

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة أبي بكر بلقايد- تلمسان

Université Aboubakr Belkaïd- Tlemcen –

Faculté de TECHNOLOGIE



MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du **diplôme** de **MASTER**

En : Génie mécanique

Spécialité : Energie renouvelable en mécanique

Par : Benyoucef Nihal et Berramdane Sarra

Sujet

Simulation des caractéristiques d'un capteur solaire cylindro-parabolique dans le nord de l'Algérie

Soutenu publiquement, le 21/06/2022, devant le jury composé de :

Mr BENRAMDANE MOHAMMED
Mr BEGAG ABDELAZIZ
BENHABIB LOUBNA
SAIM RACHID

MCB
MAB
Dr
Professeur
Université de Tlemcen
Université de Tlemcen
Université de Tlemcen
Université de Tlemcen

Président
Examineur
Encadreur
Co-Encadreur

Année universitaire : 2021 /2022

Remerciements

Le présent travail n'est pas le fruit de nos propres efforts, mais aussi les efforts de nos parents à qui nous exprimons nos sincères remerciements.

Nous exprimons ainsi nos remerciements à nos proches et familles ; frères et sœurs.

Au professeur SAIM Rachid et docteur BENHABIB Loubna, nos maîtres de mémoire, pour avoir accepté d'encadrer ce travail et dont les pertinences remarques et contributions ont été d'un apport capital. Qu'ils trouvent ici l'expression de notre profonde gratitude pour leur disposition et leur amabilité.

A Monsieur Benramdane dont la sympathie, la simplicité et la rigueur au travail fait fuir toutes les appréhensions qui pourraient habiter le novice que nous sommes dans l'environnement qui est celui de la recherche.

Aux honorables membres de Jury, le président : Dr. BENRAMDANE Mohammed (Maitre des Conférences Classe A) ; l'examineur : Dr. BEGAG Abdelaziz (Maitre-Assistant Classe B) à qui revient l'honneur de juger ce travail. Les critiques et suggestions que vous saurez apporter seront les bienvenues et contribueront à son amélioration.

A tout le corps enseignant de la faculté de la technologie en général et du département du génie mécanique la en particulier pour leurs compétences avérés.

A l'administration du département madame Khadidja.

Et à tous ceux qui de près ou de loin ont contribué moralement ou matériellement à l'aboutissement de ce travail.

الخلاصة

أكبر مصدر طاقة يمكن الوصول إليه تقنيًا على هذا الكوكب هي الطاقة الشمسية. تتمثل الفكرة العامة لهذا العمل في تصميم نموذج للنظام الشمسي المركّز على شكل أسطواني مكافئ باستخدام سائلين لنقل الحرارة (الماء، زيت حراري syltherm 800) خلال فترتين من السنة (18 يناير 2022 و 18 مايو 2022). من أجل إجراء مقارنة، قمنا بدراسة الخصائص المختلفة لكل منها، بما في ذلك درجات الحرارة الناتجة، والإشعاع، والقوى الممتصة، وكذلك كفاءة الحرارة المفيدة للأخير. تم إجراء النمذجة باستخدام برنامج محاكاة Matlab أثناء إنشاء توازن للطاقة. و بالتالي، استطعنا أن نستنتج أن اختيار الزيت كسائل نقل حراري أكثر ملائمة، وبشكل أكثر دقة في شهر مايو عندما يكون الإشعاع الشمسي أكثر أهمية

Résumé

La plus grande ressource d'énergie techniquement accessible sur la planète est l'énergie solaire.

L'idée générale de ce travail est de modéliser un système solaire à concentration de forme cylindro-parabolique en utilisant deux fluides caloporteurs (l'eau, l'huile thermique syltherm 800) pendant deux périodes de l'année (18 janvier 2022 et le 18 mai 2022). Afin d'établir une comparaison nous avons étudié les différentes caractéristiques de chacun dont les températures de sorties, les rayonnements, les puissances absorbées, ainsi que le rendement et la chaleur utile de ces derniers. La modélisation s'est faite à l'aide du logiciel de simulation Matlab tout en établissant un bilan énergétique. Ainsi, nous avons pu conclure que le choix de l'huile comme fluide caloporteur est plus favorable plus précisément au mois de mai où le rayonnement solaire est nettement plus important.

Abstract

The largest technically accessible energy resource on the planet is solar energy.

The general idea of this work is to model a cylindro-parabolic shaped concentrating solar system I using two heat transfer fluids (water, syltherm 800 thermal oil) during two periods of the year (January 18, 2022 and May 18, 2022). In order to establish a comparison, we have studied the different characteristics of each, including the output temperatures, the radiation, the powers absorbed, as well as the efficiency and useful heat of the latter. The modeling was done using the Matlab simulation software while establishing an energy balance. Thus, we were able to conclude that the choice of oil as heat transfer fluid is more favorable, more precisely in the month of May when the solar radiation is much more important.

Sommaire

Liste de figures	
Liste des tableaux	
Nomenclature	
Introduction générale.....	2

1^{ère} Partie : Généralités sur la thermodynamique

Chapitre I : Le gisement solaire

Introduction.....	6
I. Généralités sur le soleil.....	6
I.1. Caractéristique du soleil.....	6
I.2. Constante solaire.....	8
II. Position par rapport à la terre.....	9
II.1. Coordonnées géographiques terrestres	9
II.2. Coordonnées horaires	9
II.3. Les coordonnées horizontales	10
III. Heure et temps.....	11
IV. Durée et taux d'ensoleillement	12
IV.1. Durée d'ensoleillement	12
IV.2. Taux d'ensoleillement	12
V. Rayonnement solaire.....	12
V.1. Structure du rayonnement solaire	12
V.2. Nature du rayonnement solaire	13
V.3. Classification du rayonnement solaire	13
V.4. Répartition spectrale du rayonnement solaire	13
V.5. Influence de l'atmosphère sur le rayonnement solaire	14
V.6. Types de rayonnement solaire	14
VI. L'importance du gisement solaire en Algérie	15
Conclusion	17
Bibliographie	18

Chapitre II : Conversion thermodynamique

Introduction	21
I. Etat d'art	21
II. Description de la concentration	22
II.1. Facteur de concentration	22
II.2. Principe de la concentration	23
III. Les différentes technologies des centrales solaires thermodynamiques	23
III.1. Les systèmes à concentration linéaire	25
III.2. Les centrales à tour	26

III.3. Les centrales à capteurs paraboliques	28
IV. Stratégies et aspects économiques des systèmes à concentration solaires en Algérie	28

Conclusion	31
Bibliographie	32

2^{ème} Partie : Simulation d'un capteur solaire cylindro-parabolique

Chapitre III : La technologie des concentrateurs cylindro-paraboliques

Introduction	35
I. Historique	35
II. Concentrateur cylindro-parabolique	37
II.1. Description et principe de fonctionnement.....	37
II.2. Les différents constituants d'un CCP	42
III. Principales installations de capteur solaire cylindro-parabolique	46
IV. L'exploitation de technologie des CCP en Algérie	47
Conclusion	48
Bibliographie	49

Chapitre IV : Simulation d'un capteur cylindro-parabolique

Introduction	52
I. Présentation du logiciel de calcul	52
II. Description du système	53
III. Etablissement des équations caractéristiques	53
III.1. Bilan énergétique	53
III.2. Modes de transfert de chaleur	55
IV. Résolution numérique	58
IV.1. Description de la méthode des différences finies	58
IV.2. Discrétisation des équations	59
V. Résultats et discussions	60
V.1. Variation du rayonnement solaire	60
V.2. Variation de Puissance absorbée	62
V.3. Variation des températures de sorties	63
V.4. Rendement	67
V.5. Chaleur utile	69
Conclusion	70
Bibliographie	70
Conclusion générale	73
Annexe	76

Liste des Figures/ Tableaux

Liste des figures

Chapitre I

Figure I.1 La structure du soleil	7
Figure I.2 Constante solaire	8
Figure I.3 Coordonnées géographiques	9
Figure I.4 Les coordonnées horaires	10
Figure I.5 Les coordonnées horizontales	11
Figure I.6 Classification du rayonnement en fonction de la longueur d'onde	13
Figure I.7 longueur d'onde approximative dans le spectre solaire	14
Figure I.8 Type de rayonnement solaire	15
Figure I.9 Potentiel du rayonnement global en Algérie entre 1994-2018	16

Chapitre II

Figure II.1 Principe de la concentration thermodynamique	23
Figure II.2 Schéma des capteurs des trois grandes filières de centrales solaires thermodynamiques	24
Figure II.3 Les capteurs cylindro-paraboliques du programme SolarPaces dans le Nevada	25
Figure II.4 Centrale solaire à miroir de Fresnel	26
Figure II.5 Le projet NoorOuarzazat réalisé par le Maroc	27
Figure II.6 Schéma d'une centrale à tour	27
Figure II.7 Les centrales à capteurs paraboliques	28
Figure II.8 Niveaux des coûts énergétiques prévus jusqu'en 2050 pour les technologies des énergies solaires centralisées (CSP)	30

Chapitre III

Figure III.1 Vu de devant et de derrière du collecteur L-S3	36
--	----

Figure III.2 Concentrateur cylindro-parabolique	37
Figure III.3 Principe de fonctionnement du concentrateur	38
Figure III.4 Paramètres géométriques d'un cylindro parabolique	39
Figure III.5 Chemin des rayons parallèles dans un miroir parabolique	39
Figure III.6 Relation entre l'angle d'ouverture et la valeur a/f	40
Figure III.7 Relation entre la focale et l'angle d'ouverture pour une ouverture constante.....	40
Figure III.8 Surface d'ouverture du collecteur et du récepteur	41
Figure III.9 Concentrateur en ligne de rayonnement solaire	43
Figure III.10 Emplacement de l'absorbeur par rapport au foyer du concentrateur	44
Figure III.11 Évolution de la production au cours de la journée	46
Figure III.12 La centrale électrique hybride de HassiRmel	48

Chapitre IV

Figure IV.1. Aperçu d'une partie de la programmation en Matlab	52
Figure IV.2 Les différents transferts de chaleur	53
Figure IV.3 Organigramme de calcul	58
Figure IV.4 Maillage des différences finies	59
Figure IV.5 Discrétisation de l'absorbeur	60
Figure IV.6 Variation du rayonnement direct, diffus et globale pour le 18 janvier 2022 (eau)	61
Figure IV.7 Variation du rayonnement direct, diffus et globale pour le 18 janvier 2022 (huile)	61
Figure IV.8 Variation du rayonnement direct, diffus et globale pour le 18 mai 2022 (eau)	62
Figure IV.9 Variation du rayonnement direct, diffus et globale pour le 18 mai 2022 (huile)	62

Figure IV.10 Evolution des puissances en fonction du temps pour le 18 janvier 2022 (eau)	63
Figure IV.11 Evolution des puissances en fonction du temps pour le 18 janvier 2022 (huile)	63
Figure IV.12 Evolution des puissances en fonction du temps pour le 18 mai 2022 (eau)	64
Figure IV.13 Evolution des puissances en fonction du temps pour le 18 mai 2022 (huile)	64
Figure IV.14 Evolution des températures de sortie en fonction du temps pour le 18 janvier 2022 (fluide eau)	64
Figure IV.15 Evolution des températures de sortie en fonction du temps pour le 18 janvier 2022 (fluide huile)	64
Figure IV.16 Evolution des températures de sortie en fonction du temps pour le 18 Mai 2022 (fluide eau)	65
Figure IV.17 Evolution des températures de sortie en fonction du temps pour le 18 Mai 2022 (fluide huile)	65
Figure IV.18 Variation des vitesses de chauffages/ refroidissement des fluides (a) 18/01 ; (b) 18/05	67
Figure IV.19 Représentation du rendement en fonction du temps pour le 18 janvier 2022 (eau)	68
Figure IV.20 Représentation du rendement en fonction du temps pour le 18 janvier 2022 (huile)	68
Figure IV.21 Représentation du rendement en fonction du temps pour le 18 mai 2022 (eau)	68
Figure IV.22 Représentation du rendement en fonction du temps pour le 18 mai 2022 (huile)	68
Figure IV.23 Représentation de la chaleur utile en fonction du temps pour le 18 janvier 2022 (eau)	69
Figure IV.24 Représentation de la chaleur utile en fonction du temps pour le 18 janvier 2022 (huile)	69
Figure IV.25 Représentation de la chaleur utile en fonction du temps pour le 18 mai 2022 (eau)	69
Figure IV.26 Représentation de la chaleur utile en fonction du temps pour le 18 mai2022 (huile)	69

Liste des tableaux

Chapitre I

Tableau I.1 Caractéristiques principales du soleil	8
Tableau I.2 : Répartition spectrale du rayonnement thermique	14
Tableau I.3 : Potentiel d'Energie solaire en Algérie.....	16

Chapitre II

Tableau II.1 Caractéristique du système de la tour solaire	29
Tableau II.2 Caractéristique de capteur cylindro-parabolique (Données 2009)	29
Tableau II.3 Cout de capteur parabolique	29
Tableau II.4 Intensité du carbone des technologies de production d'électricité	30

Chapitre III

Tableau III.1 Mid-Temperature Selective Surfaces	45
Tableau III.2 Principales installations du cylindro-parabolique	47

Chapitre IV

Tableau IV.1 Les indices des équations algébriques/ Les conditions aux limites Détails techniques du concentrateur considéré dans l'étude.	60
Tableau IV.2 Résultats des rayonnements solaires (18 janvier 2022)	61
Tableau IV.3 Résultats des rayonnements solaires (18 mai 2022)	62
Tableau IV.4 Résultats des températures de sorties (18 janvier 2022)	65
Tableau IV.5 Résultats des températures de sorties (18 mai 2022)	66
Tableau IV.6 Résultats pour les vitesses du chauffage/ refroidissement des fluides	67
Tableau IV.7 Résultats pour les rendements thermiques des deux fluides	70

Nomenclature

A	Largueur d'ouverture	m
A_w	Surface d'un cylindro parabolique	m^2
A_a	Surface d'ouverture du miroir	m^2
A_r	Surface du récepteur	m^2
C	Facteur de concentration	-
C_p	Capacité thermique	$J/Kg.k$
D	Diamètre	m
D_j	Durée de jour	heure
ET	Equation du temps	minute
F	Ligne focale	m
h	La constante de Planck.	-
h_s	Hauteur solaire	rd
i	Angle d'Incidence	
j	Nombre de tranche	-
L	La longitude	-
l	Longueur	m
M	Masse	Kg
N_u	Nombre de Nusselt	-
n	Nombre de jour	-
P_r	Nombre de Prandl	-
q	Flux de chaleur	w
S	Surface	m^2
R_a	Nombre de Rayleigh	-
R_e	Nombre de Reynolds	-
T	Température	$K/°C$
TL_0	Temps local (légale)	heure
TSV	Temps solaire vrai	heure
TSM	Temps solaire moyen	heure
TU	Le temps universel	heure

Introduction générale

De nos jours il est impossible de parler de politique énergétique sans évoquer les questions environnementales : pollutions, climat, biodiversité, ressources naturelles. La dégradation de l'environnement n'est pas une utopie mais une réalité ; le réchauffement climatique, la raréfaction des ressources naturelles, augmentation des coûts de la santé sont les preuves palpables de cette dernière.

La prise de conscience de l'importance de ces enjeux devrait, nous l'espérons, permettre de tendre vers une utilisation rationnelle de l'énergie, une optimisation des processus énergétiques que nous mettons en œuvre tous les jours. Cependant, la conservation des ressources énergétiques est devenue une priorité à l'échelle planétaire d'où les spécialistes ont optés à trouver de nouvelles origines énergétiques telles que les énergies renouvelables [1]. Ces énergies renouvelables ont l'immense avantage d'être d'origine naturel et considérée comme inépuisable à l'échelle de temps humain. Elles se présentent sous cinq formes : la biomasse, l'énergie éolienne, la géothermie, l'énergie hydraulique et le solaire qui fut la principale source d'énergie.

Les dernières années ont vu l'émergence d'une nouvelle technologie d'exploitation de l'énergie solaire par voie thermodynamique [2]. C'est ce que l'on appelle « électricité solaire thermodynamique », et qui est l'ensemble des techniques qui transforme l'énergie rayonnée par le soleil en chaleur à température élevée puis grâce aux propriétés des fluides caloporteurs en énergie mécanique puis électrique. [3]

Le principe du solaire thermodynamique est de concentrer le rayonnement solaire afin d'obtenir des températures plus importantes.

Les systèmes solaires, notamment les systèmes à concentration solaire sont de plus en plus sollicités pour contribuer à la satisfaction des besoins en énergie. La technologie des concentrateurs solaires vient d'atteindre un niveau très remarquable, en utilisant des réflecteurs afin de concentrer les rayons du soleil sur une petite surface. Il existe quatre principaux types des concentrateurs solaires, les concentrateurs cylindro-paraboliques, les miroirs de Fresnel, les tours solaires et les concentrateurs paraboliques. La technologie des Concentrateurs Cylindro-Paraboliques (CCP) est actuellement la plus éprouvée des techniques de concentration solaire, il offre un bon rendement thermique jusqu'à des températures supérieures au 400°C[4].

L'application la plus importante de cette technologie est les centrales solaires à concentration (appelées aussi Concentrating Solar Power -CSP-). Au sud de l'Algérie (Hassi R'mel) une première centrale solaire hybride basée sur des réflecteurs cylindro-paraboliques a été installée en 2010[5].

Il existe d'autres applications de la technologie des concentrateurs cylindro-paraboliques, tels que le chauffage d'eau, le dessalement d'eau et le froid solaire. Le CCP peut être employé pour dessaler l'eau, en reliant le champ solaire à une usine thermique de dessalement par les différents procédés industriels (simple effet, multiples effets et multiples étages), ou indirectement par la production de l'électricité pour les procédés dont la source principale d'énergie est l'électricité comme : l'osmose inverse et l'électrodialyse. De plus on peut remplacer les capteurs solaires plans par un champ des concentrateurs cylindro-paraboliques dans les équipements de chauffage d'eau solaire, parce qu'il assure des grandes températures de fonctionnement avec une plus petite surface de captation par rapport aux capteurs plans. En conséquence, les demandes plus élevées peuvent être couvertes en mélangeant l'eau chaude à une autre froide, les exemples des applications avec des taux élevés de consommation d'eau chaude sont multiples : les usines, les hôpitaux et les équipements de sport [6]. Dans le secteur résidentiel plusieurs travaux de recherches sont enregistrés dans la littérature pour l'optimisation de la consommation énergétique par des petits systèmes de climatisation ou de réfrigération solaires à base des concentrateurs cylindro-paraboliques.

L'objectif de ce mémoire de master est d'analyser la différence entre l'efficacité de deux fluides caloporteurs (eau/huile thermique) à l'aide de l'outil informatique Matlab, afin de pouvoir comparer entre l'efficacité de deux fluides caloporteur choisis pour la région de Tlemcen tout en calculant les températures de sorties de ces derniers.

Notre travail est subdivisé en quatre chapitres précédés par une introduction générale et terminés par une conclusion générale. Le premier chapitre est de présenter les données du gisement solaire et les coordonnées géométriques et horaires liés au soleil. Cependant, le deuxième chapitre est de définir la conversion thermodynamique et ses différentes technologies existantes. Hors, le troisième chapitre est de se familiariser avec la technologie des concentrateurs cylindro-paraboliques dont ce type de capteur fera le principe de notre éventuel travail. Et le dernier chapitre est dédié pour la modélisation d'un CCP.

Bibliographie

[1] L. Benhabib. Modélisation d'un système mixte entre le collecteur cylindro-parabolique et les cellules en ZnO, Thèse de doctorat en physique option énergie renouvelable, Université Abou-Bekr Belkaid, Tlemcen, 08/07/2021.

[2] M. Mazouz, Etude et simulation des transferts de chaleur dans un récepteur d'un concentrateur solaire cylindro-parabolique, Mémoire de master option thermique et combustion, Université m'hamedbougara, Boumerdès, 2017.

[3] L. Benhabib, Modélisation d'un capteur cylindro-parabolique, Mémoire de master en physique option physique énergétique et matériaux, Université Abou-Bekr Belkaid, Tlemcen, 2012/2013.

[4] A. Fernandez-Garcia, E. Zarza, L. Valenzuela, M. Pérez, Parabolic-trough solar collectors and their applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 14, 1695-1721, 2010

[5] N. El Gharbi et al., Acomparative study between parabolic trough collector and linear Fresnel reflector technologies, *Science Direct*, 6, 565-572, 2011.

[6] Y. Marif, H. Benmoussa, H. Bouguettaia, D. Bechki, M. M. Belhadj, S. Boughali, Concentrateur cylindro-parabolique et ses applications dans le sud algérien, 2010

Chapitre I

Gisement solaire

Introduction

Les ressources comme le soleil, l'eau, le vent, le bois et les autres produits végétaux sont des ressources d'origine naturelles, capables de produire de l'énergie grâce aux technologies développées par l'homme.

Les nouvelles ressources dites d'origine renouvelables sont indispensables pour tenter de diminuer les impacts environnementaux et en fait des énergies d'avenir. Il existe divers types d'énergies renouvelables : l'énergie hydraulique, l'énergie éolienne, l'énergie solaire thermique et photovoltaïque, l'énergie produite par les vagues et la houle, la géothermie et la biomasse. Ces ressources sont pratiquement inépuisables et propres et s'opposent à cet effet aux énergies fossiles.

Dans ce chapitre nous allons nous familiariser tout d'abord avec le gisement solaire qui représente un ensemble de données au cours d'une période connue. On l'utilise dans divers domaines comme l'agriculture, la sécurité publique, la météorologie et sans oublier les applications énergétiques.

I. Généralités sur le soleil

I.1. Caractéristique du soleil

Le soleil est l'étoile de notre système planétaire, plus couramment appelé "système solaire". Se symbolise à être la plus proche de la terre à une distance d'environ 150 millions de kilomètres. Le soleil évoque une énorme sphère gazeuse de 1,4 millions de kilomètres de diamètre, composée d'hydrogène (pour 74% de sa masse) et d'hélium (pour 24% de sa masse). Il représente à lui seul 99,86% de la masse de notre système solaire. Son diamètre correspond à 109 fois celui de la Terre. [1]

Cependant, il libère d'énormes quantités d'énergies qui, après avoir parcouru cette distance atteignent la surface de la terre, il produit un rayonnement qui peut être assimilé, en première approximation, à celui d'un corps noir à 5800 K. [2]

Pour comprendre le comportement du rayonnement du soleil, les caractéristiques du corps noir devrait être vues brièvement. Le " corps noir " est à la fois un absorbeur et un émetteur de rayonnement électromagnétique avec 100 % d'efficacité à toutes les longueurs d'ondes. La distribution théorique des longueurs d'onde du rayonnement du corps noir est mathématiquement décrite par l'équation de Planck comme suite :[3]

$$E_{\lambda} = \frac{A\lambda^{-5}}{\exp\left(\frac{B}{\lambda T}\right) - 1} \quad (\text{I.1})$$

Avec : $A = 3.74 \times 10^{-16} \text{ (W/m}^2\text{)}$;

$B = 14.39 \times 10^{-3} \text{ (m.K)}$;

λ : Longueur d'onde (m);

T : Température absolue en (K).

Chapitre I : Gisement solaire

L'ensoleillement, qui représente le flux d'énergie émis par unité de temps et par unité de surface du soleil, exprimée en (W/m^2) est donné par la loi de Stefan-Boltzmann : [3]

$$E_S = \sigma T^4 \quad (\text{I.2})$$

Où : σ est la constante de Stefan-Boltzmann ($5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}^4$);

T est la température absolue du corps noir (K)

Cette étoile est composée d'hydrogène et d'hélium, le soleil est en effet, un réacteur de fusion continu avec ses constituants sous forme gazeuse retenue par des forces gravitationnelles, plusieurs réactions de fusion est déclenché pour intensifier l'énergie rayonnée par le soleil. Le processus le plus important est la transformation de l'hydrogène en hélium par une réaction thermonucléaire. Cependant, comme la masse du noyau de l'hélium est moins lourde que celle de quatre protons d'hydrogène, la masse perdue dans la réaction thermonucléaire est convertie en énergie [4]. Cette énergie produite à l'intérieur de la sphère solaire à une température de l'ordre de plusieurs millions de degrés est transférée à la surface extérieure puis transférée par rayonnement dans l'espace. Les processus radiatif et convectif sont le résultat des états successifs d'émission, d'absorption et de radiation; la gamme de spectre de rayonnement dans le noyau du soleil est comprise entre la longueur d'onde des rayons X et celle des rayons gamma, avec une longueur d'onde de radiation qui augmente suivant la diminution de la température à de grandes distances.

Dans la structure schématique du soleil illustré dans la figure (I.1), il est estimé que 90% de l'énergie est générée dans la région du disque solaire située entre 0 et $0,23R$, ou R le rayon du soleil, qui représente 40% de la masse du soleil. A distance de $0,7R$ du centre, la température diminue d'environ 130 000 (K) et la densité de $70 (\text{Kg}/\text{m}^3)$; là, le processus convectif du soleil devient important et la zone comprise entre $0,7$ et $1,0R$ est appelée : zone convective. Dans cette zone, la température diminue d'environ 5000 K et la densité d'environ $10^{-5} (\text{Kg}/\text{m}^3)$. [4]

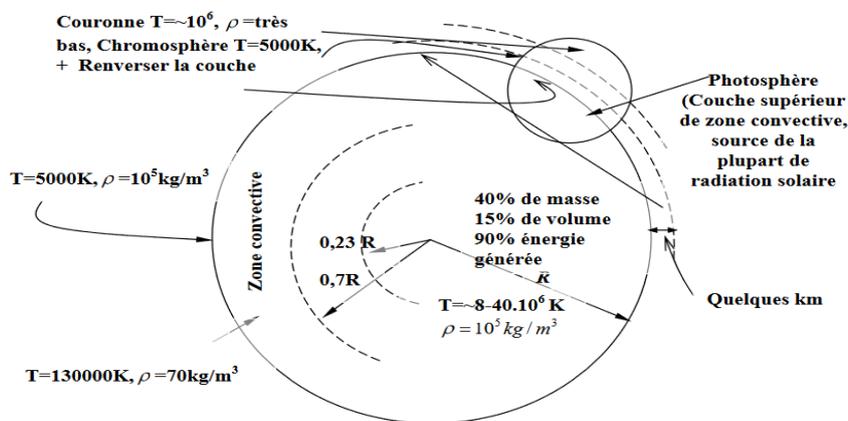


Figure I.1 La structure du soleil [4]

Chapitre I : Gisement solaire

Il est généralement admis que le rayonnement solaire est produit par un phénomène thermonucléaire contrôlé de transformation de l'hydrogène en hélium (de hélios = soleil) : les noyaux des atomes de deutérium et de tritium (isotopes de l'hydrogène) fusionnent en libérant de l'énergie. La réaction est schématiquement la suivante : [5]



Les caractéristiques principales du soleil sont regroupées dans le tableau I.1

Tableau I.1 Caractéristiques principales du soleil. [6]

Diamètre (Km)	1392000
Masse (Kg)	2.10^{30}
Surface (Km ²)	$6.09.10^{12}$
Volumes (Km ³)	$1.41.10^{18}$
Masse volumique moyenne (Kg/m ³)	1408
Vitesse (Km/s)	217
Distance du centre à la voie lactée (Km)	$2.5.10^{17}$

I.2. Constante Solaire

La constante solaire exprime la quantité d'énergie solaire que recevrait une surface de 1(m²)située à une distance de $149\,597\,870.10^3$ (m) ou 1 ua (distance moyenne Terre-Soleil), exposée perpendiculairement aux rayons du Soleil, en l'absence d'atmosphère. Pour la Terre, c'est donc la densité de flux énergétique au sommet de l'atmosphère. Sur Terre cette distance a une faible variation au cours de l'année, compte tenu de la légère anormalité de l'orbite terrestre qui est d'environ 1,7%. La constante solaire est une valeur moyenne du flux solaire reçu à la limite supérieure de l'atmosphère terrestre, sa valeur est estimée à 1367 (W/m²). [7]

La représentation schématique du système Soleil-Terre est indiquée dans la figure I.2



Figure I.2 Constante solaire [8]

II. Position par rapport à la terre

La position du Soleil est en fonction à la fois de l'emplacement géographique de l'observation à la surface de la terre et du temps.

II.1.Coordonnées géographiques terrestres

Ce sont des coordonnées angulaires qui représentent l'ensemble d'un système de deux coordonnées qui sont le plus souvent : la latitude et la longitude. Ils permettent le repérage d'un point sur la terre.

- **Latitude (Φ):** C'est l'angle que fait le plan de l'équateur avec la direction reliant le centre de la terre au point considéré. Elle est comptée positivement de 0 à +90° vers le nord et négativement de 0 à -90° vers le sud.
- **Longitude (L):** C'est l'angle que fait le méridien local passant par le point considéré avec le méridien d'origine passant par la ville de Greenwich. Il est compté positivement de 0 à +180° vers l'est et de 0 à -180° vers l'ouest.

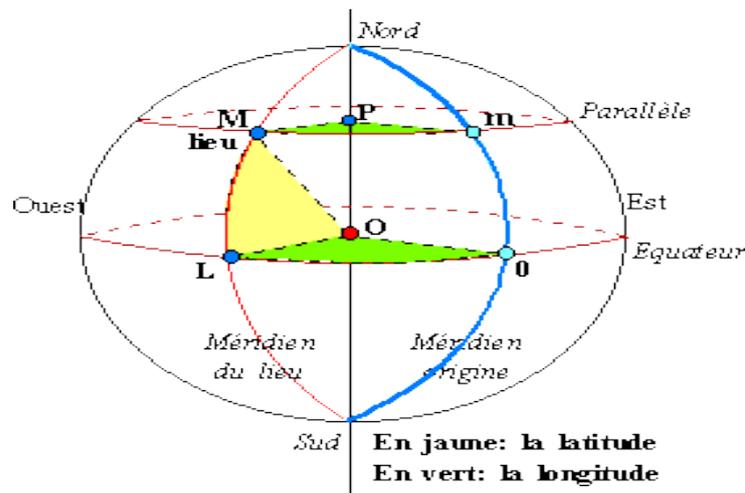


Figure I.3 Coordonnées géographiques. [9]

II.2.Coordonnées horaires

- **Déclinaison(δ):** c'est l'angle fait par le plan de l'équateur avec celui de l'écliptique. Elle est variante au cours de l'année de +23°27' à -23°27' et détermine l'inégalité des durées des jours. δ est donnée par la relation suivante:[10]

$$\delta = 23.45 \sin \left[\frac{360}{365} (N + 284) \right] \quad (\text{I.3})$$

N : Le numéro du jour dans l'année compté à partir du 1^{er} Janvier.

- **Angle horaire** : C'est l'angle formé par le méridien céleste et la projection de la direction terre/solaire sur le plan de l'équateur céleste, ou encore déterminé par la rotation régulière de la terre autour de son axe. Elle est comptée positivement dans le sens rétrograde de 0 à +360° une heure sidérale vaut donc 15° d'angle et $\omega=0^\circ$ (12h:00) au méridien de Greenwich.

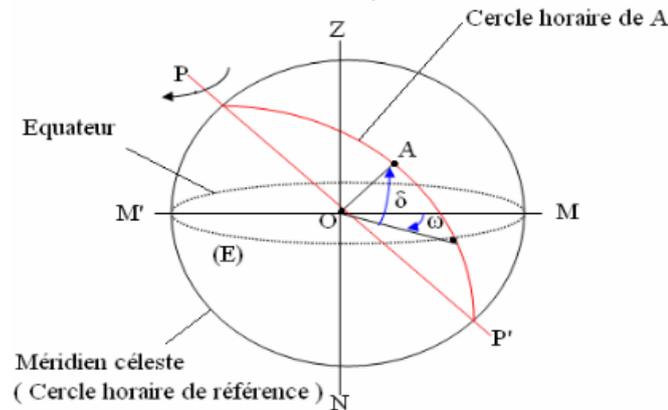


Figure I.4 Les coordonnées horaires[11]

II.3. Les coordonnées horizontales

- **Angle de la hauteur de solaire (h)** : C'est l'angle formé entre le plan horizontal et la direction du soleil. Il est donné par la relation suivante :

$$\sin(h) = \sin(\delta) \times \sin(\Phi) + \cos(\omega) \times \cos(\delta) \times \cos(\Phi) \quad \text{(I.4)}$$

- **Azimut (a)** : C'est l'angle entre le plan vertical contenant le rayon solaire et la direction de sud. Il est compté positivement de 0 à +180° vers l'ouest et négativement de 0 à -180° vers l'est. Il est relié à l'angle horaire et à la déclinaison par la relation :

$$\sin(a) = \frac{\cos(\delta) \times \sin(\omega)}{\cos(h)} \quad \text{(I.5)}$$

- **Inclinaison (β)** : L'inclinaison β du plan par rapport au plan horizontal est donnée par [12]

$$\beta = 90 - \gamma \quad \text{(I.6)}$$

γ : hauteur du plan, c'est l'angle que fait la normale du plan et sa projection sur le plan

- **Angle d'Incidence (i)** : L'angle d'incidence i est l'angle entre la direction du soleil et la normale du plan. Cet angle est déterminé par la connaissance des cosinus directeurs du rayon incident et la normale en coordonnées horizontales.[12]

$$\cos(i) = \sin(\alpha - a) \times \cos(\gamma) \times \cos(h) - \sin(\gamma) \times \sin(h) \quad (\text{I.7})$$

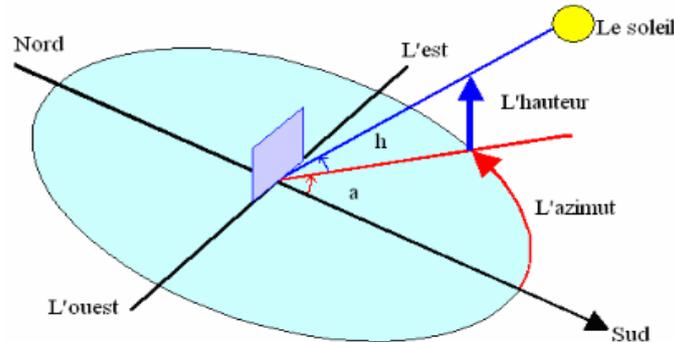


Figure I.5 Les coordonnées horizontales[13]

III. Heure et temps

La terre subit deux types de déplacement : la rotation de la terre autour de l'axe des pôles et sa révolution autour du soleil. Le mouvement de la terre sur elle-même définit la notion de journée solaire. Une rotation complète s'effectue en 24 heures. Elle amène ainsi la définition du temps, puisque chaque heure correspond à un écart angulaire de 15° . La rotation de la terre autour du soleil définit les saisons et amène à distinguer le temps solaire vrai.[14]

- **Temps solaire vrai (TSV)** : C'est le temps défini par les coordonnées angulaires vraies du soleil, ce temps est indiqué par les cadrans solaires et les héliographes.

$$\text{TSV} = 12 + \frac{\omega}{15} \quad (\text{I.8})$$

Où : ω est l'angle horaire en degré.

- **Durée de jour (d_j)**: L'angle horaire ω_c au coucher du Soleil est l'opposé de l'angle horaire à son lever, nous avons donc $\omega_c = -\omega_l$ et la durée du jour vaut :

$$d_j = 2 \frac{\omega}{15} \quad (\text{I.9})$$

- **Temps solaire moyen (TSM)** : Le temps solaire moyen est appelé parfois temps local, Il est donné par la relation suivante [10]

$$\text{TSM} = \text{TSV} - E_t \quad (\text{I.10})$$

Où :

$$E_t = 9.87 \sin \left[2 \frac{360}{365} (N - 81) - 7.53 \cos \left[\frac{360}{365} (N - 81) \right] \right] - 1.5 \sin \left[\frac{360}{365} (N - 81) \right] \quad (\text{I.11})$$

Et : est l'équation du temps exprimée en minutes.

N: est le numéro du jour dans l'année.

- **Temps universel (TU)** : Le temps universel est le temps civil moyen du méridien de Greenwich (méridien origine), appelé encore GMT (Greenwich Mean Time). Est donné par la relation suivante [15] :

$$TU = TSM - \frac{L}{15} \quad (\text{I.12})$$

Pour : $L > 0$; pour les villes situées à l'Est de Greenwich.

$L < 0$; pour les villes situées à l'Ouest de Greenwich.

$TU = TSM$; pour le méridien de Greenwich.

IV. Durée et taux d'ensoleillement

IV.1. Durée d'ensoleillement (SS)

La durée d'ensoleillement(SS) ou durée effective est un indicateur climatique qui mesure la durée temporelle pendant laquelle un lieu, un endroit est soumis à un rayonnement solaire. Cet indicateur peut servir de référence pour évaluer la fréquence du « beau temps ». La durée d'ensoleillement est généralement exprimée en une moyenne d'heures par an ou alors en une moyenne d'heures par jour.

IV.2. Taux d'ensoleillement (σ)

Par ciel clair dégagé, le sol reçoit un rayonnement solaire direct pendant toute une durée journalière maximale d'ensoleillement (SS_0). Pour cela le taux d'ensoleillement dit taux d'insolation défini le rapport entre la durée effective et la durée maximale d'ensoleillement.

$$\sigma = \frac{SS}{SS_0} \quad (\text{I.13})$$

La durée maximale d'ensoleillement (SS_0) pour un site dégagé peut être prise égale à la durée du jour calculée par la formule (I.8).

V. Rayonnement solaire

V.1. Structure du rayonnement solaire

Le rayonnement solaire est un mode d'échange d'énergie par émission et absorption des radiations électromagnétiques. L'échange thermique par rayonnement se fait selon trois processus :

Emission : Il y a conversion de l'énergie fournie à la surface en énergie électromagnétique.

Transmission : La transmission de l'énergie électromagnétique se fait par propagation des ondes avec éventuellement absorption par le milieu transféré.

Réception : A la réception, il y a conversion du rayonnement électromagnétique incident en énergie thermique (absorption) [16]

V.2. Nature du rayonnement solaire

Les réactions thermonucléaires produites au cœur du soleil génèrent des rayonnements corpusculaires et électromagnétiques se propageant dans toutes les directions du vide intersidéral avec une vitesse de 3.10^8 (m/s). [17]

La théorie corpusculaire de Max Planck prévoit que tout rayonnement de fréquence (ν) peut être considéré comme un flux de photons dont l'énergie élémentaire (E) est directement proportionnel à cette fréquence. [18]

$$E = h \times \nu = \frac{h \times c}{\lambda} \quad (\text{I.14})$$

Où

h : est la constante de Planck.

c : la vitesse de la lumière.

λ : La longueur d'onde.

V.3. Classification du rayonnement solaire

Le rayonnement visible occupe une bande étroite du spectre, aux longueurs d'ondes comprises entre 0,38 et 0,78 μm . Les longueurs d'ondes plus courtes (fréquences plus élevées) forment le rayonnement ultraviolet, puis X et γ . Les longueurs d'onde plus longues que le visible forment le rayonnement infrarouge puis micro-onde. [16]

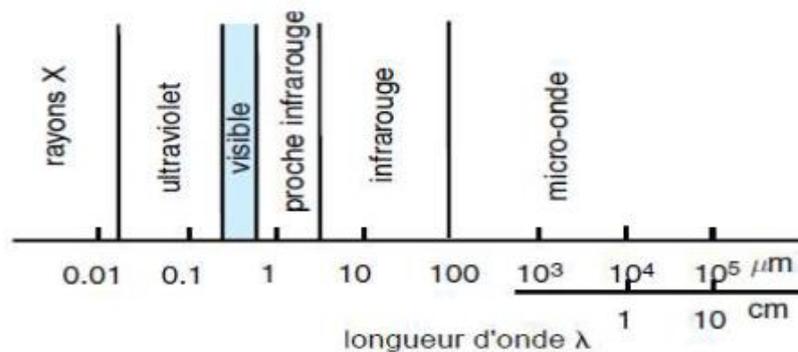


Figure I.6 Classification du rayonnement en fonction de la longueur d'onde [16]

V.4. Répartition spectrale du rayonnement solaire

Quelle que soit la longueur d'onde, les photons ne sont pas émis en même quantité par le soleil. Le maximum d'énergie transportée par le rayonnement électromagnétique se situe à une

Chapitre I : Gisement solaire

longueur d'onde de 0.5 (μm), tandis que celle-ci est très faible pour les longueurs d'onde inférieures à 0.2 (μm) et les longueurs d'onde supérieures à 0.4 (μm).

La partie visible du spectre est comprise entre 0.38 et 0.78 μm (du violet au rouge). Le Soleil émet donc la plus grande partie de son rayonnement dans le visible. [16]

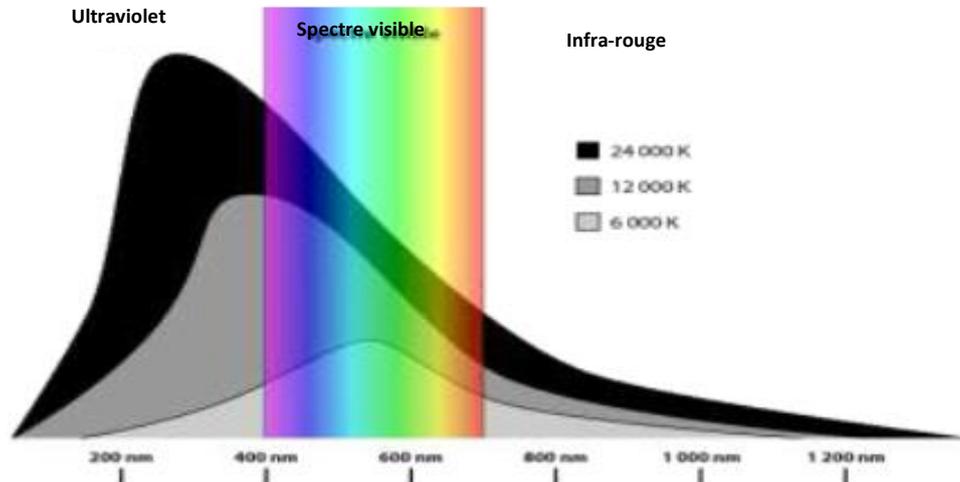


Figure I.7 longueur d'onde approximative dans le spectre solaire [16]

La répartition de l'énergie solaire dans les bandes du spectre du rayonnement thermique est donnée dans le tableau I.2

Tableau I.2 : Répartition spectrale du rayonnement thermique [19]

Longueur d'onde (μm)	0 - 0,38	0,38 – 0,78	0,78
Pourcentage (%)	6,4	48	45,6
Densité du flux énergétique (W/m^2)	87	656	623

V.5. Influence de l'atmosphère sur le rayonnement solaire

Sur la surface terrestre, le rayonnement solaire subit des interactions considérables avec les molécules gazeuses et les particules dues principalement aux phénomènes d'absorption et/ou de diffusion causés par les aérosols (poussière de diverses origines) ainsi que par les molécules d'eau et différents gaz (azote, oxygène, gaz carbonique...etc.) présentes dans la couche atmosphère enveloppante. Les molécules gazeuses et particules présentes dans l'atmosphère vont provoquer un blocage et/ou une déviation du rayonnement, diminuant ainsi l'énergie transportée par le rayonnement électromagnétique.

V.6. Types de rayonnement solaire

Le rayonnement solaire parvenant au sol est subdivisé en :[3]

- **Le rayonnement direct (R_{direct}):** est celui qui traverse l'atmosphère sans subir de modifications, il provient du disque solaire seulement à l'exclusion de tout rayonnement diffusé, réfléchi ou réfracté par l'atmosphère.
- **Le rayonnement réfléchi ou l'albédo du sol ($R_{réfléchi}$):** c'est le rayonnement qui est réfléchi par le sol ou par des objets se trouvant à sa surface. Cet albédo peut être important lorsque le sol est particulièrement réfléchissant (eau, neige, etc....).
- **Le rayonnement diffus (R_{diffus}):** c'est dû à l'absorption et à la diffusion d'une partie du rayonnement solaire global par l'atmosphère et à sa réflexion par les nuages et les aérosols.
- **Le rayonnement global (R_{total}):** le rayonnement global est subdivisé en rayonnements directs, diffus et reflété par le sol)

Ainsi, le rayonnement reçu au niveau du sol (R_g), après avoir traversé l'atmosphère est donné par la relation suivante :

$$R_g = R_{total} - R_{réfléchi} - R_{absorbé} = R_{direct} + R_{diffus} \quad (I.15)$$

D'où : $R_{absorbé}$ présente le rayonnement absorbé par l'atmosphère.

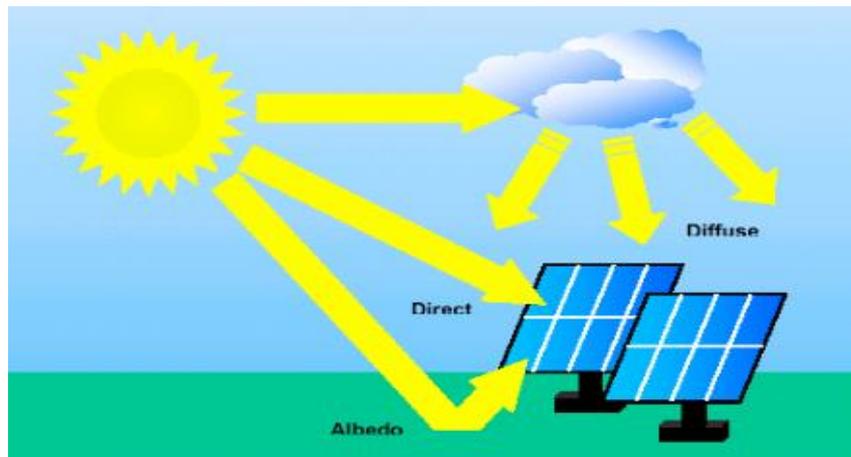


Figure I.8 Type de rayonnement solaire[3]

VI. L'importance du gisement solaire en Algérie

Le gisement solaire est l'ensemble de données décrivant l'évolution du rayonnement solaire disponible au cours d'une période donnée. Cependant, la ressource en rayonnement solaire direct est considérable à l'échelle planétaire et particulièrement à l'échelle nationale.

Avec une surface de 2.381.741 (Km²), l'Algérie est le pays le plus vaste de la méditerranée. Possédant une situation géographique des plus avantageuses et un gisement solaire important, de par son climat, l'Algérie offre de plus grandes possibilités intéressantes, à long terme, pour investir dans le domaine du solaire. Son potentiel des ressources solaires est optimal pour l'exécution des projets des concentrateurs solaires.

Chapitre I : Gisement solaire

En effet, la durée d'insolation sur la quasi-totalité du territoire national dépasse les 2000 heures annuellement et peut atteindre les 3900 heures dans les hauts plateaux et Sahara.[19]

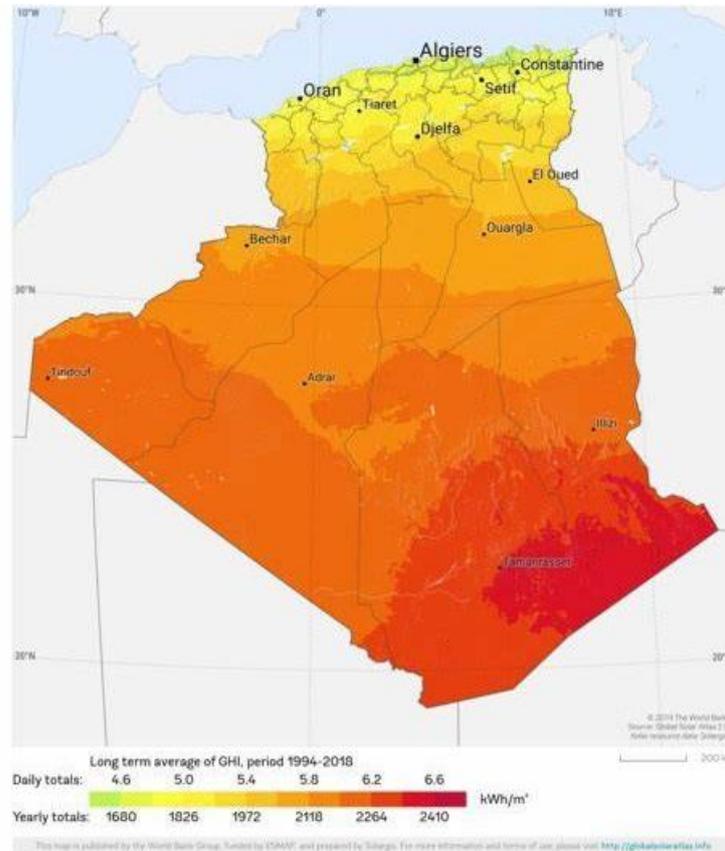


Figure I.9 Potentiel du rayonnement global en Algérie entre 1994-2018[19]

La quantité d'énergie reçue au sol quotidiennement sur une surface horizontale de 1 (m²) est de l'ordre de 5 (KW/h) sur la majeure partie du territoire national, soit près de 1700 (KWh/m²) au nord (les Régions côtières) et 2263 (KWh/m²) au sud du pays.[20]

La répartition du potentiel solaire par région climatique au niveau du territoire algérien est représentée dans le tableau suivant :

Tableau I.3 : Potentiel d'Énergie solaire en Algérie[20]

Région	Région côtière	Hauts plateaux	Sahara
Superficie	4%	10%	86%
Durée moyenne d'ensoleillement (Heure/an)	2650	3000	3500
Énergie moyenne reçue (KWh/m²/an)	1700	1900	2650

Conclusion

Le rayonnement solaire peut être utilisé soit pour produire l'électricité à l'aide des systèmes photovoltaïques, soit la chaleur thermique pour le chauffage ou plus la production d'électricité grâce aux systèmes thermiques.

De par ses caractéristiques physiques, le soleil est une immense source d'énergie en plus d'être renouvelable. Dans ce chapitre quelques notions préliminaires nécessaires sur le gisement solaire ont été présentées, à savoir les coordonnées géographiques, le mouvement du soleil, différentes composantes du rayonnement solaire et autres.

Le prochain chapitre a pour but de développer la connaissance de la conversion thermodynamique.

Bibliographie

- [1] : Audrey, Le Soleil : Présentation et caractéristiques, article publié sur Gralon,03/05/2013.
- [2] : A Mefti. *et al.*, Analyse critique de l'Atlas solaire de l'Algérie, Revue des Energies Renouvelables, 2(2), 69-85,1999.
- [3] : M. Slama Fateh, Modélisation d'un système multi générateurs photovoltaïques interconnectés au réseau électrique, Mémoire de magister en électrotechnique option Réseaux Electriques, Université Ferhat Abbas, Setif, 01 /04/2011.
- [4] :J.A. Duffie, and J.W. Beckman, Solar Engineering of Thermal Processes, 4^{ème} édition, Wiley, 2003.
- [5] : Khaled Mahdi, conception et réalisation d'un concentrateur sphérique, Mémoire de magister en physique, université de Mentouri, Constantine, 08/03/2008.
- [6] : M.S. Noun, Etude des paramètres impactant sur le rendement d'un capteur solaire, Mémoire de master en mécanique option énergétique, Université Badji Mokhtar, Annaba, 2017/2018.
- [7] :Y. Jannot, Cours de transfert thermique, Thermique solaire, Edition : Mac Graw Hill, octobre 2003.
- [8] :<http://villemin.gerard.free.fr/Astronom/aaaBases/ConSolai.htm>, 04/05/2013.
- [9] :<https://coursgeologie.com/coordonnees-geographiques-209/>, 2011.
- [10] : A. Ricaud Jan, Gisement solaire et transferts énergétiques, Université de Cergy Pontoise, 2011.
- [11] :L. Benhabib, Modélisation d'un système mixte entre le collecteur cylindro-parabolique et les cellules en ZnO, Thèse de doctorat, Université Abou Bekr Belkaid, Tlemcen, 2021.
- [12] :H. Maamar, Etude et effet de l'orientation de deux pièces d'un habitat en pierre situé à Ghardaïa, Mémoire de magister option énergies renouvelables, Université Abou Bakr Belkaid, Tlemcen, 2010/2011.
- [13]: H. Gherdine, B. Yahi, Etude d'un système autonome d'énergie photovoltaïque : Application au pompage hydraulique, Mémoire de Master, Université Abou Bekr Belkaid, Tlemcen, 2017.
- [14]: A.A. Sayigh, Characteristics of solar radiation, Solar energy conversion, pergamon press, Ontario, 1979.
- [15] :R. Bernard, G. Merguy, M. Schwartz, Le Rayonnement solaire conversion, Technique et documentation, Paris, 1980.

Chapitre I : Gisement solaire

[16] :K. Faycal, Conversion thermodynamique de l'énergie solaire : Etude de modélisation d'un capteur, Mémoire de magistère en mécanique option énergétique, Université de Batna, 2014.

[17] : A. Sfeir, G. Guarracino, Ingénierie des systèmes solaires, Technique et documentation, Paris, 1981.

[18] :M. Nia, Etude comparative des méthodes d'estimation du rayonnement solaire, Mémoire de magister en physique option énergétique et mécanique des fluides, Université de Ferhat Abbas, Setif, 2010.

[19] : A. Lawan, Modélisation du transfert de chaleur d'un concentrateur solaire cylindro-Parabolique pour la Stérilisation des Instruments Médicaux, Mémoire de mastère en génie des procédés, Université de Blida, 2017/2018.

[20] : A. Mefti, M.Y. Bouroubi, H. Mimouni, Evaluation du potentiel énergétique solaire, Bulletin des énergies renouvelables, N°2, P12, Décembre 2002.

Chapitre II

Conversion thermodynamique

Introduction

Le gisement solaire est une source d'énergie renouvelable disponible en grande quantité, en tout point de la surface terrestre et gratuite.

Actuellement deux solutions de conversion de l'énergie solaire sont en compétition :

- L'utilisation de cellules photovoltaïques pour la transformation directe du rayonnement solaire en électricité.
- L'utilisation des capteurs solaires thermiques pour transformer les photons solaires en énergie calorifique.

L'énergie thermique du soleil permet aussi de produire de l'électricité par voie thermodynamique. C'est ce que l'on appelle « électricité solaire thermodynamique », et qui est l'ensemble des techniques qui transforment l'énergie rayonnée par le soleil en chaleur à température élevée puis grâce aux propriétés des fluides caloporteurs en énergie mécanique puis électrique. Et c'est ce qui fera l'objet de ce mémoire.

Sur ce, au cours de ce chapitre, nous nous intéressons à présenter les différentes technologies thermodynamiques.

I. Etat de l'art

C'est à la fin du 19^{ème} siècle que les premières expériences, sous leurs formes actuelles, apparaissent dans le domaine du solaire à concentration (exposition universelle de 1878). Le professeur de sciences physiques, Augustin Mouchot, reçoit la médaille d'or lors de l'exposition universelle pour un concentrateur d'énergie solaire de 20m².

En 1912, le premier capteur cylindro-parabolique fut inventé et mis en œuvre par le physicien anglais Charles Vernon Boys. Il faudra ensuite attendre la fin de la seconde guerre mondiale pour retrouver de nouvelles avancées dans le domaine du solaire thermique à concentration. L'italien Giovanni Francia et le français Marcel Perrot eurent l'idée d'installer le premier système CLFR (Compact Linear Fresnel Reflector) à Marseille, près de 450ans après son invention par Léonard de Vinci.

Au 20ème siècle, les premiers systèmes paraboliques produisant de la vapeur sont conçus. A la fin des années 1970, des projets pilotes de centrales solaires à concentration se développent aux États-Unis, en Russie, au Japon et en Europe. Les années 1980 marquent le début de la construction en série de ces centrales dans le désert californien. En 2003, une troisième version de collecteur européen a été construite, et elle a été nommée SKAL-ET. Elle avait un nombre de 12 modules avec une ouverture effective de 4360 m. Elle avait été érigée à l'usine SEGS-V en Californie, aux États-Unis pendant cette époque [1]. Hors, en 2005, un nouveau CCP appelé SENERTROUGH-I a été développé par la société espagnole SENER. Il avait la même taille que le collecteur LS-3, mais la structure de support était identique à celle du collecteur LS-2. Une boucle de 600 m du collecteur SENERTROUGH-I était installée dans la centrale solaire à concentration Andasol-1 en Espagne [1], [2].

Aujourd'hui, la technologie du solaire thermodynamique a considérablement évolué et de nombreux projets y font appel ; exemple de la centrale à miroirs cylindro-paraboliques de Kathu (Afrique du Sud) d'une puissance de 100MW, qui a vu le jour en 2018.

II. Description de la concentration

L'énergie solaire thermodynamique est un moyen de produire de l'électricité et d'accumuler l'énergie thermique nécessaire à cette production pendant, dans des centrales solaires à concentration.

II.1. Facteur de concentration

L'énergie solaire étant peu dense, il est nécessaire pour la production d'électricité de la concentrer pour obtenir des températures exploitables. Le rayonnement peut être concentré sur un récepteur ponctuel ou linéaire.

Les concentrateurs solaires focalisent les rayons du soleil dans un point ou dans une ligne. Les concentrateurs en lignes possèdent généralement un facteur de concentration inférieur à ceux des concentrateurs ponctuels, ce facteur caractérise la géométrie générale d'un concentrateur.

Le coefficient permet d'évaluer l'intensité de la concentration solaire : plus le facteur de concentration est élevé, plus la température atteinte sera importante.[3]

$$\text{Facteur de concentration} = \frac{\text{Surface du miroir}}{\text{Surface du récepteur}} \quad (\text{II.1})$$

II.2. Principe de la concentration

Les capteurs à concentration comme tout capteur thermique est un dispositif destiné à absorber le rayonnement solaire et à transmettre la chaleur à haute température ainsi produite à un fluide caloporteur. Dans ces systèmes à concentration, le principe est plus précisément de concentrer le rayonnement solaire reçu par une surface d'ouverture et le diriger vers un absorbeur de surface plus petite, ainsi la chaleur produite pourra être transmise au fluide à plusieurs centaines de degrés afin de générer de la vapeur par échange thermique pour ensuite produire de l'électricité. Le fluide utilisé peut conserver sa chaleur pendant plusieurs heures après le coucher du soleil, cela permet de produire de l'électricité en début de soirée, au moment où la consommation est la plus importante.

Généralement, on parle de centrale solaire thermodynamique lorsqu'une production d'électricité est faite à l'aide d'un cycle thermodynamique. Ce dispositif permet de minimiser les pertes thermiques et d'atteindre des températures qui dépassent largement les 200°C au niveau du récepteur avec un rendement thermique supérieur à 70% (rapport chaleur utile/énergie incidente). [4]

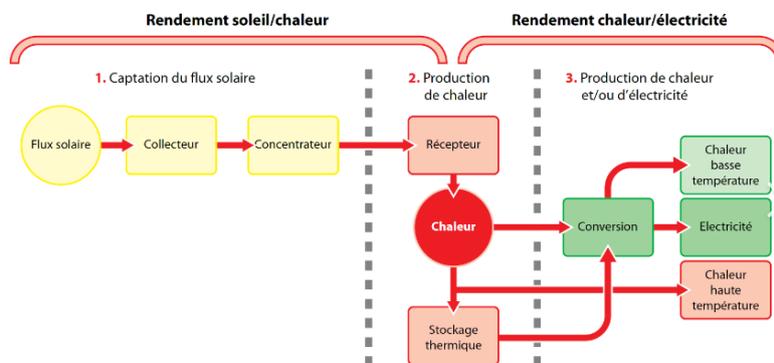


Figure II.1 Principe de la concentration thermodynamique [5]

III. Les différentes technologies des centrales solaires thermodynamiques

On appelle « solaire thermodynamique » l'ensemble des techniques qui visent à transformer l'énergie rayonnée par le soleil en chaleur à température élevée puis celle-ci en énergie mécanique (et ensuite en énergie électrique) à travers un cycle thermodynamique.

Chapitre II : Conversion thermodynamique

La production d'électricité solaire par voie thermodynamique fait appel à des capteurs à concentration et l'expérience des trente dernières années montre que les principales filières qui permettent en pratique de réaliser la concentration du rayonnement solaire dans des conditions techniques et économiques viables sont : [6]

- ❖ Des systèmes à capteurs linéaires (CCP et CLFR)
- ❖ Des systèmes à récepteur central ou centrale à tour(CT)
- ❖ Des systèmes paraboliques(PS).

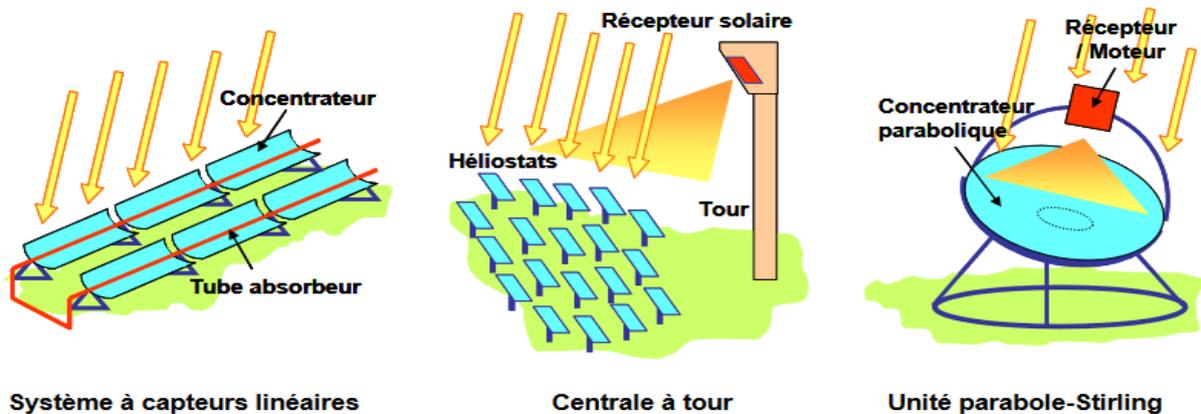


Figure II.2 Schéma des capteurs des trois grandes filières de centrales solaires thermodynamiques. [7]

Plusieurs critères peuvent être utilisés pour distinguer les différents concentrateurs : [8]

- ❖ 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 ($1 < C < 10$, $T \sim 150^\circ\text{C}$)
 - les moyennes concentrations ($10 < C < 100$, $T \sim 300^\circ\text{C}$)
 - 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.

III.1. Les systèmes à concentrateurs linéaires

III.1.1. Les capteurs cylindro-paraboliques

Ce type de technologie utilise une série de longs réflecteurs cylindriques en forme de parabole qui tournent autour d'un axe horizontal pour suivre la course du soleil et bénéficier d'un maximum de rayonnement.

Cette structure permet de concentrer le rayonnement solaire sur un tube récepteur de couleur noire situé le long de la ligne focale du réflecteur. Dans ce tube se trouve le fluide caloporteur dont la température atteint en général 500°C. Ce fluide est ensuite pompé à travers des échangeurs conventionnels afin de produire de la vapeur d'eau à hautes températures et pressions. La vapeur produite est ensuite intégrée dans un cycle thermodynamique générant de l'énergie électrique. [9]

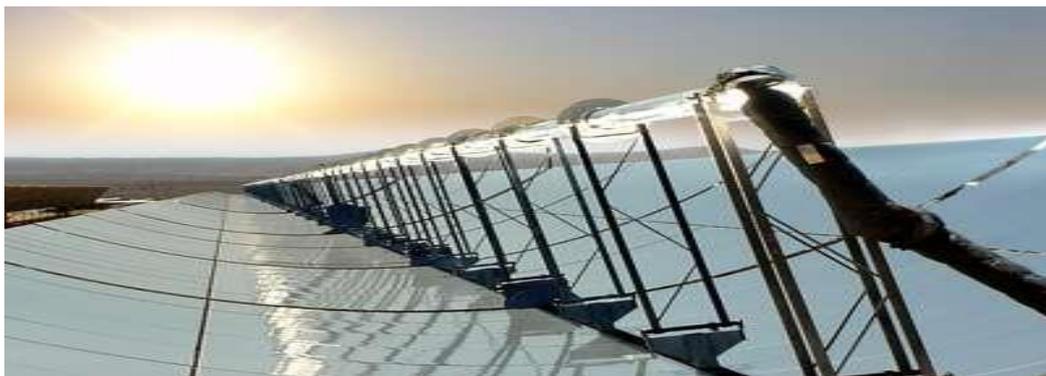


Figure II.3 Les capteurs cylindro-paraboliques du programme Solar Paces dans le Nevada [8]

Chapitre II : Conversion thermodynamique

III.1.2. Les systèmes linéaires à miroirs de Fresnel

Un facteur de coût important dans la technologie des collecteurs cylindro-paraboliques. L'idée est d'approximer la forme parabolique du collecteur par une succession de miroirs plats. [5]

Le principe du concentrateur de Fresnel est que chacun des miroirs aient la possibilité de pivoter en suivant la course du soleil à fin de concentré le maximum de rayonnement solaire sous un tube ou un ensemble de tubes récepteurs linéaires fixes.

En circulant dans ce récepteur horizontal, le fluide thermodynamique peut être vaporisé puis surchauffé jusqu'à 500 °c. La vapeur alors produite actionne une turbine qui produit de l'électricité. Le cycle thermodynamique est généralement direct, ce qui permet d'éviter les échangeurs de chaleur. [3]



Figure II.4 Centrale solaire à miroir de Fresnel [3]

III.1.3. Les centrales à tour

Ce type de centrales est constitué de nombreux miroirs qui suivent la course du soleil (les héliostats) réfléchissent et concentrent le rayonnement solaire vers une chaudière située au sommet d'une tour de (80 à 100mde haut).La tour solaire offre l'avantage de ne pas avoir à faire circuler de fluide dans l'ensemble du champ de miroirs (la surface exposée est limitée), les pertes thermiques sont donc significativement réduites. [9]

Chapitre II : Conversion thermodynamique

Les centrales à tour peuvent atteindre des températures très importantes, de 600 à 1000 °c dues au facteur de concentration qui peut dépasser les 1000.



Figure II.5 Le projet Noor Ouarzazat réalisé par le Maroc [10]

Par la suite, l'énergie concentrée est soit directement transférée au fluide thermodynamique à fin de générer de la vapeur entraînant une turbine pour alimenter une turbine à gaz, soit utilisée pour chauffer un fluide caloporteur intermédiaire qui va être envoyé à une chaudière pour générer de la vapeur entraînant une turbine.

Dans tous les cas, les turbines entraînent des alternateurs produisant de l'électricité. [3]

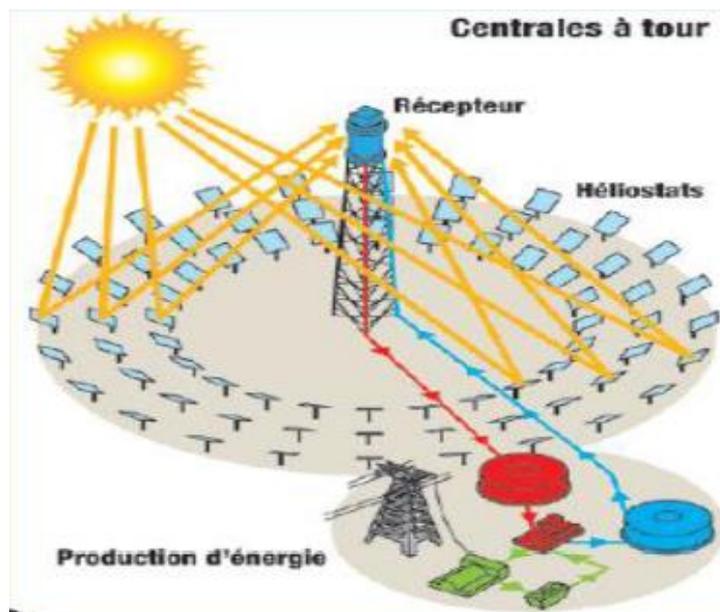


Figure II.6 Schéma d'une centrale à tour [11]

III.1.4. Les centrales à capteurs paraboliques

Le concentrateur parabolique ou sphérique est aussi appelé assiette. Les rayonnements solaires réfléchis par le miroir parabolique convergent vers un seul point, le foyer de la parabole. Le système doit être orienté à tout instant vers le soleil, ce qui implique une motorisation précise selon deux axes. Le facteur de concentration moyen dépasse le millier, ce qui permet de porter le fluide à très haute température, au-delà de 700 °C. [12]

Les capteurs paraboliques fonctionnent d'une manière autonome. Ils suivent le soleil sur 2 axes afin de concentrer le rayonnement solaire sur le foyer de la parabole réfléchissante (la parabole est installée sur un support mobile muni de deux moteurs pas à pas).



Figure II.7 Les centrales à capteurs paraboliques [3]

IV. Stratégies et aspects économiques des systèmes à concentration solaires en Algérie :

Actuellement les technologies de concentration solaire (CSP) sont celles qui présentent le plus de possibilités pour une exploitation commerciale.

Une étude d'analyse des aspects économiques des technologies des énergies renouvelables en Afrique du nord a été annoncée par la commission africaine de l'énergie en Février 2010. Cette étude approfondie a abouti aux résultats suivants :

Chapitre II : Conversion thermodynamique

Tableau II.1 Caractéristiques du système de la tour solaire[13]

Capacité	50 (MW)	100 (MW)	200(MW)
Stockage Heure	6	6	6
Efficacités annuelle (%)	14.3	14.4	14.5
Superficie Km ²	2.1	4.4	9.1
Superficie à miroir m ²	462.000	918.000	1824.000
Facteur d'efficacité annuelle %	38	38	38
Cout direct €M	200	375	640
Cout direct €/KW	4000	3750	3200
OM. €/KWh	3.4	2.2	1.9
LEC. €/KWh1	17.1	15.4	7.6

Tableau II.2 Caractéristiques de capteur cylindro-parabolique (Données 2009) [13]

Capacité	50 (MW)	100 (MW)	200(MW)
Stockage Heure	6	6	6
Efficacité annuelle %	12.3	12.3	12.3
Superficie Km ²	1.6	3.2	8
Superficie à miroir m ²	462.000	959.000	3536.000
Facteur d'efficacité annuelle %	3	34	34
Cout direct €M	200	370	1260
Cout direct €/KW	4000	3700	3150
OM. €/KWh	2	1.5	1.25
LEC. €/KWh1	16.1	14.5	12.35

Tableau II.3Cout de capteur parabolique[13]

Capacité	Nombre d'unité	Cout	LEC €/KWh
25 KW	2000 (50MW totale)	€ 2750 /KW	20.50
25 KW	1400 (350MW totale)	€ 1600 /KW	12.00

Une analyse économique a été effectuée également sur les technologies CSP en estimant leur coût moyen actualisé de l'énergie. Les résultats sont présentés dans la figure II.8

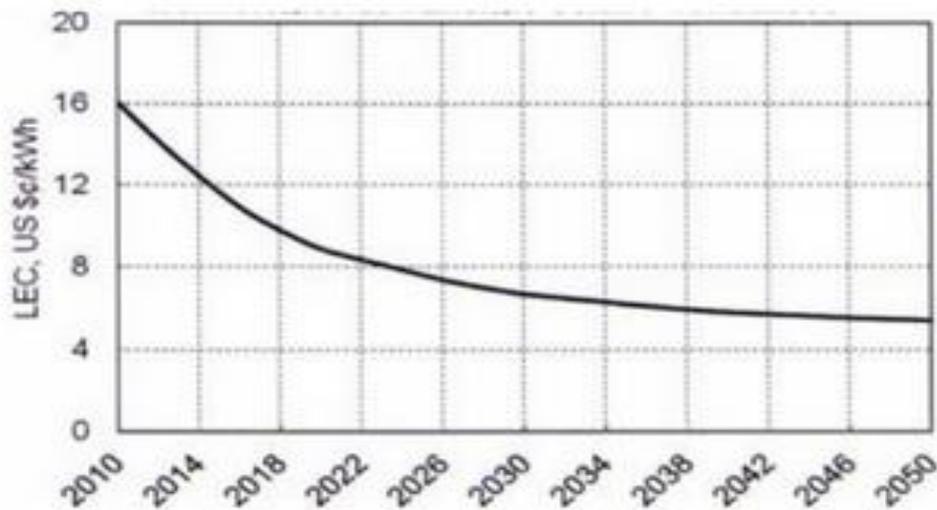


Figure II.8 Niveaux des couts énergétiques prévus jusqu'en 2050 pour les technologies des énergies solaires centralisées (CSP)[13]

L'application de ces technologies contribuera d'une manière non négligeable aux objectifs de réduction des émissions de gaz à effet de serre et aux problèmes environnementaux que nous causent actuellement les hydrocarbures.

Tableau II.4 Intensité du carbone des technologies de production d'électricité[13]

Technologie	Ton CO ₂ / MWh	Ton CO ₂
Charbon	0.84	840
Pétrole	0.78	780
Gaz naturel	0.49	490
Hydro	0	0
Thermo-solaire	0	0
Solaire TV	0	0
Eolien	0	0

Dans le domaine de la concentration solaire, le programme national des énergies renouvelables prévoit des actions ambitieuses pour l'industrie des équipements du solaire thermique. Ces actions sont résumées comme suit:[14]

- ❖ La période 2011-2013, lancement des études pour la fabrication locale des composants des centrales thermodynamiques (miroirs, fluide caloporteur et block de puissance). Le taux d'intégration visé est de 7%.

Chapitre II : Conversion thermodynamique

- ❖ La période 2014-2020, en plus des actions de renforcement des capacités d'engineering, il est prévu :
 - La construction d'une usine de fabrication des miroirs,
 - La construction d'une usine de fabrication de fluide caloporteur et équipements de stockage,
 - La construction d'une usine de fabrication des équipements du bloc de puissance,
 - Le taux d'intégration visé est de 50%.

Conclusion

D'après ce chapitre, la concentration solaire représente la technologie la plus probable pour le déploiement massif du solaire en Afrique du nord plus précisément en Algérie.

Cependant, la technologie de la thermodynamique est si vaste et plusieurs recherches qu'études ont été effectuées afin de développer et s'engager dans ce domaine.

Hors, dans notre prochain chapitre, nous allons nous familiariser sur les systèmes à capteurs cylindro-paraboliques.

Bibliographie

[1] : A. Fernandez-Garcia, et al., Parabolic-trough solar collectors and their applications, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol.14, 1695–1721, 2010

[2]: J. Vazquez and N. Castaneda, The collector for Extresol-1. 600 meters loop test in Andasol-1 and test unit description, 14th int symp on conc sol power and chem energy technol, SolarPACES, 2008

[3] : Syndicat des énergies renouvelables - Principe de fonctionnement du solaire thermodynamique, 2012.

<https://eduscol.education.fr/sti/sites/eduscol.education.fr.sti/files/ressources/techniques/5124/5124-principe-solaire-thermodynamique.pdf>, 06/2012.

[4] :R. Bernard, G. Menguy, M. Schwartz, Le rayonnement solaire conversion thermique et Applications. Edition Tec-Doc, 1980.

[5] : C. Coujard, S. Galant, Feuille de route solaire thermique, Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie, Research Gate, Juin 2010

[6] :D.YAMEGUEU NGUEWO, Contribution à la conception des centrales solaire thermodynamiques de troisième génération : Couplage et optimisation des technologies existantes, Mémoire de master d'ingénierie en génie énergétique, Institut international d'ingénierie de l'eau et de l'environnement (2iE), 2009.

[7]:P. Garcia, Outils d'évaluation technico-économique et d'aide à la conception des centrales solaires thermodynamiques du futur, Thèse de doctorat, Université de Perpignan, France, (2007).

[8] : Captation, Livre : chapitre 4, capteurs solaires à concentration, Université Alioune DIOP deBambey, 2015

[Chapitre 4: Capteurs solaires à concentration \(uadb.edu.sn\)](#), 2015.

Chapitre II : Conversion thermodynamique

[9]: H. Kadraoui, Etude comparative et rendement énergétique des différents degrés de concentrations des convertisseurs thermodynamique de l'énergie solaire, Mémoire de magistère en matériaux et énergies renouvelables option photo thermique, Université Abou BakrBelkaid, Tlemcen, 2011.

[10] :<https://afriqueconfidentielle.com/continent/algerie/le-projet-denergie-solaire-desertec-le-fiasco-de-trop-en-algerie>, 01/09/2020.

[11]: D. Ballo, N.M. Bettarcha, Etude expérimentale d'un rétro-concentrateur solaire parabolique, Mémoire de master en génie mécanique option énergétique, Université Abdel Hamid Ben Badis, Mostaganem, 2019.

[12]:L. Benhabib, Modélisation d'un système mixte entre le collecteur cylindro-parabolique et les cellules Zno, Thèse de doctorat, Université Abou Bark Belkaid, Tlemcen, 2021.

[13]:M. Mammar, A. Hamidat, Stratégies et aspects économiques des systèmes à concentration Solaires en Algérie et en Afrique du nord, Université A. Mira, Bejaia, 2012

<https://www.researchgate.net/publication/326606432> Strategies et aspects économiques des systèmes à concentration solaires en Algérie et en Afrique du Nord, 04/2012.

[14]:A. Hamidat, Le solaire thermique en Algérie : Histoire et perspectives, CDER, N. 22, 2012.

https://www.cder.dz/vlib/bulletin/pdf/bulletin_022_06.pdf, 2012.

Chapitre III

Technologies des concentrateurs cylindro-paraboliques

Introduction

Dans cette partie nous allons étudier théoriquement le fonctionnement d'un concentrateur cylindro-parabolique, en passant par tous les points importants du principe de fonctionnement jusqu'aux bilans énergétiques qui régissent une telle installation.

I. Historique[1]

En 1870, John Ericsson, ingénieur suédois, a construit le premier capteur solaire cylindro-parabolique (CCP) avec un collecteur d'ouverture de $3,25 \text{ (m}^2\text{)}$. Le but était de générer de la vapeur à l'intérieur du collecteur, puis de faire tourner un moteur de 373 (W) . Au cours des années suivantes, il a construit sept systèmes similaires à ceux du premier. Cependant, il utilisait de l'air au lieu de l'eau comme fluide de travail. En 1883, Ericsson a construit un grand système de CCP affiché à New York. Le collecteur parabolique a une longueur de $3,35 \text{ (m)}$ et $4,88 \text{ (m)}$ de large, ce qui focalise les rayons de soleil sur un tube récepteur de $15,88 \text{ (cm)}$ de diamètre. Le tube comprenait des bâtons en bois et des déchirures de fer qui étaient attachés sur les côtés du tube (cylindre). La surface du réflecteur était en verre de fenêtre, qui était installés sur des bâtons. Tout le système suivait manuellement le soleil.

En 1907, Wilhelm Meier et Adolf Remshardt (Allemands) ont obtenu un brevet sur la technologie des CCP. L'objectif du système était de générer de la vapeur.

En 1936, C.G. Abbot a utilisé un CCP et une machine à vapeur pour convertir l'énergie solaire en puissance mécanique avec une efficacité globale de $15,5\%$. Pour réduire la perte de chaleur, il a utilisé un seul tube à double paroi de verre évacué placé le long du CCP. Le système a été conçu de telle sorte que la vapeur saturée a été produite à $374 \text{ }^\circ\text{C}$ après avoir exposé le CCP au soleil pendant cinq minutes.

La technologie cylindro-parabolique n'a pas été développée pour les 60 années suivantes. Cependant, le déclenchement des CCP a recommencé au milieu des années 1970 en réponse à la crise du pétrole. Honeywell international Inc et les laboratoires nationaux de Sandia ont développés deux collecteurs au milieu des années 1970 aux États-Unis, et ils ont été conçus pour fonctionner avec des températures inférieures à $250 \text{ }^\circ\text{C}$.

Plus tard, en 1976, trois CCP de 3,66 (m) de long et 2,13 (m) de large avec un absorbeur recouvert de chrome noir recouvert d'une enveloppe en verre de 4 (cm) ont été construits et testés à Sandia.

En 1979, la société LUZ international Inc, a été fondée aux États-Unis et en Israël, son objectif était de développer et de construire des collecteurs paraboliques rentables pour les applications de chaleur thermique solaire. Luz a construit trois nouvelles générations de collecteurs paraboliques qui sont le LS-1, LS-2 et LS-3 (Figure III.1) qui ont été mis en œuvre dans des installations de systèmes de production d'énergie solaire (SPES). Les deux premières générations, LS-1 et LS-2, avaient des assemblages similaires. Ils avaient la même longueur, mais la largeur d'ouverture de LS-2 était deux fois supérieure à LS-1.



Figure III.1 Vu de devant et de derrière du collecteur L-S3 [1]

Un autre mode de suivi a été adopté qui est un système de contrôle hydraulique au lieu de l'engrenage mécanique.

En 1998, un groupe de sociétés européennes et de laboratoires de recherche a été créé pour développer et construire une nouvelle génération de CCP. Après avoir étudié plusieurs structures de collection différentes, ils ont construit la première lecture d'une nouvelle figure appelée ET-100. Le modèle se composait de 8 modules avec une ouverture de 545 (m²). Après cela, la deuxième version a été développée et nommée ET-150. Elle avait un nombre de 12 modules avec une surface d'ouverture de 820 (m²).

En 2003, une troisième version de collecteur européen a été construite, et elle a été nommée SKAL-ET. Elle avait un nombre de 12 modules avec une ouverture effective de 4360 (m²). Elle avait été érigée à l'usine SEGS-V en Californie, aux États-Unis pendant cette époque.

En 2005, un nouveau CCP appelé SENERTROUGH-I a été développé par la société espagnole SENER. Il avait la même taille que le collecteur LS-3, mais la structure de support était identique à celle du collecteur LS-2. Une boucle de 600 (m) du collecteur SENERTROUGH-I était installée dans la centrale solaire à concentration Andasol-1 en Espagne.

II. Concentrateur cylindro-parabolique

La technologie des capteurs cylindro-paraboliques est actuellement la plus éprouvée des techniques de concentration solaire. De nombreuses installations ont déjà été testées et commercialisées, dont certaines dans les années 80.

II.1. Description ET Principe de fonctionnement

Ce type de centrale se compose de rangées parallèles de longs miroirs cylindro-paraboliques qui tournent autour d'un axe horizontal pour suivre la course du soleil. [1]



Figure III.2 Concentrateur cylindro-parabolique [2]

Les capteurs solaires à concentration cylindro-paraboliques ont pour but de concentrer et transformer l'énergie solaire incidente en énergie thermique extraite par le fluide qui s'écoule dans le tube de l'absorbeur, ce qui permet d'atteindre des températures de 500°C.

Le fluide caloporteur refroidit l'absorbeur en emportant la chaleur utile qui est ensuite convertie ou transférée pour différents usages.

Le flux solaire reçu par le capteur est d'abord réfléchi sur la surface du concentrateur, puis il traverse généralement un vitrage destiné à isoler thermiquement le foyer où il est absorbé par une surface appropriée. La composante directe du rayonnement solaire peut être dirigée vers le foyer, mais les composantes diffuses ne pouvant être concentrées. L'absorbeur s'échauffe et perd de la chaleur vers l'extérieur sous forme de rayonnement et de convection. Cette perte peut être caractérisée par un coefficient de pertes thermiques. [3]

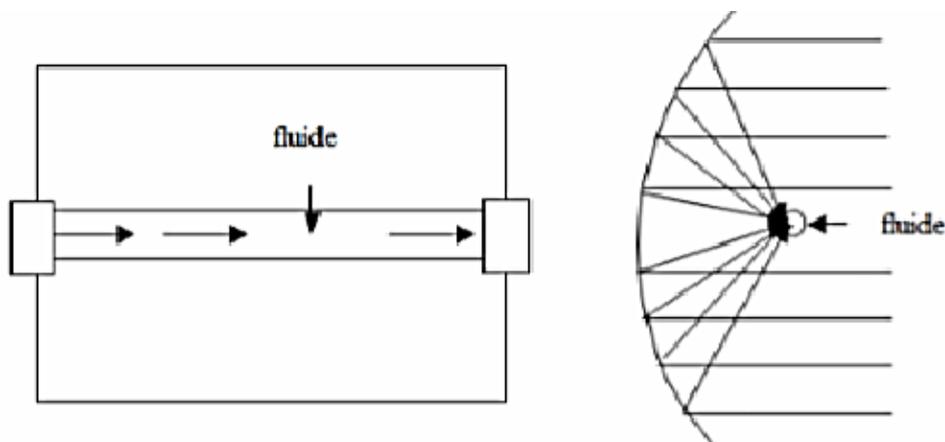


Figure III.3 Principe de fonctionnement du concentrateur [3]

Pour pouvoir choisir un réflecteur cylindro-parabolique, le concentrateur cylindro-parabolique est caractérisé par deux paramètres principaux. Les paramètres géométriques et les paramètres optiques. [4]

♣ *Les paramètres géométriques* [5]

Les quatre paramètres suivants sont utilisés pour caractériser la forme et la taille d'un cylindro-parabolique: la longueur de cylindro-parabolique, la distance focale, la largeur de l'ouverture et l'angle d'ouverture.



Figure III.4 Paramètres géométriques d'un cylindro-parabolique [5]

- **La longueur de cylindro-parabolique (l)**: C'est la longueur du miroir, elle peut atteindre les 4.06 m.
- **La distance focale (f)**: C'est la distance entre le point focale et la courbe de la parabole. La focale de la parabole (f ou F) est le paramètre qui décrit la forme de la parabole.

$$Y = \frac{1}{4f} X^2 \quad (\text{III.1})$$

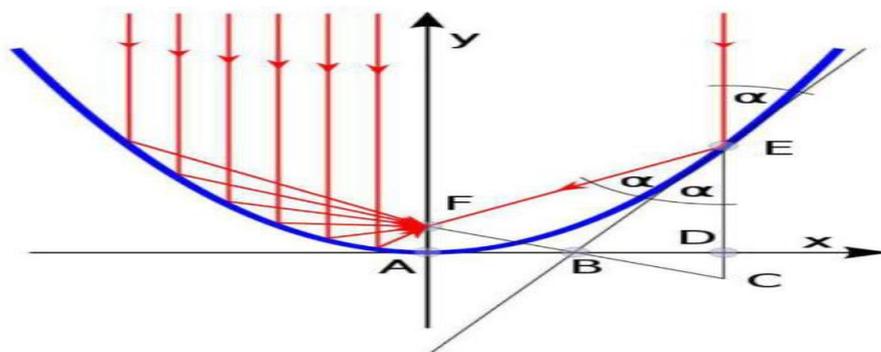


Figure III.5 Chemin des rayons parallèles dans un miroir parabolique [4]

- **L'angle d'ouverture (ψ)**: C'est l'angle au point focal entre l'axe optique (Y) et le segment reliant le point focal au bord du miroir. Deux des trois paramètres de l'angle d'ouverture, de la largeur d'ouverture et de la distance focale sont suffisants pour déterminer complètement la section transversale d'un cylindro-parabolique, c'est-à-dire la forme et la taille. Cela signifie également que deux d'entre eux sont suffisants pour calculer le troisième.

Ψ Peut être exprimée en fonction du rapport entre la largeur d'ouverture et la distance focale:

$$\tan \Psi = \frac{\frac{a}{f}}{2 - \left(\frac{a}{f}\right)^2} \quad (\text{III.2})$$

Aussi le rapport de la largeur de l'ouverture à la focale peut être exprimé en fonction de l'angle d'ouverture:

$$\frac{a}{f} = -\frac{4}{\tan \Psi} + \sqrt{\frac{16}{\tan^2 \Psi} + 16} \quad (\text{III.3})$$

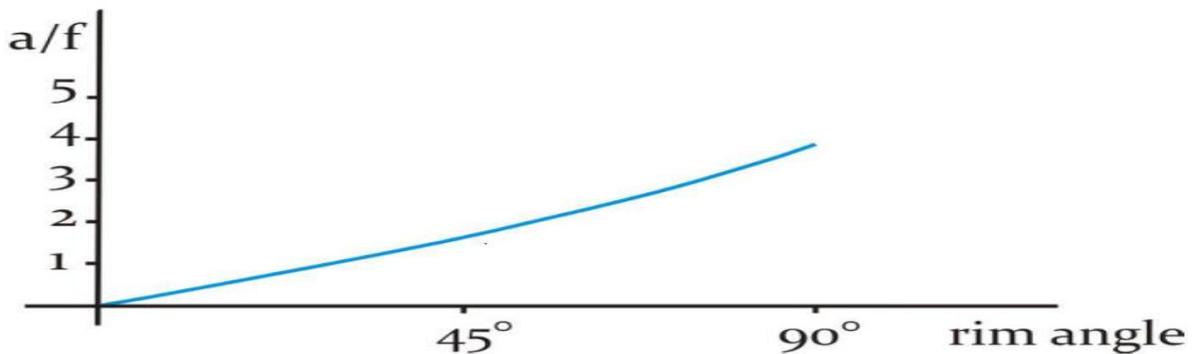


Figure III.6 Relation entre l'angle d'ouverture et la valeur a/f [4]

L'angle d'ouverture est lié à la distance entre les différentes parties des miroirs et la ligne focale. Il existe un angle d'ouverture optimal qui prend en compte aussi le prix du miroir proportionnel à sa surface. L'angle d'ouverture des cylindro paraboliques réelles est d'environ 80 °.

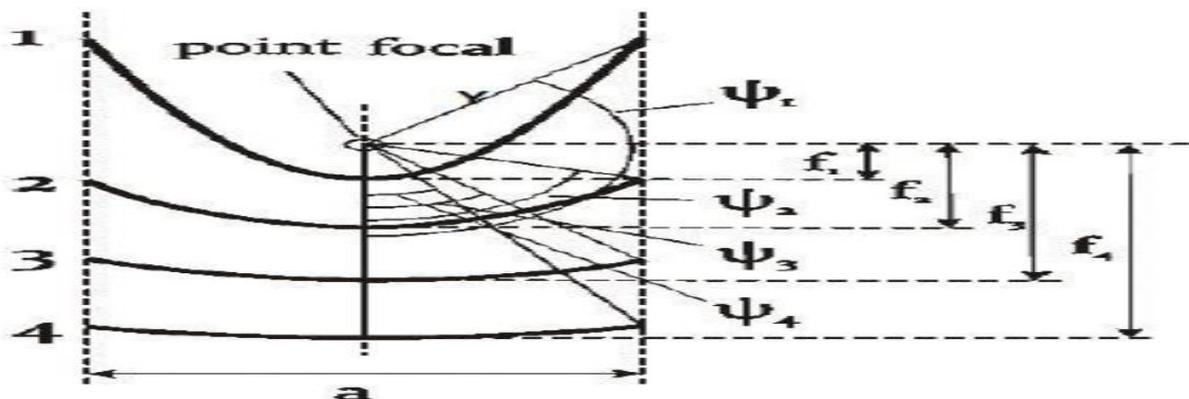


Figure III.7 Relation entre la ligne focale et l'angle d'ouverture [4]

- **La largeur de l'ouverture (a):** La plupart des collecteurs réels sont d'une largeur d'ouverture d'environ 6(m), la distance focale est (approximativement à l'angle d'ouverture et à la largeur d'ouverture) d'environ 1,75(m) et la longueur du module est comprise entre 12 et 14(m). Il existe des collecteurs qui ont des largeurs d'ouverture plus petites (Solarlite) ou plus grandes (Skyfuel, Heliotric) avec différentes longueurs focales correspondantes.

♣ *Les paramètres Optiques [5]*

- **La surface du miroir et la surface d'ouverture:** Pour un (rayonnement normal direct) et position solaire données; la surface d'ouverture de miroir est calculée comme le produit de la largeur de l'ouverture a et de la longueur du collecteur l.

$$A_a = a \cdot l \quad \text{(III.4)}$$

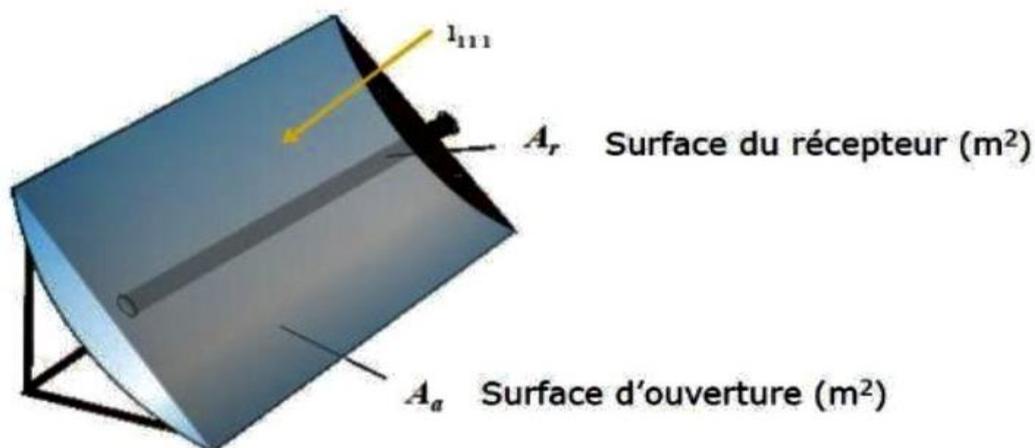


Figure III.8 Surface d'ouverture du collecteur et du récepteur [5]

La surface d'un cylindro-parabolique peut être importante pour déterminer le besoin de matière pour la fabrication. La surface est calculée comme suit:

$$A = \frac{a}{2} J_1 + \frac{a^2}{16F^2} + 2F \ln\left(\frac{a}{4f} J_1 + \frac{a^2}{16f^2}\right) \quad \text{(III.5)}$$

- **Le facteur de concentration C :** Le taux de concentration est l'un des paramètres principaux du collecteur, il est décisif pour les températures de fonctionnement possible de la centrale cylindro-parabolique. Le rapport de concentration C est défini

comme le rapport de la densité de flux radiant à la ligne focale G_{in} à l'éclairement direct à l'ouverture du collecteur G_a :

$$C = \frac{G_{in}}{G_a} \quad (\text{III. 6})$$

Aussi, Il existe un moyen simple de spécifier le taux de concentration sans le mesurer, qui est la concentration géométrique. Elle est définie comme le rapport de la surface de collecteur sur la surface du récepteur:

$$CG = \frac{A_a}{A_r} \quad (\text{III. 7})$$

Comme il est illustré sur la figure précédente, concernant la surface du collecteur, elle est plus claire à compter que la surface du récepteur. Dans de nombreux cas, la surface projetée du tube absorbeur est choisie. Dans ce cas, la surface d'ouverture du récepteur est un rectangle avec de surface d.l.

Alors, la concentration géométrique est donné par :

$$CG = \frac{A \cdot l}{d \cdot l} = \frac{a}{d} \quad (\text{III. 8})$$

Dans les concertateurs cylindro-paraboliques réels; on prend la surface d'ouverture de récepteur, c'est la surface du tube absorbeur :

$$CG = \frac{A \cdot l}{\pi \cdot d \cdot l} = \frac{a}{\pi \cdot d} \quad (\text{III. 9})$$

Cette définition mène à un taux de concentration géométrique faible. Donc, le taux de concentration selon la surface projetée du tube absorbeur est pratiquement le plus utilisé.

II.2. Les différents constituants d'un CCP

Comme tout capteur thermique, les capteurs à concentration sont des dispositifs destinés à absorber le rayonnement solaire et à transmettre la chaleur ainsi produite à un fluide caloporteur.



Figure III.9 Concentrateur en ligne de rayonnement solaire [6]

Réflecteur

Le réflecteur a pour fonction de concentrer le rayonnement qui autrement n'atteindrait pas l'absorbeur. Il est en général utilisé pour atteindre des températures très élevées. L'utilisation d'un réflecteur permet de diminuer la taille de l'absorbeur ce qui réduit les pertes de chaleur, diminuer le prix et permet aussi d'augmenter son efficacité.

Pour être efficaces, le réflecteur doit :

- Réfléchir le maximum de rayonnement lumineux;
- Être parfaitement lisse afin d'éviter l'accumulation de la saleté;
- Résister dans le temps aux effets de l'environnement (pluie, grêle, rayonnement solaire,...);
- Absorber au minimum le rayonnement lumineux;
- Résister aux variations de température.

Il existe plusieurs géométries de réflecteur selon l'utilisation : [7]

- ♣ Cylindro-parabolique: cette géométrie permet une focalisation linéaire, elle est utilisée dans le cas des collecteurs à tubes sous vides ou les centrales solaires thermiques de type Luz.
- ♣ Sphérique: le réflecteur sphérique concentre le rayonnement solaire sur un foyer linéaire mobile porté par un rayon de la sphère orienté en direction du Soleil.

- ♣ Parabolique: c'est le type de géométrie le plus utilisé. Il permet de concentrer les rayons lumineux en un point pour obtenir de très hautes températures. Il est souvent utilisé dans le cas des cuiseurs solaires ou couplé à un moteur Stirling.
- ♣ Plan: le réflecteur plan est en général mobile afin de suivre le Soleil, on parle alors d'héliostat plan. Ce système est utilisé dans le cas des centrales solaire thermique à tour ou couplé à un miroir parabolique comme dans le cas des fours solaires de type Odeillo.

✚ Absorbeur

L'absorbeur est l'un des éléments les plus importants d'un capteur thermique. Il absorbe l'énergie réfléchie par le concentrateur et la transfère au fluide caloporteur. Son coefficient d'absorption doit être aussi élevé que possible afin d'éviter toute réflexion du rayonnement incident.

La figure III-10 présente l'emplacement de l'absorbeur par rapport au foyer du concentrateur :

- À droite l'absorbeur est placé sur le foyer : l'avantage c'est qu'on a une température élevée ponctuelle de l'ordre de 700 °C (risque de détérioration du centre de l'absorbeur car il est soumis à une très grande température, alors que le reste de l'absorbeur reste intacte car on a une température faible par rapport au centre).
- À gauche l'emplacement de l'absorbeur est décalé par rapport au foyer ce qui permet d'éviter le risque de fatigue et d'homogénéiser la température de l'absorbeur, la forme de l'absorbeur a aussi été modifiée pour favoriser cela. [6]

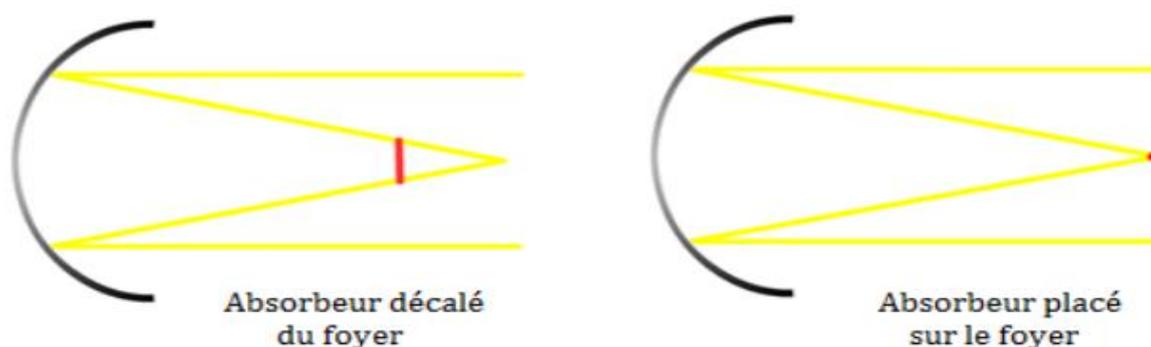


Figure III.10 Emplacement de l'absorbeur par rapport au foyer du concentrateur [6]

Voici les propriétés de quelques matériaux utilisés comme absorbeurs:

Tableau III.1 Mid-Temperature Selective Surfaces [8]

Matériaux	absorptivité α^*	émissivité ε	sélectivité α^* / ε	Température max.
Black nickel	0,88 - 0,98	0,03 - 0,25	3,7 – 32	300°C
Graphitic films	0,876 - 0,92	0,025 - 0,061	14,4 - 36,8	250°C
Black copper	0,97 - 0,98	0,02	48,5 – 49	250°C
Black chrome	0,95 - 0,97	0,09 - 0,30	3,2 - 10,8	350 - 425°C

Fluide caloporteurs et thermodynamiques

L'énergie absorbée est convertie grâce à un fluide caloporteur puis au fluide thermodynamique.

Dans certains cas, le fluide caloporteur est utilisé directement comme fluide thermodynamique. Le fluide caloporteur permet d'évacuer la chaleur emmagasinée par l'absorbeur et de la transmettre vers là où elle doit être consommée. Le choix du fluide caloporteur détermine la température maximale admissible, oriente le choix de la technologie et des matériaux du récepteur et conditionne la possibilité et la commodité du stockage. [2]

Le fluide caloporteur doit prendre en compte les conduits suivants : [9]

- Etre chimiquement stable lorsqu'il atteint une forte température, en particulier lors de la stagnation du capteur;
- Posséder des propriétés antigel en corrélation avec les conditions météorologiques locales;
- Posséder des propriétés anticorrosives selon la nature des matériaux présents dans le circuit capteur;
- Posséder une chaleur spécifique et une conductivité thermique élevées afin de transporter efficacement la chaleur;
- Etre non-toxique et avoir un faible impact sur l'environnement;
- Avoir une basse viscosité afin de faciliter la tâche de la pompe de circulation;
- Etre facilement disponible et bon marché.

Système de poursuite du soleil

Le rendement d'un concentrateur varie au cours de la journée Lorsqu'il est fixe par rapport au sol et orienté vers le sud.

La poursuite solaire est l'action de pointer, en temps réel, tous les concentrateurs dans la direction du vecteur solaire de manière à ce qu'il soit toujours perpendiculaire au réflecteur pour capter le maximum de rayon incident.

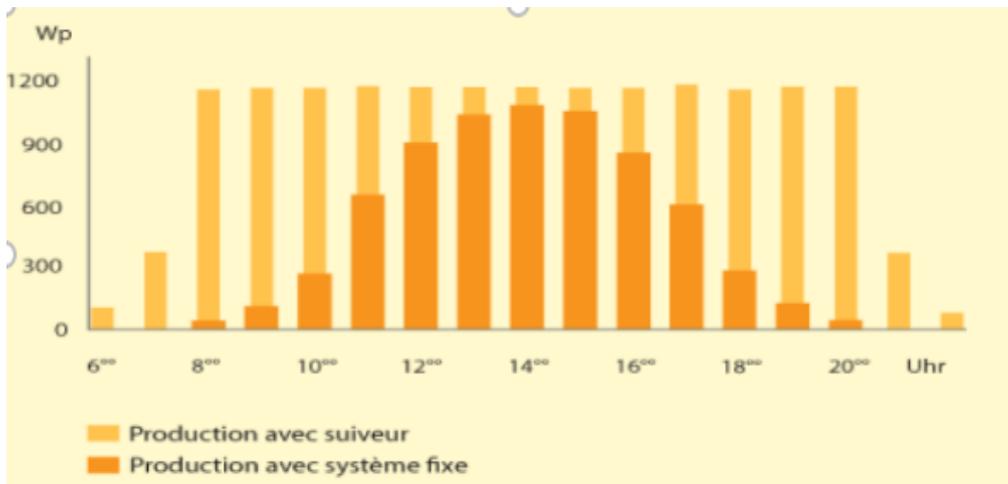


Figure III.11Évolution de la production au cours de la journée[6]

III. Principales installations de capteur solaire cylindro-parabolique

La technologie des capteurs cylindro-parabolique est actuellement la plus éprouvée des techniques de concentration solaire

Chapitre III: Technologies des CCP

Tableau III.2 Principales installations du cylindro-parabolique[10]

Installation	Lieu	Promoteur	Année	Capacité nette (MW)	Fluide caloporteur	Temp. Sortie °c	Surface champs solaire (m ²)
Coss	Vignola (France, Corse)	CEA-CNRS AFME	1980	50(KW)	Huile (Gilother m)	250	1176
SSPS-DCS-ACURE X		UE+ USA	1981	500(KW)	Huile (Sanother m)	300	2672
SEGS I	Dagget	Luz	1984	14(MW)	Huile	-	-
SEGS II	Dagget (Cal, USA)	Luz	1986	30	Huile (ESSO 500)	316	190338
SEGS III/IV	Kramer junction (Cal, USA)	LUZ	1957	30	Huile	349	230300
SEGS V	Kramer junction (Cal,	Luz	1988	30	Huile	349	250500
EL NASR	Egypte	NREA	2004	-	Vap sat	175	1906
Andasol 1	Guadix Espagne	Cobra (Espagne)	2008	50	Sels Fondus	400	1.5 Millions m ²
Andasol 2		Solar Millenium (USA)	2009	50			
Andasol 3			2011	50			
Nevasa Solar one	Boulder city USA	DOE	2007	64	Huile	300-400	1.2 Km ²

IV. L'exploitation de technologie des CCP en Algérie

L'Algérie voit des occasions idéales de combiner le gaz naturel à l'énergie solaire en intégrant l'énergie solaire concentrée à bas des concentrateurs cylindro-paraboliques. Dans une première étape une centrale électrique hybride (gaz /solaire) est actuellement en service au sud de l'Algérie (HassiRmel) avec 224 concentrateurs d'une surface de 180000 (m²) des réflecteurs paraboliques et d'une puissance électrique solaire moyenne de 25(MW). [11]

Ce choix stratégique est motivé par l'immense potentiel de l'Algérie en énergie solaire, l'énergie moyenne reçue sur une surface horizontale soit près de 1700 KWh/m² annuellement aux régions côtières, 1900 KWh/m²/an aux hauts plateaux et 2650 KWh/m²/an aux régions Sahariennes. Cette énergie constitue l'axe majeur du programme qui consacre au solaire thermique et au solaire photovoltaïque. Le solaire devrait atteindre d'ici à 2030 plus de 37% de la production nationale d'électricité selon le décret 04-92, publié au journal officiel de l'Algérie en Mars 2004. [12]



Figure III.12 La centrale électrique hybride de HassiRmel [11-12]

Conclusion

Nous concluons que la technologie de concentration cylindro-parabolique permet une conversion efficace de l'énergie solaire en énergie thermique en atteignant des températures de sortie de plusieurs centaines de degrés Celsius.

Ce chapitre avait pour but de déterminer les différents constituants ainsi que différents paramètres d'un CCP, pour nous permettre une bonne continuation dans le chapitre-4-. Durant ce dernier nous allons nous focaliser sur la modélisation.

Bibliographie

[1] : L. EL HADRAMY, Analyse et modélisation d'un capteur cylindro-parabolique, Mémoire de Master en génie mécanique Option : Energétique Spécialité : Energies Renouvelables, Université Mouloud Mammer, Tizi-Ouzou, 2016/2017.

[2] : Syndicat des énergies renouvelables - Principe de fonctionnement du solaire thermodynamique, 2012.

<https://eduscol.education.fr/sti/sites/eduscol.education.fr.sti/files/ressources/techniques/5124/5124-principe-solaire-thermodynamique.pdf>, 06/2012.

[3] :M. Kechidi, A. Lazali, Etude expérimentale d'un concentrateur cylindro-parabolique, Mémoire de master installations énergétiques et turbomachines, Université Saad Dahlab, Blida, 2018/2019.

[4] :Mazouz Mawloud, Etude et simulation des transferts de chaleur dans un récepteur d'un concentrateur solaire cylindro-parabolique, Mémoire de master option thermique et combustion, Université m'hamed bougara, Boumerdès, 2017.

[5] :A. Haffar, M. Amghar, Etude de la performance d'un concentrateur cylindro-parabolique en vue de son utilisation dans un procédé de séchage, Mémoire de master en génie mécanique option énergétique, Université Kasdi Merbah, Ouargla, 26/06/2019.

[6] : H. EL Yazidi, Y. Chouklat, Système électromécanique de poursuite pour un concentrateur solaire thermique, Mémoire de fin d'étude en techniques d'exploitation des énergies renouvelables, Université Ibn Zohr, Ouarzazat, Maroc, 2011/2012.

[7] :http://fr.solarpedia.net/wiki/index.php?title=Solaire_thermique_%C3%A0_concentration#cite_ref-8, 01/10/2017.

[8] : C.E. Kennedy, Review of mid- to high-temperature solar selectiveabsorber materials, <http://large.stanford.edu/publications/coal/references/troughnet/solarfield/docs/31267.pdf>, 07/2002.

[9] : D. YAMEGUEU NGUEWO, Contribution à la conception des centrales solaire thermodynamiques de troisième génération: Couplage et optimisation des technologies

existantes, Mémoire de master d'ingénierie en génie énergétique, Institut international d'ingénierie de l'eau et de l'environnement (2iE), 2009.

[10] : L. Benhabib, Modélisation d'un capteur cylindro-parabolique, Mémoire de master en physique option physique énergétique et matériaux, Université Abou BekrBelkaid, Tlemcen 2012/2013

[11] : N. El Gharbi et al., Acomparative study between parabolic trough collector and linear Fresnel reflector technologies, Science Direct, 6, 565-572, 2011

[12] : A. Moussaoui, S. Derbal, Réalisation et étude d'un concentrateur solaire cylindro-parabolique. Utilisation de matériaux récupérés, Mémoire de master en physique, Université Larbi Ben M'Hidi, Oum El Bouaghi, 31/05/2016.

Chapitre IV

Modélisation d'un capteur cylindro-parabolique

Introduction

Dans cette partie de notre travail, nous allons effectuer la modélisation numérique d'un concentrateur solaire cylindro-parabolique en employant deux fluides caloporteurs bien distinct (l'eau et l'huile thermique Syltherm 800. Cette modélisation est employée pour prévoir les différentes caractéristiques du capteur solaire pour chaque fluide caloporteur.

I. Présentation du logiciel de calcul

MATLAB est un système interactif de programmation scientifique, pour le calcul numérique et la visualisation graphique, basé sur la représentation matricielle des données.

Son objectif, par rapport aux autres langages, est de simplifier au maximum la transcription en langage informatique d'un problème mathématique, en utilisant une écriture la plus proche possible du langage naturel scientifique.

Le logiciel fonctionne sous Windows et sous Linux. Son interface de manipulation HMI utilise les ressources usuelles du multifenêtrage. Son apprentissage n'exige que la connaissance de quelques principes de base à partir desquels l'utilisation des fonctions évoluées est très intuitive grâce à l'aide intégrée aux fonctions.

Tous les logiciels de calcul réutilisent des savoir-faire scientifiques anciens et éprouvés, développés dans les années 1960. [1]

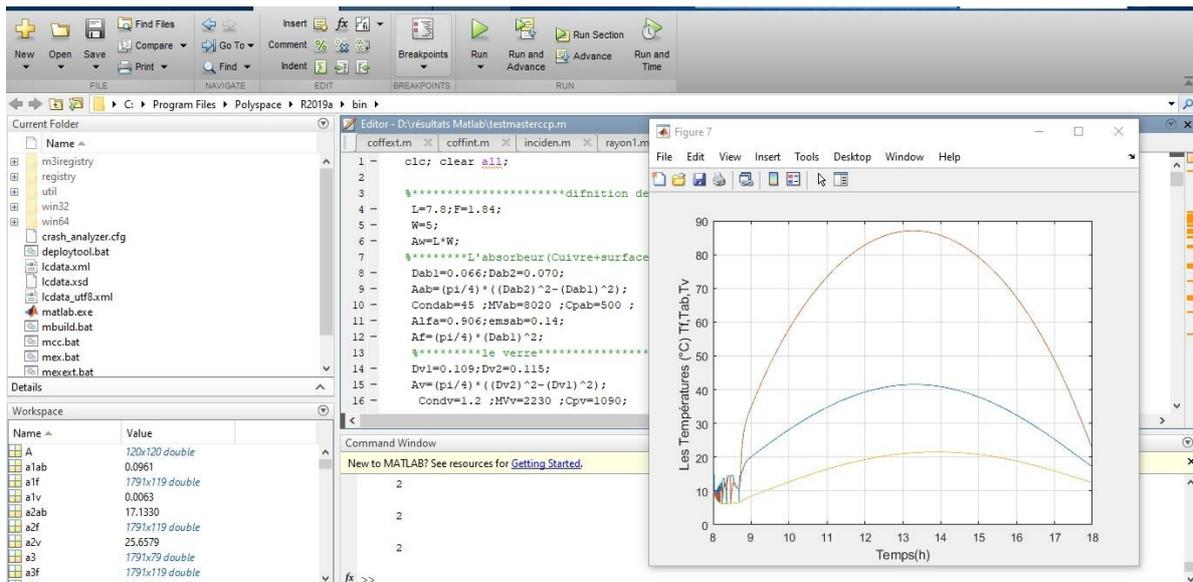


Figure IV.1 Aperçu d'une partie de la programmation en Matlab

II. Description du système

Dans cette partie de notre étude, la quantité d'énergie captée, et l'analyse des performances optiques et thermiques du concentrateur cylindro-parabolique avec deux fluides caloporteurs (huile thermique et l'eau) seront investiguées.

Un collecteur Solargenix LS-2 et un récepteur Schott PTR 2008 ont été choisi comme concentrateur solaire pour notre étude. Un tel choix de concentrateur a été motivé par la forte résistance à des gammes de températures élevées et des conditions climatiques difficiles.

La simulation de ces paramètres est réalisée pour le nord de l'Algérie plus précisément à Tlemcen (*Latitude: 34.89, Longitude: -1.32 34° 53' 24" Nord, 1° 19' 12" Ouest, Altitude: 715m* et un climat méditerranéen avec été chaud).

III. Etablissement des équations caractéristiques

III.1. Bilan énergétique

Le bilan énergétique entre les composantes de l'absorbeur (enveloppe de verre, tube absorbeur et fluide) est le principe de la modélisation. Pour cela, les différents coefficients de transfert de chaleur doivent être connus (Figure IV.2). Par conséquent, on considère les hypothèses suivantes :

- Répartition uniforme du rayonnement solaire dans l'absorbeur.
- L'effet d'ombre du tube sur le miroir est négligeable.
- L'écoulement du fluide incompressible est unidimensionnel.
- Le fluide caloporteur est incompressible.
- Le transfert par conduction entre l'absorbeur et la vitre considéré négligeable.

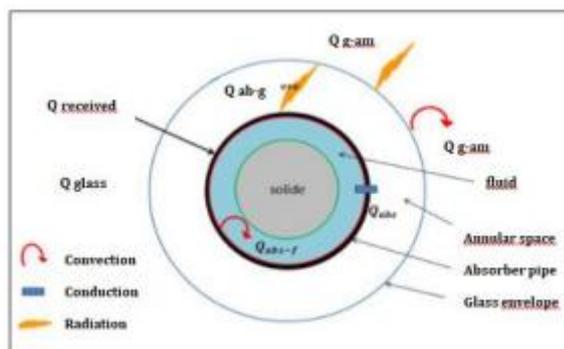


Figure IV.2 Les différents transferts de chaleur. [2]

Pour notre étude les bilans énergétiques sont comme suit :[3]

III.1.1. Pour l'enveloppe de verre

Le flux d'accumulation de chaleur dans la vitre = flux absorbé + flux de diffusion thermique interne + flux de convection interne - flux des pertes externes.

L'équation IV.1, régissant la température de la paroi de l'enveloppe de verre :

$$q_{acc.g} = q_{abs.g} + q_{diff.g} + q_{int} - q_{ext} \quad (IV.1)$$

$$A_g \cdot \rho_g \cdot C_{p_g} \cdot \frac{dT_g}{dt} = A_0 \cdot I_d \cdot \alpha_g \cdot \rho_0 \cdot \gamma \cdot k + \lambda_g \cdot \frac{d^2 T_g}{dx^2} + q_{int} - q_{ext} \quad (IV.2)$$

III.1.2. Pour le tube absorbeur

Le flux d'accumulation de chaleur dans le tube absorbeur = flux absorbé + flux de diffusion thermique interne du tube - flux de convection interne - flux de convection du tube avec le fluide.

L'équation IV.3, déterminant la température du tube absorbeur :

$$q_{acc.ab} = q_{abs} + q_{diff.ab} - q_{int} - q_u \quad (IV.3)$$

$$A_{ab} \cdot \rho_{ab} \cdot C_{p_{ab}} \cdot \frac{dT_{ab}}{dt} = A_0 \cdot I_d \cdot \alpha_0 \cdot \rho_0 \cdot \gamma \cdot k + \lambda_{ab} \cdot \frac{d^2 T_{ab}}{dx^2} - q_{int} - q_u \quad (IV.4)$$

III.1.3. Pour le fluide caloporteur

Le flux d'accumulation de chaleur dans le fluide + le flux d'advection du fluide = flux de diffusion thermique interne du fluide + flux de convection du fluide avec l'absorbeur

L'équation IV.5, menant à la température de la paroi du fluide caloporteur :

$$q_{acc.f} + q_{adv.f} = q_{diff.f} + q_u \quad (IV.5)$$

$$A_f \cdot \rho_f \cdot C_{p_f} \cdot \frac{dT}{dt} + \dot{m} \cdot C_{p_f} \cdot \frac{dT_f}{dt} = \lambda_f \cdot \frac{d^2 T_f}{dx^2} + q_u \quad (IV.6)$$

Dont : Le coefficient de transmission-absorption, la quantité d'énergie absorbée par le tube absorbeur et transmise au fluide caloporteur dépend de deux coefficients, la transmittance de l'enveloppe du verre et l'absorption de tube absorbeur est donné selon l'expression suivante :

$$\alpha_0 = \frac{\alpha_{ab} \cdot \tau_g}{1 - (1 - \alpha_{ab}) \cdot (1 - \tau_g)} \quad (IV.7)$$

Quant à l'angle d'incidence modifié est donné par :

$$\mathbf{K} = 1 - 3.84 \cdot 10^{-5} \cdot (\theta) - 143 \cdot 10^{-6} \cdot (\theta)^2 \quad (\text{IV.8})$$

Les surfaces de chaque composante sont calculées suivant les expressions :

$$\mathbf{A}_g = \frac{\pi(D_{g(\text{ext})}^2 - D_{g(\text{int})}^2)}{4} \quad (\text{IV.9})$$

$$\mathbf{A}_{ab} = \frac{\pi(D_{ab(\text{ext})}^2 - D_{ab(\text{int})}^2)}{4} \quad (\text{IV.10})$$

$$\mathbf{A}_f = \frac{\pi(D_{ab(\text{int})}^2)}{4} \quad (\text{IV.11})$$

Les quantités d'énergies absorbées par le tube absorbé et l'enveloppe de verre sont exprimées selon les relations citées par Ouagued.

III.2. Modes de transfert de chaleur [4]

III.2.1. Le transfert de chaleur extérieur

Ce transfert se fait entre l'enveloppe de la vitre et l'environnement. Il s'effectue par convection et par radiation.

➤ Le coefficient de transfert par convection

Le transfert est en fonction de la vitesse du vent. Dans le cas d'une vitesse nulle et autour d'un cylindre horizontal, selon la corrélation de Churchill et Chu, la convection est dite naturelle. Les propriétés de l'air sont calculées à la température $\mathbf{T}_{m(\text{ext})} = \frac{\mathbf{T}_{am} + \mathbf{T}_g}{2}$.

Le coefficient de transfert convectif est donné par l'expression suivante :

$$\mathbf{hc}(\text{ext}) = \left[0.6 + 3.87 \times \left[\frac{\mathbf{Ra}_a}{\left(1 + \left(\frac{0.559}{\mathbf{Pr}_a} \right)^{\frac{9}{16}} \right)^{\frac{16}{9}}} \right]^{\frac{1}{6}} \right]^2 \quad (\text{IV.12})$$

Dans le cas d'une vitesse non nulle la convection devient forcée, la corrélation de Zhukauskas fait appel.

Les propriétés de l'air sont calculées à la température ambiante et Pr_v calculé à la température de l'enveloppe de verre. Le coefficient de transfert convectif s'écrit suite à l'expression suivante :

$$h_{c(ext)} = C \cdot Re_a^n \cdot Pr_a^m \cdot \left(\frac{Pr_a}{Pr_g}\right)^{1/4} \cdot \frac{\lambda_a}{D_{ge}} \quad (IV.13)$$

Pour :

$$1 < Re_a \leq 40 \quad \Rightarrow \quad C = 0.75, n = 0.4$$

$$40 < Re_a \leq 10^3 \quad \Rightarrow \quad C = 0.51, n = 0.5$$

$$10^3 < Re_a \leq 2 \cdot 10^5 \quad \Rightarrow \quad C = 0.26, n = 0.6$$

$$2 \cdot 10^5 < Re_a \leq 10^6 \quad \Rightarrow \quad C = 0.076, n = 0.7$$

$$Et : m = \begin{cases} 0.37 \rightarrow Pr_a \leq 10 \\ 0.36 \rightarrow Pr_a > 10 \end{cases}$$

Les propriétés physiques de l'air extérieur sont calculées à la température ambiante, or pour le nombre de Prandtl, il est calculé à la température de la vitre.

➤ Le coefficient de transfert par rayonnement

Suivant la loi de Stefan Boltzmann, la relation du coefficient de transfert par rayonnement est comme suit :

$$h_{r(ext)} = \varepsilon_g \cdot \sigma \cdot \left((T_{sky} + 273.15)^2 + (T_g + 273.15)^2 \right) \times (T_{sky} + T_g + 546.3) \quad (IV.14)$$

Le flux de chaleur extérieur s'exprime comme suit :

$$q_{ext} = q_{c(ext)} + q_{r(ext)} = A_{g(ext)} \cdot [h_{r(ext)}(T_g - T_{sky}) + h_{c(ext)}(T_g - T_{am})] \quad (IV.15)$$

III.2.2. Le transfert de chaleur intérieur

Ce transfert se fait entre l'absorbeur et l'enveloppe de vitre. Il dépend de la pression. Si la pression entre les deux composants est supérieure à 0.013Pa, la convection est estimée naturelle entre deux cylindres horizontaux concentriques. Dans le cas contraire (le vide), le coefficient de convection est considéré nulle. Les propriétés physiques de l'air entre l'absorbeur et l'enveloppe de verre sont calculées à la température $T_{m(int)} = \frac{T_{am} + T_g}{2}$.

- Le coefficient de transfert par convection

$$h_{c(in)} = \frac{2\lambda_{eff}}{D_{abe} \cdot \ln\left(\frac{D_{gi}}{D_{abe}}\right)} \quad (IV.16)$$

Avec :

$$\lambda_{eff} = 0.386 \times \lambda_a \times \left(\frac{Pr_a}{Pr_a + 0.861}\right)^{1/4} \times (Ra_c)^{1/4} \quad (IV.17)$$

$$Ra_c = \frac{\left(\ln\left(\frac{D_{gi}}{D_{abe}}\right)\right)^4}{L_{eff}^3 \times \left(D_{abe}^{-3/5} + D_{gi}^{-3/5}\right)^5} \times Ra_{eff} \quad (IV.18)$$

$$L_{eff} = \frac{D_{gi} - D_{abe}}{2} \quad (IV.19)$$

$$Ra_{eff} = Gr_a \times Pr_a \quad (IV.20)$$

Dans le cas où la pression $P < 0.013P_a$ (vide entre le tube absorbeur et la vitre), la convection est considérée comme nulle.

- Le coefficient de transfert par rayonnement

$$h_{r(in)} = \varepsilon_{int} \cdot \sigma \cdot \left((T_{ab} + 273.15)^2 + (T_g + 273.15)^2 \right) \times (T_{ab} + T_g + 546.3) \quad (IV.21)$$

$$\varepsilon_{int} = \frac{1}{\left(\frac{1}{\varepsilon_{ab}} + \frac{1-\varepsilon_g}{\varepsilon_g}\right) \times \left(\frac{D_{abe}}{D_{gi}}\right)} \quad (IV.22)$$

Le flux de chaleur intérieur s'exprime comme :

$$q_{int} = q_{c(int)} + q_{r(int)} = A_{ab(ext)} \cdot [h_{r(int)} + h_{c(int)}] (T_{ab} - T_g) \quad (IV.23)$$

III.2.3. Le transfert de chaleur utile

La convection du fluide caloporteur à l'intérieur du tube absorbeur est considérée forcée pour un régime d'écoulement turbulent (suite aux hypothèses d'étude).

C'est pourquoi les corrélations de Gnielinski sont adoptées. Le coefficient de ce transfert dépend des deux nombres Reynolds et Prandtl. Il s'exprime comme suit :

$$hu = \frac{\lambda_f \times Nu_f}{D_{abi}} \quad (IV.23)$$

Le régime d'écoulement influe sur le nombre de Nusselt, par contre l'expression du nombre de Reynolds est la suivante :

$$Re_f = \frac{4\dot{m}\rho_f}{\pi\mu_f D_{ab(int)}} \quad (IV.24)$$

Pour un écoulement turbulent ($Re > 4000$)

$$Nu_f = \frac{\left(\frac{f}{8}\right) \cdot (Re_f - 1000) \cdot \left(1 + \left(\frac{D_{abi}}{L}\right)^{2/3}\right) \cdot Pr_f}{1 + 12.7 \cdot \sqrt{\frac{f}{8}} \cdot (Pr_f^{2/3} - 1)} \cdot \left(\frac{Pr_f}{Pr_{ab}}\right)^{0.11} \quad (IV.25)$$

Où : $f = (1.84 \cdot \log(Re_f) - 1.64)^{-2}$ si $D_{abi} < L$

IV. Résolution numérique

IV.1. Description de la méthode des différences finies

La résolution du système d'équations est effectuée grâce à la méthode des différences finies. Cette méthode est considérée parmi les plus anciennes des simulations numériques. La méthode des différences finies est basée sur l'hypothèse que lorsque le domaine spatial est divisé en un nombre fini des tranches Δx , et le domaine temporel en un nombre finis des pas de temps, à un pas de temps particulier, la température au sein d'un point situé sur le plan médian à l'intérieur de la tranche (nœuds du maillage) peut être représentée en fonction de l'inconnue aux points voisins. Discrétisation qu'on appelle schéma numérique est l'approche de chaque dérivée partielle en équations différentielles qui seront remplacées par un grand système des équations algébriques à coefficients linéaires ou non linéaire. Dans notre cas, les inconnus sont des températures aux nœuds du maillage. La résolution du système se fait facilement par des méthodes itératives.

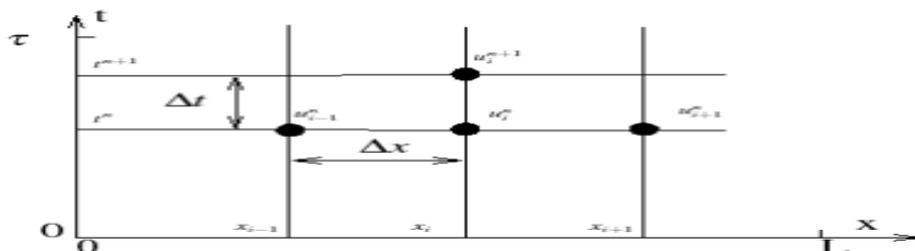


Figure IV.3 Maillage des différences finies

IV.2. Discrétisation des équations

La discrétisation qui est réalisée pour la modélisation du tube absorbeur est celle de la méthode « pas à pas ». Elle consiste à découper l'absorbeur en tranches fictives ou chaque élément est défini par l'indice j de longueur (Δx) (Figure IV.4), dans le sens de l'écoulement du fluide caloporteur et à écrire les bilans énergétiques dans chaque tranche.

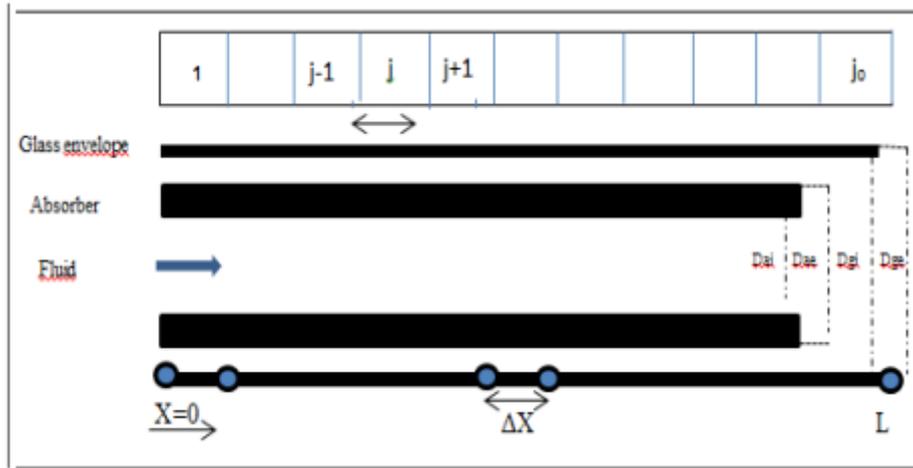


Figure IV.4 Discrétisation de l'absorbeur

Les équations algébriques linéaires ou non linéaires dont les températures sont inconnues remplacent les équations différentielles. Selon notre méthode, les équations algébriques sont réarrangées de la manière suivante : [3-4]

- Pour l'enveloppe de verre

$$A_g \cdot \rho_g \cdot C_{p_g} \cdot \frac{T_x - T_x^*}{\Delta t} = A_0 \cdot I_d \cdot \alpha_g \cdot \rho_0 \cdot \gamma \cdot k + A_g \cdot \lambda_g \cdot \frac{T_{x+1} - 2 \cdot T_x + T_{x-1}}{\Delta x^2} + q_{int} - q_{ext} \quad (IV.26)$$

$$-a_{1g} T_{j-1} + (2a_{1g} + a_{2g} + a_{3g} + a_{4g} \cdot (h_{c(ext)} + h_{r(ext)})) T_j - a_{1g} T_{j+1} - a_{3g} T_{ab,j} = B_g \quad (IV.27)$$

- Pour l'absorbeur

$$A_{ab} \cdot \rho_{ab} \cdot C_{p_{ab}} \cdot \frac{T_x - T_x^*}{\Delta t} = A_0 \cdot I_d \cdot \alpha_0 \cdot \rho_0 \cdot \gamma \cdot k + A_{ab} \cdot \lambda_{ab} \cdot \frac{T_{x+1} - 2 \cdot T_x + T_{x-1}}{\Delta x^2} + q_{int} - q_u \quad (IV.28)$$

$$-a_{1ab} T_{j-1} + (2a_{1ab} + a_{2ab} + a_{3ab} + a_{4ab}) T_j - a_{1ab} T_{j+1} - a_{3ab} T_{g,j} - a_{4ab} T_{f,j} = B_{ab} \quad (IV.29)$$

- Pour le fluide

$$A_f \cdot \rho_f \cdot C_{p_f} \cdot \frac{T_x - T_x^*}{\Delta t} \cdot \dot{m} \cdot C_{p_f} \cdot \frac{T_x - T_{x-1}}{\Delta x} = A_f \cdot \lambda_f \cdot \frac{T_{x+1} - 2 \cdot T_x + T_{x-1}}{\Delta x^2} + q_u \quad (IV.30)$$

$$-(a_{1f} + a_{3f}) T_{j-1} + (2a_{1f} + a_{2f} + a_{3f} + a_{4f})T_j - a_{1f} T_{j+1} - a_{4f} T_{j+1} = B_f \quad (IV.31)$$

Avec :

Tableau IV.1 Les indices des équations algébriques/ Les conditions aux limites

$a_{1g} = \frac{Ag\lambda_g}{\Delta x^2}$	$a_{1ab} = \frac{Aab\lambda_{ab}}{\Delta x^2}$	$a_{1f} = \frac{Af\lambda_f}{\Delta x^2}$
$a_{2g} = \frac{Ag\rho_g C_g}{\Delta x^2}$	$a_{2ab} = \frac{Aab\rho_{ab} C_{ab}}{\Delta x^2}$	$a_{2f} = \frac{Af\rho_f C_f}{\Delta x^2}$
$a_{3g} = \pi D_{abe} h_{(int)}$	$a_{3ab} = \pi D_{abe} h_{(int)}$	$a_{3f} = \frac{\dot{m}f}{\Delta x} C_{pf}$
$a_{4g} = \pi D_{ge}$	$a_{4ab} = \pi D_{ab(int)} h_u$	$a_{4f} = a_{4ab} = \pi D_{ab(int)} h_u$
$B_g = W I_d \rho_0 \alpha_g \gamma K + a_{2g} T_j^*$ $B_g = W I_d \rho_0 \alpha_0 \gamma K + a_{2ab} T_j^*$ $B_v = a_{2f} T_j^*$		
Les conditions aux limites		
$T_{g,0} = T_{am}$	$T_{ab,0} = T_{a,e}$	$T_{f,0} = T_e$

La figure IV.5, représente l'organigramme des principaux calculs pour la simulation du CCP

V. Résultats et discussions

V.1. Variation du rayonnement solaire

Dans cette section nous représentons les évolutions du rayonnement direct, diffus et total en fonction du temps pour le mois de janvier et mai au niveau de Tlemcen.

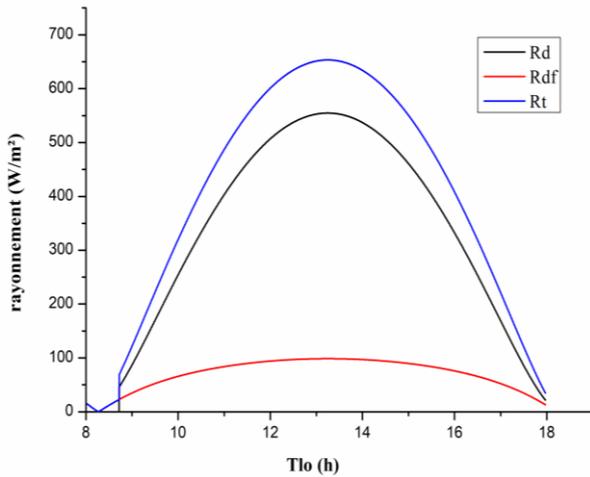


Figure IV.5 Variation du rayonnement direct, diffus et totale pour le 18 janvier 2022 (eau)

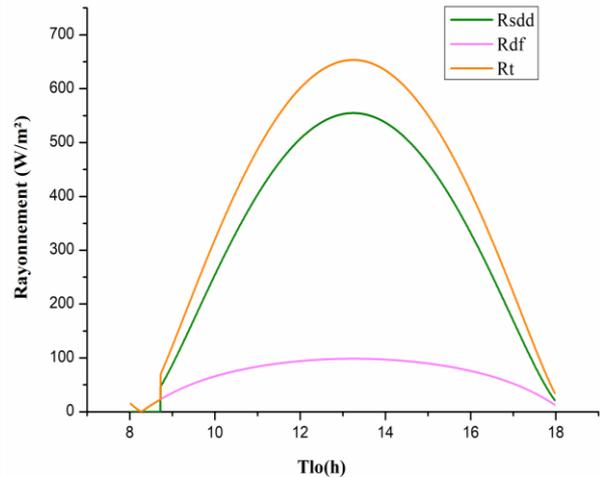


Figure IV.6 Variation du rayonnement direct, diffus et totale pour le 18 janvier 2022 (huile)

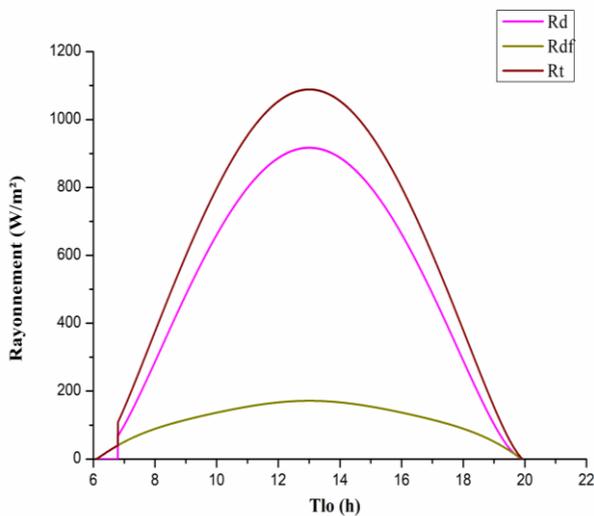


Figure IV.7 Variation du rayonnement direct, diffus et totale pour le 18 mai 2022 (eau)

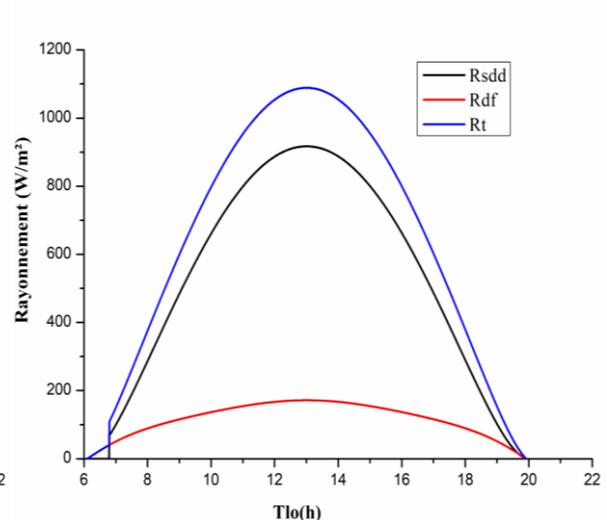


Figure IV.8 Variation du rayonnement direct, diffus et totale pour le 18 mai 2022 (huile)

D'un premier point de vue, nous pouvons conclure que pour les deux types de fluides caloporteurs, l'ensemble des rayonnements sont moins importants pour le 18 janvier par rapport au 18 mai. Ce qui laisse suggérer que les périodes où l'ensoleillement est le plus propice, ont un impact direct sur l'intensité du rayonnement quel qu'il soit.

Tableau IV.2 Résultats des rayonnements solaires (18 janvier 2022)

	Rayonnement direct (W/m ²)		Rayonnement diffus (W/m ²)		Rayonnement total (W/m ²)	
	Eau	Huile	Eau	Huile	Eau	Huile
8h	0	0	14.880	14.885	14.880	14.885
10h	254.369	254.369	65.790	65.790	320.159	320.159
12h	506.816	506.816	94.088	94.088	600.905	600.905
14h	537.100	537.100	96.933	96.333	634.033	634.033
16h	332.146	332.140	75.805	75.805	407.951	407.951
18h	21.558	21.558	13.007	13.007	34.565	34.565

Les figures (IV.5, 6) montrent que à partir de t=8h les rayonnements commencent à s'accroître avec un rythme assez rapide jusqu'à ce qu'ils atteignent leurs maximums à t= 13h, 554.913 (w/m²) pour le rayonnement direct, 97.326 (w/m²) pour le rayonnement diffus et 653.106 (w/m²) pour le rayonnement total.

Tableau IV.3 Résultats des rayonnements solaires (18 mai 2022)

	Rayonnement direct (W/m ²)		Rayonnement diffus (W/m ²)		Rayonnement total (W/m ²)	
	Eau	Huile	Eau	Huile	Eau	Huile
8h	287.405	287.405	89.104	89.104	376.509	376.509
10h	661.107	661.107	136.673	136.673	797.780	797.780
12h	886.870	886.870	166.948	166.948	1053.819	1053.819
14h	887.435	887.435	167.034	167.034	1054.470	1054.470
16h	662.625	662.625	136.858	136.858	799.483	799.483
18h	289.300	289.300	89.398	89.398	378.698	378.698
20h	0.442	0.442	0.552	0.552	0.995	0.995

Pour cette période de l'année on constate des rayonnements nettement plus importants, et un accroissement qui débute plutôt qu'au mois de janvier à t=7h.

Pendant les deux périodes, les tableaux et graphes nous montre que les deux fluides ont la même allure.

V.2. Variation de la puissance absorbée

Les figures (IV.9, 10, 11, 12) représentent l'évolution des puissances absorbées au court de la journée pour les deux fluides caloporteurs pendant deux périodes différentes (18 janvier, 18 mai) au niveau de Tlemcen.

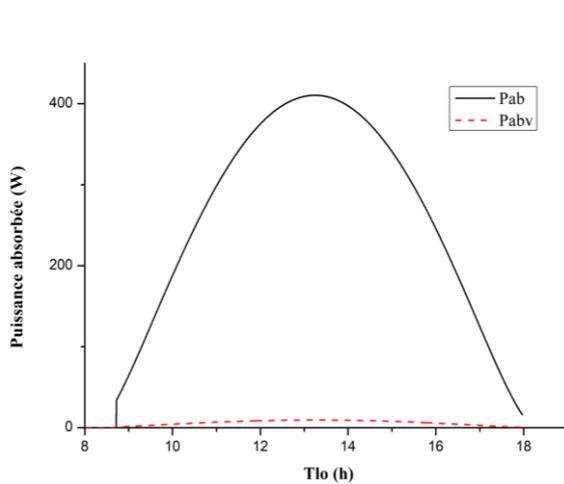


Figure IV.9 évolution des puissances en fonction du temps pour le 18 janvier 2022 (eau)

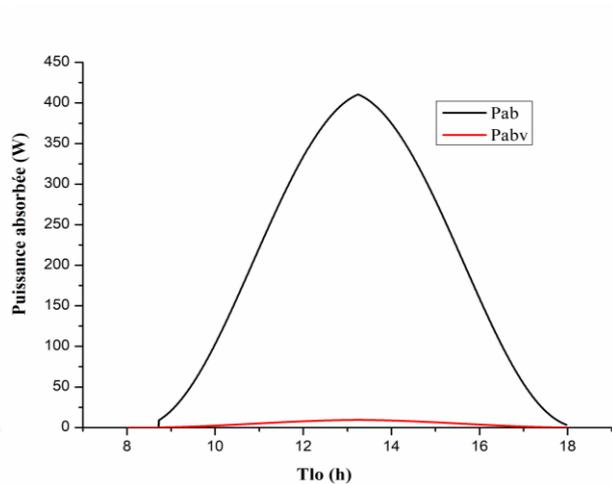


Figure IV.10 évolution des puissances en fonction du temps pour le 18 janvier 2022 (huile)

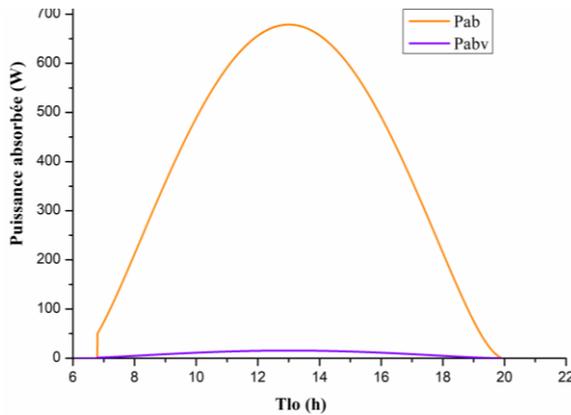


Figure IV.11 évolution des puissances en fonction du temps pour le 18 mai 2022 (eau)

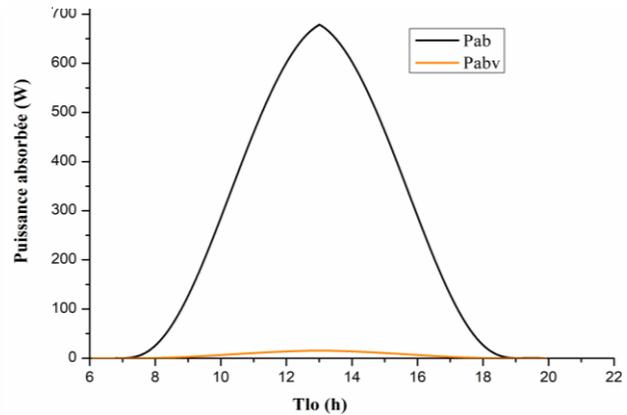


Figure IV.12 évolution des puissances en fonction du temps pour le 18 mai 2022 (huile)

Nous observons une graduation de la puissance absorbée dû au matériau utilisé pour l'absorbeur qui a un coefficient d'absorption de 90%, un coefficient de transmissivité du verre de 95% et coefficient de réflexion du réflecteur de 93%.

Les valeurs maximales pour janvier est de l'ordre de **410W** quel que soit le fluide caloporteur utilisé. Ainsi, pour le mois de Mai cette puissance est de l'ordre de **677W**.

V.3. Variation des températures de sortie

Les figures (IV.13, 14, 15, 16) représentent l'évolution des températures de sortie des deux fluide caloporteur (eau et huile) durant les deux mois de l'année (Janvier et Mai) pour la région de Tlemcen.

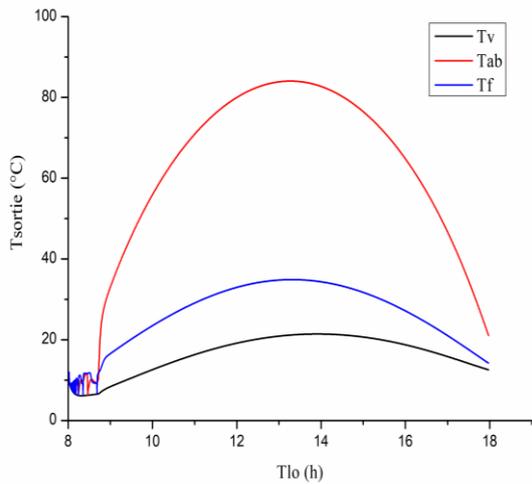


Figure IV.13 Evolution des températures de sortie en fonction du temps pour le 18 janvier 2022 (fluide eau)

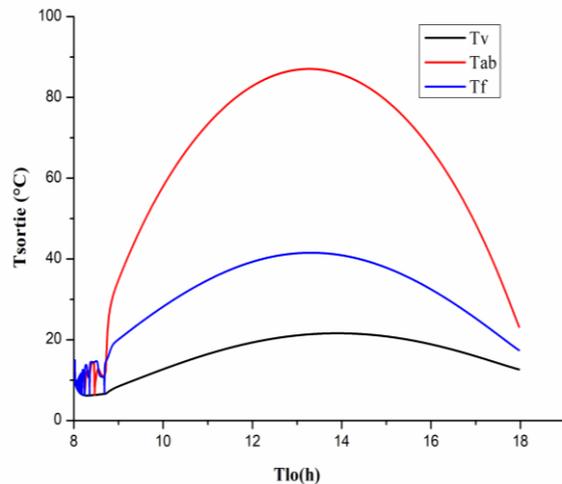


Figure IV.14 Evolution des températures de sortie en fonction du temps pour le 18 janvier 2022 (fluide huile)

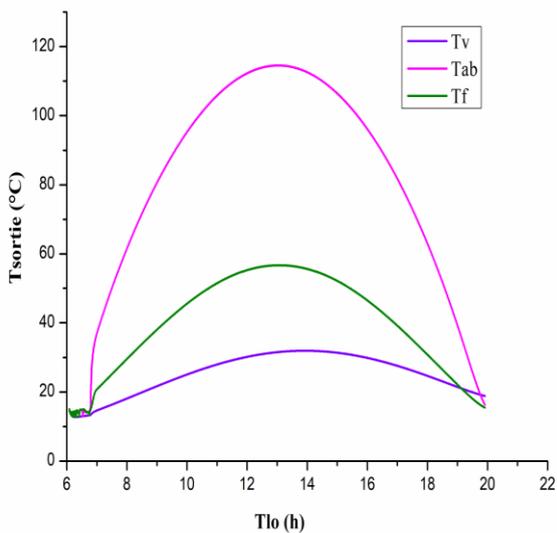


Figure IV.15 Evolution des températures de sortie en fonction du temps pour le 18 Mai 2022 (fluide eau)

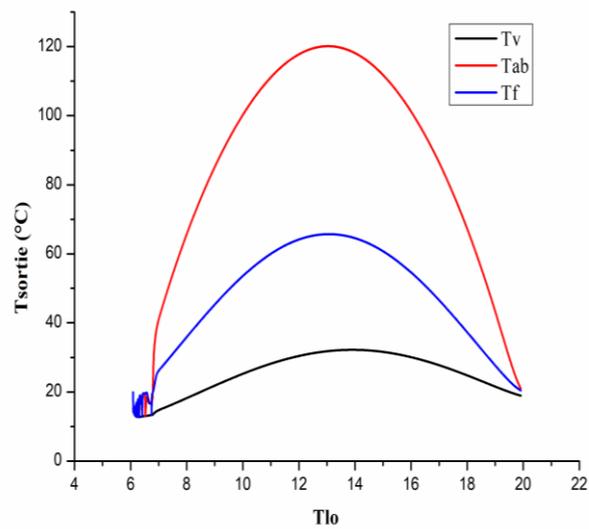


Figure IV.16 Evolution des températures de sortie en fonction du temps pour le 18 Mai 2022 (fluide huile)

Nous constatons une augmentation de la température de sortie due à l'accroissement de l'éclairement direct.

Tableau IV.4 Résultats pour les températures de sortie (18 janvier 2022)

	Température de l'absorbeur (°C)		Température du vitrage		Température du fluide	
	Eau	Huile	Eau	Huile	Eau	Huile
8h	9.50	9.84	9	9.015	11.96	14.91
10h	55.95	58.00	12.58	12.68	23.47	28.17
12h	79.98	82.81	19.14	19.30	32.95	39.27
14h	82.71	85.68	21.40	21.58	34.33	40.88
16h	64.80	67.18	18.73	18.86	27.13	32.47
18h	21.05	23.17	12.54	12.61	14.21	17.37

Le tableau nous aidera à interpréter nos résultats. D'où, à $t = 8h$, les deux fluide sont menés à des valeurs de température plus au moins similaires cause de l'indisponibilité de l'intensité solaire directe. Entre $t = 8h$ et $t = 14h$, nous remarquons une augmentation des températures qui est plus favorable pour l'huile. La différence de températures entre l'eau est l'huile est de ($\sim 3.13^\circ\text{C}$) pour l'absorbeur, de ($\sim 0.52^\circ\text{C}$) pour le vitrage et de ($\sim 6.56^\circ\text{C}$) pour le fluide. A partir de $t = 14h$ les courbes de températures s'infléchissent et entame une baisse progressive.

Les températures maximales atteintes ce jour-là sont prise à 13h et sont comme suit :

Eau : $T_{\text{abs}} = 83.95^\circ\text{C}$, $T_v = 21.09^\circ\text{C}$ et $T_f = 34.71^\circ\text{C}$.

Huile : $T_{\text{abs}} = 87.08^\circ\text{C}$, $T_v = 21.26^\circ\text{C}$ et $T_f = 41.27^\circ\text{C}$.

Tableau IV.5 Résultats pour les températures de sorties (18 mai 2022)

	Température de l'absorbeur (°C)		Température du vitrage		Température du fluide	
	Eau	Huile	Eau	Huile	Eau	Huile
8h	61.61	65.78	18.09	18.22	29.56	35.92
10h	95.29	100.25	25.047	25.25	45.56	53.58
12h	112.28	117.79	30.16	30.42	55.29	64.18
14h	112.57	118.117	31.92	32.18	55.62	64.57
16h	96.12	101.17	29.85	30.07	46.48	54.59
18h	62.94	67.22	24.65	24.79	30.78	37.27
20h	16.31	21.02	18.84	18.93	15.88	20.44

En début de journée $t = 6h$, les températures ne sont pas encore stables pour les deux fluides caloporteurs en raison de l'instabilité de l'intensité solaire. A $t = 8h$, nous observons une croissance de température légèrement plus rapide pour l'huile. Et c'est à $t = 13h$ que les températures de l'eau comme celle de l'huile prennent les valeurs maximales suivantes :

Eau : $T_{abs} = 114.257 \text{ °C}$, $T_v = 31.86 \text{ °C}$ et $T_f = 56.69 \text{ °C}$.

Huile : $T_{abs} = 120.38 \text{ °C}$, $T_v = 32.199 \text{ °C}$ et $T_f = 65.90 \text{ °C}$.

Pour pouvoir comparer les caractéristique calorifiques des deux fluides il est nécessaire d'étudier les cinétiques des échauffements et refroidissements de ces deux fluides en fonction de l'éclairement lequel est dépendant des saisons (hiver ou été).

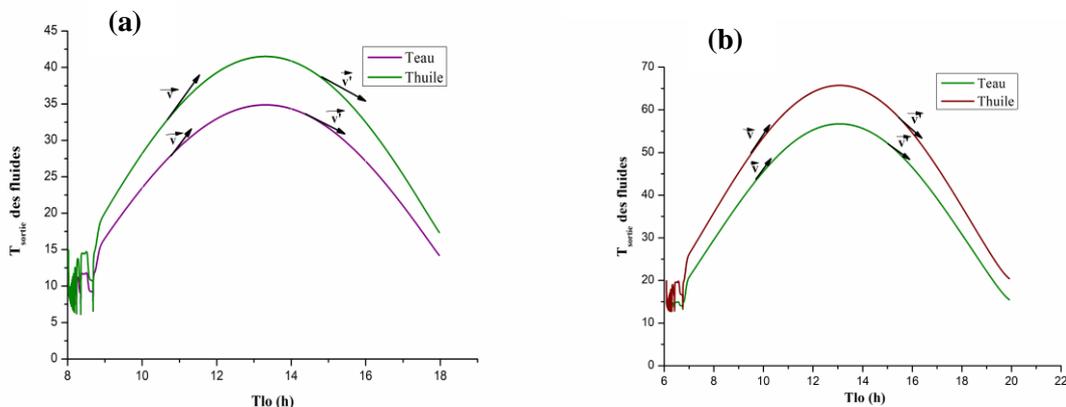


Figure IV.17 Variation des vitesses de chauffage/refroidissement des fluides (a) 18/01 ; (b) 18/05

Tableau IV.6 Résultats pour les vitesses du chauffage/refroidissement des fluides

18 Janvier 2022			
Eau		Huile	
$\Delta v_{f1} = \frac{T_{f14h} - T_{f8h}}{t_{14h} - t_{8h}} = \frac{34.33 - 11.96}{14 - 8} = \mathbf{3.728} \text{ °C/s}$	$\Delta v_{f3} = \frac{T_{f14h} - T_{f8h}}{t_{14h} - t_{8h}} = \frac{40.88 - 14.91}{14 - 8} = \mathbf{4.328} \text{ °C/s}$		
$\Delta v_{f2} = \frac{T_{f18h} - T_{14h}}{t_{18h} - t_{14h}} = \frac{14.21 - 34.33}{18 - 14} = \mathbf{-5.03} \text{ °C/s}$	$\Delta v_{f4} = \frac{T_{f18h} - T_{14h}}{t_{18h} - t_{14h}} = \frac{17.37 - 40.88}{18 - 14} = \mathbf{-5.877} \text{ °C/s}$		
18 Mai 2022			
Eau		Huile	
$\Delta v_{f1}^* = \frac{T_{f14h} - T_{f8h}}{t_{14h} - t_{8h}} = \frac{55.62 - 29.56}{14 - 8} = \mathbf{4.34} \text{ °C/s}$	$\Delta v_{f3}^* = \frac{T_{f14h} - T_{f8h}}{t_{14h} - t_{8h}} = \frac{64.57 - 35.92}{14 - 8} = \mathbf{7.775} \text{ °C/s}$		
$\Delta v_{f2}^* = \frac{T_{f18h} - T_{14h}}{t_{18h} - t_{14h}} = \frac{30.78 - 55.62}{18 - 14} = \mathbf{-6.21} \text{ °C/s}$	$\Delta v_{f4} = \frac{T_{f18h} - T_{14h}}{t_{18h} - t_{14h}} = \frac{37.27 - 64.57}{18 - 14} = \mathbf{-6.83} \text{ °C/s}$		

Durant la période du 18 mai, l'examen des vitesses de croissance de température des deux fluides caloporteurs montre que c'est l'huile qui a la plus grande vitesse. Par contre c'est l'eau qui à la plus grande vitesse de décroissance de températures. Autrement dit l'eau s'échauffe deux fois moins vite et se refroidit deux fois plus vite que l'huile.

Or, pour la période du 18 janvier, l'huile reste le fluide caloporteur qui dont les vitesses de croissances sont plus élevées et celles des décroissances sont les plus faibles.

Comme nous l'avons démontré, les cinétiques des températures ne sont pas identiques pour les deux fluides caloporteurs. Cela est explicable à travers la thermodynamique des fluides par le faite que la capacité massique de l'huile est plus petite que celle de l'eau ($C_{p\text{eau}}=4.18\text{J/g}^\circ\text{K}$; $C_{p\text{huile}}=1.15\text{J/g}^\circ\text{K}$)

V.4. Rendement

Les figures(IV.18, 19, 20, 21), montrent l'évolution du rendement au court de la journée pour les deux fluides caloporteurs pendant deux périodes différentes (18 janvier, 18 mai)au niveau de Tlemcen.

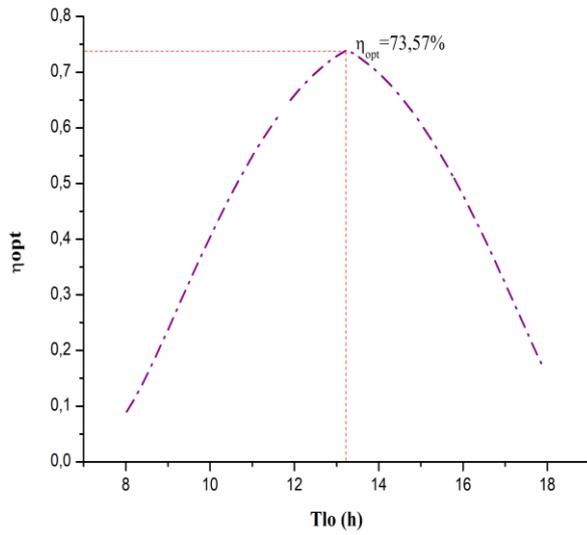


Figure IV.18 Représentation du rendement en fonction du temps pour le 18 janvier 2022 (eau)

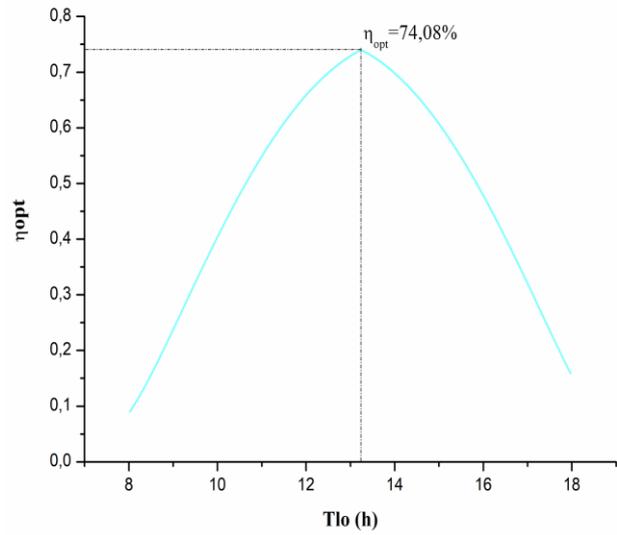


Figure IV.19 Représentation du rendement en fonction du temps pour le 18 janvier 2022 (huile)

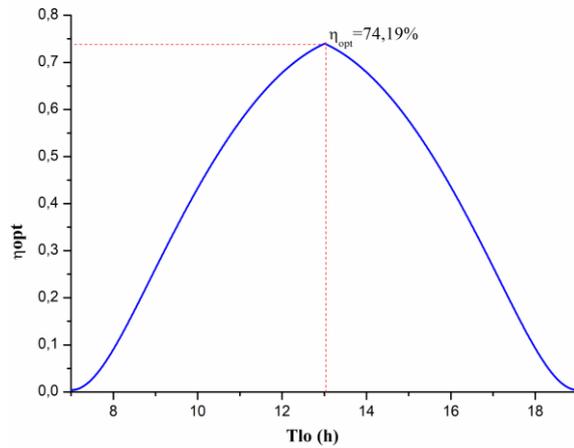


Figure IV.20 Représentation du rendement en fonction du temps pour le 18 mai 2022 (eau)

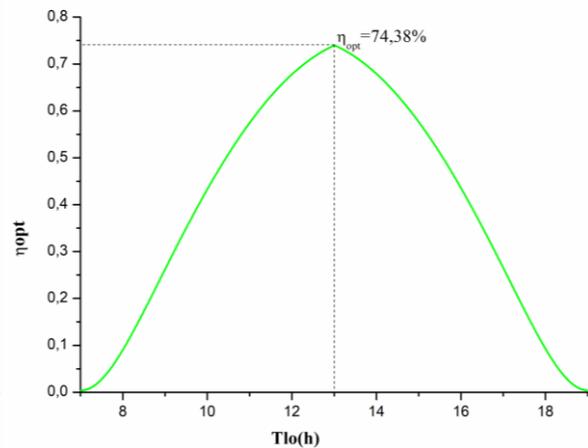


Figure IV.21 Représentation du rendement en fonction du temps pour le 18 mai 2022 (huile)

La comparaison des graphes des deux fluides caloporteurs, nous montre que le rendement du concentrateur solaire cylindro-parabolique, durant les deux périodes de l'année (janvier et mai), est toujours plus élevé pour l'huile, c'est-à-dire que le choix de l'huile comme fluide de travail dans le tube récepteur est le plus recommandé par rapport à l'eau.

V.5. Chaleur utile

Les figures (IV.22, 23, 24, 25), représentent la chaleur utile en fonction du temps pour les deux fluides caloporteurs pendant deux périodes différentes (18 janvier, 18 mai) au niveau de Tlemcen.

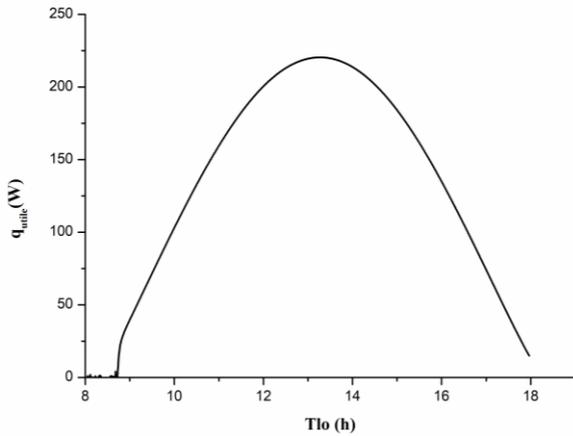


Figure IV.22 Représentation de la chaleur utile en fonction du temps pour le 18 janvier 2022 (eau)

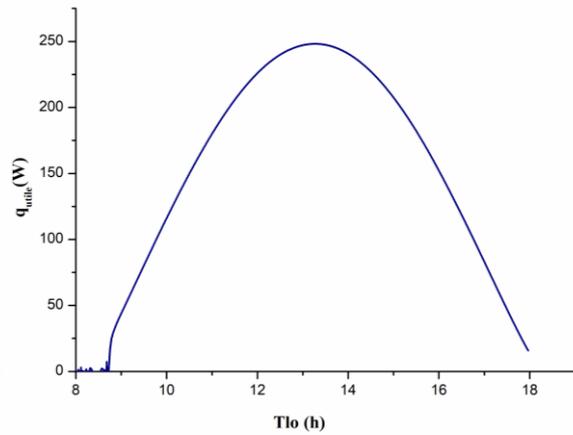


Figure IV.23 Représentation de la chaleur utile en fonction du temps pour le 18 janvier 2022 (huile)

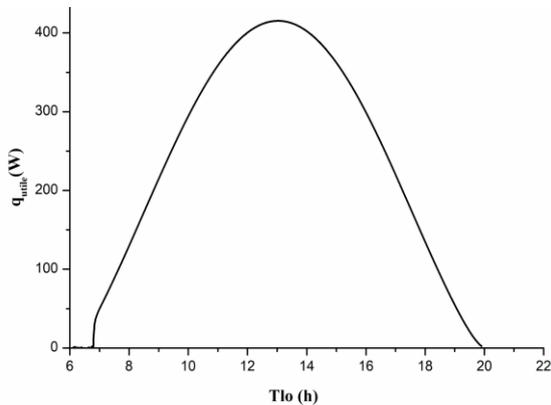


Figure IV.24 Représentation de la chaleur utile en fonction du temps pour le 18 mai 2022 (eau)

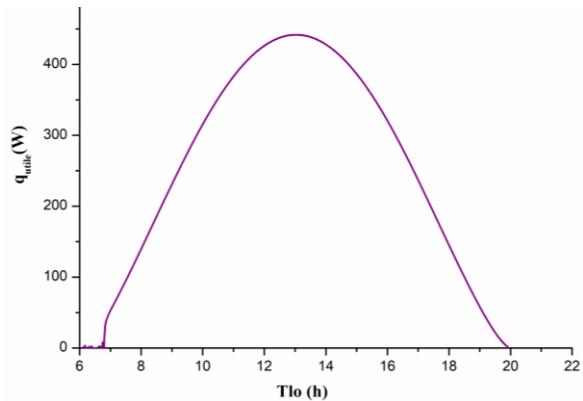


Figure IV.25 Représentation de la chaleur utile en fonction du temps pour le 18 mai 2022 (huile)

Pendant la période du 18 janvier, l'énergie utile acquise est assez faible en raison du faible taux d'intensité du rayonnement solaire, puis, au fur et à mesure que le temps passe, elle augmente jusqu'à atteindre les valeurs maximales pour l'eau et l'huile respectivement 221.02 W 248.85 W à 13h. Cependant, pendant la période du 18 mai la chaleur utile a quasiment doublée ; 414.23 W pour l'eau et 442.05 W pour l'huile, ce qui indique que l'énergie collectée est influencée par le taux de rayonnement solaire. Et inversement, le gain de chaleur utile diminue à la suite de la diminution de l'intensité du rayonnement solaire.

Afin de mieux comparer l'efficacité des deux fluides caloporteurs, il est nécessaire de connaître le pourcentage de l'énergie transmise au fluide par rapport à la puissance absorbée. Et pour cela on utilise la relation suivante :

$$\eta_{th} = \frac{q_u}{P_{abs}} \quad (IV.31)$$

Tableau IV.7 Résultats pour les rendements thermiques des deux fluides

18 Janvier 2022	
Eau	Huile
$\eta_{th} = \frac{q_u}{P_{abs}} = \frac{221.02}{410.75} = 53.80 \%$	$\eta_{th} = \frac{q_u}{P_{abs}} = \frac{248.85}{409.55} = 60.76 \%$
18 Mai 2022	
Eau	Huile
$\eta_{th} = \frac{q_u}{P_{abs}} = \frac{414.23}{676.734} = 61.21 \%$	$\eta_{th} = \frac{q_u}{P_{abs}} = \frac{442.05}{678.68} = 65.13 \%$

Comme nous le constatons l'utilisation de l'huile comme fluide caloporteur sera toujours plus efficace pendant les deux périodes.

Conclusion

Durant cette partie de notre mémoire, nous avons présenté une modélisation numérique des caractéristiques d'un concentrateur solaire cylindro-parabolique avec un réflecteur de type Solargenix LS-2 et un tube récepteur de type Schott PTR 2008, en utilisant deux fluides caloporteurs (l'eau et huile thermique Syltherm 800), dont les propriétés thermodynamiques sont différentes.

A partir des échanges thermiques qui ont eu lieu, un modèle mathématique a été établi à fin d'acquérir les résultats obtenus. Ces résultats nous montrent que cette étude est favorable au choix de l'huile comme fluide caloporteurs que l'eau. Autrement dit, ce type de concentrateur solaire cylindro-parabolique avec l'huile thermique Syltherm 800 montre une meilleure performance totale que celle utilisant l'eau.

Bibliographie

[1] : M.R. Houari, Modélisation et simulation numérique d'un collecteur cylindro-parabolique, Mémoire de master en génie mécanique option ingénierie thermique et solaire, Université Saad Dahleb, Blida, 2014/2015.

[2] : L. Benhabib, Modélisation d'un système mixte entre le collecteur cylindro-parabolique et les cellules en ZnO, Thèse de doctorat, Université Abou Bekr Belkaid, Tlemcen, 2021.

[3] : L. Benhabib et al., Simulation of different modes of heat transfer on a parabolic trough solar collector, Int. Journal of Energetica, 6, 2543-3717, 2021

[4]: L. Benhabib et al., Modeling and simulation: The performance of parabolic trough collector in Mediterranean countries, Transylvanian Review, 29, 15654-15667, 2021

Conclusion générale

La technologie des capteurs cylindro-paraboliques est actuellement la plus éprouvée des techniques de concentration solaire. L'utilisation des concentrateurs est particulièrement intéressante dans les pays comme l'Algérie ayant l'un des gisements solaire des plus importants au monde.

L'objectif de notre travail était de pouvoir modéliser et simuler mathématiquement un capteur solaire cylindro-parabolique au nord de l'Algérie, plus précisément à Tlemcen. Dont la simulation a été faite en utilisant deux fluides caloporteurs différents (eau, huile thermique syltherm 800) durant deux dates précises des mois de l'année 2022, (18 janvier et 18 mai).

Durant les premiers chapitres, nous nous sommes consacrés à présenter la partie théorique de la technologie thermodynamique ainsi ces différentes utilisations sans oublier la définition des paramètres géométriques et horaires liés au gisement solaire. Ensuite nous avons essayé de détailler un des capteurs les plus utilisés dans le domaine de la concentration solaire, qui est le capteur cylindro-parabolique.

Enfin, nous avons procédé à créer un programme de simulation à l'aide de Matlab en terme de résolutions des équations de dérivé seconde par la méthode des différences finies afin de pouvoir répondre à notre objectif.

D'après les résultats obtenus et en tenant compte des conditions initiales de température d'entrée qui est de 12°C pour le 18 janvier 2022 et de 15°C pour le 18 mai 2022, nous avons pu constater que les températures maximales de sorties du fluide ($T_{f, \text{huile}} = 41.27^\circ\text{C}$ en janvier et $T_{f, \text{huile}} = 65.90^\circ\text{C}$ en mai) sont plus importantes suite à l'utilisation de l'huile comme fluide caloporteur qu'en utilisant l'eau ($T_{f, \text{eau}} = 34.71^\circ\text{C}$ en janvier et $T_{f, \text{eau}} = 56.69^\circ\text{C}$).

Ces résultats ne nous seront pas affichés si nous n'avons pas procédé au calcul de l'intensité solaire incidente ainsi que la puissance absorbée au niveau du tube absorbeur.

Avec des rendements optiques de chaque fluide dans les deux journées choisies nous avons constaté que pour la région de Tlemcen l'huile thermique est plus fiable que l'utilisation de l'eau. D'où les valeurs de 74.08% pour l'huile en journée de janvier et 74.38% durant mai vers 73.57% et 74.19% pour l'eau durant les journées de janvier et mai respectivement.

Conclusion Générale

En prenant en considération les valeurs du rendement thermique qui étaient calculé par le rapport de la puissance utile sur la puissance absorbée. Où les valeurs étaient prometteuses pour l'huile thermique de 60.76% le 18 janvier et 65.13% dans le 18 mai.

Concluons que la comparaison entre les deux fluides nous a permet d'aboutir un fluide plus performant par rapport à l'autre dans la région du Nord d'Algérie (Tlemcen). Mais ça reste à ce que nous essayerons à étudier l'influence des autres paramètres du CCP pour procéder à un rendement thermique et optique plus élevés que ceux trouvés.

Annexes

A.1. Paramètres du concentrateur cylindro-parabolique

Tableau A.1 Détails techniques du concentrateur considéré dans l'étude. [1]

	Tube récepteur Schott PTR 2008	Collecteur Solargenix LS-2
Largeur d'ouverture (m)	--	5
Longueur d'assemblage du collecteur (m)	--	100
Distance focale (m)	--	1,8
Diamètre intérieur du tube (m)	0,066	--
Diamètre extérieur du tube (m)	0,070	--
Diamètre intérieur de l'enveloppe de verre (m)	0,115	--
Diamètre extérieur de l'enveloppe de verre (m)	0,120	--

A.2. Propriétés thermiques des fluides caloporteurs

Afin d'assurer un bon fonctionnement, le fluide caloporteur doit présenter certaines propriétés thermiques, notamment une conductivité thermique élevée et une capacité thermique spécifique élevée.

Tableau A.2. Propriétés thermique de l'eau

Masse volumique	$\rho_w = -4.95625 * 10^{-4} T^2 - 0.23291 T + 1001.83736$
conductivité thermique	$\lambda_w = -5.96341 * 10^{-6} T^2 + 1.68 * 10^{-3} T + 0.56821$
Viscosité dynamique	$\mu_w = -4.28265 * 10^{-10} T^3 + 1.88979 * 10^{-7} T^2 - 2.77774 * 10^{-5} T$
Capacité thermique	$C_{p_w} = 0.01378 T^2 - 1.42026 T + 4218.2371$

Tableau A.3. Propriétés thermique de l'huile Syltherm 800

Masse volumique	$\rho_f = 0.4153495T + 1105.72$
conductivité thermique	$\lambda_f = -5.96341 * 10^{-6} T^2 + 1.68 * 10^{-3} T + 0.56821$
Viscosité dynamique	$\mu_f = 6.672 * 10^{-7} T^4 - 1.566 * 10^{-3} T^3 + 1.338 * 10^{-2} T^2 - 5.541 * 10^{-5} T + 8.487 T$
Capacité thermique	$C_f = 1.708 T + 1107.798$