

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



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

**Fillière : Energies Renouvelables**

**Spécialité : Conversion Thermique.**

Thème

**Extraction des huiles essentielles par un concentrateur solaire de type  
paraboloïde**

Par : KRAOUAN Racha.

Soutenu le 12 juillet 2023 devant le jury composé par :

Mme.	KHELALFA.N	Docteur	USDB1	Président
Mr.	MERZOUK.M	Professeur	USDB1	Examineur
Mme.	FERRADJI.F	Docteur	USDB1	Examineur
Mr.	SAID.N	Professeur	USDB1	Encadreur
Mr.	CHEKNANE.B	Professeur	USDB1	Co- Encadreur

**Juillet 2023**



## ملخص

العمل يهدف الى دراسة وانشاء نظام شمسي بتركيز موضعي من اجل استخراج الزيوت الأساسية للنباتات الطبية والعطرية باستخدام طريقة التقطير بالبخار، في دراستنا الحالية قمنا باختيار نبات الكاليتوس. يتألف الجهاز من لاقط عاكس للأشعة الشمسية في موضع ثابت ومرآتان عاكستان. هذه التركيبة توفر حل فعال للمناطق المعزولة والبعيدة عن الشبكة الكهربائية وبديل تنافسي للأجهزة الكلاسيكية التي تستهلك الكثير من الطاقة ولها تأثير سلبي على البيئة. في إطار هذا المشروع تم اجراء دراسة حرارية وبصرية لوصف وتقييم أداء النظام المقترح، أجريت هذه الدراسة في نفس الوقت بالطريقة التجريبية والمحاكاة باستخدام نظام سولترايس. اكدت النتائج التي تم الحصول عليها تجريبياً، من حيث القدرة الحرارية المولدة ودرجة الحرارة التي تم التوصل إليها بواسطة النظام، وكذلك نتائج المحاكاة من حيث التدفق، على جدوى وأداء النظام المقترح. وأظهرت أن النظام قادر على تلبية الاحتياجات المحددة لعملية استخراج الزيوت العطرية.

**الكلمات الرئيسية:** نظام شمسي ذو تركيز مزدوج، التقطير بالبخار، دراسة حرارية وبصرية، الاشعاع الشمسي المباشر، الزيوت الاساسية

## Résumé

Le travail vise à étudier et réaliser un système solaire à concentration ponctuelle pour l'extraction d'huile essentielle à partir de plantes médicinales et aromatiques, en utilisant la méthode d'hydro distillation. Dans notre cas d'étude on a choisi la plante d'Eucalyptus.

Le dispositif se compose d'un concentrateur parabolique avec un foyer fixe et deux héliostats. Cette configuration offre une solution efficace pour les sites isolés, éloignés du réseau électrique, et représente une alternative compétitive aux systèmes traditionnels qui sont très énergivores et ont un impact négatif sur l'environnement.

Dans le cadre du projet, une étude thermique et optique a été réalisée pour caractériser et évaluer les performances du système proposé. Cette étude a été menée à la fois par des expérimentations pratiques et par des simulations utilisant le logiciel SOLTRACE pour cartographier le comportement de flux au foyer.

Les résultats obtenus expérimentalement, en termes de puissance thermique produite et de température atteinte par le système, ainsi que les résultats de simulation, en termes de flux, ont confirmé la faisabilité et les performances du système proposé. Ils ont démontré que le système est capable de répondre aux besoins spécifiques du processus d'extraction d'huile essentielle.

**Mots clés :** Système solaire à double réflexion, Hydro distillation, Etude thermique et optique, DNI, Huile essentielle.

## **Abstract**

The work aims to study and develop a solar system with point concentration for the extraction of essential oil from medicinal and aromatic plants, using the hydro distillation method. In our case study, we have chosen the Eucalyptus plant.

The system consists of a parabolic dish concentrator with a fixed focus and two heliostats. This configuration offers an efficient solution for remote, off-grid locations and represents a competitive alternative to traditional systems that are energy-intensive and have a negative impact on the environment.

Within the project framework, a thermal and optical study was conducted to characterize and evaluate the performance of the proposed system. This study involved both practical experiments and simulations using the SOLTRACE software to map the flux behavior at the focus.

The experimental results, in terms of thermal power generated and temperature achieved by the system, along with the simulation results regarding flux, confirmed the feasibility and performance of the proposed system. They demonstrated that the system is capable of meeting the specific requirements of the essential oil extraction process.

**Keywords:** Double-reflective solar system, Hydro distillation, Thermal and Optic study, DNI, Essential oils

# REMERCIEMENTS

الحمد لله الذي بنعمته تتم الصالحات

Je remercie tout d'abord, Allah qui m'a donné la force et le courage de terminer mes études et élaborer ce modeste travail.

Ce mémoire est le résultat d'un long travail de recherche, j'adresse mes remerciements à mon professeur et mon encadreur Pr SAID Noureddine vos qui m'a accordé sa confiance et a toujours su se montrer disponible. Je lui exprime également toute ma gratitude pour son écoute, sa sagesse et son appui tout au long de ce travail.

Je remercie également mon Co-promoteur Pr CHEKNANE Benamar.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à mon professeur Mr DOUMAZ Toufik pour tout le matériel fournis et pour tous ses encouragements et son soutien morale, sa disponibilité, sa patience, sa compréhension, et son aide précieuse pour réussir mon projet, rien au monde ne vaut les sacrifices que vous avez fait pour moi tout au long du mémoire, vous étiez comme un père pour moi, que dieu vous protège.

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

Ces remerciements ne peuvent s'achever sans une pensée pour ma famille et mes amis. Vous avez toujours trouvé la bonne recette, au propre comme au figuré, pour m'encourager et me motiver.

Je remercie tous les membres du jury d'examiner ce travail et de l'évaluer.

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

KRAOUAN Racha

## Dédicace

*À tout être humain cherchant une goutte de vérité dans l'océan de la Science.*

*J'adresse ce mémoire de fin d'études.*

*A ma chère mère dont le mérite, les sacrifices et les qualités humaines que ma permet de vivre ce jour. Aucune dédicace ne saurait exprimer mon respect, mon amour éternel et ma considération pour les sacrifices que vous avez consentis pour mon instruction et mon bien être. Je vous remercie pour tout le soutien et l'amour que vous me portez depuis mon enfance et j'espère que votre bénédiction m'accompagne toujours.*

*A ma chère grande mère que dieu la protège et la garde en bonne santé.*

*A mes chères tantes et oncles maternelles pour leur soutien et encouragements durant toute ma vie*

*A tous mes camarades de ma promotion.*

*Merci Infiniment.*

*Racha*

# Sommaire

**NOMENCLATURES :**

**LISTE DES FIGURES :**

**LISTE DES TABLEAUX :**

**INTRODUCTION GENERALE ..... 1**

**CHAPITRE I : ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE..... 5**

I.1. CONTEXTE DE L'ÉTUDE : ..... 6

I.2. PRODUCTION D'HUILES ESSENTIELLES (PROCEDES ET METHODES D'EXTRACTION) : ..... 6

*I.2.1. Extraction par hydro-distillation : ..... 6*

*I.2.2. Extraction par entrainement de vapeur : ..... 7*

*I.2.3. Extraction par expression à froid : ..... 8*

*I.2.4. Extraction par solvants : ..... 8*

*I.2.5. Extraction par enfleurage : ..... 10*

*I.2.6. La macération : ..... 10*

*I.2.7. Extraction par le CO<sub>2</sub> supercritique : ..... 11*

I.3. CLASSIFICATION D'HUILES ESSENTIELLES : ..... 12

I.4. OBJECTIF : ..... 12

I.5. DESCRIPTION DU PROJET : ..... 13

I.6. ETAT DE L'ART : ..... 13

**CHAPITRE II : METHODE DE CARACTERISATION OPTIQUE DU PARABOLOÏDE ET THERMIQUE DU RECEPTEUR..... 18**

II.1 INTRODUCTION : ..... 19

II.2 ÉTUDE DU SYSTEME A CONCENTRATION PONCTUELLE : ..... 19

*II.2.1 Capteurs à concentration ponctuel : ..... 19*

*II.2.1.1. Principe de fonctionnement : ..... 19*

*II.2.1.2. Classification des capteurs à concentration : ..... 20*

*II.2.1.3. Rendement des capteurs à concentration : ..... 21*

*II.2.1.4. Etude géométrique et optique du paraboloïde : ..... 21*

*II.2.1.4.1. Etude géométrique : ..... 21*

*II.2.1.4.2. Etude optique : ..... 24*

*II.2.1.5. Etude géométrique et optique de l'héliostat : ..... 26*

*II.2.1.6. Etude thermique du récepteur : ..... 29*

*II.2.1.6.1. Puissance solaire absorbée par l'ouverture du récepteur : ..... 29*

*II.2.1.6.2. Puissance correspondant aux pertes thermiques : ..... 29*

*II.2.1.6.3. Température au récepteur : ..... 30*

II.3. CONCLUSION : ..... 31

**CHAPITRE III : MATERIELS ET METHODES..... 32**

III.1. INTRODUCTION : ..... 33

III.2. DESCRIPTION DES MATERIELS UTILISES : ..... 33

*III.2.1. Le miroir parabolique: ..... 33*

*III.2.1.1. Description : ..... 33*

*III.2.1.2. Revêtement : ..... 34*

*III.2.2. L'héliostat : ..... 35*

*III.2.3. L'extracteur d'huiles essentielles de 'Clevenger' : ..... 36*

*III.2.3.1. Description : ..... 36*

*III.2.3.2. La plante (eucalyptus): ..... 37*

*III.2.3.3. Procédé d'extraction : ..... 38*

*III.2.4. Equipements de mesure : ..... 40*

*III.2.4.1. Mesure des températures : ..... 40*

*III.2.4.2. Mesure des éclaircissements : ..... 41*

*III.2.4.3 L'acquisition de données : ..... 42*

III.3. CARACTERISATION GEOMETRIQUE DU PARABOLOÏDE (REFLECTEUR) : .....	43
III.4. MESURE DES TEMPERATURES AU FOYER : .....	44
III.5. ÉVALUATION DU FLUX AU FOYER : .....	45
III.6. CONCLUSION : .....	46
<b>CHAPITRE IV : RESULTATS ET DISCUSSIONS .....</b>	<b>48</b>
IV.1 INTRODUCTION : .....	49
IV.2 CARACTERISATION DU PARABOLOÏDE : .....	49
<i>IV.2.1 Mesure des températures au foyer : .....</i>	<i>49</i>
<i>IV.2.2 Variation de la température mesurée et de la température de stagnation calculée : .....</i>	<i>51</i>
<i>IV.2.3. La cartographie de flux au foyer sous SOLTRACE : .....</i>	<i>52</i>
IV.3. CARACTERISATION DU THERMIQUE AU RECEPTEUR DU PARABOLOÏDE/HELISTATS : .....	53
IV.4. CONCLUSION : .....	54
<b>CONCLUSION GÉNÉRALE .....</b>	<b>56</b>
<b>BIBLIOGRAPHIE .....</b>	<b>59</b>
<b>ANNEXES .....</b>	<b>62</b>



## Nomenclatures :

Symboles	description	Unité
$\theta_i$	Angle d'incidence solaire	Degrès
$\Delta_r$	Dispersion du faisceau	m
$\varepsilon$	Taille angulaire du disque solaire	mrad
$\rho$	Réflectivité du miroir	%
$\Gamma$	Facteur d'interception	%
$\eta$	Rendement du capteur à concentration	%
$\sigma_{drive}$	Erreur de poursuite	mrad
$\sigma_{rec}$	Erreur d'alignement du récepteur	mrad
$\sigma_{sun}^2$	Erreur de la taille angulaire du soleil	mrad
$\sigma_{sensor}$	Erreur de mesure	mrad
$\sigma_{slope}$	Erreur de poursuite	mrad
$\tau\alpha$	Produit absorptivité/transmittivité effective	[-]
$\psi$	Angle d'ouverture	Degrès
a	distance par rapport à l'axe z	m
$A_c$	Surface d'ouverture du concentrateur	m <sup>2</sup>
$A_s$	Surface totale du paraboloïde	m <sup>2</sup>
$A_r$	Surface d'ouverture du récepteur	m <sup>2</sup>
C	Coefficient concentration géométrique	[-]
$E_{b,n}$	Eclairement direct normal	W/m <sup>2</sup>
D	Diamètre d'ouverture	m
d	Diamètre du récepteur	m
f	Distance focale	m
$h_c$	Coefficient de transfert par convection	W/m.K
k	Conductivité thermique de l'air	
$U_l$	Coefficient de pertes global	j/kg.K
r	rayon	m
$Q_p$ :	Puissance correspondante aux pertes thermiques totale	W

$Q_{p,conv}$	Puissance de pertes par convection	W
$Q_{p,ray}$	Puissance de Pertes par rayonnement	W
$Q_{p,cond}$	Puissance de Pertes par conduction	W
$Q_u$	Puissance utile	W
$\dot{Q}_u$	Energie utile fournie au récepteur	J
$T_a$	Température ambiante	K
$T_{ciel}$	Température du ciel	K
$T_r$	Température du récepteur	K
Nu	Nombre de nusselt	[-]

## Liste des figures :

<b>FIGURE I.1 :</b> APPAREILLAGE UTILISE POUR L'HYDRO-DISTILLATION DE L'HUILE ESSENTIELLE.....	7
<b>FIGURE I.2 :</b> SCHEMA D'UNE INSTALLATION D'ENTRAINEMENT A LA VAPEUR.....	7
<b>FIGURE I.3 :</b> EXTRACTION PAR EXPRESSION A FROID.....	8
<b>FIGURE I.4 :</b> L'EXTRACTION PAR SOLVANT ASSISTEE PAR MICRO-ONDES.....	9
<b>FIGURE I.5 :</b> SCHEMA SIMPLIFIE D'UN EXTRACTEUR AU CO <sub>2</sub> SUPERCRITIQUE.....	12
<b>FIGURE II.1 :</b> PARABOLOÏDE DE REVOLUTION.....	21
<b>FIGURE II.2 :</b> ELEMENT DE SURFACE DU PARABOLOÏDE.....	22
<b>FIGURE II.3 :</b> SCHEMA DESCRIPTIF DES PARAMETRES DE LA PARABOLE.....	23
<b>FIGURE II.4 :</b> CARACTERISTIQUES DE L'OPTIQUE PARABOLIQUE, (A) POUR DES RAYONS PARALLELES A L'AXE DE SYMETRIE, (B) POUR DES RAYONS A 1° DE L'AXE DE SYMETRIE.....	24
<b>FIGURE II.5 :</b> REFLEXION DE RAYONS NON PARALLELES SUR UN MIROIR PARABOLIQUE.....	25
<b>FIGURE II.6 :</b> COORDONNEES DEFINISSANT LA REFLEXION DES RAYONS DU SOLEIL PAR UN HELIOSTAT SUR UN SEUL POINT DE VISEE. LE VECTEUR H EST LA NORMALE A LA SURFACE REFLECHISSANTE DE L'HELIOSTAT.[.....	27
<b>FIGURE III.1 :</b> RÉFLECTEUR PARABOLOÏDALE UTILISÉ DANS CE MFE.....	33
<b>FIGURE III.2 :</b> REVÊTEMENT DU PARABOLOÏDE.....	35
<b>FIGURE III.3 :</b> L'HÉLIOSTAT UTILISÉ.....	36
<b>FIGURE III.4 :</b> MONTAGE DU CLEVANGER AU Foyer DU CONCENTRATEUR.....	37
<b>FIGURE III.5 :</b> FEUILLE D'EUCALYPTUS UTILISÉE.....	38
<b>FIGURE III.7 :</b> THERMOCOUPLES UTILISÉS.....	40
<b>FIGURE III.8 :</b> MESURE DE LA TEMPÉRATURE AMBIANTE.....	41
<b>FIGURE III.9 :</b> PYRANOMETRES UTILISE POUR LA MESURE DES ÉCLAIREMENTS : GLOBAL HORIZONTAL ET DIFFUS.....	42
<b>FIGURE III.10 :</b> SYSTÈME D'ACQUISITION DE DONNÉES.....	42
<b>FIGURE III.11 :</b> CÂBLE DE CONNEXION RS 232.....	42
<b>FIGURE III.12 :</b> REPÉRAGE MANUEL DU Foyer.....	43
<b>FIGURE III.13 :</b> PLAQUE SERVANT À LA MESURE DE LA TEMPÉRATURE AU Foyer.....	44
<b>FIGURE III.14 :</b> INTERFACE DU LOGICIEL SOLTRACE.....	46
<b>FIGURE IV.1 :</b> LA DISTRIBUTION DE LA TEMPÉRATURE POUR LES QUATRES POINTS DIFFÉRENTS AU Foyer PAR RAPPORT À LA DISTANCE RADIALE (DNI <sub>MOY</sub> DE 850 ET 900 W/m <sup>2</sup> ).....	49
<b>FIGURE IV.2 :</b> LA VARIATION DES TEMPÉRATURES AU Foyer ET L'ÉCLAIREMENT DIRECT NORMAL EN FONCTION DU TEMPS SOLAIRE VRAI.....	50
<b>FIGURE IV.3 :</b> LA VARIATION DE LA TEMPERATURE DE STAGNATION CALCULEE ET LA TEMPERATURE MESUREE PAR RAPPORT UN DNI <sub>MOY</sub> DE 850 ET 900 W/m <sup>2</sup> .....	51
<b>FIGURE IV.4 :</b> DISTRIBUTION DU FLUX AU Foyer DU PARABOLOÏDE POUR DNI=850 W/m <sup>2</sup> .....	52
<b>FIGURE IV.5 :</b> DISTRIBUTION DU FLUX AU Foyer DU PARABOLOÏDE POUR DNI=900 W/m <sup>2</sup> .....	52
<b>FIGURE IV.6 :</b> LA VARIATION DE LA PUISSANCE ABSORBEE AU RECEPTEUR ET CELLE UTILE EN FONCTION DE DNI.....	54

## **Liste des tableaux :**

<b>TABLEAU III.1 : PARAMÈTRES DU RÉFLECTEUR.....</b>	<b>43</b>
<b>TABLEAU IV.1 : RESULTATS DE CARACTERISATION DU SYSTEME SOLAIRE GLOBAL.....</b>	<b>53</b>

# **Introduction Générale**

L'extraction d'huile essentielle est une pratique qui remonte à l'Antiquité, où elle était réalisée à l'aide de techniques simple telles que la distillation par entraînement à la vapeur d'eau. Au fil du temps, des méthodes plus avancées ont été développées, notamment l'extraction par solvants chimiques et l'utilisation des micro-ondes.

Cependant, ces méthodes traditionnelles présentent certaines limites. L'extraction par solvants chimiques peut entraîner des résidus indésirables dans les huiles essentielles, altérant leur qualité et leur pureté. De plus, elles sont souvent énergivores et peuvent avoir un impact néfaste sur l'environnement en raison de la manipulation de produits chimiques potentiellement dangereux.

C'est dans ce contexte que l'extraction d'huile essentielle par l'énergie solaire et notamment la concentration solaire a gagné en popularité. En utilisant l'énergie solaire comme source de chaleur, cette méthode offre une alternative durable et respectueuse de l'environnement. L'énergie solaire est une ressource renouvelable et abondante, ce qui en fait une solution attrayante pour réduire l'empreinte écologique de l'extraction d'huile essentielle.

La conception du concentrateur solaire de type paraboloïde permet de concentrer les rayons solaires sur un point focal précis, générant ainsi une chaleur intense qui facilite l'extraction des huiles essentielles. Ce procédé peut être utilisé pour extraire les huiles essentielles de diverses plantes aromatiques telles que la lavande, le romarin, la menthe, la camomille et bien d'autres.

L'extraction d'huile essentielle par concentration solaire présente également un intérêt croissant dans le domaine de la recherche et du développement de nouvelles méthodes d'extraction respectueuses de l'environnement. Les chercheurs explorent les possibilités d'optimisation des performances des concentrateurs solaires, de la gestion de la chaleur et de l'efficacité du processus d'extraction.

Dans un contexte plus large, cette méthode s'inscrit dans une tendance plus générale de recherche de solutions durables et écologiques dans de nombreux secteurs industriels. L'industrie de l'aromathérapie, de la cosmétique et de la pharmacie, entre autres, est de plus en plus soucieuse de l'origine et de la qualité des ingrédients utilisés, et l'extraction d'huile essentielle par concentration solaire offre une réponse à ces préoccupations.

***Intérêt*** :L'étude de l'extraction d'huile essentielle par concentration solaire présente plusieurs intérêts significatifs. Voici quelques points clés qui mettent en évidence l'importance de cette étude :

- ✓ Durabilité environnementale : L'extraction d'huile essentielle par concentration solaire offre une approche respectueuse de l'environnement en utilisant une source d'énergie renouvelable et en réduisant l'utilisation de solvants chimiques. Comprendre et promouvoir cette méthode permet de contribuer à la préservation des ressources naturelles et à la réduction des impacts environnementaux associés à l'extraction d'huile essentielle.
- ✓ Valorisation des ressources : L'étude de l'extraction d'huile essentielle par concentration solaire permet d'explorer de nouvelles façons de valoriser les plantes aromatiques. Les huiles essentielles obtenues par cette méthode peuvent être utilisées dans de nombreux domaines, tels que l'industrie pharmaceutique, la cosmétique, l'aromathérapie et la fabrication de parfums. Comprendre les avantages, les rendements et les propriétés des huiles essentielles extraites par concentration solaire ouvre des opportunités pour développer de nouveaux produits et marchés.
- ✓ Amélioration des méthodes d'extraction : L'étude de l'extraction d'huile essentielle par concentration solaire permet de perfectionner et d'optimiser les techniques d'extraction. En analysant les paramètres clés tels que la conception des concentrateurs solaires, les températures de chauffage, les durées d'extraction, etc., les chercheurs peuvent identifier les meilleures pratiques pour obtenir des rendements élevés et des huiles essentielles de qualité supérieure. Cela peut conduire à des améliorations significatives dans l'efficacité et la rentabilité du processus d'extraction.
- ✓ Applications industrielles et commerciales : L'étude de l'extraction d'huile essentielle par concentration solaire permet de déterminer les applications potentielles de cette méthode dans diverses industries. Les entreprises du secteur de l'aromathérapie, de la cosmétique et de la pharmacie, par exemple, peuvent bénéficier de cette approche durable pour obtenir des ingrédients naturels de haute qualité. Comprendre les possibilités et les limites de l'extraction d'huile essentielle par concentration solaire peut encourager l'adoption de cette méthode à plus grande échelle.
- ✓ Développement durable : L'étude de l'extraction d'huile essentielle par concentration solaire s'inscrit dans une perspective plus large de développement

durable. En favorisant des méthodes d'extraction respectueuses de l'environnement et économiquement viables, cette approche contribue à la promotion d'une production responsable et éthique. Cela répond également aux attentes croissantes des consommateurs pour des produits naturels, de qualité et durables.

- ✓ pour répondre à une demande élevée ou à une production commerciale à grande échelle.
- ✓ préservation de l'environnement et attirer l'intérêt des marchés internationaux soucieux de durabilité.
- ✓ Création d'emplois et développement local : Le développement de la filière d'extraction d'huile essentielle par concentration solaire en Algérie peut avoir un impact économique positif en créant des emplois dans les zones rurales où se trouvent souvent les plantes aromatiques. Cela peut contribuer au développement local et à l'amélioration des conditions de vie des populations locales.

### ***Structure de mon mémoire de fin d'étude :***

Le présent projet a pour objectif global de développer et de mettre en œuvre un système de distillation solaire décentralisé pour la transformation des plantes médicinales et aromatiques en huiles essentielles. Pour cela, nous avons retenu un système à double réflexion, composé d'un miroir primaire de type paraboloïde et d'un réflecteur secondaire de type héliostat, afin de fournir une température et une puissance adéquates à l'extracteur d'huile essentielle, le Clevenger.

Ce travail se concentre sur la réalisation et la caractérisation du concentrateur solaire parabolique, ainsi que sur l'estimation théorique et expérimentale des températures et des puissances au niveau du récepteur. Ces estimations sont ensuite comparées aux résultats expérimentaux obtenus lors des essais. Le mémoire est structuré en quatre chapitres, en plus d'une introduction générale et d'une conclusion.

Le premier chapitre présente un état de l'art de la production des huiles essentielles par voie solaire, mettant en évidence les différentes méthodes et technologies utilisées dans ce domaine.

Dans le deuxième chapitre, nous nous concentrons sur l'évaluation des performances géométriques et optiques des réflecteurs, ainsi que sur la caractérisation thermique du récepteur. Cela comprend l'évaluation des flux de chaleur, des températures et des puissances générées par le système.



Le chapitre trois est dédié à l'étude expérimentale menée sur le prototype développé. Nous décrivons les procédures expérimentales mises en place et présentons les résultats obtenus lors des tests réalisés.

Enfin, dans le quatrième chapitre, nous discutons des résultats théoriques et expérimentaux, en analysant les performances du système de distillation solaire. Nous examinons les écarts éventuels entre les estimations théoriques et les résultats réels, en identifiant les facteurs qui peuvent influencer ces variations.

# **CHAPITRE I**

## **Étude Bibliographique**

## **I.1. Contexte de l'étude :**

Les huiles essentielles ont occupé et ils occupent toujours une place importante dans la vie quotidienne des hommes qui les utilisaient pour se soigner, se parfumer et même pour aromatiser la nourriture.

L'Algérie, de par sa position géographique, sa végétation, son climat, son relief et sa structure, abrite une importante richesse en plantes aromatiques et médicinales.

Vu la demande mondiale et surtout national des huiles essentielles ces dernières années, plusieurs travaux sont réalisés dans ce sens dans divers secteurs économiques, comme l'industrie de la parfumerie et de la cosmétique, l'industrie alimentaire, pharmaceutique et plus particulièrement dans la branche de l'aromathérapie, et en parallèle plusieurs méthodes basées sur le fossile ont été développées pour l'extraction, mais jusqu'à quand ? Surtout avec l'épuisement de ces ressources non-renouvelables et polluantes.

Le meilleur alternatif durable et non polluant est certainement le solaire.

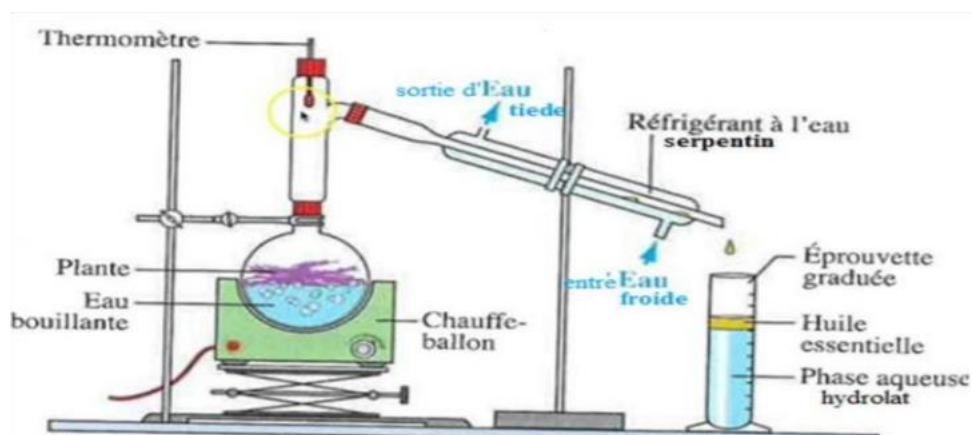
## **I.2. Production d'huiles essentielles (procédés et méthodes d'extraction) :**

Il y'a plusieurs méthodes qui permettent l'obtention d'huiles essentielles :

### ***I.2.1. Extraction par hydro-distillation :***

Le principe de l'hydro-distillation correspond à une distillation hétérogène. Le procédé consiste à immerger la matière première végétale directement dans l'eau à l'intérieur d'un récipient (l'alambic), ensuite l'ensemble bout généralement à pression atmosphérique. Le système comprend un récipient, une source de chaleur (une chaudière) qui permette l'éclatement et la libération des molécules aromatiques contenues dans les cellules végétales, un condenseur pour convertir la vapeur en liquide et un décanteur pour recueillir le condensat et séparer les huiles essentielles de l'eau.

La durée de distillation avec cette méthode est variable, elle peut prendre plusieurs heures selon le matériel utilisé et la matière végétale à traiter, tels que la durée de la distillation influe sur le rendement mais aussi sur la composition de l'huile extrait. [1]

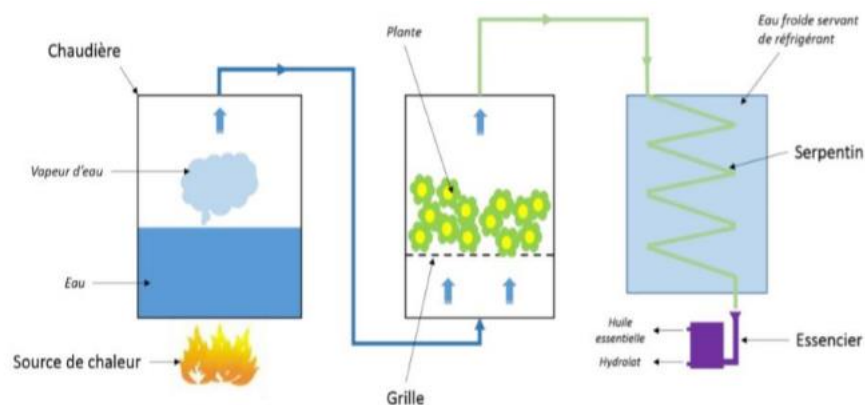


**Figure I.1 :** Appareillage utilisé pour l'hydro-distillation de l'huile essentielle [2]

### *1.2.2. Extraction par entrainement de vapeur :*

C'est l'un des procédés d'extractions les plus anciens, à la différence de l'hydro-distillation, cette méthode ne met pas en contact l'eau et la matière végétale à traiter qui est située au-dessus d'une grille. L'absence de contact direct entre l'eau et la matière végétale, évite certains phénomènes de dégradation pouvant porter atteinte à la qualité de l'huile.

Le plus souvent, une demi-heure permet d'extraire 95 % des molécules volatiles aromatiques, ce qui suffit aux besoins de l'industrie de la parfumerie. [3]



**Figure I.2 :** Schéma d'une installation d'entrainement à la vapeur [4]

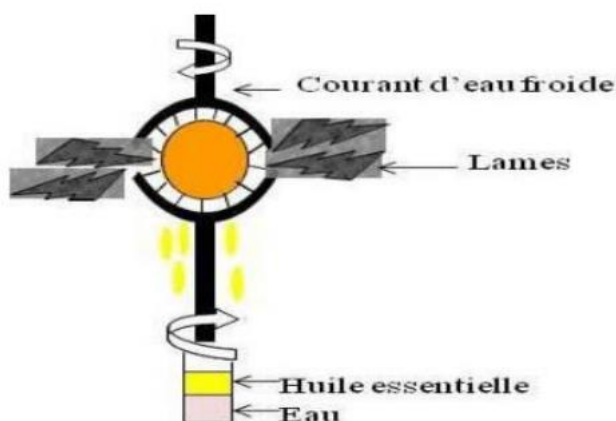
### ***1.2.3. Extraction par expression à froid :***

La méthode d'expression, également connue sous le nom de pressage à froid ou d'extraction mécanique, est une méthode simple utilisée pour extraire les huiles essentielles de l'écorce des agrumes tels les oranges, les citrons et les pamplemousses. Cette méthode est utilisée pour les agrumes car leurs huiles essentielles sont stockées dans les glandes de la peau du fruit plutôt que dans les tissus de la plante.

Dans cette méthode, l'agrumes est d'abord lavée pour éliminer toute saleté ou résidu, puis l'écorce est râpée ou tranchée mécaniquement pour libérer les huiles essentielles. Les gouttelettes contenant l'huile essentielle sont ensuite recueillies et séparées du jus et de la pulpe par centrifugation ou par d'autres méthodes.

La durée de cette méthode dépendra de plusieurs facteurs, tels que le type de plante, la quantité de matière première, la qualité des équipements utilisés et la force appliquée lors de l'expression.

En général, l'extraction par expression à froid est un processus relativement rapide, qui peut durer de quelques minutes à quelques heures en fonction de ces facteurs. [3] [5]



**Figure I.3 :** extraction par expression à froid [6]

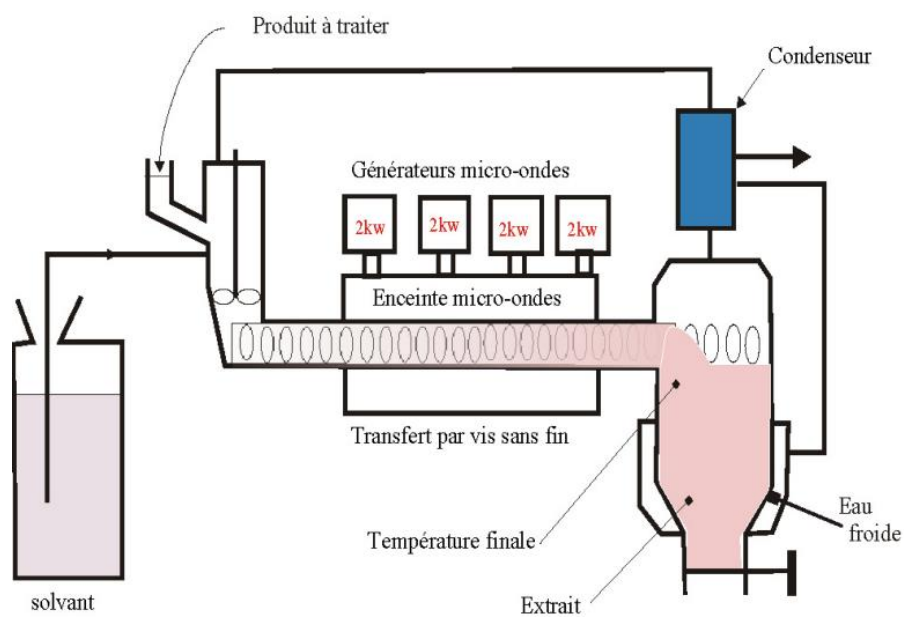
### ***1.2.4. Extraction par solvants :***

L'extraction par solvant est une méthode permettant d'extraire les huiles essentielles du matériel végétal à l'aide d'un solvant tel que l'éthanol, l'hexane ou l'éther. Cette méthode est particulièrement utile pour extraire les huiles essentielles des plantes qui sont difficiles à extraire par d'autres méthodes, ou lorsqu'un rendement élevé d'huile essentielle est souhaité.

Le processus d'extraction par solvant consiste généralement à broyer ou écraser le matériel végétal, puis à le mélanger à un solvant dans un récipient. Le mélange est ensuite remué ou agité pour permettre au solvant de dissoudre l'huile essentielle de la plante. Le mélange obtenu, appelé extrait, est ensuite séparé du matériel végétal et le solvant est évaporé pour laisser l'huile essentielle.

L'un des avantages de l'extraction par solvant est qu'elle permet d'extraire une large gamme d'huiles essentielles à partir de différents types de végétaux. Cependant, elle peut également présenter certains inconvénients. Par exemple, l'utilisation de solvants peut entraîner l'extraction de composés indésirables susceptibles d'affecter la pureté et la qualité de l'huile essentielle. En outre, le processus peut prendre du temps et nécessiter un équipement spécialisé pour garantir la sécurité et la manipulation correcte des solvants.

Il est important de noter que l'utilisation de solvants dans l'extraction d'huiles essentielles est un sujet controversé dans les communautés de l'aromathérapie et de la santé naturelle. Certaines personnes préfèrent utiliser des méthodes telles que la distillation à la vapeur ou la pression à froid, qui n'impliquent pas l'utilisation de solvants et peuvent être considérées comme plus naturelles ou plus respectueuses de l'environnement. [3]



**Figure I.4 :** L'extraction par solvant assistée par micro-ondes [7]

### ***1.2.5. Extraction par enfleurage :***

L'enfleurage est une méthode ancienne et rare d'extraction d'huiles essentielles, généralement utilisée pour extraire les huiles parfumées de fleurs délicates, comme le jasmin ou la tubéreuse, qui ne libèrent pas facilement leurs fragrances avec d'autres méthodes d'extraction.

La méthode d'extraction par enfleurage consiste à placer le matériel végétal, comme les pétales de fleurs, sur une couche de graisse ou d'huile inodore, généralement étalée sur une plaque de verre. Le matériel végétal est ensuite laissé en contact avec la graisse ou l'huile pendant un certain temps, généralement plusieurs jours, au cours duquel les molécules odorantes des fleurs se diffusent dans la graisse ou l'huile.

Lorsque le matériel végétal a été en contact avec la graisse ou l'huile pendant une période suffisante, il est retiré et remplacé par du matériel végétal frais, et le processus est répété jusqu'à ce que la graisse ou l'huile soit saturée de molécules odorantes. La graisse ou l'huile, appelée pommade, est ensuite lavée à l'alcool pour dissoudre les molécules odorantes, qui sont ensuite recueillies par un processus appelé "teinture" pour créer l'huile essentielle d'enfleurage.

L'un des avantages de la méthode de l'enfleurage est qu'elle permet d'extraire les parfums de fleurs délicates qui pourraient être endommagées ou altérées par d'autres méthodes d'extraction. Cependant, cette méthode est également exigeante en main-d'œuvre, longue et coûteuse, ce qui l'a largement remplacée par d'autres méthodes d'extraction telles que la distillation à la vapeur d'eau et l'extraction par solvant.

Il est également important de noter que l'utilisation de graisses animales, telles que le saindoux ou le suif, était traditionnellement utilisée pour le processus d'enfleurage. Toutefois, les graisses ou huiles végétales sont désormais couramment utilisées dans les méthodes modernes d'extraction par enfleurage. [3] [5]

### ***1.2.6. La macération :***

C'est une méthode d'extraction utilisée pour obtenir des huiles essentielles, des arômes et des substances actives à partir de plantes. Elle est souvent utilisée pour extraire les huiles essentielles de plantes fragiles qui ne supportent pas la chaleur et la pression de la distillation à la vapeur d'eau.

Le processus de macération consiste à tremper le matériel végétal dans un solvant liquide tel que l'huile d'olive, l'huile de tournesol, l'alcool ou l'eau, afin d'extraire les composés actifs de la plante. Les plantes sont placées dans le solvant et laissées à macérer pendant

une période déterminée, généralement plusieurs jours ou plusieurs semaines. Au fil du temps, les composés actifs des plantes se dissolvent dans le solvant, créant une solution riche en arômes et en huiles essentielles.

Une fois la macération terminée, la solution est filtrée pour éliminer tout résidu végétal, laissant une solution claire contenant les composés actifs extraits. Cette solution peut alors être utilisée telle quelle ou concentrée par évaporation du solvant pour obtenir une huile essentielle plus pure. [5]

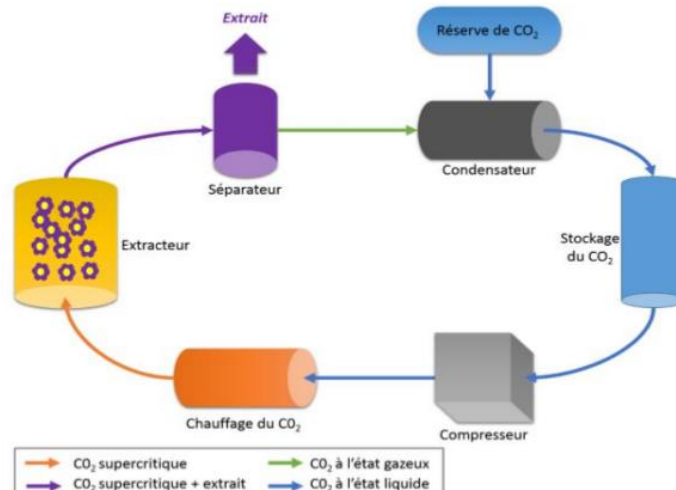
### ***1.2.7. Extraction par le CO<sub>2</sub> supercritique :***

Elle est également connue sous le nom d'extraction par fluide supercritique, est une méthode moderne et efficace utilisée pour extraire les huiles essentielles, les arômes et d'autres composés actifs des matières végétales. Il s'agit d'un processus non toxique et respectueux de l'environnement qui implique l'utilisation de dioxyde de carbone supercritique, c'est-à-dire du dioxyde de carbone pressurisé et chauffé jusqu'à ce qu'il atteigne un état entre le gaz et le liquide.

Le processus consiste à placer le matériel végétal dans un récipient d'extraction scellé et à l'exposer au dioxyde de carbone supercritique, qui agit comme un solvant et dissout les composés actifs de la plante. Le dioxyde de carbone supercritique pénètre dans le matériel végétal et extrait les composés souhaités sans les endommager ni les modifier. L'extrait obtenu est ensuite recueilli et la pression est relâchée, ce qui permet au dioxyde de carbone de retourner à l'état gazeux et de laisser derrière lui une huile ou un extrait essentiel pur et de haute qualité.

L'un des avantages de l'extraction au dioxyde de carbone est qu'elle permet un contrôle précis de la température, de la pression et du débit du solvant, ce qui se traduit par un processus d'extraction plus ciblé et plus efficace. En outre, le dioxyde de carbone est ininflammable, non toxique et ne laisse pas de solvants résiduels dans l'extrait. [5]





**Figure I.5 :** Schéma simplifié d'un extracteur au CO<sub>2</sub> supercritique [4]

### I.3. Classification d'huiles essentielles : [5]

Selon l'utilisation finale des huiles, on distingue :

- Les huiles officinales : ce sont des huiles essentielles extraites de plantes médicinales et aromatiques, qui sont utilisées en médecine pour leurs propriétés thérapeutiques. Elles sont considérées comme des remèdes naturels pour traiter différentes maladies et troubles de santé.
- Les huiles cosmétiques : elles sont utilisées dans les produits de soins de la peau et des cheveux pour leurs propriétés hydratantes, tonifiantes, antioxydantes et apaisantes.
- Les huiles alimentaires : ou agro-alimentaires sont utilisées dans l'industrie alimentaire pour leurs propriétés aromatiques et leur capacité à améliorer la saveur et l'arôme des aliments.
- Les huiles industrielles : ce sont des huiles de qualité moindre utilisées par différents secteurs (peinture lubrifiants, détergents, biocarburants). Elles sont le plus souvent obtenues par extraction par solvant (hexane)

### I.4. Objectif :

Notre objectif est de développer et réaliser un système de distillation solaire décentralisé à base d'un système à concentration de type paraboloïde, pour la production d'huile essentielle des plantes médicinales et aromatiques.

### **I.5. Description du projet :**

On utilise une configuration basée sur la double réflexion en couplant un paraboloïde fixe et un héliostat mobile pour qui suit la trajectoire du soleil. Ce choix est dicté par des contraintes techniques relatives au type d'équipement installé au niveau du récepteur (Clevenger).

### **I.6. Etat de l'art :**

On présente dans cette partie, un résumé des principales réalisations de production d'huile essentielle par voies solaires concentrées. Nous les avons classées par type de concentrateur pour des raisons de clarté.

#### **Concentrateur Scheffler :**

En 2007, Anjum Munir et Oliver Hensel [8] ont utilisé un concentrateur Scheffler à focale fixe pour l'extraction de 400 grammes de cumin pour 10 litres d'eau. Le concentrateur Scheffler se compose d'un réflecteur primaire et d'un réflecteur secondaire. Le réflecteur primaire a une surface d'ouverture de 8 m<sup>2</sup> et le réflecteur secondaire ayant une surface de 0,434 m<sup>2</sup>. Le concentrateur est doté d'une monture polaire pour le système de poursuite.

Les résultats obtenus sont :

- Extraction d'une quantité d'huile de 4.06 ml en 2h10min, l'extraction a commencé à 15 :32 h et terminé à 17 :42 h avec une consommation totale d'énergie de 3.01 kWh. Pour un éclairage direct moyen de 660 W/m<sup>2</sup>.
- L'efficacité du système pendant le processus de distillation était de 26.75 %.

Les résultats montrent que le processus complet de distillation pour l'extraction des huiles essentielles peut être réalisé avec succès en utilisant le concentrateur Scheffler à foyer fixe sans utiliser d'énergie auxiliaire. Cependant, l'extraction était comparativement faible, ce qui suggère une petite modification de l'unité de distillation existante.

En 2009, Anjum Munir , Oliver Hensel ; (Witzenhausen (Allemagne) ) [9] ont utilisé l'énergie solaire comme source de chaleur primaire (en utilisant un concentrateur Scheffler à focale fixe) et un appoint.

Le degré de fiabilité souhaité du processus solaire pour répondre à une charge particulière peut être fourni par une source d'énergie auxiliaire. En gardant tous ces faits à l'esprit, le système solaire existant est connecté à l'énergie de la biomasse pour assurer le processus de distillation en plein temps.

Les résultats obtenus donnent une quantité moyenne d'huile extraite de 21,46 ml pour 10 kg de menthe avec une erreur standard de 0,375. Afin de récupérer l'énergie du système de distillation solaire hybride, l'eau de sortie du condenseur est réutilisée pour maintenir le niveau dans l'alambic du distillateur et pour recharger de nouveaux lots. La température de l'eau atteignable est d'environ 85°C et est recyclée au besoin. De cette manière, une génération de vapeur rapide est lancée, ce qui consomme moins de temps et d'énergie pendant le traitement. Les résultats révèlent que la biomasse peut être utilisée avec succès dans le système de distillation solaire.

En 2010, M.A. Munir, M.O. Hensel [10] ont intégré un alambic en acier inoxydable avec un concentrateur Scheffler à focale fixe (d'un réflecteur primaire de 8 m<sup>2</sup> de surface) installé à Witzenhausen, Allemagne à une altitude de 51.3°, le dispositif a donné des résultats satisfaisants en termes d'efficacité du système et d'extraction des huiles essentielles.

Les résultats montrent que :

- Le flux solaire est uniformément réparti sur tout le fond de l'unité de distillation.
- Pour une plage d'éclairement de 700 à 800 W/m<sup>2</sup>, les températures enregistrées au récepteur sont comprises entre 300 et 400 °C.
- Les valeurs de puissance de sortie et d'efficacité du système sont de 1.55 kW et 33.21 %, respectivement avec un éclairement solaire direct moyen de 863 W/m<sup>2</sup>.
- Les pertes d'énergie du récipient ont été réduites de 722 à 398 W dans les conditions de fonctionnement du système de distillation.
- La mélisse, la menthe poivrée, les graines de fenouil, le romarin, le cumin et les bourgeons de clous de girofle, etc., ont été traités avec succès en utilisant la distillation solaire
- Pendant les jours ensoleillés, 40 à 50 kg de matière peuvent être distillées.

#### **CPCs (Concentrateurs paraboliques composés) :**

En 2016, M.Yunus Kültürelä , M.Sefa Tarhan [11] ont utilisé une unité solaire CPC qui comprend sept capteurs solaires paraboliques composés ayant une surface d'ouverture de 3.4 m<sup>2</sup> et un rapport de concentration de 1.9. L'unité de distillation a été dimensionnée pour distiller 5 kg de matière végétale par lot. 5 kg de vapeur d'eau ont été passés à travers un tas de plantes de 5 kg.

Une résistance électrique a été placée au fond du réservoir de distillation pour compléter le processus de distillation en cas d'approvisionnement insuffisant en énergie solaire.

Les résultats obtenus sont :

L'efficacité thermique globale des CPC solaires variait de 27.9 % à 34.3 %.

Le système de distillation a pu distiller 5 kg de menthe poivrée en évaporant 5 kg d'eau de distillation sans avoir besoin de chauffage électrique et aucun problème n'a été observé pendant le processus de distillation.

### **Paraboloïde :**

En 2020, M. Mona N. Radwan, M.M. Morad, M.M. Ali, Kamal I. Wasfy [12] ont développé un système solaire d'extraction de l'huile de lavande en raison de son usage important dans différents domaines, l'étude a été menée pour trouver un système solaire simple à partir de matériaux locaux (Égypte) à faible coût pouvant être utilisé facilement pour le processus d'extraction.

Ils se sont basés sur deux critères :

- Le premier : étudier certains paramètres de fonctionnement différents affectant les performances du système de distillation à la vapeur solaire.
- Le deuxième : comparer la qualité finale de l'huile de lavande obtenue par le système de distillation à la vapeur solaire construit avec les normes de consignes de qualité.

La parabole utilisée est en aluminium avec un diamètre d'ouverture de 1,7 m et une surface de 2,5 m<sup>2</sup> et un mécanisme de suivi manuel en coordonnées altazimutales. Les résultats expérimentaux obtenus ont révélé que la productivité du système est de 7.3 ml, l'efficacité du système est de 60.25 %, l'efficacité d'extraction est de 98.13 % et le rendement en huile essentielle est de 78.5 % dans des conditions optimales de : 1.25 l/h débit d'eau et une taille de lot de 800 g.

Le système de distillation à la vapeur solaire a nécessité deux heures pour extraire l'huile d'un lot de 400 g, alors qu'il a fallu environ trois et quatre heures pour extraire l'huile d'un lot de 600 et 800 g, respectivement. Les résultats montrent que l'efficacité d'extraction élevée et accompagnée d'une qualité de produit élevée.

### **Cylindro-parabolique :**

En 2022, M.K. E. Manyako, M.Idan Chiyanzu, M.Jean Mulopo, et M.Jibril Abdulsalam (Afrique du Sud) [13] ont évalué à l'échelle pilote la technologie thermique solaire à concentration pour l'extraction d'huiles essentielles et l'ont comparée avec les sources de

chauffage conventionnelles pour une utilisation dans des applications industrielles agro-industrielles, donc ils ont utilisé une configuration expérimentale qui se compose d'un PTC (parabolic trough collector) de 6 m de long avec une réflexion spéculaire de plus de 92% et une ouverture de 2.55 m, d'un système de suivi à axe unique, d'un échangeur de chaleur à plaques (PHE) et d'un pot de distillation à la vapeur. Le système alimenté par PTC a été construit et testé pour extraire l'huile essentielle des écorces d'agrumes (tels que l'orange, le citron et la mandarine).

Le PTC a atteint une efficacité globale significative du système de 54.99 %, soit 15.41% de moins que l'utilisation en fossile qui peut atteindre 70.4%.

### **Couplage de trois Systèmes de concentration :**

En 2023, M.Viplav Hari Pise, M.Bhaskar N. Thorat [14] ont réalisé une étude technico-économique pour déterminer les besoins en vapeur de 250 kg par lot de feuilles de bétel extraites et la quantification des besoins énergétiques pour le processus d'extraction en adoptant une source d'énergie durable et propre. Ainsi une optimisation opto-géométrique et un calcul de surface des capteurs solaires à concentration (CSC) sont effectués. La conception est constituée de trois concentrateurs, à savoir, un réflecteur de Fresnel linéaire (LFR), un collecteur paraboloidal (PDC) et un collecteur à cylindro-parabolique (PTC) de 78 m<sup>2</sup>, 122 m<sup>2</sup> et 138.87 m<sup>2</sup> de surface respectivement, pour répondre aux besoins.

L'adoption des technologies CSC pour la production de vapeur et le remplacement de la technologie courante nécessite une analyse détaillée et une comparaison technico-économique. Ce document se concentre également sur l'analyse coûts-avantages, en tenant compte du CAPEX (correspond aux dépenses d'investissement), de l'OPEX (correspond aux dépenses d'exploitation), de la durée de vie, du retour sur investissement, du coût actualisé de l'énergie (vapeur) et de l'indice de rentabilité de la valeur actuelle nette, du taux de rendement interne pour vérifier la faisabilité économique des énergies renouvelables dans ces applications.

L'analyse indique que le coût associé à la production de vapeur unitaire pour LFR, PDC, PTC et les générateurs de vapeur à base de gaz sont respectivement de 6.704 \$/ton, 11.833 \$/ton, 8.620 \$/ton et 47.486 \$/ton, ce qui indique que le coût de production de vapeur par tonne à l'aide de la technologie solaire est inférieur à celui de la vapeur produite à l'aide de gaz.

En adoptant cette technologie durable pour l'extraction de l'huile de feuille de bétel, même si le coût initial semble élevé, mais la période de récupération (le retour sous-

investissement) du LFR, PDC et PTC contre générateur de vapeur à gaz, était de 0,76, 2,17, 1,14 et 1,02 ans, respectivement.

Sur la base de cette étude, les CSC peuvent fournir une solution verte durable pour l'extraction des huiles essentielles.

## **CHAPITRE II**

### **Méthode de Caractérisation optique du parabololoïde et thermique du récepteur**

## **II.1 Introduction :**

Dans ce chapitre, nous allons examiner en détail les caractéristiques théoriques du dispositif utilisé pour extraire l'huile essentielle par le biais d'une concentration solaire. L'approche analytique proposée consiste à séparer la partie solaire de la machine d'extraction. Nous commencerons donc par analyser les performances optiques et géométriques du système de concentration. Ensuite, nous étudierons le récepteur ou sera placé l'extracteur sélectionné. En combinant ces deux sous-systèmes, nous pourrions évaluer les performances globales du système étudié. Ainsi, notre objectif dans cette section est de formuler les équations régissant les différents phénomènes impliqués et de prendre en compte les spécificités de l'extracteur en termes de puissance et de température. L'extracteur est de type **Clevenger** nécessitant une puissance de 500 Watts et une température supérieure à 200 °C.

## **II.2 Étude du système à concentration ponctuelle :**

Le système de concentration utilisé dans notre configuration est constitué d'un miroir parabolique qui reçoit le rayonnement solaire via deux héliostats orientés vers le soleil. Cette configuration a été choisie en raison des contraintes de sécurité liées à l'utilisation de l'extracteur en verre pyrex (Clevenger) s'inspire du four solaire de Mont Louis développé par le Professeur Félix Trombe en 1947 [15]. D'une puissance thermique d'environ 1,5 kW sous un éclairage direct de 1000 W/m<sup>2</sup>, le système optique comprend un concentrateur parabolique fixe de 1,77 m<sup>2</sup>, tapissé par des facettes en film hautement réfléchissant, qui concentrent 885 fois les rayons du Soleil. Ce qui permet d'obtenir des températures très élevées, sur une surface réduite à 20 cm<sup>2</sup>. Le concentrateur étant orienté vers le Nord, il est insolé par deux miroirs orienteurs d'environ 2 m<sup>2</sup>, appelé Héliostats. Les Héliostats, couverts par des réflecteurs plans, suit automatiquement la course du Soleil, et renvoie en permanence ses rayons dans l'axe focal du concentrateur.

### ***II.2.1 Capteurs à concentration ponctuel :***

#### ***II.2.1.1. Principe de fonctionnement : [16]***

Les capteurs à concentration comme tout capteur thermique est un dispositif destiné à absorber le rayonnement solaire et à transmettre la chaleur ainsi produite à un fluide caloporteur. Dans ces systèmes à concentration, le rayonnement solaire est reçu par une



surface d'ouverture et dirigé vers un absorbeur de surface plus petite grâce à une ou plusieurs réflexions, ou à des réfractions. Comparativement aux capteurs plans, les capteurs à concentration présentent de nombreux avantages :

- Des températures opérationnelles élevées (de 300°C à 2000°C)
- Des rendements plus élevés
- Une réduction de la surface de l'absorbeur limitant les pertes par convection

Ils présentent aussi des inconvénients :

- Ces capteurs ne concentrent que le rayonnement direct
- Ils nécessitent un système de suivi.

### ***II.2.1.2. Classification des capteurs à concentration : [16]***

Il existe plusieurs types de concentrateurs et ils continuent de susciter l'intérêt des chercheurs. Plusieurs critères peuvent être utilisés pour distinguer les différents concentrateurs :

- Les caractéristiques optiques permettent de différencier les systèmes imageants et les systèmes non imageants. Les concentrateurs imageants peuvent être linéaires ou ponctuels.
- Le rapport de concentration  $C$  détermine les températures opératoires. On peut distinguer :
  - Les faibles concentrations ( $1 < C < 10$  ;  $T < 150^\circ\text{C}$ )
  - Les moyennes concentrations ( $10 < C < 100$  ;  $T < 300^\circ\text{C}$ )
  - Les fortes concentrations ( $C > 100$  ;  $T > 500^\circ\text{C}$ )
- Les caractéristiques géométriques. Nous distinguons :
  - Les systèmes à deux dimensions
  - Les systèmes à trois dimensions
- Les modes de pointage. Les concentrateurs peuvent être :
  - Fixes ou périodiquement orientés
  - Mobiles autour d'un axe
  - Mobiles autour de deux axes
- Les positions relatives de l'absorbeur et du concentrateur selon que l'un est mobile par rapport à l'autre ou que les deux sont solidaires

**II.2.1.3. Rendement des capteurs à concentration : [16]**

D'une manière générale, le rendement d'un capteur à concentration est donné par :

$$\eta = \frac{\dot{Q}_u}{E_{b,n} \cos \theta \rho A_c \Gamma} \quad (\text{II.1})$$

**II.2.1.4. Etude géométrique et optique du paraboloïde :**

**II.2.1.4.1. Etude géométrique :**

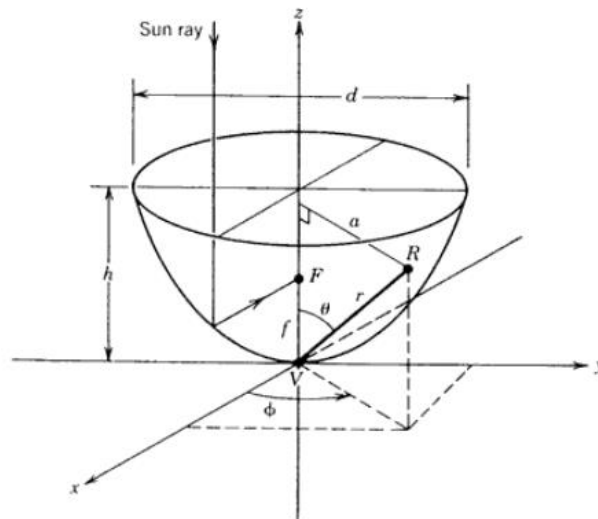
La surface formée par la rotation d'une courbe parabolique autour de son axe est appelée paraboloïde de révolution. Les concentrateurs solaires ayant une surface réfléchissante de cette forme sont souvent appelés concentrateurs paraboliques. L'équation du paraboloïde de révolution illustré à la figure II.1, en coordonnées rectangulaires avec l'axe z comme axe de symétrie, est la suivante : [17]

$$x^2 + y^2 = 4fz \quad (\text{II.2})$$

Où la distance f est la distance focale.

En coordonnées cylindriques, avec a est la distance par rapport à l'axe z, l'équation (II.2) devient :

$$z = \frac{a^2}{4f} \quad (\text{II.3})$$



**Figure II.1 : Paraboloïde de révolution [18]**

En coordonnées sphériques, l'équation d'un paraboloïde de révolution dont le sommet V est situé à l'origine et  $r$ ,  $\varphi$  et  $\theta$  définissant l'emplacement du point R sur le paraboloïde, est la suivante [16,17,19] :

$$\frac{\sin^2 \theta}{\cos \theta} = \frac{4f}{r} \quad (\text{II.4})$$

La surface totale du paraboloïde peut être déterminée en intégrant l'équation (II.3). Définissons une surface élémentaire  $ds$  telle que (voir figure II.2) :

$$dA_s = 2 \pi a \sqrt{(dz)^2 + da^2} \quad (\text{II.5})$$

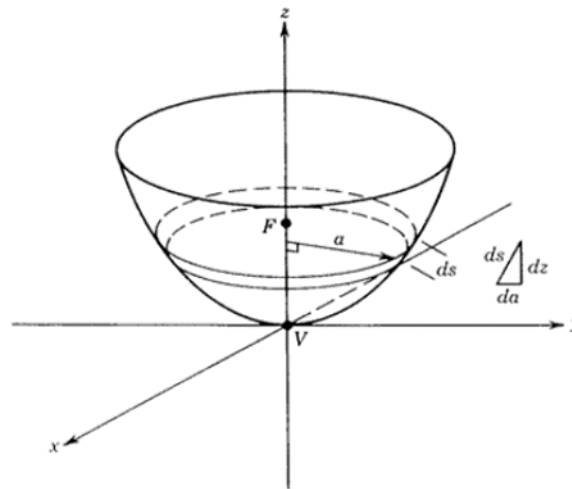


Figure II.2 : Élément de surface du paraboloïde [18]

En remplaçant  $dz$ , on a :

$$dA_s = 2 \pi a \sqrt{\left(\frac{a}{2f}\right)^2 + 1} da \quad (\text{II.6})$$

La surface totale du paraboloïde de distance focale  $f$  et de diamètre  $d$  d'ouverture  $d$  s'obtient en intégrant l'équation (II.6), [17] on a :

$$A_s = \int_0^{d/2} dA_s = \frac{8\pi f^2}{3} \left\{ \left[ \left( \frac{d}{4f} \right)^2 + 1 \right]^{3/2} - 1 \right\} \quad (\text{II.7})$$

La surface d'ouverture est la zone circulaire qui s'appuie sur le diamètre d'ouverture  $d$  est donnée par la formule suivante :

$$A_a = \frac{\pi d^2}{4} \quad (\text{II.8})$$

La surface d'ouverture peut être exprimée en fonction de la distance focale  $f$  et de l'angle d'ouverture  $\Psi$ . En utilisant l'équation (II.9), nous avons :

$$P = \frac{2f}{1 + \cos \psi} \quad (\text{II.9})$$

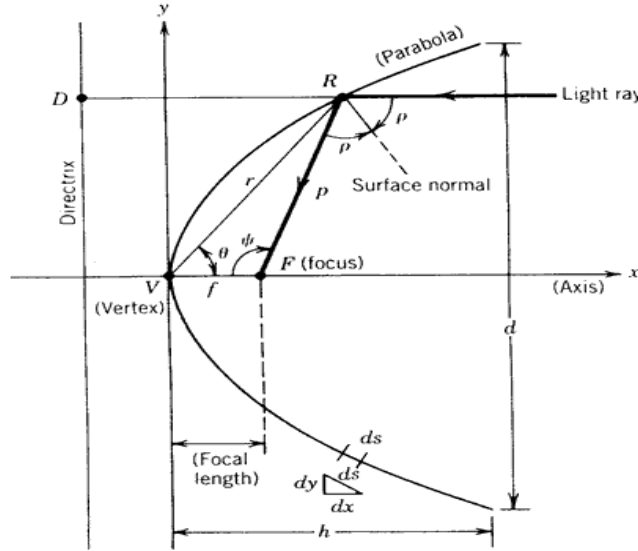


Figure II.3 : Schéma descriptif des paramètres de la parabole [18]

D'après la figure II.3, on obtient :

$$A_a = \frac{\pi}{4} (2p \sin \psi_{rim})^2$$

$$A_a = 4\pi f^2 \frac{\sin^2 \psi_{rim}}{(1 + \cos \psi_{rim})^2} \quad (\text{II.10})$$

Lors de l'évaluation de la géométrie parabolique et des dérivations optiques connexes, le lecteur occasionnel est souvent dérouté par les nombreuses formes utilisées pour représenter la géométrie d'une forme parabolique particulière. Les équivalences suivantes sont données pour la commodité du lecteur :

$$\tan(\psi_{rim}) = \frac{(f/d)}{2(f/d)^2 - \frac{1}{8}} \quad (\text{II.11})$$

$$\tan\left(\frac{\psi_{rim}}{2}\right) = \frac{1}{4\left(\frac{f}{d}\right)} \quad (\text{II.12})$$

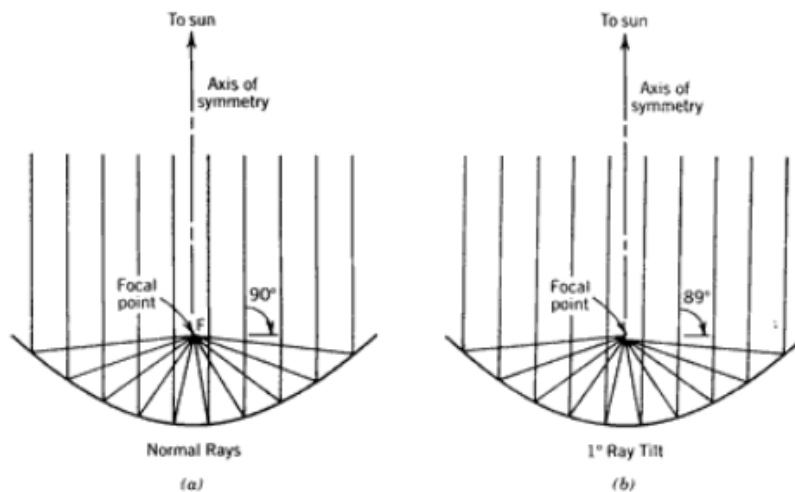
$$\frac{f}{d} = \frac{1 + \cos \psi_{rim}}{4 \sin \psi_{rim}} \quad (\text{II.13})$$

$$\frac{f}{d} = \frac{1}{4 \tan\left(\frac{\Psi_{rim}}{2}\right)} \quad (II.14)$$

**II.2.1.4.2. Etude optique : [17]**

Les réflexions de rayons solaires parallèles pour les miroirs paraboliques sont illustrées dans les diagrammes de trace de rayon de figure II.4. La caractéristique de ces miroirs en matière de concentration des rayons parallèles aux rayons incidents sont normaux à l'ouverture du réflecteur est la suivante : tous les rayons parallèles réfléchis par un miroir parabolique, lorsqu'ils sont parallèles à l'axe de symétrie, se croisent en un point (voir figure II.4a).

Dans la pratique, en revanche, la parabole n'est pas symétrique aux rotations autour de son point focal. Comme le montre la figure II.4b, si le faisceau incident des rayons parallèles s'écarte ne serait-ce que légèrement de la normale à l'ouverture du miroir, il y a dispersion du faisceau, ce qui entraîne un étalement de l'image au point focal.



**Figure II.4 :** Caractéristiques de l'optique parabolique, (a) pour des rayons parallèles à l'axe de symétrie, (b) pour des rayons à 1° de l'axe de symétrie [18]

Pour qu'un miroir parabolique fasse une mise au point nette, il doit donc suivre avec précision le mouvement du soleil afin de maintenir l'axe (ou le plan) de symétrie parallèle aux rayons incidents du soleil. Sachant que la parabole doit suivre en deux dimensions afin de maintenir le faisceau incident normal à l'ouverture de la parabole à tout moment pour permettre la focalisation.

La discussion précédente est basée sur le fait que les rayons lumineux incidents sont parallèles. Ce n'est pas le cas pour les applications réelles. En raison de la taille angulaire

limitée du disque solaire (environ 32 minutes d'arc ou 9,6 mrad), les rayons solaires qui atteignent le concentrateur ne sont pas parallèles. Ainsi, au lieu que tous les rayons incidents soient réfléchis vers le point focal, les rayons réfléchis forment une "image" de taille finie centrée sur le point focal. La géométrie impliquée est illustrée à la figure II.5, où la taille angulaire du disque solaire est désignée par  $\epsilon$ .

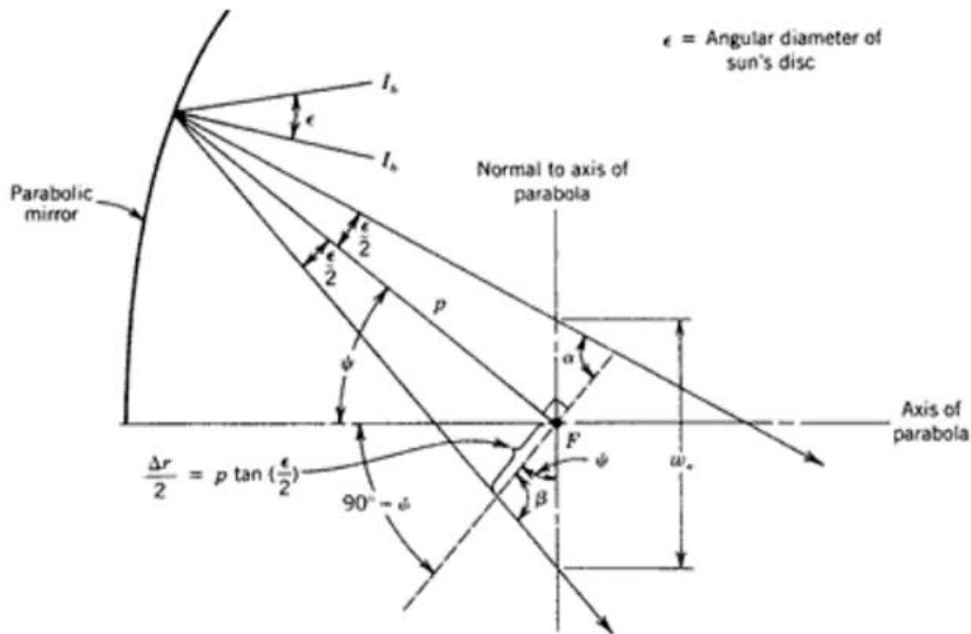


Figure II.5 : Réflexion de rayons non parallèles sur un miroir parabolique [18]

La largeur (dispersion du faisceau) de l'image du soleil réfléchi sur un plan normal à  $p$  et passant par le foyer  $F$  est indiquée comme suit :

$$\Delta_r = 2p \tan\left(\frac{\epsilon}{2}\right) \quad (\text{II.15})$$

Il s'agit de l'étalement minimal du faisceau. Toute erreur, par exemple dans la justesse de l'inclinaison du miroir, entraînera un étalement supplémentaire de la taille de l'image.

En plus de la taille angulaire finie du soleil, des erreurs indépendantes dans la conformité du miroir à une véritable forme parabolique (c'est-à-dire des erreurs de pente), une réflexion non spéculaire du faisceau lumineux incident, des erreurs de poursuite et des erreurs d'alignement du récepteur contribuent toutes à l'étalement apparent du faisceau lumineux réfléchi. Généralement, ces erreurs sont supposées aléatoires et sont rapportées en unités d'écart-type. Leur effet combiné est déterminé statistiquement. Bien que l'intensité du soleil ne soit pas normalement distribuée sur son disque, elle peut être

approximée comme une distribution standard de sorte qu'elle peut être traitée de la même façon que les erreurs du concentrateur.

Pratiquement, il y'a deux types d'erreurs : les erreurs unidimensionnelles et les erreurs bidimensionnelles.

- Les erreurs unidimensionnelles sont celles qui contribuent à l'étalement du faisceau dans le plan de courbure. Elles sont combinées comme suit :

$$\sigma_{1D} = \sqrt{(2\sigma_{slope})^2 + (\sigma_{sensor})^2 + (\sigma_{drive})^2 + (\sigma_{rec})^2} \quad (II.16)$$

- Les erreurs bidimensionnelles se produisent dans les auges paraboliques lorsqu'un rayon incident ne se trouve pas dans le plan de courbure. La largeur angulaire du soleil et la réflectance non spéculaire entrent dans cette catégorie. Ces erreurs sont combinées comme suit :

$$\sigma_{2D} = \frac{\sigma_{sun}^2 + \sigma_{refl}^2}{\cos \theta_i} \quad (II.17)$$

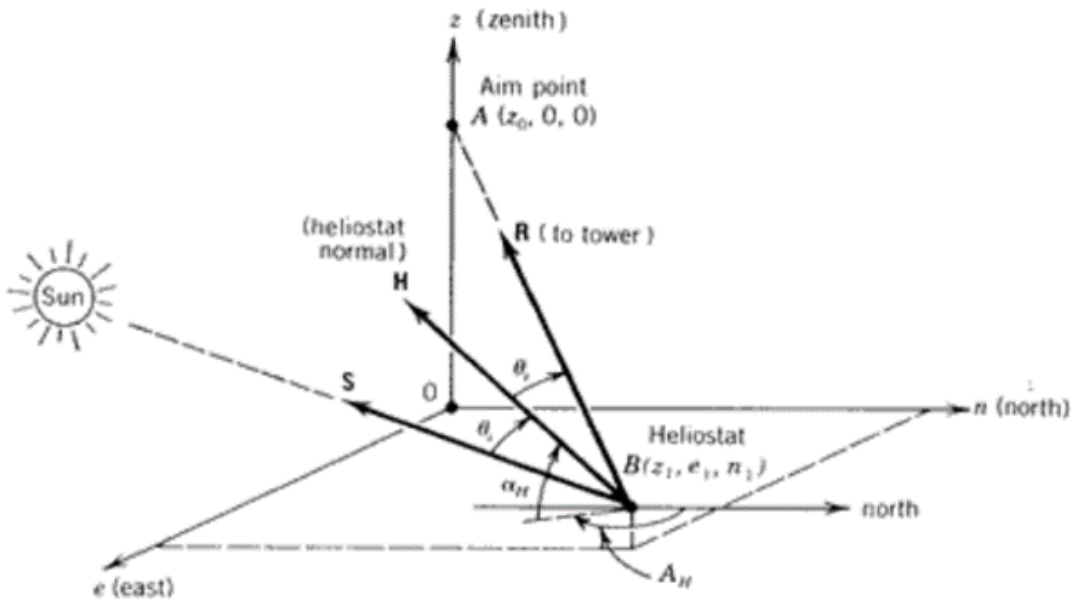
L'erreur totale est alors donnée par :

$$\sigma_{tot} = \sqrt{\sigma_{1D}^2 + \sigma_{2D}^2} \quad (II.18)$$

Comme règle d'usage, on peut s'attendre à ce que 68 % de l'énergie incidente sur la partie de la surface réfléchissante (définie par p) tombe sur la ligne  $\Delta r$  lorsque n est choisi égal à 2 (c'est-à-dire  $\pm 1\sigma_{tot}$ ). Il est courant d'utiliser  $\pm 2$  à  $\pm 3$  fois  $\sigma_{tot}$  dans les analyses solaires pour s'assurer que 95 % ou plus de toute l'énergie possible est capturée.

### ***II.2.1.5. Etude géométrique et optique de l'héliostat : [17]***

La meilleure façon de décrire la géométrie appropriée de l'héliostat est d'utiliser les coordonnées zénithales, (z, e, n), avec leur origine O à la base du point de visée A, comme la montre la figure II.6. L'emplacement d'une surface réfléchissante B peut être défini comme z1, e1 et n1 et le point de visée situé à une distance z0 au-dessus de l'origine.



**Figure II.6 :** Coordonnées définissant la réflexion des rayons du soleil par un héliostat sur un seul point de visée. Le vecteur H est la normale à la surface réfléchissante de l'héliostat.[18]

Pour prédire les angles d'altitude et d'azimut (AH) du réflecteur (héliostat), nous devons décrire les vecteurs unitaires. Le vecteur unitaire du rayon solaire central (S) pointant vers le soleil et le vecteur unitaire pointant du réflecteur vers le point visé (A) qui est défini comme suit :

$$\mathbf{R} = \frac{(z_0 - z_1)\mathbf{i} - e_1\mathbf{j} - n_1\mathbf{k}}{\sqrt{(z_0 - z_1)^2 + e_1^2 + n_1^2}} \quad (\text{II.19})$$

Où  $\mathbf{i}$ ,  $\mathbf{j}$  et  $\mathbf{k}$  sont des vecteurs unitaires dans les directions  $z$ ,  $e$  et  $n$ , respectivement. En définissant l'équation (II.19) en termes de cosinus de direction, on obtient :

$$\mathbf{R} = R_z \mathbf{i} + R_e \mathbf{j} + R_n \mathbf{k} \quad (\text{II.20})$$

Le troisième vecteur est un vecteur unitaire normal à la surface du réflecteur. Il est défini comme suit :

$$\mathbf{H} = H_z \mathbf{i} + H_e \mathbf{j} + H_n \mathbf{k} \quad (\text{II.21})$$

Comme les lois de la réflexion spéculaire exigent que l'angle d'incidence  $\theta_i$  soit égal à l'angle de réflexion, l'expression de cet angle peut être écrite en fonction du vecteur unitaire du rayon solaire central (S) et du vecteur unitaire du point visé (R) sous la forme suivante :

$$\cos 2\theta_i = \mathbf{S} \cdot \mathbf{R} \quad (\text{II.22})$$

En utilisant l'équation de vecteur unitaire du soleil :

$$\mathbf{S} = S_z \mathbf{i} + S_e \mathbf{j} + S_n \mathbf{k} \quad (\text{II.23})$$



Et l'équation (II.19), nous avons :

$$\cos 2\theta_i = R_z \sin \alpha + R_e \cos \alpha \sin A + R_n \cos \alpha \cos A \quad (\text{II.24})$$

À partir de laquelle on peut obtenir l'angle d'incidence ou de réflexion, si l'on connaît la position du soleil et la position du point visé par rapport à la surface de réflexion.

La normale unitaire (H) de la surface de réflexion peut être obtenue en additionnant le vecteur d'incidence et le vecteur de réflexion et en divisant par la quantité scalaire appropriée. On obtient ainsi :

$$\mathbf{H} = \frac{\mathbf{R}+\mathbf{S}}{2 \cos \theta_i} = \frac{(R_z+S_z)\mathbf{i}+(R_e+S_e)\mathbf{j}+(R_n+S_n)\mathbf{k}}{2 \cos \theta_i} \quad (\text{II.25})$$

En substituant l'équation (II.23) et en décrivant l'altitude et l'azimut de la surface réfléchissant  $\alpha_H$  et (AH) respectivement, on obtient :

$$\sin \alpha_H = \frac{R_z + \sin \alpha}{2 \cos \theta_i} \quad (\text{II.26})$$

Et :

$$\sin A_H = \frac{R_e + \cos \alpha \sin A}{2 \cos \theta_i \cos \alpha_H} \quad (\text{II.27})$$

Dans les champs d'héliostats, il existe plusieurs types de pertes qui influent sur l'énergie produite dans la cible, tels que les pertes par blocage, par effet d'ombrage, par effet de l'atmosphère, de débordement et par effet cosinus. Dans notre cas, seul l'effet cosinus peut produire des pertes au niveau du récepteur. [20]

Une expression pour le calcul du cosinus de ce demi-angle a été développée sous la forme de l'équation (II.24). En incorporant les coordonnées appropriées de la position de la tour et de l'héliostat définies dans la figure II.6,

Nous avons :

$$\cos 2\theta_i = \frac{(z_0 - z_1) \sin \alpha - e_1 \cos \alpha \sin A - n_1 \cos \alpha \cos A}{[(z_0 - z_1)^2 + e_1^2 + n_1^2]^{1/2}} \quad (\text{II.28})$$

Où  $\alpha$  et  $A$  sont les angles d'altitude et d'azimut du soleil, respectivement, et  $z$ ,  $e$  et  $n$  sont les coordonnées orthogonales d'un point de la tour à la hauteur des miroirs de l'héliostat, comme illustré à la Figure II.6. [20]

### **II.2.1.6. Etude thermique du récepteur :**

#### **II.2.1.6.1. Puissance solaire absorbée par l'ouverture du récepteur :**

L'énergie reçue à l'ouverture du paraboloïde, en arrivant sur l'ouverture du récepteur, est réduite à cause des pertes. La puissance absorbée est donnée par la formule suivante : [16,19]

$$Q_a = E_{b,n} \cos \theta \rho (\tau\alpha) A_c \Gamma \quad (\text{II.29})$$

Où  $(\tau\alpha)$  est le produit absorptivité/transmittivité effective ( $\tau$  est égal a 1 pour un corps noir)

$E_{b,n}$  : Eclairement direct normal en  $\text{W/m}^2$

$\Gamma$  : Facteur d'interception qui est le rapport entre l'énergie interceptée par l'absorbeur et l'énergie réfléchié par le miroir.

$\theta$  est l'angle d'incidence, c'est l'angle formé entre le vecteur solaire et le vecteur normal a la surface élémentaire du réflecteur

#### **II.2.1.6.2. Puissance correspondant aux pertes thermiques :**

Une fois que l'énergie solaire passe vers la surface d'ouverture du récepteur, elle relève sa température au-dessus de la température ambiante, cette variation de température provoque un processus des pertes de chaleur, ce sont des pertes par convection, par rayonnement et par conduction.

La puissance correspondant aux pertes thermiques est donnée par l'expression suivante [16,19] :

$$Q_p = Q_{p,conv} + Q_{p,ray} + Q_{p,cond} \quad (\text{II.30})$$

- **Pertes par convection :**

La convection est un phénomène encore peu connu pour la plaque plane. Elle est de plus liée à la vitesse et la direction du vent. Ces pertes sont proportionnelles à la surface du récepteur et la différence entre la température de surface d'absorbeur et l'air ambiant. [19]

$$Q_{p,conv} = h_c A_r (T_r - T_a) \quad (\text{II.31})$$

Tels que :

$$h_c = \frac{N_u k}{d} \quad (\text{II.32})$$

- **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. [19,21]

$$Q_{p,ray} = \varepsilon \sigma A_r (T_r^4 - T_{ciel}^4) \quad (\text{II.33})$$

$\varepsilon$  : Facteur émissivité de l'absorbeur.

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

$T_{ciel}$ : Température du ciel, généralement égale à  $T_a - 5^0 \text{ C}$ .

On peut écrire l'équation (II.33) sous la forme suivante :

$$Q_{p,ray} = h_r A_r (T_r - T_a) \quad (\text{II.34})$$

Avec  $h_r = \varepsilon \sigma \frac{T_r^4 - T_a^4}{T_r - T_a} = 4 \varepsilon \sigma T^3 \left[ 1 - \left( \frac{\Delta T}{2T} \right)^2 \right]$  et  $T = \frac{T_r - T_a}{2}$

- **Pertes par conduction :**

Les pertes par conduction sont liées à la nature du matériau utilisé et peuvent toujours être réduites dans les récepteurs des concentrateurs ponctuels, surtout ceux de type cavité. Elles sont évaluées à partir de l'expression suivante : [19,21]

$$Q_{p,cond} = k A_r (T_r - T_a) \quad (\text{II.35})$$

### II.2.1.6.3. Température au récepteur :

On calcul la température moyenne au récepteur à partir du bilan thermique. Un contrôle de volume autour du récepteur donne, en régime permanent :

$$\dot{Q}_u = \dot{Q}_a - \dot{Q}_p = E_{b,n} \cos \theta \rho (\tau \alpha) A_c \Gamma - U_l A_r (T_r - T_a) \quad (\text{II.36})$$

En posant  $\dot{Q}_u = 0$ , on évalue la température de stagnation de notre système. La mesure de la température de stagnation  $T_s$  permet l'estimation des pertes globales au niveau du récepteur pour un niveau d'éclairement donné [21].

On a donc :

$$U_l = \frac{E_{b,n} \cos \theta \rho (\tau \alpha) A_c \Gamma}{A_r (T_r - T_a)} \quad (\text{II.37})$$

### II.3. Conclusion :

Ce chapitre a été consacré à une étude approfondie de la caractérisation théorique du dispositif proposé. Notre approche analytique a permis d'analyser en détail les performances optiques et thermiques du système de concentration.

En examinant les performances optiques, nous avons évalué la capacité du miroir parabolique à recevoir le rayonnement solaire et à le concentrer efficacement vers le récepteur. Cette étude nous a permis de mieux comprendre l'efficacité de la configuration choisie, notamment grâce à l'utilisation de deux héliostats pointés vers le soleil pour assurer une concentration précise du rayonnement.

Par la suite, nous nous sommes concentrés sur l'analyse des performances thermiques du système de concentration. Nous avons examiné la capacité du récepteur à absorber et à transférer la chaleur de manière optimale. Cette évaluation nous a permis de mieux comprendre les mécanismes de transfert de chaleur impliqués et d'identifier d'éventuelles améliorations pour optimiser l'efficacité thermique du système.

Ces analyses détaillées constituent une base solide pour une meilleure compréhension du choix du dispositif d'extraction par concentration solaire. Nous abordant l'effet des phénomènes étudiés dans la partie expérimentale.

# **CHAPITRE III**

## **Matériels et Méthodes**

### III.1. Introduction :

Ce chapitre est consacré à la description détaillée du matériel utilisé et des méthodes employées pour mener à bien l'expérimentation dans le cadre de l'extraction d'huile essentielle par voie solaire à concentration. Nous commencerons par présenter en détail le système à concentration solaire utilisé. Cela inclut une description complète du miroir paraboloidal, de ses caractéristiques techniques, ainsi que le réflecteur secondaire de type héliostat et de son fonctionnement. Nous expliquerons également les méthodes utilisées pour la caractérisation optique des réflecteurs à travers la distribution des flux et des températures au foyer et nous prouverons que le dispositif proposé convient parfaitement à l'extraction d'huile essentielle par concentration solaire tout en offrant les avantages liés à l'économie d'énergie et à la préservation de l'environnement.

### III.2. Description des matériels utilisés :

#### III.2.1. Le miroir parabolique:

Le miroir parabolique est l'élément central du système utilisé pour l'extraction d'huile essentielle par concentration solaire, il présente une forme tridimensionnelle qui suit la courbure d'une parabole.

##### III.2.1.1. Description :

Il est fabriqué à partir d'une parabole de télécommunication, il est conçu pour focaliser les rayons solaires en un seul point focal précis. Son revêtement réfléchissant est réalisé par un film autocollant réfléchissant à base d'aluminium, permettant ainsi de maximiser la quantité de rayonnement solaire réfléchi vers le point focal (voir figure III.1).



Figure III.1 : Réflecteur paraboloidal utilisé dans ce MFE

### ***III.2.1.2. Revêtement :***

Le revêtement de la parabole est réalisé avec le film autocollant réfléchissant. Lors de ce revêtement, on a suivi les étapes ci-dessous:

- ✓ Préparation de la parabole : La surface de la parabole est soigneusement nettoyée pour éliminer toute saleté, poussière ou graisse. Un nettoyage minutieux permet d'assurer une bonne adhérence du film réfléchissant.
- ✓ Découpe du film réfléchissant : Le film autocollant réfléchissant est découpé en fonction des dimensions de la parabole. Des outils de découpe appropriés, tels que des ciseaux ou un cutter, sont utilisés pour obtenir les formes et les dimensions souhaitées.
- ✓ Application du film réfléchissant : Le film réfléchissant est soigneusement appliqué sur la surface de la parabole. Il est important de veiller à ce qu'il soit aligné correctement et qu'il adhère uniformément à la parabole sans laisser de bulles d'air ou de plis.
- ✓ Lissage du film : Une fois le film appliqué, il est lissé délicatement à l'aide d'une raclette en plastique, pour éliminer les éventuelles bulles d'air et assurer une surface uniforme et lisse.
- ✓ Finition : Après l'application du film, des ajustements étaient nécessaires pour garantir un alignement précis et une adhérence optimale. Tout excès de film est découpé ou retiré, laissant ainsi une finition soignée.

La figure III.2 montre les étapes de réalisation du revêtement de la parabole.



**Figure III.2 :** Revêtement du paraboloïde.

### ***III.2.2. L'héliostat :***

L'héliostat utilisé dans ce montage est du type "non imaging heliostat". Son rôle principal est de rediriger l'éclairement solaire incident vers la surface réfléchissante du paraboloïde. Cette fonctionne sur le principe de la double réflexion. Les rayons du soleil sont réfléchis une première fois par l'héliostat qui les renvoi parallèlement vers le concentrateur, qui, à son tour, les réfléchis une seconde fois en les concentrant au foyer du paraboloïde de manière à obtenir une tâche focale fixe également appelé le point focal. Deux héliostats, avec un miroir plan de 1,4 m par 0,80 m chacun, suit manuellement la course du soleil, et renvoie constamment ses rayons dans l'axe du concentrateur. De la même manière que le paraboloïde, la surface des héliostats est revêtue d'un film autocollant réfléchissant. Cette solution de double réflexion a été retenue à cause de la haute fragilité de l'extracteur utilise à savoir le 'Clivenger' réalisé en verre pyrex. La figure III.3 montre une vue de l'héliostat.





**Figure III.3 :** l'héliostat utilisé.

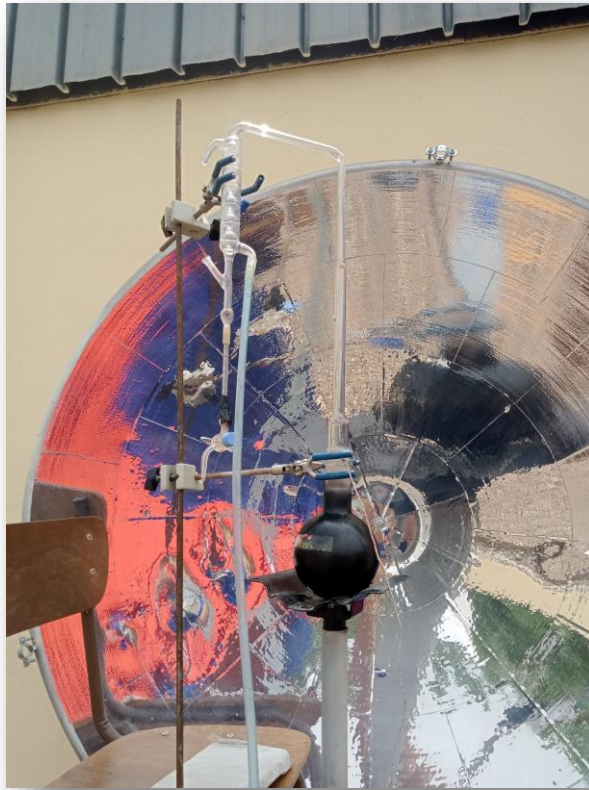
### ***III.2.3. L'extracteur d'huiles essentielles de 'Clevenger' :***

#### ***III.2.3.1. Description :***

L'extracteur d'huile essentielle de Clevenger, également connu sous le nom de système de Clevenger, est un équipement couramment utilisé pour l'extraction d'huiles essentielles à partir de plantes aromatiques.

L'extracteur de Clevenger se compose généralement d'un ballon de distillation, d'un réfrigérant à eau, d'un extracteur et d'un système de chauffage. Le ballon de distillation est une chambre en verre ou en acier inoxydable où les plantes aromatiques sont placées pour l'extraction. Il fonctionne selon le principe de la distillation par hydro distillation. Les plantes aromatiques sont chauffées dans le ballon de distillation, ce qui entraîne la libération des huiles essentielles présentes dans les plantes sous forme de vapeur. La vapeur d'eau avec les huiles essentielles est ensuite refroidie dans le réfrigérant à eau pour condenser la vapeur et récupérer les huiles essentielles. Il est muni d'un tube ou un système de condensation qui collecte les huiles essentielles condensées. Il est généralement relié au ballon de distillation et au réfrigérant à eau pour permettre la récupération des huiles essentielles extraites. Le système de chauffage de l'extracteur de Clevenger est assuré par un concentrateur parabolique permettant de chauffer en son foyer le ballon de distillation et d'induire la vaporisation des huiles essentielles.

Pour garantir une extraction efficace des huiles essentielles, il est important de contrôler la température et le débit d'eau dans le condenseur à eau. Cela permet de maintenir des conditions optimales de refroidissement pour la condensation de la vapeur et la récupération des huiles essentielles. Les huiles essentielles collectées dans l'extracteur de Clevenger sont généralement séparées de l'eau en utilisant des techniques de décantation. Cela permet d'obtenir des huiles essentielles pures et de haute qualité prêtes à être utilisées. L'extracteur d'huile essentielle de Clevenger est un équipement largement utilisé dans l'industrie de l'extraction d'huiles essentielles. Son principe de distillation par entraînement à la vapeur offre une méthode efficace pour extraire les huiles essentielles des plantes aromatiques, en préservant leurs propriétés et leurs arômes caractéristiques. La figure III.4 montre le Clevenger monté au foyer du réflecteur.



**Figure III.4 :** montage du Clevenger au foyer du concentrateur.

#### ***III.2.3.2. La plante (eucalyptus):***

L'eucalyptus (ou gommier bleu de Tasmanie) est introduit en Algérie en 1856 par Ramel qui l'avait importé d'Australie dans le but d'assainir les régions marécageuses, cet arbre aime les régions humides. Depuis, on le retrouve sur tout le littoral algérien. Son tronc lisse

et argenté peut atteindre 80 m de haut et 2,50 m de circonférence. Les feuilles arrondies à la base et pointues à l'extrémité, en forme de faucille, sont alternées et portées par un long pédoncule. Les fleurs qui naissent à l'aisselle des feuilles sont grandes, leur corolle forme une sorte de coiffe qui tombe au moment où mûrissent les étamines très nombreuses. Toutes les parties vertes de la plante renferment de petites poches qui sécrètent une huile aromatique d'une odeur balsamique, camphrée, forte et très agréable. Sa saveur chaude, un peu amère, est suivie d'une sensation de fraîcheur, les fruits ligneux ont une capsule dure. C'est cet opercule du fruit qui donne le nom de "globulus" à cette variété d'eucalyptus [22]. D'après la pharmacopée européenne l'huile essentielle d'eucalyptus globulus (EG) contient [22]:

- $\alpha$ -pinène : 0,05 à 10 %
- $\beta$ -pinène : 0,05 à 1,5 %
- sabinène : au maximum 0,3%
- $\alpha$ -phellandrène : 0,05 à 1,5%
- 1,8-cinéole : au minimum 70%
- camphre : au maximum 0,1%.

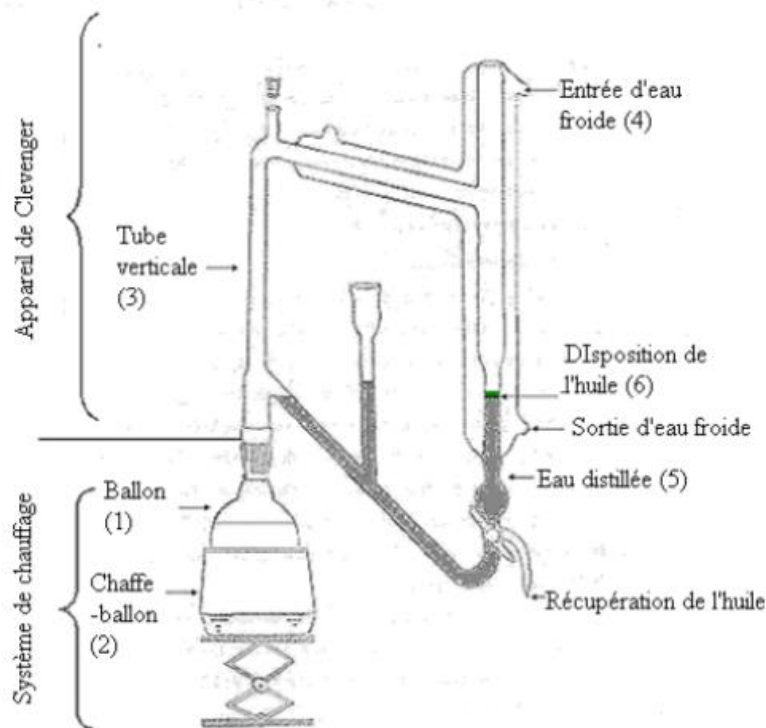


**Figure III.5 :** Feuille d'eucalyptus utilisée

#### ***III.2.3.3. Procédé d'extraction :***

La plante « EUCALYPTUS » est coupée en parties très fines et soumise à l'hydrodistillation en se servant du dispositif d'extraction type Clevenger (voir figure III.6). L'hydrodistillation se base sur le pouvoir que possède la vapeur d'eau à transporter les

huiles essentielles (HE). L'opération consiste à immerger une quantité de la masse végétale dans un grand ballon (1) en verre (de 500ml) contenant une quantité suffisante d'eau distillée sans remplir complètement le ballon (le contenu du ballon ne doit pas dépasser les trois tiers) pour éviter les débordements au cours de l'ébullition. Le mélange est porté à ébullition à l'aide d'une chauffe ballon (2) qui est remplacé dans notre cas par le système solaire. Les vapeurs chargées de l'huile essentielle passent à travers le tube vertical (3), puis à travers le réfrigérant (4) où aura lieu la condensation. Les gouttelettes ainsi produites s'accumulent dans le tube rempli au préalable d'eau distillée (5). En raison de la différence de densité, l'huile surnage à la surface de l'eau distillée (6). L'HE obtenue est récupérée puis séchée par un déshydratant, le sulfate de sodium, pour éliminer le peu d'eau susceptible d'avoir été retenu dans l'huile. L'hydrodistillation est réalisée pendant 3 heures. L'huile essentielle obtenue est conservée dans un flacon opaque bien scellé à l'abri de la lumière et à température de 4 à 6 C°. [22]



**Figure III.6 :** Dispositif d'extraction Type Clevenger.[22]

### III.2.4. Équipements de mesure :

Pour l'évaluation des performances du système à concentration solaire proposé, plusieurs équipements de mesures spécifiques ont été utilisés. Il s'agit principalement de la mesure de températures et des éclairements diffus et global à défaut de la mesure de l'éclairement direct normal. Nous décrivons aussi le système d'acquisition de données ou data logger.

#### III.2.4.1. Mesure des températures :

On utilise des thermocouples pour la mesure des températures au plan focal du réflecteur ainsi que la température ambiante.

**Les thermocouples** [23] : sont des dispositifs de mesure de température basés sur l'effet thermoélectrique. Ils sont composés de deux fils métalliques de types différents qui sont soudés ensemble à une extrémité pour former une jonction de mesure. Lorsque la jonction de mesure est exposée à une différence de température, une différence de potentiel électrique est générée. Cette différence de potentiel est proportionnelle à la température à laquelle la jonction de mesure est soumise ; tels qu'on a utilisé deux types de thermocouples (3 thermocouples type **J** et un thermocouple type **K**) :

- **Type J** : il utilise une jonction de mesure composée de fer (Fe) et de constantan (CuNi), il peut mesurer des températures allant de  $-210^{\circ}\text{C}$  à environ  $760^{\circ}\text{C}$ .
- **Type K** : il utilise une jonction de mesure composée de chromel (NiCr) et d'alumel (NiAl), il peut mesurer des températures allant de  $-270^{\circ}\text{C}$  à environ  $1\ 372^{\circ}\text{C}$ .

La figure III.7 montre les thermocouples utilisés avec leurs câbles de compensation.



**Figure III.7** : Thermocouples utilisés.



Plus un thermomètre avec un multimètre modèle CROWN pour la mesure de la température ambiante (figure III.8).



**Figure III.8** : Mesure de la température ambiante.

#### **III.2.4.2. Mesure des éclairements :**

A défaut d'un pyréliomètre, nous mesurons les éclairements global et diffus à l'aide de pyranomètres placés à l'horizontale. Nous déduisons par différence l'éclairage direct.

Le pyranomètre est un instrument de mesure utilisé pour évaluer la quantité totale de rayonnement solaire incident (global et diffus) sur une surface donnée. Il est conçu pour capturer à la fois la composante directe du rayonnement solaire provenant directement du soleil et la composante diffuse résultant de la diffusion de la lumière solaire par l'atmosphère. En occultant le capteur sensible, nous mesurons l'éclairage diffus.

Il se compose généralement d'un capteur sensible à la lumière, tel qu'une pile photoélectrique, qui convertit l'énergie lumineuse en un signal électrique proportionnel à l'intensité du rayonnement solaire. Ce capteur est recouvert d'un dôme transparent pour le protéger des conditions météorologiques et assurer une réponse précise aux différentes composantes du rayonnement solaire. La figure III.9 illustre les deux pyranomètres utilisés placés à l'horizontale.



**Figure III.9** : Pyranometres utilise pour la mesure des éclairements : global horizontal et diffus

### III.2.4.3 L'acquisition de données :

Pour la lecture des données de températures et d'éclairements, on a utilisé l'acquisition de données Hydra **Fluke** qui est un appareil multicanal permettant de mesurer des tensions continues et alternatives, des températures, des résistances et des fréquences. Elle comporte 21 canaux de mesure, 8 lignes d'E/S numérique, une entrée de totalisation et 4 lignes de sortie d'alarme (voir figure III.10) [23].

Cette acquisition fonctionne avec son logiciel Hydra Logger qui permet la commande intégrale de l'appareil à partir d'un ordinateur personnel IBM ou compatible (**voir l'interface de logiciel dans l'annexe 3**) via l'interface ordinateur RS-232 (figure III.11) [23].



**Figure III.10** : Système d'acquisition de données



**Figure III.11** : Câble de connexion RS 232.

### III.3. Caractérisation géométrique du paraboloïde (réflecteur) :

Après le tapissage des deux premiers cercles, on a pu faire un test pour trouver le foyer de la parabole, on l'exposant au soleil (voir figure III.12).



Figure III.12 : Repérage manuel du foyer

Après la mesure de la distance focale et du diamètre d'ouverture du paraboloïde, nous définissons les paramètres géométriques du réflecteur. Le tableau III.1 regroupe les dimensions caractéristiques du réflecteur.

Tableau III.1 : Paramètres du réflecteur

Diamètre de l'ouverture (D)	1.5 m
Surface totale (s)	1.77 m <sup>2</sup>
Profondeur (H)	0.26 m
Distance focale (f)	0.60 m
L'angle d'ouverture ( $\varphi$ ) d'après l'équation (II.12)	64°

Et pour savoir la surface de papier réfléchissant à coller, on a mesuré la surface incurvée de la parabole en utilisant l'équation (II.7) :

$$S = 2 \text{ m}^2$$



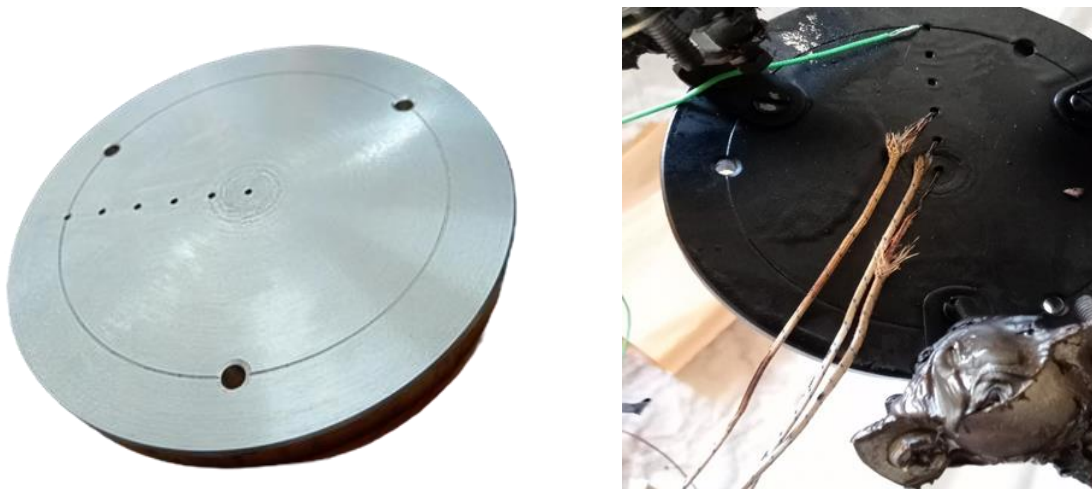
Pour pouvoir évaluer la concentration géométrique  $C$ , on a fait un test au foyer pour pouvoir déterminer la forme et la surface de la tâche. On a constaté qu'elle est quasiment circulaire, donc  $C$  calculé d'après la formule suivante :

$$C = \frac{D^2}{d^2} = (1,5)^2 / (0,078)^2 = 370$$

#### III.4. Mesure des températures au foyer :

A cause de la perturbation de climat au fil des mois de mai et juin et en raison de certains problèmes techniques et de la disponibilité de certains appareils, nos tests expérimentaux ont été retardé jusqu'à la fin de juin.

Pour la mesure des températures au foyer du réflecteur, nous avons réalisé deux campagnes de mesure indépendantes. Dans un premier temps, nous avons placés au foyer du paraboloïde une plaque circulaire d'un centimètre d'épaisseur sur laquelle nous avons placé quatre thermocouples à partir du centre distant de 1 cm l'un de l'autre (figure III.13).



**Figure III.13** : Plaque servant à la mesure de la température au foyer.

La plaque est en aluminium couverte d'une peinture noir matte afin d'augmenter le coefficient d'absorption du flux intercepté. Les mesures de températures et d'éclairements ont été réalisées le 25 juin 2023 à la terrasse du département sous un ciel parfaitement clair et ensoleillé. Les résultats de ces mesures sont reportés au chapitre suivant.

Une deuxième campagne de mesure de température au foyer du réflecteur a été réalisée le 4 juillet 2023, mais cette fois-ci en utilisant la double réflexion à savoir les deux héliostats et le paraboloïde. Le but étant d'évaluer expérimentalement les températures que le système peut atteindre pour des niveaux d'éclairements donnés et donc évaluer les puissances que peut délivrer le système. Le niveau de température atteint et la puissance délivrée au récepteur sont les valeurs permettant le fonctionnement ou non d'extracteur d'huiles essentielles de type Clivenger.

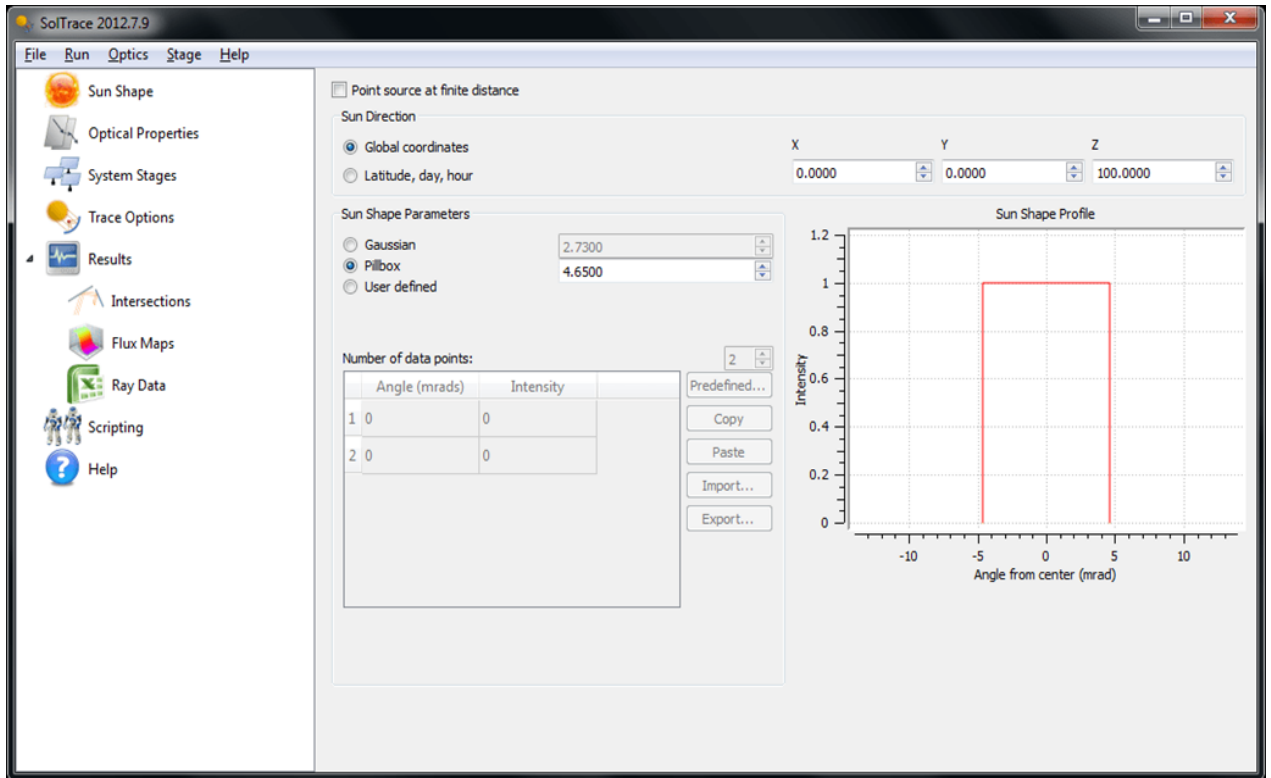
### **III.5. Évaluation du flux au foyer :**

Pour la modélisation de la distribution et de la cartographie des flux au foyer, il existe plusieurs logiciels disponibles. Dans notre étude, nous avons choisi d'utiliser le logiciel SolTrace en raison de sa fiabilité et de sa validation par de nombreux laboratoires de recherche à travers le monde et aussi sa gratuité. Nous allons utiliser ce logiciel pour caractériser notre système de concentration solaire et comparer les résultats obtenus avec les taches obtenues expérimentalement ou plus juste visuellement. L'utilisation de SolTrace nous permettra d'obtenir une représentation visuelle précise de la distribution des flux de chaleur au niveau du foyer, ce qui nous aidera à évaluer les performances de notre système. Cette comparaison nous permettra de valider notre modèle et d'affiner notre compréhension du comportement du système de concentration solaire de type double réflexion pour l'extraction d'huile essentielle.

#### ***Présentation de logiciel SOLTRACE 2012.7.9 :***

SolTRACE, est un code de modélisation optique développé par des chercheurs du National Renewable Energy Laboratory (NREL), est actuellement utilisé pour modéliser des systèmes optiques d'énergie solaire et analyser leurs performances. Bien qu'il ait été conçu à l'origine pour des applications optiques solaires, le code peut également être utilisé pour modéliser et caractériser des systèmes optiques généraux. La création du code est née de la nécessité de modéliser des systèmes optiques plus complexes que ceux qui pouvaient être modélisés avec les outils existants. En outre, les codes précédents étaient basés sur des systèmes d'exploitation obsolètes qui limitaient considérablement les capacités de présentation et de sortie des données. La présentation des données de sortie permet d'afficher et de sauvegarder rapidement des diagrammes de dispersion, des cartes de flux (des tracés tridimensionnels de l'intersection des rayons et de la trajectoire et des tracés

bidimensionnel de la distribution des flux) et des graphiques de performance. SolTRACE a permis aux chercheurs du SunLab du ministère de l'énergie (DOE) de modéliser et de prédire les performances de nouvelles conceptions optiques solaires complexes qui ne pouvaient pas être modélisées auparavant (voir figure III.14) [24].



**Figure III.14 :** Interface du logiciel Soltrace.

### III.6. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté le système de concentration solaire utilisé, comprenant le miroir parabolique de type paraboloïde et l'héliostat 'non-imaging'. La description détaillée de ces composants nous a permis de comprendre leur fonctionnement et leur contribution à la concentration solaire efficace.

De plus, nous avons expliqué les méthodes utilisées pour la caractérisation optique des réflecteurs, en mesurant la distribution des flux et des températures au foyer. Ces mesures sont essentielles pour évaluer les performances du système et analyser les variations thermiques au niveau du récepteur.

Nous avons également décrit l'extracteur d'huile essentielle Clevenger, qui constitue une partie importante de notre méthodologie. Nous avons expliqué son fonctionnement et son rôle dans l'extraction des huiles essentielles à partir des plantes.

Enfin, nous avons abordé les équipements de mesure utilisés, tels que les pyranomètres et les thermocouples, qui nous ont permis de collecter des données précises par le data logger afin d'évaluer les performances du système de concentration solaire retenu.

# **CHAPITRE IV**

## **Résultats et Discussions**

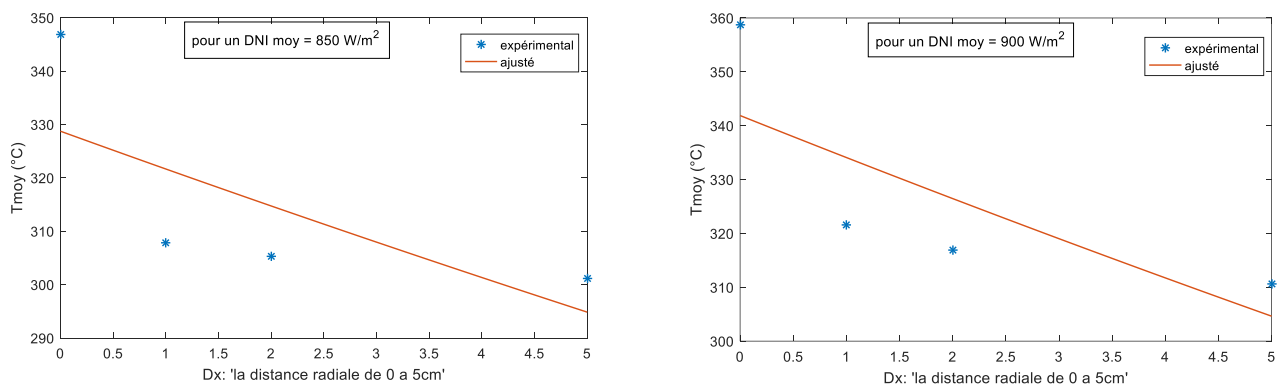
## IV.1 Introduction :

L'évaluation des performances thermiques et optiques de notre système solaire est essentielle pour garantir sa conformité et son adaptation avec l'extracteur d'huile essentielle. Dans cette partie, nous aborderons les résultats expérimentaux de caractérisation du paraboloïde seule et du paraboloïde avec les deux héliostats. C'est ainsi que nous avons procédé à des températures au foyer au moyen d'une plaque épaisse en aluminium en fonction des éclairements directs à incidence normale (DNI). Nous avons ensuite mesuré la température moyenne au niveau du récepteur en fonction des DNI pour la configuration héliostats/paraboloïde et évalué les énergies incidentes au récepteur. D'autre part, nous présentons dans ce chapitre les résultats d'une simulation sous SOLTRACE pour déterminer théoriquement l'ampleur des flux au foyer et la forme et les dimensions de la tâche focale. À défauts d'équipements adéquats (caméra thermique pour hautes températures), nous n'avons que constaté la forme et les dimensions de la tâche au foyer.

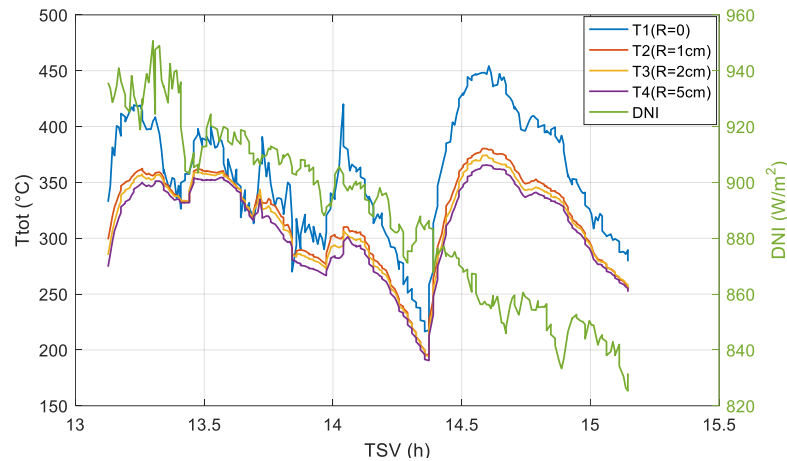
## IV.2 Caractérisation du paraboloïde :

### IV.2.1 Mesure des températures au foyer :

Nous avons effectué des mesures de distribution de température en quatre points du foyer pour différentes valeurs d'éclairement direct. La figure IV.1 illustre les profils des températures mesurées en fonction des DNI moyens de  $850 \text{ W/m}^2$  et  $900 \text{ W/m}^2$ .



**Figure IV.1 :** La distribution de la température pour les quatre points différents au foyer par rapport à la distance radiale (DNI moy de  $850$  et  $900 \text{ W/m}^2$ )



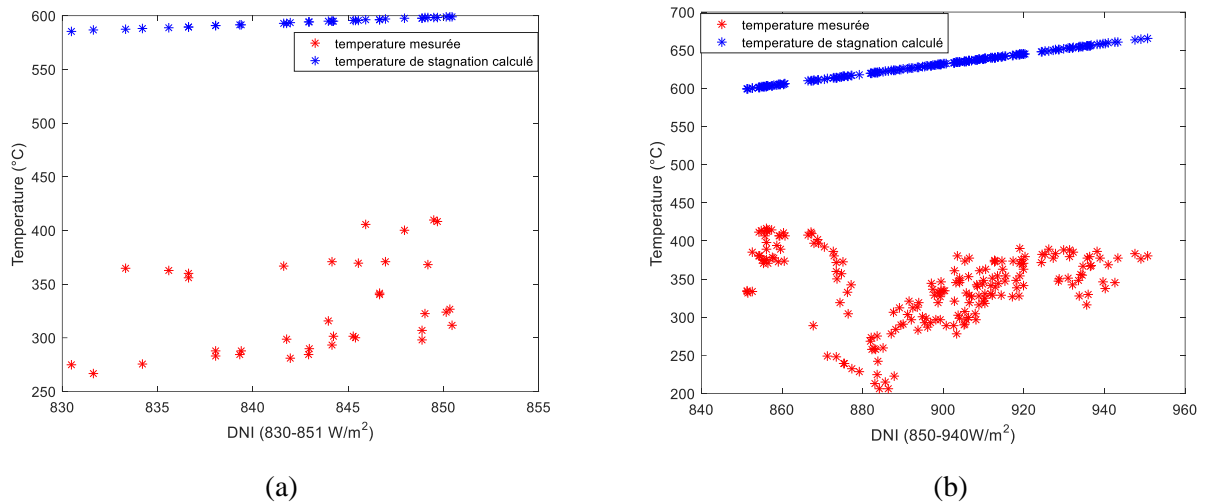
**Figure IV.2 :** la variation des températures au foyer et l'éclairement direct normal en fonction du temps solaire vrai

D'après les figures IV.1 et IV.2, on remarque que :

- ✓ Lorsque la parabole est correctement pointée de manière à ce que la tache solaire soit centrée au foyer, la température est maximale à cet endroit. Cela est dû au fait que l'intensité de la lumière solaire est concentrée sur une petite surface, ce qui entraîne une augmentation de la température. En se déplaçant à partir du centre du foyer et en s'éloignant, la température diminue de manière linéaire. Cela est principalement dû à la géométrie de la parabole et à la dispersion de l'éclairement solaire concentrée. Plus on s'éloigne du centre du foyer, plus la surface réceptrice est éloignée du point focal et moins l'intensité de la lumière est concentrée, ce qui entraîne une diminution de la température.
- ✓ En ce qui concerne l'effet du DNI sur la température au foyer, il y a une corrélation directe. Lorsque le DNI augmente, c'est-à-dire lorsque l'intensité de la lumière solaire incidente est plus élevée, la température au foyer augmentera également. Cela est dû à une plus grande quantité d'énergie solaire concentrée sur la zone réceptrice. En revanche, lorsqu'il y a une chute d'éclairement, par exemple en raison d'un passage nuageux, la température de la plaque (le foyer) ne chute pas instantanément. La plaque conserve une partie de la chaleur accumulée, ce qui lui permet de maintenir une température relativement élevée pendant un certain temps, même lorsque l'éclairement diminue. L'inertie thermique peut être influencée par les matériaux utilisés de la plaque, sa capacité à stocker la chaleur et la dissipation de la chaleur à travers le système.

### IV.2.2 Variation de la température mesurée et de la température de stagnation calculée :

On a calculé la température de stagnation à partir de l'équation (II.36) en utilisant le coefficient de pertes d'échange global  $U_L = 113.62 \text{ W/m}^2\text{K}$  calculé par Susant Kumar Sahu et al [25] qui a travaillé sur un concentrateur semblable au notre.



**Figure IV.3 :** la variation de la température de stagnation calculée et la température mesurée par rapport un DNI moy de 850 et 900  $\text{W/m}^2$

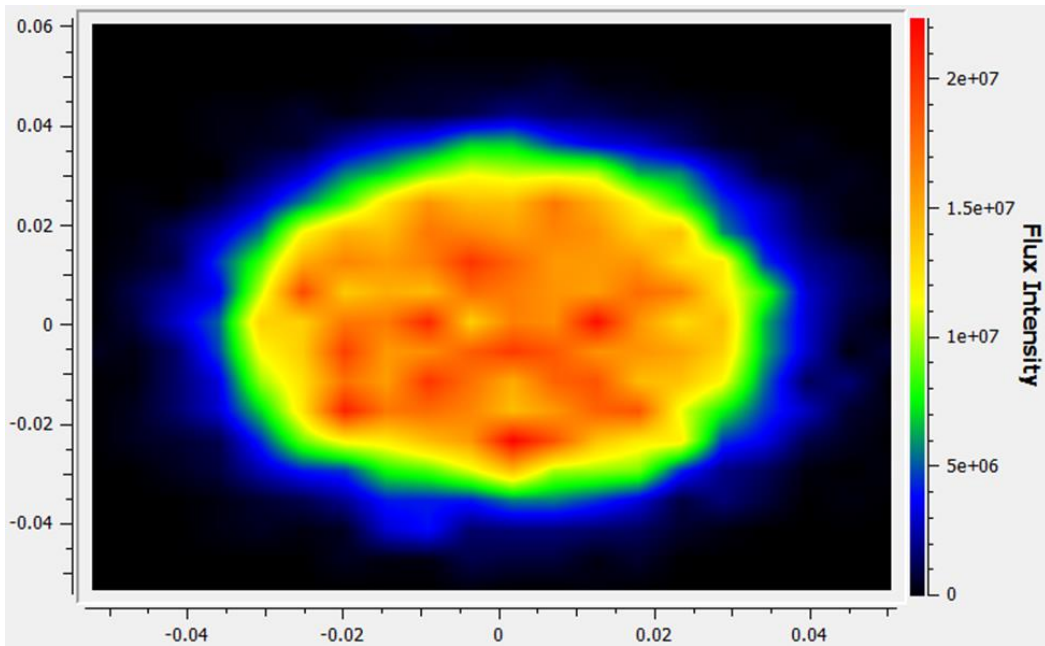
La figure IV.3 montre la variation de la température de stagnation pour deux plages d'éclairement différentes. La figure (a) représente la plage d'éclairement de 850  $\text{W/m}^2$ , tandis que la figure (b) représente la plage d'éclairement de 900  $\text{W/m}^2$ .

La courbe en bleu dans les deux figures représente la limite théorique de la température de stagnation. Cette température de stagnation correspond au point où le rendement thermique du système est égal à zéro. En d'autres termes, il y a toujours un écart entre la température mesurée expérimentalement et la valeur de la température de stagnation.

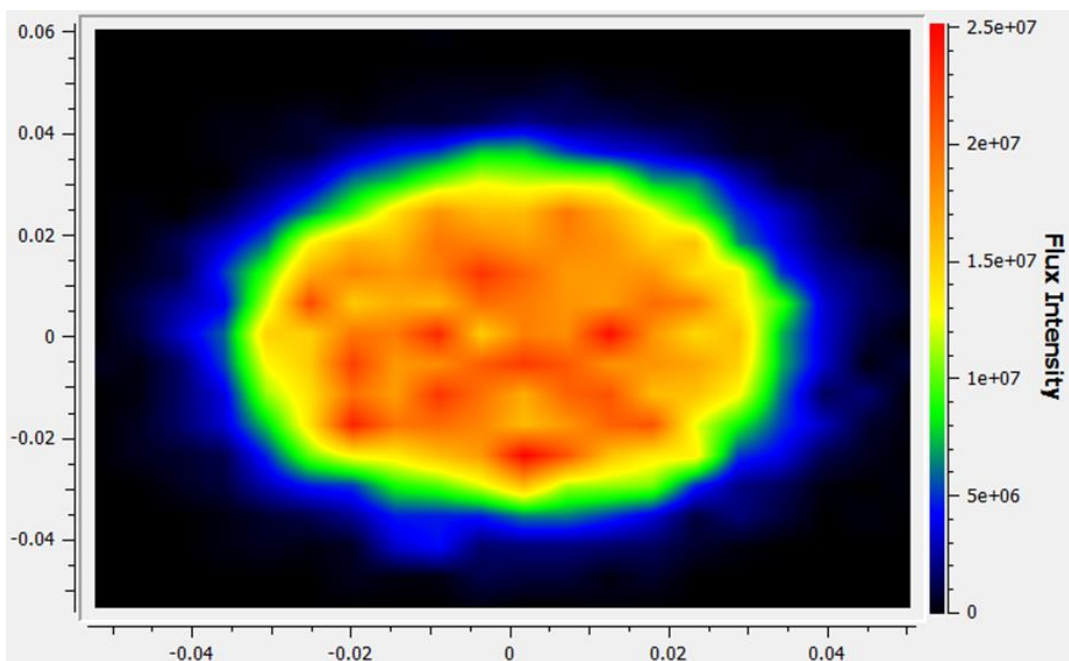
Cette observation suggère que le système ne peut pas atteindre la température maximale prédite théoriquement en raison de différents facteurs tels que les pertes thermiques, les imperfections du système et d'autres limitations. La présence de cet écart entre les mesures expérimentales et les valeurs théoriques souligne l'importance de prendre en compte les facteurs réels lors de la conception et de l'évaluation du système solaire à concentration.



*IV.2.3. La cartographie de flux au foyer sous SOLTRACE :*



**Figure IV.4 :** Distribution du flux au foyer du paraboloïde pour DNI=850 W/m<sup>2</sup>.



**Figure IV.5 :** Distribution du flux au foyer du paraboloïde pour DNI=900 W/m<sup>2</sup>.

Les résultats obtenus à partir de l'analyse avec SolTrace ont confirmé que le flux d'énergie solaire atteint sa valeur maximale au centre du foyer (voir figure IV.4 et IV.5). À mesure que l'on s'éloigne du centre, le flux diminue rapidement, ce qui montre une distribution spatiale du flux au sein du foyer. De plus, on a observé que la valeur du DNI (Direct Normal Irradiance) a une influence significative sur cette distribution du flux. Les dimensions et les distributions de flux dans le volume focal obtenues à l'aide de SolTrace correspondent bien à ceux que l'on a pu observer.

### ***IV.3. Caractérisation thermique au récepteur du paraboloïde/helistats :***

On a utilisé les équations citées dans le chapitre 2 pour calculer les différentes puissances telles que : la puissance incidente sur le réflecteur  $Q_{inc\_réflecteur}$ , la puissance absorbée par le récepteur  $Q_{abso\_récepteur}$  et la puissance utile  $Q_{utile}$ , pour des différentes valeurs moyennes de DNI, en estimant l'effet cosinus des héliostats avec une poursuite manuelle de l'ordre de 0.7 Stine [26] et confirmé par S. A. Kalogirou en 2009 [19].

Après calcul des caractéristiques de notre système. Les résultats sont reportés dans le tableau IV.1.

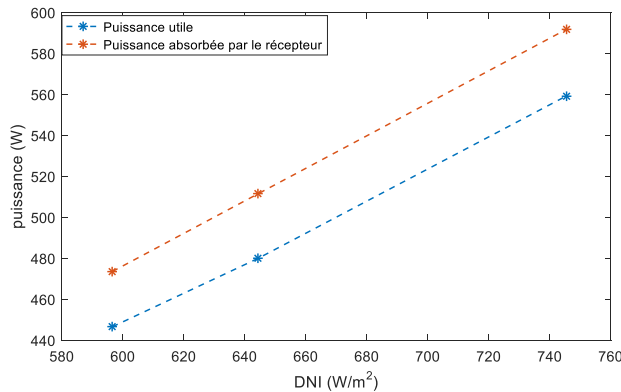
**Tableau IV.1 :** Résultats de caractérisation du système solaire global

DNI ( $W/m^2$ )	$T_{moy}$ ( $^{\circ}C$ )	$Q_{inc\_réflecteur}$ (W)	$Q_{abso\_récepteur}$ (W)	$Q_{utile}$ (W)	Temps d'évaporation (seconde)
597	198	591	474	447	217
650	213	639	512	480	202
750	216	739	592	560	173

Pour le calcul de la puissance utile, on a posé les hypothèses suivantes :

- La conduction est négligeable (car on est dans le cas du régime permanent)
- La vitesse du vent nul (convection forcée négligeable)
- les pertes sous forme des pertes radiatives

La figure IV.6 montre l'évolution de la puissance au récepteur en fonction du DNI



**Figure IV.6 :** La variation de la puissance absorbée au récepteur et celle utile en fonction de DNI

On déduit que :

- les résultats du tableau IV.1 montrent que notre système est capable de fournir la puissance nécessaire qui peut remplacer la résistance électrique de 280W alimentant un Clevenger avec un ballon de 500ml [27]. Avec une puissance thermique solaire de 447 W, on est capable d'évaporer 340 grammes d'eau en 217s. Pour une journée moyennement éclairée, nous pouvons évaporer par ce dispositif une quantité importante de mélange eau-plante et ainsi produire de l'huile essentielle et de l'hydrolat.
- La figure IV.6 montre qu'il existe toujours un écart entre la puissance absorbée et la puissance utile cela est dû aux pertes thermiques radiatives au niveau de l'absorbeur.

#### IV.4. Conclusion :

L'évaluation des performances thermiques et optiques de notre système a permis d'obtenir des résultats expérimentaux significatifs. Nous avons caractérisé le paraboloïde seul ainsi que le paraboloïde en combinaison avec les deux héliostats.

Les mesures des températures au foyer à l'aide d'une plaque épaisse en aluminium, en fonction des éclairagements directs normaux incidents (DNI), nous ont fourni des informations précieuses sur la distribution de chaleur dans le système. Nous avons

également mesuré la température moyenne au niveau du récepteur pour la configuration héliostats/paraboloïde et évalué les énergies incidentes sur le récepteur.

En complément des résultats expérimentaux, nous avons effectué une simulation sous SOLTRACE pour obtenir une estimation théorique de l'ampleur des flux thermiques au foyer et déterminer la forme et les dimensions de la tâche focale. Cela nous a permis de mieux comprendre le comportement du système solaire.

Cependant, il convient de noter que l'indisponibilité d'équipements tels qu'une caméra thermique adaptée aux hautes températures a limité notre capacité à obtenir des mesures plus détaillées. Malgré cela, nous avons pu observer la forme et les dimensions de la tâche au foyer, ce qui a fourni des indications importantes sur la concentration solaire atteinte.

## **Conclusion générale**

En conclusion, ce projet de développement d'un système de distillation solaire décentralisé pour la production d'huiles essentielles à partir de plantes médicinales et aromatiques a abouti à plusieurs résultats significatifs.

Tout d'abord, la modélisation et l'évaluation des performances du système de concentration solaire ont montré que le miroir parabolique et le réflecteur secondaire (héliostat) choisis étaient efficaces pour fournir des températures et des puissances adéquates à l'extracteur d'huile essentielle. Les estimations théoriques ont été validées par les résultats expérimentaux, démontrant ainsi la fiabilité et l'efficacité du système.

Les performances géométriques, optiques et thermiques du système ont été soigneusement évaluées, permettant de mieux comprendre les facteurs qui influencent sur l'extraction. Des simulations de flux de chaleur, et mesures précises des températures et des puissances générées ont été effectuées, offrant ainsi une base solide pour l'analyse et l'interprétation des résultats.

L'analyse des résultats expérimentaux a mis en évidence l'influence des conditions météorologiques, telles que l'intensité du rayonnement solaire et la température ambiante, sur les performances du système. Il a été observé que les variations et les fluctuations climatiques peuvent affecter le processus d'extraction, ce qui souligne l'importance de prendre en compte ces paramètres lors de la planification et de l'exploitation d'un système de concentration solaire.

De plus, cette étude a contribué à l'avancement des connaissances en fournissant une revue complète de l'état de l'art de la production d'huiles essentielles par voie solaire concentré. Les différentes méthodes et technologies existantes ont été examinées, permettant ainsi de situer cette étude dans le contexte plus large de la recherche sur les procédés d'extraction d'huiles essentielles.

Enfin, cette étude ouvre la voie à de nouvelles perspectives de recherche et d'application pratique. Les résultats et les connaissances acquises peuvent être utilisés pour optimiser davantage le système de concentration solaire, en ajustant les paramètres de fonctionnement et en explorant de nouvelles approches. De plus, l'utilisation de l'extraction d'huile essentielle par concentration solaire peut être étendue à d'autres plantes aromatiques et à d'autres régions géographiques, offrant ainsi des opportunités de développement économique et de valorisation des ressources locales.

Enfin, l'extraction d'huile essentielle par concentration solaire représente une méthode prometteuse et durable pour la production d'huiles essentielles à partir de plantes médicinales et aromatiques. Les résultats obtenus dans cette étude contribuent à la

compréhension et à l'optimisation de ce processus, ouvrant ainsi de nouvelles possibilités pour l'industrie des huiles essentielles en Algérie. Il est essentiel de poursuivre les recherches dans ce domaine afin de maximiser les rendements d'extraction, d'améliorer l'efficacité énergétique et de promouvoir une utilisation durable des ressources naturelles.

# Bibliographie

- [1] Mohand Kaci Lamia, Mlle.Bouderbala Khalida, Extraction des huiles essentielles de graines de nigelle et application à la formation de crème anti-inflammatoire, Mémoire de Master en Matériaux et produits organiques industriels, Université BLIDA-1-, 2017.
- [2] HADDOUCHE Abdellah et al, Extraction des huiles essentielles de deux espèces aromatiques Eucalyptus (*Eucalyptus globulus*) et le Romarin (*Rosmarinus officinalis L.*) et leurs activités insecticides contre le puceron vert de certains arbres fruitiers, mémoire de master, université d'Annaba, 2017.
- [3] BOUKHATEM, Mohamed Nadjib, FERHAT, Amine, et KAMELI, Abdelkrim. Méthodes d'extraction et de distillation des huiles essentielles: revue de littérature. *Une*, 2019, vol. 3, no 4, p. 1653-1659.
- [4] DESCHEPPER Robin, variabilité de la composition des huiles essentielles et intérêt de la notion de chémotype en aromathérapie, thèse de doctorat, université d'Aix-Marseille, 2017.
- [5] BENBELLI Khamsa, GHEMIT El hadi, Etude de l'extraction des huiles essentielles et des extraits bruts d'eucalyptus camaldulensis et de pistacia lentiscus : caractérisation physico-chimiques et screening phytochimique, Mémoire de Master en Génie de procédés de l'environnement Université Mohamed Seddik BENYAHIA –Jijel- , 2022.
- [6] DIMA Mnayer, Eco-Extraction des huiles essentielles et des arômes alimentaires en vue d'une application comme agents antioxydants et antimicrobiens, thèse de doctorat, université d'Avignon, 2014.
- [7] LUCCHESI Marie-Elisabeth. *Extraction Sans Solvant Assistée par Micro-ondes Conception et Application à l'extraction des huiles essentielles*. 2005. Thèse de doctorat. Université de la Réunion.
- [8] MUNIR, Anjum et HENSEL, Oliver. Development of a solar distillation system for essential oils extraction from herbs. In : *Conference on International Agricultural Research for Development, Tropentag*. 2007. p. 9-11.
- [9] MUNIR, Anjum et HENSEL, Oliver. Biomass energy utilization in solar distillation system for essential oils extraction from herbs. In : *International conference for "Biophysical and Socio-economic Frame Conditions for the Sustainable Management of Natural Resources" (Tropentag 2009) on October*. 2009. p. 6-8.

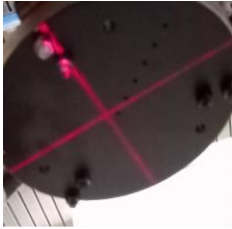


- [10] MUNIR, A. et HENSEL, O. On-farm processing of medicinal and aromatic plants by solar distillation system. *Biosystems engineering*, 2010, vol. 106, no 3, p. 268-277.
- [11] KÜLTÜREL, Yunus et TARHAN, Sefa. A solar distillery of essential oils with compound parabolic collectors (CPCs). *Anadolu Tarım Bilimleri Dergisi*, 2016, vol. 31, no 1, p. 72-83.
- [12] RADWAN, Mona N., MORAD, M. M., ALI, M. M., *et al.* A solar steam distillation system for extracting lavender volatile oil. *Energy Reports*, 2020, vol. 6, p. 3080-3087.
- [13] MANYAKO, K. E., CHIYANZU, Idan, MULOPO, Jean, *et al.* Pilot-Scale Evaluation of Concentrating Solar Thermal Technology for Essential Oil Extraction and Comparison with Conventional Heating Sources for Use in Agro-Based Industrial Applications. *ACS omega*, 2022, vol. 7, no 24, p. 20477-20485.
- [14] PISE, Viprav Hari et THORAT, Bhaskar N. Green steam for sustainable extraction of essential oils using solar steam generator: A techno-economic approach. *Energy Nexus*, 2023, vol. 9, p. 100175.
- [15] Trombe, F., Le grand Four solaire de Mont-Louis, *Journal de L'Astronomie*, Vol. 69, p.45, 1955
- [16] J. A. Duffie and W. A. Beckman, *Solar Engineering of Thermal Processes*, 4th ed. Wiley, 2013.
- [17] W.B.Stine and R.W.Harrigan , *Solar Energy Systems Design* John Wiley and Sons, Inc. 1986
- [18] chapter 8 : [Concentrator Optics](#) , Disponible à l'adresse : <https://www.zakweli.com/systeme-de-coordonnees-geographiques> consulté le 1 juin 2023
- [19] S. A. Kalogirou, *Solar Energy Engineering: Processes and Systems*, 1st ed. Academic Press, 2009.
- [20] chapter 10 : Central Receiver Systems , Disponible à l'adresse : <https://www.zakweli.com/systeme-de-coordonnees-geographiques> consulté le 1 juin 2023
- [21] S. K. Sahu et al., Experimental Investigations of Stagnation Temperature and Overall Heat Transfer Coefficient of Flat Receiver for Solar Parabolic Dish Concentrator System, *Journal of Physics: Conf. Series* 1276 (2019) 012053.
- [22] IMLOUL M. et BOURIDAH Y., Etude de l'extraction de l'huile essentielle d'eucalyptus radié, PFE Génie Chimique, Université A. MIRA – BEJAIA, 2022.
- [23] FLUKE AND PHILIPS – THE GLOBAL ALLIANCE IN TEST & MEASUREMENT, Hydra Manuel de l'utilisation, 2625A ENREGIDTREUR DE DONNEES ; 2620A UNITE D'ACQUISITION DE DONNEES.

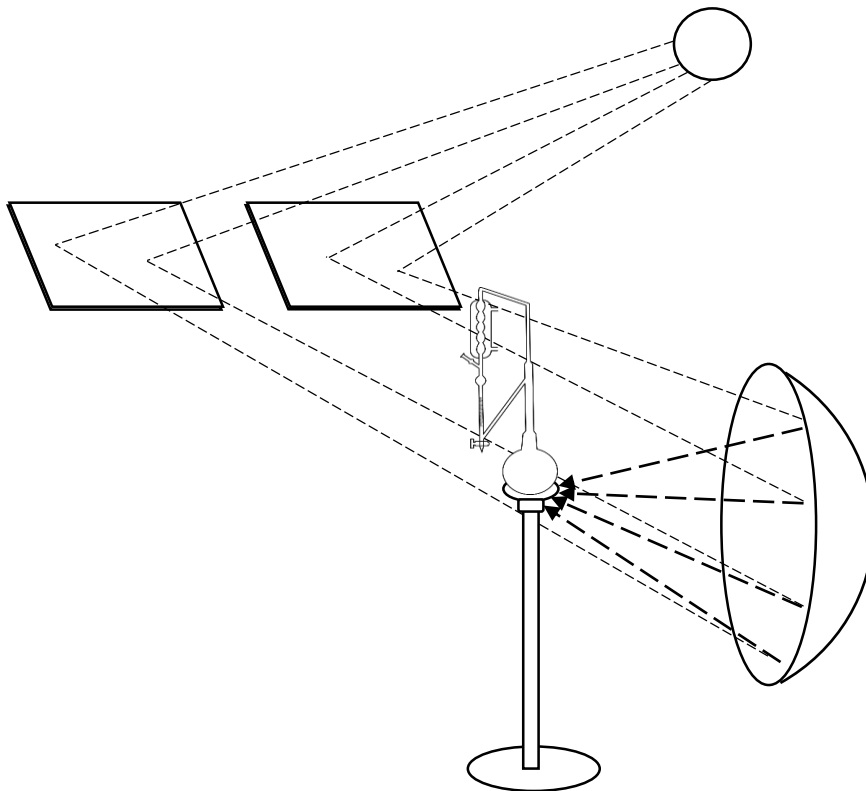
- [24] WENDELIN, Tim. SolTRACE: a new optical modeling tool for concentrating solar optics. In : International solar energy conference. 2003. p. 253-260.
- [25] KUMAR SAHU, Susant, VADIVUKKARASAN, M., SUMAN, Dharamsoth, *et al.* Experimental investigations of stagnation temperature and overall heat transfer coefficient of flat receiver for solar parabolic dish concentrator system. In : *Journal of Physics: Conference Series*. IOP Publishing, 2019. p. 012053.
- [26] STINE, William B. et HARRIGAN, Raymond W. Solar energy fundamentals and design Book. 1985.
- [27] <https://www.dutscher.com/article/002095> consulté le 9 juillet 2023

# Annexes

Annexe 1 : Figures des tests et des mesures du système :



Annexe 2 : schéma du système complet



Annexe 3 : L'interface de logiciel Hydra logger de l'acquisition des données :

The Main Menu Bar accesses pull-down menus to select Hydra Logger commands. To execute a menu command, click on the menu item or press Alt and the underlined letter in the menu item name.

The Title Bar displays the title of the current setup file. For example, the setup file could be called fmssetup.sh. If no setup file is selected, the title is Setup.

The Icon Bar contains an icon (H1 or H2) for each Hydra instrument. Configuration Display Area information applies to the selected (highlighted) icon. An asterisk (\*) appears with an icon that is presently connected via modem. "LOG" appears with the icon if Hydra Logger is presently logging data from that instrument. A telephone icon appears if a Hydra instrument is connected via modem.

The status bar provides brief textual descriptions of menu and toolbar functions. Status Bar in the View menu must be checked for Hydra Logger to display the Status Bar.

The Channel Display Area shows the configuration for each active channel for the selected Hydra instrument. Double-click anywhere in this area to open the Channels Configuration dialog box.

The Configuration Display Area is the entire area between the Icon Bar and the Channel Display Area. This area displays all Hydra Logger and instrument operating settings for the selected Hydra instrument. Double-click anywhere in this area to open the Hydra Configuration dialog box.