

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE et POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة مولود معمري تيزي وزو



Université Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou

Tasdawit Lmulud At Maemmar

Faculté du Génie de la Construction

Département de Génie Mécanique

# THÈSE

En vue de l'obtention du diplôme de

Doctorat en Génie Mécanique

présentée par

**M. BOUFOUDI Fatah**

Thème :

## **Analyse du comportement d'une centrale solaire thermique à concentration à base des nanofluides**

Thèse soutenue publiquement le lundi 4 décembre 2023 devant le jury composé de :

M. BOUTOUDJ MOHAMMED SAID	Professeur	UMMTO	Président
M. ZOUAOUI SALAH	MCA	UMMTO	Rapporteur
M. MIHOUB SOFIANE	MCA	Univ-Tiaret	Co-Rapporteur
M. MOHAMMEDI KAMAL	Professeur	UMBB	Examineur
M. NEBBALI REZKI	MCA	UMMTO	Examineur
M. AMOKRANE MOUNIR	MCA	UMMTO	Examineur

# *Dédicace*

---

*Je dédie ce travail :*

*A ma chère mère,*

*A mon cher père,*

*A ma future femme T. Sabrina,*

*A mes frères, mes sœurs, mes grands parents et ceux qui ont partagé avec moi tous les moments d'émotion lors de la réalisation de ce travail. Ils m'ont chaleureusement supporté et encouragé tout au long de mon parcours.*

*A ma famille, mes proches et à ceux qui me donnent de l'amour et de la vivacité.*

*A tous mes amis qui m'ont toujours encouragé, et à qui je souhaite plus de succès.*

*A tous ceux que j'aime et m'aiment.*

*Merci mon grand père BOUFOUDI Salah, repose en paix et sois certain de toujours rester vivant en moi.*

*Fatah*

## REMERCIEMENTS

---

EN PREMIER LIEU, JE TIENS À REMERCIER TOUTES LES PERSONNES QUE J'AI CÔTOYÉES ET QUE JE NE NOMMERAI PAS DANS CES REMERCIEMENTS, ILS SE RECONNAÎTRONT ... VOUS AVEZ ÉTÉ PRÉSENTS DANS LES BONS MOMENTS COMME DANS LES PLUS DIFFICILES, POUR M'AIDER, ME SOUTENIR OU SIMPLEMENT POUR DISCUTER. JE N'AURAI PAS PU RÉALISER CE TRAVAIL SANS VOUS ET JE VOUS EN REMERCIE SINCÈREMENT. À VOS CÔTÉS, CHAQUE OBSTACLE A ÉTÉ MOINS DUR À SURMONTER !

MES PROFONDS REMERCIEMENTS VONT À MON DIRECTEUR ET CO-DIRECTEUR DE THÈSE, M. ZOUAOUI SALAH ET M.MIHOUB SOFIANE POUR LA CONFIANCE QU'ILS M'ONT ACCORDÉS TOUT AU LONG DE LA RÉALISATION DE CETTE THÈSE. JE VOUS REMERCIE POUR VOTRE PATIENCE, VOTRE DISPONIBILITÉ, VOTRE SOUTIEN ET VOTRE CLAIRVOYANCE QUI M'ONT ÉTÉ UN GUIDE PRÉCIEUX AU COURS DES DIFFÉRENTES ÉTAPES DE MES RECHERCHES.

JE TIENS À ADRESSER MES PLUS SINCÈRES RECONNAISSANCES ET MES RESPECTUEUX REMERCIEMENTS AUX MEMBRES DU JURY, QUI M'ONT FAIT L'HONNEUR DE CONTRIBUER À L'EXAMEN ET À L'ANALYSE MINUTIEUSE DE CE MANUSCRIT.

# Table des matières

---

Dédicace.....	i
Remerciements .....	ii
Table des matières.....	iii
Liste des tableaux .....	vi
Liste des figures .....	vii
Nomenclature.....	x
Résumé .....	xi
Introduction générale .....	1

## Chapitre I: Synthèse bibliographique sur les nanofluides et les centrales solaires à concentration

I.1. Introduction .....	5
I.2. Les fluides caloporteurs dans les centrales solaires à concentration.....	5
I.3. Nanofluides .....	6
I.3.1. Préparation et fabrication des nanofluides.....	6
I.3.2. Nanoparticules.....	7
I.3.3. Fluides de base .....	7
I.3.4. Domaines d'applications des nanofluides .....	8
II.4. Centrale solaire à miroir cylindro-parabolique .....	15
II.4.1. Centrale solaire à PTC conventionnel .....	15
II.4.2. Modifications géométriques .....	20
II.4.3. Modifications thermiques .....	22
II.4.4. Intégration des nanofluides.....	24
II.5. Capteur solaire parabolique .....	31
II.5.1. Études numériques .....	31
II.5.2. Intégration des Nanofluides .....	37
II.6. Réflecteurs linéaires de Fresnel .....	38
II.6.1. Études numériques.....	38
II.6.2. Intégration des nanofluides.....	39
II.7. Centrales solaires thermodynamiques à tour .....	40
II.7.1. Études numériques.....	41
II.7.2. Intégration des nanofluides.....	44
II.8. Conclusion.....	47

## Chapitre II : Equations de base et procédure numérique

II.1.	Introduction .....	49
II.2.	Modélisation mathématique .....	52
II.2.1.	Modélisation mathématique des propriétés thermophysiques des nanofluides .....	52
II.3.	Description générale du PTC conventionnel.....	73
II.3.1.	Modélisation thermique.....	74
II.3.2.	Modélisation optique .....	76
II.3.3.	Modélisation hydraulique.....	76
II.3.4.	Efficacité du champ solaire .....	76
II.3.5.	Bilan énergétique.....	76
II.3.6.	Capacité Facteur (CF) .....	76
II.4.	Conclusion .....	78

## Chapitre III : Étude des propriétés thermophysiques des nanofluides

III.1.	Introduction .....	80
III.2.	Présentation des nanoparticules utilisées .....	80
III.3.	Présentation des nanofluides (mono-hybrides) utilisés .....	81
III.4.	Résultats et discussions .....	81
III.4.1.	Effet de la température et la concentration des nanoparticules sur les propriétés thermiques de nanofluides (mono) .....	82
III.4.1.1.	Masse volumique .....	82
III.4.1.2.	Conductivité thermique .....	83
III.4.1.3.	Viscosité dynamique .....	84
III.4.1.4.	Capacité thermique .....	86
III.4.2.	Nanofluide (Eau - $Al_2O_3$ ) .....	86
III.4.3.	Nanofluides Hybrides.....	89
III.4.3.1.	Effet de la température et la concentration des nanoparticules sur les propriétés thermiques des nanofluides (Hybrides).....	89
III.4.3.2.	Masse volumique.....	90
III.4.3.3.	Viscosité dynamique et cinématique .....	91
III.4.3.4.	Conductivité thermique .....	93
III.4.3.5.	Capacité thermique.....	95
III.5.	Comparaison des résultats obtenus .....	96
III.6.	Conclusion.....	97

Chapitre IV : Étude des performances optiques et thermiques d'une centrale solaire à concentrateurs cylindro-paraboliques à base des nanofluides

IV.1. Introduction .....	99
IV.2. Présentation du logiciel SAM .....	99
IV.3. Les paramètres de conception .....	101
IV.3.1. Descriptions de sites .....	101
IV.3.2. Description de la centrale étudiée .....	102
IV.4. Résultats et discussions .....	103
IV.5. Comparaison des résultats obtenus .....	119
IV.6. Conclusion.....	119
<b>Conclusions et Perspectives .....</b>	<b>119</b>
<b>Références Bibliographiques .....</b>	<b>126</b>

## Liste des tableaux

---

Tableau I. 1: Fluides caloporteurs .....	20
Tableau I. 2: Synthèse bibliographique sur l'intégration des nanofluides dans les applications PTC.....	30
Tableau I. 3: Études numériques et expérimentales .....	36
Tableau I. 4: Centrales solaires à miroir de Fresnel .....	44
Tableau I. 5: Listes des centrales solaires à tour dans le monde .....	41
Tableau III. 1: Comparaison des résultats des résultats obtenus.....	96
Tableau IV. 1: Caractéristiques du chaque .....	102
Tableau IV. 2: Caractéristiques de la centrale étudiée. ....	102
Tableau IV. 3: Efficacité optimale pour différentes sites et nanofluides .....	108
Tableau IV. 4a: Diamètre intérieur optimal du tube récepteur : cas du nanofluide à base du Therminol VP-1.....	116
Tableau IV. 4b: Diamètre intérieur optimal du tube récepteurs cas de nanofluide à base du Dowtherm A.....	117
Tableau IV. 5: Comparaison des résultats obtenus .....	119

## Liste des figures

---

Figure I. 1: Classification des Nanoparticules . . . . .	06
Figure I. 2: Les fluides de bases les plus utilisés . . . . .	07
Figure I. 3: Refroidissement du processeur Intel core i7 par la mousse d'aluminium. . . . .	08
Figure I. 4: Intégration des nanofluides dans le radiateur automobile . . . . .	10
Figure I. 5: Influence des nano-additifs sur la combustion des carburants . . . . .	11
Figure I. 6: Installation expérimentale d'un réservoir de stockage d'énergie thermique (TES) isolé . . . . .	12
Figure I. 7: Intégration des nanofluides comme lubrifiant dans les applications mécaniques. . . . .	13
Figure I. 8: Utilisation des nanoparticules dans le domaine antibactérienne . . . . .	13
Figure I. 9: Dextran ferrite (DF) en 10 nm . . . . .	14
Figure I. 10: Moment magnétique des particules avec ferrofluid. . . . .	14
Figure I. 11: PTC Conventionnel. . . . .	15
Figure I. 12: Comparaison entre le nouveau concentrateur solaire et concentrateur solaire traditionnel. . . . .	15
Figure I. 13: Effet du facteur de propreté sur la production d'énergie. . . . .	15
Figure I. 14: Application de PTC à des fins d'éclairage . . . . .	16
Figure I. 15: Champ PTC de 300 kWth avec un système rotatif . . . . .	17
Figure I. 16: Absorbeur sous vide avec un tuyau courbé en S . . . . .	20
Figure I. 17: Centrale solaire PTC à base d'air . . . . .	20
Figure I. 18: Collecteur parabolique à absorption directe à base des nanofluides . . . . .	21
Figure I. 19: Évolution temporaire de l'efficacité énergétique . . . . .	22
Figure I. 20: Efficacité du collecteur à base des nanofluides . . . . .	23
Figure I. 21: Effet de l'irradiation solaire et les nanofluides sur l'efficacité énergétique . . . . .	24
Figure I. 22: Modèle de concentrateur solaire parabolique. . . . .	26
Figure I. 23: Schéma du STSC . . . . .	28
Figure I. 24: Concentrateur solaire parabolique à faible coût . . . . .	29
Figure I. 25: Image du concentrateur réalisé . . . . .	30
Figure I. 26: Schéma de l'installation expérimentale . . . . .	32
Figure I. 27: Schéma de la configuration expérimentale étudiée . . . . .	33
Figure I. 28: Angle du soleil pour un champ solaire . . . . .	34
Figure I. 29: L'énergie solaire et l'énergie auxiliaire utilisées pour faire fonctionner le processus de pyrolyse . . . . .	35
Figure I. 30: Le prototype étudié . . . . .	36
Figure I. 31: Efficacité thermique . . . . .	36
Figure I. 32: Effet des nanofluides sur l'efficacité thermique et du coefficient de transfert de chaleur. . . . .	36
Figure I. 33: Modèle de stockage direct à deux réservoirs et Modèle de stockage Thermocline à réservoir unique . . . . .	38

Figure I. 34: Cycle de Brayton récupéré indirectement par la tour de refroidissement de Gatton. ....	39
Figure I. 35: Comparaison entre la puissance disponible théorique et expérimentale de la turbine .....	40
Figure I. 36: Schéma du système de la tour solaire .....	41
Figure II. 1: (a) Différentes formes de nanoparticules d'argent insérées dans deux liquides ;(b) l'eau (c) l'argon liquide .....	47
Figure II. 2: Rhéomètre rotatif MCR 320 .....	55
Figure II. 3: Dispositif expérimental à fil chaud .....	60
Figure II. 4: Diagramme schématisé des méthodes de mesure de la conductivité thermique des nanofluides .....	61
Figure II. 5: Technique de mesure de la capacité thermique (Calorimeter).....	64
Figure II.6: Diagrammes pression-volume (p-v) et température-entropie (T-s) du cycle de Carnot .....	64
Figure III. 1a: Effet de la température et de la concentration des nanoparticules sur la masse volumique à base du Therminol VP-1.....	66
Figure III. 1b: Effet de la température et de la concentration des nanoparticules sur la masse volumique à base du Dowtherm A.....	83
Figure III. 2a: Conductivités thermiques des nanofluides ( $Al_2O_3$ – Therminol VP-1) en fonction de la fraction volumique et de la température.....	84
Figure III. 2b: Conductivités thermiques des nanofluides ( $Al_2O_3$ – Dowtherm A) en fonction de la fraction volumique et de la température.....	84
Figure III. 3a: La viscosité des nanofluides ( $Al_2O_3$ – Therminol VP-1) en fonction de la fraction volumique et de la température.....	85
Figure III. 3b: La viscosité des nanofluides ( $Al_2O_3$ – Dowtherm A) en fonction de fraction volumique et de la température.....	86
Figure III. 4: La Capacité thermique des nanofluides à base de Therminol VP-1 et de Dowtherm A en fonction de la température.....	86
Figure III. 5: Effet de la température et de la concentration des nanoparticules sur la masse volumique à base d'eau.....	87
Figure III. 6a: Effet de la température et de la concentration des nanoparticules sur la conductivité thermique des nanofluides à base d'eau.....	88
Figure III. 7: Effet de la température et de la concentration des nanoparticules sur la viscosité dynamique du nanofluide à base d'eau.....	89
Figure III. 8: Effet de la température et de la concentration des nanoparticules sur la capacité thermique du nanofluide à base d'eau.....	89
Figure III. 9: Effet de la fraction volumique sur la masse volumique des nanofluides hybrides .....	90
Figure III. 10: Effet de la température sur la masse volumique des nanofluides hybrides .....	91
Figure III. 11: Effet de la température sur la viscosité dynamique des nanofluides hybrides .....	91

Figure III. 12: Effet de la température sur la viscosité cinématique du nanofluide hybride ....	92
Figure III. 13: Effet de la température sur la viscosité dynamique des nanofluides hybrides .	93
Figure III. 14: Effet de la température sur la conductivité thermique du nanofluide hybride	94
Figure III. 15: Effet de la concentration des nanoparticules sur la conductivité thermique de nanofluide hybride.....	94
Figure III. 16: Effet de la température sur la capacité thermique des nanofluides hybrides...	95
Figure IV. 1: Différentes études qui peut être réalisées à l'aide de SAM .....	100
Figure IV. 2: Interface du SAM .....	100
Figure IV. 3: Localisation des 04 régions (Hassi-Rmel, Bechar, In-Salah et Tamanrasset) sur la carte. ....	102
Figure IV. 4: Moyenne annuelle du rendement optique de la centrale .....	103
Figure IV. 5: La vitesse du vent annuel pour chaque site. ....	104
Figure IV. 6: Irradiation solaire DNI en (W/m <sup>2</sup> ).....	105
Figure IV. 7: Effet des nanofluides sur l'efficacité de la centrale solaire : (a) site de Tamanrasset (b) In Salah, (c) Bechar,et (d) Hassi Rmel .....	107
Figure IV. 8: La quantité d'eau consommée par la centrale solaire PTC : a1) Tamanrasset-Dow, a2) Tamanrasset-Ther ; b1) In-Salah-Ther,b2) In-Salah-Dow ; c1) Bechar-Ther, c2) Bechar-Dow ; d1) Hassi-Rmel-Dow, d2) Hassi-Rmel –Ther. ....	112
Figure IV. 9: L'efficacité de la centrale solaire en fonction du diamètre intérieur de récepteur pour différentes nanofluides : (a) Dowtherm A (4% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ), (b) Dowtherm A (4% CuO), (c)Therminol VP-1 (4% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ), (d) Therminol VP-1 (4% CuO), (e) Therminol VP-1 (pur) (pur) et (f) Dowtherm A (pur). ....	116
Figure IV. 10: La puissance thermique annuelle produite (MWt) .....	118
Figure IV. 11: La puissance électrique annuelle produite (MWe).....	118

## Nomenclature

Symboles	Désignations	Unités
T	Température	[°C]
T <sub>amb</sub>	Température ambiante	[°C]
CF	Facteur de capacité	[%]
C <sub>Pnf</sub>	Capacité thermique massique de nf	[kJ.kg <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> ]
C <sub>Pnp</sub>	Capacité thermique massique de np	[kJ.kg <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> ]
D <sub>in</sub>	Diamètre intérieur	[m]
D <sub>éx</sub>	Diamètre extérieur	[m]
V	Vitesse	[m /s]
DNI	Direct Normal Irradiance	[W . m <sup>-2</sup> ]
<b>Lettres grecques</b>		
ρ <sub>nf</sub>	Masse volumique du nanofluide	[kg . m <sup>-3</sup> ]
ρ <sub>fb</sub>	Masse volumique du fluide de base	[kg . m <sup>-3</sup> ]
ρ <sub>np</sub>	Masse volumique des nanoparticules	[kg . m <sup>-3</sup> ]
φ	Concentration des nanoparticules	[%]
λ <sub>nf</sub>	Conductivité thermique du nanofluide	[W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> ]
λ <sub>np</sub>	Conductivité thermique des Nanoparticules	[W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> ]
<b>Indices et exposants</b>		
Bf	Fluide de base	[-]
np	Nanoparticules	
nf	Nanofluide	
SM	Solaire Multiple	
SiO <sub>2</sub>	Silica	
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Oxyde d'aluminium	
CuO	Oxyde de cuivre	
Cu	Coper	
PTCSTPP	Parabolic Trough Concentrating solar Thermal Power Plant	
PEG-PVP-TiC	Polyethylene Glycol, Polyvinyl Pyrrolidone and Titanium Carbide	
MWCNT	Multi-Walled Carbon Nanotube	
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Oxyde de fer	
SAM	Sytem Advisor Model	
EIA	Energy Information Agency	
PV/T	Photovoltaic and thermal	
SAE20W50	Motor oil	
SiC	Silicon	
CSP	Concentrating Solar Power	
PTC	Parabolic Trough Concentrator	
Ther	Therminol VP1	
Dow	Dowtherm A	
NREL	National Renewable Energy Laboratory	
Min	Minimum	
Max	Maximum	
Amb	Ambient	

## Résumé

L'objectif de ce travail est d'examiner la performance d'une centrale solaire à concentration à bases de nanofluides d'une puissance de 50 MWe, sur différentes régions Algérienne (Bechar, Tamanrasset, In-Salah et Hassi-Rmel). Pour répondre à cette problématique, nous avons divisé le travail en deux parties. Dans la première partie, nous avons étudié l'effet de la température et de la concentration des nanoparticules et le fluide de base sur les propriétés thermophysiques de différents nanofluides (Mono et hybrides). Dans la seconde partie, nous avons intégré les propriétés des nanofluides dans le logiciel SAM (System Advisor Model) pour réaliser une simulation d'une centrale solaire cylindro-parabolique. Les résultats montrent une amélioration de propriétés thermophysiques des nanofluides par rapport à leurs fluides purs. Enfin, le nanofluide à base de Dowtherm A/CuO est considéré comme un fluide le plus compétitif à utiliser dans les applications CSP. Nous avons constaté également que les deux sites In-Salah et Tamanrasset sont les plus favorables avec une efficacité de la centrale solaire à bases des nanofluides équivalente à 51% et le rendement optique est de 68,8% et 68,85% à In-Salah et Tamanrasset, respectivement.

**Mots clés :** Nanofluide,  $Al_2O_3$ , SAM, CSP, Efficacité, Conductivité thermique.

## Abstract

The main objective of this thesis is to examine the performance of a concentrated solar power plant in different Algerian regions (Bechar, Tamanrasset, In-Salah and Hassi-Rmel). We have divided the work in two parts. In the first part, we have studied the effect of temperature and concentration of nanoparticles and the base fluid on the thermophysical properties of different nanofluids (Mono and hybrid). We have developed a numerical model using MATLAB software to assess the behaviour of each thermophysical property of the nanofluids. In the second part, we have integrated the properties of nanofluids in the SAM (System Advisor Model) software to perform a simulation of a parabolic trough solar power plant. The results show an improvement of thermophysical properties of nanofluids compared to their pure fluids. Moreover, the increase of temperature plays an important role on the decrease of viscosity and its impact on other properties was also noticed while the addition of nanoparticles to the pure fluid allows increasing the thermal conductivity by 13%. Finally, the nanofluid Dowtherm A/CuO seems to be the most competitive to use in CSP applications. We also found that the two sites In-Salah and Tamanrasset are the most favorable with an efficiency of the solar power plant based on nanofluids equivalent to 51% and the optical efficiency is 68.8% and 68.85%, respectively.

**Keywords:** Nanofluid,  $Al_2O_3$ , SAM, CSP, Efficiency, Thermal conductivity.

## ملخص

الهدف الاساسي من هذه الأطروحة هو فحص و دراسة أداء محطة الطاقة الشمسية ذات التركيز بقدر 50 ميغاوات في مناطق جزائرية مختلفة في بشار وتمنراست وعين صلاح وحاسي الرمل. ولمعالجة هذه المسألة، قمنا بتجزئة العمل إلى قسمين. درسنا في الجزء الأول تأثير درجة الحرارة وتركيز الجسيمات النانوية والسائل الأساسي على الخصائص الفيزيائية حرارية للسوائل النانوية المختلفة (الأحادية والمركبة). ثم قمنا بتطوير نموذج رقمي باستخدام برنامج ماغلاب لتقييم سلوك كل خاصية فيزيائية حرارية للسوائل النانوية التي يمكن استخدامها كسائل لنقل الحرارة في تطبيقات الطاقة الشمسية المركزة. في الجزء الثاني، قمنا بدمج خصائص الموائع النانوية في برنامج السام لإجراء محاكاة لمحطة طاقة شمسية أسطوانية مكافئة. أظهرت النتائج تحسناً في الخصائص الفيزيائية الحرارية للسوائل النانوية مقارنة بالسوائل النقية. بالإضافة إلى ذلك، تلعب الزيادة في درجة الحرارة دوراً مهماً في انخفاض اللزوجة وقد لوحظ أيضاً تأثيرها على الخصائص الأخرى، في حين أن إضافة الجسيمات النانوية إلى السائل النقي يجعل من الممكن زيادة التوصيل الحراري بنسبة 13%. أخيراً، يبدو أن السائل النانوي المركب من (Dowtherm A/CuO) هو الأكثر امتيازاً للاستخدام في تطبيقات الطاقة الشمسية المركزة. كما وجدنا أن موقعي عين الصالح وتمنراست هما الأكثر تفضيلاً بكفاءة محطة الطاقة الشمسية القائمة على السوائل النانوية بما يعادل 51% والكفاءة الضوئية 68.8% و 68.85% في عين صلاح وتمنراست على التوالي.

الكلمات المفتاحية: الطاقة، السوائل النانوية، SAM، الكفاءة،  $Al_2O_3$ ؛ الخصائص الفيزيائية.

---

## **Introduction Générale**

---

## Introduction générale

Depuis 1750, la température moyenne de la planète a augmenté de 0.8 °C. Ce réchauffement est dû à l'accumulation des gaz à effet de serre dans l'atmosphère induits par l'activité humaine [1]. L'exploitation du pétrole, du charbon, de l'uranium et du gaz qui sont considérés comme les sources d'énergie les plus sollicitées et consommées quotidiennement sont responsables de la plupart des problèmes qui menacent l'existence de notre vie sur terre. L'estimation et la durée restante de l'épuisement de ces énergies est de 53 ans pour le pétrole, 55 ans pour le gaz, 120 ans pour l'uranium et de (130 à 150 ans) pour le charbon. Ces ressources sont nommées énergies fossiles qui sont responsables de la présence du gaz à effet de serre dans l'atmosphère et qui provoquent le réchauffement de la planète [2][3]. La réponse à ces majeurs problèmes est un défi qui exige d'agir le plus vite possible et d'engager sur le déploiement des énergies renouvelables : éolienne, photovoltaïque, photo-thermique, photo-thermodynamique, hydraulique, biomasse-énergie, géothermique, etc. L'exploitation de ces énergies vertes peut engendrer la diminution de la production de CO<sub>2</sub> et des autres gaz à effet de serre et sur la régulation de notre consommation énergétique. Par la suite, la lutte contre ce phénomène est rendu incontournable pour atteindre un développement soutenable et profitable pour tous. Cela s'est concrétisé notamment par l'application de l'agenda proposé par les hauts responsables des états, en inscrivant la composante et le slogan " zéro CO<sub>2</sub>" et " lutte contre la dégradation du climat ". En effet, beaucoup d'efforts sont déployés dans le monde notamment aux États-Unis, au Japon, en Australie, en Chine et en Europe pour faire face à ce défi (gaz à effet)et de construire des nouveaux laboratoires qui vont être impliqués dans la recherche sur les énergies renouvelables et sur le développement des centrales solaires thermodynamiques et photovoltaïques [4][5].

L'Algérie est un pays où les ressources fossiles sont largement disponibles, dixième réserve mondiale de gaz, troisième réserve africaine de pétrole. L'avenir énergétique de ce pays semble garanti surtout s'il s'engage dans les énergies renouvelables, l'Algérie possède dans ce secteur un potentiel parmi les plus importants au monde. Elle dispose d'un potentiel très important en énergie solaire vu sa grande superficie ; premier dans le bassin méditerranéen, elle reçoit plus de 2400 kWh/m<sup>2</sup> de DNI (Direct Normal Irradiance) annuellement et une durée d'ensoleillement qui dépasse 3500 h au sud et de 2650 h dans le nord. En effet, L'Algérie amorce une dynamique d'énergie verte en lançant un programme ambitieux de développement des énergies renouvelables. Elle a fourni équivalent de 120 milliard de dollar juste pour produire 37% d'énergie électrique d'origine naturelle [6][7].

L'énergie solaire est considérée comme la plus importante source dans toute sorte de sources d'énergie non-conventionnelles. Actuellement, l'énergie solaire peut être utilisée dans divers domaines comme source efficace à des fins multiples, comme la production de vapeur directe, d'électricité et de dessalement de l'eau à l'aide des capteurs cylindro-paraboliques. L'installation d'une centrale solaire d'une puissance 50 MW peut éliminer 90 000 tonnes de CO<sub>2</sub> et réduire 30 mille litres de la consommation de pétrole. Le début de la crise pétrolière dans les années 1960 a permis d'ouvrir la voie à une source d'énergie alternative dans le monde entier et par conséquent, plusieurs systèmes de capteurs cylindro-paraboliques ont été élaborés [8][9].

Le collecteur cylindro-parabolique PTC (Parabolic Trough Collector) est un élément très important dans la centrale solaire à concentration cylindro-parabolique. En effet, toute évolution du rendement de PTC est primordiale.

L'amélioration des caractéristiques du fluide caloporteur dans les centrales solaires à concentration est l'une des techniques utilisées pour augmenter son efficacité. Parmi les techniques utilisées pour améliorer les performances d'un système thermique sont : les ailettes, les champs magnétiques, les canaux ondulés, etc. Mais actuellement les chercheurs sont engagés pour la nouvelle technique, qui consiste à remplacer les fluides conventionnels par des nanofluides. Dans cette thèse, nous allons aborder le travail suivant :

- ❖ Étudier les propriétés thermophysiques des nanofluides (la masse volumique, la conductivité thermique, la viscosité dynamique et cinématique et la capacité thermique).
- ❖ Élaborer un programme sous MATLAB pour étudier les variations des propriétés thermiques des nanofluides en fonction de la température, de la concentration des nanoparticules et du fluide de base.
- ❖ Faire des applications sur la centrale solaire thermique à concentration.
- ❖ Intégrer les nanofluides dans le logiciel SAM (System Advisor Model), puis simuler une centrale solaire thermique à concentration dans différents sites de l'Algérie.
- ❖ Réaliser une étude d'optimisation afin d'améliorer les performances de la centrale tels que l'énergie produite et l'efficacité.
- ❖ Faire une étude comparative par rapport aux autres études expérimentales ou numériques qui sont disponibles dans la littérature.

Les actions mises en œuvre pour réaliser cette étude, et les résultats principaux qui en sont issus sont décrits et discutés dans quatre grandes parties.

Dans le chapitre I, nous allons présenter une recherche bibliographique concernant l'impact de l'intégration des nanofluides sur le comportement et l'efficacité de la centrale solaire à concentration à savoir la Tour solaire, le concentrateur de Fresnel, le PTC conventionnel et le collecteur parabolique.

Le comportement du nanofluide dans un milieu soit fermé ou ouvert est gouverné par des équations fondamentales. L'étude des propriétés thermophysiques des fluides de travail est devenue aujourd'hui le moyen le plus prometteur et essentiel pour améliorer les performances des échangeurs thermiques. Dans le chapitre II, nous dressons une brève description concernant les méthodes et les équations disponibles dans la littérature qui offrent une idée générale sur les modèles principaux qui sont consacrés à l'étude de l'effet de plusieurs paramètres sur les propriétés thermophysiques des nanofluides. Nous allons présenter aussi les équations de transfert de chaleur et de la thermodynamique destinées au calcul de l'efficacité d'un système énergétique.

Dans le chapitre III, une étude numérique sera réalisée pour analyser l'impact de la température et de la concentration des nanoparticules sur les propriétés thermophysiques des différents nanofluides (mono-hybride). Un programme sera développé sous MATLAB intégrant des modèles mathématiques permettant d'étudier l'évolution de chaque propriété

thermophysique de nanofluides telle que : la masse volumique, la conductivité thermique, la viscosité dynamique, la viscosité cinématique et la capacité thermique, soit en mono ou en hybride.

Le dernier chapitre sera consacré à une analyse de la performance optique et thermique d'une centrale solaire à concentration à base de nanofluides avec une puissance de 50 MW. L'étude sera réalisée à l'aide du logiciel SAM (System Advisor Model) dans quatre sites en Algérie (Bechar, Hassi-Rmel, Tamanrasset et In-Salah). Plusieurs modèles sont examinés et simulés afin de choisir le meilleur site et le meilleur nanofluide. Nous allons étudier aussi la performance optique et thermique en fonction de plusieurs paramètres tels que la quantité d'eau consommée par la centrale solaire, l'irradiation solaire disponible dans chaque région, l'efficacité de la centrale à base des nanofluides, la quantité d'électricité et thermique produite par la centrale solaire, etc.

---

# **Chapitre I : Synthèse bibliographique sur les nanofluides et les centrales solaires à concentration**

---

### I.1.Introduction

L'épuisement environnemental engendré par l'utilisation des réserves fossiles a conduit au développement des énergies renouvelables. Dans ce sens, la centrale solaire thermodynamique est considérée comme une nouvelle technique énergétique prometteuse qui peut être construite à des grandes capacités. Elle peut fournir une efficacité thermique plus élevée par rapport aux autres technologies comme le photovoltaïque. L'utilisation des centrales solaires à concentration pour produire de l'électricité et de la chaleur peuvent être considérées comme la technologie la plus établie dans le monde. Dans ce chapitre, nous allons présenter la plupart des études qui ont été réalisées sur les centrales solaires à concentration à savoir la tour solaire, le concentrateur de Fresnel, le PTC conventionnel. Nous allons présenter également une recherche bibliographique sur l'application des nanofluides dans les centrales solaires à concentration.

### I.2.Fluides caloporteurs dans les centrales solaires à concentration

Le rôle du fluide de travail dans les centrales solaires à concentration est de transporter l'énergie thermique résultant du rayonnement solaire. Dans certains cas, le fluide caloporteur est utilisé directement comme fluide thermodynamique. Le choix de ces fluides est très important et on doit connaître toutes les caractéristiques pour faire un bon choix, les fluides de travail les plus utilisés sont [10] :

➤ Huiles

Les huiles montrent un bon coefficient d'échange, leur gamme de température est limitée à environ 400°C . Les huiles sont généralement employées dans les centrales solaires à collecteurs cylindro-paraboliques.

➤ Eau

L'eau est un fluide de travail. Elle a une forte capacité thermique et un excellent coefficient d'échange. En outre, elle peut être employée directement dans les centrales solaires à concentration comme fluide thermodynamique dans un cycle de Rankine. Le seul inconvénient est lié à leur utilisation qui demande des pressions très élevées dans les récepteurs à cause des hautes températures atteintes.

➤ Fluides organiques

Ces fluides (propane, butane, etc.) sont moins utilisés dans les technologies CSP. Les fluides organiques peuvent être employés comme fluide thermodynamique dans un cycle de Rankine. Ils ont une température d'évaporation relativement basse.

➤ Les sels fondus

Les sels fondus composés de Nitrate de sodium ( $\text{NaNO}_3$ ) et de potassium (K) qui possèdent une densité élevée et offre un bon coefficient d'échange. L'avantage de ces fluides

réside sur leur utilisation comme fluides de stockage dans les centrales solaires à concentration, car leur température de sortie peut dépasser 500°C.

➤ Air

L'air peut être employé comme fluide de travail dans les turbines à gaz.

➤ Gaz

L'hélium ou l'hydrogène peuvent être employés dans les centrales solaires à concentration surtout dans les moteurs Stirling comme fluide thermodynamique.

Une nouvelle technique vient d'apparaître et qui va remplacer les fluides conventionnels dans les centrales solaires à concentration, cette technique est appelée 'Nanofluide'.

### I.3. Nanofluides

Le terme nanofluide utilisé pour la première fois par **CHOI** et ses collègues en 1995[11], il signifie l'intégration des nanoparticules dans un fluide de base. Les nanofluides sont constitués d'un mélange des particules de taille infiniment petite ( d'un millième du diamètre d'un cheveu ) dans un fluide d'une façon colloïdale c'est-à-dire une combinaison diphasique entre une partie solide (nanoparticule) et liquide (fluide de base) [12][11].

#### I.3.1. Préparation et fabrication des nanofluides

Les nanofluides sont généralement fabriqués par deux méthodes :

- **Méthode en une seule étape**

La méthode de préparation en une étape permet de préparer le nanofluide directement dans le fluide de base sans passer par plusieurs étapes supplémentaires comme le séchage des particules, le stockage et la dispersion des nanoparticules dans le fluide de base. En général, la méthode en une seule étape n'est pas adaptée à la préparation des nanofluides à grande échelle en termes du coût de production. Par contre, une autre technique relativement moins coûteuse et moins complexe qui a attiré l'attention de la communauté des nanofluides appelé 'méthode en deux étapes' [13][14].

- **Méthode en deux étapes**

La synthèse en deux étapes est considérée comme la méthode la plus fréquemment utilisée pour la fabrication des nanofluides ; cette technique peut être facilement mise en œuvre. Le principal inconvénient de cette procédure est le manque du contrôle de la tendance à l'agglomération des nanoparticules. La mise en œuvre fréquente de l'ultrasonication et de l'agitation est la méthode la plus couramment utilisée pour contrôler l'agglomération.[15][16]

La méthode de synthèse des nanofluides en deux étapes comporte deux phases distinctes de préparation :

- La préparation et le séchage des nanoparticules ;
- La dispersion des nanoparticules dans le fluide de base à l'aide de méthodes chimiques (stériques et électrostatiques) et physiques (agitateur magnétique, ultrasons et homogénéisateur à haute pression).

### I.3.2.Nanoparticules

Une nanoparticule réside à la limite entre l'échelle moléculaire ou atomique et l'échelle microscopique. Elle est définie comme un assemblage ou une agglomération de quelques milliers et centaines d'atomes, avec une taille et dimension nanométrique de 1 à 100nm. Les nanoparticules ont usuellement des formes cylindriques , sphériques et sous forme de tube (NTB) [17],

Les différents types de nanoparticules sont présentés dans la figure suivante :

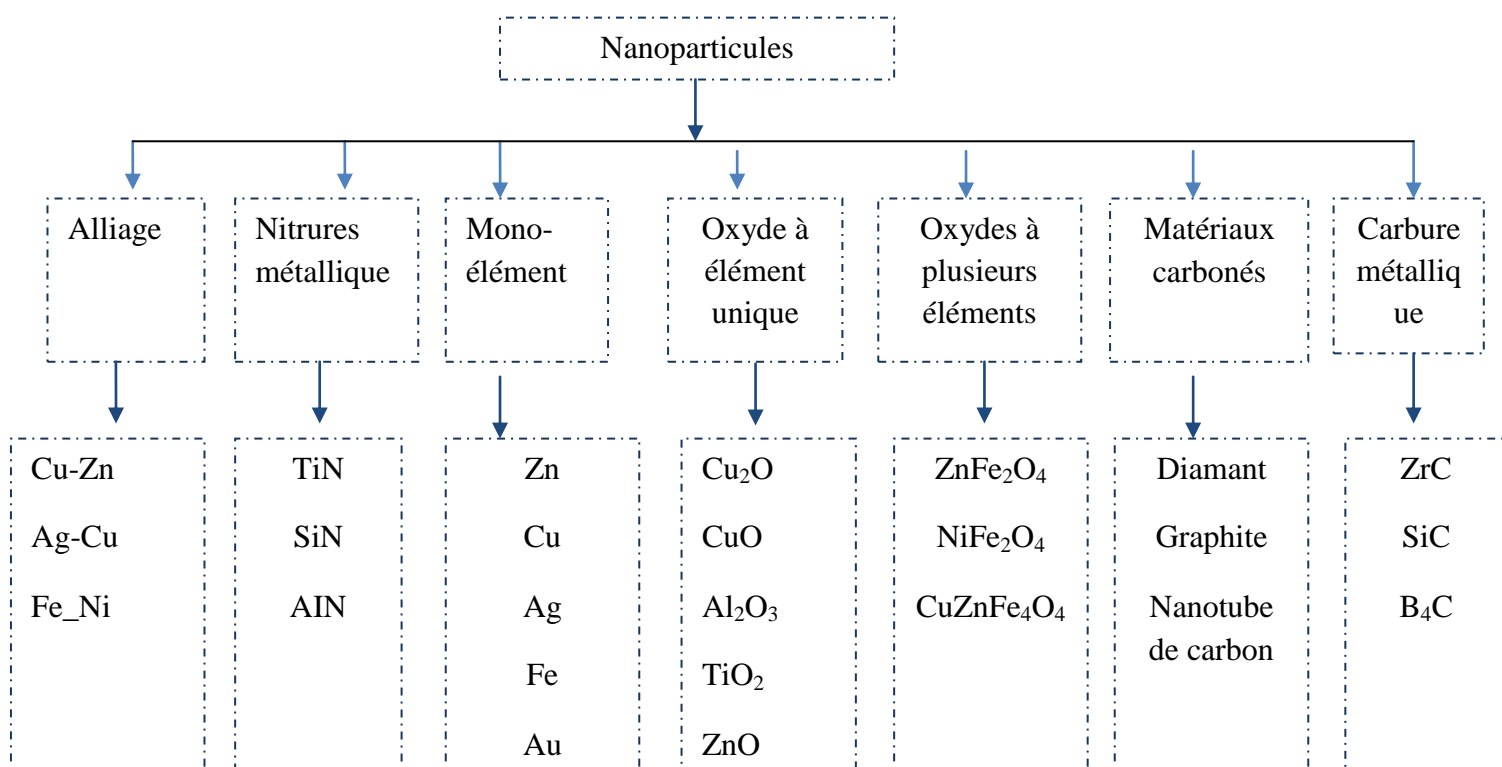


Figure I. 1: Classification des nanoparticules [18][19].

### I.3.3.Fluides de base

L'eau est considérée comme le fluide de base le plus utilisé par beaucoup de chercheurs. Généralement la sélection du fluide de base pour une bonne performance et une bonne efficacité du système repose sur les caractéristiques suivantes : la capacité thermique, la viscosité, le point d'ébullition et la stabilité thermique [20].

Les fluides de bases les plus utilisés sont présentés sur la [figure I-2](#).

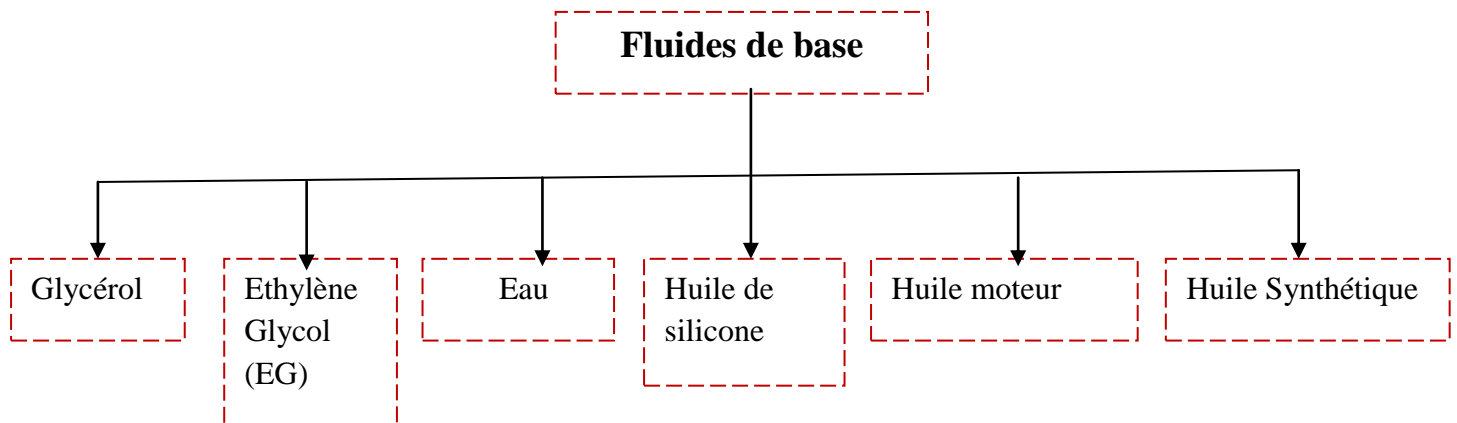


Figure I. 2: Fluides de bases les plus utilisés

### I.3.4.Domains d'applications des nanofluides

Les nanofluides sont utilisés généralement dans les applications suivantes :

#### ➤ Refroidissement des composants électronique

Après avoir connu une croissance importante au cours des dernières années, l'industrie électronique et la technologie des semi-conducteurs ont toujours des problèmes essentiels qui sont liés au refroidissement de leurs produits. à haute flux thermique. L'intégration des nanofluides dans le microprocesseur ont démontré que leur efficacité augmente. La gestion thermique dans les dispositifs électroniques est devenue un défi. Les recherches actuelles font face à cette augmentation de chaleur dans les appareils électroniques. **Bayomy et al.[21]** ont tenté à refroidir le processeur Intel Core i7 par l'injection d'une mousse d'aluminium ([figure I-3](#)).



Figure I. 3: Refroidissement du processeur Intel Core i7 par la mousse d'aluminium [21].

Les dispositifs électroniques à haut rendement exigent de nouvelles méthodes et de nouveaux liquides de refroidissement à haute performance thermique pour évacuer la chaleur générée. Un système de gestion thermique fiable est donc essentiel au bon fonctionnement des dispositifs électroniques avancés. Les nanofluides qui disposent d'un bon coefficient de transfert de chaleur et d'une bonne conductivité thermique peuvent atteindre cet objectif [22].

### ➤ Applications dans le chauffage des bâtiments et le refroidissement industriel

Les nanofluides peuvent être utilisés dans le chauffage des bâtiments, surtout dans les régions froides. Généralement le propylène glycol, l'eau et l'éthylène sont habituellement le plus utilisées comme fluide caloporteur. L'utilisation des nanofluides dans le chauffage des bâtiments à l'intérieur des échangeurs de chaleur pourrait diminuer les débits massiques et volumiques.

L'utilisation des nanofluides pour refroidir des appareils industriels et remplacer l'eau peut faire gagner beaucoup d'énergie. **Hussein et al** [23] ont mené un essai expérimental dans le but de refroidir le radiateur de voiture (figure I-4). Ils ont prouvé que les nanofluides  $\text{TiO}_2$  et  $\text{SiO}_2$  ont un fort potentiel d'amélioration du transfert de chaleur et qu'ils sont tout à fait appropriés et qu'ils conviennent parfaitement aux applications industrielles et refroidissements.

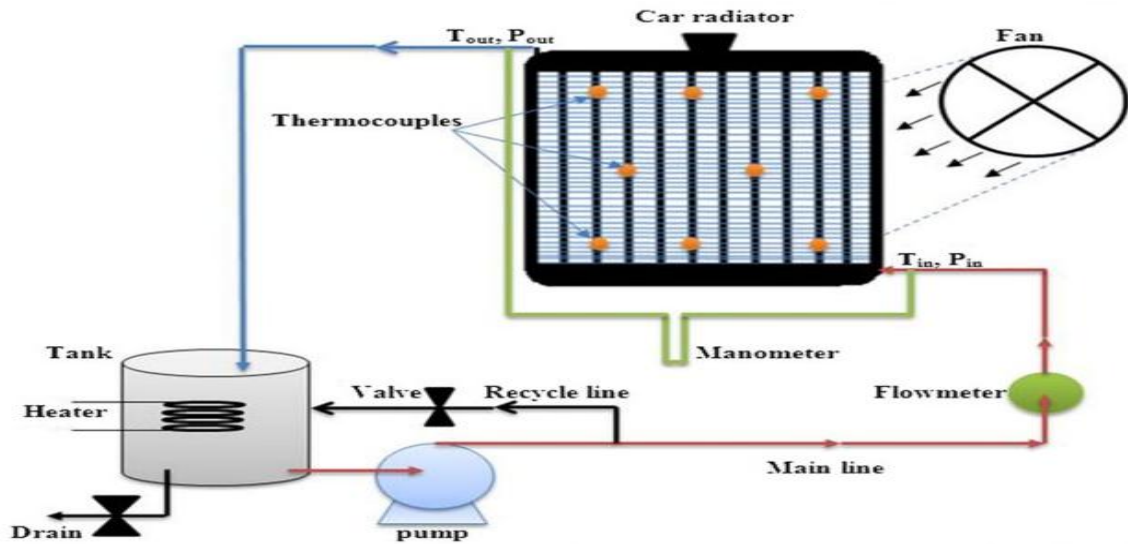


Figure I. 4: Intégration des nanofluides dans le radiateur automobile [23] .

### ➤ Application dans le refroidissement des systèmes nucléaires

Les nanofluides peuvent être utilisés aussi comme un liquide de refroidissement au cœur des réacteurs en cas d'urgence pour faire baisser sa température. Ils peuvent aussi jouer le rôle d'un régulateur de la température dans les réacteurs à haute densité.

### ➤ Moteurs à combustion interne

L'ajout des nanoparticules dans l'éthylène glycol comme fluide de base en tant que liquide de refroidissement dans des moteurs à combustion ont montré une bonne efficacité par rapport à un mélange 50/50 d'eau et d'éthylène glycol. Ce dernier est un liquide de refroidissement universellement exploité dans les automobiles. Les nanofluides ont un point d'ébullition beaucoup plus élevé et ils peuvent être employés pour augmenter la température de fonctionnement du liquide de refroidissement, puis dégager davantage de chaleur par le biais du système de refroidissement. **Nanthagobal et al.** [24] ont constaté que l'ajout des nanoparticules à base d'alcool dans le moteur diesel montre un meilleur effet anticorrosion.

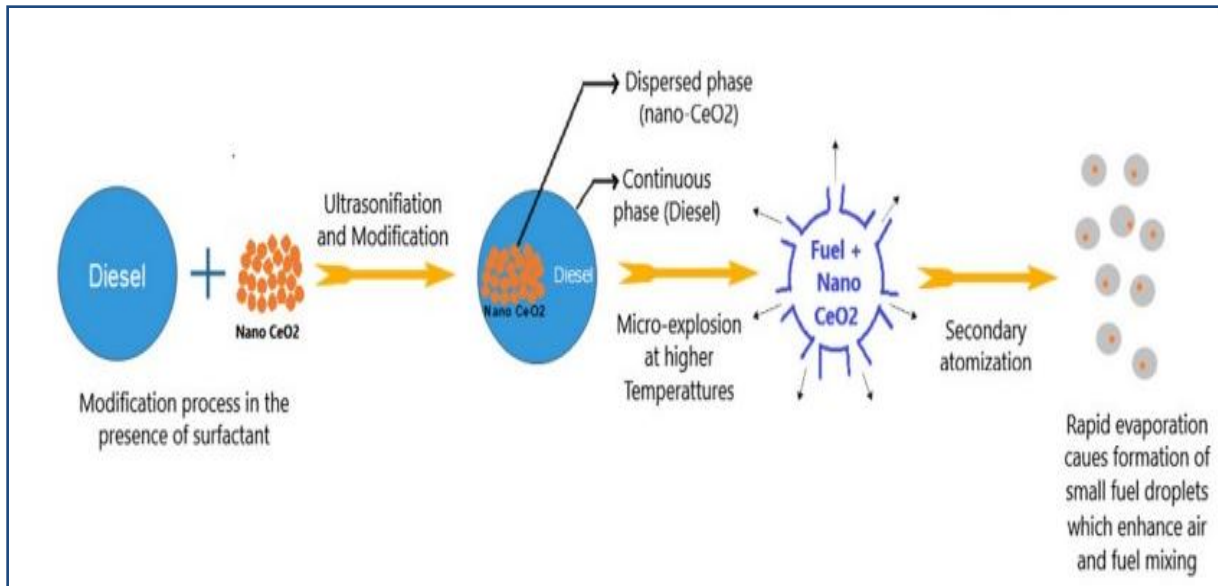


Figure I. 5: Influence des nano-additifs sur la combustion des carburants [24].

### ➤ Espace et défense

Les nanofluides peuvent conduire au développement d'une génération de dispositifs de refroidissement introduisant des nanofluides pour les systèmes électroniques dans les applications spatiales. Beaucoup d'appareils dans le système militaire nécessitent un refroidissement. Le refroidissement des appareils militaires est essentiel pour un fonctionnement crédible. Ainsi, les nanofluides ont pas mal d'applications dans les domaines de la défense et d'espace. **Harikrishnan et al.** [25] ont mené une étude expérimentale sur le stockage d'énergie à l'aide des nanofluides, ils ont intégré des nanoparticules de TiO<sub>2</sub> avec différentes concentrations dans un acide stéarique (figure I-6). Ils ont montré que les nanofluides peuvent être recommandés et considérés comme un potentiel dans les applications de stockage.

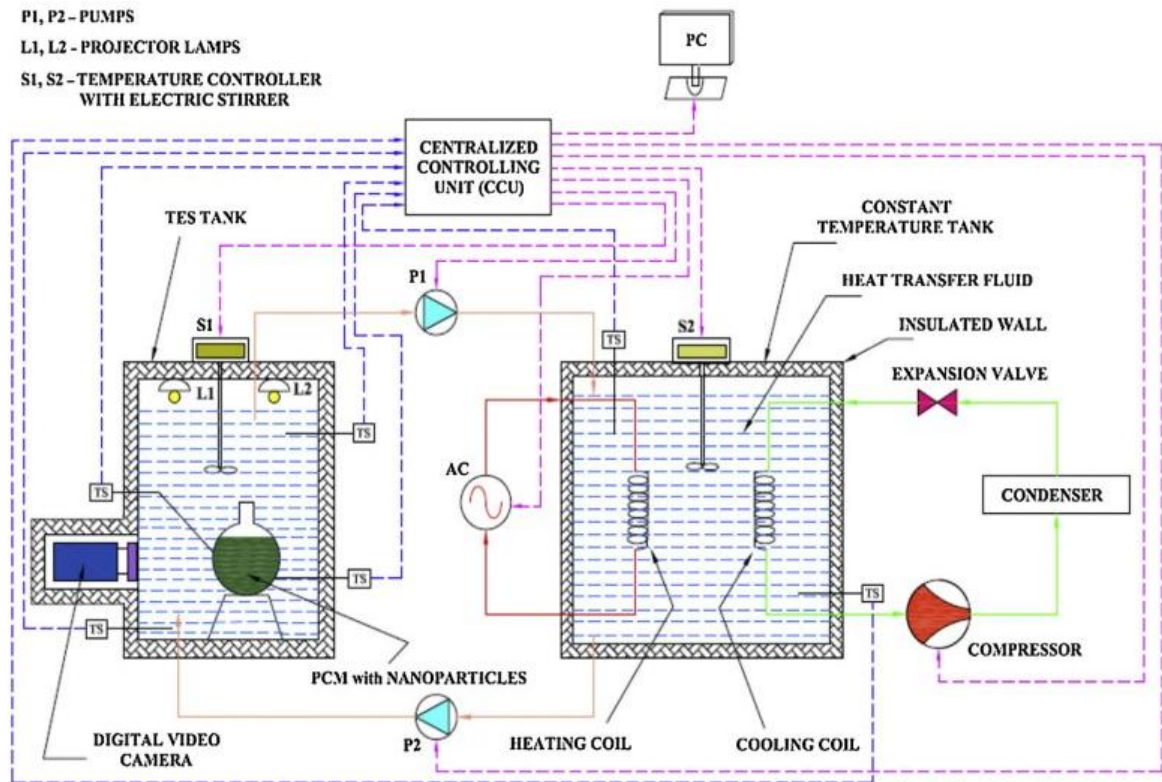


Figure I. 6: Installation expérimentale d'un réservoir du stockage d'énergie thermique (TES) isolé [25].

➤ Applications dans les domaines mécaniques

Les nanoparticules ont attiré un large intérêt ces dernières années à cause de leur excellente capacité de charge, de la résistance et de leurs bonnes propriétés de restriction (diminution) de la pression extrême. **Eswaraiah et al.** [26] ont préparé le Graphène Ultrafin (GU) par gommage de l'oxyde graphite à l'aide des rayonnements solaires focalisés, ce graphène est utilisé pour préparer un nanofluide d'huile moteur. Ils ont constaté que l'anti-usure est améliorée de 33% par rapport à l'huile de base pure.

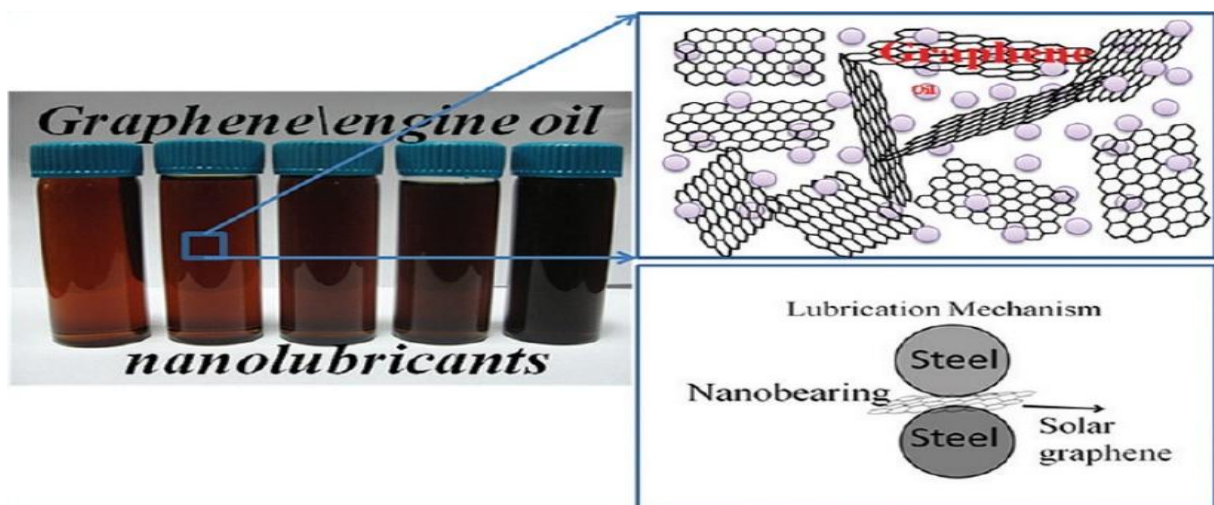


Figure I. 7: Les nanofluides dans les applications mécaniques [26].

### ➤ **Domaine de santé (activité antibactérienne)**

Les matériaux antibactériens polymères, organique et metalskin sont généralement moins stables, surtout à des pressions ou à des températures élevées. En conséquence, les matériaux inorganiques comme les métaux, les oxydes de métaux ont beaucoup attiré l'attention des chercheurs au cours de la dernière décennie, en raison de leur efficacité et capacité à résister à des conditions de traitement difficile. L'utilisation des nanofluides comme produit antibactérien montrent de bons résultats bactériostatiques contre les microbes. Les mesures électrochimiques évoquent une interaction directe entre les nanoparticules et la membrane de la bactérie à des concentrations élevées de nanoparticules. **Naheda et al. [27]** ont prouvé que les nanofluides (PEG-PVP-TiC-H<sub>2</sub>O) peuvent être considérés comme des antibactériennes importantes pour les organismes gram négatifs et gram positif. (figure I-8)

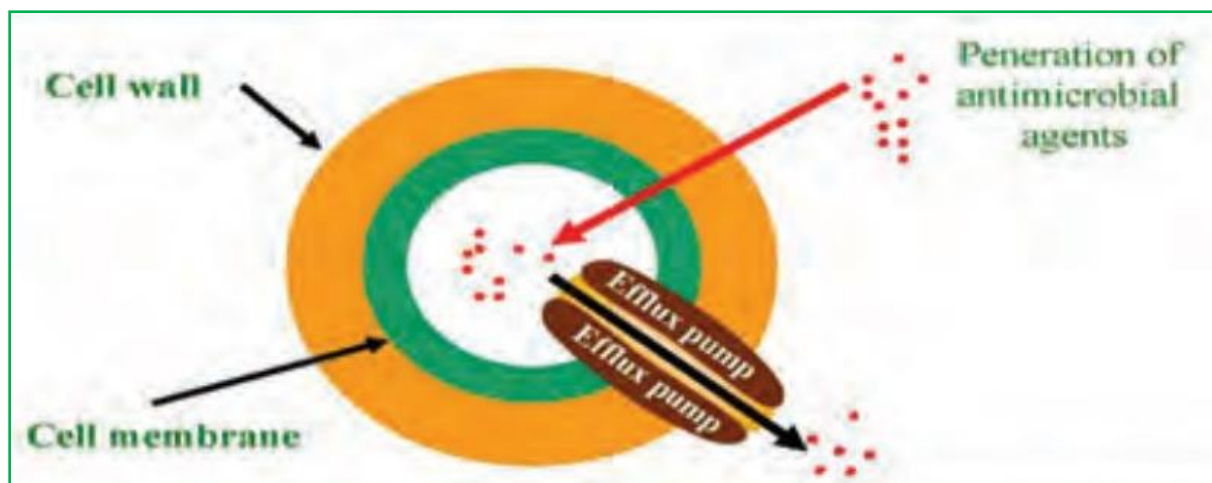


Figure I. 8: Utilisation des nanoparticules dans le domaine antibactérienne [27].

### ➤ **Palier magnétique**

Les fluides ferromagnétiques ou fluides magnétiques sont considérés comme des nanofluides spéciaux. Ce sont des mélanges colloïdaux stables telles que la magnétite d'Oxyde de fer (Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>) avec des traces de manganèse (Mn) et de titane (Ti) et d'autres métaux. **Brusentsov et al. [28]** ont prouvé que le ferromagnétique de carboxyméthyl-dextran-ferrite et le dextran-ferrite composites sont des particules les plus appropriées et les plus sélectionnées comme fluide magnétique, la DF (Dextran Ferrite) contient les noyaux de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> de diamètre varié de 10 à 12 nm, les DF séchées renfermaient 64% de dextrane et de 36% de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (figure I-9).

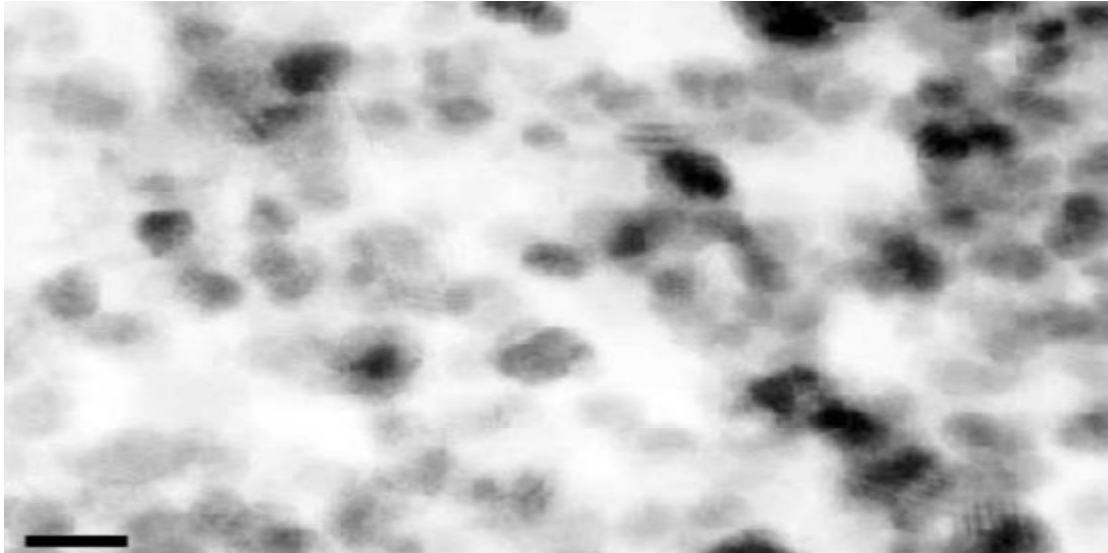


Figure I. 9: Dextrane ferrite (DF) en 10 nm [28].

Le Ferrofluide injectés dans les interstices constitue des anneaux liquides discrets aptes à supporter une différence de pression. Les joints fonctionnent sans affaiblissement lorsque l'arbre tourne. Les fluides d'étanchéité (fluides magnétiques) peuvent être appliqués et utilisés dans de nombreux domaines d'application. **Leona et al.** [29] ont intégré des particules non magnétique de la forme sphérique en latex de silice et de polystyrène pour constituer un Ferrofluide (figure I-10).

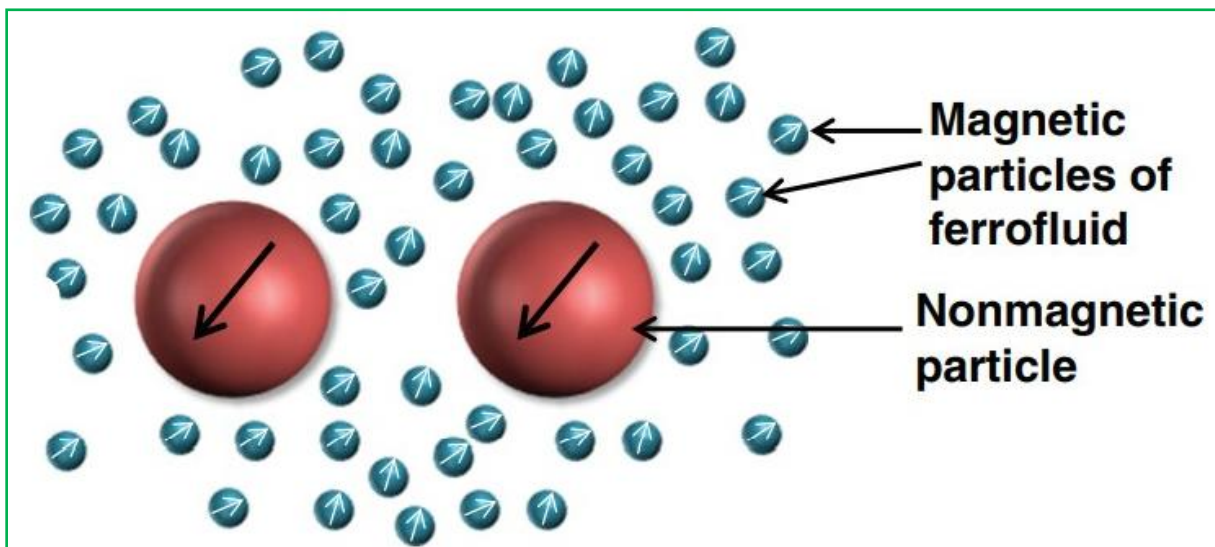


Figure I. 10: Moment magnétique des particules avec ferrofluid. [29]

### I.4. Centrale solaire à concentrateur cylindro-parabolique

#### I.4.1. Centrale solaire à PTC conventionnel

La centrale solaire à PTC conventionnel se constitue d'un réflecteur linéaire de section parabolique, d'un récepteur linéaire tubulaire et d'une structure de support métallique. Ces concentrateurs sont connectés aux systèmes de suivi avec un dispositif à axe unique, pour que les rayons solaires soient diffusés correctement dans l'ouverture du capteur. En général, le PTC est positionné avec ses axes dans la direction nord-sud et suit le soleil dans la direction Est-Ouest. Cette combinaison permet d'obtenir une exploitation maximale du rayonnement solaire incident durant la période estivale [30]. Le récepteur conventionnel composé d'un tube sous vide interne métallique et un tube externe en verre. Le vide entre l'absorbeur et le couvercle joue un grand rôle sur la réduction des pertes thermiques par convection. La [figure I-11](#) illustre la section transversale d'un tube sous vide. Généralement, la surface extérieure de l'absorbeur a un revêtement sélectif qui permet de réduire les pertes thermiques par rayonnement dans l'environnement [31][32].

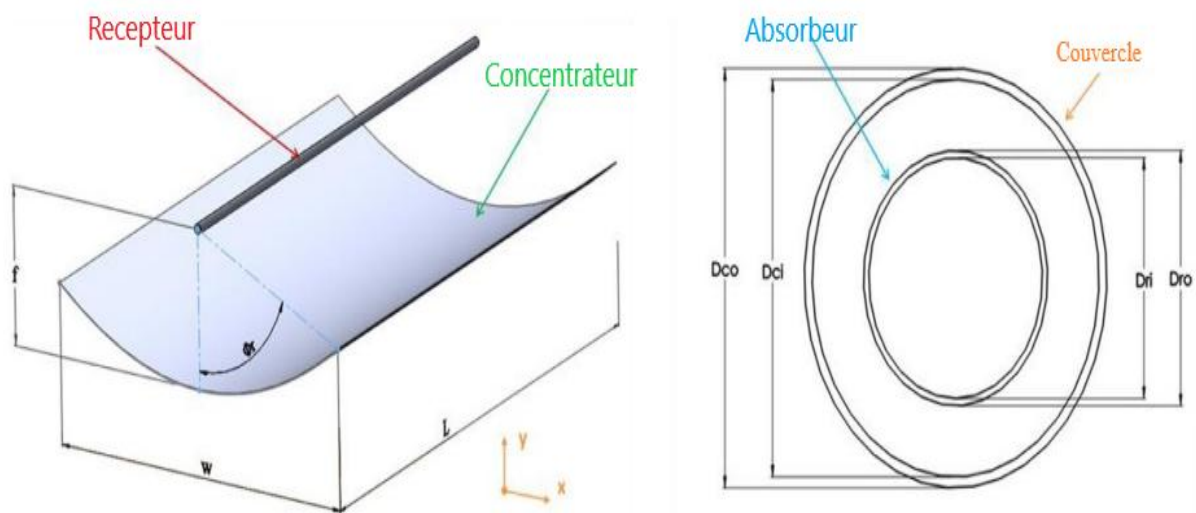


Figure I. 11: Illustration d'un PTC Conventionnel.[30]

### I.4.2. Modifications géométriques

La modification de la géométrie de PTC a été étudiée par plusieurs chercheurs dans la littérature telle que l'utilisation d'un réflecteur secondaire dans le but d'avoir une grande captation des rayons solaires. **Rodriguez et al.** [33] ont installé un concentrateur secondaire plat au-dessus de l'absorbeur pour améliorer le rendement et réduire le diamètre de l'absorbeur dans le but d'augmenter le taux de concentration. Ils ont constaté que cette technique peut augmenter le taux de concentration jusqu'à 80%. Ils ont conclu que l'ombre créée par les miroirs ne présente pas un grand inconvénient sur l'efficacité de PTC. La même problématique entamée par **Liang et al.** [34] ont mené une simulation numérique d'un flux radiant concentré afin de définir la configuration optimale pour différents modèles proposés pour le calcul des processus de l'absorption, de réflexion et de transmission. Ils ont constaté que l'efficacité optique du tube absorbeur était d'environ 45 % tandis que la performance optique de la configuration totale était d'environ 85 %. Par ailleurs, ils ont déclaré que ce système a une efficacité satisfaisante dans les cas où les erreurs de suivi du réflecteur primaire diminuent.

**Yuan et al.** [35] ont étudié numériquement un concentrateur solaire de 8 m<sup>2</sup> hybride à auge parabolique utilisé pour l'éclairage et le chauffage, ils ont réalisé la simulation pour 10 régions. Le chauffage et l'éclairage ont été appliqués dans le secteur industriel, commercial et résidentiel. Ils ont constaté que l'utilisation d'un collecteur solaire hybride est très compétitif et intéressant par rapport au système conventionnel, l'efficacité totale trouvée était d'environ 39,4 %. **Ullah et Shin.** [36] ont examiné un système séminaire d'un PTC à plusieurs étages (figure I-12), ils ont employé des fibres optiques pour transmettre les rayons solaires réfléchis à l'intérieur d'un bâtiment, leurs résultats montrent que cette méthode permet d'obtenir un éclairage intérieur suffisant.

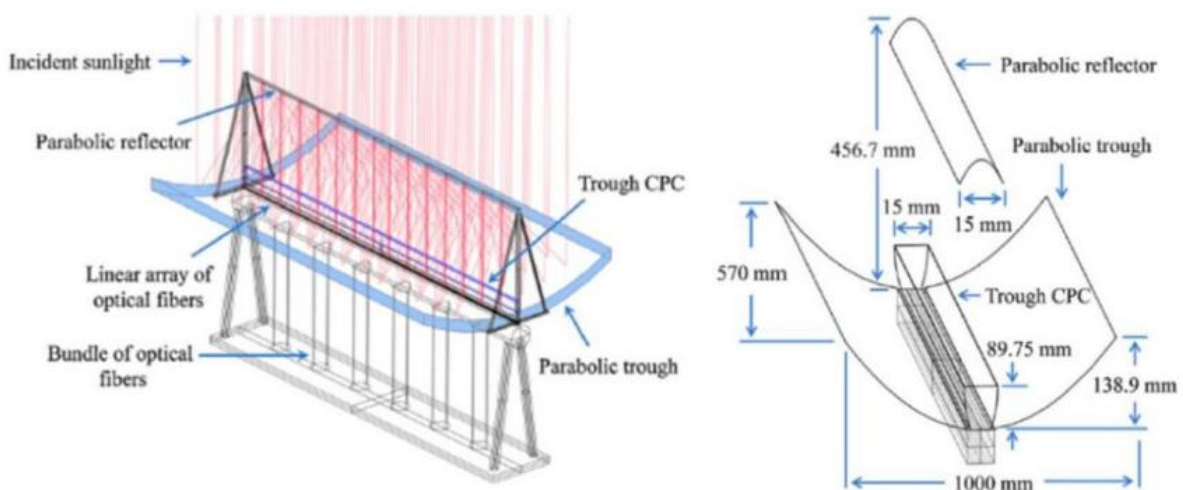


Figure I. 12: Application de PTC à des fins d'éclairage [36].

**Ziwei et al. [37]** ont examiné expérimentalement un collecteur solaire à auge avec trois récepteurs d'une géométrie différente (tube récepteur lisse et des tubes avec des ailettes) dans le but d'examiner les performances du collecteur PTC tels que l'efficacité exerique, l'efficacité énergétique et l'efficacité thermo-hydraulique qui va être utilisé pour des applications à température moyenne. Ils ont constaté que pour un débit d'air  $93\text{Nm}^3/\text{h}$  et la densité du rayonnement solaire  $900\text{W}/\text{m}^2$ , la température de l'air augmente jusqu'à  $266^\circ\text{C}$ . Ils ont constaté aussi que la chute de pression est plus élevée dans un tube à ailette que le tube lisse. Leurs résultats expérimentaux montrent aussi que l'efficacité exerique et énergétique étaient 4.29% et 14.5% respectivement. À l'aide de CFD, **Javier Muñoz et al. [38]** ont numériquement simulé un collecteur à tube à ailettes dans le but d'évaluer ces pertes thermiques, les pertes de charge, la fatigue mécanique et les contraintes thermodynamiques. Ils ont constaté que l'intégration de l'ailette dans un récepteur peut améliorer la centrale solaire de 2% et une diminution attendue des coûts d'exploitation et de maintenance grâce à la réduction du taux de changement des tubes. Ils ont conclu que les pertes parasites sont liées aux pertes de pression dans le tube augmentent avec le nombre d'ailettes et son angle d'hélice.

**Demaghet al. [39]** ont présenté une étude première sur la fiabilité d'un tube sinusoïdal courbé en S pour l'utiliser dans l'application PTC (figure I-13). Habituellement, dans les collecteurs conventionnels l'absorbeur est de forme droit placé le long de la ligne focale, mais dans leur travail l'absorbeur est courbé. Ils ont présenté l'impact de la forme des récepteurs sur la distribution du flux de chaleur. Leurs résultats montrent que cette conception (l'utilisation un absorbeur courbé) a bénéficié beaucoup d'avantages tels que la limitation de déflexion de l'absorbeur en relation avec une bonne distribution du flux de chaleur. Ils ont constaté aussi que le facteur d'interception d'un récepteur courbé est plus important par rapport à celui d'un capteur équipé d'un absorbeur sous vide conventionnel.

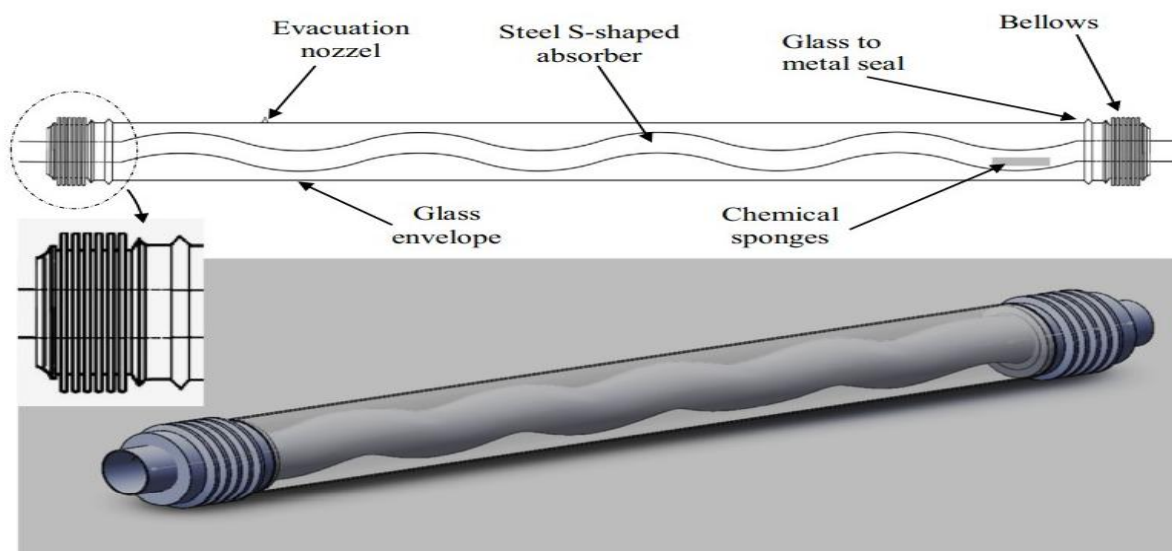


Figure I. 13: Absorbeur sous vide avec un tuyau courbé en S [39]

### I.4.3. Modifications thermiques (Fluide caloporteur)

L'optique a été conçue pour assurer la convergence du rayonnement solaire sur la surface de l'absorbeur thermique dans le système d'énergie solaire concentrée. L'intensité solaire absorbée par le fluide caloporteur sera transportée pour la convertir en énergie électrique et le rayonnement solaire doit être récupéré à des températures plus hautes.

Les huiles synthétiques sont utilisées comme fluide de travail dans la plupart des centrales à capteurs cylindro-paraboliques. En dehors des huiles synthétiques y a d'autres fluides équivalents tels que le sel fondu, l'eau et les gaz sous pression qui peuvent être employés et évalués afin d'augmenter la puissance et le rendement du PTC et de réduire les problèmes environnementaux [40].

**Ruegamer et al.** [41] ont examiné trois types de sels fondus (hypothétique et commerciaux) qui ont été utilisés comme fluide de travail dans la centrale solaire à capteur PTC dans le but d'améliorer sa capacité en augmentant l'efficacité du panier électrique qui est considéré comme l'indicateur le plus significatif et en abaissant de 20% le niveau de consommation électrique et en renforçant les éléments de captation de la chaleur. Ils ont constaté que les paramètres thermodynamiques sont totalement différents de ceux des installations qui fonctionnent à l'huile thermique, les changements qui en résultent au stade de la conception du stockage, des collecteurs et des récepteurs sont très importants. Les résultats principaux de leur étude montrent que la taille de la centrale joue un grand rôle sur l'augmentation du rendement.

**Zaversky et al.** [42] ont numériquement examiné la modélisation transitoire d'un collecteur PTC à base de sel fondu (40%  $\text{KNO}_3$  et 60%  $\text{NaNO}_3$ ) utilisé comme fluide caloporteur à la place des fluides huileux conventionnels, ils ont validé leurs résultats avec les données qui sont disponibles à l'installation SOLTERM (Italie). Ils ont constaté que les passages continus des nuages provoquent un phénomène transitoire notable de la température de sortie du collecteur, pour un débit massique constant de 6.5 Kg/s.

**Hoste et al.** [43] ont expérimentalement examiné un collecteur à auge avancé (Sky Trough) qui est moins coûteux et qui a été développé par (Skyfuel) dans le but d'analyser ses performances à base du sel fondu. Ils ont conclu que le montage de capteurs solaires cylindro-paraboliques SkyTrough DSP a prouvé un rendement thermique de 70.5 % et un rendement optique de 76 %. Ils ont conclu également que ce type de collecteur a démontré le succès de son utilisation et de la restauration du gel avec des sels fondus. Vu son économie prometteuse et ses performances le SkyFuel a l'intention de continuer le chemin vers la commercialisation de ce produit.

**Muñoz-Anton et al.** [44] ont numériquement examiné une centrale solaire à base d'air qu'est utilisé comme fluide de travail et le sel fondu comme fluide de stockage (figure I-14), et également de présenter la boucle d'essai construite à la PSA (Plataforma Solar de Almería) afin de démontrer la praticabilité technique de l'utilisation du gaz dans les centrales solaires. Ils ont examiné la plupart des éléments nécessaires à la réalisation d'une centrale électrique. Dans leur étude, ils ont proposé des techniques et des solutions pour que cette technologie soit

vraiment compétitive, par exemple mettre en évidence les problèmes qui sont liés aux pertes de charge dans l'échangeur à air, ils ont proposé aussi de trouver une solution pour réduire le coût et les pertes thermiques. Finalement, ils ont parlé de la possibilité d'avoir un meilleur transfert de chaleur entre l'absorbeur et le gaz.

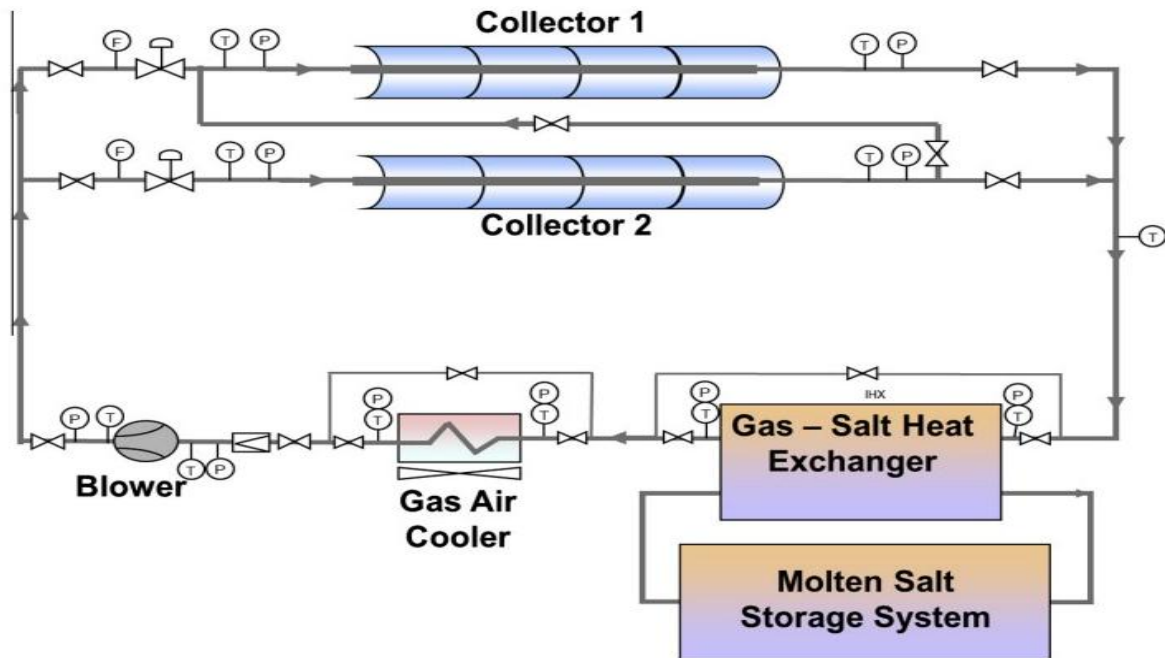


Figure I. 14: Centrale solaire PTC à base d'air [44].

La plupart des chercheurs ont utilisé les huiles synthétiques et minérales comme fluide caloporteur dans les centrales solaires PTC, ils ont examiné la capacité de transfert de chaleur et l'efficacité des collecteurs sur une base numérique et expérimentale. Les huiles synthétiques possèdent de nombreuses caractéristiques souhaitables à des températures allant jusqu'à 400°C. Il a donc été utilisé comme fluide caloporteur dans les applications solaires à capteur cylindro-parabolique. **Marif et al.** [45] ont numériquement examiné les performances thermiques et optiques d'un collecteur solaire cylindro-parabolique dans le Sahara Algérien, ils ont utilisé l'eau et l'huile synthétique comme fluide de travail. Ils ont développé un programme informatique fondé sur la méthode des différences finies unidimensionnelle. Ils ont divisé le bilan énergétique, le fluide caloporteur, l'enveloppe de verre et le tube absorbeur en plusieurs segments. Ils ont constaté clairement que les propriétés physiques du fluide de travail jouent un grand rôle sur l'amélioration de l'efficacité thermique de la centrale solaire le cas des huiles synthétiques.

Le tableau ci-dessous représente les différents types de fluides conventionnels utilisés dans les centrales solaires à collecteur PTC.

Tableau I. 1: Fluides colorateurs (Étude comparative)

Auteurs	Fluides Caloporteurs	Résultats
Nems et al. [46]	Air	Coefficient de déperdition thermique près de $1,6\text{W/m}^2\text{K}$ et Rendement maximal de 40 %.
Bader et al. [47]	Air	Rendement thermique à $125\text{ }^\circ\text{C}$ environ 65 % et à $500\text{ }^\circ\text{C}$ jusqu'à 42 %.
Al-Ansary et al. [48]	Air	Systèmes efficaces et économiques, pour les températures mois élevés.
Good et al. [49]	Air	Un bon fonctionnement à $500\text{ }^\circ\text{C}$
Chandra et al. [50]	Therminol VP-1	Les pertes thermiques ont été réduite à 20%.
Liang et al. [51]	Therminol 55	Efficacité thermique à $80\text{ }^\circ\text{C}$ et $160\text{ }^\circ\text{C}$ est de 48 % et 34 % respectivement.
Wang et al. [52]	Dowtherm A	La plage de fonctionnement entre $200\text{-}400\text{ }^\circ\text{C}$ .
Chen et al. [53]	huile minérale	Efficacité thermique de 55%
Yang et al. [54]	Sel fondu	Réduction de 31% des pertes thermiques.
Sahin et al. [55]	Eau	Les pertes de charge peuvent être négligeables par rapport à l'amélioration du transfert de chaleur.
Jamal-Abad et al. [56]	Eau	Une amélioration de 1% de l'efficacité thermique.
Bortolato et al. [57]	Eau	à $120\text{ }^\circ\text{C}$ l'efficacité optique et l'efficacité thermique est de 82% et 64% respectivement.
Nation et al. [58]	Syltherm 800	le rendement thermique environ 75%.
Mwesigye et al. [59]	Syltherm 800	Amélioration de l'efficacité thermique jusqu'à 8 %.
Song et al. [60]	Syltherm 800	La réduction des pertes thermiques jusqu'à 67%.
Mwesigye et al. [61]	Syltherm 800	Une amélioration de 10% de l'efficacité thermique.

### I.4.4. Intégration des nanofluides

Pour améliorer le rendement et l'efficacité d'un capteur solaire ou les centrales solaires d'une manière générale, les chercheurs dans ce domaine pensent à des modifications dans le fluide de transfert de chaleur. L'une parmi les méthodes les plus efficaces réside sur l'utilisation des nanofluides comme fluide de travail. Les nanoparticules les plus utilisées telles que le  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , Al, Cu,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{SiO}_2$ , Au, Ni, ZnO, et  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  peuvent être dispersées dans un

fluide de base comme l'eau, le gaz ou les huiles. Beaucoup de recherches soit expérimentales ou numériques ont été consacrées à ce genre de techniques. On peut citer le travail de **Potenza et al.** [62] ont étudié expérimentalement l'effet d'intégration des nanofluides (CuO/Gaz) dans un récepteur solaire PTC de 4 m<sup>2</sup> de surface et qui est composé de deux tubes coaxiaux. Ils ont constaté que l'utilisation des nanofluides améliorent le rendement moyen et la performance thermique du prototype étudié. **Ghasemi et al.** [63] ont numériquement évalué l'efficacité du système solaire à base du nanofluide ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ /Therminol 66) avec différentes fractions volumiques, ils ont constaté que les performances thermiques et le transfert de chaleur à base des nanofluides ont été améliorés par rapport au fluide de base pur, ils ont constaté aussi que l'augmentation de la fraction volumique conduit à l'amélioration de la conductivité thermique. **Liang et al.** [51] ont numériquement examiné les performances thermiques et l'efficacité d'un collecteur solaire NDAPTC (collecteur parabolique à absorption directe basé sur un nanofluide) (figure I-15) à base des nanofluides CuO/huile. Ils ont prouvé que l'efficacité du collecteur à base des nanofluides s'améliore de 10% par rapport au collecteur à base d'huile conventionnelle pure.

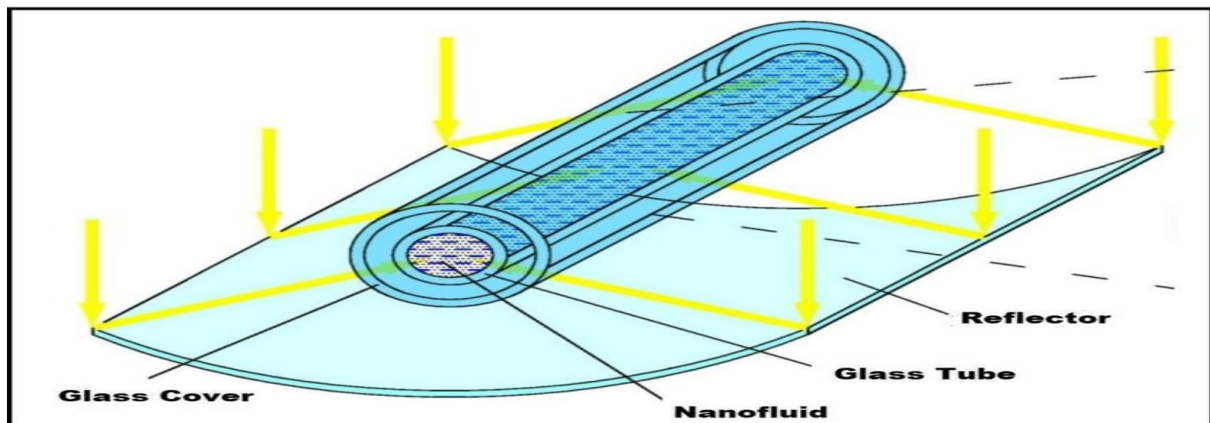


Figure I. 15: Collecteur parabolique à absorption directe à base des nanofluides [51].

**Ghasemi. et al.** [64] ont numériquement simulé le transfert de chaleur à l'intérieur du tube récepteur du collecteur solaire PTC avec des nanofluides  $\text{Al}_2\text{O}_3$ /Eau et CuO/Eau comme fluide de travail, ils ont examiné également l'effet de la fraction volumique sur le flux de chaleur et sur les performances thermiques et hydrodynamiques du collecteur. Leurs résultats montrent que l'utilisation des nanofluides comme fluide du travail améliore le transfert de chaleur de 35% pour le nanofluide (CuO/Eau) et 28% à base de ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ /Eau), pour une fraction volumique égale à 3%. **Allouhi et al.** [65] ont proposé un modèle mathématique unidimensionnel intégré dans MATLAB dans l'objectif d'examiner l'effet d'intégration de nanoparticules ( $\text{TiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  et CuO) dans un fluide de base (huile synthétique) pour l'utiliser comme fluide de travail dans le PTC à moyenne température. Ils ont prouvé que l'amélioration de l'efficacité exergetique est mieux que l'efficacité énergétique et l'utilisation des nanofluides à base de  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  et CuO améliorent les performances du collecteur d'environ 1.14%, 1.17% et 1.06%, respectivement par rapport au fluide pur comme le montre la figure I-16.

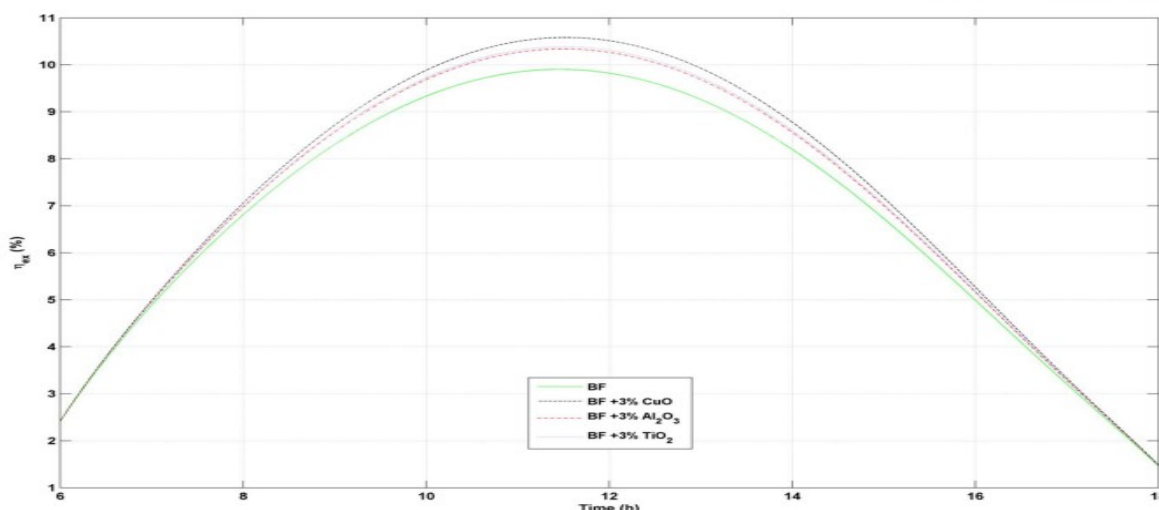


Figure I. 16:Évolution temporelle de l'efficacité énergétique [65].

Le même logiciel MATLAB utilisé par **Kasaiean et al.** [66] dans leur travail pour examiner l'effet des nanoparticules du MWCNT dispersés dans l'huile thermique qui est considéré comme fluide de travail dans un collecteur PTC dans une plage de températures variées entre 30 à 100°C. Ils ont pris en considération toutes les propriétés thermodynamiques et les équations optiques et de transfert de chaleurs. Ils ont constaté une amélioration de transfert thermique convectif de 15% pour une concentration de 6% des nanoparticules dans un fluide de base. **Mahian et al.** [55] ont ajouté des nanoparticules de Cu et SiO<sub>2</sub> dans un fluide de base (eau) dans le but d'étudier l'influence des nanofluides sur le processus d'évaporation dans un alambic solaire qui est associé à un échangeur de chaleur. Ils ont prouvé que l'intégration des nanofluides comme fluide caloporteur peut améliorer les performances thermiques d'un système jusqu'à 10%, par contre ils ont constaté que l'utilisation des nanofluides à la place de l'eau provoque une amélioration remarquable. Leurs résultats montrent aussi que la conductivité thermique de nanofluide à base de Cu est supérieure à celle de SiO<sub>2</sub>. **Minea.A et al.** [67] ont montré que l'ajout d'une forte concentration de nanoparticules Cu-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> peut réduire l'efficacité d'un système solaire à cause de la croissance exagérée de la viscosité dynamique. Ils ont constaté que le nanofluide à base d'eau avec 2% (MgO-Ag) donnent les meilleurs résultats en termes de l'efficacité du collecteur (figure I-17).

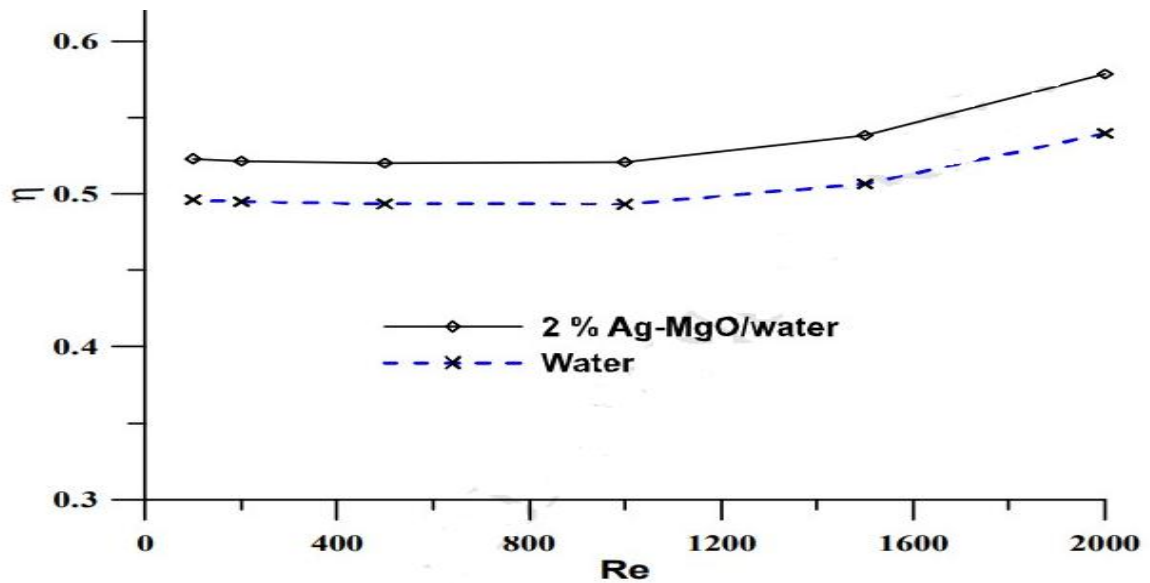


Figure I.17: Efficacité du collecteur à base des nanofluides [67].

**Kasaeian et al.** [68] ont expérimentalement examiné l'effet d'intégration des nanoparticules MWCNT avec fraction volumique (1%,2% et 3%) dans l'éthylène glycol et de nano silice pour l'utiliser comme fluide de travail dans un collecteur PTC d'une hauteur de 2 m et d'une largeur de 0.7m et un réflecteur fabriqué en acier. Ils ont constaté que l'efficacité thermique et optique avec un nanofluide (MWCNT/Éthylène glycol) est de 17% et 71.4% respectivement, pour une fraction volumique de 0.3% par rapport au fluide de base pur. **Fan et al.** [51] ont développé un modèle mathématique pour examiner le nanofluide Al/Syltherm 800 utilisé comme fluide caloporteur dans un PTC à double passage comme le montre la figure I-18 ,ils ont comparé la performance de ce collecteur par rapport au PTC conventionnel. Ils ont affirmé clairement que leur système a une efficacité particulièrement élevée et qui peut remplacer le PTC sélectif avec une augmentation de l'efficacité jusqu'à 4 % pour une température d'entrée mois de 150 °C.

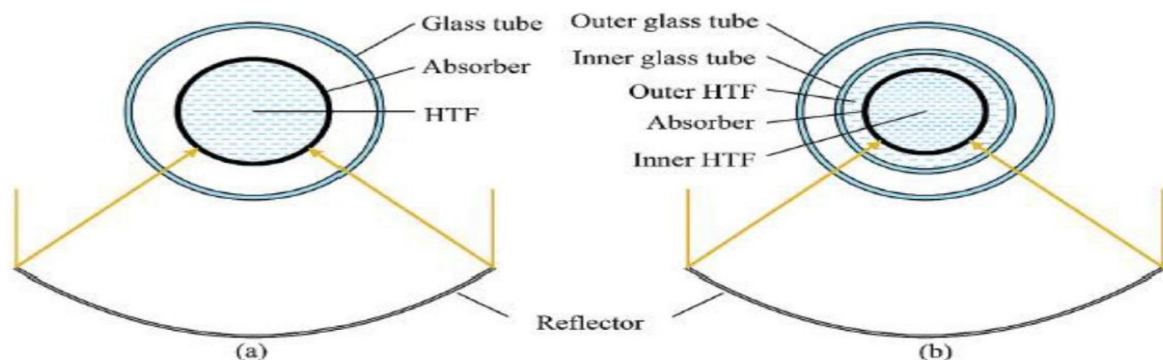


Figure I. 18:a) PTC conventionnel (b) PTC examiné par Fan.M et al [51].

**Abid.Muhammad et al.** [69] ont mené une étude comparative d'un collecteur solaire parabolique et un collecteur solaire à auge (Dish) placé séparément avec un cycle de Rankine et un électrolyseur, dans le but d'évaluer et d'examiner leur performance numériquement. Un

nanofluides à base de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  et  $\text{Al}_2\text{O}_3$  et des sels fondus ont été examinés. Ils ont constaté que l'énergie nette produite par la centrale thermique alimentée par le PTC est plus importante que la centrale à auge parabolique. Leurs valeurs sont de 8.17 KW et 6.23 respectivement, ils ont constaté que l'oxyde de ferrique ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) et d'oxyde d'aluminium ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) produisent une puissance nette et une meilleure performance que les sels fondus.

**Toghyani et al. [70]** ont numériquement étudié la performance d'un cycle électrique intégré au cycle de Rankine, le fluide de base utilisé dans leur étude est d'huile et les nanoparticules sont  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CuO}$ ,  $\text{TiO}_2$  et  $\text{SiO}_2$ . Ils ont examiné l'impact de l'irradiation solaire sur l'efficacité énergétique globale pour différents nano-fluides et l'effet de l'irradiation solaire sur la température de sortie du capteur pour différents nanofluides et l'impact du temps de déchargement sur l'efficacité énergétique globale. Leurs résultats indiquent que le rendement énergétique global dans le cas d'utilisation des nanoparticules de  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{TiO}_2$  et  $\text{CuO}$  lors de la charge est de décharge sont respectivement de 0.243, 0.294, 0.318 et 0.321, ce qui est largement supérieur au mode de décharge, ils ont constaté également que l'efficacité énergétique diminue à chaque fois l'irradiation solaire augmente et la nanoparticule de  $\text{CuO}$  mène à une efficacité plus élevée que les autres nanoparticules (voir figure I-19) [70].

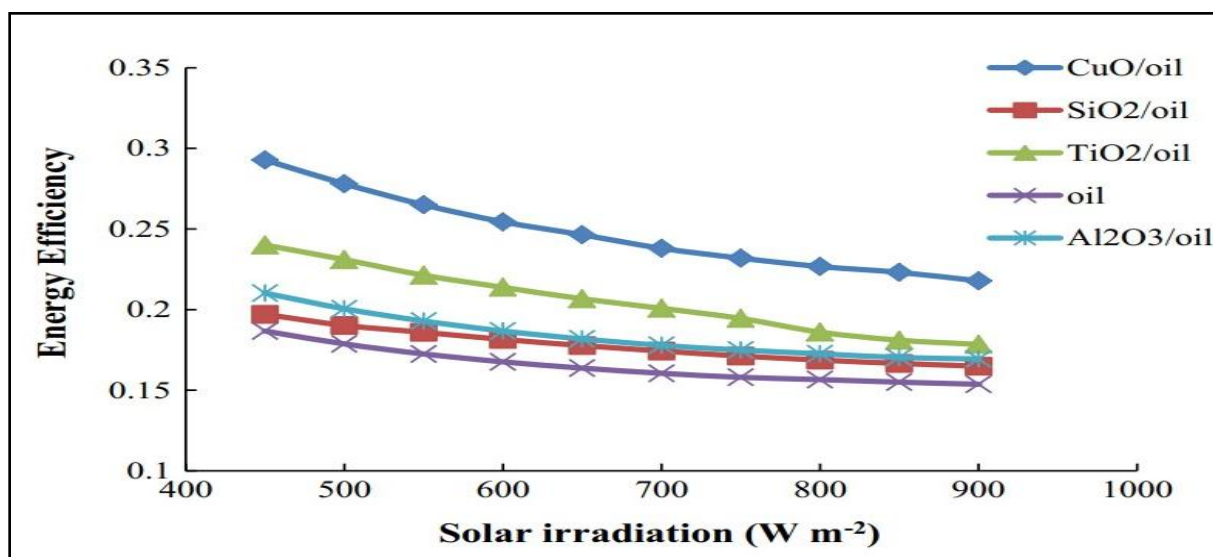


Figure I. 19: Effet de l'irradiation solaire et les nanofluides sur l'efficacité énergétique [70].

L'utilisation des nanofluides dans les applications qui servent généralement à la production d'électricité à l'aide des centrales solaires à miroir PTC, le refroidissement et la réfrigération a été étudiée par des nombreux chercheurs au cours des dernières années. Les études bibliographiques sont récapitulées dans le [tableau I-2](#), avec les détails (types des nanoparticules, fluides de bases, plage de température et l'efficacité). Cette recherche bibliographique indique une amélioration importante de la performance du système avec l'utilisation des nanofluides.

Le tableau ci-dessous montre clairement que les nanoparticules  $\text{CuO}$  et  $\text{Al}_2\text{O}_3$  donnent de bons résultats que les autres nanofluides.

Tableau I. 2: Synthèse bibliographique sur l'intégration des nanofluides dans les applications PTC.

Auteurs	Nanoparticules	Fluide de base	Commentaires
Bellos et al. [71]	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> - TiO <sub>2</sub>	Syltherm 800	Une amélioration de Nu de 23,8 % pour TiO <sub>2</sub> et de 23,4 % pour Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .
Subramani et al. [72]	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Eau	Amélioration de l'efficacité thermique de 8,5 %.
Allouchi et al. [65]	CuO	Huile	Amélioration de l'efficacité thermique de 1.06%.
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		Amélioration de l'efficacité thermique de 1.17%.
	TiO		Amélioration de l'efficacité thermique de 1.14%
Rehan et al.[73]	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Eau	Amélioration de l'efficacité thermique de 13%.
	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		Amélioration de l'efficacité thermique de 11% .
Bellos and Tzivanidis [74]	CuO	Syltherm 800	L'efficacité énergétique maximale globale est de 24,66%.
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		
Abid et al. [75]	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Eau	Le rendement énergétique global est de 23,25 % pour T= 320K.
	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		
Alashkar and Gadalla. [70]	Cu	Syltherm 800	Une amélioration du rendement énergétique d'environ 12%
	Ag	Therminol VP-1	
Ghasemi and Ranjbar [64]	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Eau	Amélioration du transfert de chaleur de 28 %.
	CuO		Amélioration du transfert de chaleur de 35 %.
Abu-Hamdeh and Almitani et al.[76]	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Eau	14,40% le taux d'améliorations du coefficient de transfert
	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		12,30% le taux d'améliorations du coefficient de transfert
	ZnO		9,01% le taux d'améliorations du coefficient de transfert
Alashkar, et al.[77]	Ag	Syltherm 800	une augmentation de 18,2 % se produit pour 5 % d'Ag/Syltherm 800
	Cu	Therminol VP-1	La puissance mensuelle de sortie est de 11,1% pour 5 % de Cu/Therminol
Ratlamwala and Abid et al. [78]	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Eau	Le coefficient de convection thermique est amélioré de 56% plus élevé par rapport au l'eau pure.
Basbous et al. [79]	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Syltherm 800	Diminuer les pertes de chaleur d'environ 10% et amélioration le coefficient de convection d'environ 18%.
Sokhansefat et al. [80]	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Sylterm 800	Amélioration le coefficient de convection d'environ 18%
Zadeh et al. [81]	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	huile synthétique	Amélioration le coefficient de convection d'environ 11.1%[81]

### I.5. Capteur solaire parabolique

Le Capteur solaire parabolique (figure I-20) concentre l'irradiation solaire sur un point focal, dans lequel ses sorties sont couplées à un nombre d'applications utiles. Il présente des taux de concentration plus élevés (1000-3000) en comparaison avec d'autres technologies de concentration. Il est constitué de trois composants essentiels qui sont : le récepteur, le concentrateur et le système de suivi. Le concentrateur est employé pour tirer l'irradiation solaire et la focaliser sur un point focal, il est en forme de parabole fabriqué avec un matériau réfléchissant. Le récepteur est employé pour transformer l'énergie solaire concentrée vers une source d'énergie désirée tels que l'énergie thermique ou l'énergie électrique, et finalement le système de suivi solaire qui suit la direction du soleil et permet d'améliorer l'efficacité du capteur en tirant davantage le rayonnement solaire. Actuellement dans le marché il existe deux types de systèmes de suivi : le premier est le système de suivi à axe unique et le second est le système de suivi à double axe [82][83].

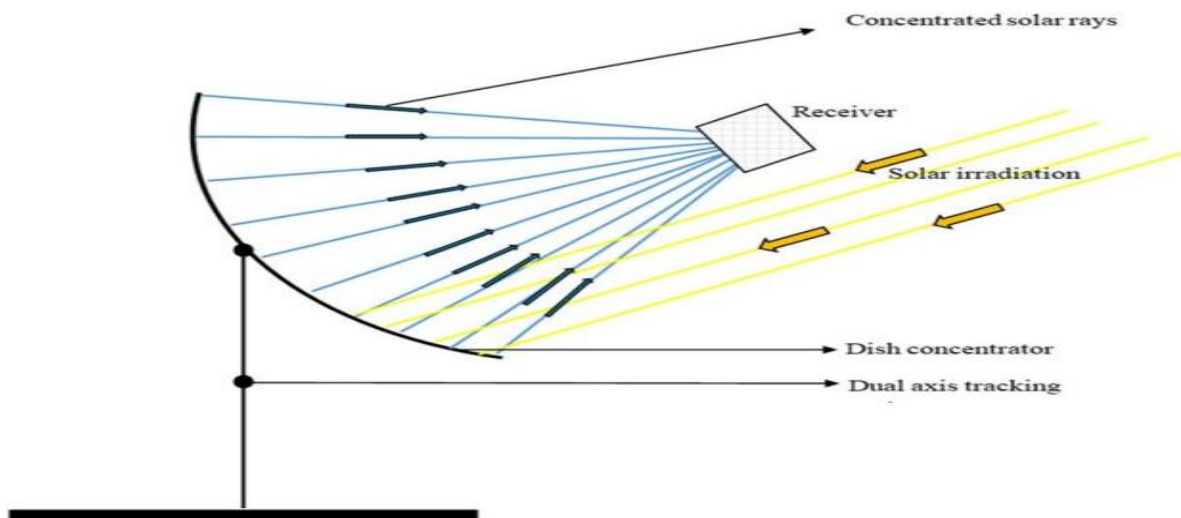


Figure I. 20:Modèle de concentrateur solaire parabolique[84].

#### I.5.1. Études numériques

Les études numériques effectuées sur la structure du capteur solaire parabolique par les scientifiques sont très vastes et énormes, **Hafez et al.** [85] ont numériquement employé le logiciel MATLAB pour simuler et modéliser les caractéristiques du moteur Stirling et pour donner des conseils théoriques sur les meilleures conceptions. Ils ont également examiné les caractéristiques qui influencent la structure de la parabole, comme la forme du réflecteur, le type du matériau du réflecteur et le diamètre du récepteur et certains autres facteurs comme la surface d'ouverture et la focale du concentrateur, l'angle de la jante, le rapport de concentration et la taille du récepteur. Ils ont constaté que la puissance de sortie du système de parabole solaire est l'un des paramètres les plus importants qui indiquent l'efficacité du système. Ils ont constaté que pour le moteur Stirling de 10 KW et lorsque la puissance de

sortie diffère de 9707, 4952 et 8597 W le pouvoir de conversion net des réflecteurs non métalliques à film polymère, réflecteurs en aluminium anodisé et un réflecteur en acier est de 97,07%, 85,97% et 49,52%, respectivement.

**Castellanos et al.** [86] ont proposé une méthode pour déterminer le système de contrôle du suivi solaire et indiquent l'angle approprié de la parabole qui permet d'augmenter le flux de chaleur dans la cavité du récepteur. Ils ont aussi développé un algorithme de dimensionnement dans le but de déterminer les paramètres Opto-géométriques qui ont un impact sur l'efficacité globale. Leurs résultats montrent que le rendement global du système est compris entre 19 %-26 % et le rendement de récepteur du système est situé entre 84 %-88 % pour une irradiation solaire située entre 150-1250 W/m<sup>2</sup> pour des concentrations solaires de 2526 et une température ambiante de 35°C, et le facteur technologique Stirling utilisé dans le modèle était  $K_s=0.5$ . Ils ont prouvé aussi que les pertes de chaleur par rayonnement augmentent considérablement lorsque le diamètre du collecteur est supérieur à 10 m.

**Pavlović et al.** [87] ont réalisé une analyse thermique et optique et la détermination de la meilleure position du récepteur afin d'améliorer la distribution du flux sur le récepteur. Ils ont observé que la température atteinte dans le récepteur dépend de la distribution du flux de chaleur sur le récepteur et le flux de chaleur maximum est constaté près de centre du serpent pour une longueur totale de l'hélice est de 9 m, ils ont calculé également le rendement énergétique en fonction de la température d'entrée de l'eau débit ont constaté que sa valeur maximale est d'environ 65%, tandis que l'efficacité énergétique varie de 4% à 15%.

**Gholamalizadeh et Chung** . [88] ont effectué une modélisation mathématique d'un système Stirling parabolique, afin de renforcer ses performances en tenant compte des facteurs de conceptions. Ils ont élaboré un modèle thermodynamique pour prévoir l'efficacité thermique du système. Ils ont également procédé à l'analyse des performances du système. Leurs résultats montrent que la puissance de sortie maximale d'un système présentant un taux de concentration amélioré de 2 499,8 était à peu près 1,66 fois plus élevée que celle du pilote original (pilote de Kerman) avec un taux de concentration de 625, cette amélioration du système entraîne une production annuelle d'énergie 3,56 fois supérieures.

**Ruelas et al.** [89] ont développé un modèle mathématique pour évaluer le facteur d'interception d'un concentrateur solaire STSC (Scheffler-Type Solar Concentrator) (figure I-21) et la faisabilité technique sur un moteur Stirling de 3 KWe en fonction du rendement optique et de la forme géométrique du concentrateur en coordonnées cartésiennes. Leurs résultats indiquent que la concentration la plus élevée a été atteinte avec un angle de bord de 45°C et le récepteur d'un concentrateur solaire de type STSC présente une amélioration de 7% par comparaison avec l'efficacité du récepteur parabolique. Ils ont aussi constaté que le nouveau modèle géométrique STSC après l'estimation du facteur d'interception peut être appliqué à la fois aux concentrateurs paraboliques et aux STSC en ajustant les limites d'intégrations correctes.

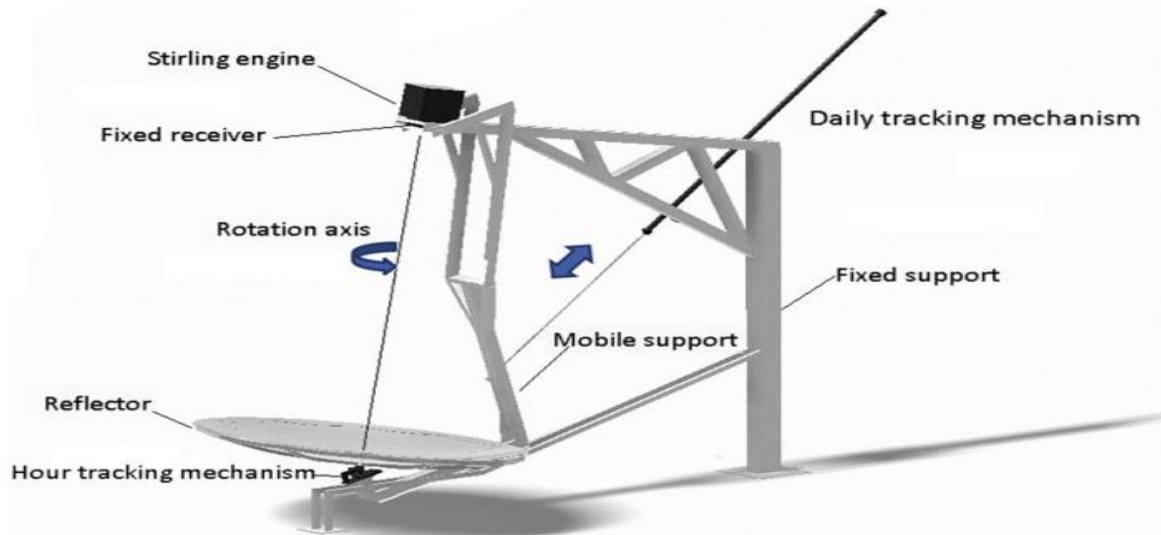


Figure I. 21:Schéma du STSC [89].

**Zanganeh et al.** [90] ont numériquement développé un modèle pour examiner deux concentrateurs solaires paraboliques avec des géométries différentes, l'un de rayon 1.5 m, une distance focale de 3 m, facteur d'interception 90%, comprenant 19 facettes de 0.275 m et un rapport de concentration solaire moyen de 1435. La deuxième parabole du rayon 10.4 m, une distance focale de 11 m, facteur d'interception 90%, comprenant 121 facettes de 0.9 m et un rapport de concentration solaire moyen de 8199. Ils ont comparé les performances de la deuxième géométrie par rapport au collecteur conventionnel, ont constaté que la conception la plus adaptée avec des jantes circulaires sur une cible de 10,4 cm de rayon, la parabole peut capter 6,6 % de rayonnement en plus et atteint une concentration moyenne supérieure à 12 % avec des facettes elliptiques par rapport aux facettes circulaires.

**Lloyd et al.** [91] ont numériquement étudié l'exergie effective utilisable par l'antenne parabolique en réalisant une analyse énergétique et d'optimisation. Dans leur analyse, ils ont tenu compte de l'irradiation solaire incidente, différents débits massiques et les différentes températures du récepteur. Ils ont conclu clairement que l'efficacité énergétique augmente avec une augmentation de la température du récepteur jusqu'à une valeur optimale, au-delà de cette valeur l'efficacité commence à diminuer.

**Beltran et al.** [92] ont suggéré une méthode graphique pour la conception d'un système de concentration à plats. Pour décrire le comportement optique, le comportement thermique qui est lié aux variables climatiques et l'étude paramétrique de la géométrie principale du PDSC, un modèle mathématique est également présenté. Le modèle utilisé dans leur étude tient compte des erreurs du facteur d'interception, du capteur solaire, du rayonnement réfléchi et émis, des pertes de chaleur par convection et par conduction. Pour la validation de leur modèle. Ils ont comparé leurs résultats par rapport aux résultats expérimentaux et théoriques publiés dans la littérature. Le calcul des pertes par rayonnement présente des erreurs allant jusqu'à 14% et l'erreur moyenne pour le reste des pertes thermiques, la température

d'absorbeur et le facteur d'interception était moins de 3%.ils ont constaté aussi que le modèle proposé peut être employé avec une certitude raisonnable pour calculer et optimiser les capteurs solaires paraboliques avec récepteurs à cavité.

**Palavras et Bakos . [93]** ont développé un concentrateur parabolique à partir d'une ancienne antenne satellite et d'un polymère film employé comme surface réfléchissante (figure I-22). Ils ont ensuite analysé les caractéristiques de performance, notamment pour la désorption de la zéolite comme application de ce concentrateur parabolique. Ils ont constaté que les évaluations de la température du fonctionnement et une valeur moyenne de coefficient global de perte de chaleur est d'environ  $163 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ . Cette valeur importante est essentiellement liée au fait que les mesures de la température qu'a été réalisée avec un absorbeur plat en aluminium au lieu d'un récepteur à cavité. Le système de concentrateur parabolique atteint des températures de plus de  $300^\circ\text{C}$  dans la région du point focal, ce qui est largement suffisant pour la régénération des zéolithes.

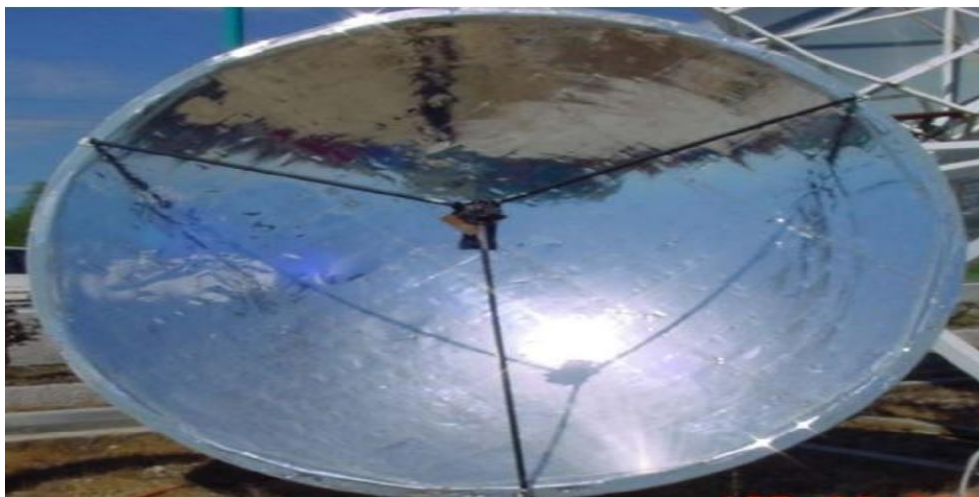


Figure I. 22: Concentrateur solaire parabolique à faible coût [93].

**Ladan et al. [94]** ont développé un capteur solaire parabolique avec profondeur et un diamètre d'ouverture de 29 cm et 1.8 m, respectivement. Ce système est utilisé pour faire cuire le riz. Le système de suivi du soleil est élaboré pour une performance effective et un système du contrôle électrique automatique est également développé. Leurs résultats préliminaires indiquent que la capacité globale du four solaire thermique est satisfaisante. Le cuiseur est capable de cuire 3,0 kg de riz en 90 à 100 minutes [94].

**Kaushika et al. [95]** ont étudié la conception et le développement d'un système de production des souches solaires moins coûteuses, c'est-à-dire un système de production de vapeur solaire à faible coût qui intègre ses innovations en matière de conception. Ils ont aussi étudié les caractéristiques de performance du système et une analyse du coût et des mesures préliminaires du champ. Ils ont utilisé un cadre en aluminium et une surface réticulaire est constituée d'un polymère pour alléger la structure de la parabole. Leurs résultats montrent une efficacité de conversion du soleil en vapeur de 70% à 80% à  $450^\circ\text{C}$  et un coût du système de capteurs de 8000 à 9000 Rs/m<sup>2</sup> avec (1US\$= 40Rs).

**Alarcon et al. [96]** ont élaboré un prototype de collecteur solaire parabolique pour les secteurs ruraux à forte disponibilité de ressources solaires en Colombie, exactement pour des régions qui n'ont pas des moyens pour accéder au service d'électricité ou des moyens budgétaires pour acheter un fourneau (électrique ou à gaz). La solution qui a été proposée et qui permet d'avoir d'électricité c'est d'installation d'un prototype solaire pour résoudre ce type du problème. Les auteurs ont réalisé une analyse théorique, la conception structurelle et la fabrication de collecteur, ils ont proposé d'installer un prototype hybride composé d'un moteur Stirling et photovoltaïque comme futur projet pour transformer l'énergie mécanique en énergie électrique.

**Azzouzi et al. [97]** ont employé l'équation de la chaleur pour élaborer un modèle et prévoir le flux de chaleur et la distribution de la température au niveau de la zone focale de collecteur solaire, ils ont partagé cette zone en six catégories ; A,B,C,D,E et F comme le montre la [figure I-23](#), ils ont noté que les résultats obtenus sont en bon accord avec celle de l'expérimentation. Ils ont constaté également que le flux moyen et la puissance disponible dans la zone focale est d'environ  $1.21 \text{ Mw/m}^2$  et  $1.64 \text{ Kw}$  respectivement, pour une irradiation solaire de  $956 \text{ W/m}^2$ .

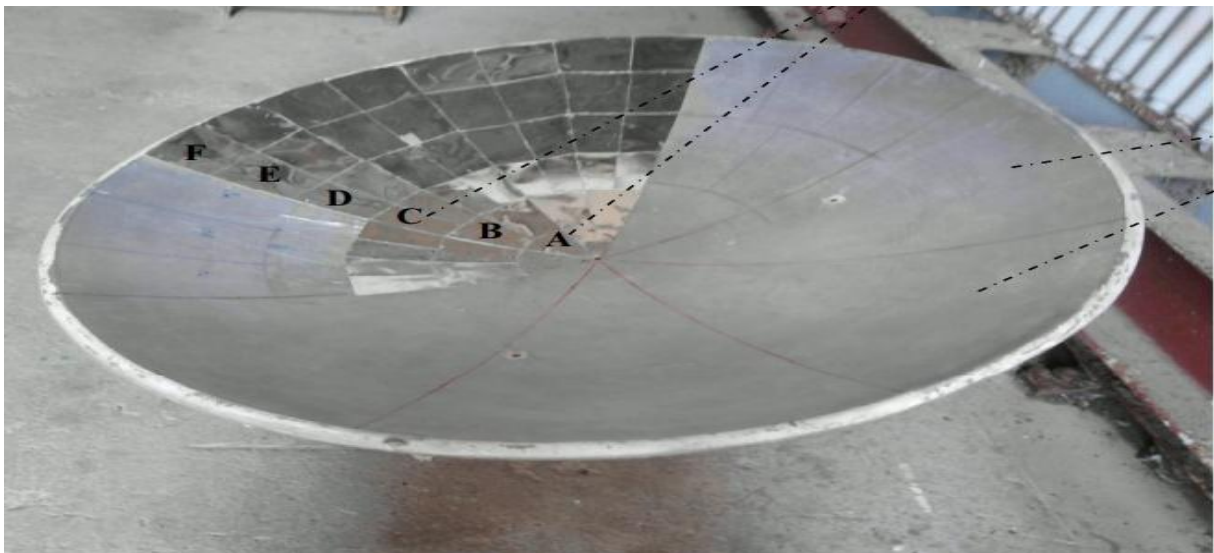


Figure I. 23:Image du concentrateur réalisé par Azzouzi et al [97].

La plus part des études numériques et expérimentales sur le concentrateur solaire parabolique sont données dans le tableau ci-dessous :

Tableau I. 3: Études numériques et expérimentales

AUTEURS	Types d'études	Système	Températures	Commentaires
<b>Palavras and Bakos . [93]</b>	Expérimentale	Concentrateur d'assiettes	plus de 300 °C	conception à faible coût
Beltran et al. [92]	Numérique	Plat/Stirling	657°C	L'erreur dans la perte de radiation est de 14% par rapport aux résultats expérimentaux.
<b>Ibrahim Ladan Mohammed. [94]</b>	Expérimentale	Collecteur/chauffe-eau	-	L'efficacité thermique d'environ 56%.
<b>Sup et al. [98]</b>	Numérique	Concentrateur d'assiettes	-	Le diamètre d'imagerie est compris entre 17 et 286 mm et le diamètre sans imagerie est compris entre 23 et 345 mm.
<b>Kaushika and Reddy. [95]</b>	Expérimentale	Générateur de vapeur solaire	450°C	Conversion énergétique de 80%.
<b>Lloyd C. Ngo et al. [91]</b>	Numérique	Antenne parabolique	$T_{\text{Sortie}} = 327^{\circ}\text{C}$	La formule de l'efficacité énergétique a été employée pour déterminer les conditions optimales de conception et de fonctionnement pour la récupération de l'énergie.
<b>Alarcón et al. [96]</b>	Expérimentale	Four solaire	161.97 °C	Ont proposé d'installer un prototype hybride composé d un moteur Stirling et photovoltaïque.
<b>Afandi et al. [99]</b>	Numérique	collecteur solaire		L'aluminium est un matériau efficace et peu coûteux approprié pour les concentrateurs.
<b>Azzouzi et al. [97]</b>	Expérimentale	collecteur solaire	$T_{\text{max}} = 1118^{\circ}\text{C}$	Les valeurs expérimentales et théoriques de la distance focale sont très proches l'une de l'autre.

### I.5.3.Intégration des Nanofluides

Pour améliorer l'efficacité thermique des concentrateurs solaires paraboliques, des nanofluides sont généralement introduits en plus comme des fluides de transfert de chaleur pour remplacer l'eau et l'huile. Les scientifiques se penchent sur ce sujet pour évaluer l'augmentation de l'efficacité thermique par des travaux expérimentaux et numériques. **Sasa Pavlovic et al. [100]** ont effectué des travaux expérimentaux en employant de l'eau et des huiles thermiques mélangées à des nanoparticules telles que le Cu, le  $\text{TiO}_2$ , le CuO et le  $\text{Al}_2\text{O}_3$  jusqu'à un taux de concentration de 5%. Les mesures des pertes de pression et des pertes thermiques sont évaluées avec une importance fondamentale. Ils ont conclu que les nanofluides à base d'huile ont une bonne performance thermique et l'utilisation des nanoparticules de Cu est la plus convenable par rapport aux cas examinés. Ils ont constaté clairement que l'efficacité énergétique du collecteur pour le nanofluide à base de Cu/ huile avec l'absorbeur offre la valeur maximale d'environ 12,29%. Par contre, ils ont observé que l'intégration des nanoparticules dans l'eau conduit à une amélioration énergétique allant jusqu'à 14%.

**Pakhare et al. [101]** ont expérimentalement examiné les performances d'un collecteur solaire parabolique de 1180 mm de diamètre et de 310 mm de profondeur comme le montre la [figure I-24](#). La performance du collecteur est analysée avec et sans nanoparticules, en employant des nanofluides dans diverses conditions de travail. Leurs résultats montrent que l'augmentation de la température dans le réservoir de stockage de l'eau était augmentée d'environ  $5^\circ\text{C}$  lorsque la nanoparticule  $\text{Al}_2\text{O}_3$  est utilisée dans la réception et l'efficacité du collecteur a été améliorée d'environ 10 % lors de l'utilisation de nanoparticules.



Figure I. 24: Schéma de l'installation expérimentale [101].

**Khan et al. [102]** ont analysé les performances énergétiques et exergetiques du collecteur solaire parabolique avec récepteur à cavité. Ils ont utilisé le nanofluide comme fluide caloporteur dans le récepteur. Trois types de nanofluides à base d'huile thermique et des

nanoparticules,  $\text{CuO}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  et  $\text{TiO}_2$  ont été examinés pour différentes conditions de fonctionnement tel que la vitesse du vent, l'intensité du rayonnement solaire, le débit et la concentration en nanoparticules, la température ambiante et la concentration des nanoparticules. Leurs résultats indiquent que le nanofluide à base d'huile  $\text{Al}_2\text{O}_3$  possède une efficacité exergetique et énergétique mieux que les autres nanofluides équivalents à 36,27% et 33,73%, respectivement, et presque 0,91 % de plus que le nanofluide à base de  $\text{CuO}$ /huile et 0,27% plus que le nanofluide à base de  $\text{TiO}_2$ /huile. Ils ont conclu également que l'augmentation du débit massique de 0,1 à 0,3 kg/sec de nanofluides à l'intérieur du récepteur entraîne une augmentation considérable des rendements globaux.

**Loni et al. [100]** ont examiné trois différents nanofluides  $\text{CuO}$ /huile,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ /huile,  $\text{SiO}_2$ /huile utilisés comme fluides de travail dans un collecteur solaire parabolique (figure I-25). Dans le but d'évaluer son efficacité pour des températures d'entrées différentes et un débit d'écoulement de fluide fixé à 60 ml/S et un diamètre intérieur de 1.9 m. Les résultats montrent une légère augmentation de l'efficacité thermique et une augmentation marginale des pertes de charge, ils ont aussi constaté que le nanofluide  $\text{Al}_2\text{O}_3$ /huile est le meilleur choix pour les applications solaires.

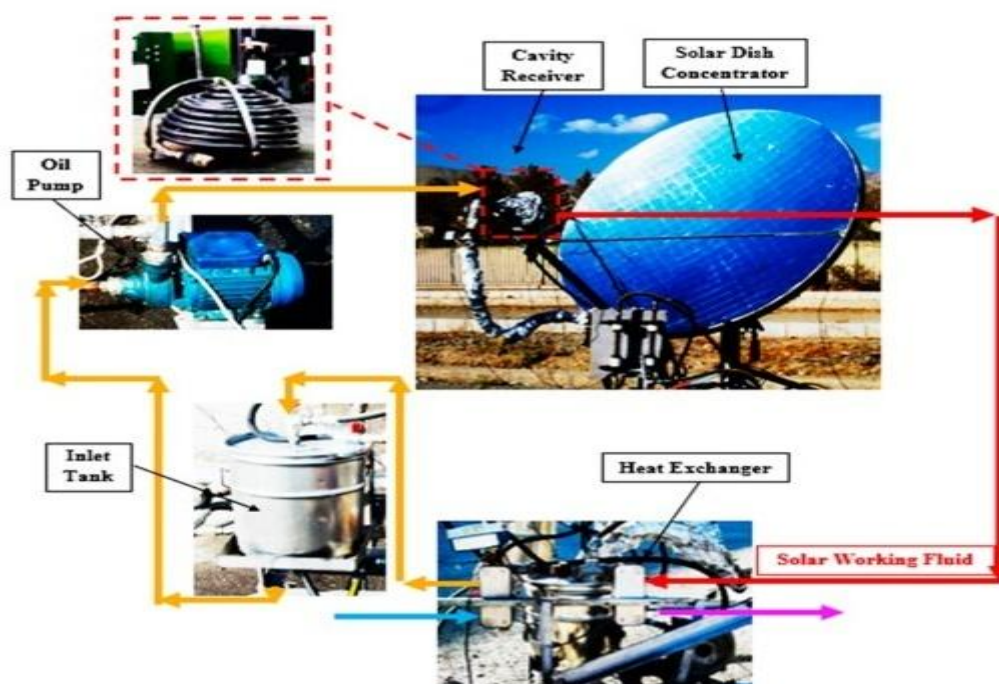


Figure I. 25: Schéma de la configuration expérimentale étudiée [100].

### I.6. Réflecteurs linéaires de Fresnel

Le réflecteur linéaire de Fresnel est l'une des technologies de concentration solaire les plus intéressantes pour les installations à moyenne et haute température. Ils sont constitués d'un ensemble de miroirs mobiles et qui concentrent collectivement les rayons solaires sur des lignes d'absorption suspendues à des tours élevées. Les segments réfléchissants sont près du sol et peuvent être assemblés de manière compacte jusqu'à 1 ha/MW. Cette technologie vise à

obtenir les performances des auges paraboliques à des coûts moindres élevés. Ils sont caractérisés par un foyer linéaire fixe où l'absorbeur est statique [103].

L'efficacité optique du réflecteur linéaire de Fresnel est plus faible que celle des cylindroparaboliques en raison de l'impact important de l'angle d'incidence. Par conséquent, la température de fonctionnement du fluide de travail est habituellement plus basse, généralement entre 150 et 350°C. Pour cette raison la technologie de Fresnel linéaire a été appliquée juste pour générer de la vapeur saturée via la génération directe de vapeur dans le tube [104].

### I.6.1.Études numériques

Beaucoup de miroirs se déplaçant de manière autonome dans un champ de collecteur de Fresnel linéaire, les miroirs voisins peuvent subir une interaction optique, ce qui diminue la quantité de rayonnement qui atteint l'ouverture du récepteur. **Zhu et al.** et **Kalogirou et al.** [105][106] ont indiqué l'angle du soleil incident, tel que déterminé par rapport aux directions cardinales. Les angles d'azimut et de zénith sont déterminés par la projection de l'angle du soleil dans le plan horizontal par référence au sud et par la projection de l'angle du soleil dans le plan Est-Ouest par référence à l'axe vertical. Autrement, l'angle du soleil peut se définir en fonction de ses projections dans le plan transversal et longitudinal, comme il est indiqué dans la figure I-26. Ils ont constaté que lorsque l'axe longitudinal d'un collecteur de Fresnel linéaire est aligné dans la direction nord-sud la performance optique globale augmente.

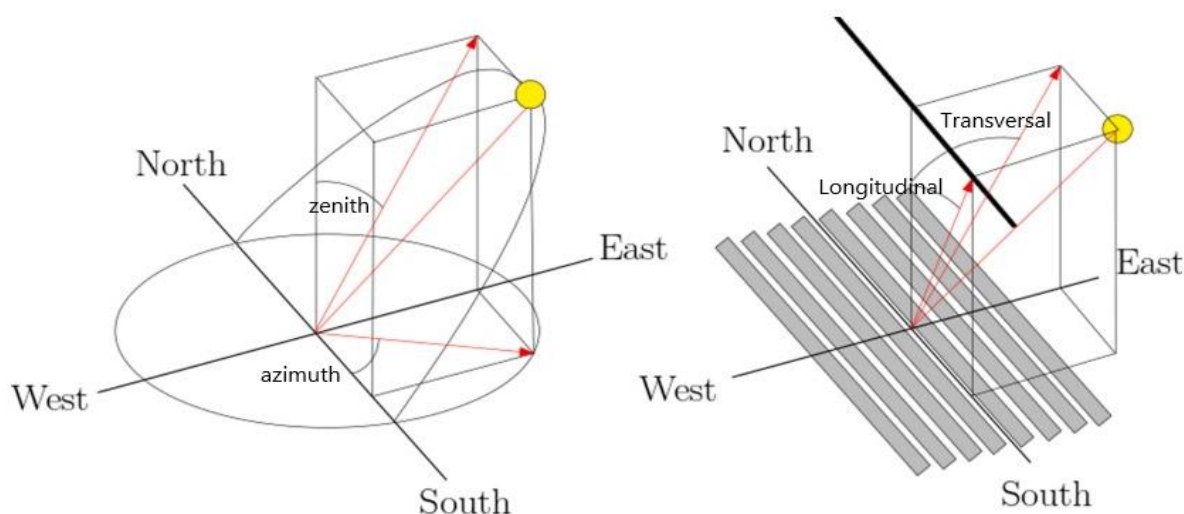


Figure I.26: Angle du soleil pour un champ solaire [106][105].

**Joseph Zeaiter et al.** [107] ont couplé le réflecteur solaire thermique avec la pyrolyse s'appelle aussi thermolyse qui est un phénomène thermochimique employé pour transformer différents types de déchets solides. Généralement, la source de chaleur pour la pyrolyse basée sur les combustibles fossiles (le gaz naturel et le charbon). Les auteurs ont pensé à utiliser une autre technique indépendante du combustible fossile comme la technologie CSP, ils ont examiné la pyrolyse des pneus. Leurs résultats montrent que l'énergie solaire capable de fournir 47.5 % de l'énergie nécessaire à la production des pneus. Ils ont constaté aussi que

l'économie de l'usine de pyrolyse a été plus élevée et plus faible en août et décembre de 20.26% et 8.86% respectivement comme le montre la [figure I-27](#).

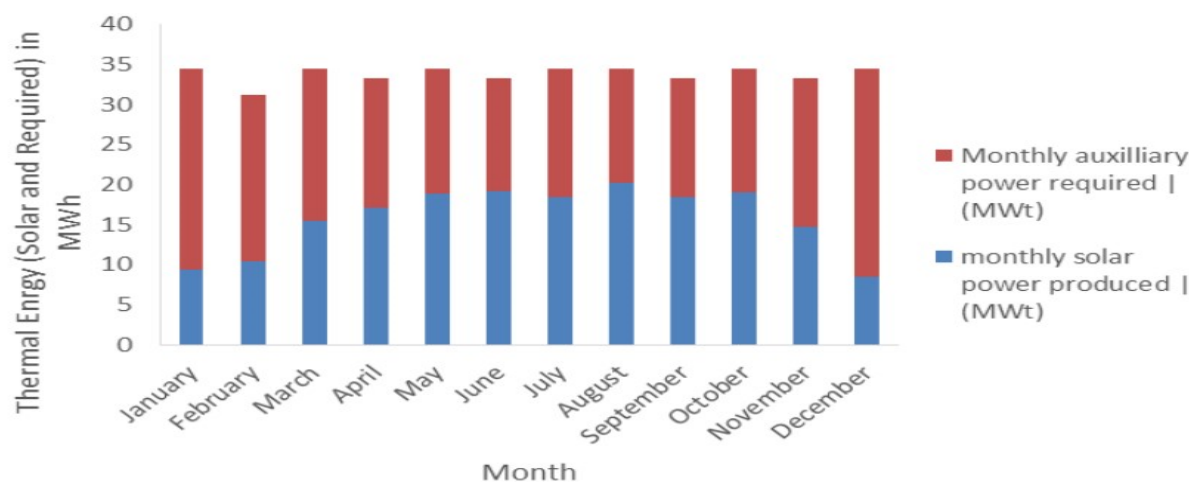


Figure I.27: L'énergie solaire et l'énergie auxiliaire utilisées pour faire fonctionner le processus de pyrolyse [107].

La même technique employée par **Sanchez et al.** [108] qui ont utilisé l'énergie solaire pour la production de biocarburants par pyrolyse, ils ont présenté un modèle pour définir les paramètres idéaux et estimer la performance annuelle d'un système de pyrolyse solaire qui présente une ouverture totale de 4,55 m<sup>2</sup> et une inclinaison de 39°. Ils ont trouvé que 1375 kg de biochar peut être produit à partir de 13,9 tonnes de biomasse sur une base annuelle.

### I.6.3. Intégration des nanofluides

**Zafar et al.** [109] ont utilisé des nanofluides comme fluide de travail dans un prototype de réflecteur linéaire de Fresnel, les nanoparticules utilisées sont de l'oxyde de cobalt et de l'oxyde de Graphène avec des concentrations en poids de 0.05%, 0.10% et 0.20% et la température varie de 20°C à 60°C. Ils ont constaté que le transfert de chaleur, le nombre de Nusselt et la conductivité thermique moyenne ont été améliorées pour une concentration des nanofluides égales à 0.2% en poids de 309.67%, 254.75% et 19.31%, respectivement. Ils ont constaté aussi que la consommation électrique a été diminuée de 19.90 à 20.30%.

**Mokhtar et al.** [110] ont estimé l'impact des nanofluides sur le comportement thermique de la technologie du réflecteur solaire linéaire de Fresnel, ils ont examiné expérimentalement les propriétés thermophysiques des nanofluides. Le nanofluide utilisé dans leur étude composé de nanotubes de carbones multi-parois avec différentes concentrations dispersées dans l'eau distillée dans un intervalle de température allant de 25°C à 70°C. Leurs résultats montrent que pour une fraction volumique de nanoparticules de 0.05%, 0.1% et 0.3% la conductivité est améliorée de 3,6 et 7% respectivement. À l'aide du code MATLAB, ils ont développé une méthode pour calculer le bilan énergétique au niveau du capteur solaire. Les auteurs ont constaté que pour une fraction volumique de 0.3% l'efficacité thermique possède la valeur la plus élevée de 33.81% [figure I-28](#).

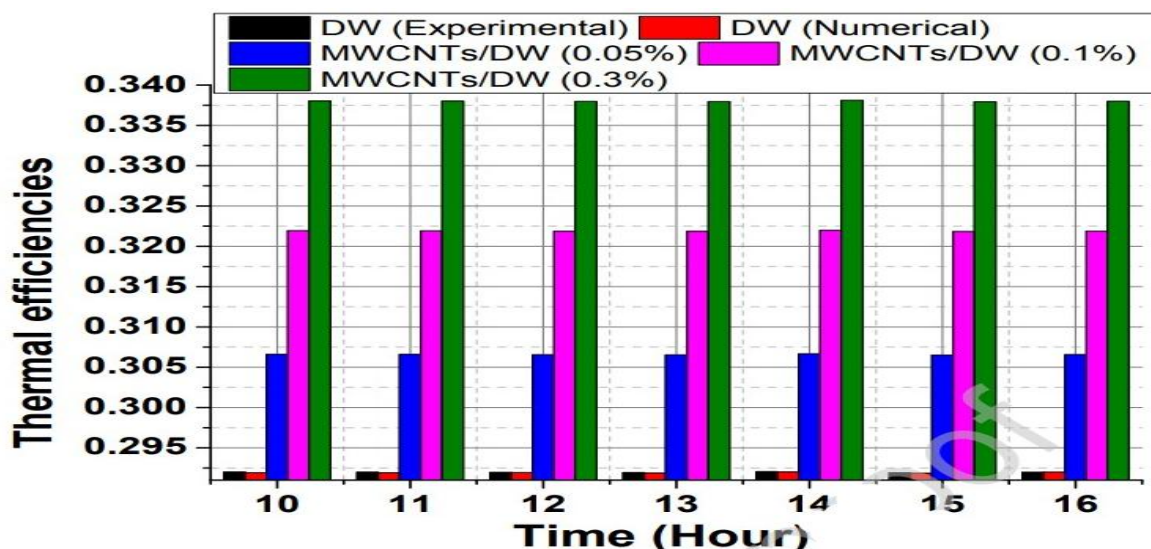


Figure I. 28: Efficacité thermique [110].

Evangelos et al. [111] ont utilisé le nanofluide CuO/Syltherm 800 comme fluide caloporteur dans un réflecteur solaire linéaire de Fresnel dans le but d'examiner sa performance thermique, la concentration des nanoparticule de CuO égale à 6% , le rapport de concentration est de 58.36. Le collecteur dispose d'une surface d'ouverture nette de 154 m<sup>2</sup>. Ils ont comparé leurs résultats obtenu à base des nanofluides par rapport à Syltherm 800 pur et ils ont conclu que le fonctionnement de réflecteur solaire linéaire de Fresnel avec nanofluide est jugé bénéfique, ils ont constaté également que pour une température d'entrée égale à 350 K et 650 K l'amélioration de l'efficacité thermique et l'augmentation du travail est de 0,22% , 32% et 0,78%, 49%, respectivement comme le montre la figure I-29.

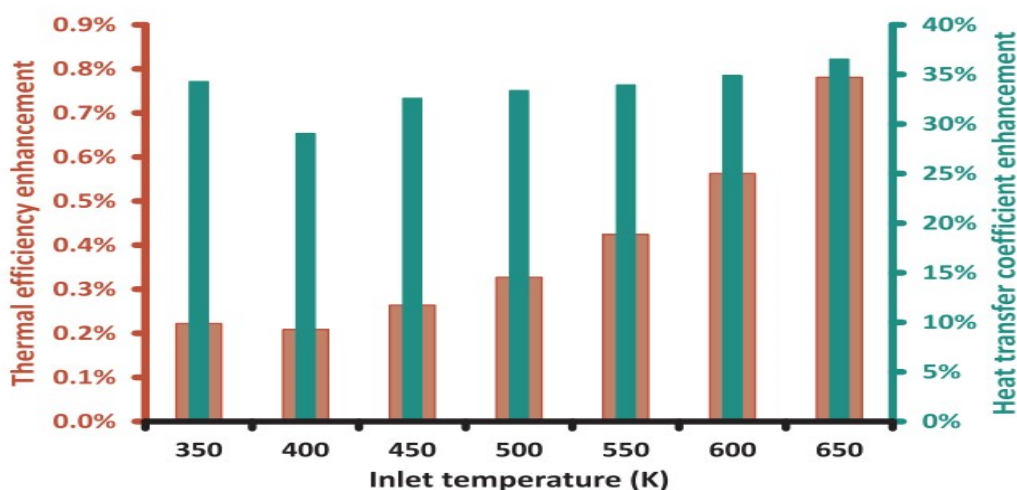


Figure I.29: Effet des nanofluides sur l'efficacité thermique et du coefficient de transfert de chaleur. [111]

Dans un autre travail les même auteurs ont utilisé le nanofluide et les ailettes internes dans un réflecteur linéaire de Fresnel, le nanofluide utilisé est de (CuO/ Syltherm 800) avec des concentrations volumiques de 2% ,4% et 6%. Ils ont constaté que l'efficacité thermique est améliorée de 1%, il a prouvé que l'utilisation des ailettes offre une efficacité mieux que l'utilisation des nanofluides. Ils ont aussi constaté que la concentration optimale des

nanoparticules est de 4% et au-delà de cette concentration l'efficacité thermique ne s'améliore pas d'une manière significative [112].

L'utilisation du réflecteur linéaire de Fresnel pour la génération de l'électricité a été réalisée dans pas mal pays de monde. Le [tableau I-4](#) résume la plupart des centrales solaires à concentration (CSP) qui ont été installée ou au cour de la réalisation.[113][114]

Tableau I. 4: Centrales solaires à miroir de Fresnel [113][114]

Pays	Nom	Puissance (MWel)	Fluide de travail
Inde	Dhursar	125	Eau/vapeur
Chine	Zhangjiakou	50	Eau/vapeur
Chine	Zhangbei	50	Eau/vapeur
Chine	Urat	50	Huile thermique
Chine	Dacheng Dunhuang	50	Sel fondu
Espagne	Puerto Errado 2	30	Eau
Inde	Dadri ISCC Plant	14	Eau/vapeur
France	Alba Nova 1	12	Eau/vapeur
France	eLLO	9	Eau
USA	Kimberlina	5	Eau
Australia	Liddel	3	Eau/vapeur
Chine	Huaneng	1.5	Eau/vapeur
Espagne	Puerto Errado 1	1.4	Eau
Italy	Rende	1	Huile diathermique
Maroc	IRESEN	1	Eau
Maroc	eCare	1	Eau
Espagne	FRESEMO	0.8	Eau/vapeur
France	Augustin Fresnel 1	0.25	Eau/vapeur

### I.7.Centrales solaires thermodynamiques à tour

Dans cette partie, un résumé sera présenté sur l'état de l'art et sur les principaux sous-systèmes qui composent la tour solaire. On a reparti les travaux en trois catégories numériques, expérimentales et à bas des nanofluides.

#### I.7.1.Études numériques

**Maolong et al.** [115] ont étudié numériquement l'effet du facteur d'ombrage et du blocage sur l'efficacité de la centrale solaire à tour. Ils ont développé un modèle de prédiction et ils ont optimisé chaque paramètre du champ de l'héliostat, une comparaison a été réalisée dans leur simulation entre un dispositif en spirale biomimétique et un dispositif radial en quinconce. Ils ont constaté que dans le champ nord, la disposition en spirale était plus performante, alors que dans les champs sud, elle se comportait moins bien en conséquence de l'effet cosinus, ils ont constaté que la précision du modèle de prédiction de la méthode du cartographie plate est plus supérieure que le modèle de la sphère.

**Francesco et al.** [116] ont réalisé une étude technico-économique de plusieurs tours pour un fonctionnement de longue durée. Ils ont utilisé les particules d olivines (minérale) comme fluide de travail et de stockage, ses caractéristiques thermophysiques sont appropriées pour un

usage à haute température. Ils ont constaté que les meilleures configurations pour les sept tours solaires est d'avoir une capacité du stockage de 2.5 GWh pour la nuit et 2 GWh pour huit tours solaires et le multiple solaire entre 1,1 et 1,25.

**Alsagri et al.** [117] ont effectué une étude thermodynamique et économique d'une centrale solaire à tour et ils ont examiné le mécanisme du stockage de l'énergie thermique avec 4, 8, 12 et 16 heures du stockage pour améliorer la capacité de production d'énergie annuelle. Leurs résultats indiquent que l'intégration de 12 heures du stockage thermique a un fort impact qui est positif sur le facteur de capacité. Ils ont conclu également que les améliorations importantes du cycle pourraient être focalisées sur les échangeurs de chaleur, en tenant compte notamment au réchauffeur primaire et au récupérateur à faible température.

**Imane Khamlich et al.** [118] à l'aide du logiciel SAM ont mené une étude technico-économique d'une centrale de 100 MWe ayant une capacité de stockage de 8h. Ils ont évalué la centrale pour différents scénarios tels que le stockage de chaleur thermocline à un seul réservoir, le stockage direct de chaleur sensible à deux réservoirs, le stockage de chaleur latente, le stockage indirect de chaleur sensible à deux réservoirs, le stockage de chaleur thermochimique et le stockage de chaleur à deux réservoirs. Ils ont constaté qu'un système direct à deux réservoirs a une meilleure rentabilité, puisque il ne possède pas d'échangeurs de chaleur supplémentaires.

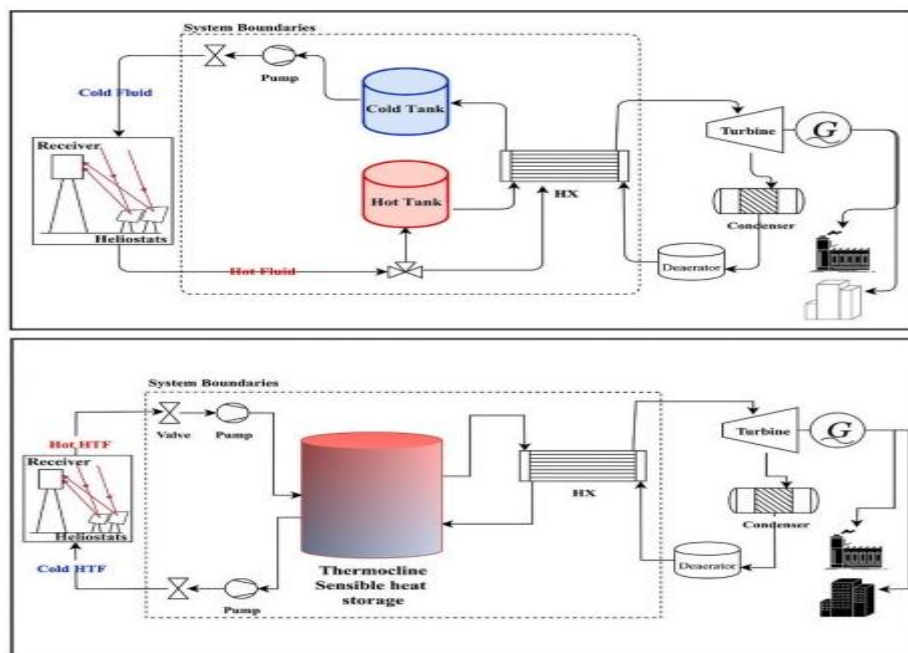


Figure I. 30: Modèle de stockage direct à deux réservoirs et Modèle de stockage thermocline à réservoir unique [118].

**Jinli Chen et al.** [119] ont étudié l'effet de la capacité thermique du récepteur et la variation de DNI et les pertes de pression sur les performances et le rendement d'une centrale solaire composée d'un récepteur et d'un champ héliostatique. Ils ont constaté que la température de sortie peut augmenter jusqu'à 882° C avec une puissance de 132 kW et une perte de pression

de 7.10 kPa, ils ont observé aussi que lorsque le DNI est de  $750 \text{ W/m}^2$ , la densité maximale de flux est de  $388 \text{ kW/m}^2$  qui est réfléchi par 52 miroirs.

**Xiaoxiao et al.** [120] ont constaté que la tour de refroidissement sec à tirage naturel est un élément prometteur et judicieux. Ils ont examiné une tour de 20 m de la hauteur dans une température ambiante de  $20^\circ\text{C}$  et  $50^\circ\text{C}$  et leur effet sur le cycle de Brayton [figure I-31](#). Ils ont conclu que les performances de la centrale baissent de 21% quand la température ambiante passe de 0 à  $50^\circ\text{C}$  et une différence importante entre le cycle de Rankine à vapeur et le cycle de Brayton en termes d'influence de la température ambiante sur la production d'énergie. Leurs résultats expérimentaux et la conception élaborée ont donné lieu une bonne cohérence.

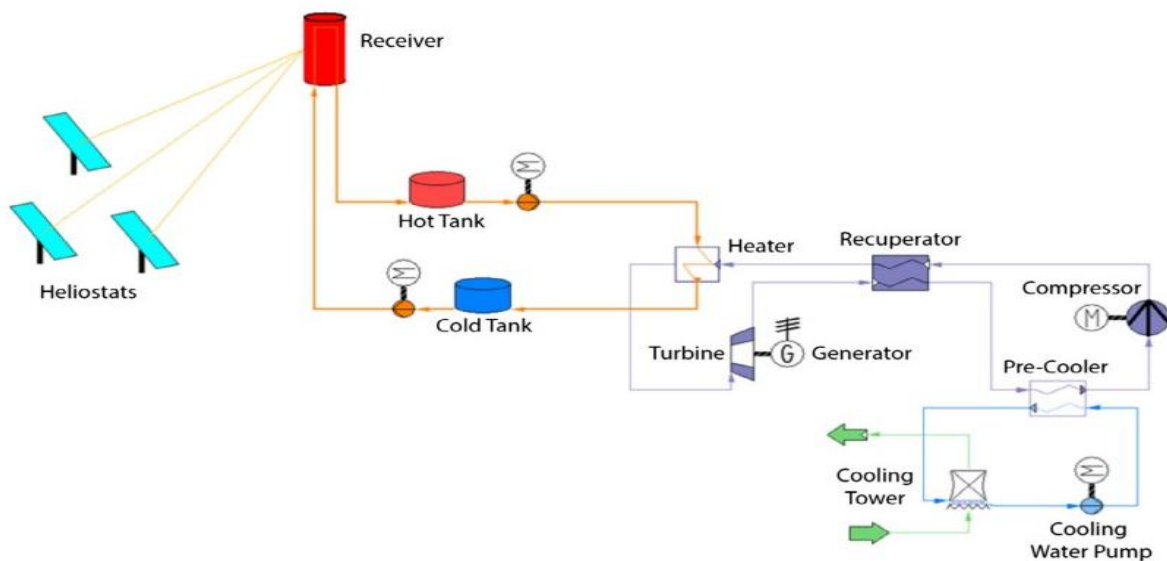


Figure I.31: Cycle de Brayton récupéré indirectement par la tour de refroidissement de Gattou. [120]

**Pramod et al.** [121] ont étudié l'effet des paramètres géométriques et du rayonnement solaire sur la performance d'une centrale solaire à tour. Ils ont conclu que les rayons solaires qui traversent le verre ordinaire en tant que matériau du toit du collecteur a une meilleure absorption que d'autres matériaux et à l'utiliser comme toit collecteur par rapport à d'autres feuilles polycarbonates, acryliques et cristallines. Ils ont conclu aussi que une augmentation de 38.46% de la puissance de la centrale solaire avec l'augmentation de la hauteur de la cheminée de la tour d'ascension solaire de 3,6 m à 4,8 m.

**Ming-Hua et al.** [122] ont examiné expérimentalement une cheminée solaire hybride à petite échelle fabriquée et conçu dans un laboratoire, leurs résultats montrent que le système hybride réduit le débit volumétrique de 14% seulement par rapport au système de cheminée solaire simple. Ils ont constaté que la puissance de sortie totale croît avec l'augmentation de la surface des panneaux. La puissance totale délivrée par le système hybride augmente environ 103 fois, 91 fois et 57 fois pour  $L = 113 \text{ m}$ ,  $L = 80 \text{ m}$  et  $L = 40 \text{ m}$ , respectivement. **Xinping et al.** [123] ont publié un travail sur les études expérimentales réalisées et des modélisations numérique de la technologie de la centrale solaire à tour. Ils ont discuté des conditions de la production d'énergie et l'effet environnemental, ils ont constaté que la production d'électricité par la Tour solaire à courant ascendant montre une faisabilité technique et une technologie fiable et

simple qui peut opérer jour et nuit et ne demande pas d'eau de refroidissement supplémentaires ni de combustibles fossiles. **Mekhail et al.** [124] ont mené une étude expérimentale et numérique sur une cheminée solaire de 6 m de l'hauteur et 0.15 m de diamètre. Ils ont prouvé un bon accord entre le travail expérimental et le travail numérique comme le montre la figure I-32.

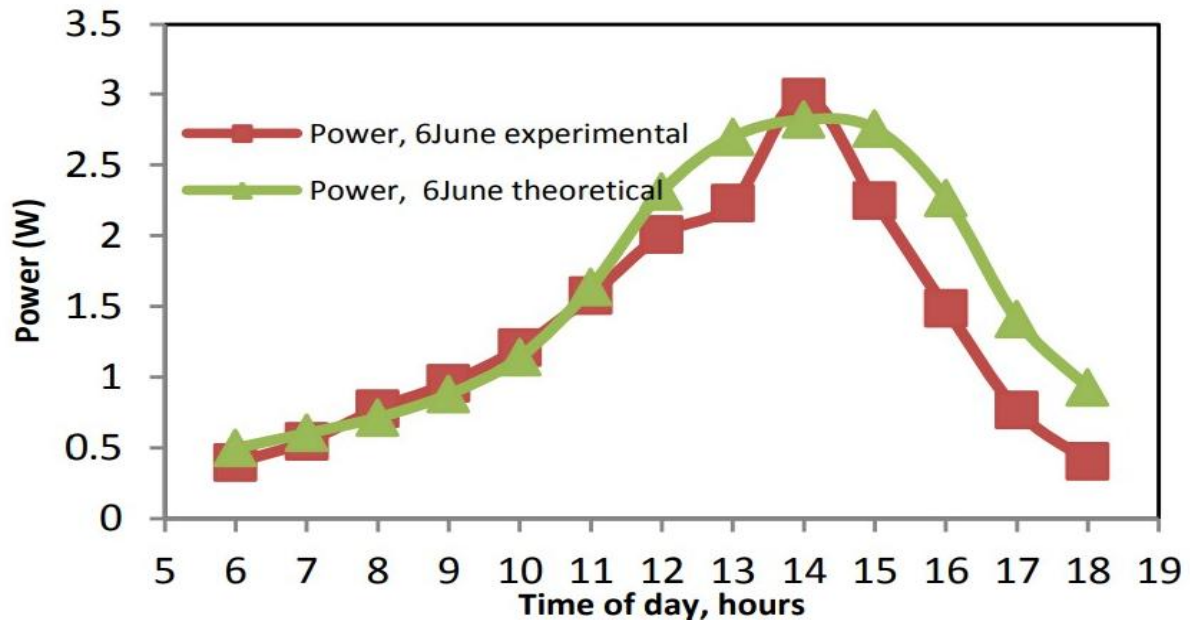


Figure I.32: Comparaison entre la puissance disponible théorique et expérimentale de la turbine [124].

### I.7.3. Intégration des nanofluides

**Elias et al.** [125] ont étudié la performance thermique d'une petite centrale solaire à tour (figure I-33) avec quatre boucles un circuit eau-vapeur, un circuit à base des nanofluides, un circuit de gaz de combustion et un circuit des sels fondus. Ils ont modélisé le système sur la base d'analyser le transfert thermique transitoire, la puissance horaire de sortie, l'efficacité thermique du cycle de vapeur et la température du fluide de travail. Ils ont constaté que l'utilisation de nanofluides dans le condenseur peut améliorer le transfert de chaleur et augmente l'efficacité du cycle. Ils ont conclu que l'ajoute de 2% de nanoparticules augmente les performances de l'échangeur de chaleur de 12%. **Abu-hamdeh et al.** [126] ont examiné deux types des nanofluides GO/DW et GO-SiO<sub>2</sub>/Dw pour l'utiliser comme fluide réfrigérant. Ils ont déterminé aussi le rayonnement horaire réfléchi à partir des données DNI. Ils ont conclu que l'utilisation des nanofluides hybride prouvent avoir un meilleur coût et efficacité.

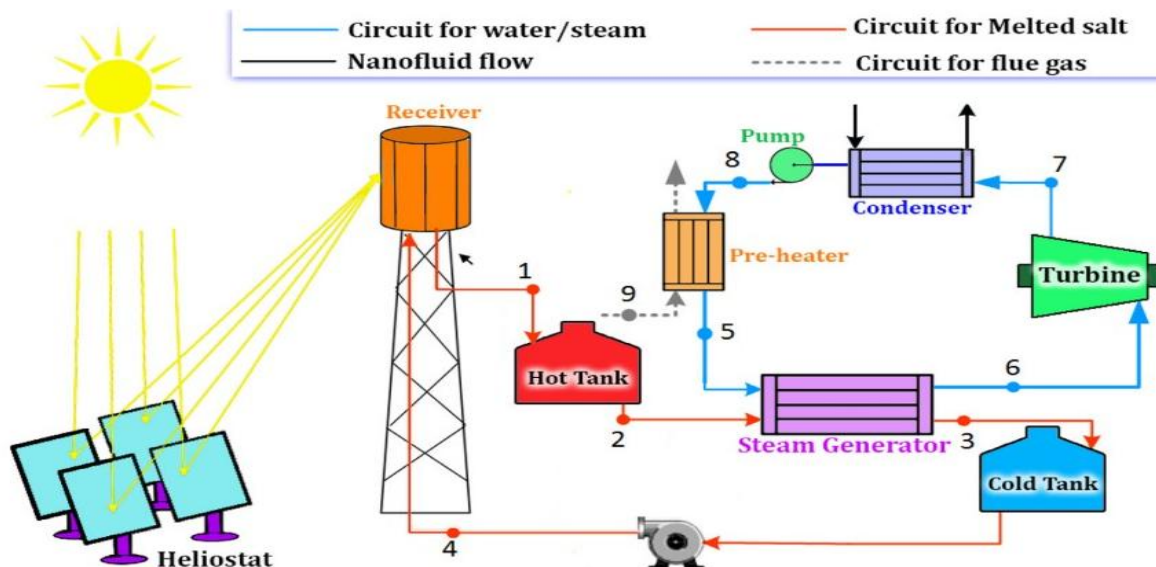


Figure I.33: Schéma du système de la tour solaire [125]

Taylor et al. [127] ont examiné les applications des nanofluides dans un collecteur solaire à fort et à haut flux tel que les tours solaires d'une capacité de 10-100 MW. Ils ont employé des nanofluides de graphite avec des concentrations volumiques de l'ordre de 0,001 %. Leurs résultats indiquent qu'une hausse du rendement de l'ordre de 5 à 10 % est envisageable. Ils ont observé que certaines températures de fonctionnement et la forme de nanoparticules sont des facteurs déterminants et nécessaires.

Au niveau du sommet de la tour, le rayonnement solaire focalisé atteint le récepteur solaire qui peut être externe ou avoir une ouverture de cavité. Les récepteurs externes conviennent à la fois pour les champs environnants s'ils ont une forme cylindrique ou pour les champs polaires s'ils sont constitués d'une cavité. Par conséquent, le champ de l'héliostat dépend du type de récepteur et vice-versa [128].

Le tableau ci-dessous représente la plupart des centrales à tour classées par leurs puissances.

Tableau I. 5: Listes des centrales solaires à tour dans le monde [129][130].

Pays	Nom	Fluide de travail	Puissances (MW)
Chili	Tamarugal	Sel fondu	450
Chili	Likana	Sel fondu	390
USA	ISEGS	Eau	377
Chili	Copiapó	Sel fondu	260
Chine	Golmud	Sel fondu	200
Chine	Delingha	Sel fondu	135
Australie	Aurora	Sel fondu	135
Maroc	NOOR III	Sel fondu	134
Israël	Ashalim Plot B (Megalim)	Eau	121
Chili	Atacama-I	Sel fondu	110
USA	Crescent Dunes	Sel fondu	110

	(Tonopah)		
UAE	DEWA	Sel fondu	100
Chine	Golden Tower	Sel fondu	100
Chine	SunCan Dunhuang I	Sel fondu	100
Chine	Yumen I	Sel fondu	100
Grèce	MINOS	-	52
Chine	Supcon	Sel fondu	50
Chine	DSG	Eau	50
Chine	Qinghai Gonghe	Sel fondu	50
Chine	Hami	Sel fondu	50
Chine	Yumen II	Sel fondu	50
Afrique du Sud	Khi Solar One	Eau	50
Espagne	Planta Solar 20 (PS20)	Eau	20
Espagne	Gemasolar	Sel fondu	19
Espagne	Planta Solar 10	Eau	11
Australie	Lake Cargelligo	Eau	3
Allemagne	Jülich Solar Tower	Air	1.5
Australie	Emalong	Liquide de Sodium	1.1
Turquie	Greenway	Sel fondu	1

### ➤ **Avantages des nanofluides** [19][131]

- Ils améliorent la conductivité thermique et du coefficient de transfert de chaleur ;
- Ils augmentent le transfert de chaleur entre le récepteur et le fluide ;
- Ils diminuent la température du matériau donc protégé l'absorbeur ;
- Ils améliorent de la capacité de rendement thermique du système PV ;
- Ils permettent au fluide de transporter de grandes quantités d'énergie en augmentant la masse volumique.

### ➤ **Inconvénients et défis des nanofluides**[132]

C'est clair que les nanofluides améliorent les processus de transfert de chaleur, mais cette technique à des contraintes et des inconvénients, par exemple :

- L'utilisation d'une grande quantité de nanoparticules peut provoquer la sédimentation ;
- Les pertes de charge et l'augmentation du travail de la pompe ;
- Leur production et leur fabrication un peu complexe ;
- Les problèmes liés aux bouchons surtout dans les coudes des conduites ;
- Le coût de la préparation qui est un peu élevé ;
- Érosion qui est lié au matériau du tuyau et les contacts avec les nanoparticules .

### I.8. Conclusion

La centrale solaire PTC est une technologie de concentration intéressante et prometteuse qui offre des avantages considérables à savoir le faible coût d'investissement, des charges de vent réduites et un facteur d'utilisation du sol relativement faible.

La plupart des recherches et des travaux sur les centrales solaires à concentration sont réalisées dans une plage de températures moins élevées. Elles sont consacrées uniquement à une partie précise, c'est-à-dire des études consacrées à évaluer le collecteur unique, le stockage ou sur le champ solaire seul. On conclut que dans la littérature, il y a peu d'études et de travaux qui englobent et examinent toute la centrale solaire et ses performances.

L'efficacité d'un système énergétique quelconque réside dans l'amélioration de ses propriétés physiques et thermiques dans les températures opérationnelles. Les propriétés thermophysiques d'un fluide caloporteur doivent être pris en considération, car leurs améliorations mènent à l'amélioration de tout le système. Nous avons conclu que les sels fondus et les huiles minérales sont employés comme fluides caloporteurs dans les centrales solaires à concentration.

Cette recherche bibliographique nous amène à tirer les conclusions suivantes :

- Aucune centrale solaire à base de nanofluides n'a été construite, il s'agit que des études numériques qui sont consacrées uniquement à l'étude des performances du concentrateur solaire à base de nanofluides.
- L'effet de la température et de la concentration des nanoparticules sur les propriétés thermophysiques ne sont pas étudiés d'une manière approfondie.
- La plupart des études ont été engagées uniquement sur une partie précise de la centrale solaire, donc, l'étude du comportement et du rendement de la centrale solaire globale est un défi qui doit être pris en considération.
- Le comportement et le rendement de la centrale solaire à concentration à base des nanofluides sur le territoire Algérien n'est pas généralement examiné.
- La plupart des centrales solaires étudiées sont à base du sel fondu. Par contre, les huiles et les nanofluides sont moins examinés.
- Il n'y a eu quasiment aucune étude sur des propriétés thermiques du fluide caloporteur à base de nanoparticules (mono-hybrides).
- L'analyse des performances de la centrale solaire à concentration à base de nanofluides et l'optimisation de ses paramètres n'ont pas été largement évaluées.

---

## **Chapitre II : Équations de base et procédure numérique**

---

### II.1. Introduction

Les fluides sont utilisés comme un moyen de transfert et de transport d'énergie dans les systèmes industriels et dans les capteurs solaires thermiques. Généralement, les liquides utilisés sont les huiles de silicone et l'eau. L'ajout de nanoparticules à ces fluides (nanofluides à différentes concentrations de nanoparticules) améliorent leurs propriétés thermiques et optiques. Les nanoparticules jouent un rôle très important dans la conversion énergétique. Le comportement des nanofluides dans un milieu fermé ou ouvert est gouverné par des équations de base. L'amélioration des propriétés thermophysiques du fluide de travail sont devenues aujourd'hui un engagement et un défi prometteur et essentiel pour améliorer les performances des échangeurs thermiques. Dans ce chapitre, nous dressons une brève description sur les méthodes et les équations disponibles dans la littérature qui offrent une idée générale sur les modèles principaux qui sont consacrés à l'étude de l'effet de plusieurs paramètres sur les propriétés thermophysiques des nanofluides. Nous présentons aussi les équations de transfert de chaleur et de la thermodynamique destinées au calcul de l'efficacité d'un système énergétique.

### II.2. Modélisation mathématique

Généralement, les nanofluides sont des fluides à deux phases, ils sont considérés comme des milieux homogènes. Ils présentent aussi quelques caractéristiques communes avec les mélanges (liquide- solide). Plusieurs phénomènes sont pris en considération et qui présentent un inconvénient dans les nanofluides telles que la sédimentation causée par les nanoparticules et la diffusion Brownienne (en particulier pour des particules de taille plus petite ou pour les températures élevées). Les particules sont ultrafines de taille nanométrique et la vitesse de glissement ne peut pas être nulle entre les nanoparticules et le fluide de base. Par contre, des mouvements aléatoires et irréguliers des particules augmentent les propriétés thermophysiques et le taux d'échange d'énergie dans le fluide. La viscosité dynamique et la conductivité thermique sont les deux propriétés thermophysiques des nanofluides les plus étudiées et examinées. Beaucoup de modèles sont développés pour le calcul de ces deux grandeurs. En revanche, la masse volumique, la viscosité dynamique et la chaleur spécifique des nanofluides ont suscité peu d'intérêt, notamment sur le plan expérimental et numérique.

#### II.2.1. Modélisation mathématique des propriétés thermophysiques des nanofluides

- Masse volumique

La masse volumique d'une substance ( $\rho$ ), correspond généralement au rapport entre la masse de la substance et son volume. Cette propriété joue un rôle important dans les caractéristiques thermo-hydrauliques d'un écoulement [133]. La masse volumique du nanofluide a été donnée par loi qui est en fonction de la fraction volumique des particules solides, la masse volumique du fluide de base et la masse volumique des nanoparticules. La loi de la masse volumique effective d'un nanofluide est souvent estimée par le principe de la règle du mélange en supposant que le nanofluide est un milieu homogène. Le modèle

conventionnel utilisé pour prédire la masse volumique est celui de Pak et Cho 1998 [134] suivant :

$$\rho_{nf} = \phi \rho_{np} + (1 - \phi) \rho_{fb} \quad [\text{kg/m}^3] \quad (\text{II. 1})$$

où  $\rho_{nf}$  et  $\rho_{np}$  sont respectivement la masse volumique du nanofluide et la masse volumique des nanoparticules.

La fraction volumique ( $\phi$ ) des nanoparticules est calculée comme suit :

$$\phi = \frac{V_{np}}{V_{np} + V_{fb}} \quad [\%] \quad (\text{II. 2})$$

Et  $\rho_{fb}$  est la masse volumique du fluide de base qui est dépendante de plusieurs paramètres tels que la température et le type du fluide.

La masse volumique du fluide de base du Dowtherm A ( $\rho_{fbd}$ ) est définie comme suit [135]:

$$\rho_{fbd} = 1190 - 0.2243 * (T) - 7.866 * 10^{-4} * T^2 \quad (\text{II. 3})$$

La masse volumique du fluide de base du Therminol VP-1 ( $\rho_{fbt}$ ) est déterminé comme suit [136] :

$$\rho_{fbt} = 1.4386 * 10^3 - 1.8711T + 2.737 * 10^{-3} * T^2 - 2.3793 * 10^{-6} * T^3 \quad (\text{II. 4})$$

La masse volumique du fluide de base de Syltherm 800 ( $\rho_{fbs}$ ) est définie comme suit [137] :

$$\rho_{fbs} = 1.2691 * 10^3 - 1.52115 * T + 1.79133 * 10^{-3} * T^2 - 1.67145 * 10^{-6} * T^3 \quad (\text{II. 5})$$

La formule de la masse volumique des nanofluides de mélange ternaire (figure II. 1) peut être calculée à l'aide du modèle proposé par Heyhat et al. [138] comme suit :

$$\rho_{nf} = \phi_p \rho_{np} + \phi_f \rho_{fb_1} + (1 - \phi_f - \phi_p) \rho_{fb_2} \quad (\text{II. 6})$$

où  $\phi_p$  et  $\phi_f$  sont donné respectivement par les formules (II. 6a) et (II. 6b) :

$$\phi_p = V_{fb_2} + V_{fb_1} \left( 1 - \frac{\rho_{fb_1}}{\rho_{fb_2}} \right) \quad [\%] \quad (\text{II. 6a})$$

$$\phi_f = \frac{V_{fb_1}}{V_p} + V_{fb_2} + V_{fb_1} \left( 1 - \frac{\rho_{fb_1}}{\rho_{fb_2}} \right) \quad [\%] \quad (\text{II. 6b})$$

Où  $V_{fb_1}$  et  $V_{fb_2}$  représentent le volume de deux fluides 1 et 2.

La figure ci-dessous présente l'intégration des nanoparticules dans deux liquides différents.

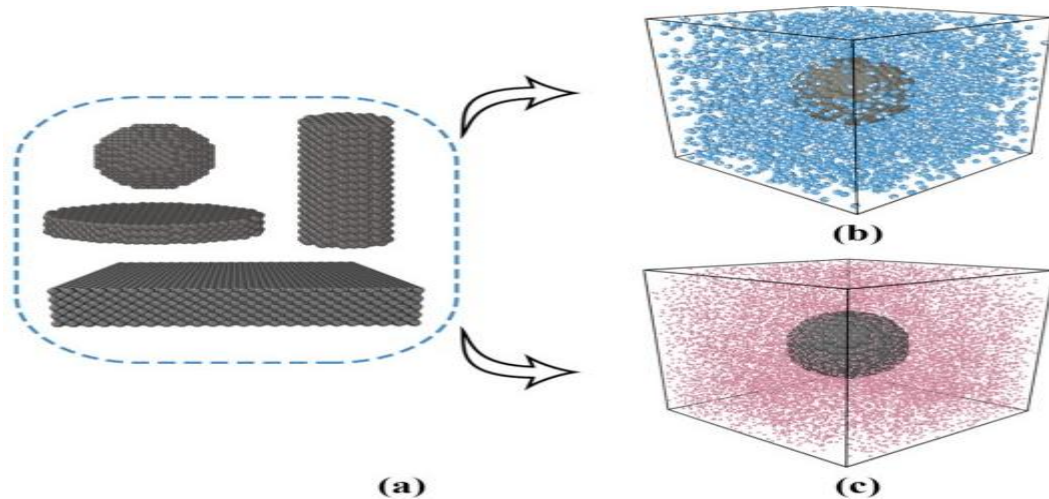


Figure II. 1: (a) Différentes formes de nanoparticules d'argent insérées dans deux liquides ;(b) l'eau (c) l'argon liquide [133].

### • Viscosité dynamique

La viscosité est une propriété très importante à étudier parce qu'elle joue un rôle important dans la mécanique des fluides. Elle est définie par l'aptitude du fluide à s'écouler. L'augmentation de la viscosité est responsable de l'augmentation de la puissance de pompage. Dans le transfert de chaleur par convection le coefficient ( $h$ ) et les pertes de charge dépendent de plusieurs paramètres ; la vitesse du fluide, la densité et la viscosité.

Un viscosimètre est un instrument de mesure qui permet de mesurer la viscosité des fluides. Il y a deux types de viscosimètres : les viscosimètres de laboratoire et les viscosimètres de process. Le rhéomètre rotatif (figure-II.2) permet de mesurer la viscosité dynamique des échantillons de viscosité faible à semi-solide. En complément des détectations dans un seul point, des courbes d'écoulement et celle de la viscosité peuvent être établies pour étudier le comportement rhéologique.

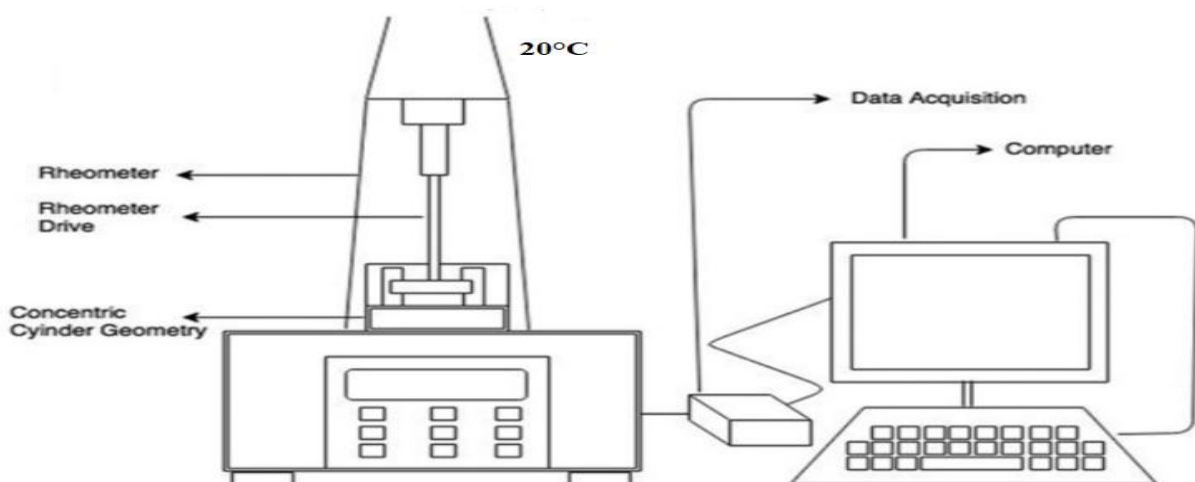


Figure II. 2: Rhéomètre rotatif MCR 320 [139].

Plusieurs modèles théoriques sont développés pour calculer la viscosité dynamique des nanofluides en fonction de plusieurs paramètres liés à la nature des fluides de base, la température et la taille des nanoparticules. Généralement ces modèles sont élaborés pour des cas particuliers et dans une plage de température limitée. Cependant, tous les modèles qui y sont développés sont issus du modèle **d'Einstein (1906)** [140].

Einstein a été le premier à déterminer la viscosité effective à l'aide des équations hydrodynamiques phénoménologiques d'une suspension de solides sphériques. Sa formule repose sur l'hypothèse d'un fluide visqueux et d'une suspension des solides sphériques avec une fraction volumique très faible inférieure à 0.02 %. Sa formule est donnée comme suit :

$$\mu_{eff} = \mu_{fb} (1 + 2.5\phi) \quad (\text{II. 7})$$

où  $\mu_{fb}$  et  $\mu_{eff}$  dénotent respectivement la viscosité du fluide de base et la viscosité du nanofluide. La formule d'Einstein montre une augmentation de la viscosité avec l'augmentation de la concentration des nanoparticules. La formule présente également certaines limites.

En 1942, **Bruijin et al.** [141] ont suggéré une formule valable même pour des concentrations élevées. Son modèle est donné comme suit :

$$\mu_{eff} = \mu_{fb} \left( \frac{1}{(1 - 2.5\phi + 1.552\phi^2)} \right) \quad (\text{II. 8})$$

En 1951, **Mooney et al.** [142]. Ont suggéré également un autre modèle pour des particules sphériques en interaction et à des concentrations plus élevées grâce à l'expression suivante :

$$\frac{\mu_{eff}}{\mu_{fb}} = e^{\left(\frac{\varepsilon\phi}{1-K\phi}\right)} \quad (\text{II. 9})$$

où  $\varepsilon$  est une constante appelée paramètre d'ajustement égal à 2.5 et  $K$  est un facteur d'auto-encombrement ( $1.35 < k < 1.91$ ).

**Vladmir et al.** [143] ont proposé une expression théorique de la viscosité effective, en excluant l'effet des forces des sphères solides et du mouvement brownien pour des nanoparticules sphériques solides. Sa formule est donnée comme suit :

$$\mu_{eff} = \mu_{fb} (1 + 2.5\phi + 7.349\phi^2) \quad (\text{II. 10})$$

**Krieger et al.** [144] ont donné un modèle semi-empirique de la viscosité de cisaillement des nanofluides, ils ont examiné des nanoparticules sphériques solides. Leur modèle est présenté comme suit :

$$\frac{\mu_{eff}}{\mu_{fb}} = \left[ 1 - \frac{\phi}{\phi_m} \right]^{-\eta\phi_m} \quad (\text{II. 11})$$

où  $\eta$  est la viscosité intrinsèque égale à 2.5 pour les suspensions mono-élément,  $\phi_m$  varie de 0.495 à 0.54, il est appelé la fraction maximale de compactage des particules qui peut avoir une valeur de 0.605 à des taux de cisaillement très élevés.

**Brinkman et al. [145]** ont développé l'équation d'Einstein pour pouvoir l'utiliser à des concentrations modérées et très élevées. Ils ont analysé l'effet de l'ajout de la molécule de soluté à un milieu continu comportant des concentrations de particules inférieures à 4 %. Cette équation a été utilisée par beaucoup de chercheurs. Le modèle empirique est donné par la formule (II.12) :

$$\frac{\mu_{eff}}{\mu_{fb}} = (1 - \phi)^{-2.5} \quad (\text{II. 12})$$

En 1970, **Nielsen et al. [145]** ont suggéré un autre modèle pour une faible concentration de particules. Pour définir la viscosité des suspensions dont la fraction volumique des particules est supérieure à 0.02%. L'expression mathématique envisagée est la suivante :

$$\frac{\mu_{eff}}{\mu_{fb}} = (1 + 1.5\phi)e^{\frac{\phi}{1-\phi_m}} \quad (\text{II. 13})$$

**Franken et Acrivos [146]** ont développé un modèle mathématique pour déterminer la viscosité des nanofluides en fonction de la viscosité du fluide de base et de la fraction volumique. Cette formule est donnée comme suit :

$$\frac{\mu_{eff}}{\mu_{fb}} = \frac{9}{8} \left[ \frac{\left(\frac{\phi}{\phi_m}\right)^{\frac{1}{3}}}{\left(\frac{\phi - \phi_m}{\phi_m}\right)^{\frac{1}{3}}} \right] \quad (\text{II. 14})$$

En 1977, **Batchelor et al. [147]** ont modifié l'équation de viscosité d'Einstein en intégrant l'effet du mouvement brownien qui est utilisable pour une concentration en volume jusqu'à 10%. Le modèle a été élaboré en considérant une suspension isotrope des nanoparticules solides et sphériques. Son modèle est donné par la formule suivante :

$$\frac{\mu_{eff}}{\mu_{fb}} = (1 + 2.5\phi + 6.5\phi^2) \quad (\text{II. 15})$$

Ceci est dû au fait que le courant autour de chaque particule est affecté par la présence potentielle d'autres particules à proximités et par les collisions entre particules. Ce paramètre est donc rectifié par le terme  $\phi^2$  dans le modèle de Batchelor [147].

**Lundgren et al. [148]** ont présenté une équation formulée sous forme de série de Taylor. Ils ont constaté que l'écoulement autour d'une particule est influencé par les particules voisines. Cette équation est considérée comme une réduction de la formule d'Einstein [140]:

$$\frac{\mu_{eff}}{\mu_{fb}} = \left[ 1 + 2.5\phi + \frac{25}{4}\phi^2 + f(\phi^3) \right] \quad (\text{II. 16})$$

**Graham et al. [149]** ont présenté une forme générique de la formule de Franken et al [146] qui correspond bien à l'équation d'Einstein pour les faibles valeurs de concentration volumique. L'équation est développée en introduisant de l'espacement inter particulaire et le diamètre des particules :

$$\frac{\mu_{eff}}{\mu_{fb}} = \left[ 1 + 2.5\phi + 4.5 \left[ \frac{1}{\left( \frac{h_e}{d_p} \left( 2 + \frac{h_e}{d_p} \right) \left( 1 + \frac{h_e}{d_p} \right)^2 \right)} \right] \right] \quad (\text{II. 17})$$

où  $d_p$  et  $h_e$  dénotent respectivement le rayon de la particule et l'espacement entre les particules.

**Ward et al.[150]** ont présenté un modèle expérimental pour les concentrations des particules élevées allant jusqu'à 35%, Il est bien évident que la viscosité est considérée comme toutes les propriétés d'un liquide, c'est-à-dire elle est liée à la masse des particules qui le constituent et aux forces qui existent entre elles et des forces entre les particules. Cette équation est à la forme suivante :

$$\frac{\mu_{eff}}{\mu_{fb}} = [1 + \eta(\phi + 2.5\eta + (2.5\eta)^2 + \dots)] \quad (\text{II. 18})$$

où  $\eta$  est l'effet volumétrique de la viscosité.

En 1998, **Pak et Cho [134]** ont constaté que la viscosité du nanofluide diminue d'une manière proportionnelle lorsque la température augmente. Ils ont développé un modèle de calcul de la viscosité des nanofluides. Leur étude basée sur la fraction volumique des particules en prenant en considération la température ambiante comme référence :

$$\mu_{eff} = \mu_{fb} (1 + 39.11\phi + 533.9\phi^2) \quad (\text{II. 19})$$

La viscosité dynamique de certains fluides de base peuvent être déterminés par les formules suivantes :

La viscosité dynamique du fluide de base de Syltherm 800 ( $\mu_{fbS}$ ) est définie comme suit [137] :

$$\mu_{fbS} = 9.88562 * 10^1 - 7.3024 * 10^{-1} * (T) + 2.21917 * 10^{-3} * (T)^2 - 3.42377 * 10^{-6} * (T)^3 + 2.66836 * 10^{-9} * (T)^4 - 8.37194 * 10^{-13} * (T)^5 \quad (\text{II.20})$$

La viscosité dynamique du fluide de base du Therminol VP-1( $\mu_{fbT}$ ) est définie comme suit [136] :

$$\mu_{fbT} = 23.165 - 0.1476 * (T) + 3.617 * 10^{-4} * (T)^2 - 3.9844 * 10^{-7} * (T)^3 + 1.6543 * 10^{-10} * (T)^4 \quad (\text{II.21})$$

La viscosité dynamique du fluide de base du Dowtherm A ( $\mu_{fbD}$ ) est définie comme suit [135]:

$$\mu_{fbD} = (10^{5.274}) * (T^{-3.247}) + (10^{27.75}) * T^{-12.3} \quad (\text{II.22})$$

**Bicerano et al.** [151] ont suggéré une corrélation pour la viscosité des nanofluides. Sa corrélation montre l'effet volumétrique de la viscosité :

$$\mu_{eff} = (1 + \eta\phi + K_h\phi^2) \quad (\text{II.23})$$

**Kitano et al.** [152] ont présenté une équation simple pour décrire la viscosité d'un mélange à deux phases en fonction de la viscosité du fluide de base :

$$\mu_{eff} = \frac{\mu_{fb}}{\left[1 - \left(\frac{\phi}{\phi_m}\right)\right]^2} \quad (\text{II.24})$$

**Avsec et Oblac** [153] ont développé un modèle de viscosité effective basée sur la formule proposée par Ward en 1937 et Einstein en 1906. L'expression est donnée par la formule suivante :

$$\frac{\mu_{eff}}{\mu_{fb}} = \left[1 + 2.5 \left(\phi_{eff} + 2.5\phi_{eff} + (2.5\phi_{eff})^2 + \dots\right)\right] \quad (\text{II.25})$$

où  $\phi_{eff}$  la fraction volumique effective déterminée par :

$$\phi_{eff} = \phi \left(1 + \frac{h_e}{r_p}\right)^3 \quad (\text{II.26})$$

où  $r_p$  et  $h_e$  sont respectivement l'épaisseur du liquide et l'espacement entre les particules.

**Tseng et al.** [154] ont examiné les caractéristiques rhéologiques et les structures de suspension des nanofluides de  $\text{TiO}_2$ / Eau pour des concentrations allant de 5 à 12 %. Ils ont développé une forme exponentielle de l'effet de la concentration en volume sur la viscosité :

$$\mu_{eff} = \mu_{fb} * 0.4513e^{0.6965\phi} \quad (\text{II.27})$$

**Chen et al.** [155] Ont développé une équation en prenant en compte les effets de la fraction de tassement variable dans la structure globale et la fraction volumique maximale des nanoparticules. L'équation est donnée par la forme suivante :

$$\frac{\mu_{eff}}{\mu_{fb}} = \left(1 - \frac{\phi_a}{\phi_m}\right)^{-2.5\phi_m} \quad (\text{II.27a})$$

où  $\phi_a$  est donné par la formule suivante :

$$\phi_a = \left[1 - \frac{a_a}{a_m}\right]^{3-D} \quad (\text{II. 27b})$$

où  $D$  désigne l'indice fractal valant 1.8 pour les nanofluides,  $a_a$  et  $a_m$  sont respectivement les agrégats et les particules primaires.  $\phi_m$  est la fraction volumique maximale des particules dont sa valeur est calculé expérimentalement.

**Maiga et al [156]**, ont développé une équation pour calculer la viscosité effective d'une manière expérimentale. Ils ont utilisé les nanoparticules  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , l'équation est donnée comme suit :

$$\frac{\mu_{eff}}{\mu_{fb}} = (306\phi^2 + 1 - 0.19\phi) \quad (\text{II. 28})$$

**Masoumi et al. [157]** ont proposé une équation théorique pour la détermination de la viscosité des nanofluides en fonction de plusieurs paramètres tels que le diamètre de particules et la fraction volumique des nanoparticules. Ils ont pris en compte aussi le mouvement Brownien, leur modèle valable pour les nanofluides  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Eau}$ :

$$\mu_{eff} = \mu_{fb} \left(1 + \frac{\rho_p V_B d_p^2}{72C\delta\mu_{fb}}\right) \quad (\text{II. 29})$$

où  $\rho_p$  est la masse volumique des nanoparticules,  $\delta$  présente la distance entre les nanoparticules,  $d_p$  est le diamètre des particules,  $V_B$  et  $C$  sont les deux fonctions de la température. Ce modèle pourrait être utile pour calculer la viscosité effective. Certaines corrélations ont été développées pour prendre en considération l'effet de la température sur la viscosité des nanofluides.

**Buongiorno et al. [158]** ont proposé un modèle pour calculer la viscosité dynamique des nanofluides en fonction de la fraction volumique des nanoparticules  $\text{Al}_2\text{O}_3$  et  $\text{TiO}_2$  qui sont inférieure à 10%.

$$\text{Pour } \text{Al}_2\text{O}_3 \quad \frac{\mu_{eff}}{\mu_{fb}} = (1 + 39.11\phi + 533.9\phi^2) \quad (\text{II. 30})$$

$$\text{Pour } \text{TiO}_2 \quad \frac{\mu_{eff}}{\mu_{fb}} = (1 + 5.45\phi + 108.2\phi^2) \quad (\text{II. 31})$$

**Kulkarni et al. [159]** ont suggéré un modèle de la viscosité effective des nanofluides, cette équation est dépendante de la température, ils ont examinés les nanofluides  $\text{CuO}/\text{eau}$ , dans une plage de température qui varie entre 5 à 50  $^\circ\text{C}$ . Ce modèle montre une diminution exponentielle de la viscosité des nanofluides lorsque la température augmente.

$$\ln\left(\frac{\mu_{nf}}{\mu_{fb}}\right) = -(2.8751 + 53.548\phi - 107.12\phi^2) + \frac{(1078.3 + 15857\phi + 205787\phi^2)}{T} \quad (\text{II. 32})$$

**Uangthongsuk et Wongwises [160]** ont effectué des expériences avec des nanoparticules de  $\text{TiO}_2$  pour des concentrations volumiques de 0,2 à 2 % dispersées dans l'eau, pour des températures allant de 15 à 30  $^\circ\text{C}$ .

$$\frac{\mu_{eff}}{\mu_{fb}} = (1 + 7.3\phi + 123\phi^2) \quad (II. 33)$$

**Nguyen et al. [161]** ont également proposé deux modèles pour déterminer la viscosité des nanofluides en fonction de la température (T) et du fluide de base, pour une fraction volumique de particules comprise entre 1 et 4% de CuO et Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

$$\text{Pour CuO} \quad \mu_{nf} = \mu_{fb} (2.1275 - 0.0215T + 0.00027T^2) \quad (II. 33a)$$

$$\text{Pour Al}_2\text{O}_3 \quad \mu_{nf} = \mu_{fb} (1.1250 - 0.0007T) \quad (II. 33b)$$

**Corcione [162]** a proposé une corrélation empirique pour estimer la viscosité dynamique des nanofluides, fondées sur un certain nombre de résultats expérimentaux disponibles dans la littérature. la température et de la fraction volumique sont 293- 323 K et 25-200 nm.

$$\mu_{eff} = \mu_{fb} \left( \frac{1}{1 - 34.87(d_p/d_{fb})^{-0.3}\phi^{1.03}} \right) \quad (II. 34)$$

**Namburu et al. [163]** ont présenté une relation entre la viscosité, la température et le diamètre dans leur modèle mathématique. La température et la concentration variaient de 35 à 50 °C et de 0 à 10 % , respectivement. Ils ont constaté que la viscosité des nanofluides de SiO<sub>2</sub> a diminuée avec l'augmentation du diamètre. Ils ont également prouvé que les nanofluides se présentaient comme un fluide non-newtonien à basse température.

$$\log(\mu_{eff}) = Ae^{-BT} \quad (II. 35)$$

où A et B sont deux fonctions de la fraction volumique des particules. Les formules proposées sont données ci-dessous :

$$A = (0.1193\phi^3 - 2.245\phi - 1.9289\phi^2 + 167.17) \quad (II. 35a)$$

$$B = (-7.10^{-6}\phi^2 - 0.0004\phi + 0.0192) \quad (II. 35b)$$

**Chandrasekhar et al. [164]** ont développé un modèle pour déterminer la viscosité des nanofluides en tenant compte des effets mécaniques, électromagnétiques, ainsi que les géométriques des nanoparticules, ils ont proposé une expression mathématique suivante :

$$\frac{\mu_{eff}}{\mu_{fb}} = 1 + b \left( \frac{\phi}{1 - \phi_m} \right)^n \quad (II. 36)$$

où n et b sont des constantes.

**Kole et al. [165]** ont proposé un modèle pour déterminer la viscosité des nanofluides en fonction de la température et de la fraction volumique des nanoparticules. Ils ont constaté que la viscosité diminue exponentiellement lorsque la température augmente.

$$\log(\mu_{eff}) = Ae^{-BT} \quad (II. 37)$$

où A et B sont associés à la fraction volumique ( $\phi$ ) des nanoparticules Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> comme suit :

$$A = (+18.404\phi - 225.9245\phi^2 + 1.749) \quad (\text{II. 37a})$$

$$B = (575.835\phi^3 - 32.101\phi^2 + 0.148\phi + 0.011) \quad (\text{II. 37b})$$

**Abu-Nada et al. [166]** ont développé une corrélation pour les nanofluides  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{eau}$ . Ils ont utilisé les résultats expérimentaux réalisés par **Nguyen et al. [161]** pour développer leur modèle en fonction de la température et de la fraction volumique des particules. Cette corrélation est à la forme suivante :

$$\begin{aligned} \mu_{nf} = & -0.155 - \frac{19.582}{T} + 0.794\phi + \frac{2094.47}{T^2} - 0.192\phi^2 - 8.11 \frac{\phi}{T} - \frac{27463.8}{T^3} + 0.127\phi^3 \\ & + 1.6044 \frac{\phi^2}{T} + 2.1754 \frac{\phi}{T^2} \end{aligned} \quad (\text{II. 38})$$

**Masud Hosseini et al. [167]** ont proposé une corrélation valable précisément pour les nanofluides  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{eau}$ . Ce modèle empirique tient compte de la température, de la concentration en volume, de la taille des nanoparticules et de l'effet de la couche de recouvrement. La formule est suivante :

$$\frac{\mu_{eff}}{\mu_{fb}} = \exp \left( m + \alpha \left( \frac{T}{T_0} \right) + \beta (\phi_h) + \gamma \left( \frac{d_p}{1-r} \right) \right) \quad (\text{II. 39})$$

où  $d_p$  est le diamètre des nanoparticules,  $\phi_h$  la fraction volumique hydrodynamique des nanoparticules,  $m$  un facteur qui dépend de propriété de système,  $r$  l'épaisseur de la couche de recouvrement,  $T_0$  la température de référence,  $T$  la température mesurée du nanofluide.

**Sharma et al. [168]** ont suggéré un modèle obtenu à l'aide des travaux expérimentaux, la corrélation est comme suite :

$$\frac{\mu_{eff}}{\mu_{fb}} = C_1 \left\{ \left( 1 + \frac{\phi}{100} \right)^{11.3} + \left( 1 + \frac{T}{70} \right)^{-0.038} + \left( 1 + \frac{d_p}{170} \right)^{-0.061} \right\} \quad (\text{II. 40})$$

où  $C_1$  est une constante égale à 1.4 pour SiC et de 1 pour des oxydes des métaux.

En 2020, **Udawattha et al. [169]** ont présenté un modèle pour définir la viscosité effective de fluide qui contient des nanoparticules sphériques et rigides dispersées de manière homogène. Ils ont testé cette nouvelle équation avec 22 nanofluides différents, leur modèle n'est pas valide pour les nanofluides non newtoniens.

$$\mu_{eff} = \mu_{fb} \left( 1 + 2.5 * \phi + \frac{\rho_B * V_B * d_p^2}{72 * \delta * [Z_r]} \right) \quad (\text{II. 50})$$

où  $Z_r$  est le taux de cisaillement ( $14 \text{ S}^{-1}$ ) et  $\delta$  distance entre les nanoparticules (m).

**Minakov et al. [170]** ont expérimentalement proposé un modèle pour calculer le coefficient de la viscosité des nanofluides en fonction de la fraction volumique. La formule générale est comme suite :

$$\text{Formule générale} \quad \mu_{eff} = (1 + a\phi + b\phi^2) \quad (\text{II. 50a})$$

$$\text{Pour le nanofluide à base (Al}_2\text{O}_3) \quad \mu_{eff} = (1 + 6\phi + 72\phi^2) \quad (\text{II. 50b})$$

$$\text{Pour le nanofluide à base (TiO}_2) \quad \mu_{eff} = (1 + 7.1\phi + 148\phi^2) \quad (\text{II. 50c})$$

En réalité, aucun modèle n'est apte à prédire avec exactitude la viscosité des nanofluides. Une large gamme de variation apparait lorsqu'on effectue une comparaison entre les valeurs théoriques et les données expérimentales [171] [172].

- **Conductivité thermique :**

La conductivité thermique ou conductance thermique d'un matériau mesure sa capacité à transmettre la chaleur. Cette propriété est variable en fonction de la température et de la constitution du matériau. La conductivité thermique est définie aussi comme la propriété la plus significative et importante dans la nanotechnologie. La conductivité thermique noté  $\lambda$  (W/m.K) traduit la capacité d'un matériau à transporter ou à transmettre la chaleur. Les trois techniques les plus utilisées dans la recherche et l'industrie pour mesurer la conductivité thermique sont les suivantes : la méthode du flash, la méthode du fil chaud et la méthode de la plaque chauffante conservée. La [figure II-3](#) montre le dispositif expérimental à fil chaud.

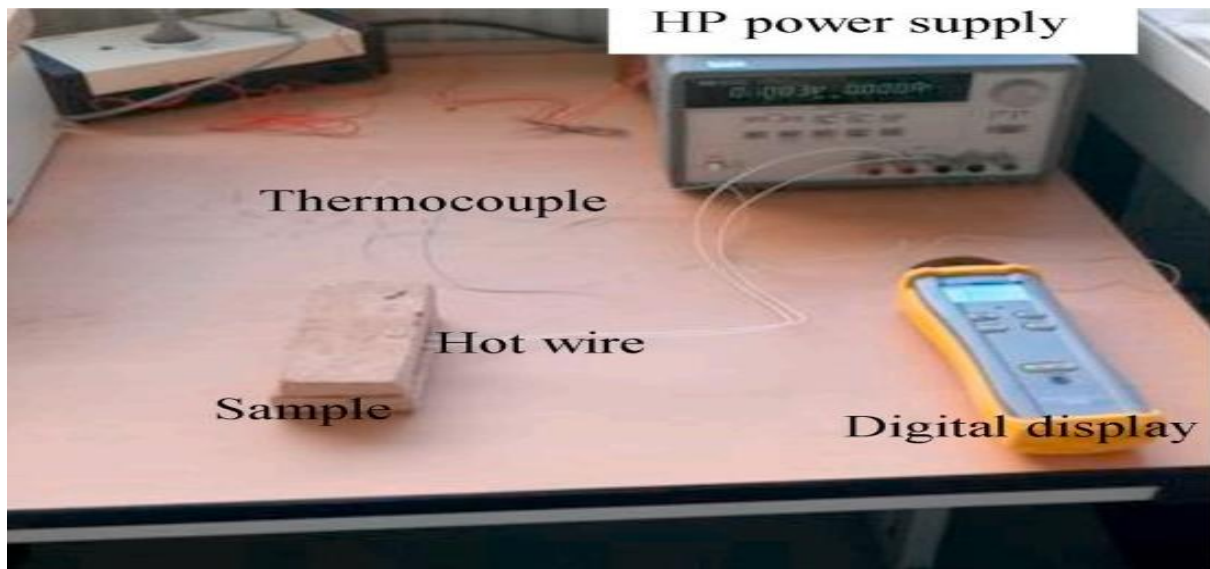


Figure II. 3 Dispositif expérimental à fil chaud [173].

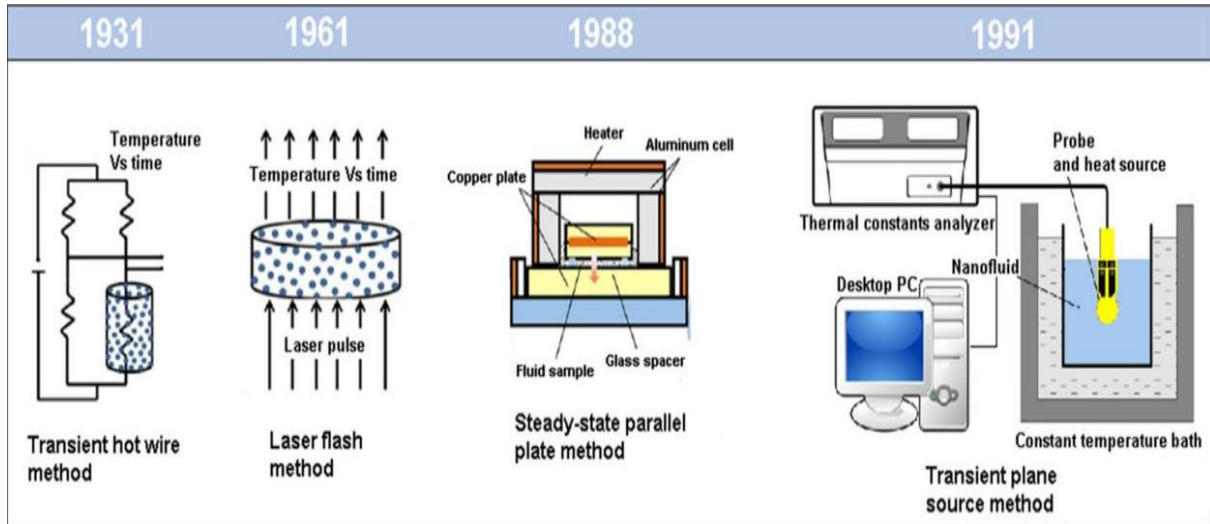


Figure II. 4: Diagramme schématique des méthodes de mesure de la conductivité thermique des nanofluides [113].

Les modèles classiques de la conductivité thermique pour les mélanges solides-liquides ne sont pas généralement applicables aux nanofluides. Par conséquent, plusieurs chercheurs ont présenté les différents mécanismes et méthodes qui sont considérés comme paramètres déterminants de cette propriété. Ils ont élaboré des nouveaux modèles pour la détermination de la conductivité thermique des nanofluides. Aujourd'hui, il n'existe aucune théorie fiable et précise permettant de prédire la conductivité thermique des nanofluides.

En revanche, à partir des résultats expérimentaux beaucoup de chercheurs ont établi et constaté que la conductivité thermique des nanofluides dépendra de certain nombre de paramètres et de facteurs tels que la fraction volumique, la conductivité thermique des nanoparticules et du fluide de base, la surface et la forme des nanoparticules, ainsi la température. Cependant, il existe plusieurs corrélations et modèles semi-empiriques pour déterminer la conductivité apparente des nanofluides composés par des mélanges diphasiques. Elles sont essentiellement basées sur la définition suivante de la conductivité thermique effective d'un mélange à deux composants :

$$\lambda_{eff} = \frac{\lambda_p \phi_p (dT/dx)_p + \lambda_{fb} \phi_{fb} (dT/dx)_{fb}}{\phi_p (dT/dx)_p + \phi_{fb} (dT/dx)_{fb}} \quad (II. 51)$$

En 1881, **Maxwell** [174] a développé un modèle pour estimer la conductivité thermique effective d'une suspension contenant des particules solides ( mélanges particules-fluides), la plupart des modèles théoriques remontant au travail classique de Maxwell (1881) :

$$\lambda_{eff} = \frac{\lambda_p + 2\lambda_{fb} + 2\phi(\lambda_p - \lambda_{fb})}{\lambda_p + 2\lambda_{fb} - (\lambda_p - \lambda_{fb})} \lambda_{fb} \quad (II. 52)$$

où  $\lambda_{eff}$  et  $\lambda_p$  représentent respectivement la conductivité thermique effective et la conductivité des nanoparticules.

où  $\lambda_{fb}$  est la conductivité thermique de certains fluides de base qui peuvent être déterminés par les formules suivantes :

La conductivité du fluide de base du Dowtherm A ( $\lambda_{fbD}$ ) est définie comme suit [175]:

$$\lambda_{fbD} = 1.856 * 10^{-1} - 1.600 * 10^{-4} * T + 5.913 * 10^{-12} * T^2 \quad (II.53)$$

La conductivité du fluide de base du Therminol VP-1 ( $\lambda_{fbT}$ ) est définie comme suit [136] :

$$\lambda_{fbT} = 0.14644 + 2.0353 * 10^{-5} * T - 1.9367 * 10^{-7} * T^2 + 1.0614 * 10^{-11} * T^3 \quad (II.54)$$

La conductivité du fluide de base de Syltherm 800 ( $\lambda_{fbS}$ ) est définie comme suit [137] :

$$\lambda_{fbS} = 1.90134 * 10^{-1} - 1.88053 * 10^{-4} * T \quad (II.55)$$

Le modèle de **Maxwell** offre des résultats fiables et satisfaisants pour des suspensions contenant des particules sphériques avec des concentrations relativement faibles. Par contre, il ne tient pas en compte l'effet des interactions inter-particules.

En 1935, **Bruggeman** [176] a proposé une corrélation pour analyser les interactions entre les particules, ce modèle est mieux développé que le modèle de Maxwell. Pour un mélange binaire continuant des particules sphériques homogènes, le modèle de Bruggeman est donné sous la forme suivante :

$$\phi \left( \frac{\lambda_p - \lambda_{eff}}{\lambda_p + 2\lambda_{eff}} \right) + (1 - \phi) \left( \frac{\lambda_{fb} - \lambda_{eff}}{\lambda_{fb} + \lambda_{eff}} \right) = 0 \quad (II.56)$$

Le modèle de Bruggeman est complémentaire du modèle de Maxwell en tenant compte des concentrations volumiques relativement élevées. En revanche, il ne prend pas en compte ni la forme des particules ni leurs tailles.

En 1962, **Hamilton et Crosser** [177] ont suggéré un modèle pour les mélanges (solide-liquide) de particules non sphériques et ils ont intégré un facteur de forme (n), pour prendre en considération l'effet de la forme des nanoparticules.

La valeur de la conductivité thermique des nanofluides dans laquelle le rapport de conductivité de la phase solide et la phase liquide doit être supérieur à 100 peut être donnée par cette formule :

$$\lambda_{eff} = \frac{\lambda_p + (n - 1)\lambda_{fb} - (n - 1)\phi(\lambda_{fb} - \lambda_p)}{\lambda_p + (n - 1)\lambda_{fb} + (\lambda_{fb} - \lambda_p)\phi} \lambda_{fb} \quad (II.57)$$

où  $n = 3/\psi$  est le facteur de forme empirique, dont  $\psi$  est la sphéricité de la particule (exprimée par le rapport entre la surface d'une sphère de volume égal à celui de la particule et la surface de la particule. de la particule et la surface de la particule. Une comparaison entre ce modèle et le modèle de Maxwell montre que le modèle de Maxwell est un cas particulier du modèle de Hamilton et Crosser pour une sphéricité égale à un). Ce modèle peut être

employé lorsque la conductivité thermique des particules est supérieure à celle du fluide de base.

**Yu et Choi [178]** ont développé le modèle de Maxwell en tenant compte de l'impacte de la nanocouche. Ils ont remplacé la conductivité thermique des particules solides  $\lambda_p$ , comme suit :

$$\lambda_p = \frac{[2(1 - \gamma) + (1 - \beta)^3(1 + 2\gamma)\gamma]}{-(1 - \gamma) + (1 + \beta)^3(1 + 2\gamma)} \lambda_{fb} \quad (\text{II. 58})$$

où  $\gamma$  est le rapport de la conductivité thermique de la nano-couche à la conductivité thermique de la particule donné par  $\gamma = \lambda_{layer} / \lambda_p$

et  $\beta$  est le rapport entre l'épaisseur de la nano-couche ( $r$ ) et le rayon de la particule, ( $d$ ) est donné par  $\beta = r/d$ . ils ont modifié l'équation de Maxwell comme suit :

$$\lambda_{eff} = \frac{\lambda_{pe} + 2\lambda_{fb} - 2(\lambda_{pe} - \lambda_{fb})(1 - \beta)^3 \phi}{\lambda_{pe} + 2\lambda_{fb} - 2(\lambda_{pe} - \lambda_{fb})(1 + \beta)^3 \phi} \lambda_{fb} \quad (\text{II. 59})$$

**Yu et Choi [179]** ont proposé également une modification du modèle de Hamilton-Crosser (1962). Ils ont introduit la couche inter faciale particule-liquide pour des nanoparticules non sphériques.

$$\lambda_{eff} = \left( 1 + \frac{n\phi_{eff} A}{1 - \phi_{eff} A} \right) \lambda_{fb} \quad (\text{II. 60})$$

A est défini par :

$$A = \frac{1}{3} \sum_{j=a,b,c} (\lambda_{pj} - \lambda_{fb}) / [\lambda_{pj} + (n - 1)\lambda_{fb}] \quad (\text{II. 60a})$$

Et  $\phi_{eff}$  par :

$$\phi_{eff} = \phi \sqrt{(a^2 + t)(b^2 + t)(c^2 + t)} / \sqrt{abc} \quad (\text{II. 60b})$$

où  $n$  est le facteur de forme empirique général donné par  $n = 3\Psi^{-\alpha}$ , ( $\Psi$  est la sphéricité des particules et  $\alpha$  est un paramètre empirique).

**Qing-Zhong Xue [180]** a suggéré un modèle pour la conductivité thermique effective des nanofluides. Cette corrélation inclut l'effet de l'interface entre les particules solides et le fluide de base, elle est basée sur la théorie de la polarisation moyenne. Sa formule pour la conductivité thermique effective est donnée par :

$$9 \left( 1 - \frac{\phi}{\delta} \right) \frac{\lambda_{eff} - \lambda_{fb}}{2\lambda_{eff} + \lambda_{fb}} + \frac{\phi}{\delta} \left[ \frac{\lambda_{eff} - \lambda_{c,x}}{\lambda_{eff} + B_{2,x}(\lambda_{c,x} - \lambda_{eff})} + 4 \frac{\lambda_{eff} - \lambda_{c,y}}{2\lambda_{eff} + (1 - B_{2,x})(\lambda_{c,y} - \lambda_{eff})} \right] = 0 \quad (\text{II. 61})$$

$\delta$  est donné par,

$$\delta = abc / [(a + t) + (b + t) + (c + t)] \quad (\text{II. 61a})$$

$\lambda_{c,x}$  et  $\lambda_{c,y}$  sont les demi-rayons des nanoparticules et (a, b, c) sont les constantes diélectriques effectives et  $B_{2,x}$  le facteur de dépolarisation le long de l'axe symétrique x.

**Xue et Xu [181]** ont développé une équation basée sur le modèle de Bruggeman. Leur modèle prend en considération l'effet des coques inter faciales, ils ont remplacé la conductivité thermique des nanoparticules par la conductivité thermique supposée complexes qui comprenait les couches inter faciales entre les fluides de base et les nanoparticules

$$\left(1 - \frac{\phi}{\alpha}\right) \frac{\lambda_{eff} - \lambda_{fb}}{2\lambda_{eff} + \lambda_{fb}} + \frac{\phi}{\alpha} \left[ \frac{(\lambda_{eff} - \lambda_2)(2\lambda_2 + \lambda_1) - \alpha(\lambda_1 - \lambda_2)(2\lambda_2 + \lambda_{eff})}{(2\lambda_{eff} - \lambda_2)(2\lambda_2 + \lambda_1) + 2\alpha(\lambda_1 - \lambda_2)(\lambda_2 + \lambda_{eff})} \right] = 0 \quad (\text{II. 62})$$

où  $\alpha$ ,  $\lambda_1$  et  $\lambda_2$  sont respectivement le rapport volumique des nanoparticules sphériques et des nanoparticules complexes, la conductivité thermique de la nanoparticule et de la couche inter-faciale.

**Xie et al. [182]** ont développé un modèle de la conductivité thermique effective qui tient en compte ; des effets de la fraction volumique, l'épaisseur de la nano-couche, la conductivité thermique et la taille des nanoparticules, la conductivité thermique des fluides et des nano couches.

$$\lambda_{eff} = \left(1 + 3\Theta\phi_T + \frac{3\Theta^2\phi_T^2}{1 - \Theta\phi_T}\right) \lambda_{fb} \quad (\text{II. 63})$$

où  $\Theta$  est donné par la formule suivante :

$$\Theta = \{\beta_{1b}[(1 + \gamma)^3 - \beta_{p1}/\beta_{b1}]\} / [(1 + \gamma)^3 + 2\beta_{1b}\beta_{p1}] \quad (\text{II. 63a})$$

Et,

$$\beta_{1b} = (\lambda_1 - \lambda_{fb}) / (\lambda_1 + 2\lambda_{fb}) \quad (\text{II. 63b})$$

$$\beta_{p1} = (\lambda_p - \lambda_1) / (\lambda_p + 2\lambda_1) \quad (\text{II. 63c})$$

$$\beta_{b1} = (\lambda_{fb} - \lambda_1) / (\lambda_{fb} + 2\lambda_1) \quad (\text{II. 63d})$$

Ou,  $\gamma$  est le rapport des épaisseurs de la nanocouche et de la nanoparticule donné par  $\gamma = \delta / r_p$ . la fraction volumique totale  $\phi_T$  donnée par :

$$\phi_T = \phi(1 + \gamma)^3 \quad (\text{II. 64})$$

**Xuan et al. [183]** ont proposé un modèle sur la base du modèle de Maxwell, en examinant le mouvement aléatoire des nanoparticules en suspension. Ils ont proposé une formule modifiée de la conductivité thermique effective suivante :

$$\lambda_{eff} = \frac{\lambda_p + 2\lambda_{fb} - 2(\lambda_{fb} - \lambda_p)\phi}{\lambda_p + 2\lambda_{fb} - (\lambda_{fb} - \lambda_p)\phi} \lambda_{fb} + \frac{\rho_p \phi C_{pp}}{2} \sqrt{\frac{K_B T}{3\pi r_c \mu_{fb}}} \quad (\text{II. 65})$$

où  $K_B$  est la constante de Boltzmann,  $r_c$  est le rayon apparent des grappes est dépendant de la dimension fractale de la structure des grappes. Bien que ce modèle intègre l'effet de la température sur l'amélioration de la conductivité.

**Wang et al. [184]** ont également développé un modèle basé sur le modèle multi-composant de Maxwell en introduisant la conductivité thermique effective des grappes de particules. Leur modèle a été confirmé avec succès aux données expérimentales.

$$\lambda_{eff} = \frac{(1 - \phi) + 3\phi \int_0^\infty \lambda_{cl}(r)n(r)/[\lambda_{cl}(r) + 2\lambda_{fb}]dr}{(1 - \phi) + 3\phi \int_0^\infty \lambda_{yp}(r)n(r)/[\lambda_{cl}(r) + 2\lambda_{fb}]dr} \lambda_{fb} \quad (\text{II. 66})$$

$\lambda_{cl}(r)$  représente la fonction de distribution du rayon.

**Kumar et al. [185]** ont proposé un modèle qui montre la relation entre la température et la conductivité thermique des nanofluides. Ils tenant en compte aussi le mouvement Brownien des particules, sa formule peut être exprimée comme suit :

$$\lambda_{eff} = \lambda_{fb} + C \frac{(2k_B T)(\phi r_{fb})}{(\pi \mu_{fb} d_p^2) \lambda_{fb} (1 - \phi) r_p} \lambda_{fb} \quad (\text{II. 67})$$

où  $\mu_{fb}$ ,  $C$  et  $d_p$  sont respectivement la viscosité dynamique du fluide de base, une constante et le diamètre des particules.

**Bhattacharya et al. [186]** ont développé une méthode pour mesurer la conductivité thermique effective d'un nanofluide en appliquant la simulation du mouvement brownien. Ils ont réuni la conductivité des particules et la conductivité du fluide de base comme suit :

$$\lambda_{eff} = \phi \lambda_p + (1 - \phi) \lambda_{fb} \quad (\text{II. 68})$$

**Jang et Choi et al. [187]** ont proposé un modèle théorique faisant intégrer quatre modes :

- La diffusion thermique dans des nanoparticules dans les fluides ( $\lambda_{fb}$ ),
- La collision entre les molécules du fluide de base ( $(\lambda_{fb} (1 - \phi))$ )
- La collision entre des nanoparticules due au mouvement Brownien (négligé).
- L'interaction thermique entre les molécules de fluide de base et les nanoparticules.

L'équation finale de la conductivité thermique effective des nanofluides est la suivante :

$$\lambda_{eff} = \lambda_{fb} (1 - \phi) + \lambda_p \phi + 3C \frac{d_{fb}}{d_p} \lambda_{fb} Re_d^2 Pr \phi \quad (\text{II. 69})$$

Où  $C$  est une constante et  $d_{fb}$  est le diamètre de la molécule du fluide de base.

**Prasher et al. [187]** ont constaté que l'effet du mouvement Brownien des nanoparticules soit précisément responsable de l'amélioration de la conductivité thermique effective des nanofluides. Ils ont modifié le modèle de Maxwell en introduisant la convection du liquide à proximité des particules lié au mouvement Brownien:

$$\lambda_{eff} = (1 + Re^m Pr^{0.333} \phi) \left[ \frac{\lambda_p + \lambda_{fb} + 2(\lambda_p - \lambda_{fb})\phi}{\lambda_p + 2\lambda_{fb} - (\lambda_p - \lambda_{fb})\phi} \right] \lambda_{fb} \quad (II. 70)$$

où  $h$  le coefficient de convection donné par :

$$h = \lambda_{eff} / (1 + A Re^m pr^{0.333} \phi) \quad (II. 70a)$$

où  $A$  et  $m$  sont des constantes,  $Re$  est le nombre de Reynolds est calculé par :

$$Re = \frac{1}{\nu} \sqrt{\frac{18K_b T}{\pi \rho_p d_p}} \quad (II. 70b)$$

**Koo et Kleinstreuer [188]** ont proposé un modèle qui inclut les effets de la fraction volumique, la taille des particules, la température et le mouvement Brownien. La formule résultante est la suivante :

$$\lambda_{eff} = \frac{\lambda_p + \lambda_{fb} + 2(\lambda_p - \lambda_{fb})\phi}{\lambda_p + 2\lambda_{fb} - (\lambda_p - \lambda_{fb})\phi} \lambda_{fb} + 5 * 10^4 \beta \phi \rho_{fb} C_{pfb} \sqrt{\frac{K_B T}{\rho_p d_p}} * f(T, \phi) \quad (III. 71)$$

La première partie de leur modèle est obtenus directement à partir du modèle de Maxwell et la deuxième partie présente le mouvement Brownien.

Où  $f(T, \phi)$  est une fonction varie selon la température et de la fraction volumique des particules donné par :

$$f(T, \phi) = (-6.04\phi + 0.4705)T + (1722.3\phi - 134.63) \quad (III. 71a)$$

$\beta$  est une constante liée au mouvement des particules.

**Nan et al. [189]** ont généralisé un modèle prenant en compte l'approximation de Maxwell-Garnett. Ils ont développé une formule simple afin de prédire la conductivité thermique effective des composites à base de nanotubes de carbone et la fraction volumique des nanoparticules :

$$\lambda_{eff} = 1 + \frac{\phi \lambda_p}{3 \lambda_{fb}} \quad (II. 72)$$

**Yamada et Ota [190]** ont suggéré une nouvelle formule pour estimer la conductivité thermique effective du mélange. Ils ont constaté que les modèles de prédiction existantes de plusieurs auteurs ne parviennent pas forcément à estimer la conductivité thermique "effective" avec une grande fiabilité par exception dans le cas d'une valeur très petite. Leur modèle est donné par la formule suivante :

$$\lambda_{eff} = \frac{\lambda_p/\lambda_{fb} + K - K\phi(1 - \lambda_p/\lambda_{fb})}{\lambda_p/\lambda_{fb} + K + \phi(1 - \lambda_p/\lambda_{fb})} \lambda_{fb} \quad (\text{II. 73})$$

où K est le facteur de forme pour des particules cylindriques de diamètre  $d_p$  et de longueur  $l_p$  donné par :

$$K = \phi^{0.2} \left( \frac{l_p}{d_p} \right) \quad (\text{II. 74})$$

En 2005, **Xue [191]** a développé un modèle basé sur le principe de Maxwell de la conductivité thermique effective des nanofluides à base des nanotubes de carbone NTC. Ils ont Comparé leur modèle avec les données expérimentales obtenus par **Choi [134]**.

$$\lambda_{eff} = \lambda_{fb} \frac{1 - \phi + (2\phi \lambda_p/\lambda_p - \lambda_{fb}) \ln(\lambda_p + \lambda_{fb}/2\lambda_{fb})}{1 - \phi + (2\phi \lambda_{fb}/\lambda_p - \lambda_{fb}) \ln(\lambda_p - \lambda_{fb}/2\lambda_{fb})} \quad (\text{II. 75})$$

En 2006, **Xue [192]** a présenté une corrélation pour la conductivité thermique effective de composite à base des nanotubes de carbone (NTC), ils ont introduit la résistance thermique à l'interface avec une théorie de polarisation moyenne. Le modèle proposé introduit aussi les effets simultanés de la concentration, la longueur, le diamètre de la conductivité thermique du fluide de base et du nanotube, sur la conductivité thermique du nanofluide.

$$9(1 - \phi) \frac{\lambda_{eff} - \lambda_{fb}}{2\lambda_{eff} + \lambda_{fb}} + \phi \left[ \frac{\lambda_{eff} - \lambda_{33}^c}{\lambda_{eff} + 0.14 \frac{d_p(\lambda_{33}^c - \lambda_{eff})}{I_p}} + 4 \frac{\lambda_{eff} - \lambda_{11}^c}{2\lambda_{eff} + \frac{1}{2}(\lambda_{11}^c - \lambda_{eff})} \right] = 0 \quad (\text{II. 76})$$

Où  $\lambda_{33}^c$  et  $\lambda_{11}^c$  Sont respectivement longitudinales de la cellule unitaire d'un nanotube et les conductivités thermiques équivalentes transversales d'un diamètre  $d_p$  et une longueur  $I_p$ .

En 2012, **Walvekar et al. [193]** ont suggéré un modèle à base de NTC, ils ont intégré l'effet du diamètre, l'effet du mouvement Brownien qui est lié à la température. Ce modèle représente une modification du modèle développé par Kumar en 2004. Il est donné par la formule suivante :

$$\lambda_{eff} = \lambda_{fb} \left[ 1 + \frac{\lambda_p \left( \frac{2\phi(r_p + l_p)}{r_p l_p} \right)}{\lambda_{fb} \left( \frac{3(1 - \phi)}{r_{fb}} \right)} \right] + \frac{C\phi(T - T_0)}{r_p^2 l_p^2 \mu_{fb}} \ln \left( \frac{l_p}{d_p} \right) \quad (\text{II. 77})$$

où  $r_p$ ,  $r_{fb}$  et  $l_p$  sont respectivement le rayon de la particule, le rayon moyen de la molécule du fluide de base et la longueur (m) des NTCs. ( $C$ ) est une constante dépend de la constante de Boltzmann.

**Akbari et al. [194]** ont amélioré le modèle de Nan et al. (1997). Ils ont pris en considération des phénomènes de la micro-convection et de clustering dans les nanofluides:

$$\frac{\lambda_{eff}}{\lambda_{nf}} = \frac{[\lambda_p(1+2\alpha)+2\lambda_{fb}]-2\phi[\lambda_{fb}-\lambda_p(1-\alpha)]}{[\lambda_p(1+2\alpha)+2\lambda_{fb}]+\phi[\lambda_{fb}-\lambda_p(1-\alpha)]} + \frac{552*10^5*2^{Q/2}Qd_p^E}{Q-1.4} Re_{fb}^Q \quad (II. 79)$$

où Q est un facteur dépend du fluide de base équivalent à 1.6 pour l'éthylène glycol et à 2 pour l'eau. (E) une constante qui varie selon la nature du fluide de base et des particules.

$Re_b$ ,  $\alpha$  sont donné par ces équations :

$$Re_b = 1/\nu\sqrt{(18K_bT)/(\pi\rho_p d_p)} \quad (II. 79a)$$

$$\alpha = (2R_{fb})/d_p \quad (II. 79b)$$

**Alipour [195]** a suggéré un modèle théorique pour déterminer la conductivité thermique, leur modèle est constitué de deux parties, un modèle statique et un modèle dynamique en incluant le mouvement brownien des particules.

$$\lambda_{eff} = \lambda_{fb} \left[ \frac{(\lambda_{pe} + 2\lambda_{fb}) + 2\phi(\lambda_p - w\lambda_{fb})}{(\lambda_{pe} + 2\lambda_{fb}) - \phi(\lambda_p - \lambda_{fb})} \right] \lambda_{fb} \quad (II. 80)$$

où  $w$  est le rapport entre la conductivité de la cache des particules et celle de fluide de base.

**Jiang [196]** a proposé un modèle en tenant en compte du rayon de la particule, le rayon de la molécule, les conductivités thermiques de la particule, du fluide, la fraction volumique, la fraction volumique et de l'épaisseur de la nano-couche.

$$\lambda_{eff} = \lambda_{fb} \frac{\lambda_{pe} + 2\lambda_{fb} + 2(\lambda_p - \lambda_{fb}) + (1 + B)^3 \phi}{\lambda_{pe} + 2\lambda_{fb} - (\lambda_p - \lambda_{fb}) + (1 + B)^3 \phi} \quad (II. 81)$$

où  $\lambda_{pe}$  est la conductivité thermique de la nanoparticule (composite nanoparticule/nanoenveloppe)

**Hosseini et al. [197]** ont proposé une nouvelle corrélation qui contient les paramètres suivants : la conductivité du liquide de base conductivité des nanoparticules, de la taille des nanoparticules, propriétés de l'enveloppe inter faciale et des fractions volumiques.

$$\lambda_{eff} = \lambda_m + \lambda_m \left[ (\lambda_p/\lambda_p)^\alpha (t/d_p)^\beta (v_p)^\gamma (T/T_0)^\delta \right] \quad (II. 82)$$

Où  $\alpha, \beta, \gamma$  et  $\delta$  sont des constantes dépendent de type du nanofluide,  $t$  est l'épaisseur de l'enveloppe interracial (m).

En 2018, **Abbasov [198]** a proposé un modèle qui prend en considération l'agrégation des nanoparticules et la nano-couche.

$$\lambda_{eff} = \lambda_{fb} \frac{(1-\alpha)}{2} \left\{ \left[ 2 - \frac{\mu}{2} h^2 \phi^{2/3} \right] - \frac{\mu}{A'} \left[ \frac{1}{A'} \ln \left( 1 - A' h \phi^{1/3} \right) + h \phi^{1/3} \right] \right\} \\ + \lambda_{fb} \frac{\alpha}{2} \left\{ \left[ 2 - \frac{\mu}{2} n^2 h^2 \phi^{2/3} \right] - \frac{\mu}{A'} \left[ \frac{1}{A'} \ln \left( 1 - A' n h \phi^{1/3} \right) + n h \phi^{1/3} \right] \right\} \quad (II. 83)$$

où  $A'$  est donné par :  $A' = 1 + \frac{\lambda_e}{\lambda_{fb}}$ . Lorsque l'agrégation des nanoparticules est absente,  $h = \left(\frac{6}{\pi}\right)^{\frac{1}{3}}$  et  $\alpha = 0$  et  $n$  est la concentration des molécules du fluide.

- **Chaleur spécifique**

La capacité thermique ou la chaleur spécifique ( $C_p$ ) est donnée comme la quantité de chaleur nécessaire pour élever la température de l'unité de masse d'une substance d'un degré Kelvin. Elle indique aussi la capacité du matériau à accumuler de l'énergie sous forme thermique, pour une masse spécifique, pendant que sa température augmente. Une capacité thermique importante signifie qu'une grande quantité d'énergie peut être accumulée avec une augmentation assez faible de la température. L'intégration des nanoparticules solides dans des fluides de base provoque généralement une diminution de la chaleur spécifique des nanofluides, parce que la chaleur spécifique des nanoparticules solides est moins élevée que celle des fluides de base. La capacité thermique est exprimée en joules par kelvin (J/ K), elle peut être mesurée par un instrument de mesure calorimètre (figure-II-5).

## Calorimeter

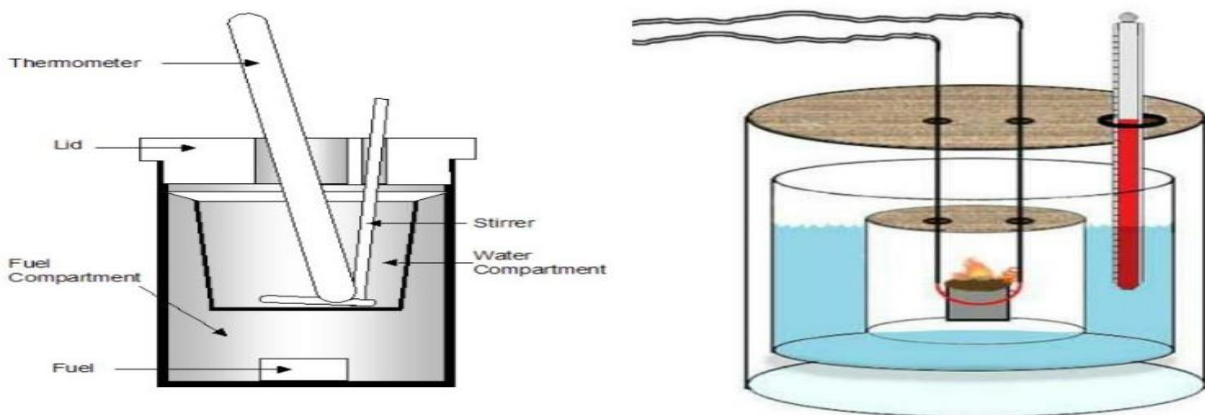


Figure II. 5: Technique de mesure de la capacité thermique (Calorimeter)

Cette grandeur doit être établie avec une grande précision car elle est incluse dans l'équation de l'énergie. Pour un nanofluide, il y a deux modèles pour le calcul de la chaleur spécifique. Elle peut être évaluée en utilisant la règle des mélanges ou en se basant sur le principe d'un équilibre thermique entre le fluide de base et les particules solides.

En 1980, **Pak et Cho [199]** ont proposé l'expression suivante pour la détermination de la chaleur spécifique des nanofluides :

$$C_{pnf} = \phi C_{pp} - C_{pfb} (1 - \phi) \quad (II. 84)$$

où  $C_{pnf}$ ,  $C_{pfb}$  et  $C_{pp}$  sont respectivement la chaleur spécifique du nanofluide, la chaleur spécifique du fluide de base et la chaleur spécifique des nanoparticules.

En 2000, **Xuan et Roetzel [200]** ont défini un modèle de la chaleur spécifique des nanofluides fondé sur l'hypothèse de l'équilibre thermique entre les particules solides et le fluide de base comme suit :

$$C_{pnf} = \frac{\phi \rho_p C_{pnp} + (1 - \phi) \rho_{fb} C_{pfb}}{\phi \rho_p + (1 - \phi) \rho_{fb}} \quad (\text{II. 85})$$

où  $\rho_{fb}$  et  $\rho_p$  sont la masse volumique du fluide de base et des nanoparticules respectivement.

En 2012, **Pakdaman et al. [201]** ont proposé un modèle basé sur les résultats expérimentaux. Ils ont examiné les nanofluides à base de MWCNT/huile. La formule est donnée comme suit :

$$C_{pnf} = C_{pfb} - C_{pfb} (0.0128T + 1.8382) \phi^{0.4779} \quad (\text{II. 86})$$

où  $\phi$  est la concentration en poids des nanoparticules varie de 0 à 0.004, et T est la température allant de 313 K à 343 K. Ils ont constaté que l'écart maximum entre les données expérimentales et les valeurs prédites par l'équation est de 9,4 %.

En 2018, **Akliu et al. [20]** ont proposé une formule qui permet de calculer la capacité thermique des nanofluides en fonction de la fraction volumique et de la température. Ils ont examiné les nanoparticules (SiO<sub>2</sub>-CuO) avec un diamètre de 25 nm.

$$\frac{C_{pfb}}{C_{pnf}} = 1.0697 \left[ 1 + \frac{\phi}{100} \right]^{5.6939} \left[ 1 + \frac{T_{nf}}{T_{fb}} \right]^{0.001} \quad (\text{II. 87})$$

**Yuguo GAO et al. [202]** ont développé une corrélation pour calculer la capacité thermique des nanofluides composés de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+ graphène dispersés dans l'eau.

$$C_{Cf} = 3.918 - 218.3\phi + 0.006596T + 0.00003185\phi^2 + 5.278\phi T - 0.000535T^2 \quad (\text{II. 88})$$

**Mousavi et al. [203]** ont proposé une équation pour déterminer la capacité thermique des nanofluides à base de MgO-TiO<sub>2</sub>. Cette équation a été donnée par :

$$C_{pnf} = 4.2049836 - 0.0015513333T + 2.103030303T^2 - 8.62\phi \quad (\text{II. 89})$$

**Mousavi et al. [204]** ont proposé une formule pour calculer la capacité thermique des nanofluides à base de CuO-MgO-TiO<sub>2</sub> dispersés dans l'eau Cette formule a été donnée par :

$$C_{pnf} = 4.2028064 - 0.0015020303T + 2.0272727T^2 - 17.03\phi \quad (\text{II. 90})$$

**Batur Çolak et al. [205]** ont développé une équation pour calculer la capacité thermique des nanoparticules Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> et ZnO dispersés dans l'eau, en prenant en considération l'effet de la température.

$$C_{pnf} = (4.168 + 0.0002322 * T)(1 - 0.01175\phi^{0.6207}) \quad (\text{II. 91})$$

**Eric et al. [206]** ont suggéré une équation pour déterminer la capacité thermique des nanofluides à base de  $Al_2O_3$ -Fe en fonction de la température, la fraction volumique et du fluide de base.

$$\frac{C_{pnf}}{C_{bf}} = 0.53 + (0.0013T - 0.000001T^2) - 250\phi + 67640.9\phi^2 \quad (II.92)$$

En 2020, **Tiwari et al. [207]** ont proposé une formule pour calculer la capacité thermique des nanofluides en fonction du diamètre des nanoparticules, de la température, de la masse volumique des nanofluides et du fluide de base

$$\frac{C_{pnf}}{C_{bf}} = \left( 1 - 10.6364 \left( \frac{T}{T_0} \right)^{-0.771} \phi^{0.448} \left( \frac{d_{np}}{d_0} \right)^{-0.747} \left( \frac{C_{pnp}}{C_{pfb}} \right)^{1.027} \left( \frac{\rho_{nf}}{\rho_{fb}} \right)^{-2.742} \right) \quad (II.93)$$

où  $C_{bf}$  est la chaleur spécifique du fluide de base qui est dépendante de plusieurs paramètres tels que la température et le fluide de base qui peut être déterminée par les formules suivantes :

La chaleur spécifique du fluide de base du Dowtherm A ( $C_{pfd}$ ) est définie comme suit [175]:

$$C_{pfd} = -2.364 * 10^3 + 3.946 * 10 * T - 1.703 * 10^{-1} * T^2 + 3.904 * 10^{-4} * T^3 - 4.422 * 10^{-7} * T^4 + 1.979 * 10^{-10} * T^5 * 10^{-3} \quad (II.94)$$

La chaleur spécifique du fluide de base du Therminol VP-1( $C_{pft}$ ) est définie comme suit [136] :

$$C_{pft} = 2.125 * 10^3 - 11.017 * T + 0.049862 * T^2 - 7.7663 * 10^{-5} * T^3 + 4.394 * 10^{-8} * T^4 \quad (II.95)$$

La chaleur spécifique du fluide de base de Syltherm 800 ( $C_{pfs}$ )est définie comme suit [137] :

$$C_{pfs} = 1.10787 + 1.70736 * 10^{-3} * T \quad (II.96)$$

En 2021 , **Yuguo GAO et al. [202]** ont développé une corrélation pour calculer la capacité thermique des nanofluides composées de  $Al_2O_3$ + Graphène dispersés dans l'eau.

$$C_{pnf} = 3.918 - 218.3 * \phi + 0.006596 * T + 0.00003185 * \phi^2 + 5.278 * \phi * T - 0.000535 * T^2 \quad (II.97)$$

### II.3. Description générale du PTC conventionnel

Généralement, la centrale solaire à concentration est composée de plusieurs modules et de nombreux panneaux qui sont placés linéairement en série. Ils sont reliés les uns aux autres dans une configuration parallèle, cette conception crée le champ solaire total. Le module a habituellement une longueur proche de 10 m et globalement chaque série compte environ 10 à 15 modules dans les centrales solaires à concentration.

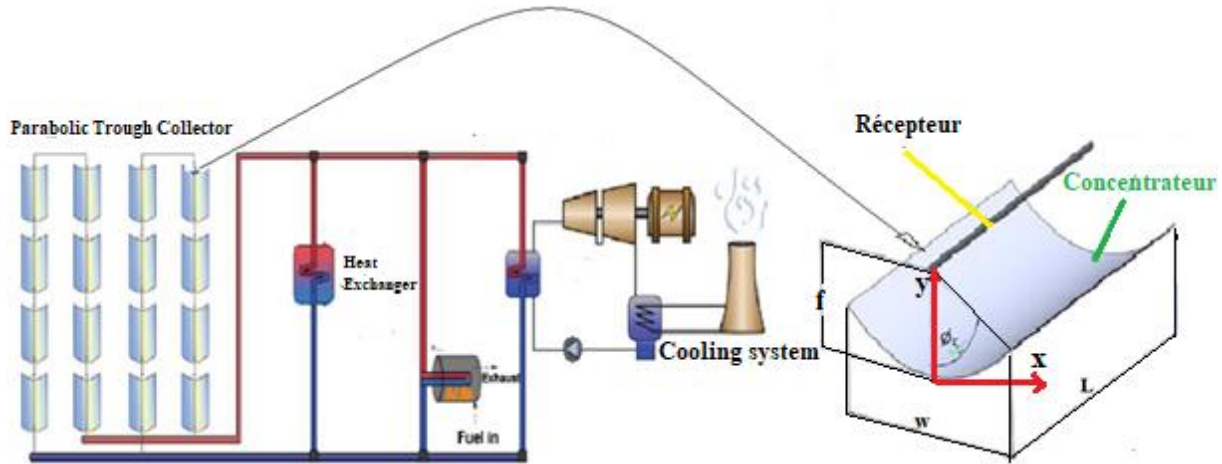


Figure II. 6: Centrale solaire à concentrateurs cylindro-paraboliques (PTC).

La configuration géométrique de la forme parabolique est définie par la formule suivante [30] :

$$y = \frac{x^2}{4 \cdot f} \quad (\text{II. 98})$$

L'angle d'ouverture  $\phi_r$  est déterminé à partir de l'ouverture ( $W$ ) et de la distance focale ( $f$ ).

$$\phi_r = \arctan \left[ \frac{8 \cdot \frac{f}{W}}{-1 + 16 \cdot \left(\frac{f}{W}\right)^2} \right] \quad (\text{II. 99})$$

Le rapport de concentration géométrique ( $C$ ) est défini comme le rapport entre l'ouverture du collecteur ( $A_a$ ) et la surface de l'absorbeur ( $A_0$ ) :

$$C = \frac{A_a}{A_0} \quad (\text{II. 100})$$

où  $A_a$  est l'ouverture totale du collecteur donné par le produit de la largeur ( $W$ ) et de la longueur ( $L$ ) est donné comme suit :

$$A_a = W \cdot L \quad (\text{II. 101})$$

La surface extérieure de l'absorbeur ( $A_a$ ) est la surface intérieure du tube donnée par cette formule :

$$A_0 = \pi \cdot D_{in} \cdot L \quad (\text{II. 102})$$

$D_{in}$  est le diamètre intérieur du tube récepteur.

### II.3.1. Modélisation thermique

Le rendement thermique ( $\eta_{th}$ ) est donné par le rapport entre la chaleur utile ( $Q_u$ ) et le rayonnement solaire direct disponible ( $Q_s$ ) donné comme suit [208] :

$$\eta_{th} = \frac{Q_u}{Q_s} \quad (\text{II. 103})$$

La production de chaleur utile ( $Q_u$ ) peut être obtenue en faisant le bilan énergétique du volume de fluide, elle peut être déterminée par cette formule [209]:

$$Q_U = m \cdot C_p \cdot (T_{out} - T_{in}) \quad (\text{II. 104})$$

L'irradiation solaire disponible sur l'ouverture du capteur ( $Q_s$ ) est donnée par le produit de la surface de l'ouverture ( $A_a$ ) et du rayonnement solaire direct ( $G_b$ ) [30]:

$$Q_s = A_a \cdot G_b \quad (\text{II. 105})$$

Les pertes thermiques de l'absorbeur vers le couvercle (flux radiatif net), sont définies comme les pertes thermiques par rayonnement du tube de l'absorbeur vers le couvercle [210] :

$$Q_{ab-cou} = A_o \cdot \sigma \cdot \frac{T_r^4 - T_c^4}{\frac{1}{\varepsilon_r} + \frac{1 - \varepsilon_c}{\varepsilon_c} \cdot \frac{A_r}{A_c}} \quad (\text{II. 106})$$

où ( $\sigma$ ) est la constante de Stefan-Boltzmann qui est égale à  $5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$ , ( $\varepsilon_r=0.86$ ) et ( $\varepsilon_c=0.000327 \cdot T_r - 0.065971$ ) sont respectivement, l'émissivité de l'absorbeur et l'émissivité de la couverture.

Les pertes thermiques de la couverture vers l'ambiance ( $Q_{loss}$ ) sont présumées être les mêmes que celles de l'absorbeur vers la couverture. Il y a à la fois des pertes thermiques par rayonnement et par convection de la couverture vers le milieu ambiant [209] qui est donné par cette formule :

$$Q_{co-amb} = A_o \cdot \sigma \cdot \varepsilon_c \cdot (T_c^4 - T_{sky}^4) + A_o \cdot h_{out} \cdot (T_c - T_{am}) \quad (\text{II. 107})$$

où  $T_c$  la température moyenne de la couverture,  $T_{am}$  la température ambiante et  $T_{sky}$  la température du ciel. Cette température du ciel peut être déterminée par l'équation suivante [211]:

$$T_{sky} = 0.0552 \cdot T_{am}^{1.5} \quad (\text{II. 108})$$

Le  $h_{out}$  est le coefficient de transfert de chaleur entre la couverture et le milieu ambiant, peut être obtenu à l'aide de la formule suivante [212] :

$$h_{out} = 4 \cdot V_{wind}^{0.58} \cdot D_o^{-0.42} \quad (II. 110)$$

L'équation ci-dessus peut être utilisée pour un écoulement transversal sur des objets cylindriques et elle fait appel à la vitesse du vent ( $V_{wind}$ ) et au diamètre extérieur du couvercle ( $D_o$ ).

### II.3.2. Modélisation optique

Le bilan énergétique de l'absorbeur montre que le rayonnement solaire absorbé ( $Q_{abs}$ ) est décomposé en chaleur utile ( $Q_u$ ) et en perte thermique ( $Q_{loss}$ ). Il est donné par l'équation suivante [74]:

$$Q_{abs} = Q_u + Q_{loss} \quad (II. 111)$$

L'énergie solaire absorbée ( $Q_{abs}$ ) peut-être exprimée en fonction du rayonnement solaire disponible ( $Q_s$ ) et du rendement optique du capteur solaire ( $\eta_{opt}$ ).

$$Q_{abs} = \eta_{opt} * Q_s \quad (II. 112)$$

L'efficacité optique maximale ( $\eta_{opt}$ ) est le résultat de différents critères. Chaque paramètre concerne une optique différente tels que l'absorbance de l'absorbeur ( $\alpha=0.86$ ), le facteur d'interception ( $\gamma$ ) est généralement proche de 1 pour les conceptions commerciales optimisées, la transmittance de la couverture ( $\tau=0.95$ ) et la réflectance totale ( $\rho_{tot}$ ) prend des valeurs proches de 80-85%. Enfin, l'efficacité optique maximale d'un PTC typique est d'environ 75 % [30]. L'équation est donnée comme suit :

$$\eta_{opt} = \alpha * \tau * \gamma * \rho_{tot} \quad (II. 113)$$

### II.3.3. Modélisation hydraulique

La modélisation hydraulique est importante afin d'évaluer la perte de charge ( $\Delta p$ ) et le travail de pompage nécessaire ( $W_p$ ) [30][104].

$$\Delta p = f_r \cdot \frac{L}{D_{ri}} \cdot \left( \frac{1}{2} \rho \cdot U^2 \right) \quad (II. 114)$$

où  $f_r$  est le facteur de friction peut être évalué en utilisant l'équation (II.115) pour un écoulement turbulent.

$$f_r = 0.184 * R_e^{-0.2} \quad (II. 115)$$

La vitesse moyenne du fluide ( $U$ ) est exprimée comme suit :

$$U = \frac{m}{\rho \cdot \frac{\pi}{4} \cdot D_i^2} \quad (II. 116)$$

Le travail de pompage ( $W_p$ ) est calculé comme suit [112]:

$$W_p = \frac{m \cdot \Delta p}{\rho} \quad (\text{II. 117})$$

Le transfert de chaleur de l'absorbeur au fluide de travail est modélisé en employant le coefficient de transfert de chaleur **h**. Ainsi, la quantité de chaleur utile ( $Q_U$ ) peut être écrite comme suit :

$$Q_U = A_{ro} \cdot h \cdot (T_r - T_m) \quad (\text{II. 118})$$

La température moyenne du fluide ( $T_m$ ) peut être calculée comme suit :

$$T_m = \frac{T_{in} + T_{out}}{2} \quad (\text{II. 119})$$

Le coefficient de transfert de chaleur (**h**) peut être déterminé en appliquant la formule suivante :

$$h = \frac{N_u \cdot k}{D_{ri}} \quad (\text{II. 120})$$

Le nombre de Nusselt ( $N_u$ ) peut être exprimé en tenant compte du nombre de Prandtl ( $Pr$ ) et du nombre de Reynolds ( $Re$ ), conformément au modèle de le modèle de Dittus-Boelter [213]:

$$N_u = 0.023 \cdot Re^{0.023} Pr^{0.4} \quad (\text{II. 121})$$

#### II.3.4. Efficacité du champ solaire

Le ACS (Assemblage de Collecteur Solaire) est traité come un noud de calcul indépendant dans la boucle, et les valeurs de performance sont déterminées indépendamment pour chaque SCA. L'efficacité du champ solaire comprend les efficacités suivantes :

$$\eta_{cs} = \sum_{i=1}^{N_{ACS}} \eta_{geo} \cdot \eta_{opt} \cdot \eta_{iam} \cdot \eta_{th} \cdot \eta_{field} \quad (\text{II.122})$$

$N_{ACS}$  est le nombre du collecteur dans le champ ;  $\eta_{opt}$  est le rendement optique ;  $\eta_{geo}$  efficacité géométrique (la sensibilité) est la mesure du facteur de transmission du flux de rayonnement ;  $\eta_{iam}$  est l'angle d'incidence modifier (IAM) représentant un mélange d'effets optiques et géométriques ;  $\eta_{th}$  est le rendement thermique ;  $\eta_{field}$  est l'efficacité du champ donnée par :

$$\eta_{field} = \eta_{avail} \cdot \eta_{intco} \cdot \eta_w \quad (\text{II.123})$$

$\eta_w$  est la perte du' au vent.

$$\eta_w = \begin{cases} 1 & \text{si } v < 15 \text{ km/h} \\ -0.0083 \cdot v + 1.125 & \\ 0 & \text{si } v > 45 \text{ km/h} \end{cases} \quad (\text{II.123})$$

où  $v$  est la vitesse du vent ; l'efficacité moyenne de disponibilité  $\eta_{avail}$  est environ 0.995 ; les pertes dans les interconnexions des tubes absorbantes sont prises en compte par l'efficacité d'interconnexion  $\eta_{intco}$  avec une valeur de 0.99.

### II.3.5. Bilan énergétique

Pour produire de l'électricité, l'énergie thermique recueillie par le champ solaire doit être transformée à l'aide d'un cycle de puissance approprié. Plusieurs cycles d'alimentation sont disponibles pour cette application. Les cycles les plus couramment utilisés sont le cycle de Brayton, le cycle de Rankine à vapeur, et le cycle de Stirling.

Le cycle de Rankine est indispensable lorsqu'une centrale solaire à concentration est employée pour produire de la vapeur (exemple : technologie de Fresnel linéaire, tour solaire et de miroirs cylindro-paraboliques), le cycle de Brayton est nécessaire si un gaz est détendu dans une turbine à gaz ; exemple dans une centrale hybride cylindro-parabolique, le cycle de Stirling permet de décrire les processus thermodynamiques de la technologie des miroirs paraboliques Dish.[214]

**Cycle de Carnot :** ce cycle est constitué de 4 secteurs, dont deux sont adiabatiques et deux isothermes, dans lesquels le fluide de travail change d'état au cours d'un même cycle mais revient à son état initial. En outre, il y a un support isolant ainsi qu'un réservoir chaud et un réservoir froid. La température du réservoir froid est indiquée par  $T_H$  et La température du réservoir chaud est désignée par  $T_c$ .

Le cycle de Carnot peut être défini en notation pression-volume (diagramme p-v) et en notation température-entropie (diagramme T-s) (figure II.7):

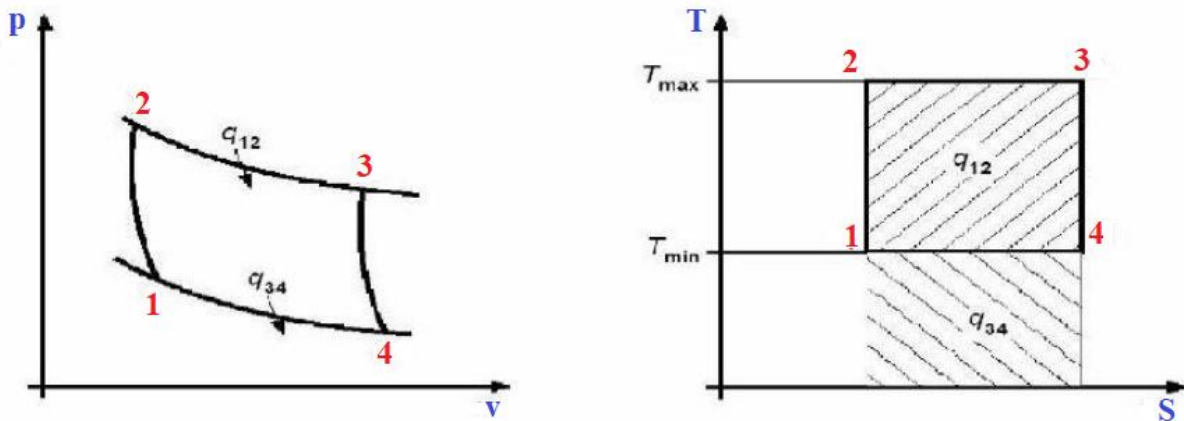


Figure II.7: Diagrammes pression-volume (p-v) et température-entropie (T-s) du cycle de Carnot

Le rendement de Carnot est le rendement thermique d'un système soumis à un cycle de puissance réversible puissance réversible fonctionnant entre des réservoirs thermiques aux températures  $T_H$  et  $T_C$  et peut être calculé selon l'équation suivante [214] [215].

$$\eta_{max} = 1 - \frac{T_c}{T_H} \quad (II.124)$$

**Cycle de Rankine :** Les cycles de production d'électricité à partir de vapeur sont basés sur le cycle idéal de Rankine, dans sa forme la plus simple (1-Détente isentropique ; 2-Rejet de chaleur ;3- Compression isentropique ; 4-Ajout de chaleur) figure II.8.

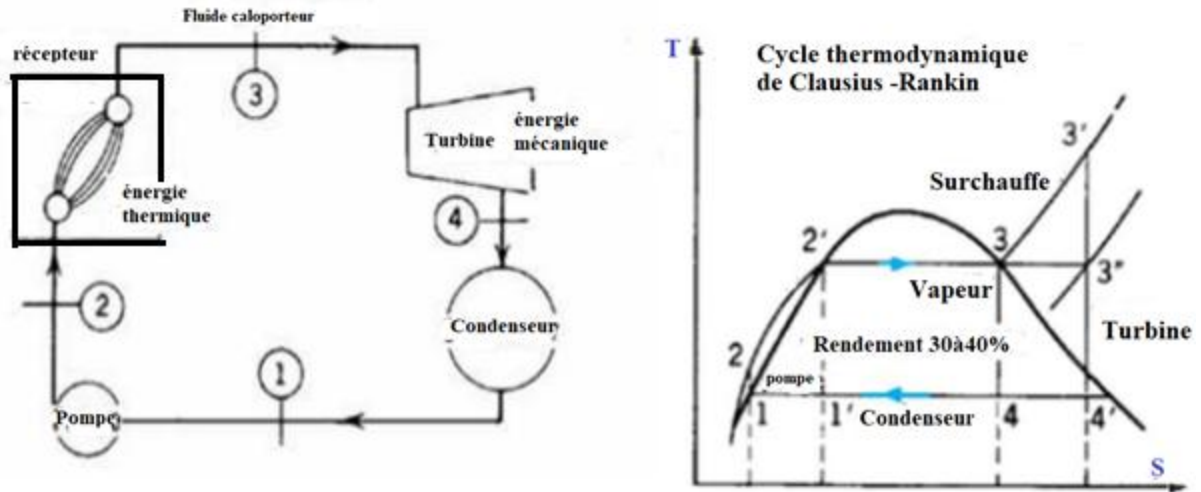


Figure II.8 : Les composants associés au processus du cycle Rankine à vapeur.

Le diagramme (T-S) est un diagramme très courant qui est utilisé pour l'analyse des cycles du système de transfert d'énergie. Dans un diagramme (T-S), la chaleur  $Q$  transférée au cours d'un processus réversible interne est donnée par la formule suivante :

$$Q_{int,rev} = \int_1^2 T \cdot ds \quad (II.125)$$

Le rendement thermodynamique du cycle est donné par le rapport suivant [216]:

$$\eta_{cycle} = \frac{\dot{W}}{\dot{Q}} \quad (II.126)$$

où  $\dot{Q}$  est l'énergie thermique requise et  $\dot{W}$  est le travail fourni par le cycle.

**Cycle de Brayton :** Le cycle de Brayton est considéré comme un cycle de turbine à gaz idéal et un cycle de référence, dans lequel les pertes par dissipation et par frottement et les pertes de charge dans les échangeurs de chaleur ou la chambre de combustion sont négligées. Il est composé de quatre processus suivants : Compression isentropique dans le compresseur, Addition isobare de chaleur provenant du processus de combustion, Expansion isentropique dans la turbine et Élimination isobare de la chaleur[214].

L'efficacité thermique du cycle est donnée par la formule suivante [216]:

$$\eta_{brayton} = \frac{w_{net}}{q_{in}} = 1 - \frac{q_{out}}{q_{in}} = 1 - \frac{c_p(T_4 - T_1)}{c_p(T_4 - T_1)} = 1 - \frac{T_1((T_4/T_1) - 1)}{T_2((T_3/T_2) - 1)} \quad (II.127)$$

Où  $w_{net}$  le travail net est donné par la formule suivante :

$$W_{net} = W_{turb,out} - W_{comp,in} \quad (II.128)$$

$P_1 = P_4$  et  $P_2 = P_3$  donc :

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{(k-1)/k} = \left(\frac{P_3}{P_4}\right)^{(k-1)/k} = \frac{T_3}{T_4} \quad (II.129)$$

Où  $k$  est le rapport de la capacité calorifique à pression constante  $c_p$  et à volume constant  $c_v$  :

$$k = \frac{c_p}{c_v} \quad (\text{II.130})$$

La substitution de ces équations à la relation d'efficacité thermique et la simplification donnent :

$$\eta_{brayton} = 1 - \frac{1}{r_p^{(k-1)/k}} \quad (\text{II.131})$$

Les centrales solaires thermiques sont généralement mises en action grâce à un cycle à vapeur similaire au cycle de Brayton, utilisant l'eau comme fluide de travail.

La puissance thermique ( $P_{th}$ ) de la turbine à vapeur est donnée par :

$$P_{th} = \dot{m} \cdot (h_3 - h_4) \quad (\text{II.132})$$

Où  $\dot{m}$ ,  $h_3$  et  $h_4$  sont respectivement le débit massique de la vapeur, les enthalpies spécifiques de la vapeur avant et après la turbine.

Le taux de transfert de chaleur ( $Q_{cond}$ ) qui est extraite par le condenseur est calculé par [217] [214]:

$$Q_{cond} = \dot{m} \cdot (h_4 - h_1) \quad (\text{II.133})$$

Où  $h_4$  et  $h_1$  sont respectivement les enthalpies spécifiques de la vapeur avant et après le condenseur.

La puissance électrique de la pompe d'alimentation est donnée par [217]:

$$Q_v = \dot{m} \cdot (h_3 - h_2) \quad (\text{II.134})$$

Où  $h_3$  et  $h_2$  sont respectivement les enthalpies spécifiques de la vapeur avant et après le générateur de vapeur.

Alors l'expression de l'efficacité thermique de cycle de puissance ( $\eta_{PC}$ ) est calculée par la formule suivante [217]:

$$\eta_{PC} = \frac{P_{th}}{Q_v} = \frac{(h_3 - h_4)}{(h_3 - h_2)} \quad (\text{II.135})$$

$P_{th}$  est la puissance thermique de la turbine à vapeur.

L'efficacité nette ( $\eta_{net}$ ) de la centrale est déterminé par :

$$\eta_{net} = \frac{P_{net}}{Q_v} \quad (\text{II.136})$$

Où  $P_{net}$  est la puissance nette du bloc de puissance de la centrale.

La centrale thermique nécessite une puissance électrique pour alimenter des composants auxiliaires comme le système de poursuite solaire, la pompe du champ solaire, etc.

La puissance de tous ces parasites ( $P_{para}$ ) s'exprime par :

$$P_{para} = P_{para,f} + P_{para,p} + P_{para,s} + P_{para,a} \quad (\text{II.137})$$

$P_{para,f}$  est la puissance parasite du champ solaire,

$P_{para,p}$  est la puissance parasite du block de puissance,

$P_{para,s}$  est la puissance parasite du système de refroidissement,

$P_{para,a}$  est la puissance parasite du autres systèmes,

L'efficacité nette (rendement) de la centrale thermique est donnée par la formule suivante [214]:

$$\eta_{net} = \frac{P_{net} - P_{para}}{Q_v} \quad (II.138)$$

### II.3.6. Capacité facteur (CF)

La capacité facteur est souvent utilisée. Elle est définie comme la fraction de temps pendant lequel une centrale fonctionne à pleine puissance (ou nominale) ; elle est donc donnée par la formule suivante [218]:

$$CF = \frac{\epsilon P_e}{\tau P_c} \quad (II.139)$$

où  $\epsilon$  est le facteur de conversation (kWh en J) et  $\tau$  est le temps (secondes),  $P_c$  est Puissance électrique de la centrale lorsque elle fonctionne à sa capacité maximale,  $P_e$  étant l'électricité produite grâce à l'énergie solaire donnée par la formule suivante [219]:

$$P_e = G_h \cdot \eta_c \cdot \eta_t \cdot \eta_m \quad (II.140)$$

où  $G_h$  est l'irradiation solaire,  $\eta_c$  est la collecte qu'est égale à 25% CSP et 12% pour le collecteur CST (Centrale Solaire à Tour),  $\eta_m$  est l'efficacité de la maintenance ( $\eta_m = 96\%$ ) et  $\eta_t$  est l'efficacité de la transformation donnée par la formule suivante [220]:

$$\eta_t = \left[ \eta_{opt} - \left( \frac{\tau F_g h}{\epsilon G_h} (T_A - T_{amb}) + \frac{\tau F_g \zeta \sigma}{\epsilon G_h} (T_A^4 - T_{am}^4) \right) \right] (96.1 - 1.4SM) \eta_{thr} \quad (II.141)$$

Où  $F_g$  est un facteur géométrique qui dépend de la concentration,  $h$  est le coefficient de pertes par convection,  $\zeta$  est l'émissivité de la surface de l'absorbeur,  $\sigma$  est la constante de Boltzmann,  $T_A$  est la température de l'absorbeur,  $T_{amb}$  est la température ambiante,  $\eta_{thr}$  est l'efficacité du cycle thermodynamique qui est donnée par la formule suivante :

$$\eta_{thr} = Z \left( 1 - \frac{T_{amb}}{T_A} \right) \quad (II.142)$$

$Z$  est le facteur d'écart par rapport à l'idéalité donné par  $Z=0.6$ ,  $\zeta$  est de l'émissivité.

## II.5. Conclusion

Les nanofluides en tant que fluides de transfert de chaleur ont acquis une certaine popularité depuis leur apparition à la fin des années 1990. Par ailleurs, les chercheurs essayent régulièrement de développer des modèles qui permettent d'avoir des résultats précis et fiables

dans le développement des applications des nanofluides. Les propriétés thermophysiques tels que la masse volumique, la conductivité thermique, la capacité thermique et la viscosité dynamique des fluides sont considérablement modifiés par la présence des nanoparticules et cette modification c'est en fonction de plusieurs paramètres à savoir le type du matériau, des particules et des fluides de base, leurs concentrations, leurs tailles, la température du milieu, etc.

Le mouvement brownien est lié à la taille nanométrique des nanoparticules. Il permet de minimiser les problèmes de sédimentations rencontrées lors de l'utilisation des particules plus grosses, diminuant ainsi le problème d'érosion dans les canaux. Finalement, nous avons présenté les différents modèles mathématiques qui ont été utilisés pour déterminer les performances optiques et thermiques et l'efficacité de la centrale solaire à concentrateurs cylindro-paraboliques.

---

## **Chapitre III : Étude des propriétés thermophysiques de nanofluides**

---

### III.1. Introduction

Dans cette partie, une simulation numérique sera réalisée pour analyser l'impact de la température et de la concentration des nanoparticules sur les propriétés thermophysiques de différents nanofluides (mono et hybrides). En premier lieu, nous allons examiner l'effet de l'intégration des nanoparticules uniques (mono) de  $Al_2O_3$  dans trois fluides de bases à savoir l'eau, Therminol VP-1 et Dowtherm A. Dans la deuxième partie, deux sortes de nanoparticules sont utilisées avec des concentrations différentes : pour le CuO est fixé à 1% et  $Al_2O_3$  variant de 0% à 4%, et trois fluides de base Therminol VP-1, Syltherm 800 et Dowtherm A ont été choisis pour entamer ce travail. A l'aide du code de calcul MATLAB, un programme a été développé en intégrant des modèles mathématiques qui nous permettent d'étudier l'évolution de chaque propriété thermophysique de chaque nanofluide comme la masse volumique, la conductivité thermique, la viscosité dynamique et cinématique, et la capacité thermique.

### III.2. Présentation des nanoparticules utilisées

Les nanoparticules  $Al_2O_3$  et CuO sont les plus utilisées dans plusieurs applications et recherches, en raison de leur stabilité, leur résistance à la chaleur, leur résistance à la corrosion, et leur dureté élevée. Leurs propriétés thermophysiques sont indiquées dans le [tableau III-1](#).

Tableau III.1 : Propriétés thermophysique des nanoparticules ( $Al_2O_3$ ) et (CuO) à  $T= 293$  K [221] [222].

Propriétés thermophysiques	CuO	$Al_2O_3$
Conductivité thermique (W/m.K)	33	40
Masse volumique ( $kg/m^3$ )	6000	3970
Capacité thermique (kJ/kg.K)	0.551	0.765

### III.3. Présentation des nanofluides (mono-hybrides) utilisés

Les quatre types de fluides de base examinés dans cette étude sont le Therminol VP-1, le Syltherm 800, le Dowtherm A et l'eau. Ces fluides huileux sont employés dans une variété d'applications comme fluides de transfert de chaleur en raison de leur résistance à la température élevée.

Dans ce qui suit, nous allons présenter les différents fluides utilisés dans notre travail.

**Syltherm 800** : est une huile de silicone conseillée pour une exploitation dans une plage de température inférieure ou égale à  $400^\circ C$ . Elle est très stable, elle peut être utilisée pendant longtemps dans de nombreux domaines tels que le traitement chimique, la pharmacie, fluide caloporteur dans les centrales solaires à concentration.

**Therminol VP1** : est un fluide synthétique de transfert de chaleur constitué de 73,5% d'oxyde de diphényle et de 25% de (C<sub>12</sub> H<sub>10</sub>) diphényle. Il est aussi utilisé dans de nombreux domaines comme les matières plastiques, le traitement hydraulique et les réactions chimiques. Il est employé dans une plage de température optimale allant de 12°C à 400°C.

**Dowtherm A** : est un fluide très stable thermiquement employé dans diverses applications (traitement de plastique, énergie solaire, produits pharmaceutiques et récupération de chaleur). Il fonctionne à la fois en phase liquide et en phase vapeur et ses qualités incluent une longue durée de vie et une large gamme de températures.

### III.4. Effet de la température et de la concentration des nanoparticules sur les propriétés thermophysiques des nanofluides (mono-hybrides)

Dans cette première partie, quatre types différents de nanofluides sont étudiés à savoir : Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> -Therminol VP-1, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> - Dowtherm A et Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – Eau. La concentration des nanoparticules de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> est varié de 1% à 4% . Le but de cette étude est d'examiner l'influence de la température de fonctionnement, la concentration des nanoparticules et le type de fluide de base sur les propriétés thermophysiques des nanofluides, en utilisant le code MATLAB. Le choix d'un meilleur fluide de travail nous permet de l'utiliser comme un fluide de transfert thermique dans les centrales solaires thermiques à concentration.

#### III.4.1. Nanofluides mono

##### III.4.1.1.Masse volumique

Les résultats de la simulation numérique de la masse volumique de deux nanofluides Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Dowtherm A, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> -Therminol VP-1 en fonction de la fraction volumique sont exposés sur les [figures III-1a-1b](#). Nous avons varié la température de 200°C à 400°C et la concentration des nanoparticules d'Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> de 0 à 4%. Nous avons constaté que la masse volumique augmente au fur et à mesure que la fraction volumique. Pour une concentration de 4% de nanoparticule le taux d'augmentation de la masse volumique des nanofluides Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Dowtherm A et Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Therminol VP-1 par rapport à leurs fluides de base purs sont 16,15% et 15,89%, respectivement .

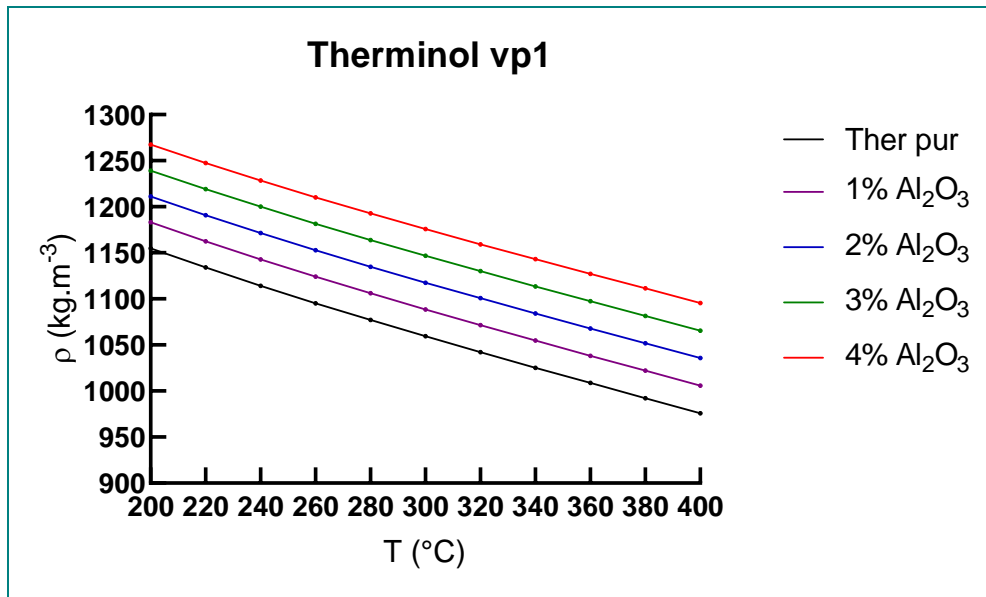


Figure III. 1a: Effet de la température et de la concentration des nanoparticules sur la masse volumique à base du Therminol VP-1.

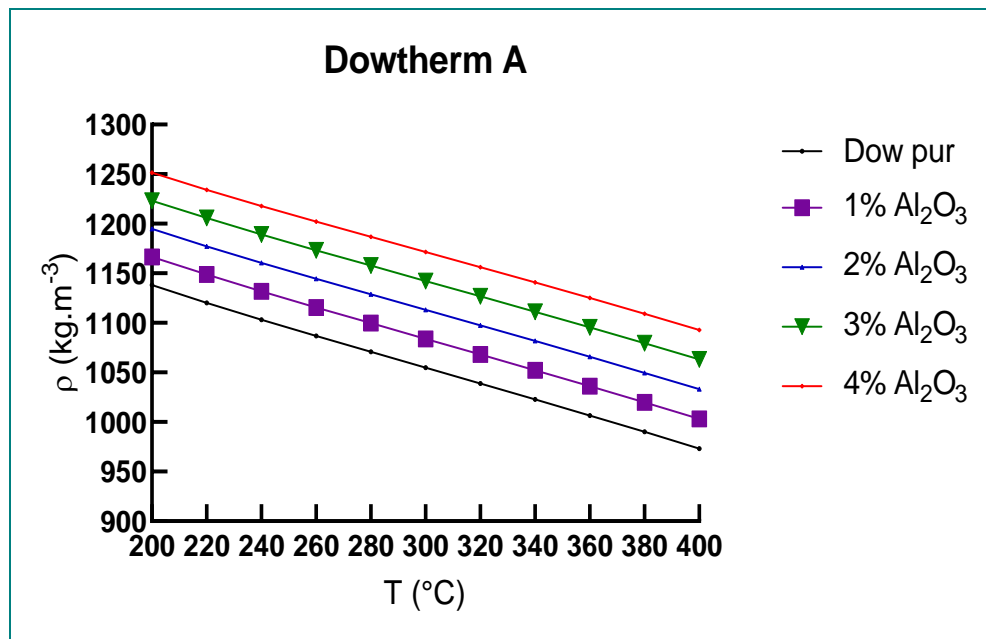


Figure III.1b: Effet de la température et de la concentration des nanoparticules sur la masse volumique à base du Dowtherm A.

### III.4.1.2. Conductivité thermique

Les conductivités thermiques des nanofluides à base du Therminol VP-1 et du Dowtherm -A sont illustrées sur les figures III-2a-2b, pour une valeur de la concentration en nanoparticules qui varie de 0 à 4 % . On constate clairement que les conductivités thermiques diminuent avec l'augmentation de la température. Par la suite, nous avons comparé chaque nanofluide à son fluide pur, et nous avons remarqué que les nanofluides ont une conductivité plus élevée que les fluides purs, et la présence de nanoparticule Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> augmente la

conductivité des huiles synthétiques. Nous observons également que le nanofluide  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Dowtherm A a une conductivité plus élevée que  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Therminol VP-1.

Pour les deux nanofluides, la conductivité thermique des nanofluides mono croît avec la fraction volumique. L'ajout des nanoparticules a un effet sur la conductivité thermique des nanofluides. Généralement, les avantages des nanofluides sont directement liés à l'amélioration de la conductivité thermique par l'ajout des nanoparticules.

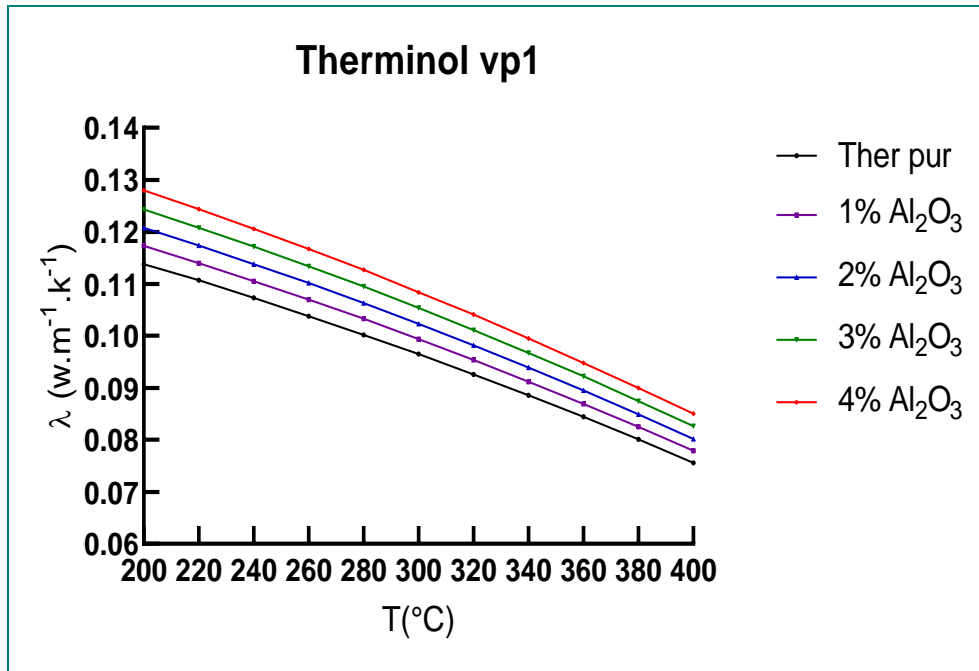


Figure III.2a: Conductivité thermique du nanofluide ( $\text{Al}_2\text{O}_3$  – Therminol VP-1) en fonction de la concentration des nanoparticules et de la température.

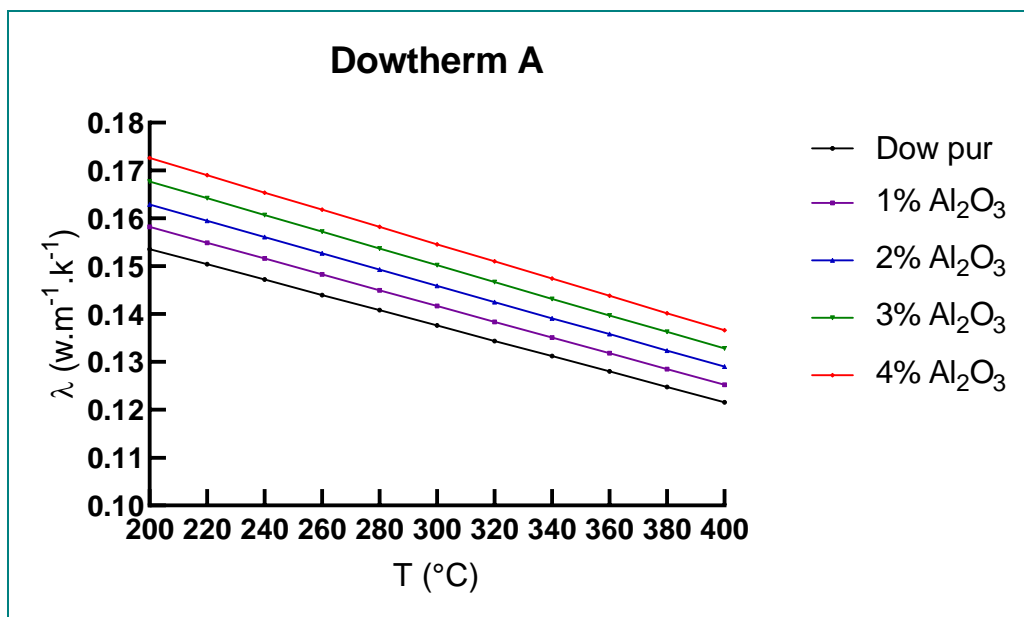


Figure III.2b: Conductivité thermique des nanofluides ( $\text{Al}_2\text{O}_3$  – Dowtherm A) en fonction de la concentration des nanoparticules et de la température.

### III.4.1.3. Viscosité dynamique

La propriété thermophysique la plus significative qui devrait être définie par le HTF (Heat Transfer Fluids) est la viscosité dynamique. Généralement, elle doit être la plus faible possible pour que la puissance de pompage devient plus faible, car la viscosité a un impact sur la vitesse du mouvement du fluide. Si le HTF est visqueux le déplacement sera lent. Pour tous les nanofluides, les valeurs de la viscosité sont indiquées sur les figures (III-3a-3b).

Les figures ci-dessous présentent les variations de la viscosité des nanofluides mono en fonction de la fraction volumique et de la température. Nous observons que la présence des nanoparticules provoquent l'augmentation de la viscosité dynamique du nanofluide, mais avec des valeurs différentes suivant la nature du fluide de base. Pour notre cas, la viscosité du nanofluide ( $\text{Al}_2\text{O}_3$  – Dowtherm A) est faible que le nanofluide ( $\text{Al}_2\text{O}_3$  – Therminol VP-1).

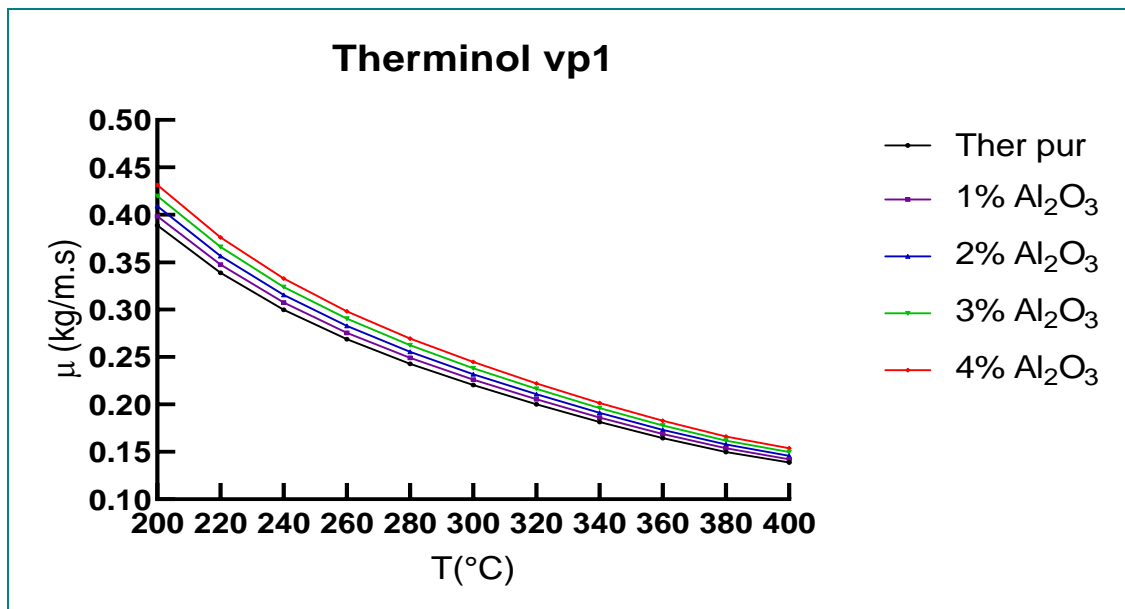


Figure III.3a: La viscosité du nanofluide ( $\text{Al}_2\text{O}_3$  – Therminol VP-1) en fonction de la fraction volumique et de la température.

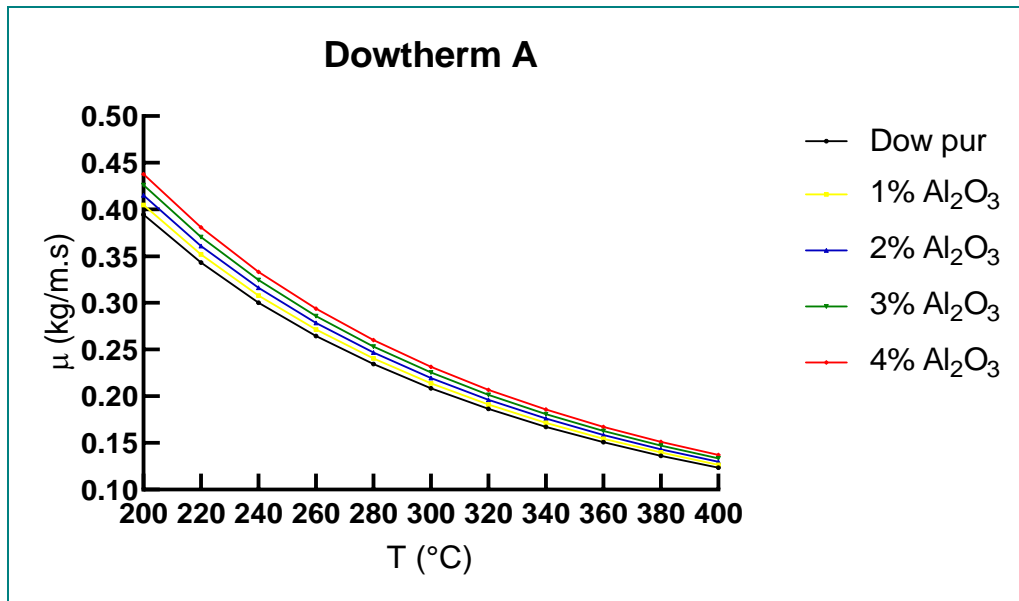


Figure III.3b: La viscosité du nanofluides ( Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – Dowtherm A) en fonction de fraction volumique et de la température.

#### III.4.1.4. Capacité thermique

La comparaison de la capacité thermique des nanofluides soit à base de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – Dowtherm A ou Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – Therminol VP-1 sont illustrées sur la figure (III-4). On remarque que l'augmentation de la température provoque l'amélioration de la capacité thermique des nanofluides, pour T=200°C , T=250°C, T= 300°C, T= 350°C et T= 400°C et à 4% de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> la capacité thermique des nanofluides à base du Therminol VP-1 est de 1.0217 , 1.2168 , 1.3567 , 1.4768 et 1.5935 kJ/kg.K, respectivement. La capacité thermique des nanofluides à base du Dowtherm A est de 1.195 , 1.4232, 1.5869, 1.7273 et 1.8638 kJ/kg.K, respectivement .

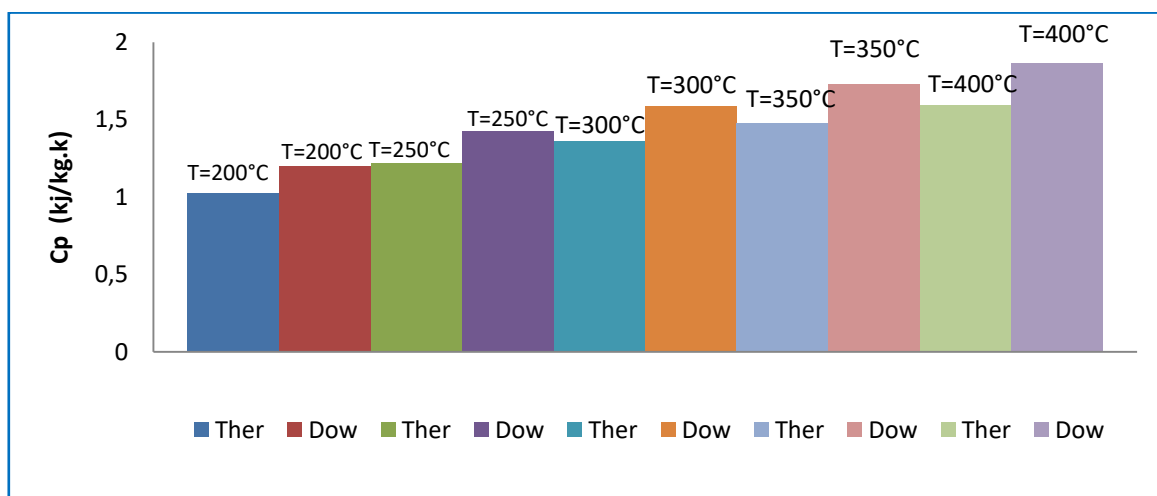


Figure III.4: Capacité thermique des nanofluides à base du Therminol VP-1 et du Dowtherm A en fonction de la température à φ=4% .

### III.4.2. Nanofluide (Eau - $\text{Al}_2\text{O}_3$ )

#### a) Masse volumique

La masse volumique du nanofluide  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Eau en fonction de la fraction volumique est illustrée sur la [figure III-5](#). Tout d'abord, nous avons varié la valeur de la fraction volumique d' $\text{Al}_2\text{O}_3$  de 0 à 4% et de la température de 200°C à 400°C. Il est clair que la masse volumique s'améliore lorsque la concentration des nanoparticules augmente. Pour une fraction volumique des nanoparticules  $\text{Al}_2\text{O}_3$  égale à 4% le pourcentage d'augmentation de la masse volumique du nanofluide  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Eau par rapport aux fluides de base pure est de 8,8%, 9,3%, 9,8% et 10,4% pour  $T=200^\circ\text{C}$ ,  $T=250^\circ\text{C}$ ,  $T=300^\circ\text{C}$ ,  $T=350^\circ\text{C}$  et  $T=400^\circ\text{C}$ , respectivement.

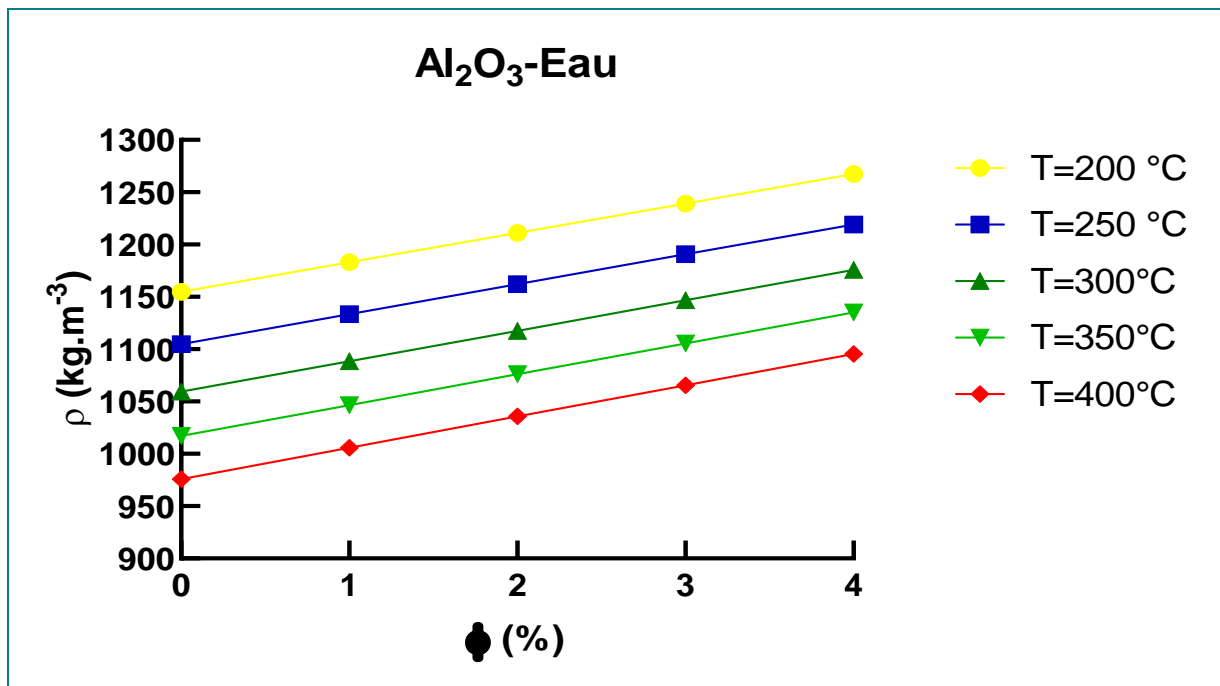


Figure III.5: Effet de la température et de la concentration des nanoparticules sur la masse volumique à base d'eau.

### b) Conductivité thermique :

Les résultats de la simulation numérique de la conductivité thermique du nanofluide qui concernent le fluide à base d'eau, indiquent que les conductivités thermiques du nanofluide augmente avec la concentration des nanoparticules ( $\phi = 1\%$  à  $4\%$ ). On remarque aussi et surtout que les valeurs des conductivités thermiques du nanofluide (Eau-  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) en fonction de la température sont plus importantes que celles de l'eau pure [figure \(III.6a\)](#), ce qui indique que le nanofluide est un bon conducteur, puisque le transfert de chaleur s'améliore avec l'augmentation de la conductivité thermique des fluides.

L'amélioration et l'augmentation de la conductivité thermique du nanofluide (Eau-  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) par rapport à l'eau pure est très importante. La valeur maximale d'amélioration obtenue pour quatre concentrations :  $1\%$ ,  $2\%$ ,  $3\%$  et  $4\%$  par rapport à leurs fluides de base purs sont respectivement égale à  $3\%$ ,  $6\%$ ,  $9\%$ , et  $10\%$  à  $T = 400^\circ\text{C}$ . On remarque aussi que la conductivité thermique du nanofluide (Eau-  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) est plus élevée que celle de l'eau pure.

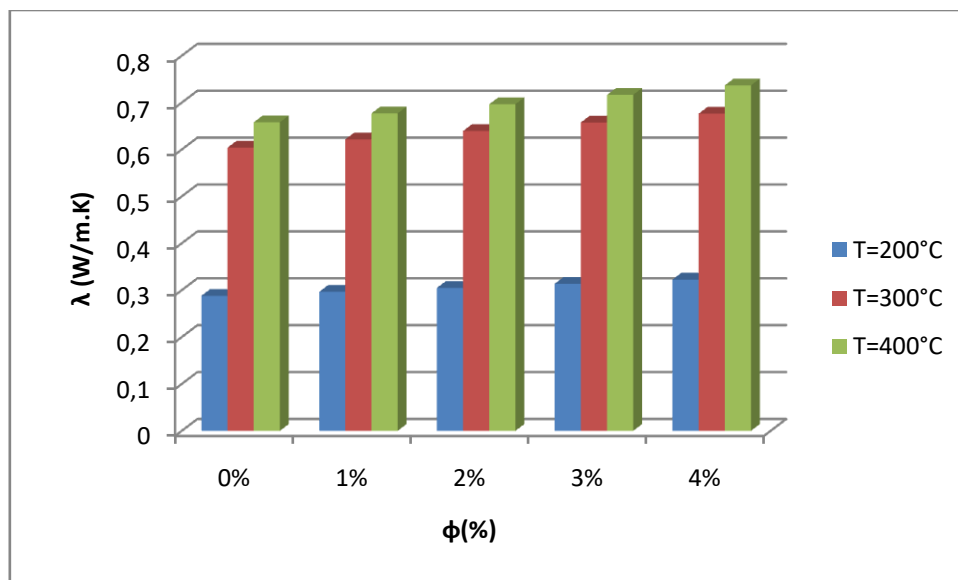


Figure III.6a: Effet de la température et de la concentration des nanoparticules sur la conductivité thermique du nanofluide à base d'eau.

### c) Viscosité dynamique

La [figure III.7](#) représente l'impact de la température et de la concentration des nanoparticules  $\text{Al}_2\text{O}_3$  sur la viscosité dynamique. Nous constatons que la viscosité dynamique du nanofluide diminue avec l'augmentation de la température, car il existe une relation inverse entre eux. Cet effet de la température sur la viscosité du nanofluide a été attribué à la réduction des forces intermoléculaires, ce qui rend l'écoulement plus facile. On constate aussi que lorsque la température est égale à  $300^\circ\text{C}$ , la viscosité du nanofluide tend vers zéro pour toutes les valeurs de la concentration des nanoparticules.

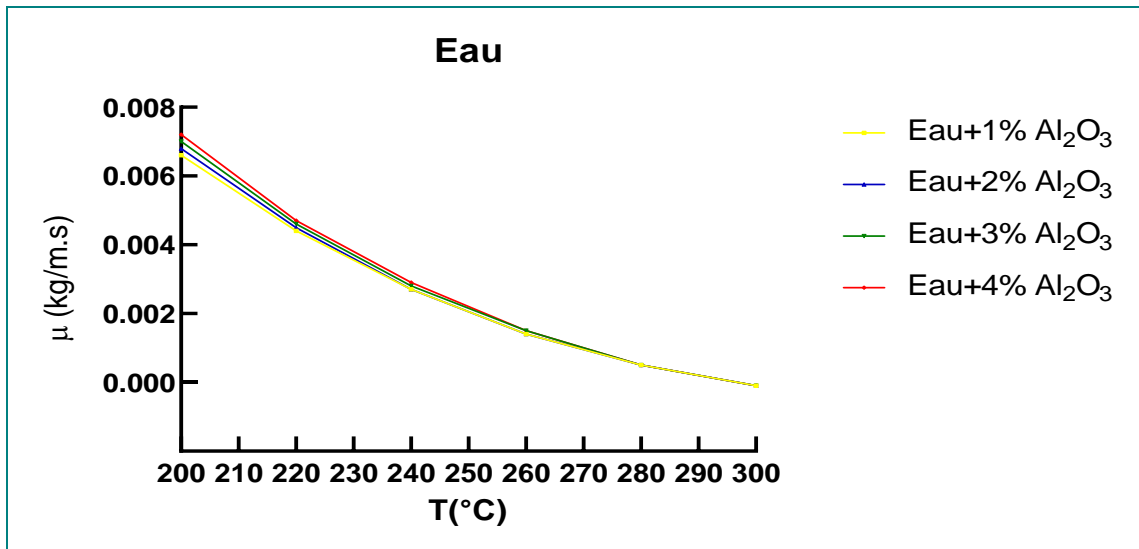


Figure III.7: Effet de la température et de la concentration des nanoparticules sur la viscosité dynamique du nanofluide à base d'eau.

**d) Capacité thermique**

La **figure III.8** montre la capacité thermique du nanofluide (Eau-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) et son évolution en fonction de la concentration des nanoparticules d'Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Nous l'avons comparé à celle de l'eau pure et pour différentes concentrations. La chaleur spécifique du nanofluide généralement comme nous avons constaté dans les résultats précédents augmente avec l'augmentation de la température et diminue avec l'augmentation de la concentration des nanoparticules. Cette diminution se traduit par la présence des nanoparticules à l'intérieur du fluide de base, ce qui signifie que le nanofluide stocke une plus petite quantité de chaleur que l'eau pure.

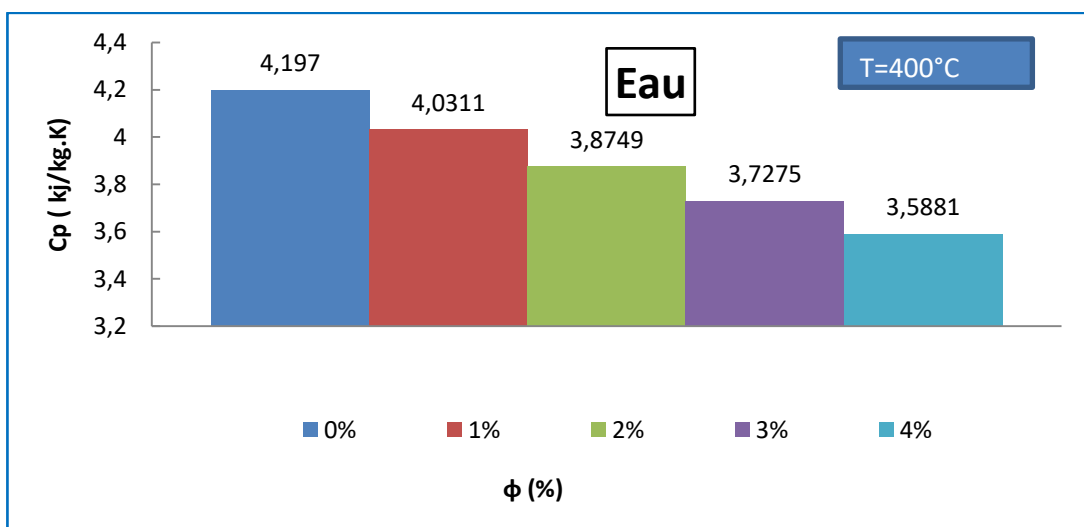


Figure III.8: Effet de la concentration des nanoparticules sur la capacité thermique du nanofluide à base d'eau.

### III.4.3. Nanofluides Hybrides

Dans cette deuxième partie, nous allons étudier l'impact de la température et de la fraction volumique sur les propriétés thermophysiques des nanofluides hybrides tels que le  $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{CuO}/\text{Syltherm 800}$ , le  $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{CuO}/\text{Therminol VP-1}$  et le  $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{CuO}/\text{Dowtherm A}$ .

#### III.4.3.1. Masse volumique

Les résultats obtenus montrent que la masse volumique des nanofluides hybrides augmente avec l'augmentation de la fraction volumique. Cette augmentation peut être expliquée physiquement par le fait que l'ajout d'une certaine masse dans un liquide automatiquement son volume augmente en parallèle. Ensuite, pour étudier l'influence de la concentration des nanoparticules sur la masse volumique, nous avons fixé la température à  $T=400^\circ\text{C}$  et à  $200^\circ\text{C}$ , la concentration de  $\text{CuO}$  à 1% et la concentration de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  variée jusqu'à 4%, comme il est illustré sur la [figure III.9](#). Il est montré aussi que la masse volumique augmente proportionnellement avec la fraction volumique. Le taux d'amélioration de la masse volumique hybride de ( $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{CuO}/\text{Syltherm 800}$ ), ( $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{CuO}/\text{Therminol VP-1}$ ) et ( $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{CuO}/\text{Dowtherm A}$ ) à  $T=400^\circ\text{C}$  est de 9,8%, 8,1%, et 8,2%, respectivement, par rapport à leurs fluides de base purs. Par conséquent, il est constaté également que l'augmentation de la température entraîne une diminution linéaire de la masse volumique, comme le montre la [figure III.10](#).

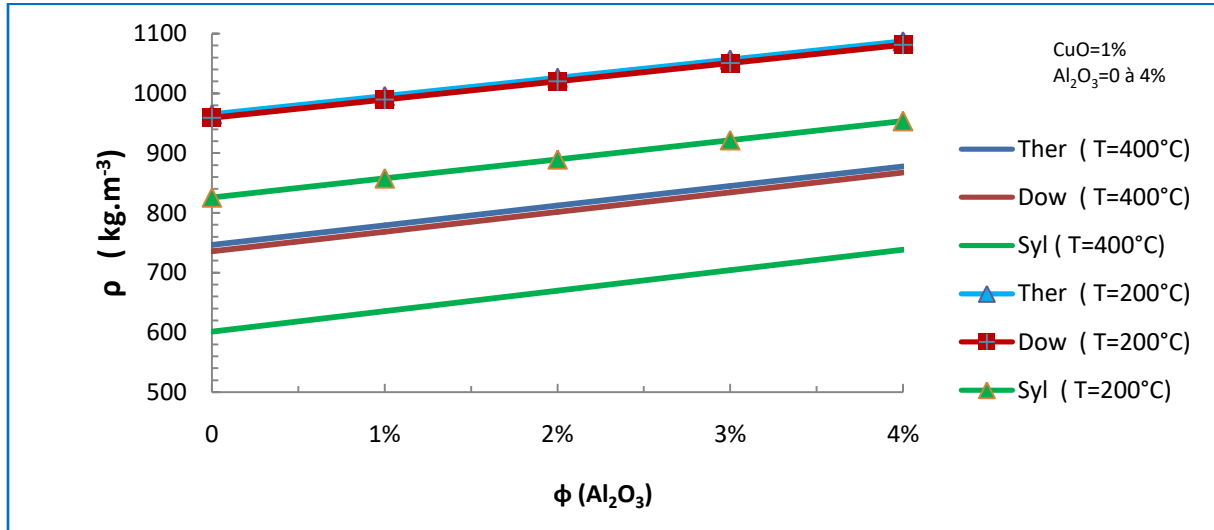


Figure III. 9: Effet de la fraction volumique sur la masse volumique des nanofluides hybrides

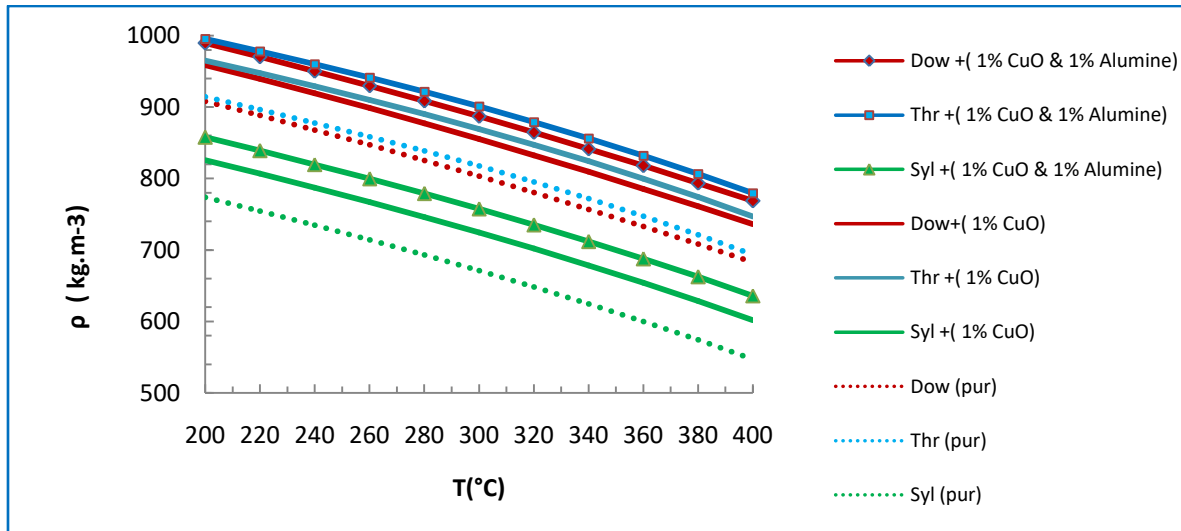


Figure III. 10: Effet de la température sur la masse volumique des nanofluides hybrides

### III.4.3.2. Viscosité dynamique et cinématique

L'impact de la température et de la fraction volumique sur la viscosité dynamique et cinématique des nanofluides hybrides sont présentés sur les figures III-11, III-12 et III-13 pour des concentrations et de la température suivantes : (CuO =1%, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>=1% et T= 200°C à 400°C). Il a été observé que l'augmentation de la température engendre une diminution de la viscosité dynamique et cinématique. On peut également observer que la viscosité dynamique et cinématique du nanofluide mono est inférieure à celle des autres nanofluides, ce qui est dû à l'augmentation de la température. Cette diminution de la viscosité a été considérée comme un avantage dans des applications industrielles ou dans les centrales solaires à concentration.

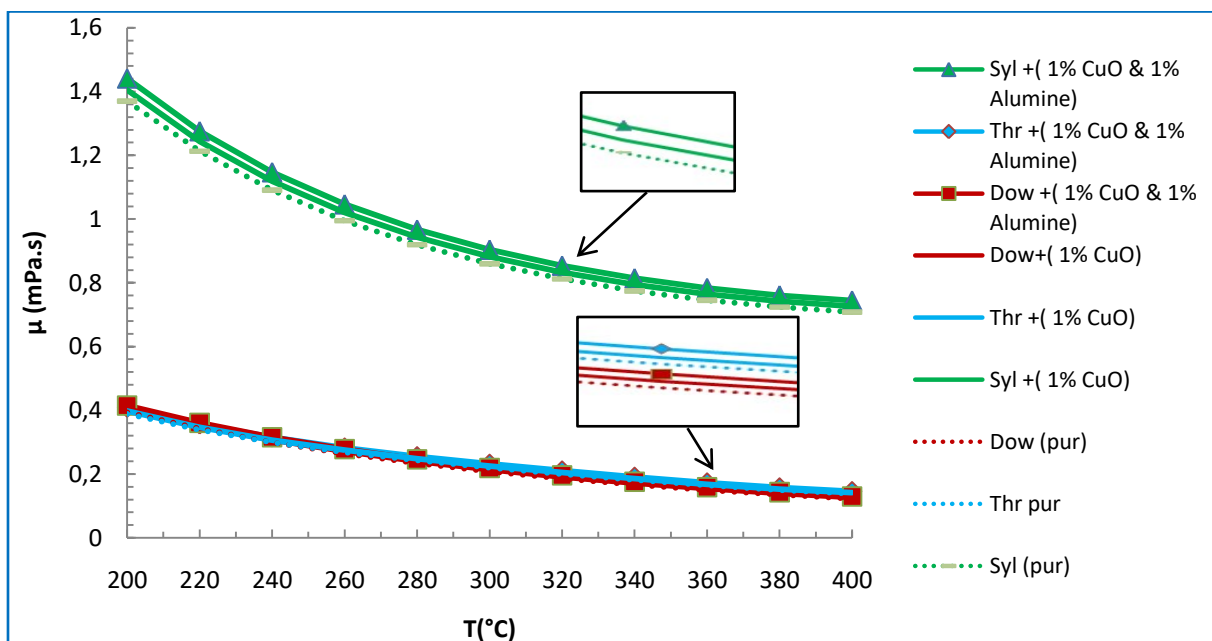


Figure III. 11: Effet de la température sur la viscosité dynamique des nanofluides hybrides

La figure III.13 montre l'influence de la concentration des nanoparticules sur le comportement de la viscosité dynamique des nanofluides hybrides. Tout d'abord nous avons fixé la température à 400 °C, une concentration de CuO = 1 % et la concentration des nanoparticules Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> varié de 0 % à 4 %, on constate que la viscosité dynamique augmente à chaque fois que la concentration des nanoparticules augmente. Le taux d'augmentation est de 9.6% pour le nanofluide (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+CuO/Therminol VP-1) et de 9.7 % pour le (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+CuO/Syltherm 800), tandis qu'il est de 9.71 % pour (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+CuO/Dowtherm A) par rapport à leurs fluides de base purs .

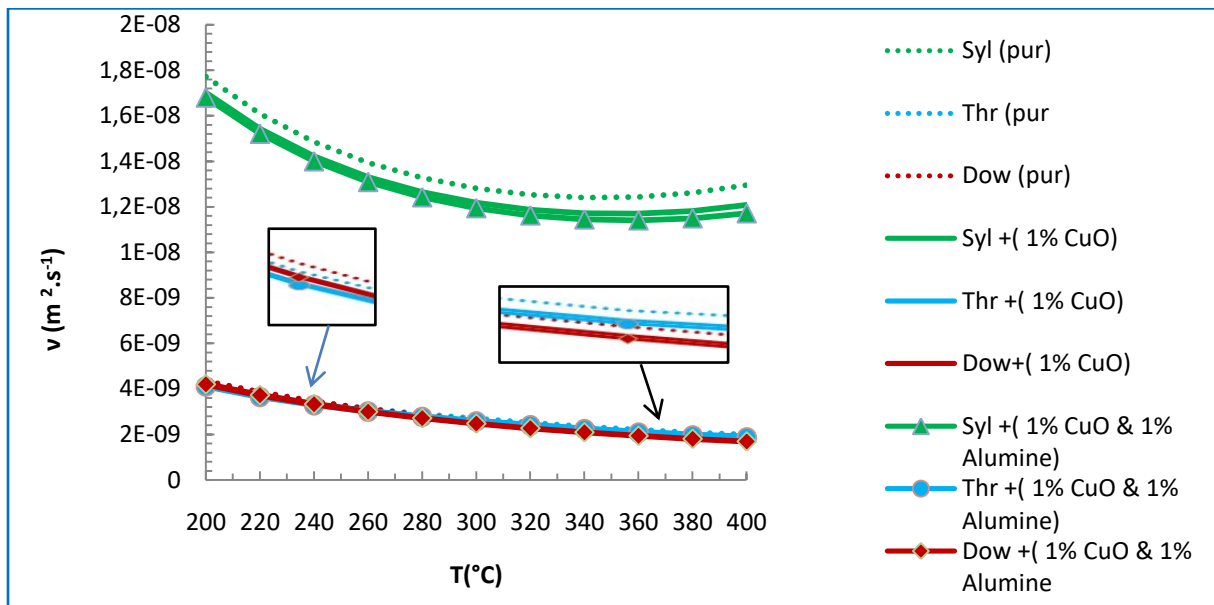


Figure III. 12: Effet de la température sur la viscosité cinématique des nanofluides hybrides

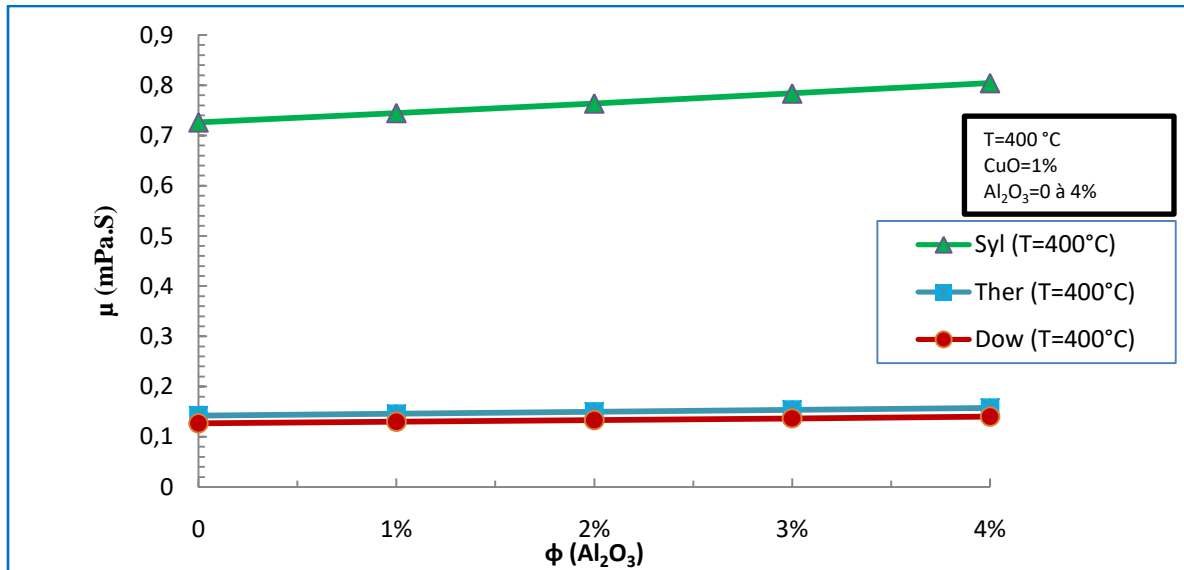


Figure III. 13: Effet de la température sur la viscosité dynamique des nanofluides hybrides

### III.4.3.3. Conductivité thermique

L'effet de la température et la concentration des nanoparticules sur la conductivité thermique des nanofluides hybrides sont exposées sur les figures III.14 et 15. La conductivité thermique représente la propriété thermique la plus importante dans un nanofluide soit mono ou hybrides. L'amélioration de la conductivité thermique mène à l'amélioration de l'ensemble du système. La figure III-15 montre une amélioration considérable de la conductivité thermique lorsque les nanoparticules sont ajoutées, ce qui explique une dépendance physique réciproque qui doit être prise en compte. On constate aussi que pour 1% de CuO l'amélioration de la conductivité thermique des nanofluides mono est de 2,95%, 2,8% et 3,05% pour (CuO/Therminol VP-1), (CuO/Syltherm 800) et (CuO/Dowtherm A) respectivement. L'ajout de 1% d' $Al_2O_3$  améliore beaucoup plus la conductivité thermique des nanofluides hybrides et le taux d'amélioration est de 7,3%, 5,7% et 5,8% pour ( $Al_2O_3$ +CuO/Therminol VP-1), ( $Al_2O_3$ +CuO/Syltherm 800) et ( $Al_2O_3$ +CuO/Dowtherm A) respectivement. Le taux d'amélioration maximum est de 13,6% pour une concentration de 4%.

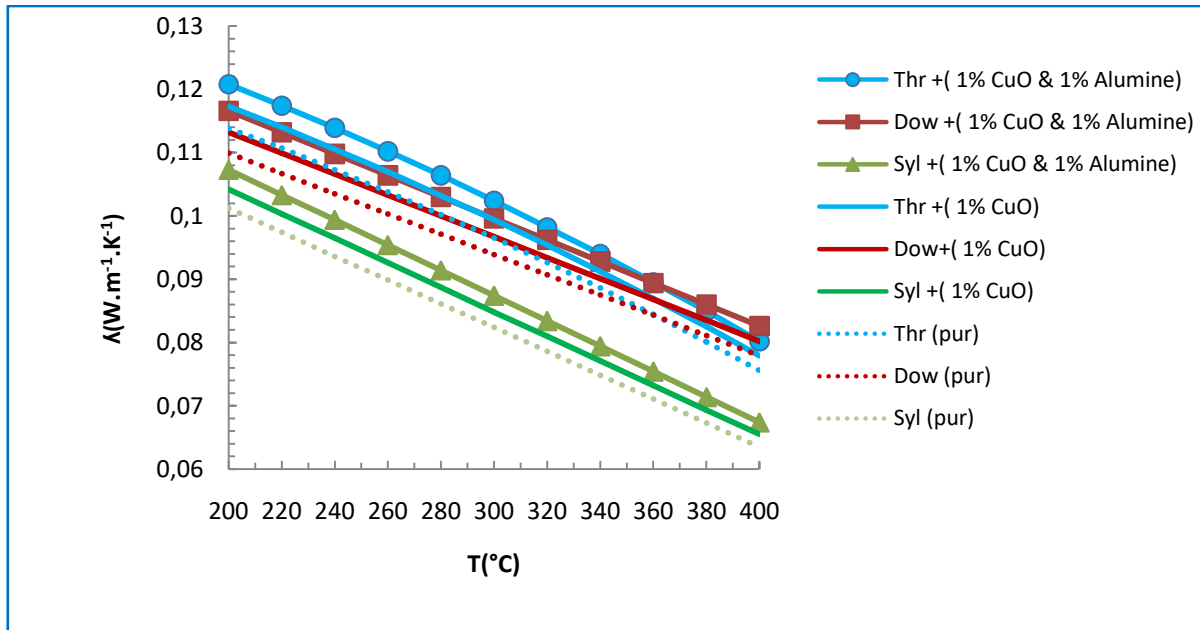


Figure III. 14: Effet de la température sur la conductivité thermique des nanofluides hybrides

La figure III- 14 illustre l'influence de la température sur la conductivité thermique. On remarque qu'il y a une relation disproportionnée à chaque fois que la température accroît la conductivité des nanofluides décroît. Pour  $T=400^{\circ}\text{C}$  la conductivité thermique du nanofluide ( $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{CuO}/\text{Dowtherm A}$ ) est plus forte à celles des autres nanofluides.

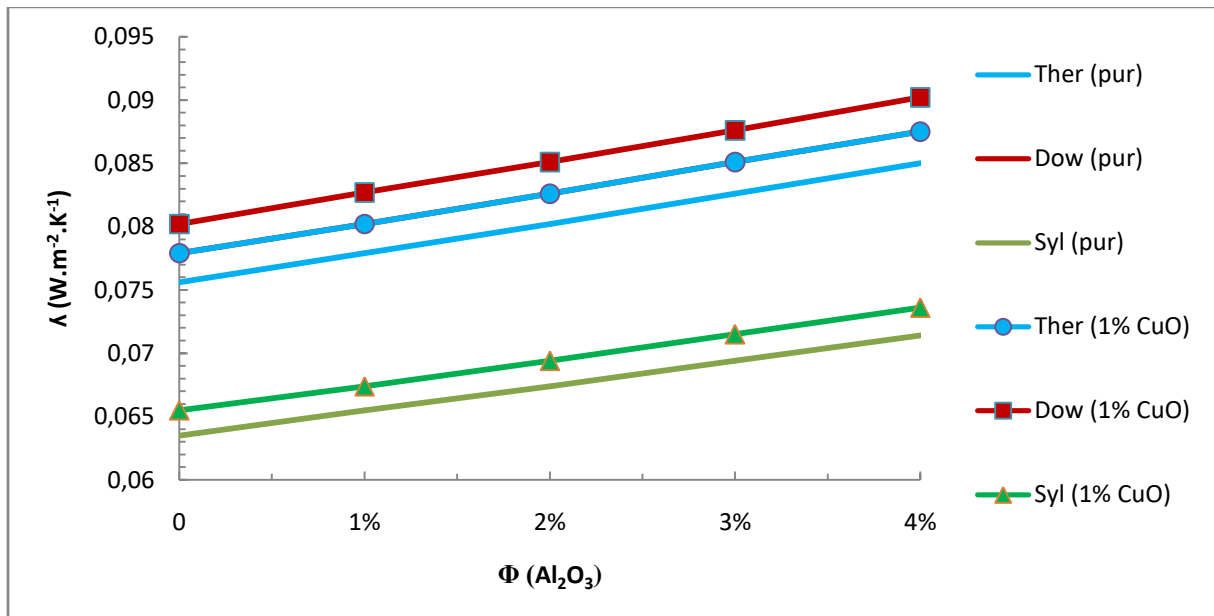


Figure III. 15: Effet de la concentration des nanoparticules sur la conductivité thermique des nanofluides hybrides

### III.4.3.4. Capacité thermique

L'augmentation de la capacité thermique d'un nanofluide (mono-hybrides) peut conduire à une augmentation de la capacité du stockage de chaleur dans la centrale solaire à concentration. La figure III.16 présente l'effet de la température sur la chaleur spécifique, on constate que qu'il existe une relation de proportionnalité linéaire entre la température et la chaleur spécifique. Le nanofluide ( $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{CuO}/\text{Dowtherm A}$ ) contient la capacité thermique la plus élevée par rapport aux autres nanofluides. En revanche, l'ajout de nanoparticules engendre une diminution de la capacité thermique.

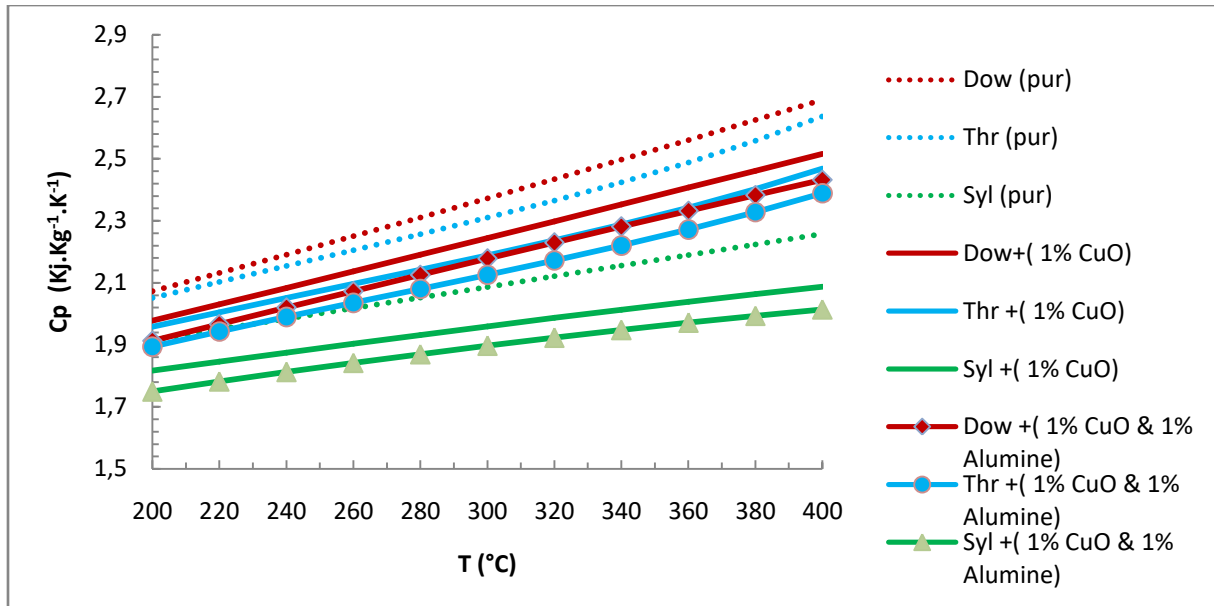


Figure III. 16: Effet de la température sur la capacité thermique des nanofluides hybrides

### III.5. Comparaison des résultats obtenus avec d'autres études

Le tableau ci-dessous ([Tableau.III.2](#)) compare nos résultats avec certains travaux existants dans la littérature, qui ont des caractéristiques thermophysiques et des conditions de travail pratiquement identiques à celles de notre étude. D'après le tableau, les résultats obtenus sont encourageants et ils ont quasiment les mêmes valeurs, ce qui valide la fiabilité de notre étude.

Tableau .III. 2: Comparaison des résultats obtenus

	Fluide de base	Température (°c)	Particules et concentration	Masse volumique (kg.m <sup>-3</sup> )	Conductivité thermique (W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> )	Chaleur spécifique (kJ/kg.K)	Viscosité (Pa.s)
<b>La présente étude</b>	Syl	300°C	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (4%)	≈845	≈0.0953	≈1.7377	≈0.00188
	Ther	300°C	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (4%)	≈982	≈0.1096	≈1.9605	≈0.00028
	Dow	300°C	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (4%)	≈974	≈0.1087	≈2.004	≈0.00029
<b>Abubakr et al. [223]</b>	Ther	300°C	Pur	≈810	≈0.098	≈2.300	≈0.00025
	Syl	300°C	Pur	≈675	≈0.0815	≈2.100	≈0.00050
	Dow	300°C	Pur	≈760	≈0.081	≈2.500	≈0.00020
<b>Allouhi et al [224]</b>	Ther	300°C	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (5%)	≈960	≈0.109	≈2.020	-
	Ther	300°C	CuO (5%)	≈1060	-	≈1.820	-
<b>Bellos and Tzivanidis [210]</b>	Syl	300°C	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (4%)	≈810	≈0.086	≈1.810	≈0.001
	Syl	300°C	CuO (4%)	≈890	-	≈1.720	-
<b>Basbous et al . [79]</b>	Syl	300°C	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (5%)	≈815	≈0.08	≈1.901	≈0.001
	Syl	300°C	CuO (5%)	≈895	-	≈1.750	-

### III.6. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons exposé et interprété les résultats de la simulation numérique obtenus sur les propriétés thermophysiques de nanofluides (mono-hybrides) tels que la masse volumique, la conductivité thermique, la capacité thermique, la viscosité dynamique et cinématique. Le choix du fluide caloporteur est important pour prendre une bonne décision et avoir un meilleur rendement. Les nanofluides employés dans cette étude ont été examinés pour différentes caractéristiques. En effet, nous avons mené deux études, dans la première partie, nous avons étudié l'effet de la température et la concentration des nanoparticules sur les propriétés thermophysiques à base de  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Dans la deuxième partie, nous avons évalué l'influence de la température et de la fraction volumique sur les propriétés thermophysiques du nanofluide hybrides ( $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{CuO}$ /Therminol VP-1,  $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{CuO}$ /Syltherm 800 et  $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{CuO}$ /Dowtherm A). D'après les résultats, nous pouvons conclure que :

- La masse volumique des nanofluides mono- hybrides augmente avec la fraction volumique et diminue avec l'augmentation de la température.
- L'ajout de nanoparticules joue un grand rôle sur l'amélioration de la conductivité thermique qui représente un paramètre fondamental pour le transfert thermique. A' température égale à  $400^\circ\text{C}$  et une concentration volumique de 4% pour  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , et de 1% pour  $\text{CuO}$ , le taux d'amélioration moyen de la conductivité thermique en utilisant les nanofluides hybrides est de 13%.
- La capacité thermique augmente avec l'augmentation de la température décroît avec l'augmentation de la concentration des nanoparticules.
- L'utilisation des huiles synthétiques (Therminol VP-1 et Dowtherm A) comme fluide de base donne des meilleurs résultats par rapport à l'eau et Syltherm 800.

---

**Chapitre IV : Étude des performances optiques  
et thermiques d'une centrale solaire à  
concentrateurs cylindro-paraboliques à base de  
nanofluides**

---

### IV.1.Introduction

La technologie CSP (Concentrating Solar Power) présente un avantage et un intérêt pour produire de l'électricité et de la chaleur à partir des centrales solaires thermodynamiques. Le concept CSP utilise un ensemble de miroirs qui réfléchissent la lumière vers un récepteur linéaire où elle peut être directement absorbée par le tube absorbeur. Dans ce chapitre, nous allons faire une étude sur le comportement et l'effet des nanofluides utilisés comme fluide de transfert thermique dans les centrales solaires à concentrateurs cylindro-paraboliques. En premier lieu, nous allons étudier les performances optiques du réflecteur dans quatre régions : Tamanrasset, In-Salah, Hassi- Rmel et Bechar. Par la suite, nous allons étudier l'efficacité d'une centrale située dans différentes régions et pour différents nanofluides. Enfin, nous allons effectuer un calcul d'optimisation pour sélectionner le diamètre optimal du récepteur pour notre centrale à base de nanofluides pour diminuer les pertes de charge et pour avoir en retour une meilleure efficacité à l'aide du logiciel SAM.

### IV.2.Présentation du logiciel SAM

Le logiciel SAM (System Advisor Modél) c'est un logiciel développé par le NREL (National Renewable Energy Laboratory) en partenariat avec le département d'énergie des Etats Unis le DOE (Department Of Energy). Ce logiciel est disponible gratuitement dans la plateforme NREL avec plusieurs versions. SAM est un logiciel qui effectue une analyse des coûts et des performances. Il est conçu pour aider les personnes impliquées dans l'industrie des énergies renouvelables à prendre des décisions fiables et précises, il offre aux utilisateurs une opportunité d'examiner et de comparer les technologies solaires et autres technologies renouvelables sur une base économique, technique et opérationnelle. Pour étudier les performances du système, le logiciel SAM utilise chaque simulation numérique dans TRNSYS (Transient System Simulation). Ce dernier est un modèle semi-empirique. Il fournit une plate-forme pour modéliser les systèmes thermodynamiques sur une base modulaire à partir des données météorologiques horaires [225]. Il est largement utilisé pour modéliser les bâtiments et les systèmes d'énergie renouvelable, par contre le logiciel SAM peut-être utilisé pour simuler :

- Les systèmes photovoltaïques à haute concentration ;
- L'énergie marine marémotrice et la géothermie ;
- La centrale solaire à concentration ;
- La centrale éolienne et la combustion de la biomasse comme le montre la [figure IV.1](#).


# System Advisor Model

The System Advisor Model (SAM) is a free user-friendly platform that **calculates a renewable energy system's (sub-)hourly energy output**, and **calculates detailed financial metrics** for a renewable energy project over the life of the project.

These calculations are done using **detailed performance models**, a **detailed cash flow finance model**, and a library of reasonable default values for each technology and target market.

Technologies SAM can model:

- Photovoltaics
- Concentrating Solar Power (Trough, Tower, Linear Fresnel, Dish Stirling)
- Geothermal (power)
- Solar Water Heating
- Wind (Small + Utility scale)
- Biomass Power

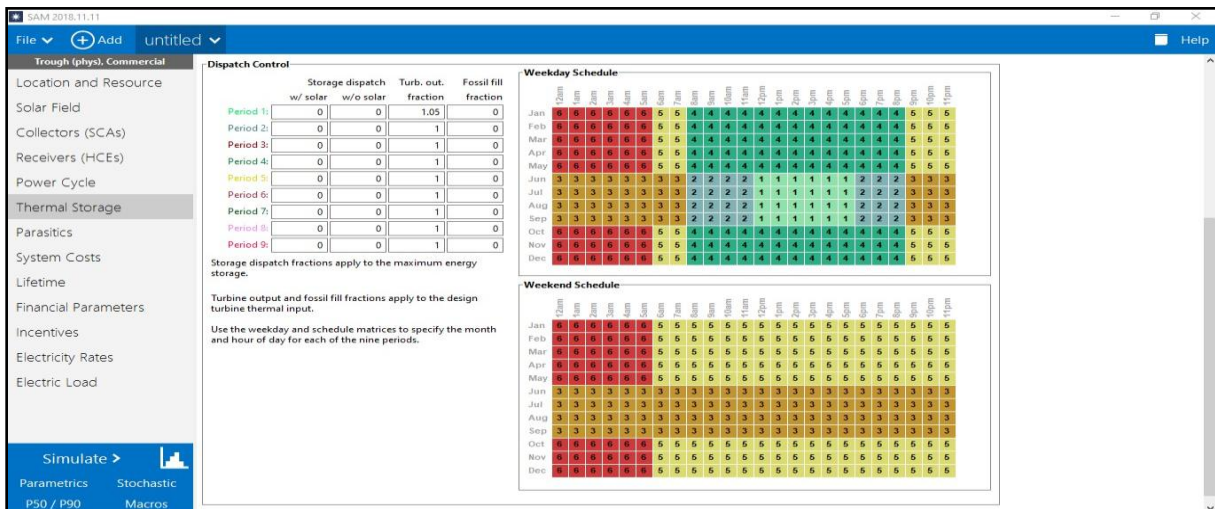


Weather Data + System Specs → Energy Production + Cost Data + Utility Rates & Incentives + Financing Options → Annual, Monthly, and Hourly Output, LCOE, NPV, Payback, Revenue, Capacity Factor

NATIONAL RENEWABLE ENERGY LABORATORY 2

Figure IV. 1: Différentes options qui peuvent être réalisées par le logiciel SAM [225]

Le logiciel SAM offre une interface logique pour définir et lancer une simulation TRNSYS prédéterminée et à évaluer les résultats. Il permet de calculer le coût de production de l'électricité à partir des informations données sur l'emplacement et les coûts des installations, le type du financement, le crédit d'impôt applicable et les spécifications du système. Le logiciel est basé sur un moteur de simulation horaire dans lequel il interagit avec des modèles de performance, de coût et de financement pour déterminer la production d'énergie. Le modèle offre des options pour des études paramétriques et permet également d'échanger les données avec des modèles externes développés sous Microsoft Excel. Il permet aussi de faire une analyse de sensibilité, de simulation et d'optimisation. Il peut déterminer les performances et faire une analyse économique et environnementale de la centrale solaire à concentration.



**Dispatch Control**

Period	Storage dispatch w/ solar	Storage dispatch w/o solar	Turb. out. fraction	Fossil fill fraction
Period 1:	0	0	1.05	0
Period 2:	0	0	1	0
Period 3:	0	0	1	0
Period 4:	0	0	1	0
Period 5:	0	0	1	0
Period 6:	0	0	1	0
Period 7:	0	0	1	0
Period 8:	0	0	1	0
Period 9:	0	0	1	0

**Weekday Schedule**

Month	Day	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31		
Jan	Mon	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	
Feb	Mon	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	
Mar	Mon	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	
Apr	Mon	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	
May	Mon	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	
Jun	Mon	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	
Jul	Mon	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
Aug	Mon	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
Sep	Mon	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
Oct	Mon	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
Nov	Mon	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
Dec	Mon	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4

**Weekend Schedule**

Month	Day	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31				
Jan	Mon	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4		
Feb	Mon	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	
Mar	Mon	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	
Apr	Mon	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	
May	Mon	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	
Jun	Mon	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	
Jul	Mon	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
Aug	Mon	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
Sep	Mon	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
Oct	Mon	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
Nov	Mon	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
Dec	Mon	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4

Figure IV. 2: Interface du SAM [226].

### IV.3.Paramètres de conception

Les entrées nécessaires pour avoir un meilleur ajustement de la centrale solaire sont liées aux paramètres du champ solaire et le bloc de puissance, les fluides de transfert thermique (HTF), et le système de stockage thermique d'énergie (TES). Les exigences de conception sont la fraction de combustible de remplissage (FFF) de l'hybridation, le facteur multiple solaire (SM), le facteur de capacité (efficacité CF) et la capacité du système de stockage (Heures de pleine charge FLH). Ces paramètres sont définis ci-dessous :

- Multiple solaire (SM)

SM : est défini comme le rapport entre la taille réelle du champ solaire en mètre carré et la taille du champ solaire nécessaire en mètre carré aussi pour alimenter la turbine à capacité nominale avec irradiance solaire maximale.

- Fraction du combustible de remplissage (FFF)

FFF : c'est une fraction de la production brute de la turbine de conception dans un bloc de puissance qui peut être atteinte par la chaudière de sauvegarde, elle est définie aussi comme la quantité de combustible fossiles utilisée pour produire de l'énergie électrique à l'absence du soleil. Il sert à calculer l'énergie de la chaudière de sauvegarde.

- Heures de pleine charge (FLH)

FLH : c'est le nombre d'heures que le système de stockage peut fournir de l'énergie à la capacité d'entrée de la turbine de conception.

- Facteur de capacité (CF)

CF : c'est le rapport de la valeur prédite électrique de sortie du système dans la première année de fonctionnement à la sortie de la plaque signalétique, ce qui équivaut à la quantité d'énergie que le système produirait s'il fonctionnait à sa capacité nominale pour chaque heure de l'année.

#### IV.3.1.Description de sites

Les sites choisis pour installer la centrale CSP à miroir PTC doivent se conformer à certaines exigences que nous pouvons diviser en trois groupes : les exigences de rayonnement solaire, la disponibilité de grands espaces d'implantation, les besoins en infrastructures.

Les sites choisis pour cette étude sont Hassi-Rmel, Tamanrasset, Bechar et In-Salah situés dans le sud Algérien. Les données météorologiques de ces endroits, comme le DNI et la température ambiante sont tirées de la base des données NREL (National Renewable Energy Laboratory). [Le tableau IV.1](#) représente les paramètres de nos sites.

## Chapitre IV: Étude des performances optiques et thermiques

Tableau IV. 1: Caractéristiques de chaque emplacement [227]

	Hassi -Rmel	Bechar	In -Salah	Tamanrasset
Latitude (°)	32.93°N	31.37°N	27.19°N	22.78°N
Longitude (°)	3.26°E	2.13°E	2.48°E	5.52°E
DNI (KWh/m <sup>2</sup> )	2008.4	2095.9	1947.0	2759.4
Altitude (m)	777	536	292	1375

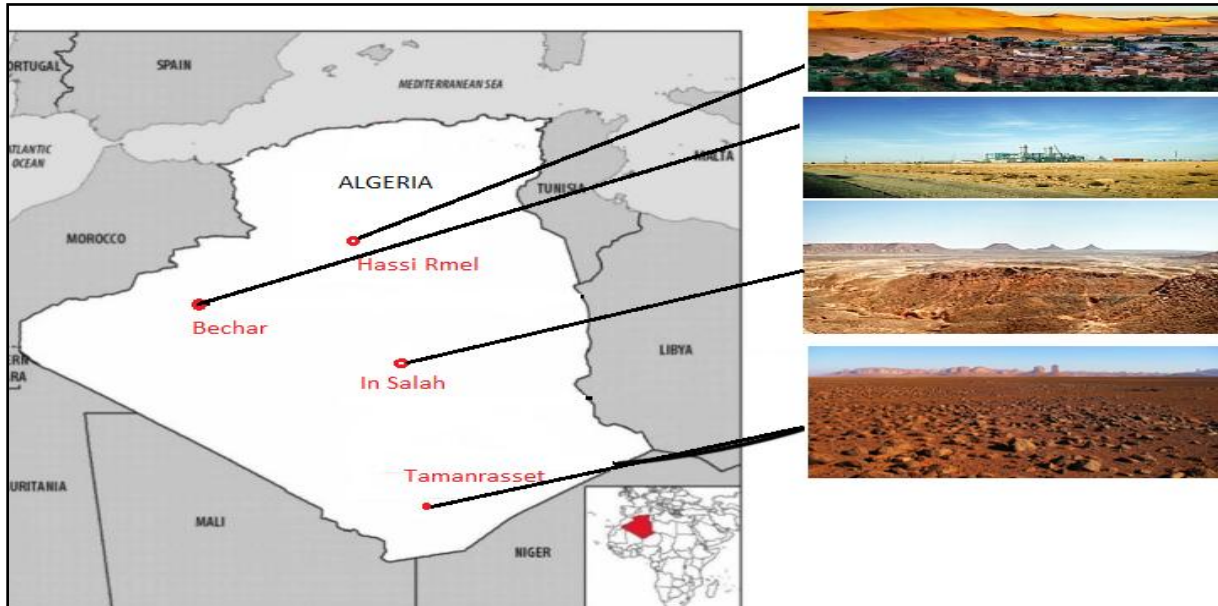


Figure IV. 3: Localisation des 04 régions (Hassi-Rmel, Bechar, In-Salah et Tamanrasset) sur la carte.

### IV.3.2. Description de la centrale étudiée

La centrale étudiée est une centrale à concentrateurs cylindro-paraboliques de 50 MWe, elle est supposée comme une centrale hybride sans stockage, toutes les caractéristiques de la centrale étudiée sont représentées sur le [tableau IV.2](#) suivant :

Tableau IV. 2: Les caractéristiques de la centrale étudiée.

Champs de miroir	Surface réfléchissante	464340 m <sup>2</sup>
	Longueur de l'ensemble du collecteur	150 m
	Nombre de modules par assemblage	12
	La largeur de collecteur	5.75 m
	Surface de réflecteur	817.5 m <sup>2</sup>
	Nombre de boucles	71
	ouverture à boucle unique	6540 m <sup>2</sup>
Le block de puissance	FFF	25%
	Température d'entrée	200° C
	Température de sortie	400° C
	Puissance à la sortie de la génératrice	50 MWe

### IV.4. Résultats et discussions

#### IV.4.1. Performances optiques

La performance optique du système CSP varie considérablement tout au long de l'année, avec un rendement maximal au cours de l'été. Ce changement annuel de la productivité a plusieurs implications importantes en termes d'intégration des centrales solaires à concentrateurs cylindro-paraboliques et aussi, en termes de configuration du champ solaire. Dans cette partie à l'aide du logiciel SAM, on va déterminer les différentes caractéristiques de la centrale. Les différents résultats seront présentés sous forme des graphes et à une échelle horaire (heure par heure) et cela pour les quatre sites considérés. Nous allons présenter en premier lieu, les profils annuels du rendement optique (%), la vitesse du vent et le DNI (irradiation normal direct) comme le montre les figures IV.4, IV.5 et IV.6, respectivement.

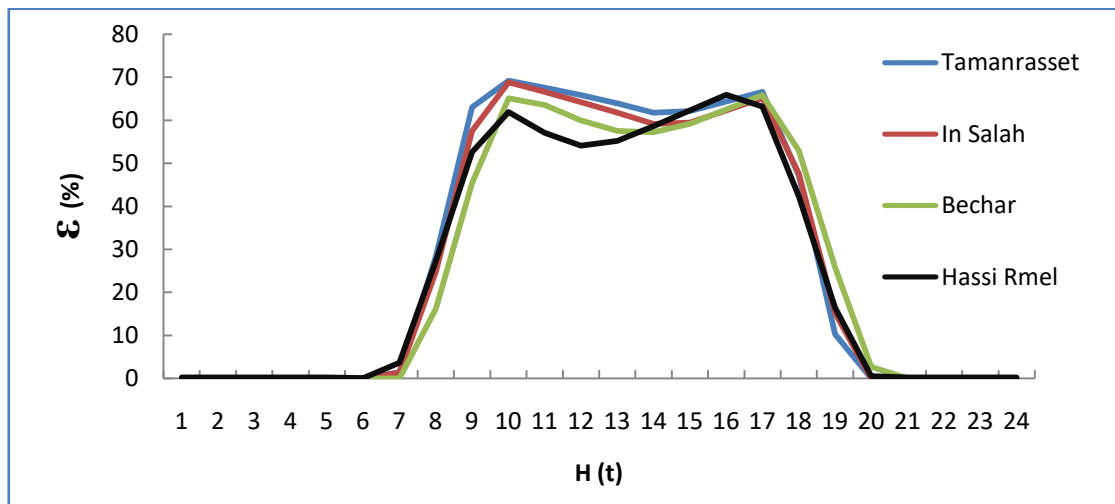


Figure IV. 4: Moyenne annuelle du rendement optique de la centrale

La figure IV.4 représente la moyenne annuelle du rendement optique en pourcentage (%) à l'échelle horaire (heure par heure), qui a une forme d'une cloche bien symétrique, nous avons observé que la moyenne annuelle du rendement optique maximal que peut atteindre la centrale solaire pour ces sites sont obtenus entre dix heures et dix-huit heures avec des valeurs maximales de 68.8% , 68.85%, 65.14% et 61.95% à In-Salah, Tamanrasset , Bechar et Hassi-Rmel, respectivement. Cela dû à la présence de flux solaire durant cette période.

Les risques naturels comprennent des phénomènes environnementaux à savoir les tempêtes, les tremblements de terre, les orages et d'autres. Ces risques peuvent affecter la sécurité du fonctionnement de la centrale solaire. Afin de résister à l'impact de ces phénomènes, la conception du champ solaire et du bloc d'alimentation doit être adaptée, donc l'analyse de l'effet et la force du vent dans chaque site est très importante, ce que nous allons présenter sur la figure IV.5 qui montre clairement que le vent ne présente pas vraiment un

grand risque vu sa puissance qui ne dépasse pas 5 m/s sur toutes les régions. La valeur maximale est obtenue à Hassi-Rmel entre 13h à 17h.

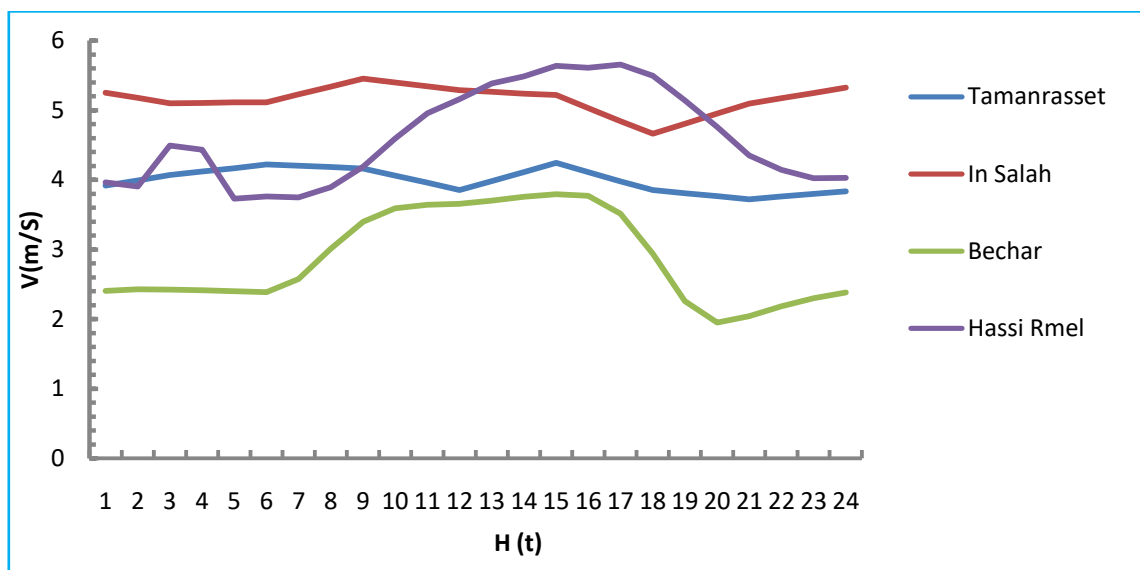


Figure IV. 5: La vitesse du vent annuelle (m/s).

Le rayonnement solaire est un critère essentiel pour la construction et l'installation des centrales CSP dans un site donné. Il doit avoir une disponibilité suffisante du rayonnement solaire pour avoir un bon rendement, ce rayonnement est particulièrement important que la fraction directe du rayonnement solaire qui doit être élevée, contrairement à d'autres types d'utilisation de l'énergie solaire par exemple la centrale photovoltaïque.

Les systèmes ou les technologies CSP à miroir de PTC utilisent et exploitent uniquement la composante directe du rayonnement solaire, c'est la seule qui peut être concentrée.

En effet, le critère le plus pertinent à prendre en compte est le DNI (Direct Normal Irradiance) qui est déterminé comme la densité du flux de rayonnement dans le spectre solaire ( $0,3\mu\text{m}$  à  $3\mu\text{m}$ ) arrivant sur la surface de la terre qui est perpendiculaire à la direction du soleil. Le DNI est impacté par l'absorption et la diffusion du rayonnement solaire sur les molécules de l'air, la vapeur d'eau, l'azote et les aérosols.

En examinant l'allure de la courbe du DNI (figure IV.6) qui représente l'ensoleillement normal direct dans quatre sites. On remarque qu'elle a la forme d'une cloche bien symétrique. La moyenne annuelle maximale se trouve à Tamanrasset, In-Sallah à midi qui correspond à un DNI égale à  $725 \text{ W/m}^2$  suivi par Bechar et Hassi-Rmel avec des valeurs de  $594$  et  $576 \text{ W/m}^2$ , respectivement.

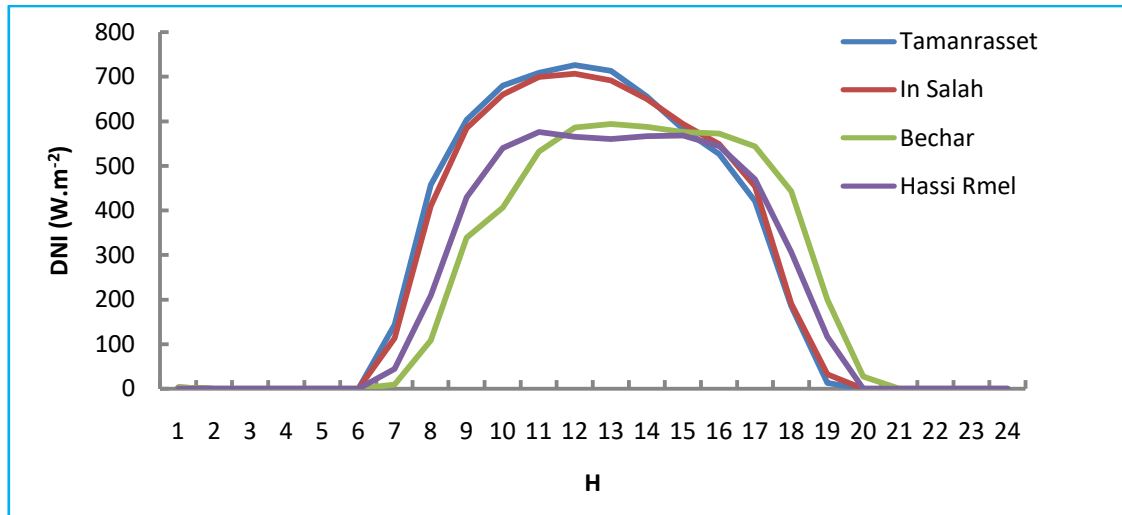


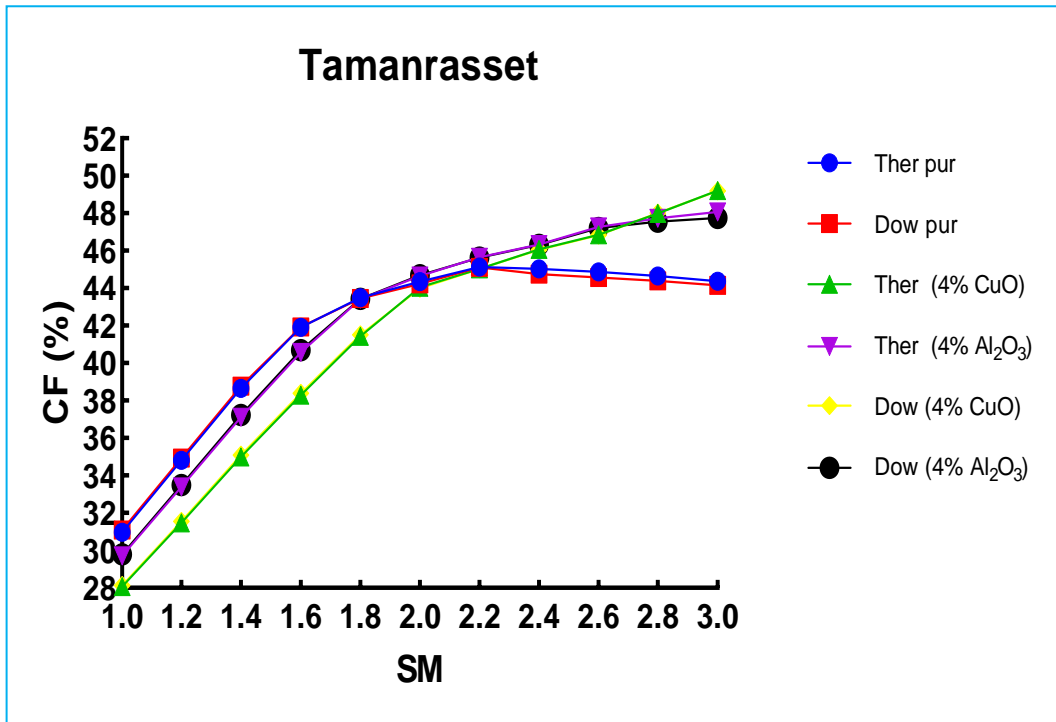
Figure IV. 6: Irradiation solaire DNI en ( $W/m^2$ )

### IV.4.2.Effet des nanofluides

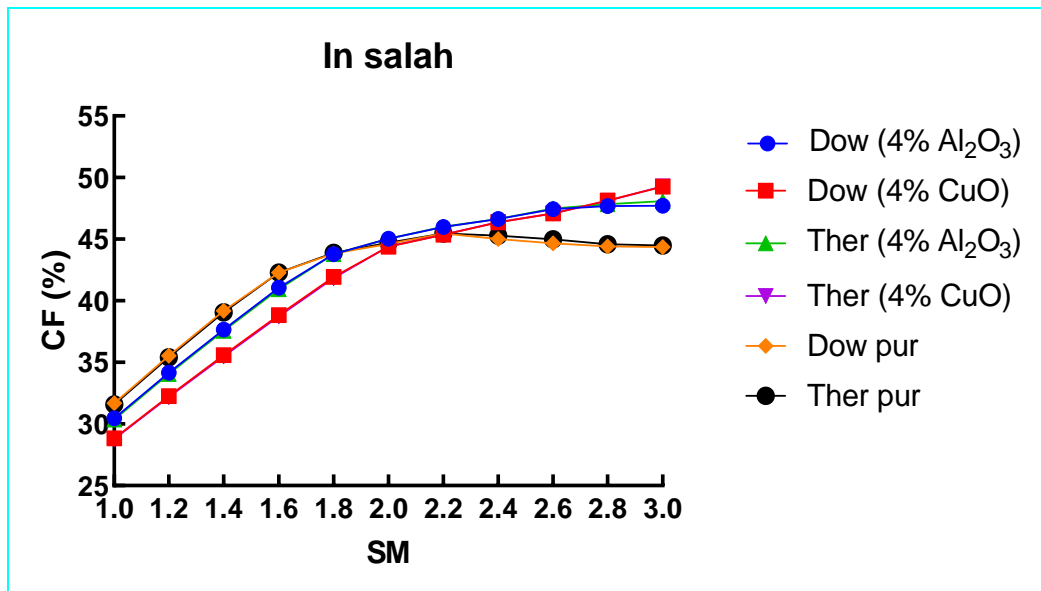
Le choix du site pour l'installation et la construction d'une centrale solaire à concentrateurs cylindro-paraboliques est particulièrement important. En général, l'installation de ces types de centrales solaires nécessite des grandes surfaces de terrain pour placer les concentrateurs solaires. L'Algérie avec sa grande superficie et son vaste désert, elle peut devenir le premier producteur d'électricité dans le monde si elle exploite ses ressources naturelles.

Dans cette partie, on va examiner l'effet d'intégration des nanofluides comme fluides de transfert thermique sur la performance de la centrale solaire à concentrateurs cylindro-paraboliques de 50 MW . Les nanofluides examinés sont composé de deux fluides de bases Therminol VP-1 (Ther) et Dowtherm A (Dow), les nanoparticules utilisées sont le  $Al_2O_3$  et le CuO, et on va les comparer par rapport à leurs fluides de bases purs . Les propriétés thermophysiques des nanofluides sont intégrées sous le logiciel SAM et nous allons exécuter une simulation de la centrale solaire en fonction de plusieurs paramètres, notamment la variation du SM et les nanofluides.

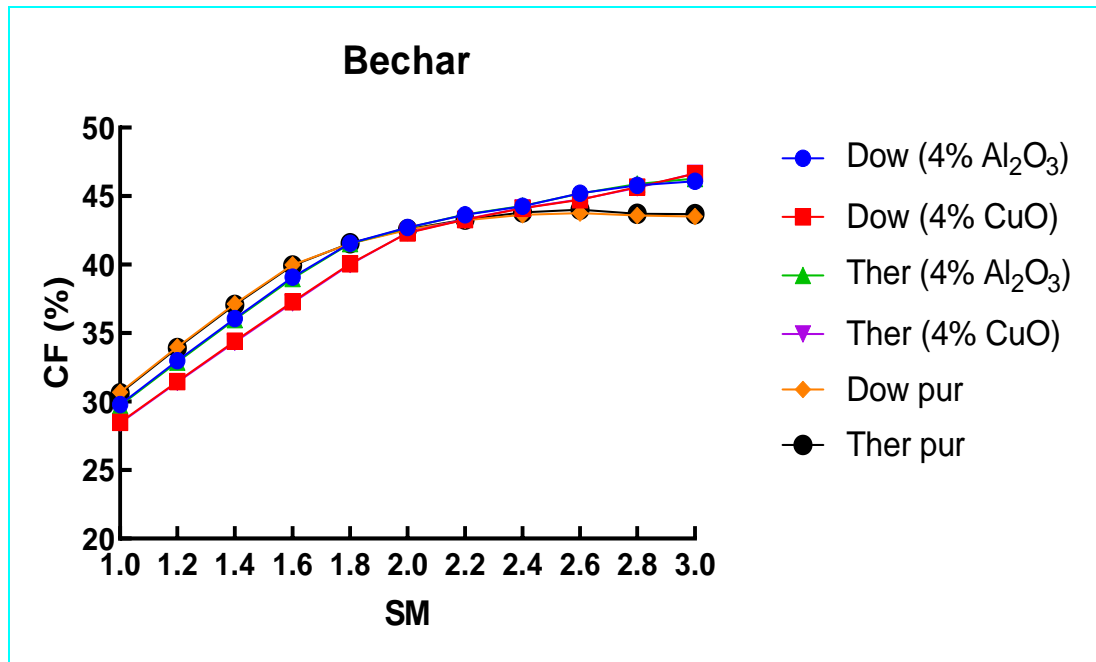
La figure.IV-7 montre clairement que l'efficacité de la centrale solaire s'améliore lorsque les nanofluides sont employés comme fluides caloporteurs pour les grands champs solaires (SM supérieur à 2) dans tous les sites. Selon nos résultats, nous avons constaté que le site d'In-Salah est considéré comme le site le plus compétitif pour réaliser ce type de centrales solaires, suivi de Tamanrasset, Bechar et Hassi-Rmel.



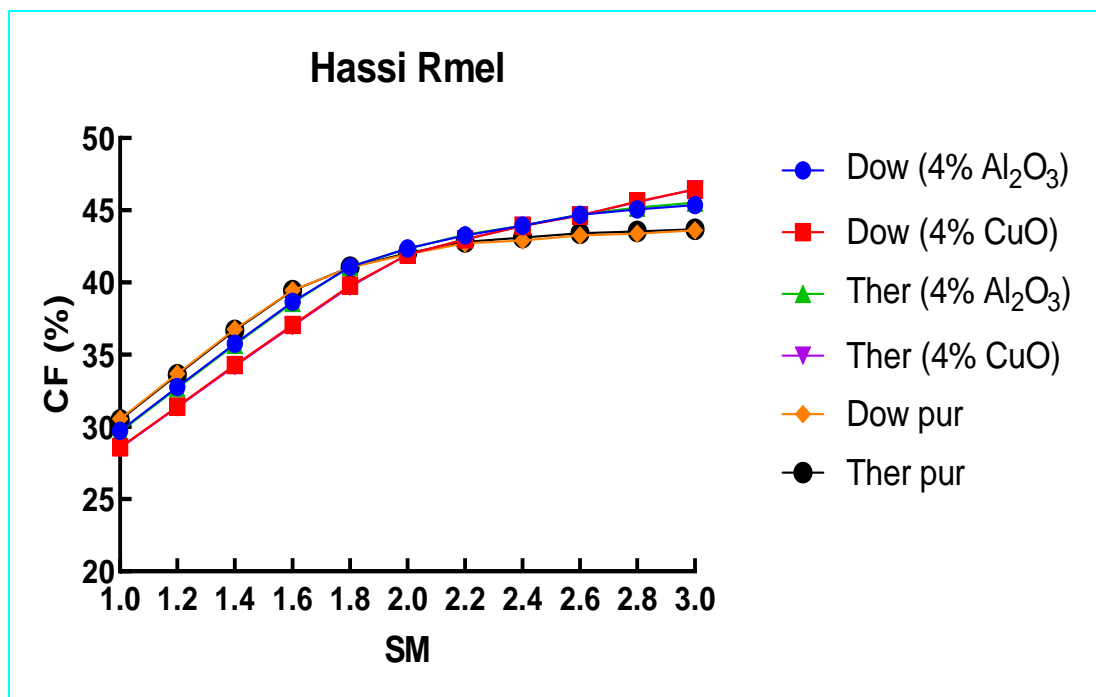
(a)



(b)



(c)



(d)

Figure IV. 7: Effet de nanofluides sur l'efficacité de la centrale solaire : (a) site de Tamanrasset (b) In Salah, (c) Bechar, et (d) Hassi Rmel .

Les paramètres optimaux sont exposés sur le [tableau IV.3](#). On constate clairement que le multiple solaire optimal varie en fonction des paramètres des sites et du type du fluide utilisé. Nous pouvons annoncer que l'efficacité de la centrale à base des nanofluides est mieux

que celle du fluide pur pour tous les sites, ce qui confirme que les nanofluides sont vraiment une bonne solution pour remplacer les fluides caloporteurs conventionnels. Enfin, une centrale solaire à base de Dowtherm A mélangé avec CuO obtient les meilleurs résultats parmi les autres avec 49% à In Salah et Tamanrasset, 47% à Bechar et 46% à Hassi -Rmel.

Tableau IV. 3: Efficacité optimale pour différentes sites et nanofluides

Sites performances nf	In salah		Tamanrasset		Bechar		Hassi Rmel	
	SM <sub>opt</sub>	CF (%)	SM <sub>opt</sub>	CF (%)	SM <sub>opt</sub>	CF (%)	SM <sub>opt</sub>	CF (%)
<b>Ther (pur)</b>	2.2	45	2.2	45	2.8	43	3	44
<b>Dow( pur)</b>	2.6	45	2.2	45	2.6	44	3	44
<b>Ther(4% CuO)</b>	3	49	3	49	3	47	3	46
<b>Ther( 4% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)</b>	3	48	3	48	3	46	3	46
<b>Dow ( 4% CuO)</b>	3	49	3	49	3	47	3	46
<b>Dow ( 4% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)</b>	3	48	3	47	3	46	3	45

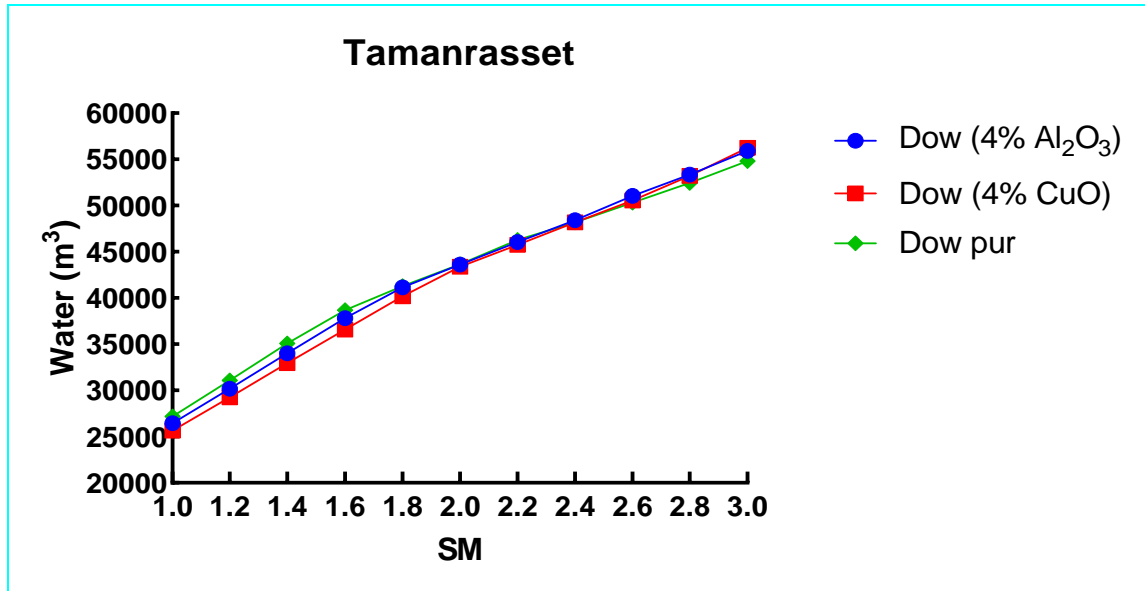
### IV.4.3.Consommation d'eau

La disponibilité de l'eau est essentielle pour le refroidissement et le nettoyage, surtout si les centrales CSP devraient être équipées du système du refroidissement notamment par voie humide ou sèche. Le refroidissement humide est favorable à l'exploitation dans les centrales CSP comme dans notre cas en raison des couts inférieurs d'investissement par rapport au refroidissement sec. Une autre technique peut être utilisée avec le couplage de deux méthodes ; le refroidissement humide et sec (hybride). Une autre source qui doit être intégrée telle que l'eau de mer qui est plus probablement disponible dans certaines régions surtout dans le nord. Toutefois, l'irradiation est légèrement faible près de la côte que sur les hauts plateaux en raison de la teneur en vapeur d'eau plus élevée dans l'atmosphère, par contre à chaque fois on se dirige vers le sud l'irradiation augmente comme nous l'avons expliqué précédemment, le cas de Sahara au sud de l'Algérie.

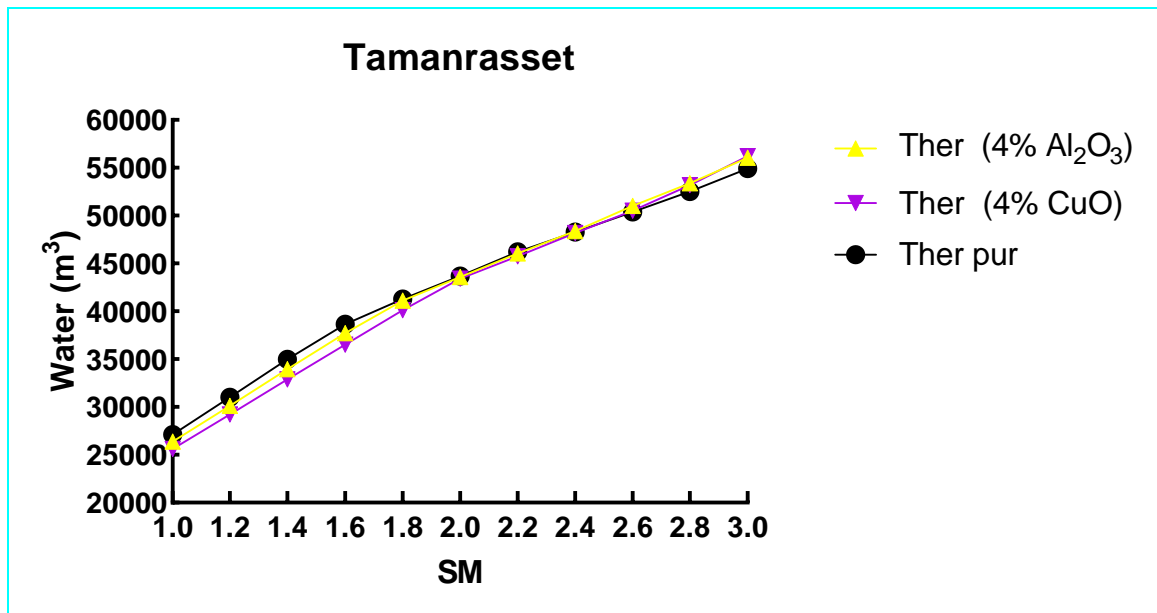
Généralement, l'eau est moins utilisée pour le nettoyage du réflecteur et pour l'alimentation du cycle à vapeur ; 15% seulement pour le nettoyage du réflecteur et 80% de l'eau consommée et utilisée pour le refroidissement et 5% pour d'autres besoins de la centrale électrique.

La [figure IV-8](#) montre la consommation d'eau par la centrale solaire à base des nanofluides (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/ Therminol VP- 1), (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Dowtherm A), (CuO/ Therminol VP- 1) et (CuO/Dowtherm A) dans les quartes régions à savoir Tamanrasset, In-Sallah, Bechar et Hassi-Rmel. On remarque que à chaque fois le champ solaire devient grand, la consommation d'eau augmente aussi d'une manière proportionnelle, pour SM= 1 et le nanofluides (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Dowtherm A) la quantité d'eau consommée est de 26443.9 m<sup>3</sup> dans le site de Tamanrasset, 25997.2 m<sup>3</sup> à Bechar, 25599 m<sup>3</sup> à Hassi Rmel et de 26687.2 m<sup>3</sup> à In Salah. Pour SM= 3 la quantité d'eau consommée est de 55916.9 m<sup>3</sup>, 54445.6 m<sup>3</sup>, 53478.6 m<sup>3</sup> et 55767.9 m<sup>3</sup>, respectivement.

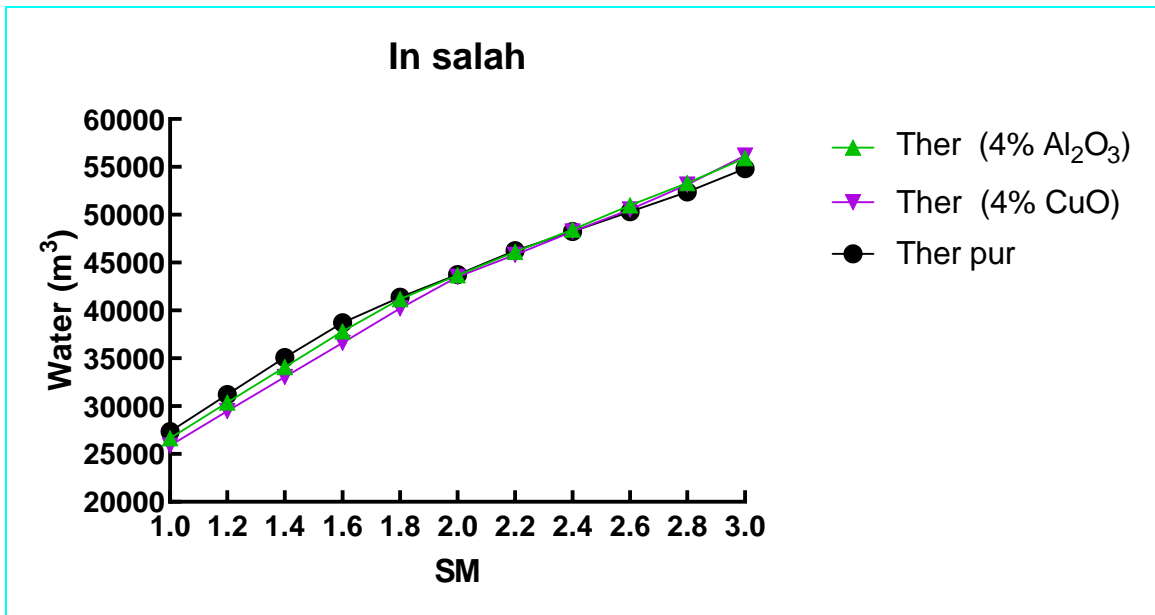
Nous remarquons aussi que l'utilisation des nanofluides diminue la consommation d'eau dans tous les sites lorsque le champ solaire ne soit pas vraiment vaste pour SM varie de 1 à 2, la consommation d'eau est réduite à 2.7, 5.4, 2.8 et 5.5% pour une centrale solaire à base des nanofluides ( $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Dowtherm A}$ ), ( $\text{CuO}/\text{Dowtherm A}$ ), ( $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Therminol VP- 1}$ ) et ( $\text{CuO}/\text{Therminol VP 1}$ ), respectivement.



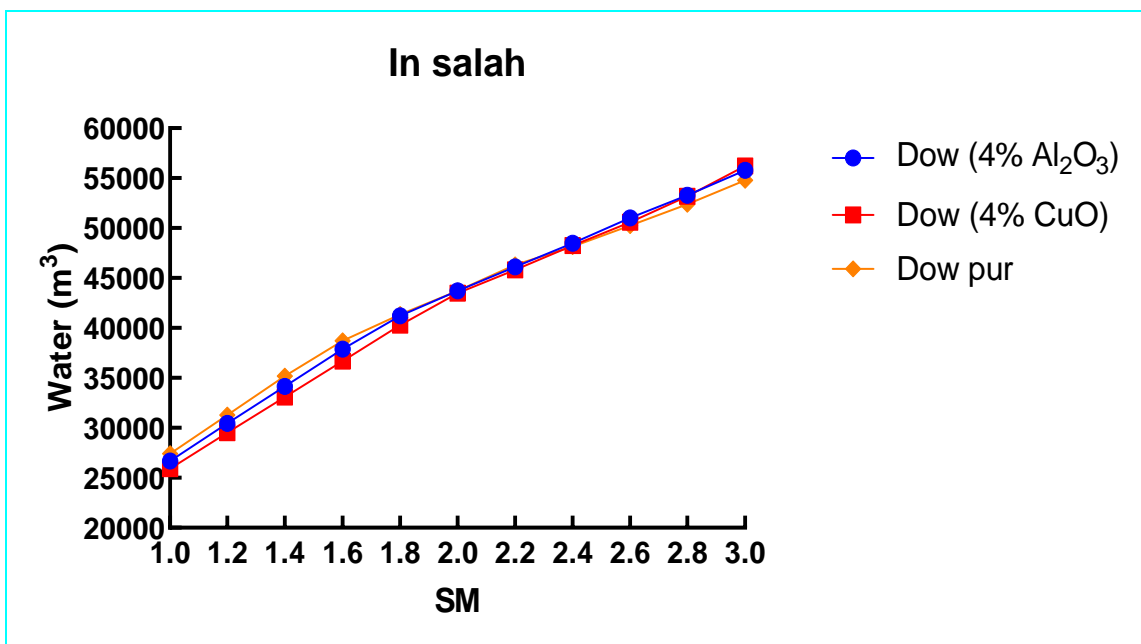
(a<sub>1</sub>)



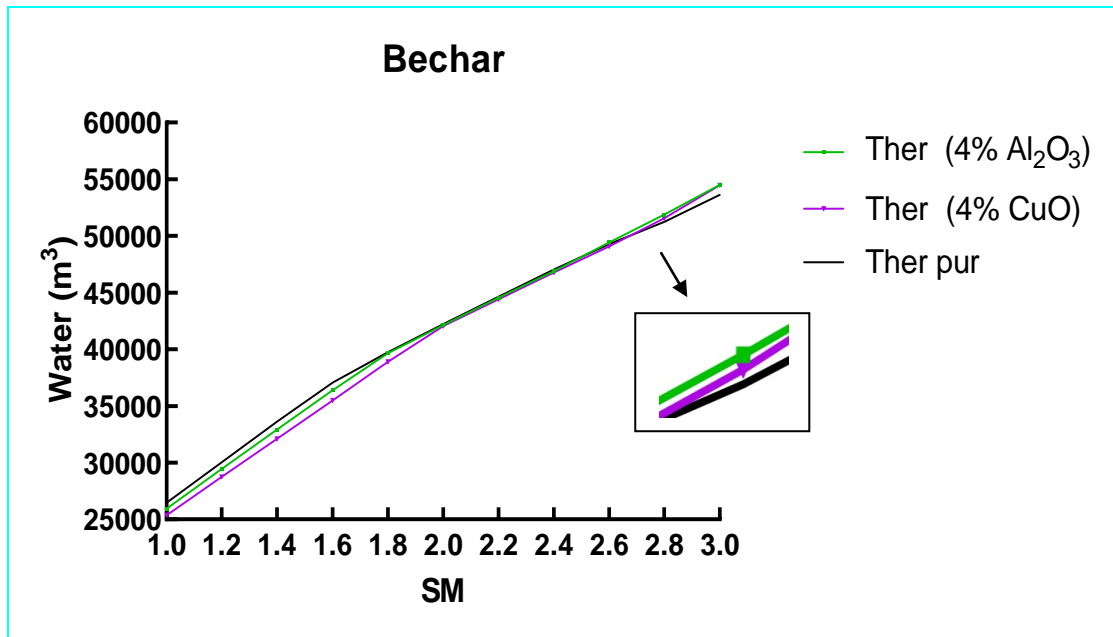
(a<sub>2</sub>)



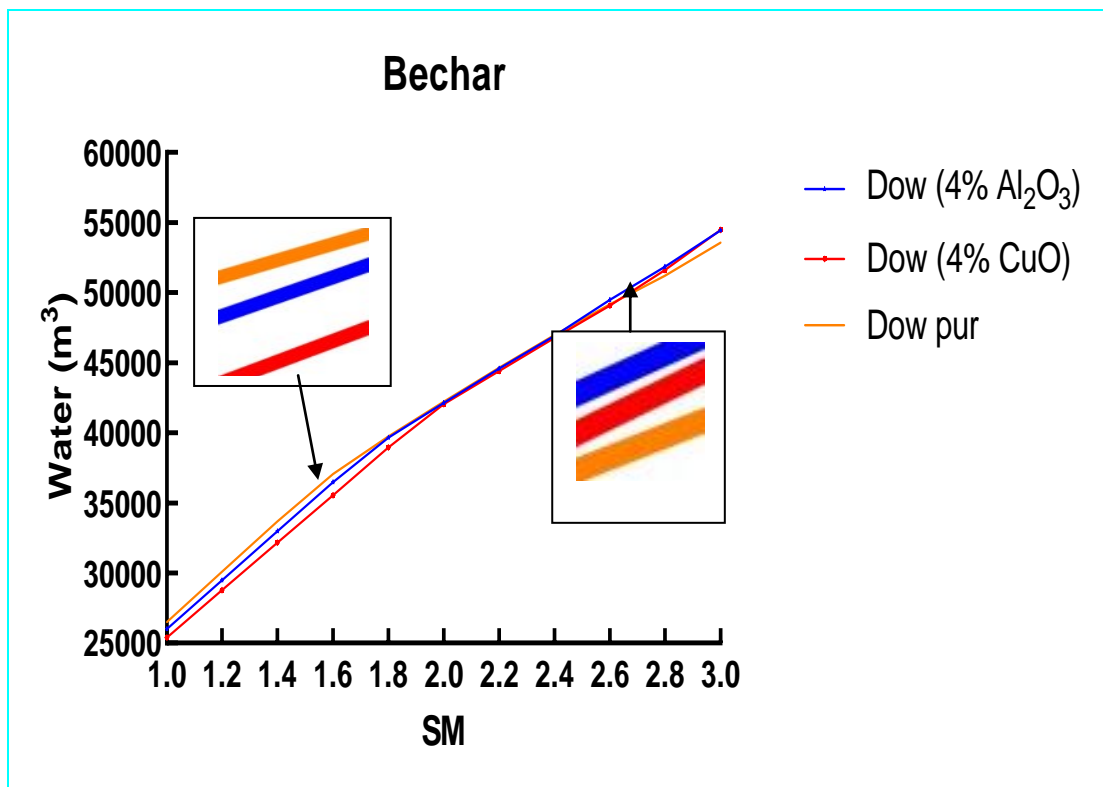
(b<sub>1</sub>)



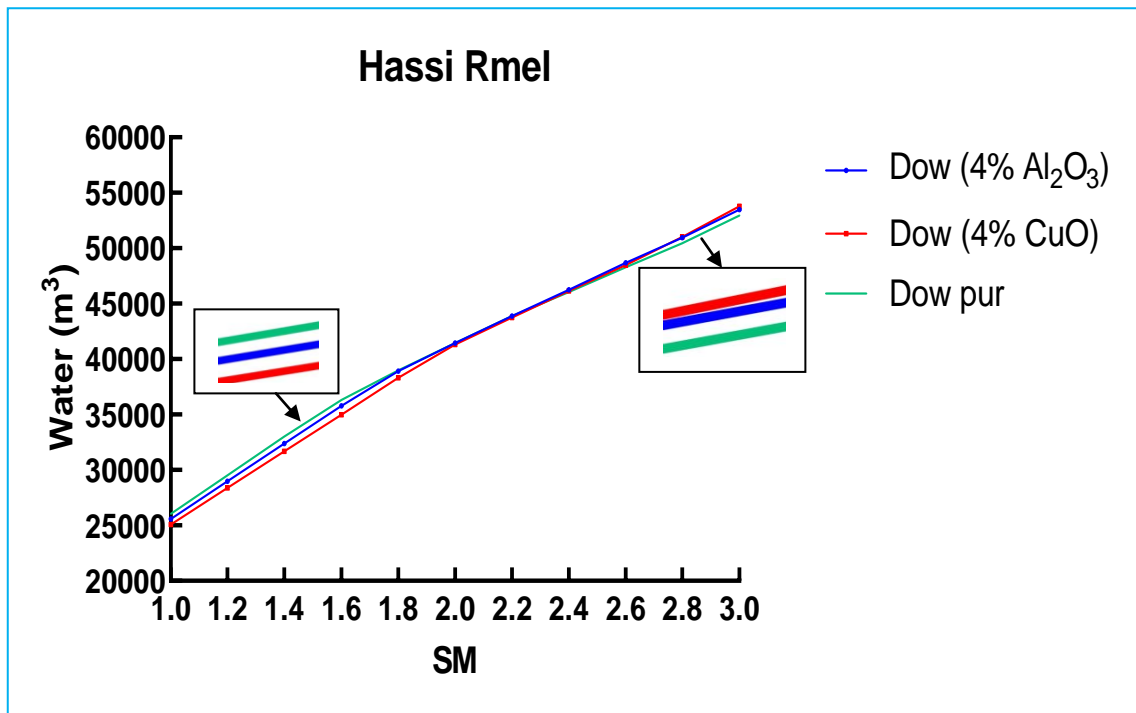
(b<sub>2</sub>)



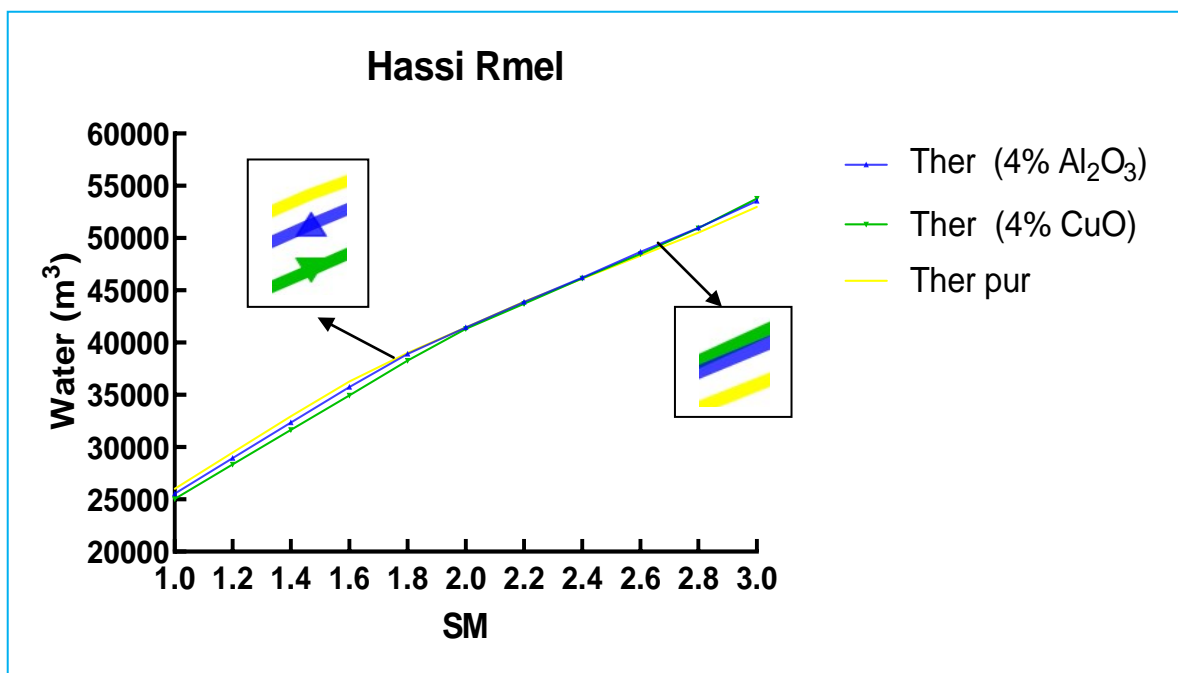
(C<sub>1</sub>)



(C<sub>2</sub>)



(d<sub>1</sub>)

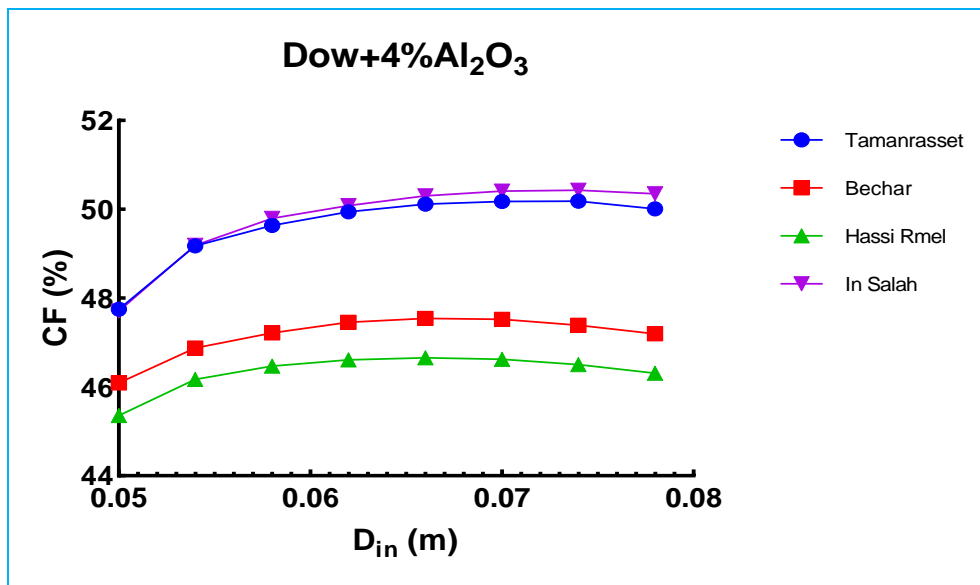


(d<sub>2</sub>)

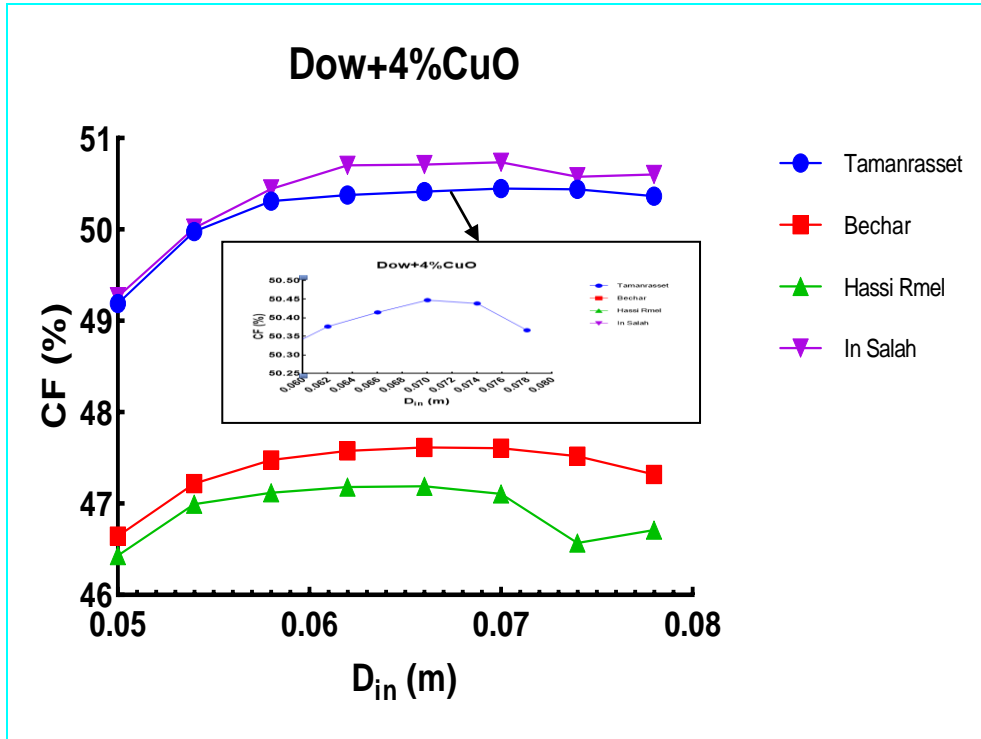
Figure IV. 8: La quantité d'eau consommée par la centrale solaire à miroir PTC : a1) Tamanrasset-Dow, a2) Tamanrasset-Ther ; b1) In-Salah-Ther, b2) In-Salah-Dow ; c1) Bechar-Ther, c2) Bechar-Dow ; d1) Hassi-Rmel-Dow, d2) Hassi-Rmel-Ther.

### IV.4.5. Diamètre du tube récepteur

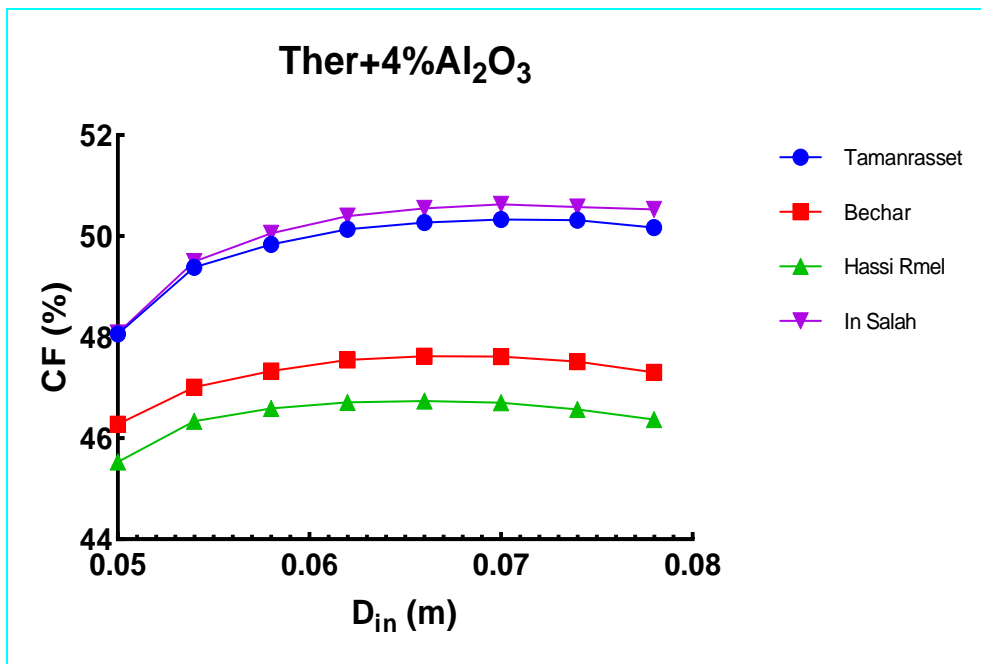
Les problèmes liés à l'utilisation des nanofluides sont principalement en relation avec les pertes de charge, qui sont considérées comme l'inconvénient principal des nanofluides. Plusieurs articles dans la littérature ont annoncé ce problème comme une recherche qui doit être prise en considération. Dans cette partie, nous essayons de trouver une technique permettant de réduire les pertes de charge qui est basée sur l'optimisation du diamètre de tube interne du récepteur. La chute de pression est généralement liée au type du matériau, la viscosité du fluide caloporteur utilisé, le diamètre intérieur du tube et au nombre de coudes et la rugosité. Dans les figures ci-dessous, nous avons optimisé le diamètre intérieur du récepteur dans quatre sites et différents nanofluides. Les résultats montrent l'évolution de l'efficacité de la centrale solaire à base des nanofluides pour différentes valeurs du diamètre intérieur du tube et pour différents sites. Il est clair que le diamètre du tube intérieur joue un rôle important dans l'amélioration de l'efficacité du système et la réduction de la chute de pression. Ensuite, l'efficacité de la centrale augmente lorsque le diamètre du récepteur augmente jusqu'à une valeur optimale, au-delà de cette valeur l'efficacité de la centrale solaire diminue progressivement, ce que provoque l'augmentation des pertes de charge.



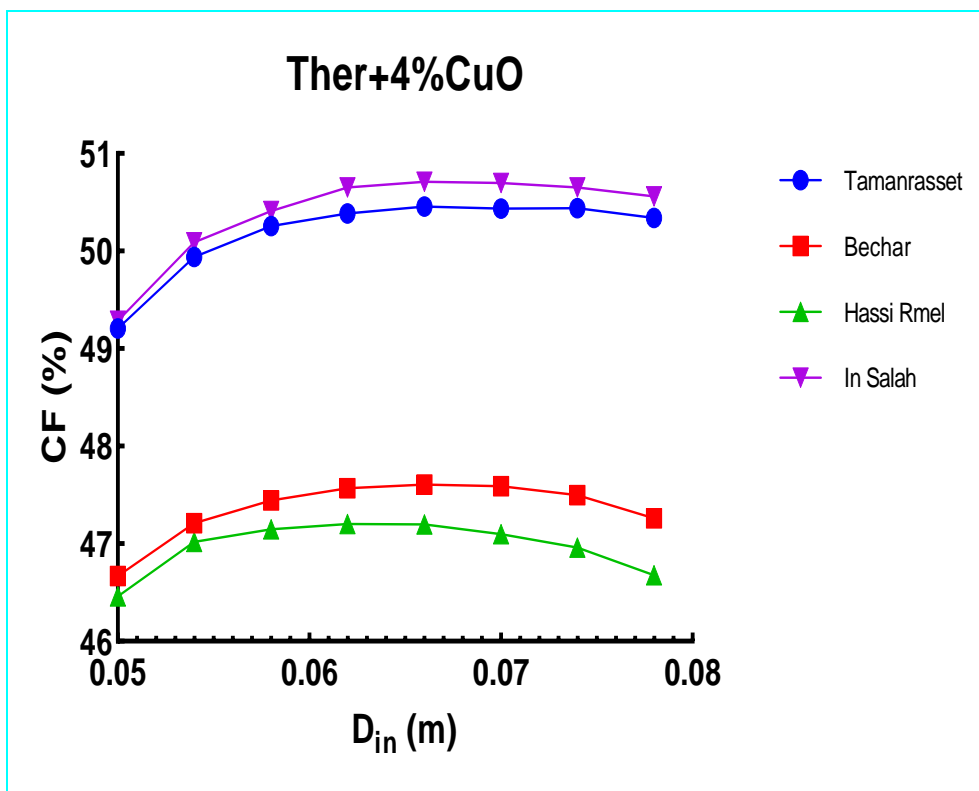
(a)



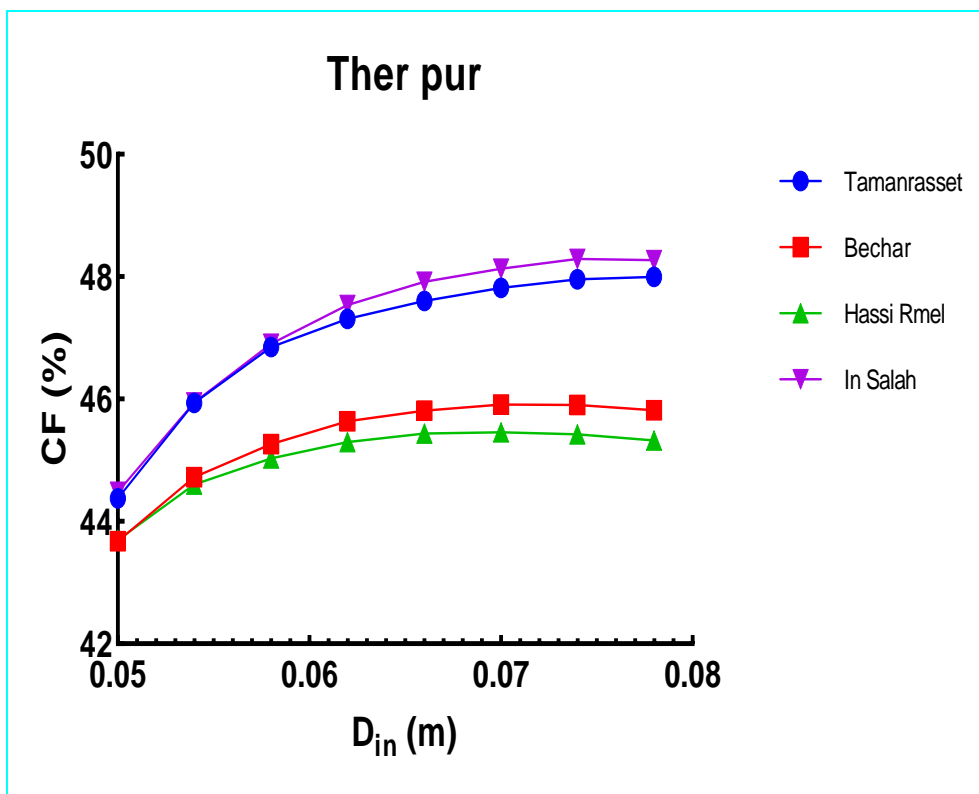
(b)



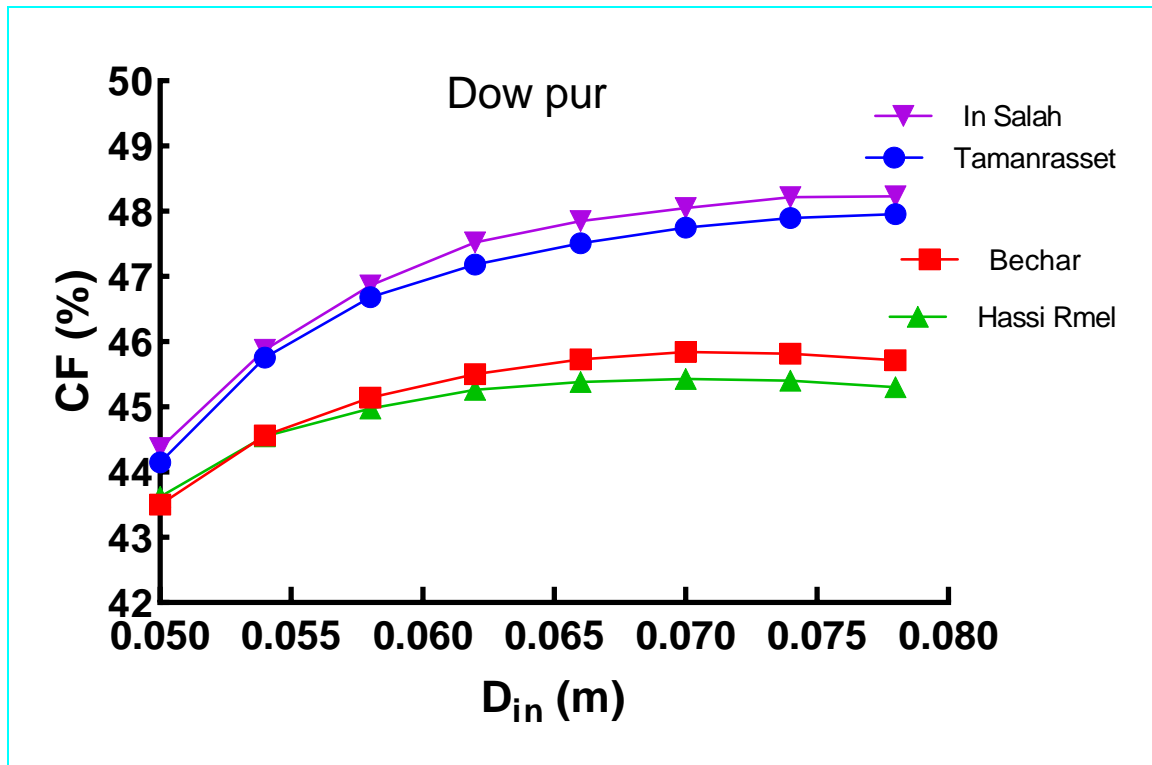
(C)



(d)



(e)



(f)

Figure IV. 9: Efficacité de la centrale solaire en fonction du diamètre intérieur du récepteur pour différents nanofluides : (a) Dowtherm A (4%  $Al_2O_3$ ), (b) Dowtherm A (4% CuO), (c) Therminol VP-1 (4%  $Al_2O_3$ ), (d) Therminol VP-1 (4% CuO), (e) Therminol VP-1 (pur) et (f) Dowtherm A (pur).

Le diamètre intérieur optimal du tube du récepteur solaire pour chaque sites et nanofluides est résumé dans le tableau IV.4. D'après les résultats, on peut constater que le diamètre intérieur optimal du récepteur égal à la valeur conventionnelle pour l'installation solaire à base des fluides purs et plus élevé qu'à base des nanofluides. La sélection du diamètre est dépend de type du nanofluide utilisé comme fluide caloporteur et des conditions météorologiques de chaque région.

Tableau IV. 4.a: Diamètre intérieur optimal du tube récepteur : cas du nanofluide à base du Therminol VP-1.

Therminol Vp-1						
Technologies et scénarios	Ther (4% CuO)		Ther (4% $Al_2O_3$ )		Ther (pur)	
	$D_{in}$ (opt)	CF (%)	$D_{in}$ (opt)	CF (%)	$D_{in}$ (opt)	CF (%)
Tamanrasset	<b>0.066</b>	<b>50</b>	<b>0.07</b>	<b>50</b>	<b>0.074</b>	<b>48</b>
Hassi-Rmel	<b>0.062</b>	<b>47</b>	<b>0.066</b>	<b>47</b>	<b>0.07</b>	<b>45</b>
Bechar	<b>0.066</b>	<b>50</b>	<b>0.07</b>	<b>50</b>	<b>0.074</b>	<b>48</b>
In-Salah	<b>0.066</b>	<b>51</b>	<b>0.07</b>	<b>51</b>	<b>0.074</b>	<b>49</b>

Tableau IV. 4b: Diamètre intérieur optimal du tube récepteurs cas de nanofluide à base du Dowtherm A.

<b>Dowtherm A</b>						
Technologies et scénarios	Dow (4% CuO)		Dow (4% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )		Dow (pur)	
	D <sub>in (opt)</sub>	CF (%)	D <sub>in (opt)</sub>	CF (%)	D <sub>in (opt)</sub>	CF (%)
Tamanrasset	<b>0.07</b>	<b>50</b>	<b>0.074</b>	<b>50</b>	<b>0.074</b>	<b>48</b>
Hassi-Rmel	<b>0.066</b>	<b>47</b>	<b>0.066</b>	<b>47</b>	<b>0.07</b>	<b>45</b>
Bechar	<b>0.066</b>	<b>48</b>	<b>0.066</b>	<b>48</b>	<b>0.07</b>	<b>46</b>
In-Salah	<b>0.07</b>	<b>51</b>	<b>0.074</b>	<b>50</b>	<b>0.074</b>	<b>48</b>

### IV.4.6. Puissance thermique et électrique annuelle produite

#### IV.4.6.1. Puissance thermique

La puissance thermique est la quantité de chaleur dégagée par un système ou par un corps. Couramment, elle est exprimée en watts (W) ou en kilowatts (1 kW = 1000 W). Tout dispositif ou système produisant de la chaleur est qualifié par une certaine puissance, il s'agit d'une caractéristique propre au dispositif.

La [figure IV.10](#) représente la moyenne annuelle de la puissance thermique produite par la centrale solaire à concentrateur cylindro-parabolique dans quatre sites à In-Sallah, Tamanrasset, Bechar et Hassi-Rmel, et une comparaison est faite pour observer l'effet des nanofluides sur la puissance thermique de la centrale solaire. D'après les résultats, on constate que la puissance thermique est améliorée lorsqu'on intègre les nanofluides. Le taux d'amélioration est de 8% à Tamanrasset, 9% à In-Salah, 2% à Bechar et 7% à Hassi-Rmel et la puissance maximale produite est de 134 , 133, 104 et 89 Mwt, respectivement.

#### IV.4.6.2. Puissance électrique

Les histogrammes ci-dessous de [la figure IV-11](#) montrent la puissance électrique annuelle en (MWe par an) produite par les quatre sites étudiés. On remarque que le site de In-Salah figure en premier concernant la puissance électrique produite, suivie de Tamanrasset, Bechar et Hassi-Rmel. Ces sites offrent une puissance électrique annuelle maximale respectivement, égale à 21,6877 , 21,4619 , 17,8214 et 17,068 KWe. Et ils offrent une puissance électrique annuelle minimale de 9,45016, 10,777, 11,5855 et 11,3329 MWe.

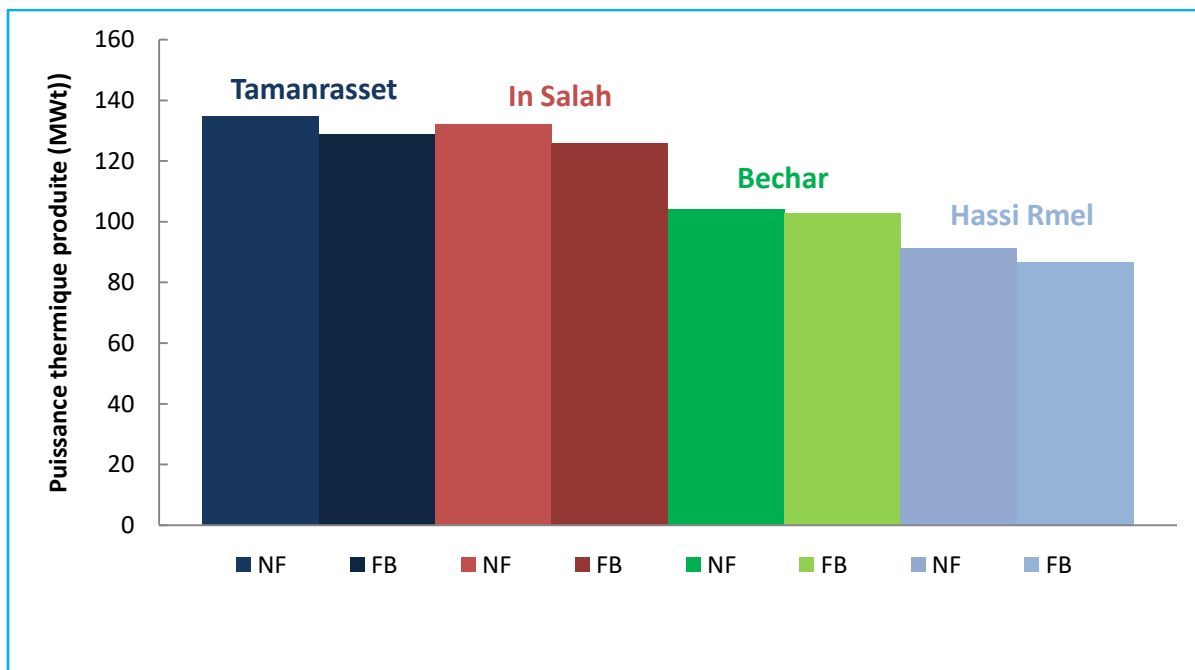


Figure IV. 10: La puissance thermique annuelle produite (MWt)

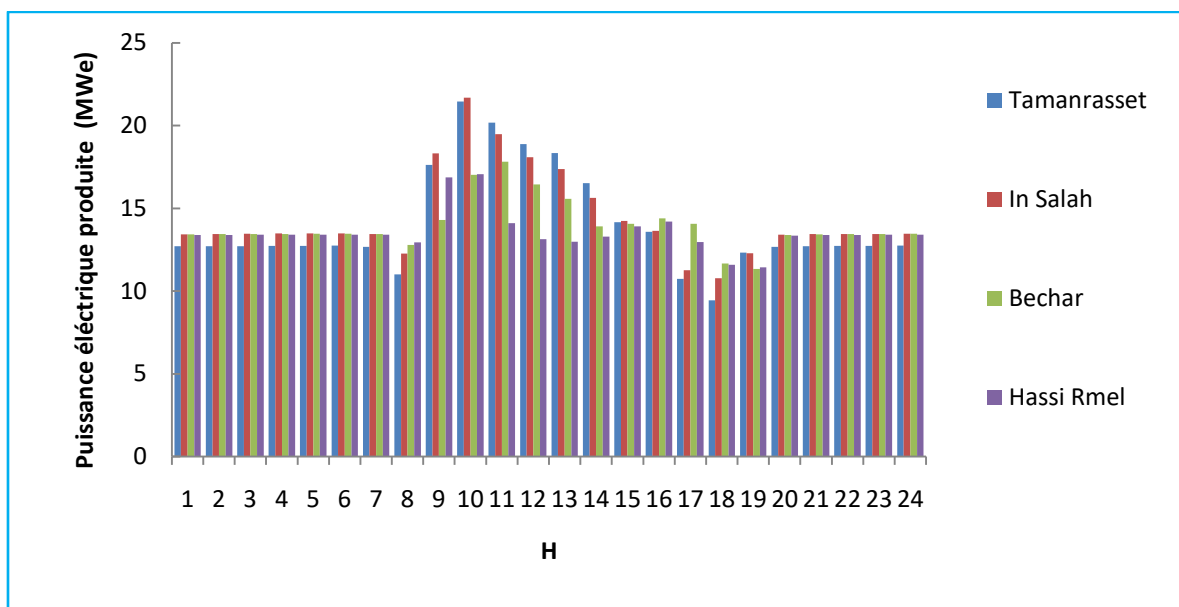


Figure IV. 11: La puissance électrique annuelle produite (MWe)

### IV.5. Comparaison des résultats obtenus

Le [tableau.IV.5](#) montre la comparaison des résultats obtenus dans ce travail avec les études qui ont été réalisées et qui sont proches par rapport à notre cas, notamment avec ou sans stockage. Nous avons constaté que les résultats obtenus sont vraiment fiables et encourageants.

Tableau IV. 5: Comparaison des résultats par rapport aux autres études

	Fluide caloporteur	La technologie (CSP)	stockage	Puissance (MW)	SM <sub>opt</sub>	CF (%)
<b>Cette étude</b>	Nanofluides	Centrale hybride	Sans stockage	50	3	43-51
<b>Mihoub et al. [228]</b>	Therminol VP-1	PTCSTPP	8H	50	3.1	43
<b>Liu et al. [229]</b>	Synthetic oil	PTC	6H	100		20-25 40-53
<b>Khaoula Ikh et al. [230]</b>	Therminol VP-1	hybride	Sans stockage	25	1.6	47

### IV.6. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté une étude sur le comportement de la centrale solaire à concentrateurs cylindro-paraboliques à base des nanofluides dans quatre sites différents en Algérie. En premier lieu, nous avons réalisé une analyse thermique et optique sous forme des courbes à l'échelle horaire et les moyennes annuelles des diverses performances de la centrale solaire à concentration ont été discutés, on a commencé par le rendement optique, suivi par la vitesse du vent et enfin nous avons présenté l'irradiation normale directe de chaque région. En deuxièmes lieu, nous avons utilisé les nanofluides comme fluides caloporteurs et nous avons déterminé les caractéristiques de la centrale solaire à savoir son efficacité, la quantité d'eau consommée et la puissance thermique et électrique annuelle produite. Pour diminuer les pertes de charge dans le récepteur nous avons déterminé le diamètre optimal qui nous permet d'avoir une bonne efficacité de la centrale solaire. Les résultats les plus importants sont résumés ci-dessous :

- ❖ Le rendement optique atteint ces valeurs maximales entre dix heures et dix-huit heures avec une valeur de 68.85 %, 68.8 %, 68.85 %, 65.14 % et 61.95% à In-Salah, Tamanrasset , Bechar et Hassi-Rmel, respectivement.
- ❖ L'ensoleillement normal direct annuel dans quatre sites présente des valeurs considérables importantes qui dépassent les 700 W/m<sup>2</sup>.

- ❖ Les résultats montrent également que le vent ne présente pas une menace dans tous les sites et ne dépasse pas 5 m/s.
- ❖ La consommation d'eau est réduite à 2.7 , 5.4, 2.8 et 5.5% pour une centrale solaire à base des nanofluides ( $Al_2O_3$ /Dowtherm A), (CuO/Dowtherm A) , ( $Al_2O_3$ / Therminol VP- 1) et (CuO/ Therminol VP -1) , respectivement par rapport à leurs fluides de base
- ❖ Il s'avère que l'efficacité de la centrale à concentration à base des nanofluides augmente avec l'augmentation du SM jusqu'à une valeur optimale au-delà de cette valeur, le rendement de la centrale diminue progressivement. La valeur optimale de l'efficacité obtenue est de 51% lorsque le SM est égal à 3.
- ❖ Le choix optimal et le meilleur choix de nanofluide à utiliser comme fluide caloporteur est CuO/Dowtherm A, ce qui montre que l'intégration de nanofluides dans une centrale solaire à concentrateurs cylindro-paraboliques peut grandement contribuer à améliorer son efficacité.
- ❖ La puissance thermique et électrique annuelle produite par la centrale solaire est plus grandes par apport à leur fluide de base conventionnel.

---

## **Conclusions et Perspectives**

---

### Conclusions et Perspectives

Dans cette thèse, nous avons proposé une étude d'analyse du comportement d'une centrale solaire à concentration à base de nanofluides dans quatre sites tels que Bechar, Tamanrasset, In-Salah et Hassi-Rmel. Nous avons reparti le travail en deux tâches. Dans la première partie, une étude numérique à l'aide du code MATLAB a été menée pour évaluer l'influence de la concentration des nanoparticules, la température et le fluide de base sur les propriétés thermophysiques des nanofluides (mono-hybrides). Dans cette partie, nous avons examiné quatre nanofluides : le Therminol VP-1, le Syltherm 800, le Dowtherm A et l'eau mélangés avec deux nanoparticules le  $\text{Al}_2\text{O}_3$  et le CuO. Dans la seconde partie, une méthodologie a été proposée pour la détermination des performances de la centrale CSP à concentrateurs cylindro-paraboliques et son efficacité en variant le diamètre intérieur du récepteur en fonction de plusieurs scénarios notamment les sites d'implantation de la centrale solaire et le type des fluides caloporteurs utilisés. Le logiciel SAM (System Advisor Model) a été employé pour déterminer les paramètres de conception, tels que l'efficacité optique, l'irradiation solaire de toutes les régions, la vitesse du vent, le multiple solaire (SM), le rendement (CF), l'énergie thermique et l'électrique annuelles produites par la centrale électrique d'une puissance de 50 MW. Les données météorologiques de ces régions ont été tirées sur le site officiel de NREL et sur la plateforme du logiciel METEONORM.

Les principales conclusions issues de cette étude sont les suivantes :

- L'ajout des nanoparticules améliore la masse volumique des nanofluides mono-hybrides et joue également un grand rôle dans l'amélioration de la conductivité thermique, cette propriété représente un paramètre fondamental dans le transfert de chaleur. Pour une concentration volumique d' $\text{Al}_2\text{O}_3=4\%$ , et  $\text{CuO}=1\%$  et à  $T=400^\circ\text{C}$ , le taux d'amélioration moyen de la conductivité thermique est de 13 % en utilisant les nanofluides hybrides. En revanche, l'augmentation de la température provoque la diminution de la masse volumique et la conductivité thermique d'une manière proportionnelle.
- La capacité thermique augmente avec l'augmentation de la température et décroît avec l'augmentation de la concentration des nanoparticules. Ainsi, les nanofluides les mieux compétitifs sont des nanofluides à base de Dowtherm A et Therminol VP-1.
- La consommation d'eau est réduite de 2.7% , 5.5% , 2.8% et 5.5% pour une centrale solaire à base de nanofluides ( $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Dowtherm A}$ ), ( $\text{CuO}/\text{Dowtherm A}$ ) , ( $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Therminol VP-1}$ ) et ( $\text{CuO}/\text{Therminol VP-1}$ ), respectivement par rapport à leurs fluides de base.
- Le nanofluide à base de Dowtherm A et CuO a été considéré comme un choix optimal et le meilleur par rapport aux autres nanofluides. Le choix de ce nanofluide comme fluide caloporteur dans la centrale solaire à concentrateurs cylindro-paraboliques offre une bonne efficacité.

- Le rendement optique atteint ses valeurs maximales entre dix (10) heures et dix-huit (18) heures avec une valeur de 68,8% , 68,85%, 65,14% et 61,95% à In Salah, Tamanrasset , Bechar et Hassi-Rmel respectivement.
- Le diamètre optimal obtenu pour avoir un meilleur rendement de la centrale solaire à concentration PTC à base des nanofluides est de 0.07 m.
- La puissance thermique et électrique annuelle produite par la centrale solaire à concentration PTC à base des nanofluides est plus performant par apport au fluide de base conventionnel. Nous avons constaté que la puissance thermique a été améliorée lorsqu'on intègre les nanofluides, le taux d'amélioration est de 8% à Tamanrasset, 9% à In-Salah, 2% à Bechar et 7% à Hassi-Rmel.

**En perspectives, et pour les travaux à venir, il serait aussi pertinent de tenir en compte des suggestions et des propositions suivantes :**

- ❖ Il est possible d'intégrer d'autres technologies de stockage dans les centrales solaires à concentration, comme le stockage de chaleur latente ou les technologies de stockage chimique.
- ❖ Il est également envisageable d'ajouter d'autres modèles de capteurs solaires tels que les héliostats ou les capteurs de Fresnel à bases de nanofluides. Cela permettra de mener une étude comparative de ces diverses technologies.
- ❖ Des études expérimentales et la dynamique moléculaire quantique sont indispensables pour mieux maîtriser les mécanismes nanométriques des nanofluides (effet Brownien).
- ❖ La production directe de la vapeur comme fluide caloporteur peut être envisagé dans les régions dans lesquelles les températures sont trop élevées.
- ❖ Il est possible d'examiner expérimentalement les performances de la centrale solaire à concentration à bases des nanofluides.
- ❖ Il est envisageable d'élaborer des nouveaux modèles théoriques pour les propriétés thermophysiques des nanofluides en prenant en compte tous les phénomènes du transfert de chaleur à l'échelle nanométrique.
- ❖ Il est possible d'étendre cette étude pour d'autres types de centrales solaire telle que la centrale solaire à tour, la centrale solaire à miroir de Fresnel, etc...
- ❖ Il serait intéressant de procéder à une étude technico-économique et environnementale de l'installation.

## Publications et Communications liés au sujet de la thèse

### Publications

- 1- **F.BOUFOUDI**, S.ZOUAOUI and S.MIHOUB, ‘ Numerical investigation of the (Mono-Hybrid) Nanofluid Thermophysical Properties for Concentrated Solar Power Plant’ ; Journal of Nanofluids, Volume 12, Number 5, June 2023, pp. 1233-1241(9) ; DOI: <https://doi.org/10.1166/jon.2023.2015>
- 2- **F.BOUFOUDI**, S.MIHOUB and S.ZOUAOUI, ‘Receiver parameter optimization for nanofluid-based Parabolic Trough Concentrating plant: A case study’ ; Energy Sources, Part A Recovery, Utilization, and Environmental Effects, Taylor & Francis, VOL. 45, NO. 2, 5559–5576. 2023; DOI: 10.1080/15567036.2023.2209036
- 3- **F.BOUFOUDI**, S.ZOUAOUI and S.MIHOUB, ‘OPTIMISATION DES PROPRIETES THERMOPHYSIQUE DU NANOFLUIDE; Algerian Journal of Engineering Architecture and Urbanism, AJEAU, Vol. 5 Nr. 5 2021 ISSN: 2588- 1760, Proc ; Algerian Journal of Engineering Architecture and Urbanism (aneau.org)
- 4- **F.BOUFOUDI**, S.MIHOUB and S.ZOUAOUI, Techno-economic analysis of a thermodynamic solar power plant based on molten salts in different sites in Algeria ; 2023; Journal of Physical & Chemical. Vol. 2 n°2 (2023) : DOI: <https://doi.org/10.58452/jpcr.v2i2.157>
- 5- **F.BOUFOUDI**, S.ZOUAOUI and S.MIHOUB, Investigation of the Thermophysical Properties of Nanofluids Based on Metal Oxides: Application in Concentrated Solar Power Plants ; 2023; Journal of Technology Innovations and Energy. Vol. 10 n°2 (2023) : v2i22023 : DOI: 10.56556/jtie.v2i4.691

### Communications

- 1- **F.BOUFOUDI**, S.ZOUAOUI and S.MIHOUB , Numerical study of thermal conductivity enhancement of MgO nanofluids; (MSE'22); Proceedings of 1st National Conference of Materials sciences And Engineering, ISBN: 978-9931-9603-2-4. (16) (PDF) Proceedings of First National Conference On Materials Sciences and Engineering ( MSE'22) (researchgate.net)
- 2- **F.BOUFOUDI**, S.ZOUAOUI and S.MIHOUB , Techno-economic analysis of a thermodynamic solar power plant based on molten salts in different sites in Algeria ; Mohamed El Bachir El Ibrahimi University, Bordj-Bou-Argeridj, March 6th -7 th, 2023; Journal of Physical & Chemical Research; <https://sites.google.com/univbba.dz/nspca23/publications>
- 3- **F.BOUFOUDI**, S.ZOUAOUI and S.MIHOUB, Etude des performances d'une centrale solaire a' capteur cylindro-parabolique; 1 st National Conference On Science & Technology, 1st NCST22, 27th -28th JUNE 2022, Mascara, Algeria

4- **F.BOUFOUDI,S.ZOUAOUI** and **S.MIHOUB**,Study of the performance of a solar thermal collector on different locations in algeria; 1 ST International Conference On Renewable Materials And Energies ICRME2022 October 26-27, 2022, OUARGLA-ALGERIA

5- **F.BOUFOUDI,S.ZOUAOUI** and **S.MIHOUB**, Optimization of the Performance of a Concentrated Solar Power Plant: Fresnel Mirror; 4th International Conference on Applied Engineering and Natural Sciences on 10-13 November in 2022 at Konya/Turkey; 3rd International Conference On Applied Engineering And | ICAENS 2022

6- **F.BOUFOUDI,S.ZOUAOUI** and **S.MIHOUB**,Numerical Simulation Of A 100 Mw Solar Tower Power Plant: based on molten salts; 2 nd International Conference on Scientific and Academic Research on 14-16 March in 2023 at Konya/Turkey, Conference | International Conference On Scientific And Academic Research Icsar (2022)

## Références bibliographiques

- [1] N. Guido, C. Marta, “Climate normal in the European Alps : focus on high-elevation environments” , *Journal of Mountain Science*. 2023, doi.org/10.1007/s11629-023-7951.
- [2] H. C. Lau, K. Zhang, H. K. Bokka, and S. Ramakrishna, “A Review of the Status of Fossil and Renewable Energies in Southeast Asia and Its Implications on the Decarbonization of ASEAN”, *Energies* .2022,doi:10.3390/en15062152.
- [3] F. Martins, C. Felgueiras, M. Smitkova, and N. Caetano, “Analysis of Fossil Fuel Energy Consumption and Environmental Impacts in European Countries ”,*Energie Procedia*. 2019, doi: 10.3390/en12060964.
- [4] I.Sullivan, A.Goryachev, A. Digdaya1 , X.Li , A. Atwater, David A. Vermaas and C.Xiang, “CO2 capture”, *Chemistry of Materials* . 2021, doi: 10.1038/s41929-021-00699-7.
- [5] T. S. Adebayo, S. D. Oladipupo, I. Adeshola, and H. Rjoub, “technological innovation on CO 2 emissions : evidence from Portugal Wavelet analysis of impact of renewable energy consumption and technological innovation on - CO 2 emissions : evidence from Portugal,” *Environ. Sci. Pollut. Res.*2022, doi: 10.1007/s11356-021-17708-8.
- [6] Y.Himri , S.Rehman , A.Mostafaeipour , S.Himri , A.Mellit , M.Merzouk and N. Kasbadji Merzouk, “Overview of the Role of Energy Resources in Algeria ’ Energy Transition,” 2022, doi./10.3390/en15134731.
- [7] M. N e h. and H. A. Slimane Sefiane, U. Strategy Transition to Green Economy (STRAEV) Research Laboratory, and A. of Mostaganem, “Financial or Socio-Economic Feasibility ? Potential Assessment of Renewable Energy Investment in Algeria, 2022, doi: 10.24112/jaes.060004.
- [8] B. Nagappan, Y. Devarajan, and E. Kariappan, “Performance analysis of sustainable solar energy operated ejector refrigeration system with the combined effect of Scheffler and parabolic trough collectors to lower greenhouse gases,” *Environ. Sci. Pollut. Res.* 2022, doi: 10.1007/s11356-022-19058-5.
- [9] R. P. Praveen and K. V. V. Chandra Mouli, “Performance enhancement of parabolic trough collector solar thermal power plants with thermal energy storage capability,” *Ain Shams Eng. J.* 2022, doi: 10.1016/j.asej.2022.101716.
- [10] B. Thonon, “Le solaire thermodynamique pour la production de chaleur et d ’ electricite bernard thonon”, CEA Tech – LITEN.2018.RCS Paris B 775 685 019..
- [11] S. U. S. Choi, “Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles,” *Am. Soc. Mech. Eng. Fluids Eng. Div. FED*, Book,1995, pp. 99–105.
- [12] R. A. Taylor and P. E. Phelan, “Thermal Energy Conversion in Nanofluids Thermal Energy Conversion in Nanofluids”, Arizona state university,” 2014, at: <https://www.researchgate.net/publication/268177779>.
- [13] Y. Li, S. Tung, E. Schneider, and S. Xi, “A review on development of nano fl uid preparation and characterization” ,*powder technology*.2009, doi:

- 10.1016/j.powtec.2009.07.025.
- [14] S. Chakraborty and P. K. Panigrahi, "Stability of nano fluid : A review," *applied thermal engineering*. 2020, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2020.115259.
- [15] K. Y. Leong, K. Z. K. Ahmad, H. Chyuan, M. J. Ghazali, and A. Baharum, "Synthesis and thermal conductivity characteristic of hybrid nano fluids – A review," *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2016, doi: 10.1016/j.rser.2016.11.068.
- [16] L. S. Sundar, M. K. Singh, and A. C. M. Sousa, "Thermal conductivity of ethylene glycol and water mixture based Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> nanofluid," *Int. Commun. Heat Mass Transf.*, 2013, doi: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2013.08.026.
- [17] P. Christian, M. Baalousha, and T. Hofmann, "Nanoparticles : Structure , Properties , Preparation and Behaviour in Nanoparticles : structure , properties , preparation and behaviour in environmental media," 2014, doi: 10.1007/s10646-008-0213-1.
- [18] H. Al-Kayiem, S. Lin, and A. Lukmon, "Review on Nanomaterials for Thermal Energy Storage Technologies," *Nanosci. & Nanotechnology-Asia*. 2013, doi: 10.2174/22113525113119990011.
- [19] A. Ahmed, H. Baig, S. Sundaram, and T. K. Mallick, "Review Article Use of Nanofluids in Solar PV / Thermal Systems," *International Journal of Photoenergy*. . 2019, doi.org/10.1155/2019/8039129.
- [20] S. Akilu, A. T. Baheta, M. A. Mior, A. A. Minea, and K. V. Sharma, "Properties of glycerol and ethylene glycol mixture based SiO<sub>2</sub>-CuO/C hybrid nanofluid for enhanced solar energy transport," *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, 2017, doi: 10.1016/j.solmat.2017.10.027.
- [21] A. M. Bayomy and M. Z. Saghir, "Experimental study of using c -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – water nanofluid flow through aluminum foam heat sink : Comparison with numerical approach," *Int. J. Heat Mass Transf.* 2017, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.11.037.
- [22] M. Bahiraei and S. Heshmatian, "Electronics cooling with nano fluids : A critical review," *Energy Convers. Manag.* 2018, doi: 10.1016/j.enconman.2018.07.047.
- [23] A. M. Hussein, R. A. Bakar, K. Kadrigama, and K. V Sharma, "Heat transfer enhancement using nano fluids in an automotive cooling system ," *Int. Commun. Heat Mass Transf.* 2014, doi: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2014.01.003.
- [24] M. Hatami, M. Hasanpour, and D. Jing, "Recent developments of nanoparticles additives to the consumables liquids in internal combustion engines : Part I : Nano-fuels," *J. Mol. Liq.* 2020, doi: 10.1016/j.molliq.2020.114250.
- [25] S. Harikrishnan, S. Magesh, and S. Kalaiselvam, "Thermochimica Acta Preparation and thermal energy storage behaviour of stearic acid – TiO<sub>2</sub> nanofluids as a phase change material for solar heating systems," *Thermochim. Acta*, 2013, doi: 10.1016/j.tca.2013.05.001.
- [26] V. Eswaraiah, V. Sankaranarayanan, and S. Ramaprabhu, "Graphene-Based Engine Oil Nanofluids for Tribological Applications," American Chemical Society, 2011. dx.doi.org/10.1021/am200857.

- [27] N. H. Al-garah, F. L. Rashid, A. Hadi, and A. Hashim, "Synthesis and Characterization of Novel ( Organic – Inorganic ) Nanofluids for Antibacterial , Antifungal and Heat Transfer Applications," . *jbns* 12, 2018, doi: 10.1166/jbns.2018.1538.
- [28] N. A. Brusentsov, "Evaluation of ferromagneticuids and suspensions for the site-speci " c radiofrequency-induced hyperthermia of MX11 sarcoma cells in vitro," *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2001. PII: S 0 3 0 4 - 8 8 5 3 ( 0 0 ) 0 1 2 3 8 - 5
- [29] F. mnal.J. Felicia, S. Vinod, and J. Philip, "Recent Advances in Magnetorheology of Critical Review," , *jon*,2016, doi: 10.1166/jon.2016.1203.
- [30] E. Bellos and C. Tzivanidis, "Alternative designs of parabolic trough solar collectors," *Prog. Energy Combust. Sci.* 2019, doi: 10.1016/j.pecs.2018.11.001.
- [31] C. E. Kennedy and H. Price, "Progress In Development Of High-Temperature Solar-Selective Coating," *j.pecs*, 2016. doi: 10.1015/j.pecs.2015.11.002.
- [32] W. Ahmad, Eckhard Lü pfert, "Advances in Parabolic Trough Solar Power Technology Related papers Advances in Parabolic Trough Solar Power Technology," *energy*,2005, doi: 10.1115/1.1467922.
- [33] D. Rodriguez-sanchez and G. Rosengarten, "Improving the concentration ratio of parabolic troughs using a second-stage flat mirror," *Appl. Energy*.2015,doi: 10.1016/j.apenergy.2015.08.106.
- [34] H. Liang , "A Monte Carlo method and finite volume method coupled optical simulation method for parabolic trough solar collectors," *Appl. Energy*, vol.2017, doi: 10.1016/j.apenergy.2017.05.047.
- [35] T. Li and C. Yuan, "An optimal design analysis of a novel parabolic trough lighting and thermal system," *International Journal of Energy Research*,2016 . <https://doi.org/10.1002/er.3505>.
- [36] Ullah and S. Shin, " Highly concentrated optical fiber-based daylighting systems for multi-floor office buildings. *Energy Build.*, 2014, doi: 10.1016/j.enbuild.2013.12.031..
- [37] Z. Zhao, F. Bai, X. Zhang, and Z. Wang, "Experimental study of pin finned receiver tubes for a parabolic trough solar air collector," *Sol. Energy*, 2020, doi: 10.1016/j.solener.2020.06.070.
- [38] J. Muñoz and A. Abánades, "Analysis of internal helically finned tubes for parabolic trough design by CFD tools," *j.apenergy*, 2011, doi: 10.1016/j.apenergy.2011.04.026.
- [39] Y. Demagh, I. Bordja, Y. Kabar, and H. Benmoussa, "ScienceDirect A design method of an S-curved parabolic trough collector absorber with a three-dimensional heat flux density distribution," *Sol. ENERGY*, , 2015, doi: 10.1016/j.solener.2015.10.002.
- [40] R.Naveenkumar & M. Ravichandran,B.Stalin, A.Ghosh ,A.Karthick ,L.Sundar Raj Leo Aswin S. Priyanka ,S.Kumar , "Comprehensive review on various parameters that influence the performance of parabolic trough collector," , *Environmental Science and Pollution Research*. 2021, doi.org/10.1007/s11356-021-13439-y
- [41] T. Ruegamer, H. Kamp, T. Kuckelkorn, W. Schiel, G. Weinrebe, and P. Nava, "Molten salt for parabolic trough applications : system simulation and scale effects," *Energy*

- Procedia*, 2014, doi: 10.1016/j.egypro.2014.03.161.
- [42] M. Sa, F. Zaversky, R. Medina, J. Garcı, and D. Astrain, “Object-oriented modeling for the transient performance simulation of parabolic trough collectors using molten salt as heat transfer fluid,” , *solener* .2013, doi: 10.1016/j.solener.2013.05.015.
- [43] G. Hoste and N. Schuknecht, “Thermal efficiency analysis of SkyFuel ’ s advanced , large-aperture , parabolic trough collector,” *Energy Procedia*, 2015, doi: 10.1016/j.egypro.2015.03.012.
- [44] J. Muñoz-anton, M. Biencinto, E. Zarza, and L. E. Díez, “Theoretical basis and experimental facility for parabolic trough collectors at high temperature using gas as heat transfer fluid,” *j.apenergy*, 2014, doi: 10.1016/j.apenergy.2014.08.099.
- [45] Y. Marif, H. Benmoussa, H. Bouguettaia, M. M. Belhadj, and M. Zerrouki, “Numerical simulation of solar parabolic trough collector performance in the Algeria Saharan region,” *Energy Convers. Manag.*, doi: 10.1016/j.enconman.2014.06.002.
- [46] M. Nem and J. Kasperski, “Experimental investigation of concentrated solar air-heater with internal multiple- fi n array,” ,*renene*.2016, doi: 10.1016/j.renene.2016.06.038.
- [47] R. Bader, A. Pedretti, M. Barbato, and A. Steinfeld, “An air-based corrugated cavity-receiver for solar parabolic trough concentrators,” *Appl. Energy*, 2015, doi: 10.1016/j.apenergy.2014.10.050.
- [48] H. Al-ansary and O. Zeitoun, “Numerical study of conduction and convection heat losses from a half-insulated air-filled annulus of the receiver of a parabolic trough collector,” *Sol. Energy*, 2011, doi: 10.1016/j.solener.2011.09.002.
- [49] P. Good, G. Ambrosetti, A. Pedretti, and A. Steinfeld, “A 1 . 2 MW th solar parabolic trough system based on air as heat transfer fluid at 500 ° C — Engineering design , modelling , construction , and testing,” *Sol. Energy*, 2016, doi: 10.1016/j.solener.2016.10.002.
- [50] S. Mukherjee, S. Ebrahim, P. C. Mishra, N. Ali, and P. Chaudhuri, “A Review on Pool and Flow Boiling Enhancement Using Nanofluids: Nuclear Reactor Application,” *Processes*, 2022, doi: 10.3390/pr10010177.
- [51] H. Liang, C. Zhu, M. Fan, S. You, H. Zhang, and J. Xia, “Study on the thermal performance of a novel cavity receiver for parabolic trough solar collectors,” *Appl. Energy*, 2018, doi: 10.1016/j.apenergy.2018.04.030.
- [52] W. Fuqiang, C. Ziming, T. Jianyu, Y. Yuan, S. Yong, and L. Linhua, “Progress in concentrated solar power technology with parabolic trough collector system : A comprehensive review,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*2017, doi: 10.1016/j.rser.2017.05.174.
- [53] G. Xu, W. Chen, S. Deng, X. Zhang, and S. Zhao, “Performance Evaluation of a Nanofluid-Based Direct Absorption Solar Collector with Parabolic Trough Concentrator,” , *nano* .2015, doi: 10.3390/nano5042131.
- [54] H. Yang, Q. Wang, X. Huang, J. Li, and G. Pei, “Performance study and comparative analysis of traditional and double-selective-coated parabolic trough receivers,” *Energy*, 2018, doi: 10.1016/j.energy.2017.12.126.

- [55] O. Mahian, A. Kianifar, S. Zeinali, D. Wen, and A. Z. Sahin, "Nano Energy Nano fluids effects on the evaporation rate in a solar still equipped with a heat exchanger," *NANO*. 2017, doi: 10.1016/j.nanoen.2017.04.025.
- [56] M. T. Jamal-abad, S. Saedodin, and M. Aminy, "Experimental investigation on a solar parabolic trough collector for absorber tube filled with porous media," *Renew. Energy*, 2017, doi: 10.1016/j.renene.2017.02.004.
- [57] M. Bortolato, S. Dugaria, and D. Del, "Experimental study of a parabolic trough solar collector with flat bar-and-plate absorber during direct steam generation," *Energy*, 2016, doi: 10.1016/j.energy.2016.10.021.
- [58] D. D. Nation, P. J. Heggs, and D. W. Dixon-hardy, "Modelling and simulation of a novel Electrical Energy Storage ( EES ) Receiver for Solar Parabolic Trough Collector ( PTC ) power plants," *Appl. Energy*, 2017, doi: 10.1016/j.apenergy.2017.03.084.
- [59] A. Mwesigye, T. Bello-ochende, and J. P. Meyer, "Heat transfer and thermodynamic performance of a parabolic trough receiver with centrally placed perforated plate inserts," *Appl. Energy*, 2014, doi: 10.1016/j.apenergy.2014.03.037.
- [60] X. Song, G. Dong, F. Gao, X. Diao, and L. Zheng, "A numerical study of parabolic trough receiver with nonuniform heat flux and helical screw-tape inserts," *Energy*, 2014, doi: 10.1016/j.energy.2014.09.049.
- [61] A. Mwesigye, T. Bello-ochende, and J. P. Meyer, "International Journal of Thermal Sciences Heat transfer and entropy generation in a parabolic trough receiver with wall-detached twisted tape inserts," *Int. J. Therm. Sci.* 2016, doi: 10.1016/j.ijthermalsci.2015.08.015.
- [62] M. Potenza, M. Milanese, G. Colangelo, and A. De Risi, "Experimental investigation of transparent parabolic trough collector based on gas-phase nanofluid," *Appl. Energy*, 2017, doi: 10.1016/j.apenergy.2017.06.075.
- [63] S. E. Ghasemi and A. A. Ranjbar, "ScienceDirect Effect of using nanofluids on efficiency of parabolic trough collectors in solar thermal electric power plants," *Int. J. Hydrogen Energy*, 2017, doi: 10.1016/j.ijhydene.2017.07.087.
- [64] S. E. Ghasemi and A. A. Ranjbar, "ScienceDirect Effect of using nanofluids on efficiency of parabolic trough collectors in solar thermal electric power plants," *Int. J. Hydrogen Energy*, 2017, doi: 10.1016/j.ijhydene.2017.07.087.
- [65] A. Allouhi, M. B. Amine, R. Saidur, T. Kousksou, and A. Jamil, "Energy and exergy analyses of a parabolic trough collector operated with nano fluids for medium and high temperature applications," *Energy Convers. Manag.* 2018, doi: 10.1016/j.enconman.2017.10.059.
- [66] A. Kasaiean, M. Sameti, R. Daneshazarian, Z. Noori, A. Adamian, and T. Ming, "Heat transfer network for parabolic trough collector as a heat collecting element by using of nanofluid," *Renew. Energy*, 2018, doi: 10.1016/j.renene.2018.02.062.
- [67] A. A. Minea and W. M. El-maghlany, " Experimental study on viscosity of stabilized Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, TiO<sub>2</sub> nanofluids and their hybrid," *Renew. Energy*, 2018, doi: 10.1016/j.renene.2017.12.093..

- [68] A. Kasaeian, R. Daneshzarian, R. Rezaei, and F. Pourfayaz, "Experimental investigation on the thermal behavior of nano fluid direct absorption in a trough collector," *J. Clean. Prod.*, 2017, doi: 10.1016/j.jclepro.2017.04.131.
- [69] M. Abid, T. A. H. Ratlamwala, and U. Atikol, "ScienceDirect Solar assisted multi-generation system using nanofluids : A comparative analysis," *Int. J. Hydrogen Energy*, 2017, doi: 10.1016/j.ijhydene.2017.05.178.
- [70] S. Toghyani, E. Baniyadi, and E. Afshari, "Thermodynamic analysis and optimization of an integrated Rankine power cycle and nano-fluid based parabolic trough solar collector," *Energy Convers. Manag.* 2016, doi: 10.1016/j.enconman.2016.05.029.
- [71] E. Bellos and C. Tzivanidis, "Optimization of a Solar-Driven Trigenation System with Nanofluid-Based Parabolic Trough Collectors," *Energ*, 2017, doi: 10.3390/en10070848.
- [72] J. Subramani, P. K. Nagarajan, S. Wongwises, and S. A. El-agouz, "Experimental Study on the Thermal Performance and Heat Transfer Characteristics of Solar Parabolic Trough Collector Using Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Nanofluids," *Environmental Progress & Sustainable Energy* . 2017, doi: 10.1002/ep.12767.
- [73] M. A. Rehan , " analysis factors and speci fi cations of solar dish technologies for different systems," *Renew. Energy*, 2017, doi: 10.1006/j.renene.2017.11.060..
- [74] E. Bellos and C. Tzivanidis, "Thermal analysis of parabolic trough collector operating with mono and hybrid nano fl uids," *Sustain. Energy Technol. Assessments*. 2017, doi: 10.1016/j.seta.2017.10.005.
- [75] M. Abid, T. A. H. Ratlamwala, and U. Atikol, "Performance assessment of parabolic dish and parabolic trough solar thermal power plant using nano fl uids and molten salts," 2015, doi: 10.1002/er. 550–563
- [76] N. H. Abu-hamdeh and K. H. Almitani, "Solar liquid desiccant regeneration and nanofluids in evaporative cooling for greenhouse food production in Saudi Arabia," *Sol. Energy*, 2016, doi: 10.1016/j.solener.2016.04.048.
- [77] A. Alashkar and M. Gadalla, "Performance analysis of an integrated solar - based power generation plant using nanofluids", *International Journal of Energy Research*. 2018, doi: 10.1002/er.3976.
- [78] E. C. Okonkwo, M. Abid, and T. A. H. Ratlamwala, "Numerical Analysis of Heat Transfer Enhancement in a Parabolic Trough Collector Based on Geometry Modifications and Working Fluid Usage," *J. Sol. Energy Eng. Trans.*2018, doi: 10.1115/1.4040076.
- [79] N. Basbous, M. Taqi, and M. A. Janan, "Thermal Performances Analysis of a Parabolic Trough Solar Collector Using Different Nanofluids," *IEEE*,2016. doi: 10.1015/140/30076..
- [80] T. Sokhansefat, A. B. Kasaeian, F. Kowsary, and M. Carlo, "Heat transfer enhancement in parabolic trough collector tube using Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> / synthetic oil nano fl uid," *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2014, doi: 10.1016/j.rser.2014.02.028.
- [81] P. M. Zadeh, T. Sokhansefat, A. B. Kasaeian, F. Kowsary, and A. Akbarzadeh,

- “Hybrid optimization algorithm for thermal analysis in a solar parabolic trough collector based on nano fluid,” *Energy*, 2015, doi: 10.1016/j.energy.2015.01.096.
- [82] X. Luo, X. Ma, Y. F. Xu, Z. K. Feng, W. P. Du, and R. Wang, *Solar Water Heating System. journal Energy Conversion and Management*, 2018. doi: 10.1016/j.enconman.2018.09.057.
- [83] K. H. Kumar, A. M. Daabo, M. K. Karmakar, and H. Hirani, *Solar parabolic dish collector for concentrated solar thermal systems : a review and recommendations*. Springer Berlin Heidelberg, National Center for Biotechnology, 2022. DOI: 10.1007/s11356-022-18586-4
- [84] A. Z. Hafez, A. Soliman, K. A. El-metwally, and I. M. Ismail, “Design analysis factors and specifications of solar dish technologies for different systems and applications,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 67, pp. 1019–1036, 2017, doi: 10.1016/j.rser.2016.09.077.
- [85] A. Z. Hafez, A. Soliman, K. A. El-metwally, and I. M. Ismail, “Solar parabolic dish Stirling engine system design , simulation , and thermal analysis,” *Energy Convers. Manag.*, 2016, doi: 10.1016/j.enconman.2016.07.067.
- [86] L. Sebastian ., “Mathematical modeling of the geometrical sizing and thermal performance of a Dish/Stirling system for power generation,” *Renew. Energy*, 2017, doi: 10.1016/j.renene.2017.01.020.
- [87] S. Pavlovic, E. Bellos, and R. Loni, “Exergetic investigation of a solar dish collector with smooth and corrugated spiral absorber operating with various nanofluids,” *J. Clean. Prod.*, 2017, doi: 10.1016/j.jclepro.2017.11.004.
- [88] E.Gholamalizadeh And Jae Dong Chung, “Design of the Collector of a Solar Dish-Stirling System : A Case Study,” *IEE*, 2017, Digital Object Identifier 10.1109/ACCESS.2017.2758354 .
- [89] J. Ruelas, N. Velázquez, and J. Cerezo, “A mathematical model to develop a Scheffler-type solar concentrator coupled with a Stirling engine,” , 2013, doi: 10.1016/j.apenergy.2012.05.040.
- [90] G. Zanganeh, R. Bader, A. Pedretti, M. Pedretti, and A. Steinfeld, “A solar dish concentrator based on ellipsoidal polyester membrane facets,” *Sol. Energy*. 2012, doi: 10.1016/j.solener.2011.09.001.
- [91] L. C. Ngo, “Centre for Renewable and Sustainable Energy Studies.”, *Journal of energy* , 2017, doi: 10.1016/j.aenergy.2017.05.060.
- [92] R. Beltran, N. Velazquez, A. C. Espericueta, D. Saucedo, and G. Perez, “Mathematical model for the study and design of a solar dish collector with cavity receiver for its application in Stirling engines” , *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2012, doi: 10.1007/s12206-012-0801-0.
- [93] I. Palavras and G. C. ã. Bakos, “Development of a low-cost dish solar concentrator and its application in zeolite desorption,”, *Renewable Energy*, 2006, doi: 10.1016/j.renene.2005.11.007.

- [94] I. L. Mohammed, "Design and Development of a Parabolic Dish Solar Thermal Cooker," *International Journal of Engineering Research and Applications*, 2013, doi: 10.1016/j.nene.2013.11.007..
- [95] N. D. Kaushika and K. S. Reddy, "Performance of a low cost solar paraboloidal dish steam generating system," *Journal Energy Conversion and Management* .2000. doi.org/10.1016/S0196-8904(99)00133-8
- [96] J. A. Alarcón, J. E. Hortúa, and A. L. G, "Design and construction of a solar collector parabolic dish for rural zones in Colombia Diseño y construcción de un colector solar parabólico tipo disco para zonas rurales," *Tecciencia*, 2013, DOI: <http://dx.doi.org/10.18180/tecciencia.2013.14.2>.
- [97] D. Azzouzi, B. Boumeddane, A. Abene, and N. Said, "Mechanics Industry Experimental and parametric study of a solar paraboloid designed to receive a Stirling engine," *International Journal on Mechanical*, 2015, doi: 10.1051/meca/2014082.
- [98] B. Anak, M. Farid, T. Zanariahshamsirali, and R. Abu, "Effect of rim angle to the flux distribution diameter in solar parabolic dish collector," *Energy procedia*, 2015, doi: 10.1016/j.egypro.2015.03.231.
- [99] R. B. Affandi, P. Melaka, C. K. Gan, M. Ruddin, and A. Ghani, "Development of Design Parameters for the Concentrator of Parabolic Dish ( PD ) Based Concentrating Solar Power ( CSP ) under Malaysia Environment Development of Design Parameters for the Concentrator of Parabolic Dish ( PD ) Based Concentrating Solar Powe," *J. Appl. Sci. Agric*, Book, 2014, 9(11):42–48.
- [100] R. Loni, S. Pavlovic, E. Bellos, C. Tzivanidis, and E. A. Asli-ardeh, "Thermal and exergy performance of a nanofluid-based solar dish collector with spiral cavity receiver," *Appl. Therm. Eng.*, 2018, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2018.02.070.
- [101] J. N. Pakhare, H. Pandey, and M. Selvam, "Experimental Performance Evaluation of a Parabolic Solar Dish Collector with Nano fluid Parabolic collector," *Concentrated Solar Thermal Energy Technologies*, Book, pp. 115–123, 2018.
- [102] M. S. Khan, M. Abid, H. M. Ali, P. Amber, M. A. Bashir, and S. Javed, "Comparative performance Assessment of Solar Dish Assisted s-CO<sub>2</sub> Brayton Cycle Using Nanofluids," *Appl. Therm. Eng.*, 2018, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2018.11.021.
- [103] D. Mills, "Advances in solar thermal electricity technology," *Solar Energy*, 2004, doi: 10.1016/S0038-092X(03)00102-6.
- [104] E. Bellos, and C. Tzivanidis, "A detailed parametric analysis of a solar dish collector," *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 2018, doi: 10.1016/j.seta.2017.12.005.
- [105] T. Wendelin, M. J. Wagner, and C. Kutscher, "History , current state , and future of linear Fresnel concentrating solar collectors," *Sol. Energy*, 2014, doi: 10.1016/j.solener.2013.05.021.
- [106] S. A. Kalogirou, *Solar Energy Engineering Processes and Systems Second Edition*. copyright, 2014, Elsevier Inc. all.525 B Street 1800, San Deigo, CA 92101-4495 A.

- [107] J. Zeaiter, F. Azizi, M. Lamah, D. Milani, H. Y. Ismail, and A. Abbas, "Waste Tire Pyrolysis using Thermal Solar Energy: An Integrated Approach," *Renew. Energy*, 2018, doi: 10.1016/j.renene.2018.02.030.
- [108] B. J. D. Nixon, and M. S, "Modelling and evaluating a solar pyrolysis system," *Renew. Energy*, 2018, doi: 10.1016/j.renene.2017.10.023.
- [109] Z. Said, M. Ghodbane, L. S. Sundar, A. K. Tiwari, M. Sheikholeslami, and B. Boumeddane, *Renew. Energy*, 2020, doi: 10.1016/j.renene.2020.11.054.
- [110] M. Ghodbane, Z. Said, A. A. Hachicha, and B. Boumeddane, "Performance assessment of linear Fresnel solar reflector using MWCNTs/DW nanofluids," *Renew. Energy*, 2019, doi: 10.1016/j.renene.2019.10.137.
- [111] E. Bellos and C. Tzivanidis, "Multi-criteria evaluation of a nano fluid-based linear Fresnel solar collector," *Sol. Energy*. 2018, doi: 10.1016/j.solener.2018.02.007.
- [112] E. Bellos, "Enhancing the performance of a linear Fresnel reflector using nanofluids and internal finned absorber," *J. Therm. Anal. Calorim.*, 2018, doi: 10.1007/s10973-018-6989-1.
- [113] Y. He, K. Wang, Y. Qiu, B. Du, Q. Liang, and S. Du, *Review of the solar flux distribution in concentrated solar power : non-uniform features , challenges , and solutions*. Elsevier Ltd, 2018. doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.12.006
- [114] E. Bellos, "Progress in the design and the applications of linear Fresnel reflectors – A critical review," *Therm. Sci. Eng. Prog.*, vol. 10, no, 2019, doi: 10.1016/j.tsep.2019.01.014.
- [115] M. Zhang, L. Yang, C. Xu, and X. Du, "An efficient code to optimize the heliostat field and comparisons between the biomimetic spiral and staggered layout," *Renew. Energy*, 2016, doi: 10.1016/j.renene.2015.11.015.
- [116] F. Rovense, M. Angel, and M. Romero, "Thermo-economic analysis of a particle-based multi-tower solar power plant using un fi red combined cycle for evening peak power generation," 2022, doi: 10.1016/j.energy.2021.122798.
- [117] H. A. Kazem, H.A. Kazem, M.T. Chaichan, I.M. Al-shezawi, H.S. Al-saidi, H.S. Al-rubkhi, K. Al-sinani, A.H.A. Al-waeli, "Effect of humidity on the PV performance in Oman, *Asian Trans. Eng.* (2014) pp. 29–32.
- [118] I. Khamlich, "Technical and economic assessment of thermal energy storage in concentrated solar power plants within a spot electricity market," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 2020, doi: 10.1016/j.rser.2020.110583.
- [119] J. Chen, G. Xiao, H. Xu, X. Zhou, J. Yang, and M. Ni, "Experiment and dynamic simulation of a solar tower collector system for power generation Experiment and dynamic simulation of a solar tower collector system for power generation," *Renew. Energy*, vol. 2022, doi: 10.1016/j.renene.2022.07.045.
- [120] X. Li, S. Duniam, H. Gurgenci, Z. Guan, and A. Veeraragavan, "Full scale experimental study of a small natural draft dry cooling tower for concentrating solar thermal power plant," *Appl. Energy*, 2017, doi: 10.1016/j.apenergy.2017.02.032.

- [121] P. Belkhode, C. Sakhale, and A. Bejalwar, "Materials Today : Proceedings Evaluation of the experimental data to determine the performance of a solar chimney power plant," *Mater. Today Proc.* 2019, doi: 10.1016/j.matpr.2019.09.006.
- [122] M. Huang, "Experimental and numerical studies for applying hybrid solar chimney and photovoltaic system to the solar-assisted air cleaning system," *Appl. Energy*, 2020, doi: 10.1016/j.apenergy.2020.115150.
- [123] X. Zhou and Y. Xu, "ScienceDirect Solar updraft tower power generation," *Sol. ENERGY*, 2014, doi: 10.1016/j.solener.2014.06.029.
- [124] T. Mekhail, A. Rekaby, M. Fathy, M. Bassily, and R. Harte, "Experimental and Theoretical Performance of Mini Solar Chimney Power Plant," *jocet*, 2017, doi: 10.18178/jocet.2017.5.4.386.
- [125] E. M. Salilih, N. H. Abu-hamdeh, R. A. Alsulami, and M. J. H. Rawa, "Annual performance analysis of small scale industrial waste heat assisted solar tower power plant and application of nanofluid Annual performance analysis of small scale industrial waste heat assisted," *J. Taiwan Inst. Chem. Eng.*, 2021, doi: 10.1016/j.jtice.2021.04.019.
- [126] N. H. Abu-hamdeh, "The effects of incident solar radiation on the collector efficiency using coolant hybrid nano fluid via simulation of solar tower system with the parallel heat exchangers," *J. Taiwan Inst. Chem. Eng.* 2021, doi: 10.1016/j.jtice.2021.04.063.
- [127] R. A. Taylor., "Applicability of nanofluids in high flux solar collectors Applicability of nanofluids in high flux solar collectors," *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 2013, doi: 10.1063/1.3571565.
- [128] Mamuel Romero and Aldo Steinfeld. "Concentrating solar thermal power and thermochemical fuels", "Environmental Science," 2012, doi: 10.1039/c2ee21275g.
- [129] Liste des centrales solaires thermodynamiques, Available: Online:[http://fr.wikipedia.org/Liste des centrales solaires thermodynamiques \(fr-academic.com\)](http://fr.wikipedia.org/Liste_des_centrales_solaires_thermodynamiques_(fr-academic.com)), vu le 11 Février 2022."
- [130] A. S. Alsagri, , A. Chiasson, and Mohamed Gadalla, "cept Maot pyte pydi," *J. Sol. Energy Eng. Receiv.* 2018; doi: 10.1115/1.4043515.
- [131] A. R. Prasad, S. Singh, and H. Nagar, "A Review on Nanofluids : Properties and Applications," *Int. J. Adv. Res. Innov. Ideas Educ.*, 2017, vol. 3, no. August, pp. 3185–3209.
- [132] Mathieu Bouton." Evaluation de l'intérêt énergétique des nanofluides dans l'usage des machines frigorifiques", these, 2018, HAL Id: hal-01871061 <https://hal.univ-lorraine.fr/hal-01871061>.
- [133] M. Abbasi, M. M. Heyhat, and A. Rajabpour, "Study of the effects of particle shape and base fluid type on density of nanofluids using ternary mixture formula: A molecular dynamics simulation," *J. Mol. Liq.*, 2020, doi: 10.1016/j.molliq.2020.112831.
- [134] Y. Cho, "Hydrodynamic and Heat Transfer Study of Dispersed Fluids With Submicron Metallic Oxide Particle," *Experimental Heat Transfer*, 2014, doi: 10.1080/08916159808946559.

- [135] A. Mwesigye and İ. H. Yılmaz, “Thermal and thermodynamic benchmarking of liquid heat transfer fluids in a high concentration ratio parabolic trough solar collector system,” *J. Mol. Liq.*, 2020, doi: 10.1016/j.molliq.2020.114151.
- [136] A. Mwesigye and J. P. Meyer, “ Numerical analysis of the thermal and thermodynamic performance of a parabolic trough solar collector using SWCNTs-Therminol@VP-1 nanofluid,” *renene*, 2017, doi: 10.1016/j.renene.2017.10.047.
- [137] Z. H. Aggrey Mwesigye, “Thermal and thermodynamic performance of a parabolic through receiver with Syltherm800-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanofluid as the heat transfer fluid,” *egypro*, 2015, doi: 10.1016/j.egypro.2015.07.402.
- [138] M. M. Heyhat, A. Rajabpour, M. Abbasi, and S. Arabha, “Importance of nanolayer formation in nanofluid properties: Equilibrium molecular dynamic simulations for Ag-water nanofluid,” *J. Mol. Liq.*, 2018, doi: 10.1016/j.molliq.2018.05.122.
- [139] A. M. Abdullah , “Tailoring the viscosity of water and ethylene glycol based TiO<sub>2</sub> nanofluids,” *J. Mol. Liq.*, 2020, doi: 10.1016/j.molliq.2019.111982.
- [140] A. Einstein, “Eine neue Bestimmung der Moleküldimensionen,” *Ann. Phys.*, 1906, doi: 10.1002/andp.19063240204.
- [141] D. R. H., “The viscosity of suspensions of spherical particles,” *Recl. des Trav. Chim. des PayesBas*, 1942, doi.org/10.1016/0095-8522(51)90036-0.
- [142] M. MOONEY, “the viscosity of a concentrated suspension of spherical particles,” *Journal of Colloid Science*, 1951. doi.org/10.1016/0095-8522(51)90036-0
- [143] I. M. Krieger and T. J. Dougherty, “A Mechanism for Non-Newtonian Flow in Suspensions of Rigid Spheres,” *Trans. Soc. Rheol.*, 1959, doi: 10.1122/1.548848.
- [144] H. C. Brinkman, “The viscosity of concentrated suspensions and solutions,” *J. Chem. Phys.*, 1952, doi: 10.1063/1.1700493.
- [145] L. E. Nielsen, “Generalized equation for the elastic moduli of composite materials,” *J. Appl. Phys.*, 1970, doi: 10.1063/1.1658506.
- [146] N. A. Frankel and A. Acrivos, “On the viscosity of a concentrated suspension of solid spheres,” *Chem. Eng. Sci.*, 1967, doi: 10.1016/0009-2509(67)80149-0.
- [147] B. G.K., “The effect of Brownian motion on the bulk stress in a suspension of spherical particles,” *J. Fluid Mech.*, book, 1977, vol. 83, , pp. 97–117.
- [148] T. S. Lundgren, “Slow flow through stationary random beds and suspensions of spheres,” *J. Fluid Mech.*, 1972, doi: 10.1017/S002211207200120X.
- [149] A. Tamura, D. I. Graham, J. McCulloch, and G. M. Teasdale, “Focal cerebral ischaemia in the rat: I. Description of technique and early neuropathological consequences following middle cerebral artery occlusion,” *J. Cereb. Blood Flow Metab.*, 1981, doi: 10.1038/jcbfm.1981.6.
- [150] W. N. Bond, “The viscosity of air,” *Proc. Phys. Soc.*, 1937, doi: 10.1088/0959-5309/49/3/301.
- [151] J. Bicerano, J. F. Douglas, and D. a Brune, “Journal of Macromolecular Science , Part

- C : Polymer Model for the Viscosity of Particle Dispersions Model for the Viscosity of Particle Dispersions,” *J. Macromol. Sci. Part C Polym. Rev.*, 1999 pp. 561–642.
- [152] T. Kitano, T. Kataoka, and T. Shirota, “An empirical equation of the relative viscosity of polymer melts filled with various inorganic fillers,” *Rheol. Acta*, 1981, doi: 10.1007/BF01513064.
- [153] J. Avsec and M. Oblak, “The calculation of thermal conductivity, viscosity and thermodynamic properties for nanofluids on the basis of statistical nanomechanics,” *Int. J. Heat Mass Transf.*, 2007, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2007.01.064.
- [154] W. J. Tseng and K. C. Lin, “Rheology and colloidal structure of aqueous TiO<sub>2</sub> nanoparticle suspensions,” *Mater. Sci. Eng.* 2003, doi: 10.1016/S0921-5093(03)00063-7.
- [155] J. W. Chen and E. Nakano, “Shear viscosity to entropy density ratio of QCD below the deconfinement temperature,” *Phys. Lett. Sect. B Nucl. Elem. Part. High-Energy Phys.*, 2007, doi: 10.1016/j.physletb.2007.02.026.
- [156] S. E. B. Maïga, C. T. Nguyen, N. Galanis, and G. Roy, “Heat transfer behaviours of nanofluids in a uniformly heated tube,” *Superlattices Microstruct.*, 2004, doi: 10.1016/j.spmi.2003.09.012.
- [157] N. Masoumi, N. Sohrabi, and A. Behzadmehr, “A new model for calculating the effective viscosity of nanofluids,” *J. Phys. D. Appl. Phys.* 2009, doi: 10.1088/0022-3727/42/5/055501.
- [158] J. Buongiorno, “Convective transport in nanofluids,” *J. Heat Transfer*, 2006, doi: 10.1115/1.2150834.
- [159] P. K. Namburu, D. P. Kulkarni, A. Dandekar, and D. K. Das, “Experimental investigation of viscosity and specific heat of silicon dioxide nanofluids,” *Micro Nano Lett.*, vol. 2, no. 3, pp. 67–71, 2007, doi: 10.1049/mnl:20070037.
- [160] W. Duangthongsuk and S. Wongwises, “An experimental study on the heat transfer performance and pressure drop of TiO<sub>2</sub>-water nanofluids flowing under a turbulent flow regime,” *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 53, no. 1–3, pp. 334–344, 2010, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2009.09.024.
- [161] C. T. Nguyen, “Temperature and particle-size dependent viscosity data for water-based nanofluids - Hysteresis phenomenon,” *Int. J. Heat Fluid Flow*, 2007, doi: 10.1016/j.ijheatfluidflow.2007.02.004.
- [162] M. Corcione, “Empirical correlating equations for predicting the effective thermal conductivity and dynamic viscosity of nanofluids,” *Energy Convers. Manag.*, 2011, doi: 10.1016/j.enconman.2010.06.072.
- [163] P. K. Namburu, D. P. Kulkarni, D. Misra, and D. K. Das, “Viscosity of copper oxide nanoparticles dispersed in ethylene glycol and water mixture,” *Exp. Therm. Fluid Sci.*, 2007, doi: 10.1016/j.expthermflusci.2007.05.001.
- [164] M. Chandrasekar, S. Suresh, and A. Chandra Bose, “Experimental investigations and theoretical determination of thermal conductivity and viscosity of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/water nanofluid,” *Exp. Therm. Fluid Sci.*, 2010, doi: 10.1016/j.expthermflusci.2009.10.022.

- [165] M. Kole and T. K. Dey, "Thermal conductivity and viscosity of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanofluid based on car engine coolant," *J. Phys. D. Appl. Phys.*, 2010, doi: 10.1088/0022-3727/43/31/315501.
- [166] E. Abu-Nada, "Effects of variable viscosity and thermal conductivity of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-water nanofluid on heat transfer enhancement in natural convection," *Int. J. Heat Fluid Flow*, 2009, doi: 10.1016/j.ijheatfluidflow.2009.02.003.
- [167] S. M. Hosseini, A. R. Moghadassi, and D. E. Henneke, "A new dimensionless group model for determining the viscosity of nanofluids," *J. Therm. Anal. Calorim.*, 2010, doi: 10.1007/s10973-010-0721-0.
- [168] K. V Sharma, "equations\_Transfer Coefficients of Water Based Nanofluids for Turbulent," *Int. Journal of Microscale and Nanoscale Therm. Fluid Transp. Phenom.*, 2014, doi: 10.1017/j.ftran.2014.09.016.
- [169] D. S. Udawattha, M. Narayana, and U. P. L. Wijayarathne, "Predicting the effective viscosity of nanofluids based on the rheology of suspensions of solid particles," *J. King Saud Univ. - Sci.*, 2019, doi: 10.1016/j.jksus.2017.09.016.
- [170] A. V. Minakov, V. Y. Rudyak, and M. I. Pryazhnikov, "Systematic Experimental Study of the Viscosity of Nanofluids," *Heat Transf. Eng.*, 2021, doi: 10.1080/01457632.2020.1766250.
- [171] S. M. S. Murshed, K. C. Leong, and C. Yang, "Thermophysical and electrokinetic properties of nanofluids - A critical review," *Appl. Therm. Eng.*, 2008, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2008.01.005.
- [172] J. Garg; B. Poudel; M. Chiesa; J. B. Gordon; J. J. Ma; J. B. Wang; Z. F. Ren; Y. T. Kang; H. Ohtani; J. Nanda; G. H. McKinley; G. Chen, "Enhanced thermal conductivity and viscosity of copper nanoparticles in ethylene glycol nanofluid," *J. Appl. Phys.*, 2008, doi: 10.1063/1.2902483.
- [173] F. Hadji, N. Ihaddadene, R. Ihaddadene, A. Betga, A. Charick, and P. O. Logerais, "Thermal conductivity of two kinds of earthen building materials formerly used in Algeria," *J. Build. Eng.*, 2020, doi: 10.1016/j.job.2020.101823.
- [174] J. Maxwell, "A Treatise on Electricity and Magnetism: By James Clerk Maxwell.", book, pp. 1831–1879, 1954, [Online]. Available: <http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&qintitle:A+treatise+on+electricity+and+magnetism>.
- [175] R. L. Moore, R. Athena, and R. L. Moore, "Implementation of DOWTHERM A Properties into RELAP5- Implementation of DOWTHERM A Properties into," book, no. April, 2010. INL/EXT-10-18651
- [176] D. A. G. Bruggeman, "Berechnung verschiedener physikalischer Konstanten von heterogenen Substanzen. III. Die elastischen Konstanten der quasiisotropen Mischkörper aus isotropen Substanzen," *Ann. Phys.*, 1937, doi: 10.1002/andp.19374210205.
- [177] A. E. Hamilton, Crosser Determination, T. Conductivity, and S. Greases, "An Experimental Determination of the Thermal Conductivity of Several Greases, ACS Publications, 1962, [Doi.org/10.1021/je60012a01](https://doi.org/10.1021/je60012a01).

- [178] J. A. Eastman, S. U. S. Choi, S. Li, W. Yu, and L. J. Thompson, “Anomalously increased effective thermal conductivities of ethylene glycol-based nanofluids containing copper nanoparticles,” book, 2001, doi: 10.1063/1.1341218.
- [179] W. Yu and S. U. S. Choi, “The role of interfacial layers in the enhanced thermal conductivity of nanofluids: A renovated Hamilton-Crosser model,” *J. Nanoparticle Res.*, 2004, doi: 10.1007/s11051-004-2601-7.
- [180] Q. Z. Xue, “Model for effective thermal conductivity of nanofluids,” *Phys. Lett. Sect. A Gen. At. Solid State Phys.*, 2003, doi: 10.1016/S0375-9601(02)01728-0.
- [181] Q. Xue and W. M. Xu, “A model of thermal conductivity of nanofluids with interfacial shells,” *Mater. Chem. Phys.*, 2005, doi: 10.1016/j.matchemphys.2004.05.029.
- [182] H. Xie, M. Fujii, and X. Zhang, “Effect of interfacial nanolayer on the effective thermal conductivity of nanoparticle-fluid mixture,” *Int. J. Heat Mass Transf.*, 2005, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2004.10.040.
- [183] Y. Xuan and Q. Li, “Investigation on convective heat transfer and flow features of nanofluids,” *J. Heat Transfer*, , 2003, doi: 10.1115/1.1532008.
- [184] B. X. Wang, L. P. Zhou, and X. F. Peng, “A fractal model for predicting the effective thermal conductivity of liquid with suspension of nanoparticles,” *Int. J. Heat Mass Transf.*, 2003, doi: 10.1016/S0017-9310(03)00016-4.
- [185] D. H. Kumar, H. E. Patel, V. R. R. Kumar, T. Sundararajan, T. Pradeep, and S. K. Das, “Model for heat conduction in nanofluids,” *Phys. Rev.*, 2004, doi: 10.1103/PhysRevLett.93.144301.
- [186] P. Bhattacharya, S. K. Saha, A. Yadav, P. E. Phelan, and R. S. Prasher, “Brownian dynamics simulation to determine the effective thermal conductivity of nanofluids,” *J. Appl. Phys.*, 2004, doi: 10.1063/1.1736319.
- [187] S. P. Jang and S. U. S. Choi, “Role of Brownian motion in the enhanced thermal conductivity of nanofluids,” *Appl. Phys. Lett.*, , 2004, doi: 10.1063/1.1756684.
- [188] J. Koo and C. Kleinstreuer, “Impact analysis of nanoparticle motion mechanisms on the thermal conductivity of nanofluids,” *Int. Commun. Heat Mass Transf.*, 2005, doi: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2005.05.014.
- [189] C. W. Nan, Z. Shi, and Y. Lin, “A simple model for thermal conductivity of carbon nanotube-based composites,” *Chem. Phys. Lett.*,, 2003, doi: 10.1016/S0009-2614(03)00956-4.
- [190] E. Yamada and T. Ota, “Effective thermal conductivity of dispersed materials,” *Wärme- und Stoffübertragung*, , 1980, doi: 10.1007/BF00997630.
- [191] Q. Z. Xue, “Model for thermal conductivity of carbon nanotube-based composites,” *Phys. B Condens. Matter*, , 2005, doi: 10.1016/j.physb.2005.07.024.
- [192] Q. Z. Xue, “Model for the effective thermal conductivity of carbon nanotube composites,” *Nanotechnology*, 2006, doi: 10.1088/0957-4484/17/6/020.
- [193] R. Walvekar, I. A. Faris, and M. Khalid, “Thermal conductivity of carbon nanotube

- nanofluid-Experimental and theoretical study,” *Heat Transf. - Asian Res.*, 2012, doi: 10.1002/htj.20405.
- [194] M. Akbari, N. Galanis, and A. Behzadmehr, “A new model for nanofluid conductivity based on the effects of clustering due to Brownian motion,” *Heat Transf. - Asian Res.*, 2011, doi: 10.1002/htj.20350.
- [195] R. Alipour, M. Ghoranneviss, M. Mirzaee, and A. Jafari, “The direct effect of interfacial nanolayers on thermal conductivity of nanofluids,” *Heat Mass Transf. und Stoffuebertragung*, 2014, doi: 10.1007/s00231-014-1376-3.
- [196] H. Jiang, H. Li, Q. Xu, and L. Shi, “Effective thermal conductivity of nanofluids considering interfacial nano-shells,” *Mater. Chem. Phys.*, 2014, doi: 10.1016/j.matchemphys.2014.07.031.
- [197] S. M. Hosseini, M. R. Safaei, M. Goodarzi, A. A. A. Alrashed, and T. K. Nguyen, “New temperature, interfacial shell dependent dimensionless model for thermal conductivity of nanofluids,” *Int. J. Heat Mass Transf.*, 2017, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.06.061.
- [198] H. F. Abbasov, “Determination of nanolayer thickness and effective thermal conductivity of nanofluids,” *J. Dispers. Sci. Technol.*, , 2019, doi: 10.1080/01932691.2018.1475241.
- [199] H. A. H. T. S. O. Cho, Pak et, D. F. W. S. M. OXIDE, and 1980 PARTICLES, “Hydrodynamic and Heat Transfer Study of Dispersed Fluids With Submicron Metallic Oxide,” *Exp. Heat Transf. A J. , Therm. Energy Transp. , Storage , Convers.*, 2013. doi.org/10.1080/08916159808946559.
- [200] Y. Xuan and W. Roetzel, “Conceptions for heat transfer correlation of nanofluids,” *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2000, doi.org/10.1016/S0017-9310(99)00369-5.
- [201] M. Fakoor Pakdaman, M. A. Akhavan-Behabadi, and P. Razi, “An experimental investigation on thermo-physical properties and overall performance of MWCNT/heat transfer oil nanofluid flow inside vertical helically coiled tubes,” *Exp. Therm. Fluid Sci.*, 2012, doi: 10.1016/j.expthermflusci.2012.02.005.
- [202] Y. Gao, Y. Xi, Z. Yang, A. P. Sasmito, A. S. Mujumdar, and L. Wang, “experimental investigation of specific heat of aqueous graphene oxide al<sub>2</sub>o<sub>3</sub> hybrid nanofluid,” *Therm. Sci.*, 2021, doi: 10.2298/TSCI190404381G.
- [203] S. M. Mousavi, F. Esmaeilzadeh, and X. P. Wang, “Effects of temperature and particles volume concentration on the thermophysical properties and the rheological behavior of CuO/MgO/TiO<sub>2</sub> aqueous ternary hybrid nanofluid: Experimental investigation,” *J. Therm. Anal. Calorim.*, , 2019, doi: 10.1007/s10973-019-08006-0.
- [204] S. M. Mousavi, F. Esmaeilzadeh, and X. P. Wang, “A detailed investigation on the thermo-physical and rheological behavior of MgO/TiO<sub>2</sub> aqueous dual hybrid nanofluid,” *J. Mol. Liq.*, 2019, doi: 10.1016/j.molliq.2019.02.100.
- [205] A. B. Çolak, O. Yıldız, M. Bayrak, and B. S. Tezekici, “Experimental study for predicting the specific heat of water based Cu-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> hybrid nanofluid using artificial neural network and proposing new correlation,” *Int. J. Energy Res.*, 2020, doi:

10.1002/er.5417.

- [206] E. C. Okonkwo, I. Wole-Osho, D. Kavaz, M. Abid, and T. Al-Ansari, “Thermodynamic evaluation and optimization of a flat plate collector operating with alumina and iron mono and hybrid nanofluids,” *Sustain. Energy Technol. Assessments*, 2020, doi: 10.1016/j.seta.2020.100636.
- [207] A. K. Tiwari, N. S. Pandya, H. Shah, and Z. Said, “Experimental comparison of specific heat capacity of three different metal oxides with MWCNT/ water-based hybrid nanofluids: proposing a new correlation,” *Appl. Nanosci.*, vol.2020, doi: 10.1007/s13204-020-01578-6.
- [208] E. Bellos, Ch. Tzivanidis “Thermal efficiency enhancement of nanofluid-based parabolic trough collectors,” *J. Therm. Anal. Calorim.*, 2019, doi: 10.1007/s10973-018-7056-7.
- [209] E. Bellos, C. Tzivanidis, and Z. Said, “Original article A systematic parametric thermal analysis of nano fluid-based parabolic trough solar collectors,” *Sustain. Energy Technol. Assessments*, 2020, doi: 10.1016/j.seta.2020.100714.
- [210] E. Bellos and C. Tzivanidis, “Parametric investigation of nanofluids utilization in parabolic trough collectors.” , *Thermal Science and Engineering Progress*,2017,doi.org/10.1016/j.tsep.2017.05.001
- [211] W. C. Swinbank, “Long-wave radiation from clear skies,” *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, vol. 1963, doi: 10.1002/qj.49708938105.
- [212] N. C. Bhowmik and S. C. Mullick, “Calculation of tubular absorber heat loss factor,” *Sol. Energy*, 1985, doi: 10.1016/0038-092X(85)90101-X.
- [213] F. W. D. A. L. M. K. BOELTEE, “Heat transfer in automobile radiators,”Book, vol. 12, pp. 3–22, 1985.
- [214] M. Sofiane, “Contribution à la modélisation et à l’optimisation des concentrateurs solaires motorisés appliqués aux systèmes thermosolaires,” ,Thèse,2017, université Ibn Khladoun de Tiaret .
- [215] A. Rovira, M. José, M. Valdes, and J. M. Martínez-val, “Energy management in solar thermal power plants with double thermal storage system and subdivided solar field,” , *apenergy*, 2011, doi: 10.1016/j.apenergy.2011.04.036.
- [216] J. A. D. Deceased and W. A. Beckman, *Solar engineering of thermal processes*, vol. 3, no. 3. 1982.
- [217] C. S. Turchi, Z. Ma, and M. Erbes, “Gas Turbine / Solar Parabolic Trough Hybrid Designs Preprint,” ,ASM, 2011, GT2011-45184, pp. 989-996; 8 page, doi.org/10.1115/GT2011-45184.
- [218] N. F. Ñ, S. Izquierdo, and C. Montan, “Analysis of CSP plants for the definition of energy policies : The influence on electricity cost of solar multiples , capacity factors and energy storage,” 2010, doi: 10.1016/j.enpol.2010.06.009.
- [219] A. Poullikkas, “Economic analysis of power generation from parabolic trough solar thermal plants for the Mediterranean region — A case study for the island of Cyprus,”

- 2009, doi: 10.1016/j.rser.2009.03.014.
- [220] H. Broesamle , H. Mannstein , C. Schillings , F. Trieb, “Assessment of solar electricity potentials in north africa based on satellite data and a geographic information system.” *Solar Energy*,2001,doi.org/10.1016/S0038-092X(00)00126-2
- [221] S. Balac, “Débuter avec matlab.” Stéphane Balac Centre de Mathématiques INSA de Lyon,book, Copyright 2001 Stéphane Balac - INSA de Lyon ,Centre de Mathématiques, F-69621 V
- [222] T. Report ,Getting Started With MATLAB & SIMULINK School of Engineering , Newcastle University , Newcastle Upon Getting Started With MATLAB & SIMULINK,” no. October, 2020.
- [223] M. Abubakr, H. Amein, B. M. Akoush, M. M. El-bakry, and M. A. Hassan, “An intuitive framework for optimizing energetic and exergetic performances of parabolic trough solar collectors operating with nano fluids,” *Renew. Energy*, 2020, doi: 10.1016/j.renene.2020.04.160.
- [224] A.Allouhi, M. Benzakour Amine , R. Saidur , T. Kousksou , A. Jamil," Energy and exergy analyses of a parabolic trough collector operated with nanofluids for medium and high temperature applications ", *Energy Conversion and Management*,2018, doi.org/10.1016/j.enconman.2017.10.059
- [225] S. Vanlod “ To see the Help system in SAM, click Help in the main window, or press the F1 key (command- in MacOS) from any page in SAM., 2022.
- [226] System Advisor Model ( SAM ) , Home - System Advisor Model - SAM. (nrel.gov), ” 2022.
- [227] Nrel.Gov (national laboratory of the U.S.Department of Energy, Office of Energy Efficiency and renewable energy, operated by the alliance for sustainable Energy ).” [Online]. Available: <https://www.nrel.gov/>. [Accessed: 11-Jul-2021].
- [228] S. Mihoub, A. Chermiti, and H. Beltagy, “Methodology of determining the optimum performances of future concentrating solar thermal power plants in Algeria,” *Energy*. 2017, doi: 10.1016/j.energy.2016.12.056.
- [229] M. Liu., “Review on concentrating solar power plants and new developments in high temperature thermal energy storage technologies,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*2016, doi: 10.1016/j.rser.2015.09.026.
- [230] K. Ikhlef and S. Larbi, “Techno-economic optimization for implantation of parabolic trough power plant : Case study of Algeria Techno-economic optimization for implantation of parabolic trough power plant : Case study of Algeria,”. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 2020, doi: 10.1063/5.0013699.