

UNIVERCITE KASDI MERBAH OUARGLA

Faculté Des Hydrocarbures de L'énergie

Renouvelable Et Des Sciences de La Terre Et De L'univers

Département Des Energies Renouvelables



Mémoire

MASTER ACADEMIQUE

Domaine : Energies Renouvelables

Spécialité : Hydrogéné vert vecteur d'énergie

Présenté par :

BENRAS Salah Eddine

DJERIOUI Abdelhak

Thème

Mise en marche d'un système de
traitement d'eau huileuse pétrolier

Soutenu publiquement

Le : 17 / 06 / 2025

Soumis au jury composé de :

M^r Nacib Hicham

MAA

Président

UKM Ouargla

M^{me} ZOUBEIDI Chahinaz

MCA

Encadreur/rapporteur

UKM Ouargla

M^r HADJADJ Abdsamea

MAA

Examineur

UKM Ouargla

Année universitaire 2024/2025

Dédicace

À ceux qui ont semé en moi les premières graines de curiosité et de
connaissance,

À ceux qui m'ont appris qu'il n'y a pas de limites à la volonté, ni de fin
au chemin de la connaissance...

À mes chers parents, symboles de don et de sacrifice,
C'est en vous que j'ai puisé ma patience, et grâce à vos conseils, j'ai
parcouru avec confiance le chemin de l'apprentissage...

Chaque lettre de ces mémoires est le prolongement de votre
bienveillante insufflation.

À ma chère épouse,

Ma complice de tous les jours et mon soutien dans les moments de
fatigue et d'hésitation,

Merci pour votre patience et votre confiance, qui m'ont donné la force de
continuer...

Cette réussite est le fruit de votre soutien avant d'être le fruit de mes
propres efforts.

À mes enseignants et encadreurs qui n'ont jamais renoncé à leur savoir,

N'ont ménagé aucun effort pour me guider et me soutenir...

Vous avez toute ma reconnaissance et ma gratitude.

À mes amis et collègues qui m'ont soutenu et encouragé,
Qui ont partagé avec moi les moments difficiles et la fatigue, et la joie de
chaque étape réussie.

À tous ceux qui ont cru en moi, m'ont encouragé et ont eu un impact positif sur mon parcours universitaire...

Je dédie cet humble ouvrage, en espérant qu'il contribuera, même modestement, à bâtir un avenir scientifique prometteur et à servir l'environnement et l'humanité.

BENRAS Salah Eddine

À ceux qui ont semé en moi les premières graines de curiosité et de
connaissance,

À ceux qui m'ont appris qu'il n'y a pas de limites à la volonté, ni de fin
au chemin de la connaissance...

À mes chers parents, symboles de don et de sacrifice,

C'est en vous que j'ai puisé ma patience, et grâce à vos conseils, j'ai
parcouru avec confiance le chemin de l'apprentissage...

Chaque lettre de ces mémoires est le prolongement de votre
bienveillante insufflation.

À mes enseignants et encadreurs qui n'ont jamais renoncé à leur savoir,

N'ont ménagé aucun effort pour me guider et me soutenir...

Vous avez toute ma reconnaissance et ma gratitude.

À mes amis et collègues qui m'ont soutenu et encouragé, et sur tous
Benras

Qui ont partagé avec moi les moments difficiles et la fatigue, et la joie de
chaque étape réussie.

À tous ceux qui ont cru en moi, m'ont encouragé et ont eu un impact
positif sur mon parcours universitaire...

Je dédie cet humble ouvrage, en espérant qu'il contribuera, même
modestement, à bâtir un avenir scientifique prometteur et à servir
l'environnement et l'humanité.

DJERIOUI Abdelhak

Remerciements

Tout d'abord, nous remercions Allah le tout puissant et miséricordieux, qui nous a donné la force, le courage et la patience d'accomplir ce Modeste travail.

Nous adressons nos sincèrement remerciements à notre encadrant **Mme. ZOUBEIDI Chahinaz** pour ses remarques, ses conseils et ses critiques constructives.

Nous remercions également tous les membres du jury, qui nous ont fait l'honneur d'accepter d'examiner ce mémoire.

Nous remercions tous les enseignants qui ont contribué à notre formation durant notre cursus universitaire.

Nous remercions tous ceux qui, d'une manière ou d'une autre, nous ont toujours soutenus par leur respect et leur gentillesse.

Sommaire

Dédicace.....	I
Remerciements.....	IV
Sommaire.....	V
Liste des figures.....	VII
Liste des tableaux.....	IX
Nomenclature.....	X
Introduction générale.....	3
Les eaux huileuses pétrolier et techniques des traitements.....	6
1 Introduction.....	7
2 Notions générales.....	8
2.1 L'eau nature et caractéristiques.....	8
2.2 Pollutions de l'eau :.....	9
2.3 Les eaux usées industrielles :.....	10
2.4 Les différents types d'eaux usées industrielles :.....	10
2.5 Les eaux huileuses.....	11
2.5.1 Définition des eaux huileuses :.....	11
2.5.2 Méthodes de traitement des eaux huileuses :.....	13
2.6 Distillateurs :.....	14
2.6.1 L'histoire de Distillateur solaire :.....	15
2.6.2 Définition.....	16
2.6.3 Types de distillateurs solaires :.....	16
2.7 Histoire des concentrateurs solaires :.....	19
2.7.1 Concentrateurs solaires paraboliques :.....	20
2.7.2 Géométrie parabolique :.....	20

2.7.3	Dimensions concentrateur parabolique :	21
2.8	Absorbeur	24
3	Conclusion.....	24
	Dimensionnement d'un distillateur solaire avec un concentrateur parabolique.....	25
1	Introduction	26
2	Traitement des eaux huileuses par concentrateur parabolique.....	26
2.1	Provenance des huiles usées :	27
2.2	Composition :	28
3	La distillation solaire comme option propre et durable :	28
4	Vers une station thermique intelligente pour le traitement des eaux huileuses :	29
5	Le système de contrôle électronique : le cœur intelligent de la centrale :	32
6	Architecture flexible et évolutive :	33
7	Conclusion :	34
	Résultats et interprétation	36
1	Introduction	37
2	Résultats et discussions.....	37
3	Recommandations :	44
	Conclusion générale	43
	Références bibliographiques	45

Liste des figures

Figure 1.1 : Organigramme de différentes classes des eaux usées industriel	11
Figure 1.2 Concentrateur parabolique.	Error! Bookmark not defined.
Figure 1.3 Principe de fonctionnement d'un distillateur solaire.	Error! Bookmark not defined.
Figure 1.4 Distillateur à simple effet.	Error! Bookmark not defined.
Figure 1.5 Distillateur à multiple effets.	Error! Bookmark not defined.
Figure 1.6 Les différents types des concentrateurs solaires.	20
Figure 1.7 Propriétés géométriques de la parabole.	21
Figure 1.8 Schéma géométrique du concentrateur Solaire parabolique (1).	22
Figure 1.9 Schéma géométrique du concentrateur Solaire parabolique (2).	Error! Bookmark not defined.
Figure 1.10 Angle d'ouverture d'une parabole en fonction de la distance focale.	Error! Bookmark not defined.
Figure 2.1 : Concentrateur cylindro-parabolique	Error! Bookmark not defined.
Figure 2.2 installation thermique intégrée basée sur la concentration de l'énergie solaire.	30
Figure 2.3 un système de contrôle électronique intelligent à l'aide d'une carte Arduino nanométrique.	30
Figure 2.4 Connexion des capteurs de température au niveau de système.	31
Figure 2.5 Montage de fonctionnement d'un distillateur solaire à l'aide d'un concentrateur parabolique.	31
Figure 2.6 écran LCD et Arduino	32
Figure 2.7 écran LCD 24*4	Error! Bookmark not defined.
Figure 2.8 Carte Arduino NANO	Error! Bookmark not defined.
Figure 2.9 Vanne électrique	Error! Bookmark not defined.

Figure 2.10 Capteur de température (Sonde DS18B20).....	Error! Bookmark not defined.
Figure 3.1 schéma représentatif sur procédure de mise en œuvre	Error! Bookmark not defined.
Figure 3.2 courbe de variation des températures T_{sortie} $T_{\text{entré}}$ T_{foyer} en fonction du temps. (29/05/2025).....	Error! Bookmark not defined.
Figure 3.3 courbe de variation d'irradiation de soleil en fonction du temps.(29/05/2025)	Error! Bookmark not defined.
Figure 3.4 courbe de variation des températures T_{sortie} $T_{\text{entré}}$ T_{foyer} en fonction du temps (02/06/2025).....	41
Figure 3.5 courbe de variation d'irradiation de soleil en fonction du temps. (02/06/2025)	41
Figure 3.6 courbe de variation des températures T_{sortie} $T_{\text{entré}}$ T_{foyer} en fonction du temps (10/06/2025).....	43
Figure 3.7 courbe de variation d'irradiation de soleil en fonction du temps.(10/06/2025)	43

Liste des tableaux

Tableau 1.1: Taille des gouttelettes dans le mélange .	12
Tableau 1.2 les concentrations types de certains polluants d'une huile lubrifiante usée. Error! Bookmark not defined.	
Tableau 1.3 Les tests effectués du 29/05/2025. Error! Bookmark not defined.	
Tableau 1.4 Les tests effectués du 02/06/2025.	40
Tableau 1.5 Les tests effectués du 10/06/2025.	42

Nomenclature

Symbole, Désignation, Unité

$T_{\text{entré}}$ Température d'entrée du système [$^{\circ}\text{C}$]

T_{sortie} Température de la sortie du système [$^{\circ}\text{C}$]

T_{foyer} Température de foyer de concentrateur parabolique [$^{\circ}\text{C}$]

G : Radiation solaire (w/m^2)

P : Paramètre de la parabole (m)

h : Profondeur concentrateur solaire (m)

D : Diamètre de la parabole (m)

f : distance focale (m)

S_x : surface de la parabole (m^2)

A_p : surface d'ouverture d'une parabole (m^2)

Ψ : angle d'ouverture d'une parabole (degré)

Résumé

La pollution issue des activités industrielles, notamment pétrolières et mécaniques, représente une menace environnementale croissante, se traduisant principalement par le rejet de liquides huileux et d'eaux contaminées sans traitement adéquat. Face à cette problématique, le recours aux énergies renouvelables, en particulier l'énergie solaire, s'impose comme une solution stratégique pour un traitement durable de ces déchets. Cette étude présente un système thermique solaire à concentration utilisant un concentrateur solaire concave à air pour focaliser le rayonnement solaire en un point focal thermique, permettant de chauffer les liquides contaminés et d'activer des processus physiques tels que l'évaporation ou la séparation thermique. Le système intègre des dispositifs de mesure électroniques et un contrôle intelligent basé sur un microcontrôleur Arduino, régulant le débit et les vannes selon les relevés de température et de pression, assurant ainsi une opération automatique et sécurisée. Des tests expérimentaux en conditions réelles ont démontré la réactivité du système aux variations de l'ensoleillement et sa capacité à générer un différentiel thermique efficace pour un véritable traitement thermique. Les résultats confirment l'applicabilité industrielle de ce système, notamment dans les régions à fort rayonnement solaire, et ouvrent des perspectives d'amélioration technique. Ce travail contribue à la transition vers un développement durable grâce à une solution innovante, économique et respectueuse de l'environnement.

Les mots clés : énergies renouvelables - système thermique

ملخص:

تُعدّ التلوثات الناتجة عن الأنشطة الصناعية، خاصةً في القطاعات البترولية والميكانيكية، من أبرز التهديدات البيئية المتزايدة، حيث تتجلى أساسًا في تصريف الزيوت والسوائل الملوثة دون معالجة مناسبة، مما يؤثر سلبيًا على النظم البيئية والمياه. في هذا السياق، يُعتبر اللجوء إلى الطاقات المتجددة، وعلى رأسها الطاقة الشمسية، خيارًا استراتيجيًا لمعالجة هذه المخلفات بشكل مستدام. تعتمد هذه الدراسة على نظام حراري شمسي مركز يستخدم عاكسًا شمسيًا مقعرًا يعمل بالهواء لتركيز أشعة الشمس في بؤرة حرارية تسخن السائل الملوّث لتفعيل عمليات فيزيائية كالتبخّر أو الفصل الحراري. يشمل النظام مكونات إلكترونية وأجهزة قياس مربوطة بوحدة تحكم ذكية من نوع Arduino تتحكم في صمامات وتدفق السائل حسب معطيات الحرارة والضغط، مما يضمن تشغيلًا آليًا وأمنًا. تم اختبار النموذج تجريبيًا في ظروف واقعية، وأظهرت النتائج قدرة النظام على التكيف مع تغيّرات الإشعاع الشمسي وتوفير فرق حراري فعّال يتيح معالجة حرارية حقيقية. تؤكد النتائج جدوى التطبيق الصناعي للنظام، خاصة في المناطق المشمسة، وتفتح آفاقًا لتطويره وتحسينه تقنيًا، مما يعزّز دوره كحل اقتصادي وبيئي مبتكر في معالجة التلوث الصناعي.

الكلمات الرئيسية: الطاقات المتجددة - النظام الحراري

Introduction générale

Introduction générale

Introduction générale

Le développement industriel rapide, notamment dans les secteurs pétrolier et gazier, a provoqué une hausse importante des eaux usées industrielles, riches en hydrocarbures, métaux lourds et produits chimiques toxiques. Rejetées sans traitement, ces eaux menacent gravement les écosystèmes aquatiques et les ressources en eau douce, car elles contiennent des polluants difficiles à dégrader. Issues des processus d'extraction, de raffinage et de transport, elles nécessitent des traitements spécialisés pour éviter leur dispersion dans l'environnement et le climat. [1].

La pollution des eaux huileuses, issue des activités pétrolières, est un grave problème environnemental [2]. Ces eaux, riches en substances toxiques, contaminent les milieux naturels si elles ne sont pas traitées. Les méthodes classiques, souvent coûteuses et énergivores, présentent des limites. La distillation solaire concave, utilisant la chaleur du soleil pour évaporer et purifier l'eau, offre une alternative écologique et économique. Elle ne produit pas d'émissions nocives et permet une réutilisation de l'eau. Malgré quelques contraintes (météo, entretien), elle reste une solution prometteuse pour réduire l'impact de l'industrie pétrolière sur l'environnement.

La distillation solaire concave est une solution innovante pour traiter les eaux huileuses industrielles. Elle utilise la concentration du rayonnement solaire pour évaporer l'eau contaminée et la séparer des huiles et impuretés. Cette technologie, efficace et à faible coût, repose sur une énergie renouvelable, ce qui en fait une alternative durable aux méthodes classiques. Elle réduit les impacts environnementaux des activités pétrolières et favorise une gestion responsable de l'eau. L'étude vise à évaluer son potentiel en analysant les caractéristiques de l'eau polluée, en testant l'efficacité du système, puis en formulant des recommandations pour améliorer ses performances, soutenir l'utilisation durable des ressources et produire une eau pure, utile notamment à la production d'hydrogène vert [3].

Ce travail est structuré en trois chapitres. Le premier présente le cadre théorique : définition des eaux huileuses, leurs sources, et les principales méthodes de traitement, anciennes et modernes. Il aborde aussi la distillation solaire, ses principes physiques, les types d'appareils utilisés, leur fonctionnement, ainsi qu'une analyse de la conception des antennes solaires à concentration, visant à maximiser l'absorption du rayonnement solaire pour une évaporation efficace.

Introduction générale

Le deuxième chapitre décrit les aspects techniques de l'appareil expérimental, détaillant ses dimensions, composants et mécanisme de fonctionnement, y compris le système de contrôle automatique visant à optimiser son efficacité. Il traite également de la conception du système pour maximiser la collecte et la concentration de l'énergie solaire, améliorant ainsi la performance de la distillation.

Le troisième chapitre analyse les données expérimentales pour évaluer les performances de l'appareil en conditions variées. Il examine l'efficacité de séparation de l'eau et des contaminants huileux, identifie les défis techniques rencontrés, et propose des solutions pour optimiser le fonctionnement et l'efficacité du système.

Cette étude propose des solutions durables pour traiter les eaux polluées par des déchets pétroliers, en recourant à l'énergie solaire afin de réduire l'impact environnemental et d'optimiser l'usage des ressources, favorisant ainsi la durabilité dans l'industrie pétrolière.

Ce travail a été effectué au laboratoire pédagogique d'énergie renouvelable de la Faculté des Hydrocarbures et Énergies Renouvelables de l'Université de Ouargla, lors d'un stage pratique de trois mois cette année.

Chapitre I :

Les eaux huileuses pétrolier et techniques des traitements

1 Introduction

L'eau huileuse de pétrole est un type d'eau industrielle polluée résultant des activités d'extraction, de production, de traitement et de raffinage du pétrole et du gaz. Cette eau contient un mélange complexe de polluants, notamment des huiles et des graisses, des hydrocarbures, des additifs chimiques, des métaux lourds et parfois des dépôts solides. En raison de leur danger pour l'environnement et de la difficulté de leur décomposition naturelle, leur rejet sans traitement constitue une menace directe pour les eaux souterraines et de surface, la vie marine et la santé publique [4].

Il existe de nombreuses façons de traiter cette eau, y compris le traitement physique (comme la séparation par gravité ou la centrifugation), le traitement chimique (utilisation de substances pour séparer les composants) et le traitement biologique (en cas de pollution lumineuse), mais beaucoup de ces méthodes consomment beaucoup d'énergie ou nécessitent des produits chimiques supplémentaires [5].

Dans ce contexte, le distillateur solaire est une solution écologique et économique prometteuse pour traiter les eaux huileuses de pétrole. Il utilise la chaleur solaire, via une unité fermée ou un capteur concentré comme une parabole concave, pour évaporer l'eau contaminée. L'eau pure s'évapore tandis que les polluants lourds restent séparés, puis la vapeur est recondensée en eau réutilisable. Cette méthode, sans recours aux énergies fossiles ni additifs chimiques, est efficace et peu coûteuse. Ses performances peuvent être optimisées par une meilleure conception des condensateurs, l'emploi de matériaux à haute absorption thermique et un contrôle automatique des conditions internes. Adapté aux régions ensoleillées et semi-arides, ce procédé réduit l'impact environnemental de l'industrie pétrolière et favorise une gestion durable des ressources en eau.

2 Notions générales

2.1 L'eau nature et caractéristiques

L'eau est une substance transparente incolore, insipide et inodore formée par l'union de deux atomes d'hydrogène avec un atome d'oxygène (H₂O), et est l'élément de base sur lequel la vie sur Terre est basée. Il constitue environ 70 % de la masse du corps humain, entre dans la composition de la plupart des organismes vivants et est utilisé dans tous les processus biologiques, industriels et agricoles. On l'appelle souvent la « bouée de sauvetage » en raison de son rôle essentiel dans le maintien de l'équilibre écologique et biologique [8].

L'eau existe dans la nature sous trois formes physiques :

- L'état liquide comme dans les rivières, les mers, les océans et les eaux souterraines.
- À l'état solide comme dans la neige, les icebergs et les poteaux.
- Un état gazeux est comme la vapeur d'eau dans l'air qui est une composante du cycle hydrologique.

L'eau a des propriétés physiques et chimiques uniques qui la rendent essentielle à la vie : c'est un solvant général capable de dissoudre de nombreuses substances, a un point d'ébullition et de fusion approprié pour la vie et stocke une grande quantité de chaleur, ce qui en fait un régulateur efficace des températures à la surface de la Terre.

Bien que l'eau couvre plus de 70 % de la surface de la planète, seulement 2,5 % est douce, principalement sous forme de glace permanente ou d'eau souterraine profonde, tandis que seul un très petit pourcentage est disponible pour l'utilisation humaine (sous forme d'eau de surface ou souterraine facilement accessible). La disponibilité de l'eau potable est un défi mondial dans un contexte de croissance démographique, d'activité industrielle et de changement climatique. De nombreux pays sont confrontés à de graves pénuries d'eau, ce qui rend essentielles une bonne gestion, un bon traitement et l'utilisation de sources alternatives telles que le dessalement ou la réutilisation pour assurer la sécurité de l'eau pour les générations futures. Ainsi, l'eau n'est pas seulement un composé chimique, mais un élément existentiel et un pilier essentiel de toutes les activités de la vie, et constitue un axe vital dans les efforts de développement durable, le maintien de la santé publique et la réalisation de la sécurité alimentaire et économique.

2.2 Pollutions de l'eau :

La pollution de l'eau est l'un des problèmes environnementaux les plus graves qui menacent la santé humaine et l'écosystème, et elle signifie l'entrée de substances étrangères ou polluantes dans les masses d'eau (telles que les rivières, les mers, les lacs et les eaux souterraines), ce qui modifie leurs propriétés physiques, chimiques ou biologiques et les rend impropres à l'utilisation humaine, animale ou agricole. Ce type de pollution affecte directement les sources limitées d'eau douce, causant de graves dommages à la santé publique, à l'économie et à l'environnement [7].

Les sources de pollution de l'eau sont de deux types principaux :

- **Sources ponctuelles** : Ce sont celles qui peuvent être localisées avec précision, comme les eaux usées industrielles sortant des usines, ou les eaux usées non traitées déversées directement dans les rivières ou les mers.
- **Sources diffuses** : Il s'agit de celles qui sont difficiles à identifier avec précision, telles que les pluies torrentielles qui transportent avec elles les polluants agricoles, les pesticides et les engrais des champs aux cours d'eau.

Les sources les plus courantes de pollution de l'eau sont les suivantes :

- **Industries pétrolières et chimiques** : De grandes quantités d'eau huileuse et d'eau contenant des produits chimiques toxiques et des hydrocarbures lourds sont déversées dans l'environnement, et ce sont parmi les polluants les plus dangereux.
- **Assainissement** : Surtout lorsque des eaux usées non traitées sont déversées dans les rivières ou les mers, entraînant une grave pollution biologique et la propagation de maladies.
- **Déchets agricoles** : tels que les pesticides et les engrais chimiques, qui s'infiltrent dans les eaux souterraines ou sont emportés par l'eau de pluie dans les égouts de surface.
- **Les déchets solides et plastiques** : ils sont déversés dans les plans d'eau, ce qui entrave la vie marine et entraîne une pollution visuelle et chimique à long terme.
- **Déversements d'hydrocarbures** : résultant d'accidents de navires ou d'oléoducs, qui sont destructeurs pour l'environnement marin et peuvent nécessiter des décennies pour y remédier.
- **Activités minières** : l'eau contaminée par des métaux lourds tels que le mercure et le plomb est rejetée dans la nature sans traitement adéquat.

Cette pollution entraîne de nombreux effets négatifs, notamment : la détérioration de la qualité de l'eau, la mort des poissons et des organismes aquatiques, la menace pour la santé publique par le biais de maladies d'origine hydrique et la réduction de l'accès à l'eau potable, ce qui nécessite des efforts concertés pour adopter des techniques de traitement efficaces et des politiques environnementales strictes pour préserver cette ressource vitale.

2.3 Les eaux usées industrielles :

Les eaux usées industrielles sont parmi les types d'eau polluée les plus dangereux, car elles résultent de diverses activités industrielles qui utilisent l'eau dans les processus de fabrication, de refroidissement, de lavage ou dans le cadre de réactions chimiques, et leur composition varie selon le type d'industrie, car elles contiennent des polluants organiques tels que les huiles, les graisses et les solvants, et des polluants inorganiques tels que les métaux lourds, les sels et les produits chimiques toxiques, en plus des polluants thermiques résultant de l'utilisation de l'eau dans le refroidissement. Parmi les plus dangereuses de ces eaux figurent les eaux huileuses des industries pétrolières et gazières, qui contiennent des niveaux élevés d'hydrocarbures, de métaux lourds et de produits chimiques complexes, et présentent un grand danger pour l'environnement aquatique si elles sont rejetées sans traitement, car elles entraînent la destruction de la vie biologique, la pollution des eaux souterraines et de surface, et affectent négativement l'agriculture et la santé publique. Par conséquent, le traitement des eaux usées industrielles est d'une grande importance et comprend de multiples techniques, notamment le traitement physique tel que la séparation et la sédimentation, chimique tel que la neutralisation et la sédimentation chimique, le traitement biologique des polluants organiques, en plus du traitement thermique ou solaire, tel que la distillation solaire, une technique qui repose sur l'utilisation de la chaleur solaire pour évaporer l'eau polluée et la séparer des huiles et des substances toxiques, permettant l'accès à une eau pure qui peut être réutilisée de manière durable et respectueuse de l'environnement [4].

2.4 Les différents types d'eaux usées industrielles :

Les eaux usées industrielles au sein des unités de production sont classées en fonction de leurs usages en trois types principaux. Tout d'abord, l'eau publique, qui est l'eau utilisée à des fins non industrielles telles que la boisson, la baignade et les toilettes des travailleurs, est très similaire aux eaux usées domestiques dans sa composition.

Tout d'abord, l'eau de fabrication, qui est l'eau utilisée directement dans les processus de production industrielle, que ce soit comme solvant, agent de réaction ou nettoyage dans les

lignes de production, et qui est souvent contaminée par des produits chimiques, des métaux organiques et lourds qui varient selon la nature de l'industrie.

Deuxièmement, l'eau de refroidissement, qui est utilisée pour refroidir les équipements et les machines dans les usines, est généralement contaminée par des huiles, des matériaux résistants à la corrosion ou à haute température, ce qui en fait une source de pollution thermique.

Troisièmement, l'eau pour le lavage des sols, des moteurs et des machines, qui est produite par les processus de nettoyage dans l'environnement industriel et est saturée d'huiles, de graisses, de poussières et de résidus de produits chimiques et d'huiles industrielles.

Enfin, les eaux huileuses, qui sont les plus dangereuses, principalement produites par l'extraction, le transport et le raffinage du pétrole et du gaz, et contiennent des niveaux élevés d'hydrocarbures.[8]

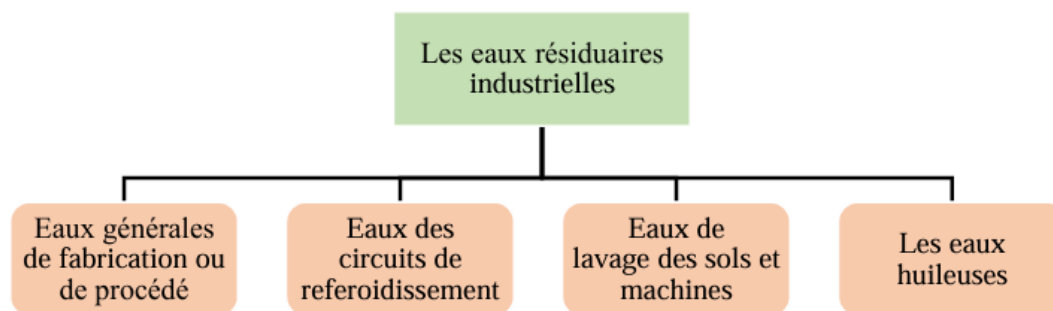


Figure 1.1 : Organigramme de différentes classes des eaux usées industriel [8].

2.5 Les eaux huileuses

2.5.1 Définition des eaux huileuses :

L'eau huileuse est un type d'eaux usées industrielles qui contient des pourcentages variables d'huiles ou d'hydrocarbures, et qui est principalement produite à partir de processus associés aux industries pétrolières et gazières, tels que l'extraction, la production, le traitement, le raffinage, le transport et le nettoyage industriel. Cette eau est un sous-produit inévitable des activités pétrolières, où l'eau est utilisée à différents stades de traitement et se mélange aux huiles et à leurs dérivés, formant un mélange complexe d'eau et de matière organique.

Les eaux huileuses sont classées en fonction de la nature de la distribution de l'huile dans l'eau en quatre types principaux:

Chapitre I : Les eaux huileuses pétrolier et techniques des traitements

Huile libre (flottante) : C'est l'huile qui ne se dissout pas dans l'eau et ne réagit pas chimiquement avec elle, mais reste sous la forme d'une couche qui flotte à sa surface en raison de la différence de densité entre l'huile et l'eau. Ce type d'eau huileuse est l'un des types les plus simples en termes de séparation et de traitement, car l'huile peut être éliminée à l'aide de moyens mécaniques simples tels que des séparateurs ou des barrières à huile.

Huile dispersée : Dans ce type, l'huile est distribuée sous forme de petites gouttelettes à l'intérieur de l'eau à la suite d'une agitation mécanique ou de perturbations à l'intérieur des tuyaux ou des réservoirs. Les gouttelettes d'huile restent coincées dans l'eau pendant un certain temps et sont difficiles à séparer par les méthodes conventionnelles, ce qui nécessite l'utilisation de moyens plus avancés tels que les matériaux collectés ou la séparation centrifuge.

Huile émulsionnée : Il se forme lorsque l'huile réagit avec des produits chimiques ou se dépose à l'intérieur de l'eau par des facteurs physiques, et c'est une émulsion stable qui ne peut pas être facilement séparée. Cette stabilité est due à la présence d'émulsifiants ou à la présence d'impuretés qui affectent la tension superficielle. La séparation de ce type d'huile nécessite des techniques particulières telles qu'un traitement chimique ou l'utilisation de micro membranes (ultrafiltration).

Huile dissoute : C'est de l'huile qui est dissoute au niveau moléculaire dans l'eau, de sorte qu'elle ne peut pas être vue ou séparée par des moyens mécaniques simples ou même chimiques. Ce type d'huile nécessite un traitement très poussé tel que la distillation, l'oxydation ou l'adsorption à l'aide de matériaux spéciaux [10].

Tableau 1.1: Taille des gouttelettes dans le mélange [9].

Type d'huile	Diamètre des gouttelettes D_g (μm)
Huile libre (flottante)	≥ 150
Huile dispersée	0-150
Huile émulsifiée	$2 \leq 20$
Huile dissoute	≤ 5

2.5.2 Méthodes de traitement des eaux huileuses :

Il existe de nombreuses méthodes de traitement des eaux huileuses en fonction de la nature des polluants et de la concentration et du type d'huiles, et ces méthodes peuvent être classées en quatre grandes catégories : les méthodes physiques ou mécaniques, les méthodes chimiques, les méthodes biologiques et le traitement thermique à l'aide de concentrateurs solaires.

Tout d'abord, la méthode physique ou mécanique repose sur des propriétés physiques simples telles que la densité et la taille des particules pour séparer l'huile de l'eau. Cette méthode comprend l'utilisation de séparateurs d'huile, de systèmes de refroidissement, de centrifugeuse et de bassins de filtration. Il est particulièrement efficace avec de l'huile libre et flottante, mais n'est pas suffisant lorsqu'il y a des émulsions ou des huiles dissoutes [10].

Deuxièmement, la méthode chimique, utilisée lorsque les émulsions doivent être rompues ou que les liaisons chimiques entre l'huile et l'eau doivent être rompues. Cette méthode implique l'ajout de produits chimiques tels que des coagulants, des coagulants et des désémulsifiants, qui aident à séparer l'huile et les micro suspensions et à améliorer la sédimentation ou la flottabilité.

Troisièmement, la méthode biologique, qui repose sur l'utilisation de micro-organismes capables de décomposer les composés organiques huileux et de les convertir en substances inoffensives, telles que le dioxyde de carbone et l'eau. Cette méthode est principalement utilisée pour le traitement de l'eau à faible concentration d'huile, et est souvent complétée après des traitements physiques et chimiques. Cette méthode nécessite des conditions environnementales spécifiques pour garantir l'efficacité des micro-organismes.

Enfin, le traitement thermique à l'aide de concentrateurs solaires, une technique moderne et durable qui repose sur la concentration de la lumière du soleil à l'aide de miroirs ou de plats concaves pour élever la température de l'eau huileuse jusqu'au point de s'évaporer. Au cours du processus d'évaporation, la vapeur d'eau monte et se condense dans un système séparé, laissant derrière elle des huiles lourdes et des impuretés. Cette méthode est respectueuse de l'environnement, en particulier dans les zones ensoleillées, car elle ne nécessite pas de sources d'énergie traditionnelles et produit de l'eau pure et réutilisable. Il est également efficace pour séparer les huiles émulsionnées ou même partiellement dissoutes, et est utilisé comme solution complémentaire ou finale pour le traitement des eaux industrielles dans le secteur pétrolier et gazier [11].



Figure 1.2 Concentrateur parabolique [9].

2.6 Distillateurs :

Un distillateur est un appareil ou un système technique utilisé pour purifier des liquides et séparer leurs composants en fonction de leurs différents points d'ébullition, par un processus connu sous le nom de « distillation ». Cette technique est considérée comme l'une des méthodes physiques les plus anciennes et les plus simples de séparation des matériaux, car elle repose sur le chauffage du liquide jusqu'à ce qu'il atteigne le point d'ébullition de l'un de ses composants, ce qui conduit à sa transformation en vapeur. Cette vapeur est ensuite dirigée dans un condenseur, qui est une partie du distillateur dont la température est basse, et la vapeur se condense en un liquide pur qui est recueilli dans un récipient spécial [19].

Distiller est largement utilisé dans de nombreux domaines. Par exemple, dans le dessalement, le distillateur est utilisé pour séparer l'eau pure des sels, minéraux et autres polluants, ce qui la rend apte à la consommation ou à un usage industriel. Dans l'industrie chimique, il est utilisé pour séparer les produits chimiques purs des solvants ou des impuretés. Il est également utilisé dans la production d'huiles essentielles, de spiritueux et de certaines applications environnementales telles que le traitement des eaux industrielles polluées, en particulier les eaux huileuses résultant de la production de pétrole et de gaz.

Il existe de nombreux types de distillateurs, dont certains sont simples et dépendent d'une source de chaleur traditionnelle, et d'autres sont avancés, tels que les distillateurs solaires qui utilisent l'énergie solaire concentrée pour générer la chaleur nécessaire au processus d'évaporation. Ce dernier est un exemple de l'utilisation d'énergies renouvelables pour traiter l'eau de manière durable et respectueuse de l'environnement, en particulier dans les zones où les sources d'eau douce sont rares et où le rayonnement solaire est fort. En bref, le distillateur est un appareil essentiel pour la séparation et la purification des liquides, utilisé dans un large éventail d'applications scientifiques, industrielles et environnementales, et gagne en importance à la lumière des défis environnementaux [12].

2.6.1 L'histoire de Distillateur solaire :

Les distillateurs solaires sont apparus comme une solution durable pour le dessalement à l'aide de l'énergie solaire, datant de plusieurs siècles, avec des développements significatifs au cours des deux derniers siècles. Les archives historiques indiquent que le philosophe grec Aristote (au IV^e siècle av. J.-C.) a décrit le processus de condensation de la vapeur, mais les applications pratiques ont commencé au XVI^e siècle lorsque les marins ont utilisé des couvercles en verre pour convertir l'eau de mer en eau douce. Cependant, la première conception pratique du distillateur solaire remonte à 1872, lorsque le scientifique Charles Wilson a construit un distillateur solaire dans la ville chilienne de Las Salinas, avec une capacité de production d'environ 23 litres par jour, dans le but de fournir de l'eau potable aux mineurs de nitrate.

Pendant la Seconde Guerre mondiale (1939-1945), l'intérêt pour les distillats solaires s'est accru après que les forces militaires américaines et britanniques aient mis au point des modèles portables de dessalement de l'eau de mer pour les soldats sur des îles éloignées.

Dans les années cinquante et soixante, des scientifiques tels que le Dr Maria Teller et le Dr Harry Teller ont mené des recherches approfondies pour améliorer l'efficacité des distillateurs solaires, en introduisant des améliorations telles que des surfaces absorbantes sombres et du verre incliné pour augmenter le taux d'évaporation.

Les années soixante-dix ont vu un boom de la recherche scientifique sur le dessalement de l'eau solaire en raison de la crise pétrolière mondiale, ce qui a incité des organisations telles que la NASA et l'Organisation mondiale de la santé à développer des distillateurs solaires avancés pour une utilisation dans les zones désertiques. Dans les années quatre-vingt et quatre-vingt-dix, des technologies telles que les distillateurs à plusieurs étages et les systèmes de condensation sous vide ont été incorporées pour augmenter l'efficacité. Aujourd'hui, les distillateurs solaires sont largement utilisés au Moyen-Orient et en Afrique du Nord ainsi que dans certaines parties de l'Inde et de l'Australie, et des recherches sont en cours pour les combiner avec des cellules solaires photovoltaïques ou des nanomatériaux afin d'améliorer les performances. Bien que leur productivité soit encore limitée par rapport aux usines de dessalement classiques, elle reste une solution prometteuse pour les zones reculées aux ressources limitées [13].

2.6.2 Définition

Un distillateur solaire est un dispositif technique qui utilise l'énergie solaire pour convertir l'eau salée ou polluée en eau pure potable. Le distillateur solaire est un système simple et efficace utilisé pour dessaler ou purifier l'eau basé sur l'énergie solaire comme source de chaleur primaire, et il est considéré comme une solution durable et environnementale pour traiter l'eau polluée ou salée, en particulier dans les zones reculées ou celles souffrant d'une pénurie de ressources énergétiques [20]. Cet appareil se compose généralement d'un bassin contenant l'eau à traiter, d'une surface d'absorption de couleur foncée qui aide à chauffer l'eau et d'un couvercle incliné transparent qui laisse passer la lumière du soleil et piège la vapeur produite par évaporation. Lorsque l'eau est chauffée par la chaleur du soleil, la partie pure de celle-ci s'évapore puis se condense sur la surface intérieure du couvercle incliné, de sorte que les gouttelettes d'eau distillée s'écoulent dans un canal de drainage où l'eau pure est recueillie, tandis que les impuretés, les huiles et les métaux lourds restent dans le bassin. Cet appareil est utilisé efficacement dans le traitement des eaux huileuses générées par l'industrie pétrolière, car il sépare l'eau des huiles et des polluants sans avoir besoin d'additifs chimiques ou d'énergie électrique, ce qui en fait une solution économique et respectueuse de l'environnement.

Les performances de cet appareil peuvent être améliorées en utilisant des miroirs ou des paraboles solaires concaves pour concentrer la chaleur du soleil et accélérer le processus d'évaporation, augmentant ainsi son efficacité et le rendant adapté à une utilisation dans les petits et moyens projets industriels [3].

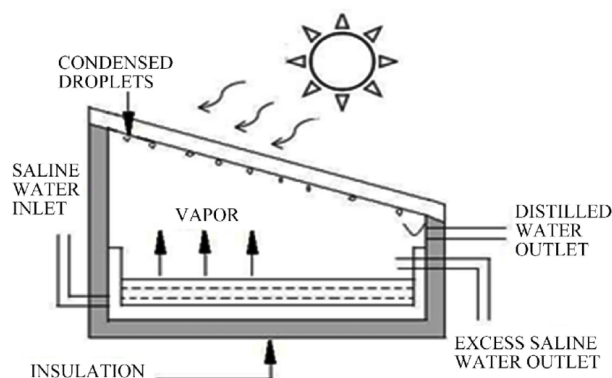


Figure 1.3 Principe de fonctionnement d'un distillateur solaire [9].

2.6.3 Types de distillateurs solaires :

Il existe plusieurs types de distillateurs solaires qui diffèrent en termes de conception, d'efficacité et de méthode de travail, notamment:

➤ Distillation à effet de serre solaire :

Ce type est considéré comme l'un des plus simples et des plus répandus. Sa structure est similaire à la forme d'une serre agricole, où la baignoire en verre ou en plastique transparent est recouverte d'un couvercle incliné qui permet à la lumière du soleil de passer à l'intérieur. La température de l'eau à l'intérieur de l'aquarium est augmentée par l'énergie solaire, de sorte que l'eau s'évapore et se condense sur la surface intérieure du couvercle, puis s'accumule dans des canaux dédiés. Ce système est peu coûteux et facile à entretenir, et est utilisé pour dessaler de l'eau salée ou contaminée en petites quantités.

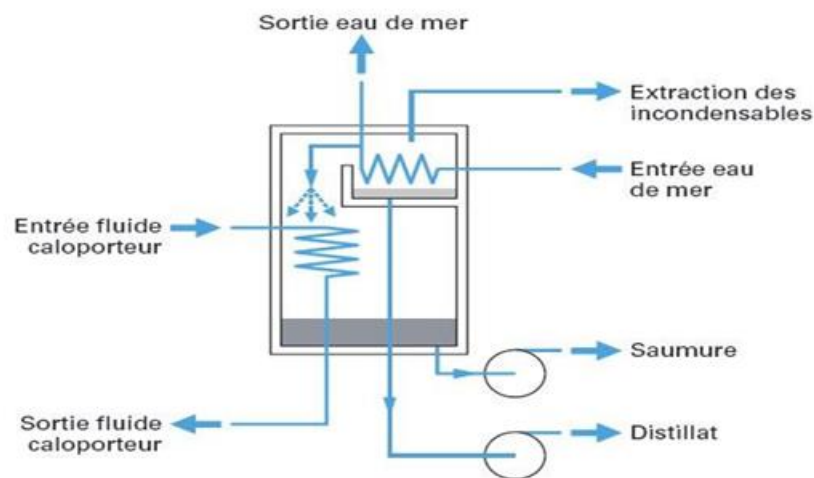


Figure 1.4 Distillateur à simple effet [10].

➤ Distillation solaire à effets multiples :

Il s'agit d'un système plus sophistiqué et plus efficace, car il repose sur l'utilisation d'une série d'étapes ou d'"effets" dans lesquels la chaleur générée par la condensation est réutilisée à l'étape précédente pour évaporer l'eau à l'étape suivante. Cette fréquence de consommation d'énergie réduit les pertes de chaleur et améliore la productivité de l'eau distillée par rapport à la distillation simple. Ce type peut être combiné avec des systèmes de concentration solaire tels que des paraboles concaves ou des miroirs cylindriques, ce qui le rend adapté au traitement de grandes quantités d'eau, en particulier dans les utilisations industrielles ou communautaires. Les deux types visent à séparer l'eau propre des impuretés et des polluants en utilisant de l'énergie propre, et sont considérés comme des solutions durables pour le traitement de l'eau, en particulier dans les zones souffrant de rareté des ressources en eau ou de pollution industrielle [14].

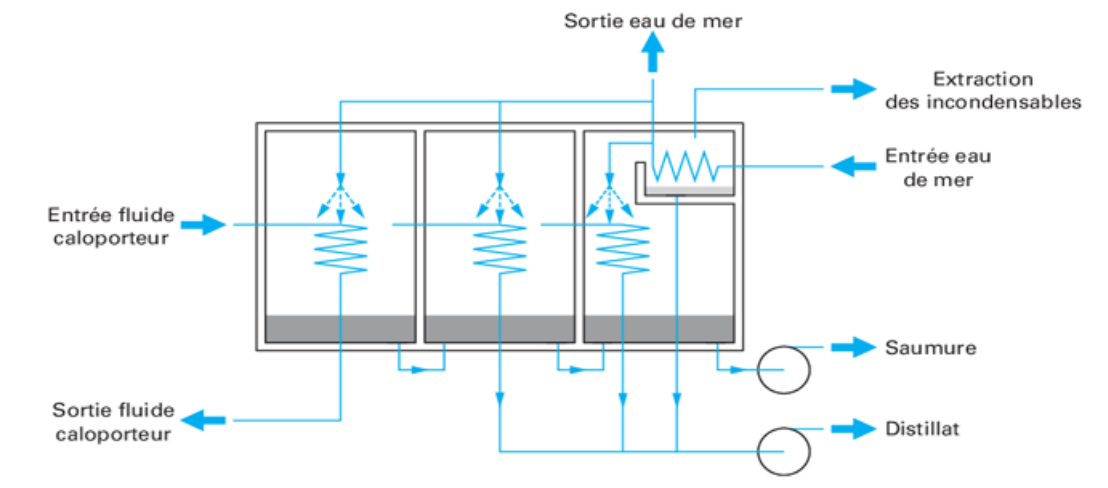


Figure 1.5 Distillateur à multiple effets [9].

➤ Distillation solaire améliorés à l'aide de concentrateurs solaires :

Les systèmes de distillation solaire améliorés à l'aide de concentrés solaires sont parmi les technologies de traitement de l'eau les plus efficaces et les plus durables, basées sur le principe de focaliser le rayonnement solaire sur une petite zone à l'aide d'outils optiques tels que la parabole, les auge paraboliques ou les lentilles de Fresnel. Cette technologie vise à augmenter la température de l'eau contaminée, telle que les eaux huileuses industrielles provenant des activités d'extraction et de raffinage du pétrole et du gaz, à des degrés bien supérieurs à ceux obtenus par de simples systèmes de distillation solaire, accélérant ainsi le processus d'évaporation et améliorant la productivité. Dans ce système, la lumière du soleil réfléchi ou réfractée est dirigée avec précision vers un point focal ou une ligne focale dans laquelle est placée une unité de chauffage contenant l'eau à traiter. En raison de la chaleur concentrée, l'eau s'évapore en laissant derrière elle des huiles, des minéraux et d'autres polluants, et la vapeur résultante est ensuite dirigée vers un condenseur dans lequel elle est convertie en eau pure recueillie dans des réservoirs spéciaux. Ces systèmes sont respectueux de l'environnement, s'appuient sur une source d'énergie naturelle et renouvelable, réduisent les émissions de carbone et ne nécessitent aucun apport énergétique externe par rapport aux systèmes conventionnels.

Cette technologie est de plus en plus utilisée dans les domaines industriels, en particulier dans le traitement des eaux très polluées telles que les eaux huileuses, en raison de ses solutions économes en termes de coûts et d'énergie, ainsi que de sa contribution à la réduction de l'empreinte environnementale des industries lourdes [15].

Malgré certains défis techniques tels que la nécessité d'utiliser des systèmes de suivi solaire pour atteindre une efficacité maximale et l'impact des performances sur les conditions météorologiques, les développements récents dans les domaines du stockage thermique et des matériaux réfléchissants améliorent la faisabilité et la diffusion de ces systèmes dans divers environnements, en particulier dans les zones à fort rayonnement solaire.

2.7 Histoire des concentrateurs solaires :

La technologie de distillation solaire améliorée à l'aide de concentrés solaires est une innovation relativement récente, mais elle est basée sur des concepts anciens enracinés dans les civilisations anciennes qui ont observé le phénomène d'évaporation et de condensation causé par la chaleur du soleil. Bien que ces principes aient été primitivement utilisés pour collecter l'eau potable, la première application réelle d'un distillateur solaire connu remonte à 1872 à Las Salinas, au Chili, où l'ingénieur Charles Wilson a construit un énorme distillateur solaire pour fournir aux mineurs de l'eau douce à partir de l'eau de mer, en utilisant une serre solaire de milliers de mètres carrés. L'utilisation de concentrés solaires, tels que les miroirs concaves et les lentilles, a commencé à émerger au milieu du XXe siècle, en particulier dans les années cinquante et soixante du siècle dernier, lorsque des centres de recherche scientifique en Europe et en Amérique ont commencé les premières expériences sur la concentration du rayonnement solaire en utilisant des techniques optiques pour le chauffage et la production d'électricité. Pendant la crise énergétique des années soixante-dix, Ces recherches se sont accélérées pour inclure de nouvelles applications, notamment le traitement de l'eau et le dessalement, conduisant à la conception de systèmes de distillation solaire plus efficaces alimentés par des miroirs paraboliques ou des paraboles solaires concaves capables d'atteindre des températures élevées.

Au début du XXIe siècle, grâce aux progrès des matériaux, de l'énergie et des systèmes intelligents, ces systèmes sont devenus plus précis et plus efficaces, et ont commencé à être utilisés dans le traitement des eaux usées industrielles et des eaux huileuses des industries pétrolières, en particulier dans les pays à fort rayonnement solaire comme l'Inde, les Émirats arabes unis, l'Arabie saoudite et le Maroc. Aujourd'hui, cette technologie représente un pilier clé des projets de développement durable, notamment avec la tendance mondiale vers les énergies propres, et son utilisation devrait se développer à l'avenir grâce au développement continu des systèmes de suivi solaire et du stockage de l'énergie thermique [16].

Il existe deux types de concentrateurs solaires :

- ✓ Concentrateurs linéaires
- ✓ Concentrateurs ponctuels

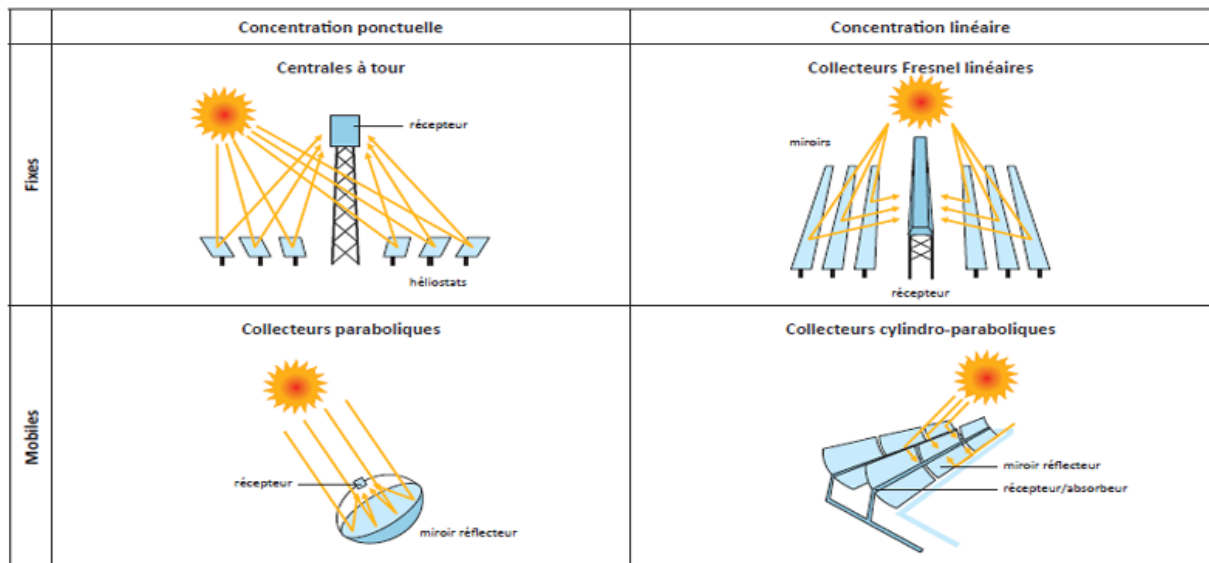


Figure 1.6 Les différents types des concentrateurs solaires [9].

2.7.1 Concentrateurs solaires paraboliques :

Un Concentrateur solaire parabolique est un type de miroir réfléchissant doté d'une surface concave (incurvée intérieure), conçu pour focaliser le rayonnement solaire en un seul point connu sous le nom de « point focal ». Ces miroirs sont généralement faits de matériaux hautement réfléchissants tels que l'aluminium ou l'argent recouverts d'une surface en verre ou en plastique renforcé, et sont utilisés dans les applications solaires en raison de leur capacité à collecter de grandes quantités de lumière solaire et à les convertir en énergie thermique ou électrique. Son efficacité dépend de la précision de sa courbure et de la qualité de sa surface réfléchissante, ce qui permet la concentration de la lumière du soleil avec une forte intensité. Ces miroirs sont utilisés dans les centrales solaires à concentration (CSP), les fours solaires, les systèmes de chauffage et même dans la recherche scientifique qui nécessite des températures élevées. Il est conçu pour résister à des conditions météorologiques extrêmes, ce qui en fait un choix durable pour la production d'énergie propre [11].

2.7.2 Géométrie parabolique :

Une parabole est l'ensemble des points situés à distance égale d'une droite fixe (D) appelée directrice, et un point fixe (F) appelé foyer. L'intersection de la parabole et de son axe est le sommet (V), qui est exactement intermédiaire entre le foyer et la directrice [9].

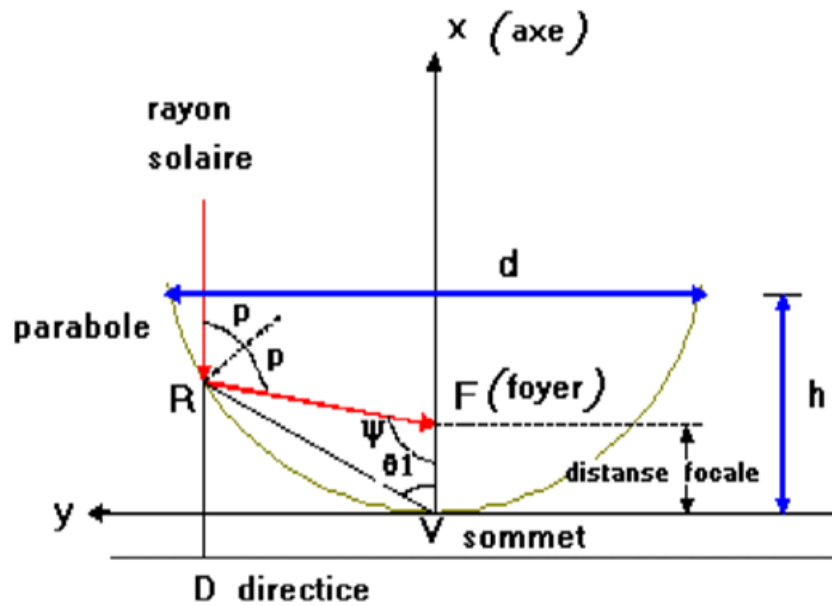


Figure 1.7 Propriétés géométriques de la parabole.

2.7.3 Dimensions concentrateur parabolique :

Dans le but d'améliorer l'efficacité des systèmes d'énergie solaire, le système de centre solaire concave est une solution technique avancée qui repose sur la focalisation du rayonnement solaire à un point focal pour atteindre les taux d'absorption d'énergie thermique les plus élevés. L'importance d'étudier les différentes dimensions de ce système réside dans l'identification des facteurs affectant ses performances, que ce soit d'un point de vue technique comme le diamètre du miroir, la distance focale et l'angle de réflexion, ou d'un point de vue thermique comme l'efficacité de transfert de chaleur et les pertes d'énergie, en plus des aspects environnementaux et économiques associés à sa conception et à son fonctionnement. En analysant soigneusement ces dimensions, il est possible de développer des conceptions plus efficaces qui augmentent la productivité du système et réduisent ses coûts d'exploitation, ce qui en fait une option durable pour soutenir la transition vers une énergie propre.

➤ Equation d'une parabole :

Si la parabole est donnée par son foyer F qui a pour coordonnées $(0, \frac{p}{2})$ et une directrice, qui a pour équation $y = (-\frac{p}{2})$ (on appelle p : Paramètre de la parabole), l'équation de la parabole sera :

$$y = \frac{x^2}{(2 \times p)} \dots\dots\dots (01)$$

➤ **Caractéristiques d'une parabole :**

Deux paramètres permettent de décrire complètement une parabole et de fixer ses :

- **Le coefficient « p »** est responsable de l'ouverture de la parabole, il intervient dans l'équation de la parabole génératrice du parabolöide. Plus le paramètre "p" augmente, plus l'ouverture de la parabole est petite donc la parabole devient plate, et inversement plus « p » diminue plus l'ouverture est grande et la parabole devient profonde. Ce paramètre règle donc la profondeur de la parabole.
- **Le diamètre D** : permet, une fois p déterminé, de fixer les dimensions de la parabole. Vu de haut, la parabole présente une ouverture circulaire dont le diamètre est D.

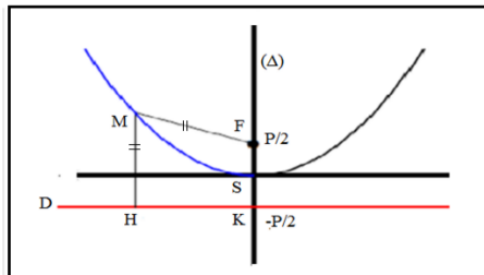


Figure 1.8 Schéma géométrique du concentrateur Solaire parabolique (1).

➤ **La profondeur d'une parabole (taille) :**

La taille de la courbe ou la profondeur de la parabole peut être définie comme la distance maximale depuis le sommet jusqu'à une ligne tracée à travers l'ouverture de la parabole.

Elle est définie par :

$$h = \frac{D^2}{16f} \dots\dots\dots(02)$$

D : diamètre de la parabole.

f : distance focale.

$$f = \frac{P}{2} \dots\dots\dots (03)$$

➤ **Surface d'une parabole :**

La surface de l'espace enfermé entre une parabole et une ligne à travers son ouverture est donnée par :

$$Sx = 2/3 \pi \sqrt{2f} [(2h + 2f)^{3/2} - 2f^{3/2}] \dots\dots\dots (04)$$

➤ **Surface d'ouverture d'une parabole :**

La surface d'ouverture d'une parabole est la surface du disque supérieur de la parabole, elle se calcule par la formule suivante. $A_p = \pi \times \frac{D^2}{4}$

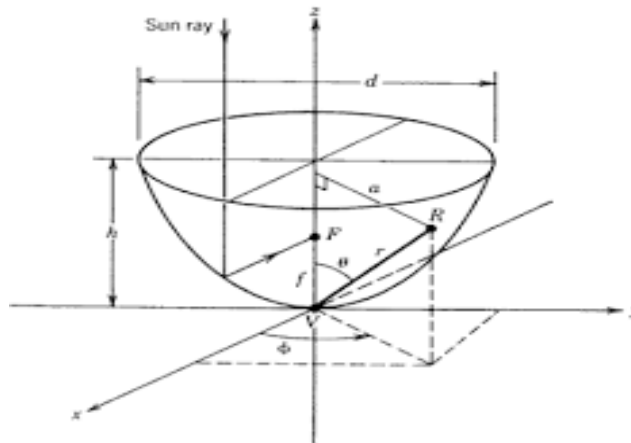


Figure 1.9 Schéma géométrique du concentrateur Solaire parabolique (2).

➤ **Angle d'ouverture d'une parabole :**

L'angle d'ouverture d'une parabole augmente avec la diminution de la distance focale et devient plus petit avec l'augmentation de f. Plus f augmente, plus l'angle est petit, donc la parabole est relativement plate.

$$\tan \psi_p = \frac{1}{(d/8h) - (2h/d)} \dots\dots\dots (06)$$

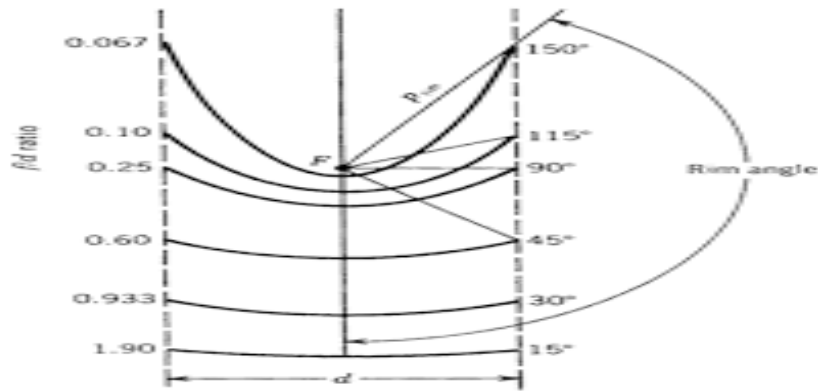


Figure 1.10 Angle d'ouverture d'une parabole en fonction de la distance focale.

2.8 Absorbeur

Le récepteur doit être capable d'absorber efficacement le flux solaire concentré et de le convertir en énergie thermique, qui est ensuite transférée à un fluide spécifique (liquide ou gaz). Pour ce faire, la surface du récepteur doit présenter plusieurs caractéristiques essentielles

- Une excellente conductivité thermique afin de faciliter le transfert de chaleur vers le fluide.
- Un facteur d'absorption aussi proche de l'unité que possible pour maximiser l'absorption du rayonnement solaire.
- Une résistance chimique élevée vis-à-vis du fluide utilisé pour assurer une durabilité à long terme.

Il est crucial que le récepteur soit fabriqué en métal, car seuls les métaux présentent des coefficients de conduction thermique élevés. Par exemple, le cuivre affiche une conductivité thermique de 360 W/m.K, l'aluminium de 200 W/m.K, et l'acier de 60 W/m.K. Ainsi, l'utilisation d'un matériau métallique garantit une efficacité optimale dans le transfert de chaleur du récepteur au fluide de travail.

3 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons abordé sur les types de distilles solaires, leurs propriétés et les composants de l'appareil que nous ferons avec le processus de distillation.

Chapitre II :

**Dimensionnement d'un
distillateur solaire avec un
concentrateur parabolique**

1 Introduction

Face aux défis environnementaux croissants liés à l'expansion industrielle, la contamination de l'eau par les hydrocarbures industriels est devenue un problème environnemental crucial, notamment dans les secteurs du pétrole et des produits chimiques. De nombreuses installations industrielles rencontrent des difficultés pour traiter ces eaux par des méthodes traditionnelles, en raison de la complexité de la séparation des composants eau et huile et des coûts d'exploitation élevés des systèmes thermiques utilisant des combustibles fossiles.

Parallèlement, le monde assiste à une tendance croissante vers l'utilisation des énergies renouvelables comme solutions alternatives et durables pour le traitement de l'eau, notamment l'énergie solaire, en raison de sa gratuité, de sa renouvelabilité et de son respect de l'environnement.

Les systèmes de distillation solaire constituent l'une des applications les plus importantes dans ce domaine, notamment lorsqu'ils sont associés à des technologies améliorant les performances thermiques, telles que les concentrateurs cylindro-paraboliques, qui permettent de capter et de concentrer le rayonnement solaire en un point unique, augmentant ainsi la température et l'efficacité de l'évaporation.

Dans les régions désertiques, comme le sud de l'Algérie, on enregistre des niveaux très élevés de rayonnement solaire direct, dépassant parfois 2 200 kWh/m² par an. Ces régions constituent donc un environnement idéal pour l'application de solutions thermiques à concentration solaire (CSP).

Sur la base de ces données, ce travail vise à concevoir et développer un système de distillation solaire intelligent basé sur un concentrateur solaire parabolique et un échangeur de chaleur à serpentin, équipé d'une unité de contrôle électronique, pour traiter efficacement les eaux huileuses sans recourir aux sources d'énergie conventionnelles.

2 Traitement des eaux huileuses par concentrateur parabolique

Les eaux huileuses générées par les activités industrielles, notamment dans le secteur pétrolier et gazier, sont l'un des polluants environnementaux les plus dangereux. Elles contiennent des composés organiques lourds et complexes appelés « liquides lourds », tels que des hydrocarbures à longue chaîne, des graisses, des dérivés soufrés et des métaux lourds. Ces liquides lourds se caractérisent par leur densité élevée et leur résistance à la décomposition, ce

qui les rend insensibles aux traitements physiques ou chimiques conventionnels. Difficiles à séparer de l'eau par la seule gravité ou la flottabilité, leur désintégration ou leur extraction nécessitent souvent des additifs ou une énergie considérable.

Ces caractéristiques engendrent de multiples défis environnementaux et industriels, notamment des coûts d'exploitation élevés, la difficulté de respecter des normes environnementales strictes et l'accumulation de polluants dans le milieu naturel en cas d'élimination inappropriée. De plus, certaines méthodes de traitement thermique conventionnelles libèrent des émissions toxiques ou dégradent la qualité de l'eau après traitement.

Face à ces défis, la distillation solaire apparaît comme une solution innovante et écologiquement durable pour traiter ce type d'eau, notamment lorsqu'elle est complétée par un miroir parabolique. Ce centre capte et concentre le rayonnement solaire sur un tube récepteur de chaleur, générant des températures élevées capables d'évaporer l'eau pure du mélange huileux, laissant les particules lourdes sous forme de sédiments concentrés. Cela permet de séparer efficacement l'eau des polluants lourds sans aucune émission de carbone, en utilisant directement l'énergie solaire, notamment dans les zones à fort rayonnement solaire.

Cette solution, qui allie technologie et environnement, constitue un modèle efficace de traitement des eaux industrielles polluées, propre et économique, répondant aux exigences du développement durable [17].

2.1 Provenance des huiles usées :

Les principales sources des huiles usées sont : les usines de raffinage du pétrole, les industries pétrochimiques, les usines de fabrication et de transformation de l'acier, les installations portuaires et les navires, les industries alimentaires, les stations-service, etc. Toutes ces huiles peuvent être classées en plusieurs groupes dont les trois qui seront traités dans cette étude : les huiles de coupe, les huiles de trempage et les huiles lubrifiantes. L'emploi antérieur des huiles nous informe sur leur composition. On y retrouve, à peu de chose près, toujours les mêmes constituants mais à des concentrations différentes.

2.2 Composition :

Les huiles usées peuvent être acides ou basiques. Leur pH varie entre 1 et 12. On y retrouve des matières en suspension, de diamètre allant du submicron à quelques millimètres. La concentration de ces matières en suspension peut aller jusqu'à 450 mg/L (BARTHER et BOSSERT, 1984). La densité de ces matières est plus élevée que celle de l'eau, cependant il arrive souvent que des gouttelettes d'huile de densité plus légère que l'eau s'accrochent aux solides en suspension et constitue ainsi un floc de densité plus légère que l'eau. Les huiles usées contiennent des matières minérales et organiques solubles dans le mélange. Les matières minérales sont composées de particules chimiques oxydantes ou réductrices, de métaux et de composés toxiques.

Les matières organiques sont, pour leur part biodégradable ou non-biodégradables et peuvent contenir des produits toxiques. Les métaux lourds les plus souvent rencontrés sont : le mercure (Hg), le cadmium (Cd), le cuivre (Cu), le zinc (Zn), le plomb (Pb), et le chrome (Cr). Des études ont démontré que la concentration de métaux lourds dans les effluents d'eau huileuse des usines de pétrole BP s'est avérée faible (Varjani et al. 2019)[17]. De plus, les auteurs n'ont observé aucun effet écologique négatif aux différents sites de déversement.

Tableau 1.2 les concentrations types de certains polluants d'une huile lubrifiante usée.[18]

POLLUANTS	CONCENTRATION (mg/L)
Al	10 - 30
Cu	5 - 120
Fe	150 - 800
Pb	960 - 2070
Si	10 - 240
Sn	30
Na	20 - 110
Ba	10 - 900
Ca	1160 - 2690
Zn	680 - 1360
Mg	10 - 420

3 La distillation solaire comme option propre et durable :

Compte tenu des contraintes environnementales et des coûts élevés associés aux traitements traditionnels des eaux huileuses, la distillation solaire apparaît comme une solution prometteuse et durable, alliant efficacité environnementale et rentabilité économique. Cette technologie repose sur le principe de la séparation thermique : l'eau est évaporée du mélange huile-eau sous l'effet de la chaleur. La vapeur ainsi obtenue est ensuite condensée pour

produire de l'eau pure, tandis que les composés lourds tels que les huiles et les graisses restent dans le réservoir d'origine.

Le concentrateur cylindro-parabolique est l'une des méthodes les plus efficaces pour convertir l'énergie solaire en chaleur à haute température. Ce dispositif concentre les rayons du soleil à travers un miroir parabolique sur un tube métallique (généralement en cuivre ou en acier) traversé par le fluide à chauffer. Grâce à cette structure, des températures supérieures à 120 °C peuvent être facilement atteintes, ce qui est suffisant pour évaporer l'eau sans nécessiter de source d'énergie supplémentaire.

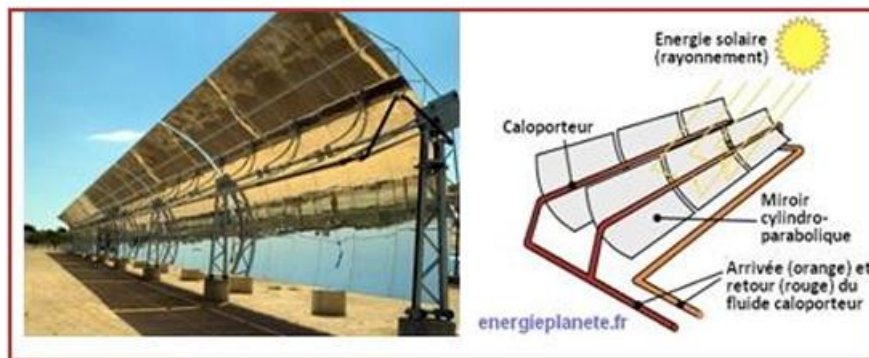


Figure 2.1 : Concentrateur cylindro-parabolique [6].

4 Vers une station thermique intelligente pour le traitement des eaux huileuses :

Compte tenu du rôle essentiel de la distillation solaire comme méthode propre et durable de traitement des eaux huileuses, notamment dans les zones riches en rayonnement solaire comme le désert algérien (Ouargla), il est apparu nécessaire de développer une installation thermique intégrée basée sur la concentration de l'énergie solaire, utilisant des technologies de contrôle électronique intelligentes pour garantir des performances précises et stables.

Cette installation utilise un concentrateur parabolique qui concentre le rayonnement solaire sur un tube récepteur en cuivre spiralé (en forme d'échangeur de chaleur spiralé) placé au foyer, où l'eau huileuse circulant à l'intérieur est chauffée. Grâce à sa conductivité thermique élevée, le cuivre permet un transfert de chaleur rapide et efficace au liquide, augmentant progressivement la température du mélange eau-huile jusqu'à atteindre le point de vaporisation. Les molécules d'eau se séparent ensuite sous forme de vapeur, laissant derrière elles les composés organiques lourds et l'huile.



Figure 2.2 installation thermique intégrée basée sur la concentration de l'énergie solaire.

Ce système ne se limite pas aux seuls aspects thermiques ; il est optimisé par un système de contrôle électronique intelligent, développé à l'aide d'une carte Arduino nanométrique.



Figure 2.3 un système de contrôle électronique intelligent à l'aide d'une carte Arduino nanométrique.

Ce système est connecté à un ensemble de capteurs thermiques installés à des points stratégiques : un dans le réservoir d'eau huileuse avant son entrée dans le tube, et un autre à l'extrémité du tube après chauffage.



Figure 2.4 Connexion des capteurs de température au niveau de système.

La carte est programmée pour réagir à ces données thermiques en temps réel, ouvrant et fermant automatiquement des vannes électroniques en fonction de la température du fluide. Le mélange ne peut ainsi sortir de l'échangeur de chaleur que lorsqu'une certaine température (par exemple, 105 ou 110 °C) est dépassée, ce qui est suffisant pour produire la vapeur nécessaire à la distillation.

La mise en œuvre d'une telle installation ne nécessite pas d'infrastructure importante, ce qui permet de l'installer dans des laboratoires universitaires ou comme station mobile de terrain pour réaliser des expériences sur divers échantillons d'eaux huileuses. Le contrôle des entrées et des conditions de fonctionnement permet d'améliorer l'efficacité de la distillation et d'obtenir des résultats précis, permettant ainsi le déploiement de cette technologie dans de futures installations industrielles à forte empreinte environnementale.

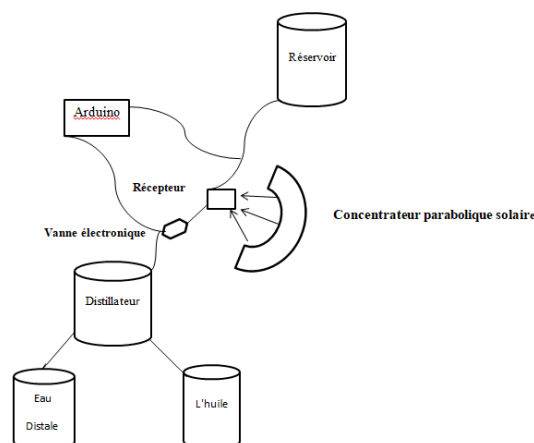


Figure 2.5 Montage de fonctionnement d'un distillateur solaire à l'aide d'un concentrateur parabolique.

5 Le système de contrôle électronique : le cœur intelligent de la centrale :

Le système de contrôle électronique, composé d'une carte Arduino et d'un système de capteurs intelligents, est le cœur battant de la centrale thermique. Sa fonction ne se limite pas à la surveillance des températures, mais s'étend à la régulation des processus thermiques et interactifs avec précision et réactivité en temps réel. Ce système transforme l'unité de distillation, simple dispositif thermique, en une centrale intelligente fonctionnant avec une intervention humaine minimale et s'adaptant en temps réel aux variations de température et de climat.

Au cœur de ce système se trouve une carte de contrôle électronique programmée avec l'IDE Arduino. Elle est connectée à plusieurs capteurs de température, soigneusement répartis : l'un à l'intérieur du réservoir d'eau huileuse avant chauffage, et l'autre à l'extrémité de l'échangeur de chaleur après concentration de l'énergie solaire. Grâce à ces mesures, le système peut surveiller l'élévation de température du fluide et comparer les valeurs actuelles aux valeurs critiques préprogrammées.

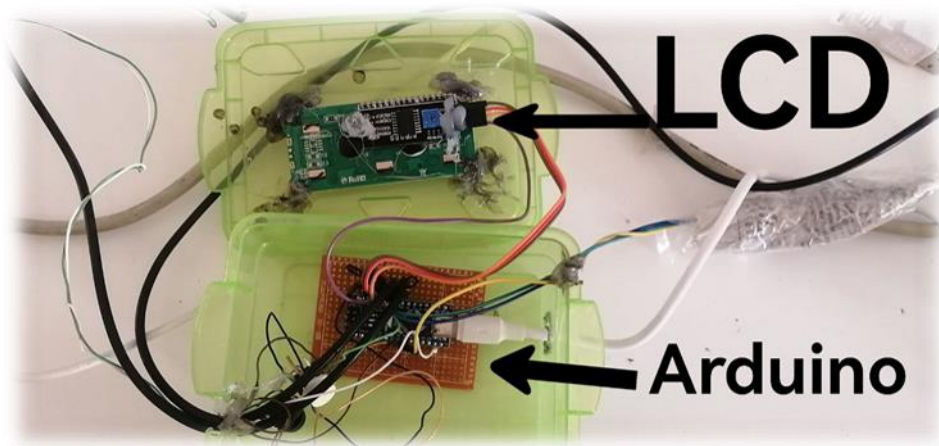


Figure 2.6 écran LCD et Arduino

Lorsque la température du fluide atteint un seuil spécifié (105 °C), le système envoie un signal à une électrovanne électronique qui contrôle le débit du fluide ou de la vapeur, garantissant ainsi une distillation optimale du mélange.,

De plus, cette unité est connectée à un écran LCD 20x4 affichant en temps réel la température, le débit du fluide et l'état de la vanne, facilitant ainsi la surveillance des performances du système, même pour les opérateurs non experts.

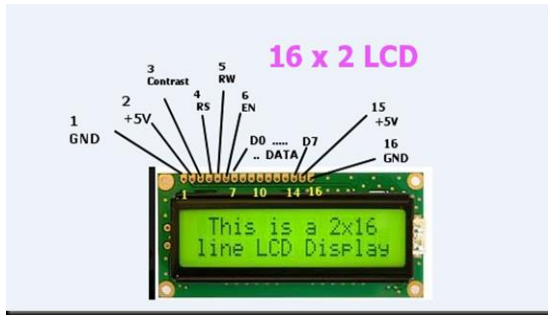


Figure 2.7 écran LCD 24*4

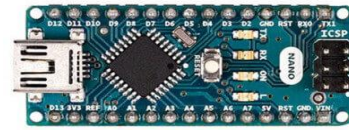


Figure 2.8 Carte Arduino NANO



Figure 2.9 Vanne électrique.



Figure 2.10 Capteur de température.

(Sonde DS18B20)

6 Architecture flexible et évolutive :

Cette centrale thermique a été conçue avec une architecture flexible permettant une extension et des modifications ultérieures aisées, en fonction des besoins de recherche ou de l'évolution de la nature de l'eau traitée. Cette flexibilité résulte de l'adoption de composants modulaires, remplaçables et extensibles, tant sur le plan thermique qu'électronique, faisant de la centrale une plateforme idéale pour l'expérimentation, la configuration, voire le déploiement industriel ultérieur.

Sur le plan thermique, la conception de l'échangeur de chaleur à serpentin connecté à un concentrateur solaire parabolique permet d'augmenter la capacité thermique simplement en modifiant le nombre de spires ou en utilisant des tubes de plus grand diamètre, sans avoir à repenser l'ensemble du système. L'angle d'inclinaison ou la concentration du rayonnement du

concentrateur solaire peuvent également être ajustés en fonction des caractéristiques géographiques du site afin d'obtenir le meilleur rendement thermique possible.

Sur le plan électronique, l'adoption d'un contrôleur Arduino est une solution intelligente permettant une évolutivité continue. Des systèmes de communication sans fil (tels que Wi-Fi ou LoRa) peuvent être intégrés ultérieurement pour la surveillance des données à distance ou la notification en cas de panne. Cette structure permet également l'ajout aisé d'autres composants, tels que des capteurs de pression, des capteurs de débit de fluides, des unités de stockage de données (cartes SD), ou encore l'intégration d'algorithmes d'intelligence artificielle pour l'apprentissage du comportement du système et le contrôle proactif.

Grâce à cette architecture évolutive, la station passe d'une solution statique à une plateforme dynamique capable de s'adapter à divers scénarios opérationnels et de recherche, que ce soit dans des laboratoires universitaires, de petites usines de transformation ou même des zones reculées dépourvues de ressources énergétiques traditionnelles.

7 Conclusion :

Dans ce chapitre, et grâce à une analyse des composants du système et des phases de conception et de mise en œuvre, nous avons démontré que l'utilisation de l'énergie solaire concentrée (CSP) constitue une option efficace et prometteuse pour traiter et séparer les eaux huileuses de manière écologique et économique.

Le système solaire thermique adopté, qui comprend un concentrateur solaire parabolique, un échangeur de chaleur à serpentin et un système de contrôle électronique précis, a démontré sa capacité à fournir des températures suffisantes pour évaporer l'eau du mélange huileux, contribuant ainsi à une séparation thermique efficace sans recourir à des sources d'énergie conventionnelles.

Les performances globales du système ont également démontré que l'énergie solaire, même dans des conditions climatiques désertiques comme celle d'Ouargla, offre un rendement acceptable et stable. Cela confirme le potentiel d'adoption de ce type de technologie dans les applications industrielles et environnementales, notamment dans les zones à fort ensoleillement.

Chapitre II : Dimensionnement d'un distillateur solaire avec un concentrateur parabolique

Cette étude marque une étape avancée dans le développement des systèmes de distillation solaire et ouvre des perspectives pour étendre leur utilisation au traitement des eaux usées industrielles et pétrolières de manière propre et durable.

Chapitre III :

Résultats et interprétation

1 Introduction

Pendant trois ans des recherches bibliographiques et des études expérimentales ont été effectuées pour la mise en fonctionnement et la mise en point d'un système de production de l'eau distillée à haute pureté par des travaux de master au niveau département des énergies renouvelables à l'université de Ouargla.

A la suite à ces travaux effectués auparavant, dans ce chapitre nous allons présenter une analyse détaillée des résultats obtenus lors de la mise en œuvre expérimentale de système de distillation d'eaux huileuses relié par échangeur intégré dans un concentrateur solaire parabolique avec un système de contrôle et fonctionnement automatique à l'aide d'un programme de commande électronique.

Cette analyse vise à évaluer les performances du système dans différentes conditions de fonctionnement et à comprendre la réponse de chaque composant aux variables thermiques et temporelles. Nous soulignons également l'efficacité de la concentration du rayonnement solaire, du taux d'évaporation, de l'efficacité de condensation et de la précision du contrôle automatisé pour améliorer la stabilité du système et accroître sa rentabilité.

Ces résultats constituent une étape cruciale vers la validation de l'utilisation de l'énergie solaire concentrée pour traiter les eaux huileuses de manière propre et durable, notamment dans les environnements désertiques caractérisés par un rayonnement solaire élevé et des ressources limitées. Chaque résultat est accompagné d'une discussion scientifique visant à interpréter le comportement expérimental et à le comparer aux prédictions théoriques ou aux résultats antérieurs disponibles dans la littérature scientifique

2 Résultats et discussions

Les résultats des mesures de la température d'entrée (T_e) et de sortie (T_s) de l'eau dans l'échangeur ainsi que la température de l'environnement (T_{env}) et la puissance d'ensoleillement et de la surface de l'échangeur située au foyer de concentrateur parabolique solaire (P_{sol}) et la température à la surface (T_{foyer}) (voir la figure 3.1) sont présentés dans des figures suivantes pour trois jours de test :

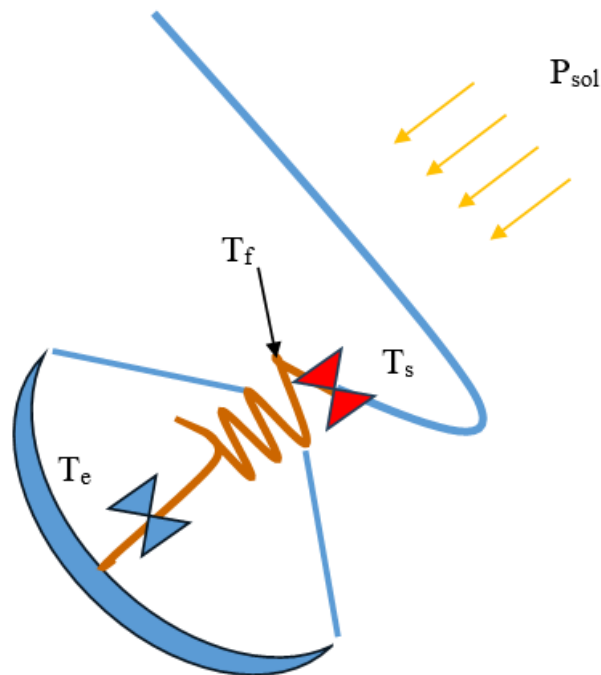


Figure 3.1 schéma représentatif sur procédure de mise en œuvre

➤ Les tests effectués au 29/05/2025

Tableau 1.3 Les tests effectués du 29/05/2025.

Temps	T _{sortie}	T _{entré}	T _{foyer}	T _{ambient}	Irr (ω/m^2)
11 :16	36	38	61	34.1	956
11 :36	39	38	62	34.6	970
11 :56	39	38	62	34.4	972
12 :16	41	40	83	35.7	1000
12 :36	42	41	90	35.2	1010
12 :56	42	41	91	35.8	1110
13 :16	40	40	93	35.9	1220
13 :36	40	40	97	35.9	1110
13 :56	41	40	80	35.8	1356
14 :16	41	40	62	35.8	1882
14 :20	41	40	57	35.6	1120

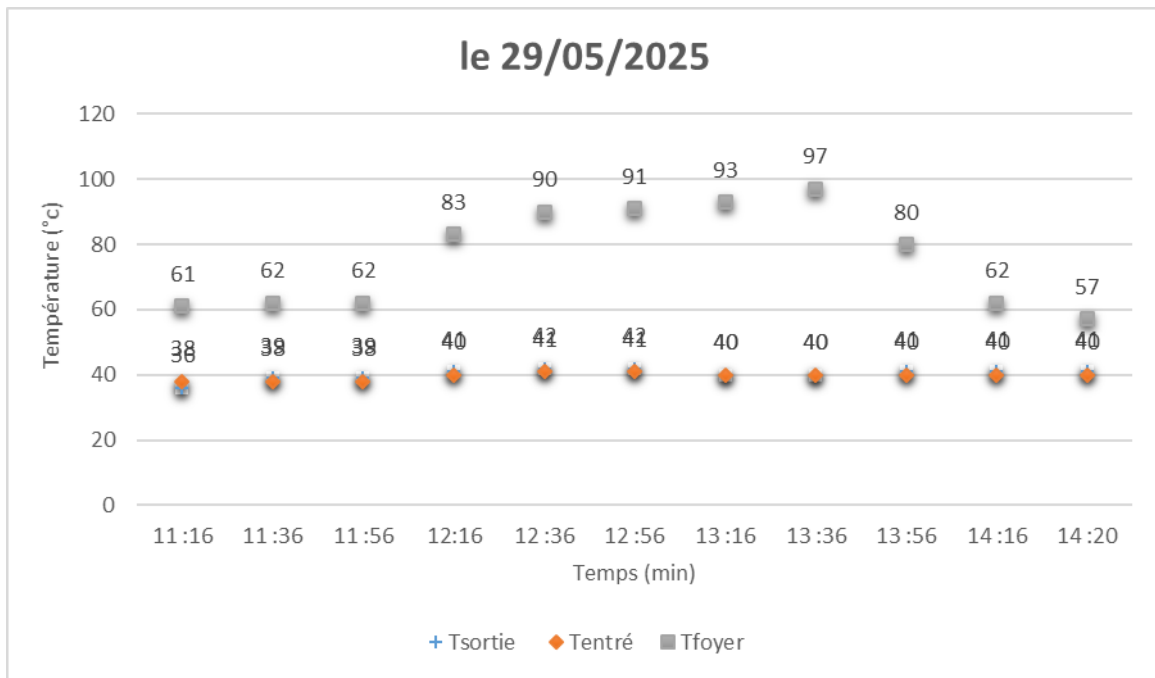


Figure 3.2 courbe de variation des températures T_{sortie} $T_{\text{entré}}$ T_{foyer} en fonction du temps.

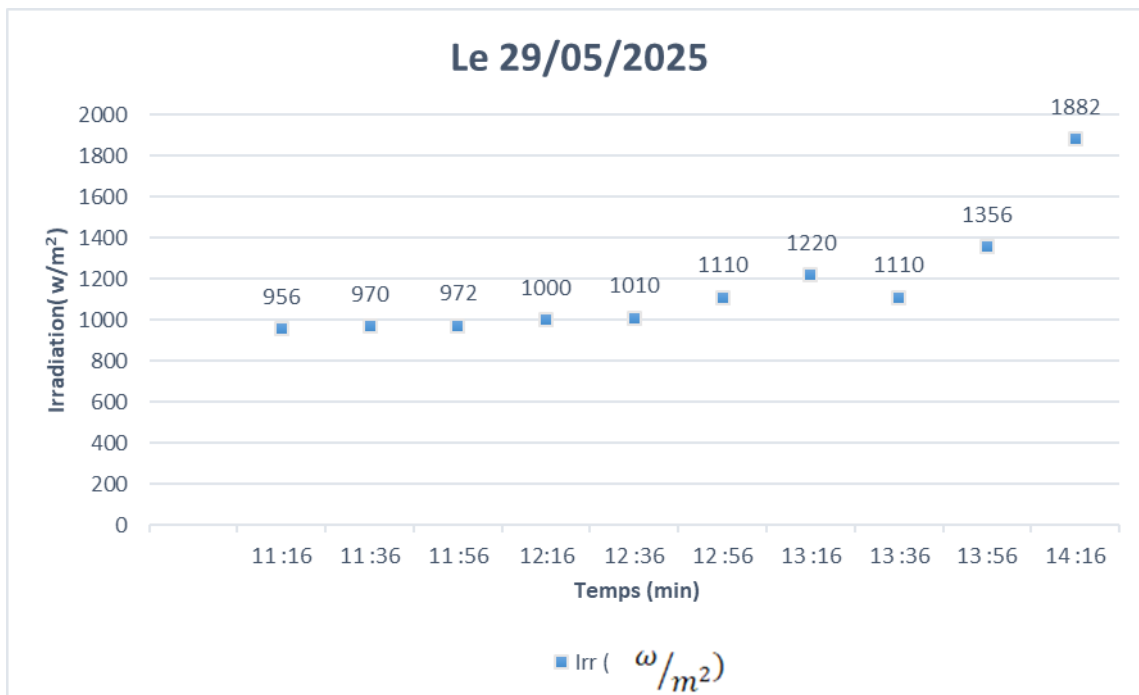


Figure 3.3 courbe de variation d'irradiation de soleil en fonction du temps.

L'analyse de la courbe montre une augmentation notable de la température du foyer en fonction du temps, principalement liée à l'intensification progressive du rayonnement solaire. En revanche, les températures d'entrée et de sortie du liquide sont restées sensiblement égales, ce qui pourrait indiquer un équilibre thermique à cause d'une faible efficacité d'échange thermique dans les conditions observées.

Nous avons également observé une augmentation significative de l'irradiation au fil du temps, en raison du bon ensoleillement sur le site d'expérimentation.

➤ **Les tests effectués au 02/06/2025**

Tableau 1.4 Les tests effectués du 02/06/2025.

Temps	T _{sortie}	T _{entré}	T _{foyer}	T _{ambient}	Irr (ω/m^2)
11 :30	33	34	73	34.1	1080
11 :50	34	34	83.4	34.9	1061
12 :10	34	34	78.8	35.4	1020
13 :35	35	35	76.2	36	1084
13 :55	35	35	65.5	36	986
14 :15	35	35	67.4	33.6	1046

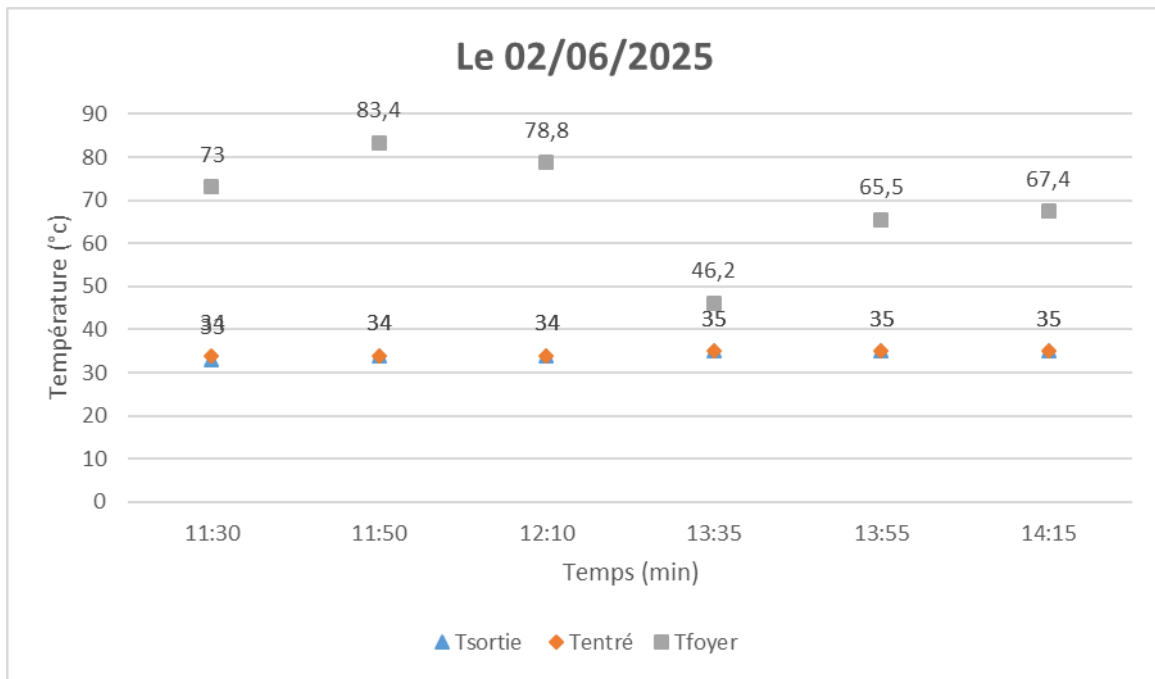


Figure 3.4 courbe de variation des températures T_{sortie} $T_{\text{entré}}$ T_{foyer} en fonction du temps

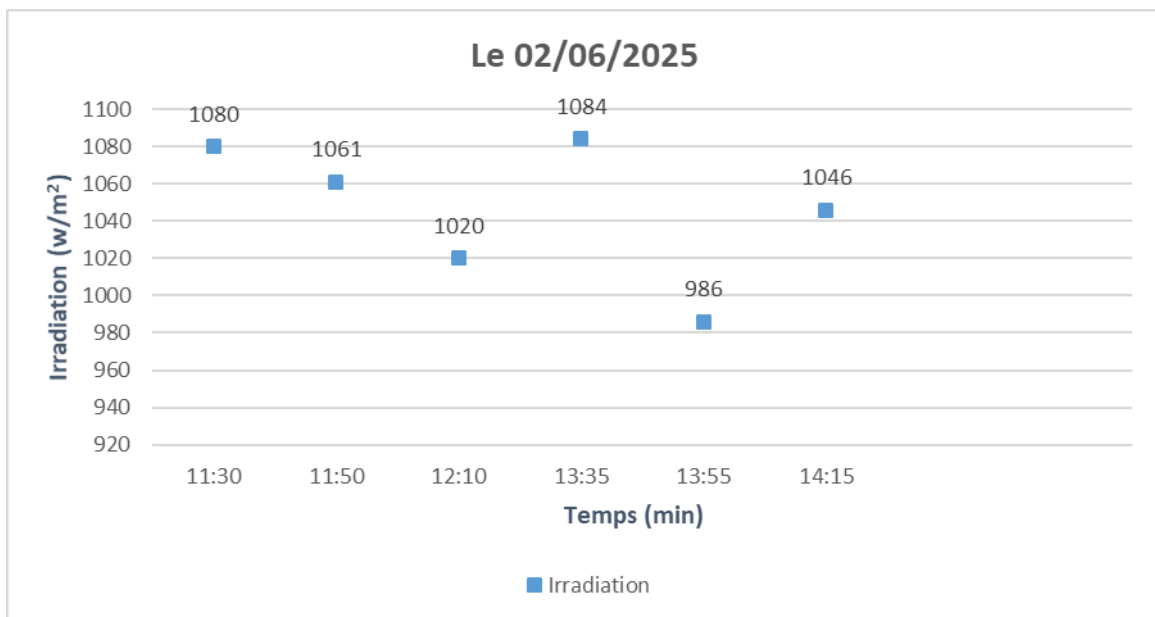


Figure 3.5 courbe de variation d'irradiation de soleil en fonction du temps.

Le graphique présente l'évolution des températures relevées le 02/06/2024 : celle du foyer solaire, ainsi que les températures d'entrée et de sortie d'eau huileuse. On observe une augmentation notable de la température du foyer en début de journée, atteignant un pic de 83,4 °C vers 11h50, en lien avec un bon ensoleillement. Par la suite, une baisse marquée est enregistrée vers 13h35 (46,2 °C) en raison d'un passage nuageux, avant une reprise progressive. En revanche, les températures d'entrée et de sortie sont restées quasiment

constantes (34 à 35 °C), indiquant une faible différence thermique dans le fluide traité. Cette tendance met en évidence l'impact direct des conditions météorologiques sur la performance thermique du système.

➤ Les tests effectués au 10/06/2025

Tableau 1.5 Les tests effectués du 10/06/2025.

Temps	T _{sortie}	T _{entré}	T _{foyer}	T _{ambient}	Irr (ω/m^2)
11 :15	61	58	68.5	35.5	865
11 :35	57	52	70	45	945
11 :55	56	54	75.5	46.5	958
12 :15	58	52	65.1	49.8	946
12 :35	56	49	70.7	47.1	922
12 :55	54	51	74.2	47.5	988
13 :15	55	49	68.7	47.5	988
13 :35	54	49	65.2	47.9	928
13 :55	58	46	69.1	47.5	986
14 :15	58	46	70.3	47.8	965
14 :25	56	44	64	47.1	922

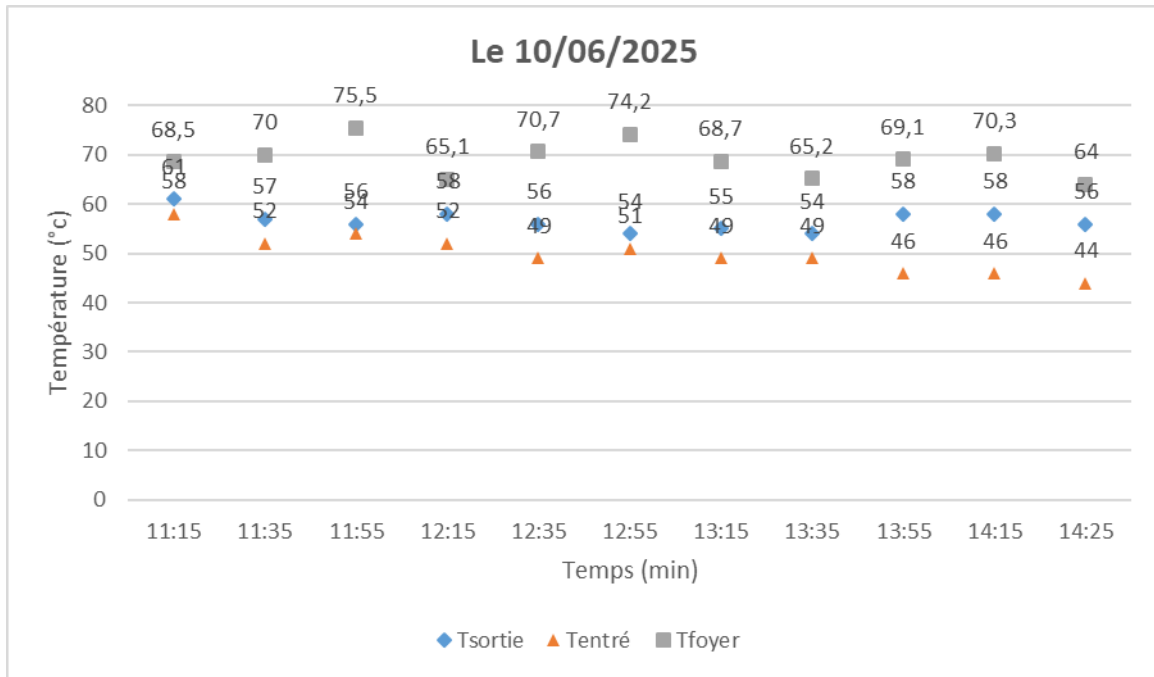


Figure 3.6 courbe de variation des températures T_{sortie} $T_{\text{entré}}$ T_{foyer} en fonction du temps

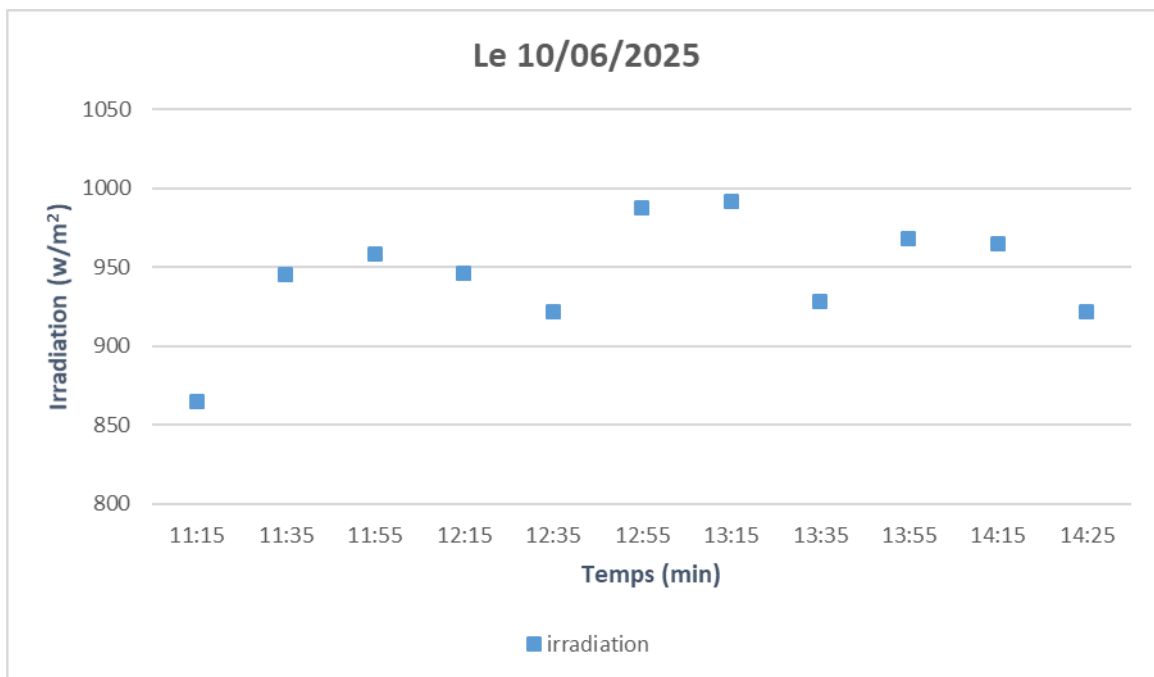


Figure 3.7 courbe de variation d’irradiation de soleil en fonction du temps.

L’analyse de la courbe du 10/06/2025 montre l’évolution des températures au sein du système de distillation solaire à concentration tout au long de la plage horaire observée. La température au foyer (T_{foyer}) présente des variations modérées, oscillant entre environ 64 °C et 75,5 °C. Cette fluctuation indique une bonne captation de l’énergie solaire, avec des pics qui

reflètent probablement une intensité solaire maximale à certains moments, notamment vers 11h55 et 12h55.

Les températures d'entrée ($T_{\text{entrée}}$) et de sortie (T_{sortie}) du liquide évoluent de façon corrélée mais avec un écart notable. On observe que T_{sortie} est systématiquement plus élevée que $T_{\text{entrée}}$, ce qui confirme que le liquide est bien chauffé lors de son passage par le système. La température de sortie atteint des valeurs proches de 58 °C, tandis que celle d'entrée diminue légèrement en fin de période, atteignant 44 °C. Cette baisse pourrait être liée à une légère perte d'énergie ou à une diminution de l'intensité du rayonnement solaire.

Dans l'ensemble, ces résultats illustrent la capacité du système à capter et transmettre efficacement la chaleur au fluide, avec une performance globalement stable malgré des variations solaires normales en conditions réelles. L'écart constant entre T_{foyer} et les températures du fluide montre que l'énergie disponible au foyer est suffisante pour entraîner une élévation thermique utile au processus de traitement envisagé.

3 Recommandations :

- Il est recommandé de développer un système de régulation adaptatif capable de s'ajuster dynamiquement à la température générée par le concentrateur parabolique, et non de forcer le concentrateur à s'adapter aux besoins du système.
- Intégration de soupapes de sécurité contre la surpression est essentiel pour libérer la pression excessive en cas de dysfonctionnement, notamment dans les circuits de chauffage ou de circulation du fluide, assurant ainsi une protection passive du système.
- Le réservoir doit être installé dans une zone ombragée ou à l'abri du rayonnement solaire direct, afin d'éviter toute perturbation des capteurs de température à l'entrée du système.
- Il est préférable d'opter pour un concentrateur parabolique de plus grand diamètre, afin d'augmenter la surface de captation du rayonnement solaire, ce qui permet d'améliorer le rendement thermique et l'efficacité du processus de distillation.

Conclusion générale

Conclusion générale

L'objectif principal de notre étude est de concevoir et d'évaluer un système de concentrateur solaire thermique utilisant un concentrateur solaire de type à miroir parabolique pour traiter les eaux huileux ou pollués de manière écologiquement efficace et économique, en s'appuyant sur l'énergie solaire comme source de chaleur propre, avec l'intégration d'un système de contrôle électronique pour réguler le processus de chauffage et améliorer les performances thermiques du système, dans le but d'atteindre une température suffisante permettant de démarrer le processus de séparation, d'évaporation ou de traitement physique du liquide cible.

A travers cette étude, on peut conclure

Cette étude a démontré l'efficacité du système solaire thermique à concentration pour élever la température du fluide contaminé à des niveaux thermiques adaptés au traitement, confirmant ainsi la faisabilité de l'utilisation de l'énergie solaire comme alternative prometteuse pour le traitement des fluides industriels sans recourir aux sources d'énergie traditionnelles, polluantes et coûteuses. Des expériences sur le terrain ont montré que la température du point focal du système augmente significativement lors des pics d'ensoleillement, contribuant ainsi à améliorer les performances du système et à augmenter le différentiel thermique entre l'entrée et la sortie du fluide. Le système de contrôle électronique basé sur Arduino a également contribué à améliorer la réponse thermique du système et à contrôler intelligemment le débit du fluide. Les résultats confirment que ce système pourrait constituer le cœur de solutions durables pour le traitement des eaux industrielles, notamment dans les zones à fort ensoleillement. Il pourrait également être amélioré à l'avenir par une meilleure isolation thermique et l'intégration de technologies de traitement supplémentaires pour une meilleure efficacité d'élimination des polluants.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

- [1] Revue de la pollution dans l'environnement aquatique africain.
- [2] Débordements industriels environnement, territoire et conflit, XVIIIe-XXIe siècle
Partie 43
- [3] Les Énergies du soleil - Page 74.
- [4] Bulletin Du Centre Technique Des Eaux Usées Volumes 12-23
- [5] Traitement des eaux Par François Berné page 58
- [6] Dictionnaire classique des sciences naturelles présentant la définition, l'analyse et l'histoire de tous les êtres qui composent les trois règnes, leur application générale aux arts, à l'agriculture, à la médecine, à l'économie domestique, etc Volume 10 Par Drapiez (M.) · 1845
- [7] Les impacts du changement climatique en Aquitaine un état des lieux scientifique
Par Hervé Le Treut · 2013
- [8] Traitement et épuration des eaux industrielles polluées procédés membranaires, bioadsorption et oxydation chimique 2007
- [9] Mémoire de fin d'étude Thème : Étude et réalisation d'un distillateur solaire
- [10] Traitement des eaux Par François Berné page 299
- [11] Optique géométrique imagerie et instruments Par Bernard Balland · 2007 pages 209
- [12] Mémoire pour les distillateurs de Genièvre Par F Millecam, P. J Van Hoorebeke ·
1804 page 07
- [13] Nouveau manuel complet du distillateur et du liquoriste Par Lebeaud, Julia De
Fontenelle · 1851 page 03
- [14] Primer Col·loqui Internacional d'Energia Solar 1980 page 69
- [15] La Conquête du soleil applications scientifiques et industrielles de la chaleur solaire
(héliodynamique) page 414
- [16] Chapitre 1 - Centrales solaires : état de l'art Par Gilles FLAMANT · 2023
- [17] Mémoire de fin d'étude Thème Dépollution des eaux par des filtres solaires.

Références bibliographiques.

[18] Physico-chimie des lubrifiants analyses et essais Par Jacques Denis, Jean Briant, Jean-Claude Hipeaux · 1997

[19] https://www.researchgate.net/figure/Distillateur-simple-effet_fig3_259008665

[20] Journal of Environmental Management, 245, 358–366.