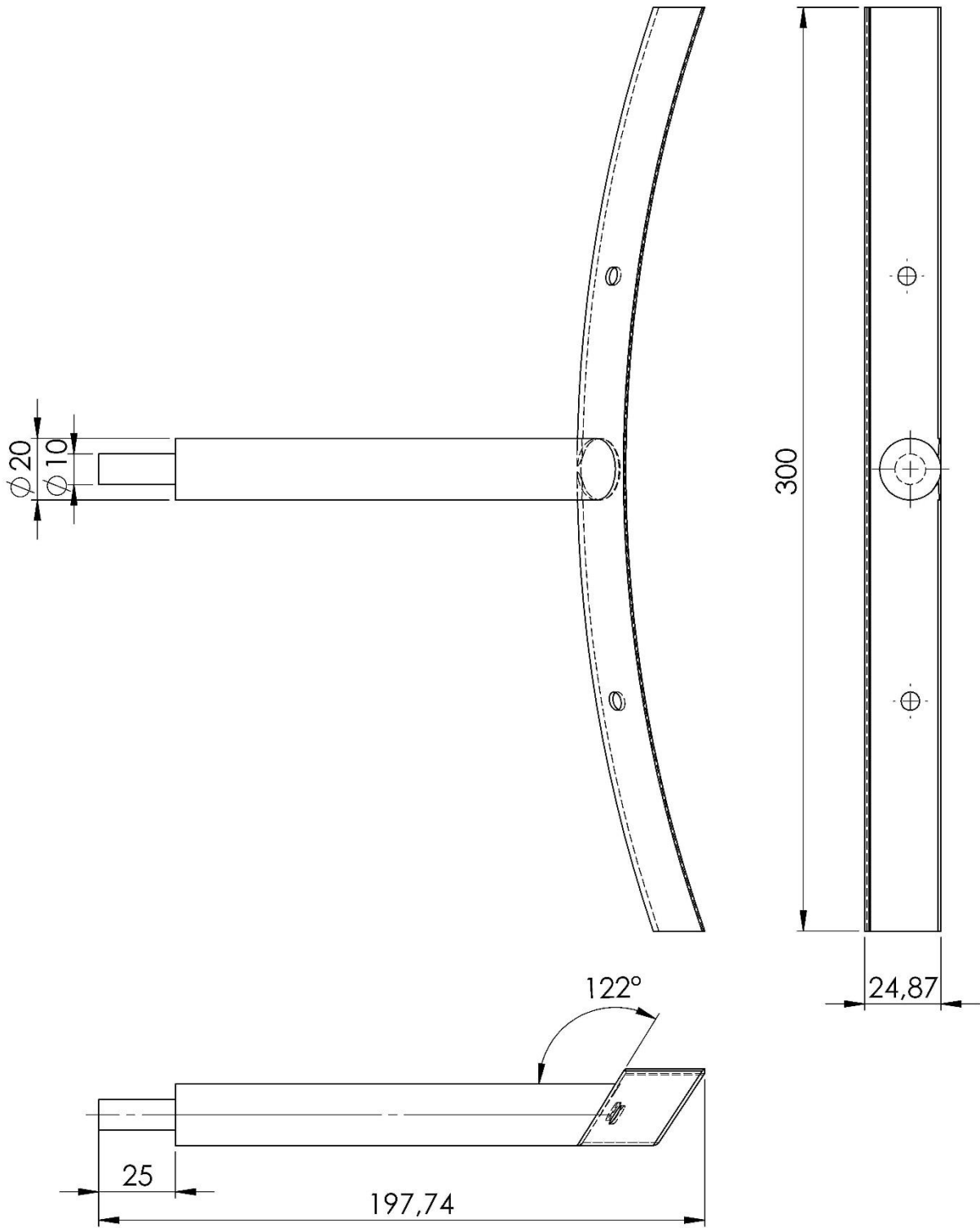
M2 ELM

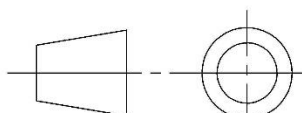


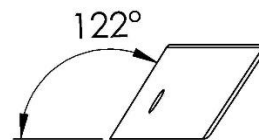
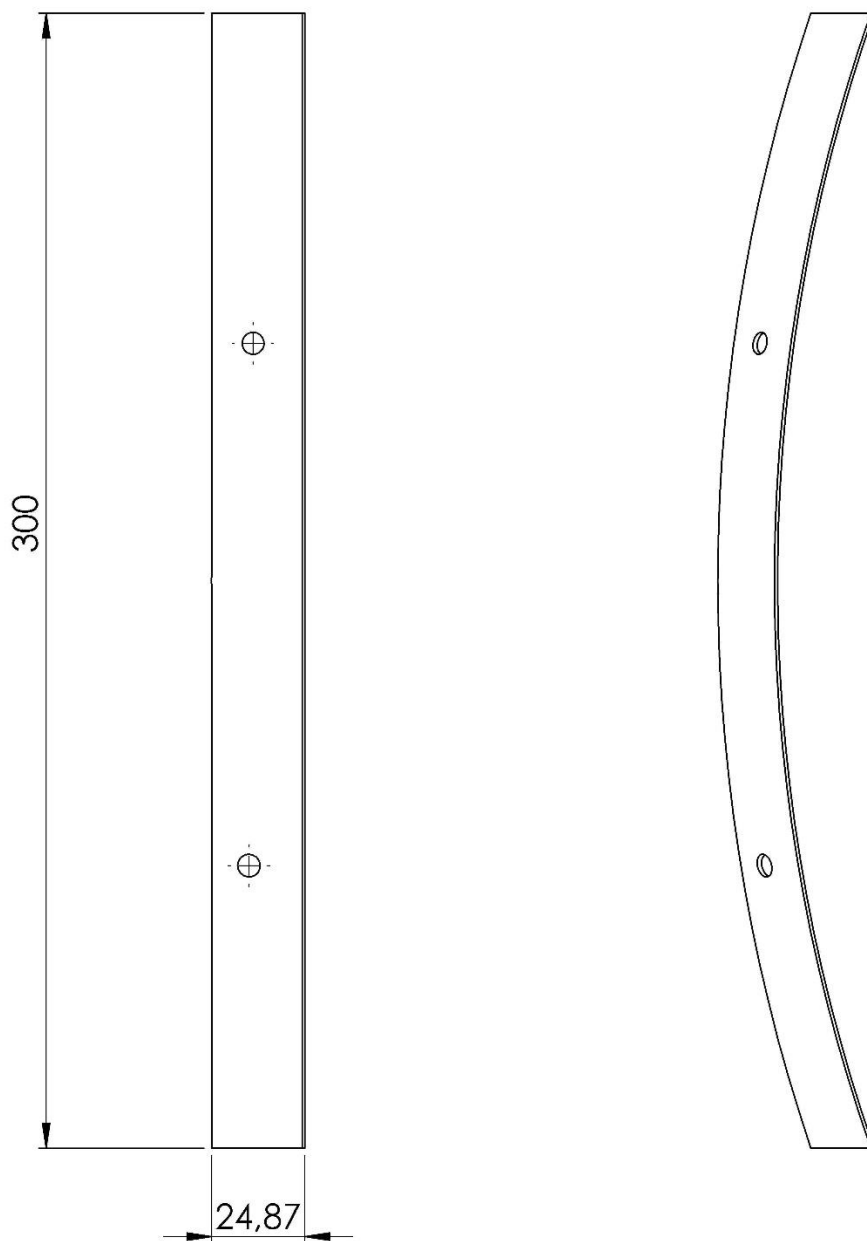
Dessiné par:
HAMDIKENE Mohamed et HADDAD Amazigh

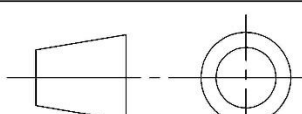


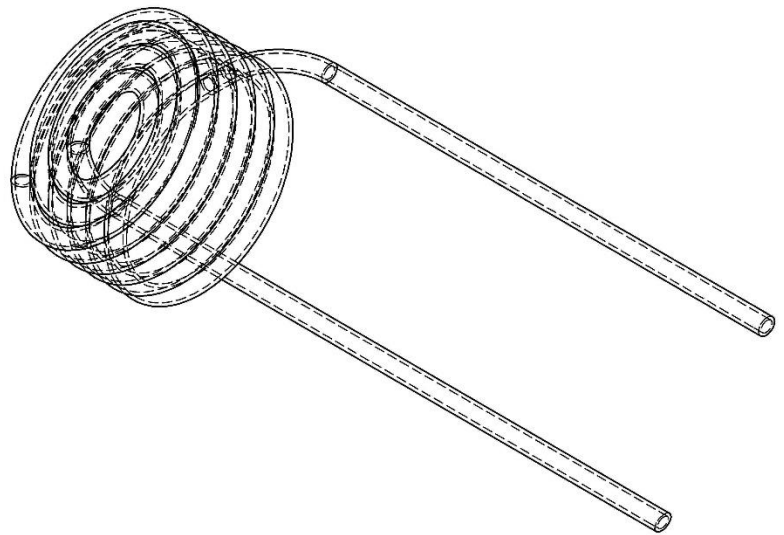
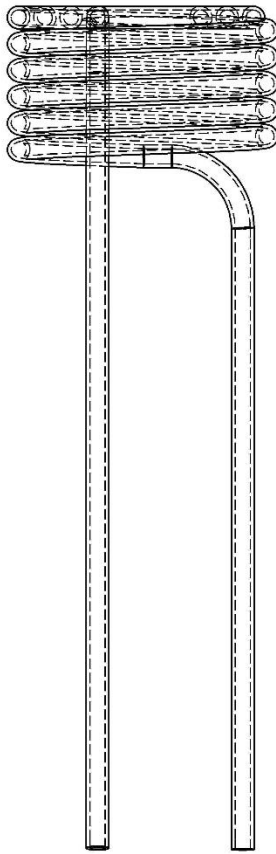
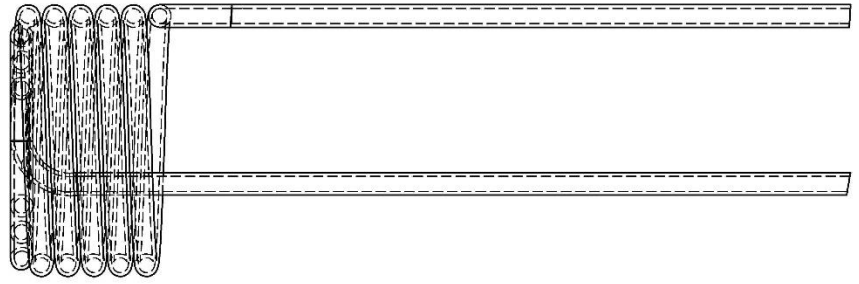
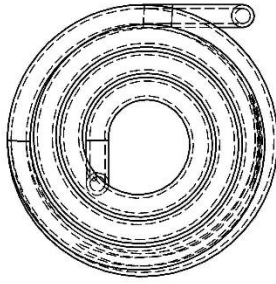
Entretoise pour le cadre de
la parabole



UNIVERSITE A/MIRA_BEJAIA		25/08/2022
Echelle 1:2	Arbre de la parabole	PFE
Matière: Acier		M2 ELM
		Dessiné par: HAMDIKENE Mohamed et HADDAD Amazigh



UNIVERSITE A/MIRA_BEJAIA		25/08/2022
Echelle 1:2	Pate intérieure de l'arbre de la parabole	PFE
Matière: Acier		M2 ELM
		Dessiné par: HAMDIKENE Mohamed et HADDAD Amazigh



UNIVERSITE A/MIRA_BEJAIA

25/08/2022

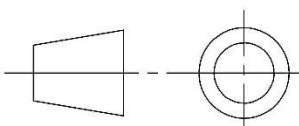
Echelle: 1:2

Serpentin

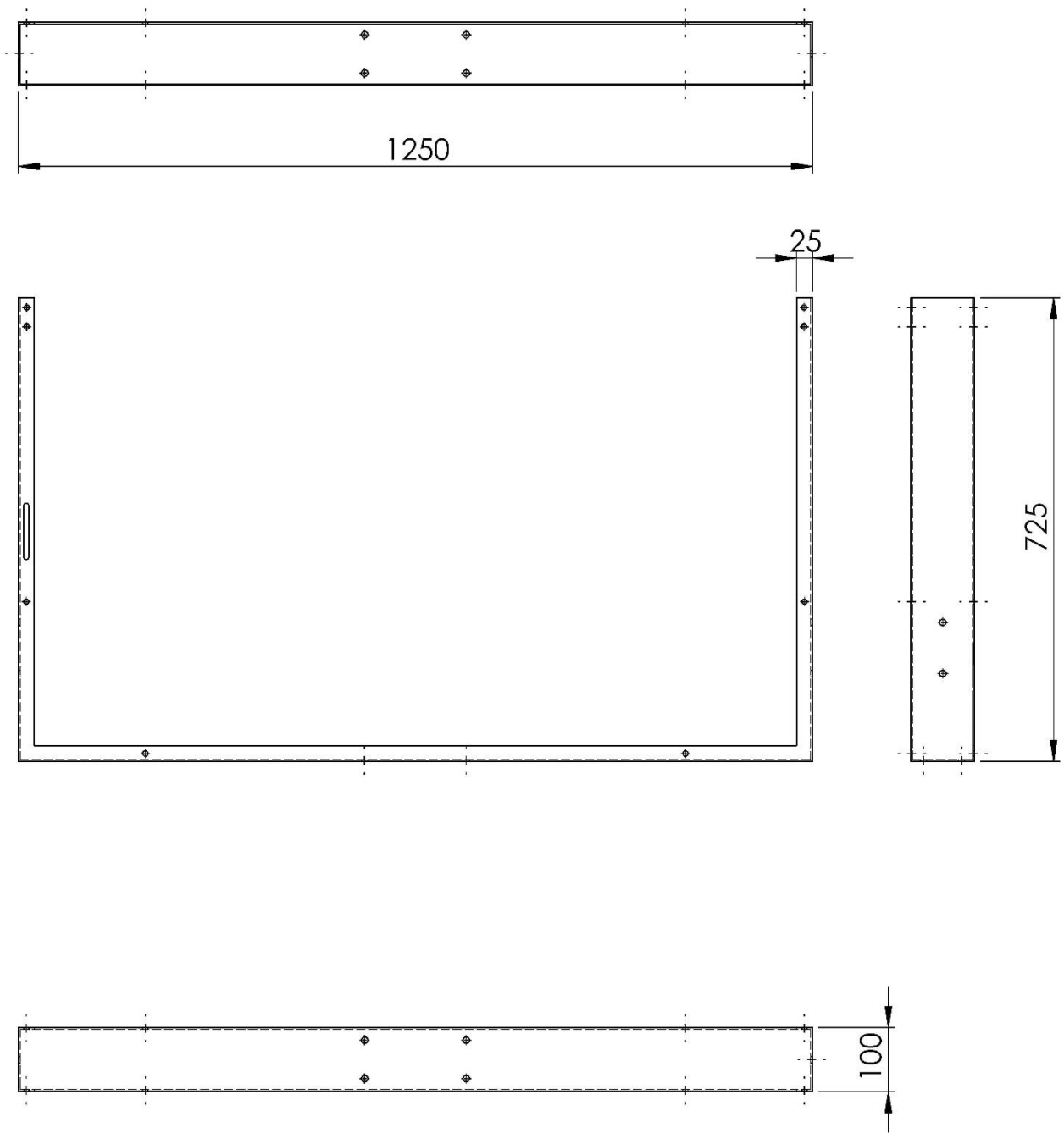
PFE

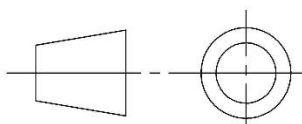
Matière: Cuivre

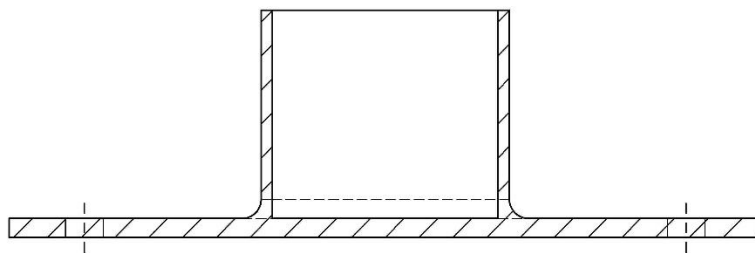
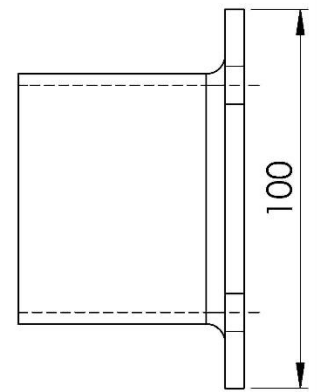
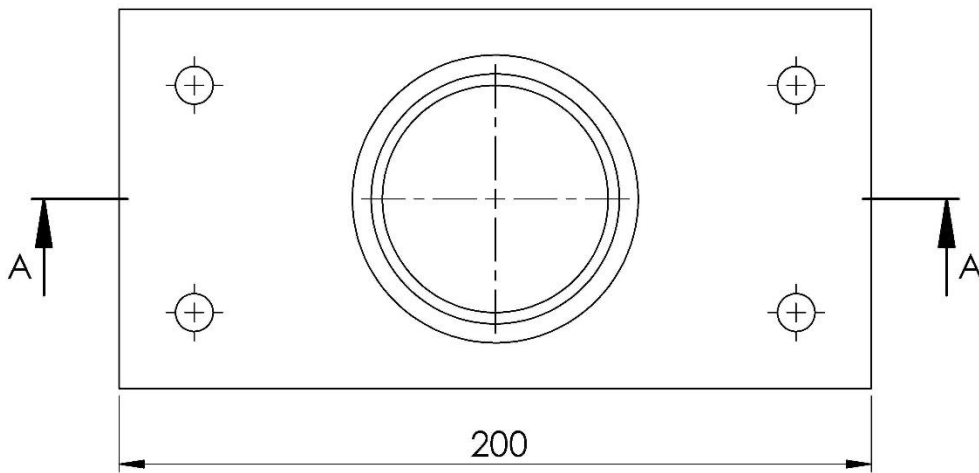
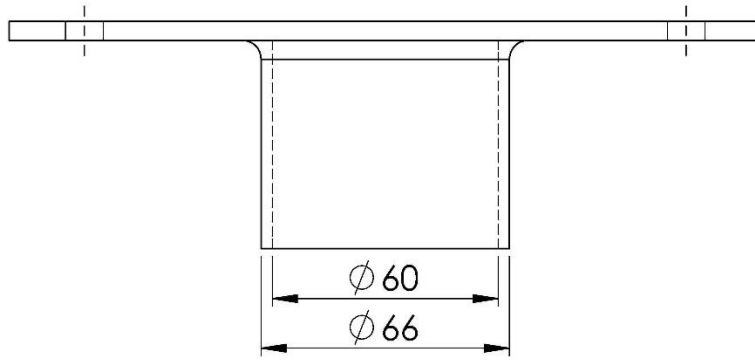
M2 ELM



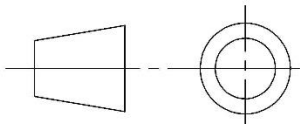
Dessiné par:
HAMDIKENE Mohamed et HADDAD Amazigh

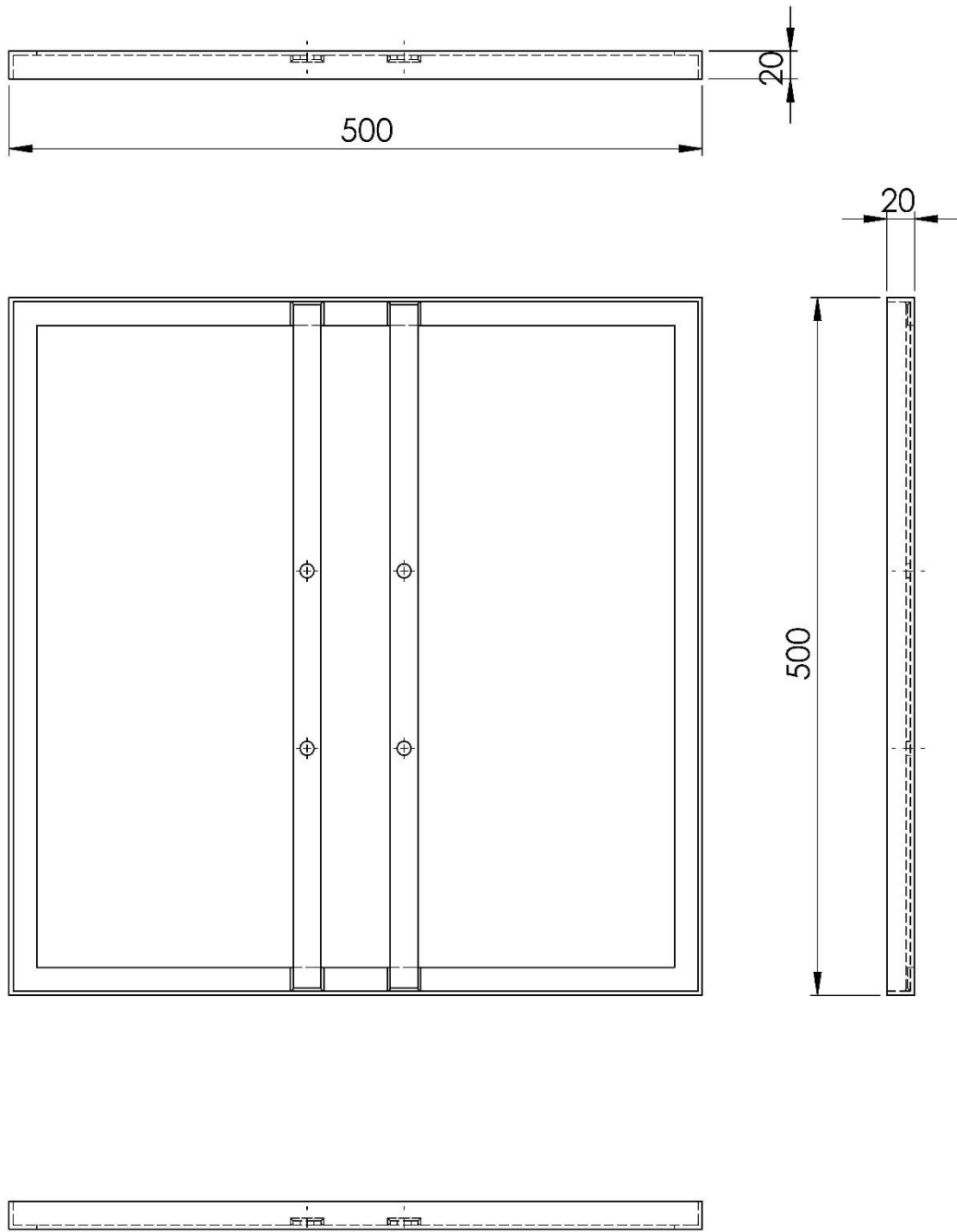


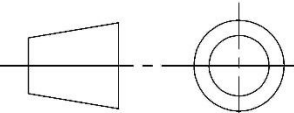
UNIVERSITE A/MIRA_BEJAIA		25/08/2022
Echelle:1:10	Cadre de la parabole	PFE
Matière: Acier		M2 ELM
	Dessiné par: HAMDIKENE Mohamed et HADDAD Amazigh	

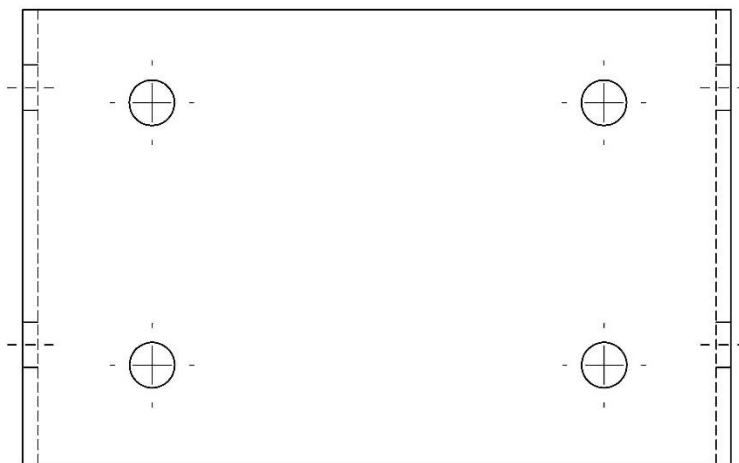
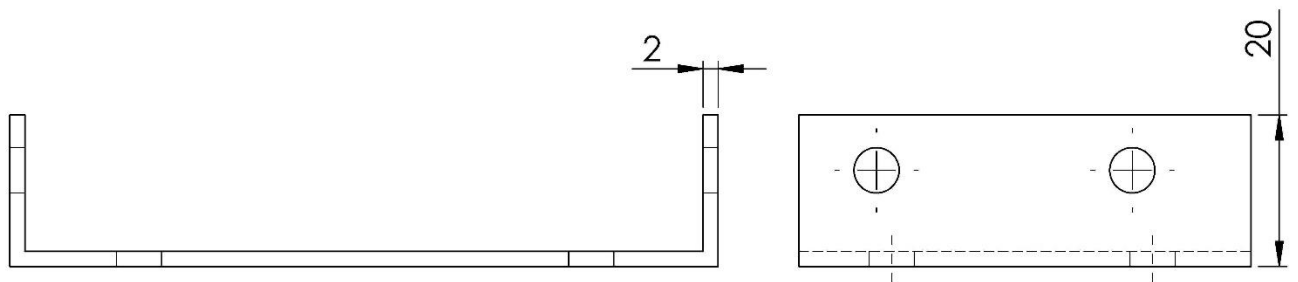
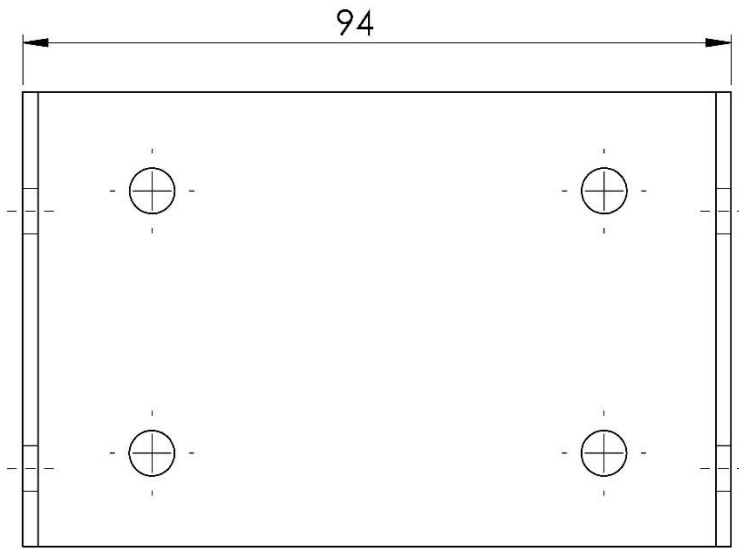


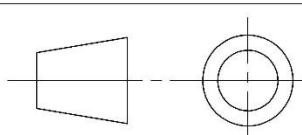
COUPE A-A
ECHELLE 1 : 2

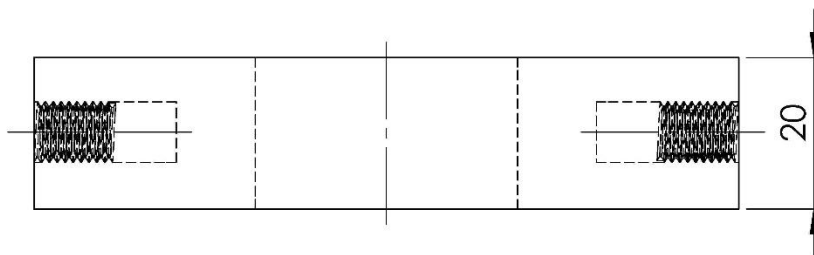
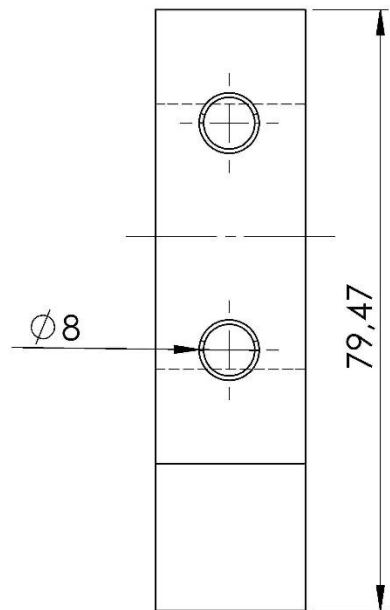
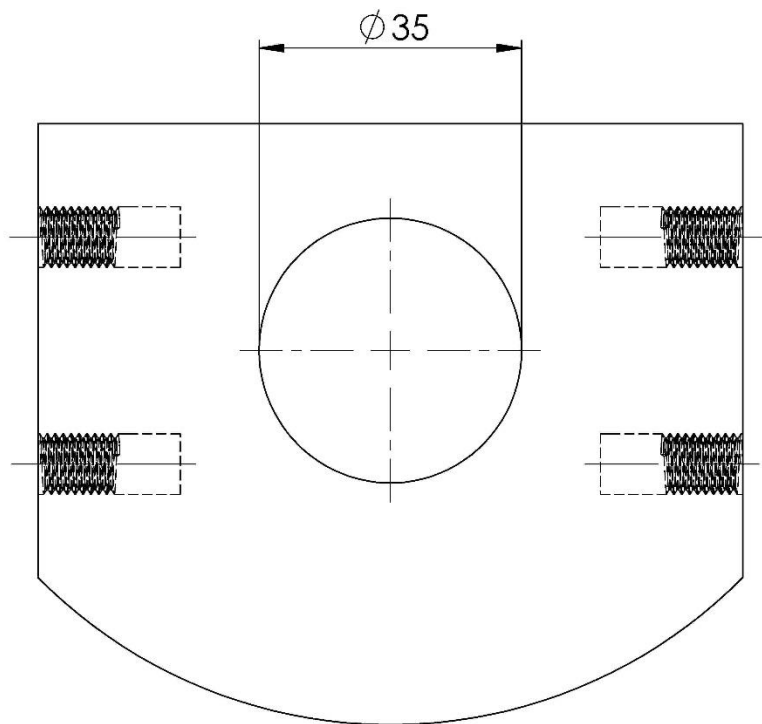
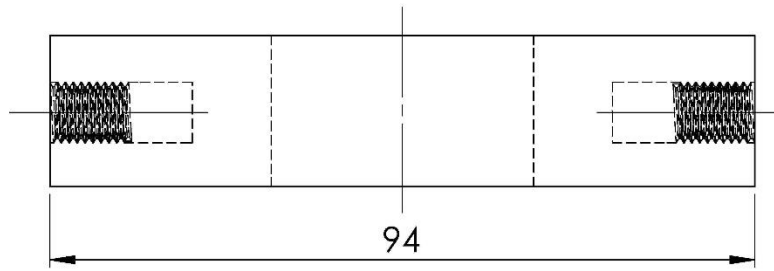
UNIVERSITE A/MIRA_BEJAIA		25/08/2022
Echelle 1:2	Alésage du support de rotation horizontal	PFE
Matière: Acier		M2 ELM
		Dessiné par: HAMDIKENE Mohamed et HADDAD Amazigh

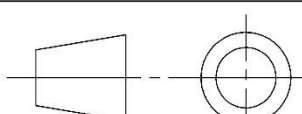


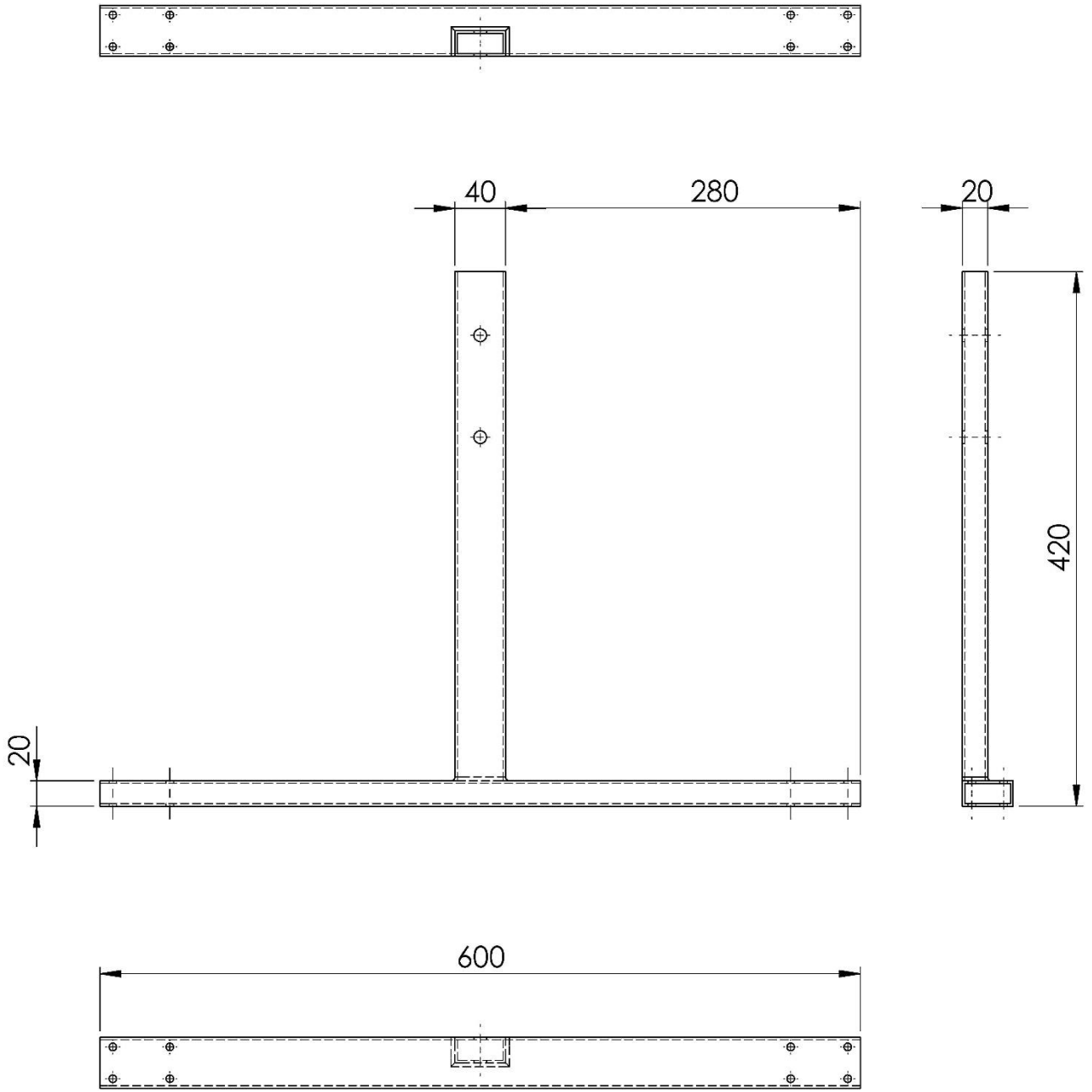
UNIVERSITE A/MIRA_BEJAIA		25/08/2022
Echelle 1:5	Le socle	PFE
Matière: Acier		M2 ELM
		Dessiné par: HAMDIKENE Mohamed et HADDAD Amazigh



UNIVERSITE A/MIRA_BEJAIA		25/08/2022
Echelle 1:1	Support de fixation des moteurs	PFE
Matière:Acier		M2 ELM
		Dessiné par: HAMDIKENE Mohamed et HADDAD Amazigh



UNIVERSITE A/MIRA_BEJAIA		25/08/2022
Echelle 1:1	Support De Rotation Verticale	PFE
Matière: Acier		M2 ELM
		Dessiné par: HAMDIKENE Mohamed et HADDAD Amazigh



UNIVERSITE A/MIRA_BEJAIA

25/08/2022

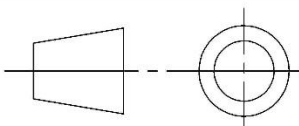
Echelle 1:5

Support de stabilité

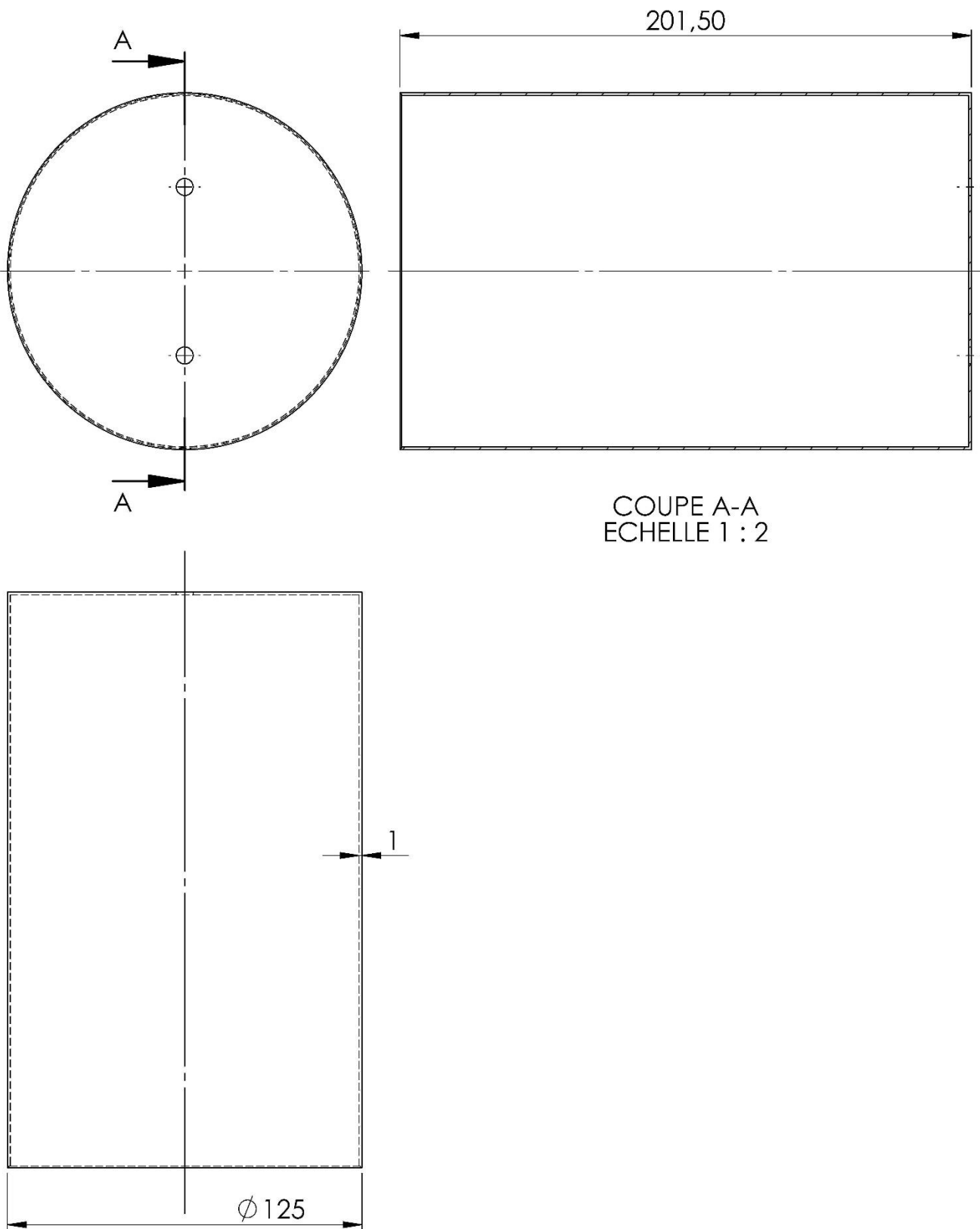
PFE

Matière: Acier

M2 ELM



Dessiné par:
HAMDIKENE Mohamed et HADDAD Amazigh



COUPE A-A
ECHELLE 1 : 2

UNIVERSITE A/MIRA_BEJAIA

25/08/2022

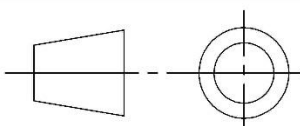
Echelle:1:2

Tube extérieur de
l'absorbeur

PFE

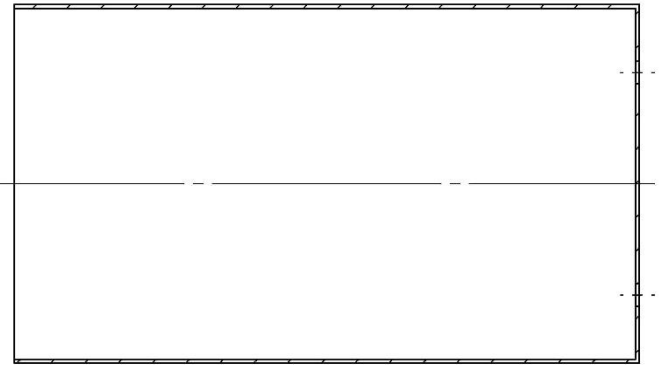
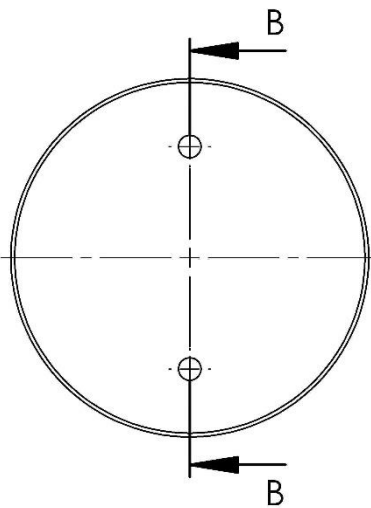
Matière: Zinc

M2 ELM

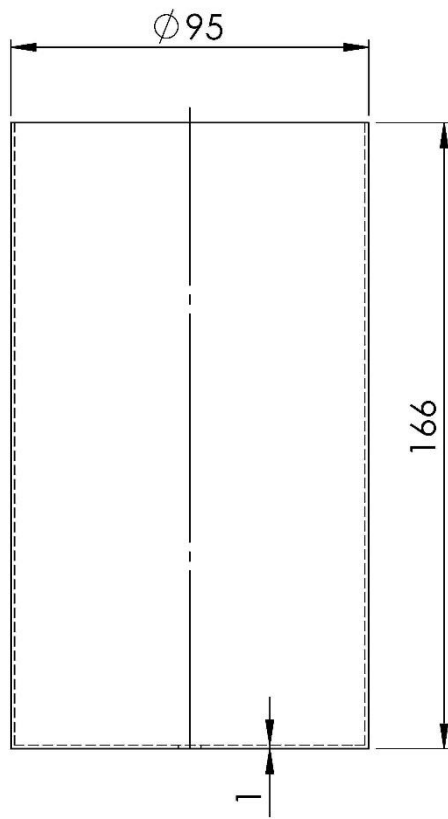


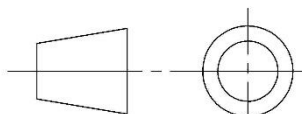
Dessiné par:

HAMDIKENE Mohamed et HADDAD Amazigh

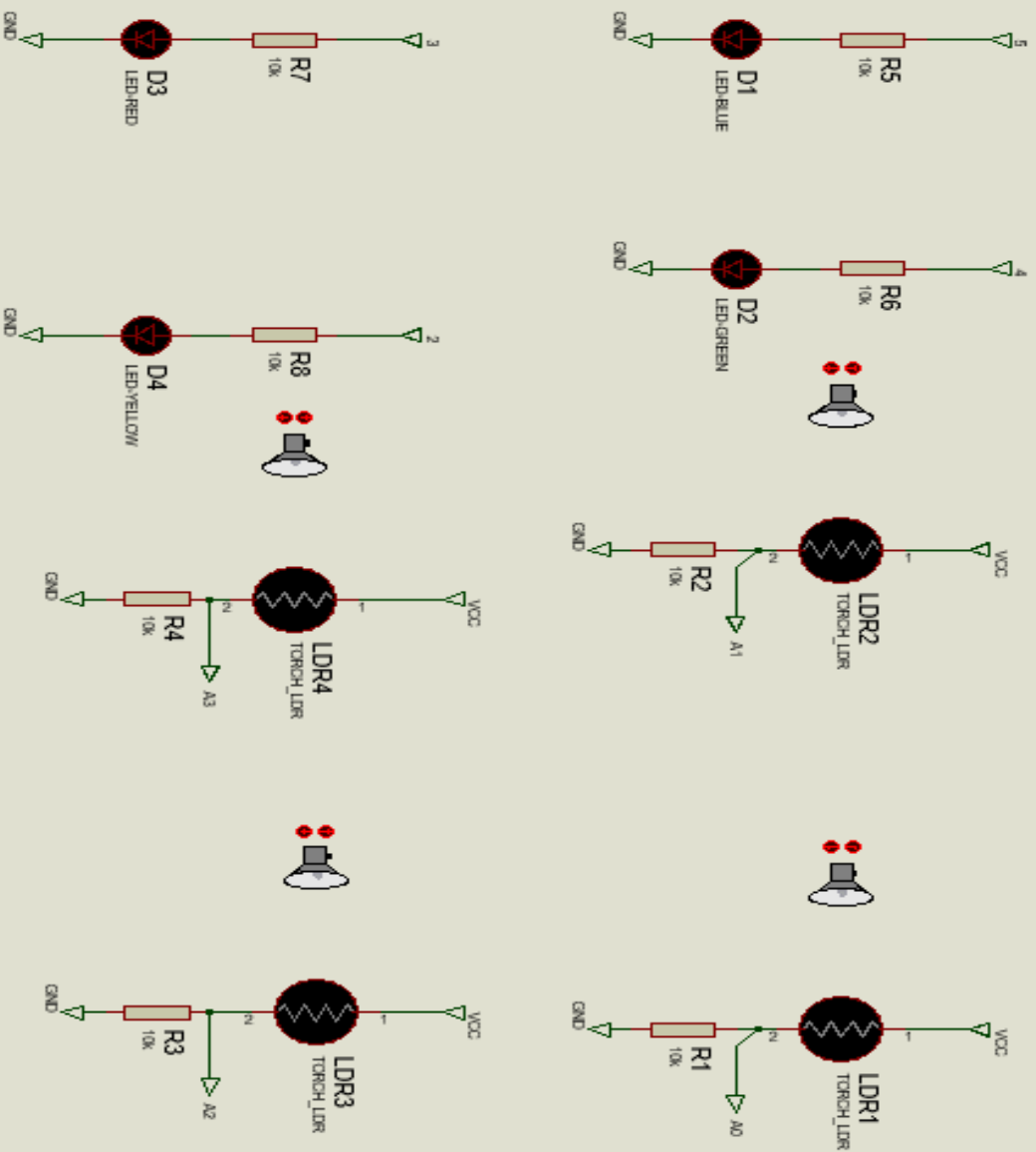
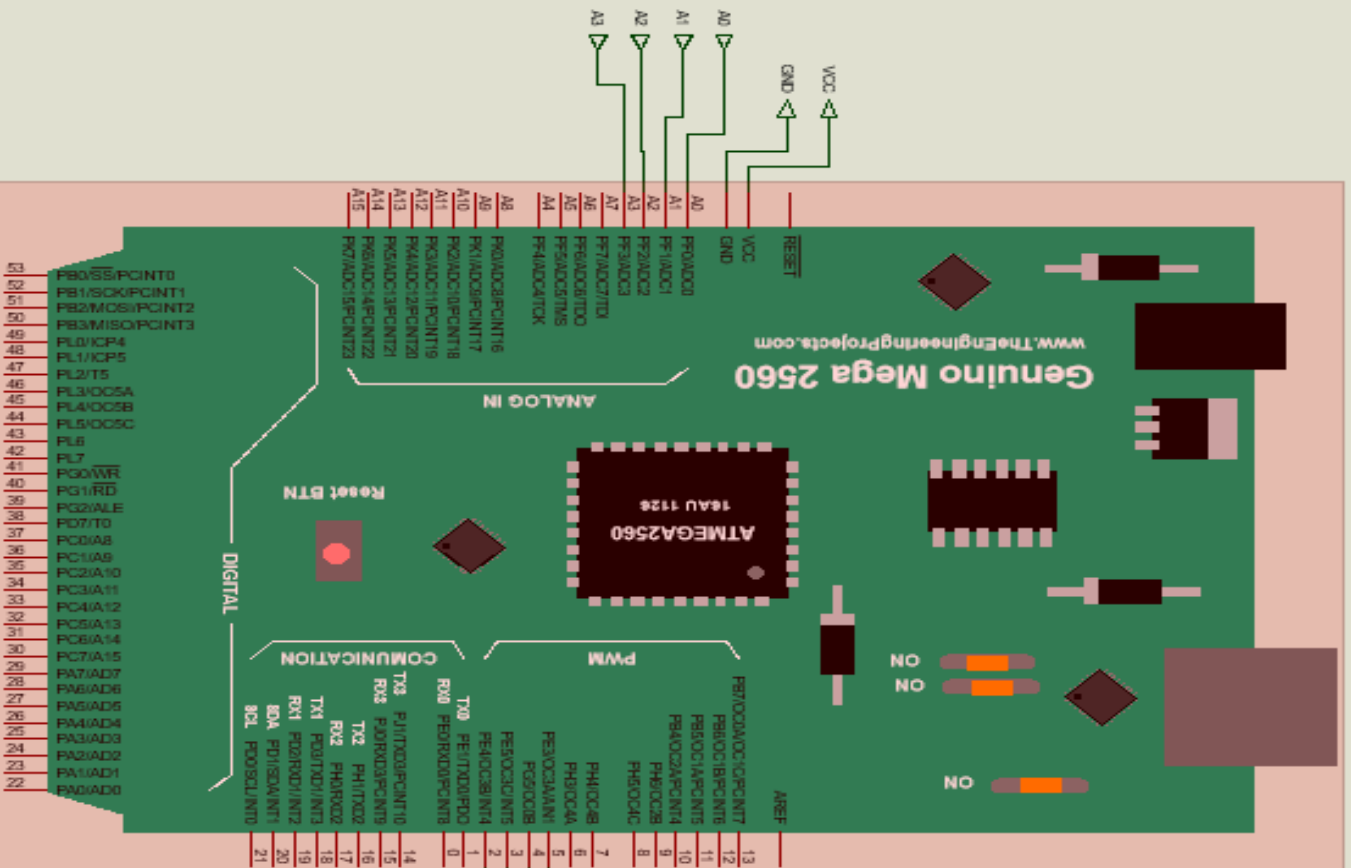


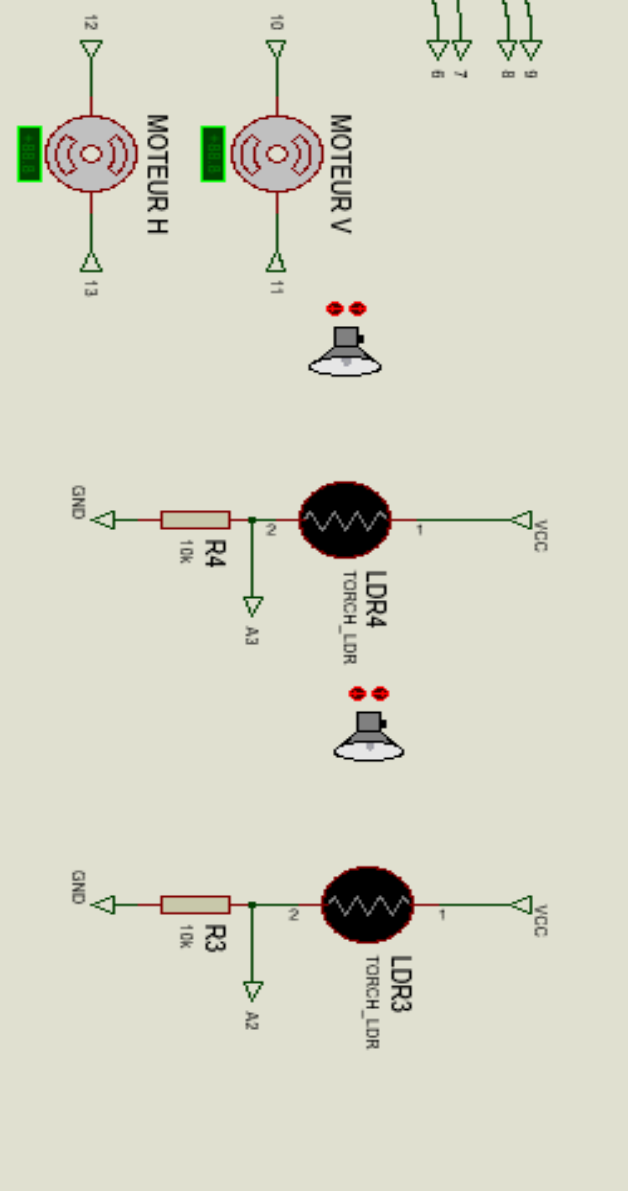
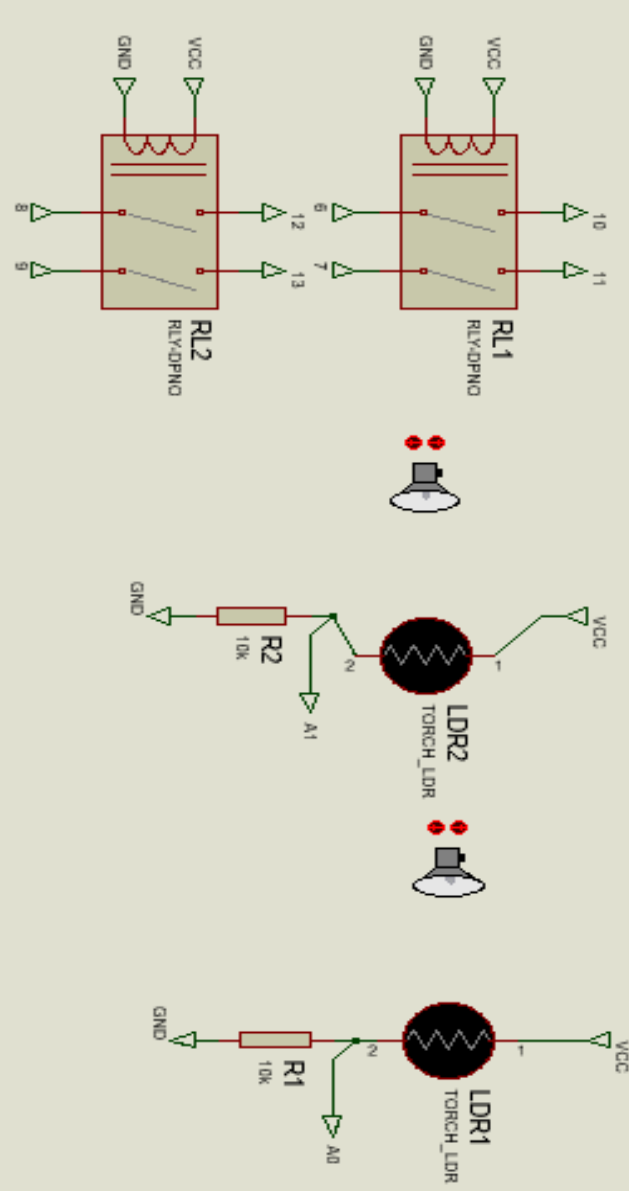
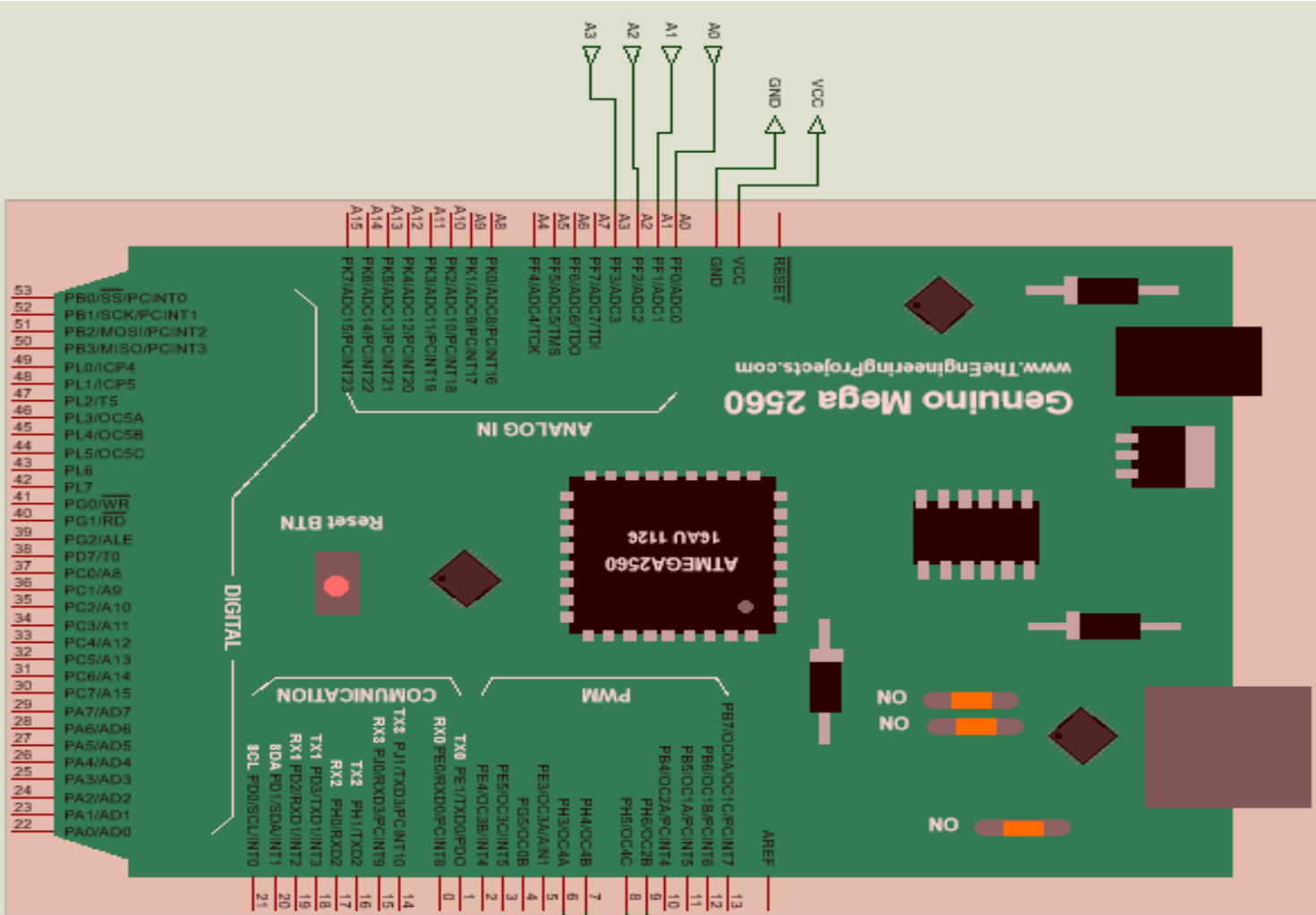
COUPE B-B
EHELLE 1 : 2



UNIVERSITE A/MIRA_BEJAIA		25/08/2022
Echelle: 1/2	Tube intérieure de l'absorbeur	PFE
Matière: Zinc		M2 ELM
		Dessiné par: HAMDIKENE Mohamed et HADDAD Amazigh

Simulation sous Proteus





Programme Arduino

```

int ph = A0;
int pb = A1;
int pg = A2;
int pd = A3;
int led1 = 5;
int led2 = 4;
int led3 = 3;
int led4 = 2;
int relay1 = 6;
int relay2 = 7;
int relay3 = 8;
int relay4 = 9;
void setup() {
  Serial.begin(9600);
  pinMode(photo1, INPUT);
  pinMode(photo2, INPUT);
  pinMode(photo3, INPUT);
  pinMode(photo4, INPUT);
  pinMode(led1, OUTPUT);
  pinMode(led2, OUTPUT);
  pinMode(led3, OUTPUT);
  pinMode(led4, OUTPUT);
  pinMode(relay1, OUTPUT);
  pinMode(relay2, OUTPUT);
  pinMode(relay3, OUTPUT);
  pinMode(relay4, OUTPUT);
}
void loop() {
  //relay1
  int lecture1 = analogRead(photo1);
  Serial.println(lecture1);
  if (lecture1 < 300) {
    digitalWrite(led1, HIGH );
    digitalWrite(relay1,LOW);
  }
  if (lecture1 > 400) {
    digitalWrite(led1, LOW );
    digitalWrite(relay1,HIGH);
  }
  //relay2
  int lecture2 = analogRead(photo2);
  Serial.println(lecture2);
  if (lecture2 < 300) {
    digitalWrite(led2, HIGH);
    digitalWrite(relay2, LOW );
  }
  if (lecture2 > 400) {
    digitalWrite(led2,LOW );
    digitalWrite(relay2,HIGH );
  }
  //relay3
  int lecture3 = analogRead(photo3);
  Serial.println(lecture3);
  if (lecture3 > 400) {
    digitalWrite(led3, LOW);
    digitalWrite(relay3, HIGH);
  }
  if (lecture3 < 300) {
    digitalWrite(led3, HIGH);
    digitalWrite(relay3, LOW);
  }
  //relay4
  int lecture4 = analogRead(photo4);
  Serial.println(lecture4);
  if (lecture4 > 400) {
    digitalWrite(led4, LOW);
    digitalWrite(relay4, HIGH);
  }
  if (lecture4 < 300) {
    digitalWrite(led4, HIGH);
    digitalWrite(relay4, LOW);
  }
}
}

```