

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة أبي بكر بلقايد - تلمسان

Université Aboubakr Belkaïd – Tlemcen –

Faculté de TECHNOLOGIE



MEMOIRE

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

En : Génie Mécanique

Spécialité : Génie Thermique et Energies Renouvelables

Par : DERRICHE Rafika Imane

DJELLOULI Nassira

Sujet

Analyse paramétrique d'une centrale thermique à concentration

Soutenu publiquement, le 21 /04 /2016, devant le jury composé de :

Mr SEBBANE Omar	MCA	Univ. Tlemcen	Président
Mr BENRAMDANE Mohammed	MCB	Univ. Tlemcen	Directeur du mémoire
Mr GHERNAOUT MEA	Professeur	Univ. Tlemcen	Examineur 1
Mr SAIM Rachid	Professeur	Univ. Tlemcen	Examineur 2

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à :

A mes parents, aucun hommage ne pourrait être à la hauteur de l'amour dont ils ne cessent de me combler, avec toute ma reconnaissance et ma gratitude pour leurs sacrifices. Pour leur patience illimitée, leurs encouragements continus, leurs aides énormes et leurs grands sacrifices. Que Dieu leur procure bonne santé et longue vie.

A mes frères et mes sœurs, ainsi que mes cousins et cousines pour leurs grand amour et soutiens qu'ils trouvent ici l'expression de ma haute gratitude.

A toute ma famille, et mes amis, à qui je souhaite le succès.

*A mon binôme Rafika et toute la famille **DERRICHE**.*

Et à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin pour que ce projet soit possible, je vous dis merci.

Nassira ^_^

Dédicaces

A l'homme de ma vie, mon exemple éternel, mon soutien moral et source de joie et de bonheur, celui qui s'est toujours sacrifié pour me voir réussir, que dieu te garde dans son vaste paradis, à toi mon père.

A la lumière de mes jours, la source de mes efforts, la flamme de mon cœur, ma vie et mon bonheur ; maman que j'adore.

Aux personnes dont j'ai bien aimé la présence dans ce jour, à ma sœur Sihed, mes frères Abdelhak Mohammed et Mehdi, je dédie ce modeste travail dont le grand plaisir leurs revient en premier lieu pour leurs conseils, aides, et encouragements.

A mon binôme Nacéra et toute la famille DJELLOULI.

Aux personnes qui m'ont toujours aidé et encouragé, qui étaient toujours à mes côtés, et qui m'ont accompagné durant mon chemin d'études, mes aimables amies, et sœurs de cœur, toi Fousra et Zamar.

Rafika ;)

Remerciements

Remerciement

On remercie Dieu le tout puissant de nous avoir donné la santé et la volonté d'entamer et de terminer ce mémoire.

Tout d'abord, ce travail ne serait pas aussi riche et n'aurait pas pu voir le jour sans l'aide et l'encadrement de Mr BENRAMDANE Mohammed, Maître de conférence et sous chef de département mécanique à l'Université de Tlemcen, on le remercie vivement pour la confiance qu'il nous a fait en acceptant de diriger ce travail, pour la qualité de son encadrement exceptionnel, pour sa patience, sa rigueur et sa disponibilité durant notre préparation de ce mémoire.

Nous sommes conscientes de l'honneur que nous a fait Mr SEBBANE Omar, Maître de conférence à l'Université de Tlemcen, en étant président du jury ainsi que Mr GHERNAOUT MEA et Mr SAIM Rachid, Professeurs à l'Université de Tlemcen, d'avoir accepté d'examiner ce travail; dont nous étions étudiantes pour trois ans.

Nos plus grands remerciements pour Mr GHNIFED, chef de département Mécanique, et Mlle Khadidja RAHOUI, secrétaire du département pour leurs aide, encouragement, compréhensibilité et disponibilité.

Nos remerciements s'adressent également à tous nos professeurs pour leurs générosités et la grande patience dont ils ont su faire preuve malgré leurs charges académiques et professionnelles.

Nos profonds remerciements vont également à toutes les personnes qui nous ont aidés et soutenues de près ou de loin, principalement à tout l'effectif de la faculté de l'ingénieur de l'université ABOU BAKR BELKAID Tlemcen.

ملخص

أصبح استخدام الطاقة الشمسية مصدر اهتمام كبير ، وخصوصا في بلدنا حيث لديه ثروة طاقوية كبيرة طول العام. يمكننا استخدام الطاقة الشمسية بصفة مركزة لإنتاج الكهرباء أو الحرارة. مهمتنا هي دراسة العوامل المؤثرة على تشغيل و تركيب محطة حرارية تعمل على الطاقة الشمسية المركزة. هذه المحطة تعمل مع برج للطاقة الشمسية و توربينات البخار، مقاصدنا معرفة تأثيرات تغييرات درجة الحرارة و الضغط على المردود بغية تحسرين و الرفع من قيمته.

نمت المحاكاة لمختلفة التعديلات على دورة RANKINE و HIRN ، و قد وجدنا أن الزيادة في درجة الحرارة بالنسبة لدورة HIRN ، ارتفاع الضغط العالي و الحد من الضغط المنخفض، لكلتا الدورتين، يؤدي إلى مردود أفضل.

الكلمات المفتاحية: دراسة العوامل المؤثرة، ونظام للطاقة الشمسية الحرارية، برج الطاقة الشمسية و مردود التوربينات البخارية.

Résumé

L'exploitation de l'énergie solaire est devenue une préoccupation majeure, surtout que notre pays en détient un potentiel solaire important durant l'année. Nous pouvons utiliser l'énergie solaire concentrée pour produire de l'électricité ou pour la production de chaleur. Notre travail consiste à l'analyse paramétrique du fonctionnement d'une installation thermique solaire à concentration. Cette installation travaille avec une tour solaire et une turbine à vapeur, nous avons étudié l'influences de la température de surchauffe, pour le cycle de Hirn, et les haute et basse pressions, pour les deux cycle, sur le rendement afin de proposer une éventuelle amélioration.

Des simulations pour différentes modifications sur le cycle de RANKINE et celui de HIRN ont étaient faites. Nous avons trouvé que l'augmentation de la température de surchauffe, l'accroissement de la haute pression et la réduction de la basse pression conduisent à un rendement meilleur.

Mots clés : Influence de la température et des pressions, installation thermique solaire, tour solaire, turbine à vapeur, rendement thermique d'une turbine à vapeur.

Abstract

Abstract

The use of solar energy has become a major concern, especially since our country has a significant solar potential during the year. We can use concentrated solar energy to produce electricity or heat production. Our job is to parametric analysis of the operation of a solar thermal system for concentration. This installation works with a solar tower and a steam turbine, we studied the influences of the superheat temperature for the cycle Hirn, and high and low pressure for the two cycle performance to deliver a possible improvement.

Simulations for different modifications of the cycle and of RANKINE have HIRN were made. We found that the increase in the superheat temperature, increasing the high pressure and the reduction of the low pressure lead to a better performance.

Keywords: Influence of temperature and pressure, solar heating system, solar tower, steam turbine, thermal efficiency of a steam turbine.

Sommaire

Dédicaces

Remerciements

Résumés

Sommaire

Liste des figures

Liste des tableaux

Nomenclature

Introduction générale..... 1

Chapitre I : Etat de l'art de la thermo-solaire à concentration

I.1.Introduction..... 4

I.2. Généralité.....5

I.2.1. Multiples sortes d'utilisation de l'énergie solaire.....5

I.2.1.1. Capteurs solaires.....5

I.2.1.2.Capteurs solaires à concentration.....7

I.2.1. 3. Améliorations des performances.....7

I.2.2.Maitrise de l'énergie solaire.....8

I.2.2.1.Coordonnées géographiques.....8

I.2.2.2.Coordonnées horaires.....9

I.2.2.3.Coordonnées solaires locales.....9

I.2.3.Réception des rayons solaires.....10

I.2.3.1.Irradiation solaire.....11

I.2.3.2.Zones prometteuses.....12

Sommaire

I.2.3.2.Principes régissant les concentrateurs solaires.....	12
I.2.3.2.a. Principe d'optique du concentrateur.....	12
I.2.3.2.b. Système de poursuite	14
I.3.Aperçu sur la technologie.....	14
I.3.1.Historique de l'exploitation de l'énergie solaire.....	14
I.3.2.Etat actuel de la technologie.....	17
I.3.2.1.Centrales à tour.....	18
I.3.2.2.Centrales à miroirs paraboliques.....	18
I.3.2.3Centrales à miroirs cylindro-paraboliques	18
I.3.2.4.Centrales à miroirs de Fresnel	19
I.3.3.Recherches et projets.....	19
I.3.3.1.En Espagne.....	20
I.3.3.2.Aux États-Unis	20
I.3.3.3.Dans le reste du monde.....	20
I.3.4.Aspect économique.....	21
I.3.4.1.Perspectives et marché	21
I.3.4.2.Couts de production.....	22
I.4.Conclusion.....	23

Chapitre II : Présentation des éléments de la centrale thermique à concentrateur

II.1. Introduction.....	24
II.1.1. Principe de fonctionnement.....	24
II.2. Conversion thermo-solaire	25
II.2.1.Concentration linéaire.....	26
II.2.1.1.Centrales à miroirs cylindro-paraboliques	26

Sommaire

II.2.1.2.Centrales solaires à miroirs de Fresnel.....	27
II.2.1.3.Eléments de l'installation.....	28
II.2.1.3.a. Collecteur.....	28
II.2.1.3.b. Champ solaire	30
II.2.2.Concentration ponctuelle.....	31
II.2.2.1.Centrales à tour	31
II.2.2.2.Centrales à miroir parabolique Dish-Stirling.....	32
II .3.Conversion thermodynamique.....	33
II .3.1.Fonctionnement général.....	33
II .3.2.Composants de l'installation.....	34
II .3.2.1.Chaudière.....	34
II .3.2.2.Turbine.....	35
II .3.2.3.Condenseur.....	36
II .3.2.4.Pompe.....	36
II .3.3.Cycles thermodynamique.....	37
II .3.3.1.Cycle de Rankine	37
II .3.3.2.Cycle de Brayton.....	38
II .3.3.3.Cycle combiné	39
II .3.3.4.Cycle de Hirn.....	39
II .3.3.5.Cycle de Stirling.....	40
II .4.Transport et stockage de chaleur	42
II .4.1.Fluides caloporteurs	42
II .4.1.1.Eau.....	43
II .4.1.2.Huiles.....	43
II .4.1.3.Sels fondus.....	43

Sommaire

II .4.1.4.Gaz.....	43
II .4.1.5.Fluides organiques.....	43
II .4.2.Stockage thermique.....	44
II .4.2.1.Systèmes de stockage.....	44
II .4.2.1.a. Systèmes basés sur la chaleur sensible	44
II .4.2.1.b. Systèmes basés sur la chaleur latente.....	44
II .4.2.1.c. Systèmes basés sur le stockage par cycle thermochimique	45
II .4.2.2.Classification.....	45
II .4.2.2.a. stockage découplé	45
II .4.2.2.b. stockage en parallèle	45
II .4.2.2.c. stockage en série.....	45
II .4.2.2.d. stockage intégré à l'échangeur.....	46
II .4.Conclusion.....	46
 Chapitre III : Etude thermodynamique de la turbine à vapeur	
III.1. Introduction.....	47
III.2.Choix de la technologie solaire.....	47
III.2.1.Tour solaire.....	47
III.2.1.1.Héliostat.....	47
III.2.1.2.Récepteur.....	48
III.2.1.3.Tour.....	49
III.2.2.Centrale à concentrateurs cylindro-paraboliques.....	49
III.2.3.Capteur parabole/Stirling.....	50
III.2.4.Récapitulation.....	51
III.3.Etude des cycles thermodynamiques les plus utilisés.....	53
III.3.1.Fluides utilisés.....	53

Sommaire

III.3.1.1.Fluide seul.....	53
III.3.1.1.a. Avantage.....	53
III.3.1.1.b. Inconvénients.....	53
III.3.1.2.Deux fluides.....	53
III.3.1.2.a. Avantages.....	53
III.3.1.1.b. Inconvénients.....	54
III.3.2.Cycle simple de Rankine.....	54
III.3.3.Cycle Hirn de vapeur.....	58
III.3.4.Cycle de Hirn avec surchauffe.....	60
III.3.5.Pertes dans les cycles de Rankine et alternatifs fluides actifs.....	63
III.3.6.Cycle Hirn réel avec surchauffe	63
III.3.Conclusion.....	64

Chapitre IV : Simulation de l'installation et interprétation des résultats

IV .1. Introduction.....	65
IV .2.Conditions météo-logiques et géographiques de la région.....	65
IV .2.1.Conditions géographiques de la région.....	66
IV .2.2.Conditions météorologiques.....	66
IV .3.Description de l'installation.....	67
IV .3.1.Bilans massique et énergétique.....	67
IV .3.1.1.Cycle de Rankine.....	68
IV .3.1.2.Cycle de Hirn.....	70
IV .3.2.Etude de la centrale.....	72
IV .3.2.1.Etude de la partie thermo-solaire.....	72
IV .3.2.2.Etude de la partie thermodynamique.....	73
IV .3.2.2.a. Exemple de calcul des paramètres.....	74

Sommaire

IV .3.2.2.b. Cycle de Rankine.....	77
IV .3.2.2.c. Cycle de Hirn.....	79
IV .4.Simulation.....	84
IV .4.1.Contraintes de travail	86
IV .4.2.Simulation du cycle de Rankine.....	87
IV .4.2.1.Influence de la basse pression.....	87
IV .4.2.2.Influence de la haute pression.....	93
IV .4.3.Simulation du cycle de Hirn.....	95
IV .4.3.1.Influence de la basse pression (PB).....	95
IV .4.3.1.a. Pour $P_H = 10$ bars.....	96
IV .4.3.1.b. Pour $P_H = 15$ bars.....	97
IV .4.3.1.c. Pour $P_H = 20$ bars.....	99
IV .4.3.2.Influence de la haute pression.....	101
IV .4.3.2.a. Pour $P_B = 3$ bars.....	101
IV .4.3.2.b. Pour $P_B = 5$ bars.....	104
IV .4.3.2.c. Pour $P_B = 7$ bars.....	107
IV .4.4.Interprétation des graphes.....	110
IV .4.4.1.Cycle de Rankine.....	110
IV .4.4.2.Cycle de Hirn.....	111
IV.4.5.Récapitulation.....	113
IV.4.5.1.Cycle de RANKINE.....	113
IV.4.5.2.Cycle de Hirn.....	114
IV .5.Conclusion.....	115
Conclusion générale.....	116

Bibliographie

Annexe

Liste des figures

Chapitre I: Etat de l'art de la thermo-solaire à concentration

Figure (I.1) : Schéma de principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque.....	5
Figure (I.2) : Eléments d'installation photovoltaïque.....	6
Figure (I- 3) : Classification des principaux types de capteurs solaires commercialisés.....	6
Figure (I.4) : Coordonnées géographiques.....	8
Figure (I.5) : Coordonnées horaires.....	9
Figure (I.6) : Coordonnées horizontales.....	10
Figure (I-7) : Composantes du rayonnement global sur une surface incliné.....	10
Figure (I.8): Irradiation solaire moyenne.....	11
Figure (I.9) : Irradiation journalière dans le monde.....	12
Figure (I.10) : Cuiseur solaire d'Antoine Laurent de Lavoisie.....	15
Figure (I.11) : Schéma de principe d'une centrale solaire.....	18
Figure (I.12): Zones favorables pour l'exploitation du potentiel solaire.....	19

Chapitre II : Présentation des éléments de la centrale thermique a concentrateur

Figure (II.1) : Schéma de principe d'une centrale solaire à concentration.....	24
Figure (II.2) : Schéma global de la conversion thermo-solaire.....	25
Figure (II.3) : Comparaison des technologies solaires à concentration.....	26
Figure (II.4) : Installation à Miroirs cylindro-paraboliques d'Andasol, Espagne.....	27
Figure (II.5) : Centrale solaire à miroirs de Fresnel, Fresdemo, Espagne.....	28
Figure (II.6) : Schéma d'un capteur de concentration linéaire.....	29
Figure (II.7) : Schéma de principe d'un tube collecteur.....	30

Liste des figures

Figure (II.8) : Différentes configurations de champs solaires.....	30
Figure (II.9) : Champ solaire dans la centrale Solar One en Californie.....	32
Figure (II.10) : Centrale à Paraboles solaires Dish-Stirling à Albuquerque, Australie.....	33
Figure (II.11) : Principe de fonctionnement d'une centrale thermique solaire à concentration.....	34
Figure (II.12) : Illustration d'une chaudière.....	35
Figure (II.13) : Schéma d'une turbine axiale industrielle.....	36
Figure (II.14) : Cycle de Rankine.....	38
Figure (II.15) : Cycle de Brayton.....	38
Figure (II.16) : Schéma d'un cycle combiné (centrale à tour).....	39
Figure (II.17) : Cycle de Hirn.....	40
Figure (II.18) : Système à concentration parabolique et moteur à cycle Stirling.....	41

Chapitre III : Etude thermodynamique de la turbine à vapeur

Figure (III.1) : Avantages et inconvénients.....	50
Figure(III.2) : (a) Quatre composants de base d'un cycle de Rankine simples ; b Diagramme de température et entropie spécifique.....	55
Figure (III.3) : (a) Cycle de Hirn de la vapeur ; (b) Diagramme T-s.....	58
Figure (III.4) : (a) Un cycle de Hirn avec réchauffage de vapeur; (b) Diagramme T-s.....	61

Chapitre IV : Simulation de l'installation et interprétation des résultats

Figure (IV.1) : Schéma de principe du cycle de Rankine.....	68
Figure (IV.2) : Diagramme de température et entropie spécifique, du cycle de Rankine.....	68
Figure (IV.3) : Schéma de principe du cycle de Hirn.....	70
Figure (IV.4) : Diagramme température-entropie.....	70
Figure (IV.5) : Disposition du champ solaire, d'après eSolar.....	72

Liste des figures

Figure (IV.6) : Schéma simplificateur de l'implantation.....	73
Figure (IV.7) : Cycle théorique de RANKINE entre 2 et 10 bars.....	74
Figure(IV.8) : Cycle de HIRN entre 2 et 10 bars à 400°C.....	76
Figure (IV.9) : Interface du logiciel Mathcad.....	85
Figure (IV.10) : Variation du rendement en fonction des basses pressions.....	87
Figure (IV.11) : Variation du rendement en fonction des basses pressions pour deux hautes pressions.....	88
Figure (IV.12) : Variation du rendement en fonction des basses pressions pour deux hautes pressions.....	89
Figure (IV.13) : Variation du rendement en fonction des basses pressions pour trois hautes pressions.....	90
Figure (IV.14) : Variation du rendement en fonction des basses pressions pour trois hautes pressions.....	91
Figure (IV.15) : Variation du rendement en fonction des basses pressions pour quatre hautes pressions.....	92
Figure (IV.16) : Variation du rendement en fonction des basses pressions pour différentes hautes pression.....	92
Figure (IV.17) : Variation du rendement en fonction des hautes pressions.....	93
Figure (IV.18) : Variation du rendement en fonction des hautes pressions pour deux basses pressions.....	94
Figure (IV.19) : Variation du rendement en fonction des hautes pressions pour différentes basses pression.....	94
Figure (IV.20) : Variation du rendement en fonction des températures ($P_H = 10$ bars).....	95
Figure (IV.21) : Variation du rendement en fonction des températures pour deux basses pressions ($P_H = 10$ bars).....	96
Figure (IV.22) : Variation du rendement en fonction des températures pour différentes basses pression ($P_H = 10$ bars).....	96
Figure (IV.23) : Variation du rendement en fonction des températures ($P_H = 15$ bars).....	97
Figure (IV.24) : Variation du rendement en fonction des températures pour deux basses pressions ($P_H = 15$ bars).....	98

Liste des figures

Figure (IV.25) : Variation du rendement en fonction des températures pour différentes basses pressions ($P_H = 15$ bars).....	98
Figure (IV.26) : Variation du rendement en fonction des températures ($P_H = 20$ bars).....	99
Figure (IV.27) : Variation du rendement en fonction des températures pour deux basses pressions ($P_H = 20$ bars).....	100
Figure (IV.28) : Variation du rendement en fonction des températures pour différentes basses pression ($P_H = 20$ bars).....	100
Figure (IV.29) : Variation du rendement en fonction des températures ($P_B = 3$ bars).....	101
Figure (IV.30) : Variation du rendement en fonction des températures pour deux hautes pressions ($P_B = 3$ bars).....	102
Figure (IV.31) : Variation du rendement en fonction des températures pour trois hautes pressions ($P_B = 3$ bars).....	103
Figure (IV.32) : Variation du rendement en fonction des températures pour différentes hautes pressions ($P_B = 3$ bars).....	103
Figure (IV.33) : Variation du rendement en fonction des températures ($P_B = 5$ bars).....	104
Figure (IV.34) : Variation du rendement en fonction des températures pour deux hautes pressions ($P_B = 5$ bars).....	105
Figure (IV.35) : Variation du rendement en fonction des températures pour trois hautes pressions ($P_B = 5$ bars).....	106
Figure (IV.36) : Variation du rendement en fonction des températures pour différentes hautes pressions ($P_B = 5$ bars).....	106
Figure (IV.37) : Variation du rendement en fonction des températures ($P_B = 7$ bars).....	107
Figure (IV.38) : Variation du rendement en fonction des températures deux hautes pressions ($P_B = 7$ bars).....	108
Figure (IV.39) : Variation du rendement en fonction des températures trois hautes pressions ($P_B = 7$ bars).....	109
Figure (IV.40) : Variation du rendement en fonction des températures différentes hautes pressions ($P_B = 7$ bars).....	109

Liste des tableaux

Chapitre I: Etat de l'art de la thermo-solaire à concentration

Tableau (I.1) : Les quatre principales technologies de collecte et de concentration du flux solaire.....	17
--	----

Chapitre III : Etude thermodynamique de la turbine à vapeur

Tableaux (III.1) : Température et fluides utilisés pour les récepteurs.....	48
Tableau (III. 2) : Comparaison entre les différents capteurs solaires.....	51

Chapitre IV : Simulation de l'installation et interprétation des résultats

Tableau (IV.1) : Données géographiques de Tlemcen.....	66
Tableau (IV.2) : Données météorologiques de Tlemcen.....	67
Tableau (IV.3) : Déterminations des différents paramètres h_i et x_5 en fonction des basses pressions.....	78
Tableau (IV.4) : Déterminations des différents paramètres h_i et x_i en fonction des hautes pressions.....	78
Tableau (IV.5) : Détermination des paramètres h_i et x_i en fonction des températures ($P_H = 10$ bars).....	79
Tableau (IV.6) : Détermination des paramètres h_i et x_i en fonction des températures ($P_H = 15$ bars).....	79
Tableau (IV.7) : Détermination des paramètres h_i et x_i en fonction des températures ($P_H = 20$ bars).....	81
Tableau (IV.8) : Détermination des paramètres h_i et x_i en fonction des températures ($P_B = 3$ bars).....	82
Tableau (IV.9) : Détermination des paramètres h_i et x_i en fonction des températures ($P_B = 5$ bars).....	83
Tableau (IV.10) : Détermination des paramètres h_i et x_i en fonction des températures ($P_B = 7$ bars).....	84

Nomenclatures

Alphabet latin		
Symbole	Définition	Unité
a	Azimut	dégre
A	Ouverture du concentrateur	m²
C	Concentration solaire	/
C_{ϕ}	Rayonnement solaire concentré	W/m²
d	diamètre d'une image	m
D	Diamètre de l'ouverture	m
F	Focale	m
h	Hauteur	degré
h	Enthalpie massique	kJ/kg
I	Irradiation normale directe	W/m²
nombre-f (f/#)	Propriété des systèmes optiques	/
m	Débit massique	kg/s
P	Pression	bar
\mathcal{P}	Puissance nette générée	W
q	Chaleur massique	kJ/kg
s	Entropie	kJ/kg/K
T	Température	°C
U	Coefficient de perte de chaleur	W/K
v	Volume massique	m³/kg
w	Travail massique	kJ/kg

Nomenclatures

Alphabet grec		
Symbole	Définition	Unité
α	Absorptivité thermique	/
γ	Facteur dû aux imperfections des réflecteurs	/
δ	Déclinaison solaire	degré
ε	Émissivité thermique	/
η	Rendement	/
θ_s	Angle horaire	degré
λ	Latitude	degré
ρ	Réfectivité thermique	/
τ	Transmissivité thermique	/
ω	Angle horaire	degré
Φ	Longitude	degré

Abréviations	
Abrégés	Définition
AIE	Agence internationale de l'énergie
CLFR	Compact Linear Fresnel Reflector (réflecteur compact linéaire de Fresnel)
DCA	Défense contre les avions
DNI	Irradiation directe normale à la surface
DSG	Direct Stram Generator, Génération directe de vapeur
IRENA	Agence internationale de l'énergie renouvelable
GTA	Gaz Transportation Agreement (Agrément de gaz de transport)
LCOE	Levelised Cost of Electricity (Coûts de production actualisés de l'électricité)
LEC	Levelized Electricity Costs (Coûts de production actualisés de l'électricité)
OCDE	Organisation de Cooperation et de Developpement Economiques

Nomenclatures

Indice	Définition
a	Ambiante
abs	Absorbeur
C	Condenseur
c	Concentrateur
Ch	Chaudière
Ch1	Surchauffe
Ch2	Resurchauffe
f	Finale
F	Fenêtre
Gen	Générateur
i	Initiale
Op	Optique
P	Pompe
r	Réel
R	Récepteur
S	Soleil
s	Isentropique
Stir	Stirling
T	Turbine
u	Utile

Introduction générale

Introduction générale

Le monde est témoin, depuis plus d'un siècle, d'un important changement économique ; le développement industriel, l'augmentation du parc automobile et la multiplication des équipements domestiques ont provoqué une croissance importante de la demande énergétique.

Malheureusement, cette croissance de la demande a été majoritairement couverte par l'utilisation de sources d'énergies fossiles, motivée par des considérations économiques. D'autres facteurs comme l'effet sur l'environnement, la limitation de nos réserves fossiles, et le nationalisme énergétique n'ont pas été pris en compte.

Depuis les années 1990, la question du protectorat environnemental a occupé une place graduelle dans les pays développés et la prise de conscience de la nécessité d'une politique volontariste en ce domaine s'est rapidement accrue. Comme alternative à ces préoccupations, le développement et l'adaptation des énergies renouvelables sont inévitables.

Des ressources énergétiques illimitées et largement disponibles existent et doivent être exploitées. Certaines, comme l'énergie éolienne ou hydraulique connaissent déjà un développement technique et commercial logique et sont économiquement concurrentielles. D'autres, comme l'énergie solaire et thermoélectrique, sont techniquement disponibles, mais leur compétitivité nécessite une plus grande confiance de la part des entreprises privées et des institutions publiques afin de favoriser l'implémentation de ce type de systèmes.

Dans l'optique de la production d'électricité, l'énergie solaire est une source d'énergie propre et inépuisable. Actuellement les technologies de concentration solaire sont celles qui présentent le plus de possibilités pour une exploitation commerciale. Ces technologies se basent sur des collecteurs qui concentrent la radiation solaire et réchauffent à haute température un fluide caloporteur. Ce fluide peut ensuite être utilisé pour la génération d'électricité ou la génération de chaleur, par exemple au moyen d'un cycle de RANKINE.

Introduction générale

Les énergies renouvelables possèdent généralement une limitation due à leur caractère inhérent à leur difficulté de stockage. Si la limitation due au stockage est importante pour des énergies comme l'énergie éolienne ou photovoltaïque, elle l'est moins pour la concentration solaire, qui utilise généralement des systèmes de stockage de chaud ou qui peut être hybridée avec d'autres sources énergétiques (gaz naturel, biomasse, etc.)

Le potentiel solaire des pays proches des pôles terrestres est limité. La nébulosité et le faible niveau de radiation dû à la latitude sont des facteurs localisant l'implantation de systèmes à concentration solaire. Cependant, les contraintes environnementales sont des problèmes réels, faisant fi des frontières nationales. Les pays les plus proches de l'équateur sont par exemple des candidats singulièrement adaptés pour ce genre de technologies.

A l'heure de la prise de conscience massive des gouvernements relative aux effets nocifs du réchauffement climatique, il est primordial de considérer l'énergie solaire thermique comme l'une des alternatives aux combustibles fossiles.

L'Algérie qui dispose d'un potentiel solaire exceptionnel avec plus de 3000 heures d'ensoleillement et une superficie de 2381745 Km² a décidé de mettre en place une stratégie pour développer différentes applications de l'énergie solaire et notamment les systèmes à concentration solaire pour l'alimentation en énergie, que ça soit la production de la chaleur ou de l'électricité, qui sera profitable aux régions les plus sollicitant. C'est dans ce sens que notre intérêt a porté sur l'étude d'une centrale thermique solaire à concentrateurs.

Une centrale solaire thermodynamique à concentration (ou centrale solaire thermique à concentration ou encore héliodynamique, en anglais CSP pour *Concentrating Solar Power Plant*) est une centrale qui concentre les rayons du soleil à l'aide de miroirs afin de chauffer un fluide caloporteur qui permet en général de produire de l'électricité. Ce type de centrale permet, en stockant ce fluide dans un réservoir, de prolonger le fonctionnement de la centrale plusieurs heures au-delà du coucher du soleil.

Introduction générale

Ces centrales connaissent un développement important malgré leurs limites, en particulier la nécessité de disposer de conditions optimales d'ensoleillement direct, idéalement supérieur à 1 900 kWh/m²/an ; elles présentent par contre un avantage majeur par rapport au photovoltaïque : elles peuvent (optionnellement) stocker la chaleur qu'elles produisent pour pouvoir continuer à fonctionner plusieurs heures après le coucher du soleil.

Afin d'optimiser l'investissement, la gestion opérationnelle et le rendement de telle installations, nous avons établi une petite étude paramétrique pour mettre en valeur l'importance du choix des variables opérationnelles de la conversion énergétique avec ses différentes procédures et processus.

Notre travail comporte les quatre chapitres suivants :

- **Le premier chapitre** parle en premier lieu des multiples sortes d'utilisation de l'énergie solaire ainsi que les différentes sortes de maîtrise de cette dernière. Ensuite, on a donné un focus sur le développement de son utilisation et son impact commercial.

- **Le deuxième chapitre** expose les éléments de la centrale thermique à concentrateur et les différentes sortes de conversion thermo-solaire et thermodynamique, et montre également les moyens de transport et de stockage de chaleur.

- **Le troisième chapitre** est consacré à l'étude thermodynamique de la turbine à vapeur, au choix de la technologie de concentration solaire et du cycle thermodynamique adopté pour le chapitre suivant.

- **Le quatrième chapitre** énonce les étapes de simulation, illustre ses résultats et termine avec l'interprétation, l'explication et l'éclaircissement des multiples changements en performances de l'installation de conversion thermodynamique.

Chapitre I

Etat de l'art de la thermo- solaire à concentration

Chapitre I : Etat de l'art de la thermo-solaire à concentration

1. Introduction :

Fournies par le soleil, le vent, la chaleur de la terre, les chutes d'eau, les marées ou encore la croissance des végétaux, les énergies renouvelables n'engendrent pas ou peu de déchets ou d'émissions polluantes. Elles participent à la lutte contre l'effet de serre et les rejets de CO₂ dans l'atmosphère, facilitent la gestion raisonnée des ressources locales et génèrent des emplois. Le solaire (solaire photovoltaïque, solaire thermique), l'hydroélectricité, l'éolien, la biomasse, la géothermie sont des énergies à flux inépuisables par rapport aux « énergies stock » tirées des gisements de combustibles fossiles en voie de raréfaction : pétrole, charbon, lignite, gaz naturel [1].

De ces faits, l'exploitation des énergies renouvelables est recommandée, nous nous spécialisons dans l'utilisation de l'énergie solaire, pour satisfaire les besoins énergétiques, par voie des centrales thermiques à concentration solaire. L'énergie solaire constitue le plus grand potentiel énergétique que nous disposons sur terre, constant à très long terme (plusieurs millions d'années).

L'idée d'exploiter cette énergie pour la conversion thermodynamique, bien que relativement ancienne, se matérialise seulement aujourd'hui. Le développement récent des centrales solaires commerciales, ne représente qu'une part infime de la production d'électricité, ce qui laisse entrevoir également la possibilité de fabriquer des microcentrales capables d'alimenter des sites isolés, pas concurrent, mais complémentaire au réseau de distribution le plus adapté aux grandes échelles.

Le présent chapitre a le but d'établir un état d'art de la conversion thermomécanique de l'énergie solaire, de grandes et de petites puissances, de citer les multiples installations opérationnelles et de signaler quelques futurs projets dans le monde [2].

2. Généralité :

2.1. Les multiples sortes d'utilisation de l'énergie solaire

Dans le domaine des énergies renouvelables, et dans le cadre de l'exploitation de l'énergie solaire, les capteurs solaires occupent une place importante. Leur développement technologique a apporté sur la stabilité des performances des systèmes dans le temps. Du fait de cette fiabilité, leur utilisation dans les secteurs industriels ou individuels est aujourd'hui très répandue [3].

2.1.1. Les capteurs solaires

Deux types de capteurs solaires existent actuellement sur le marché:

- **Les cellules photovoltaïques :** Il s'agit de la conversion directe de l'énergie lumineuse du rayonnement solaire incident en énergie électrique.

Les particules de lumière viennent heurter les électrons sur le matériau semi-conducteur (en général du silicium) de la photopile et lui communiquent leur énergie, voir Figure I.1. Le silicium traité oriente la circulation de tous les électrons dans le même sens. Une tension apparaît donc, en présence de lumière, aux bornes de la photopile. Le premier cas de génération d'électricité photovoltaïque a été effectué en 1954 par les chercheurs américains Chapin, Fuller, Pearson et Prince.

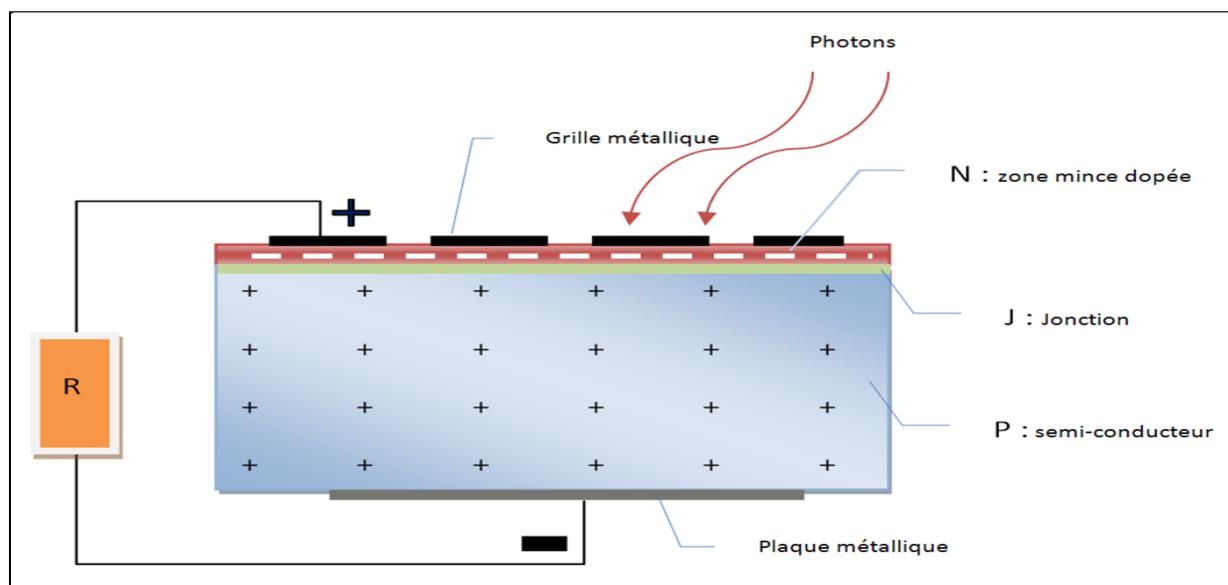


Figure (I.1) : Schéma de principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

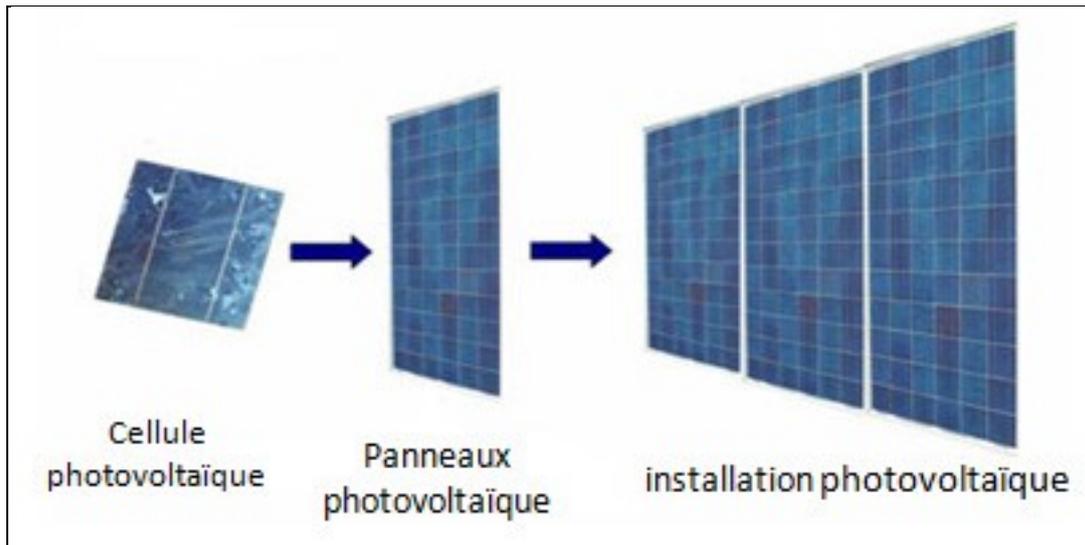


Figure (I.2) : Eléments d'installation photovoltaïque

- **Les capteurs solaires thermiques** : ils vont intercepter l'énergie solaire et la transformer en énergie calorifique utilisable par l'intermédiaire d'un fluide caloporteur (eau, air,...).

Il est possible de classer les capteurs suivant différentes caractéristiques, qu'ils soient à air ou à circulation de liquide, ou encore que ces derniers soient vitrés ou non vitrés [3].

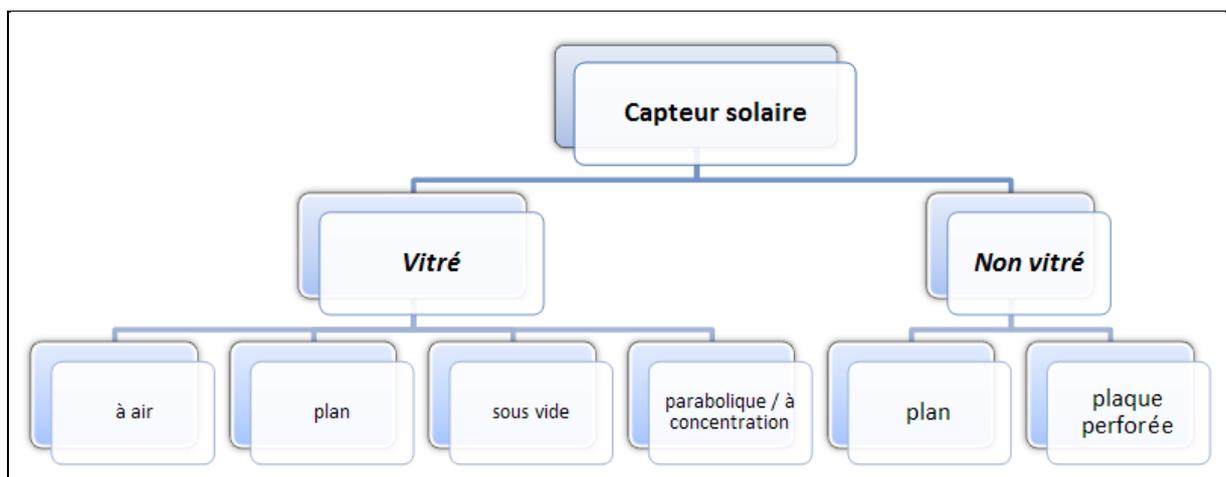


Figure (I.3) : Classification des principaux types de capteurs solaires commercialisés

Dans notre travail nous nous intéressons à la concentration solaire et à son utilisation.

2.1.2. Les capteurs solaires à concentration

Leur rôle est de concentrer les rayons du soleil à l'aide de réflecteurs sur un absorbeur. Alors, il est possible de réduire considérablement la surface de l'absorbeur, et par là même, les déperditions thermiques ; on augmente ainsi les performances du capteur. Ces derniers sont le plus souvent utilisés pour des besoins en hautes températures, dans le cadre de production de vapeur alimentant des générateurs électriques par exemple.

Compte tenu de la géométrie des réflecteurs, ces capteurs sont adaptés à des zones où le rayonnement diffus est négligeable sur la période de fonctionnement d'une installation. Ainsi, les températures de sortie de ces capteurs vont de 100°C à plus de 1000°C [3].

2.1.3. Améliorations des performances

Afin d'améliorer les performances des capteurs solaires à concentration, trois axes d'optimisation font l'objet de recherches et développements. Nous avons synthétisé ces principales pistes :

- *Rendement optique*
- Posture de réflecteurs dans la cavité.
- *Réduction des déperditions thermiques*
- Développement de miroirs asymétriques avec haut coefficient de réflexion
- Interposition de matériau transparent entre l'absorbeur et le vitrage ;
- Matériau transparent isolant ;
- *Géométrie /matériau*
- Choix de matériau à propriétés sélectives ;
- Design de l'absorbeur (plan, cylindrique).

2.2. Maitrise de l'énergie solaire

Le rayonnement solaire est un rayonnement thermique qui se propage sous la forme d'ondes électromagnétiques. Donc, c'est un apport énergétique disposé quotidiennement, dont l'intensité varie selon le lieu, l'heure du jour et la saison.

Pour récupérer un maximum d'énergie en provenance du soleil, il est nécessaire d'orienter au mieux le récepteur. La connaissance de la position du soleil dans le ciel et par rapport au lieu de captation s'avère donc nécessaire.

2.2.1. Les coordonnées géographiques

Tout point de la sphère terrestre est repéré par ses coordonnées géographiques :

- La latitude (λ) d'un lieu, correspond à l'angle avec le plan équatorial que fait le rayon joignant le centre de la terre à ce lieu. Elle varie entre (0° et $+90^\circ$) au pôle Nord et (0° et -90°) au pôle Sud.
- La longitude (ϕ) d'un lieu, correspond à l'angle que fait le plan méridien passant par ce lieu avec un plan méridien retenu comme origine. On a choisi pour méridien origine 0° le plan passant par l'observatoire de Greenwich. Par convention on affecte du signe (+) les méridiens situés à l'est de ce méridien, et du signe (-) les méridiens situés à l'ouest [4].

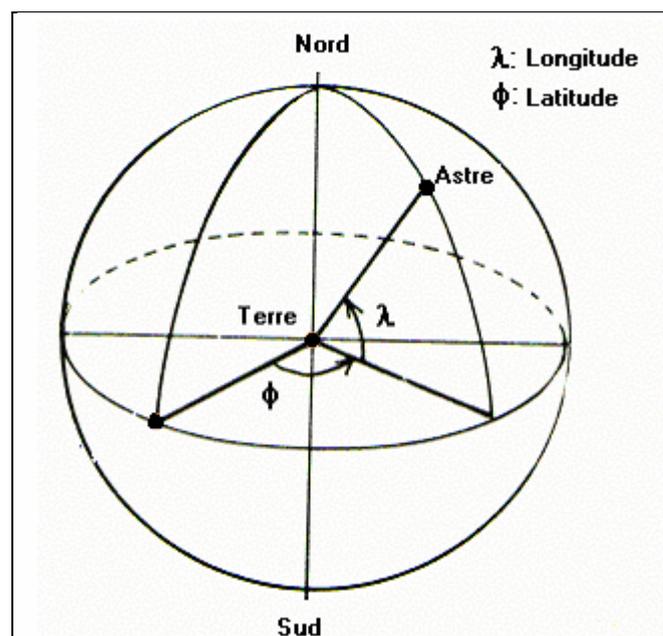


Figure (II.4) : Coordonnées géographiques [4]

2.2.2. Les coordonnées horaires

- La déclinaison solaire (δ), est l'angle formé par la direction du soleil et le plan équatorial terrestre. Elle varie tout au long de l'année, entre deux valeurs extrêmes, ($- 23,45^\circ \leq \delta \leq 23,45^\circ$), s'annule aux équinoxes de printemps et d'automne, et prend les valeurs extrêmes aux solstices d'été et d'hiver.

- L'angle horaire (w), du soleil, est l'angle formé par le plan méridien du lieu et celui qui passe par la direction du soleil si l'on prend comme origine le méridien de Greenwich. L'angle horaire est compris entre 0° et 360° . La valeur de l'angle horaire est nulle à midi solaire, négative le matin, positive dans l'après midi et augmente de 15° par heure [4].

La formule suivante donne l'angle horaire :

$$W = (TSV - 12) \times 15^\circ \quad (II.1)$$

TSV : temps solaire vrai.

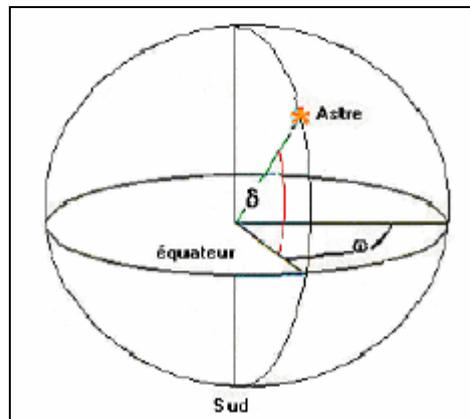


Figure (II.5) : Coordonnées horaires [4]

2.2.3. Les coordonnées solaires locales

La position d'un astre dans l'espace, peut être repérée par ses coordonnées horizontales définies sur la sphère céleste :

- La hauteur (h), est l'angle que fait la direction de l'astre, avec le plan horizontal.
- L'azimut (a), est l'angle que fait la projection du rayon solaire sur le plan horizontal (plan tangent au sol) avec la direction sud.

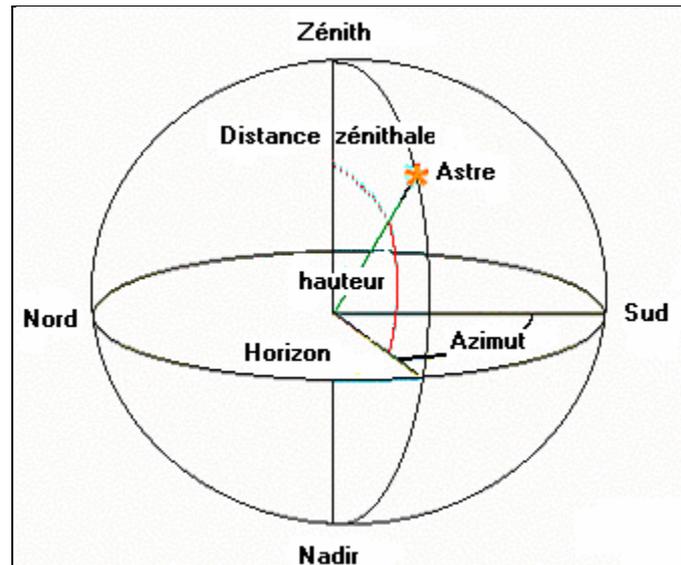


Figure (II.6) : Coordonnées horizontales [4]

Le rayonnement solaire arrivant au sol est formé de rayonnement direct et de rayonnement diffus, l'ensemble forme le rayonnement global [4].

Le rayonnement solaire direct se définit comme étant le rayonnement provenant directement du soleil. Il est donc nul lorsque le soleil est occulté par les nuages.

Le rayonnement solaire diffus résulte de la diffraction du rayonnement solaire par les nuages et les particules en suspension dans l'atmosphère. Il n'est donc nul que la nuit.

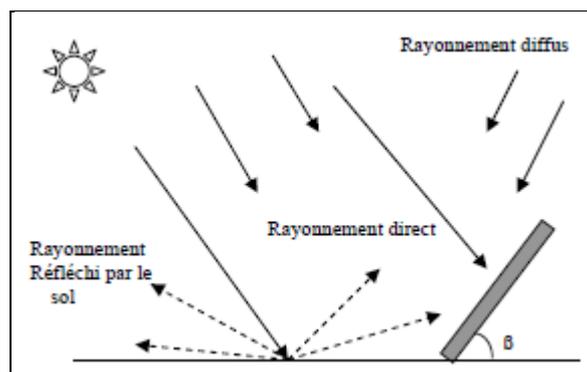


Figure (I-7) : Composantes du rayonnement global sur une surface inclinée [4]

2.3. Réception des rayons solaires

Après avoir acquis le savoir faire de placer les récepteurs solaires, il reste à savoir où les placer sur notre planète pour en bénéficier au maximum.

Il y a des zones sur terre précises pour garantir un rendement expliquant l'investissement lourd des technologies de la thermodynamique solaire.

2.3.1. Irradiation solaire

L'énergie solaire peut être utilisée pour produire de la chaleur à partir des systèmes thermiques à concentration. Ces derniers systèmes utilisant seulement l'irradiation directe, ne peuvent être installés que dans des zones fortement ensoleillées. Ainsi, un ensoleillement de 1800 kWh/m²/an est le seuil minimum estimé nécessaire pour obtenir un rendement suffisant. Les mesures du gisement solaire ont concerné essentiellement, dans un premier temps, la durée d'ensoleillement. Actuellement, les données sur le gisement solaire sont disponibles auprès des agences météorologiques nationales et internationales, des établissements chargés du développement des technologies solaires ainsi que des établissements de recherche [3].

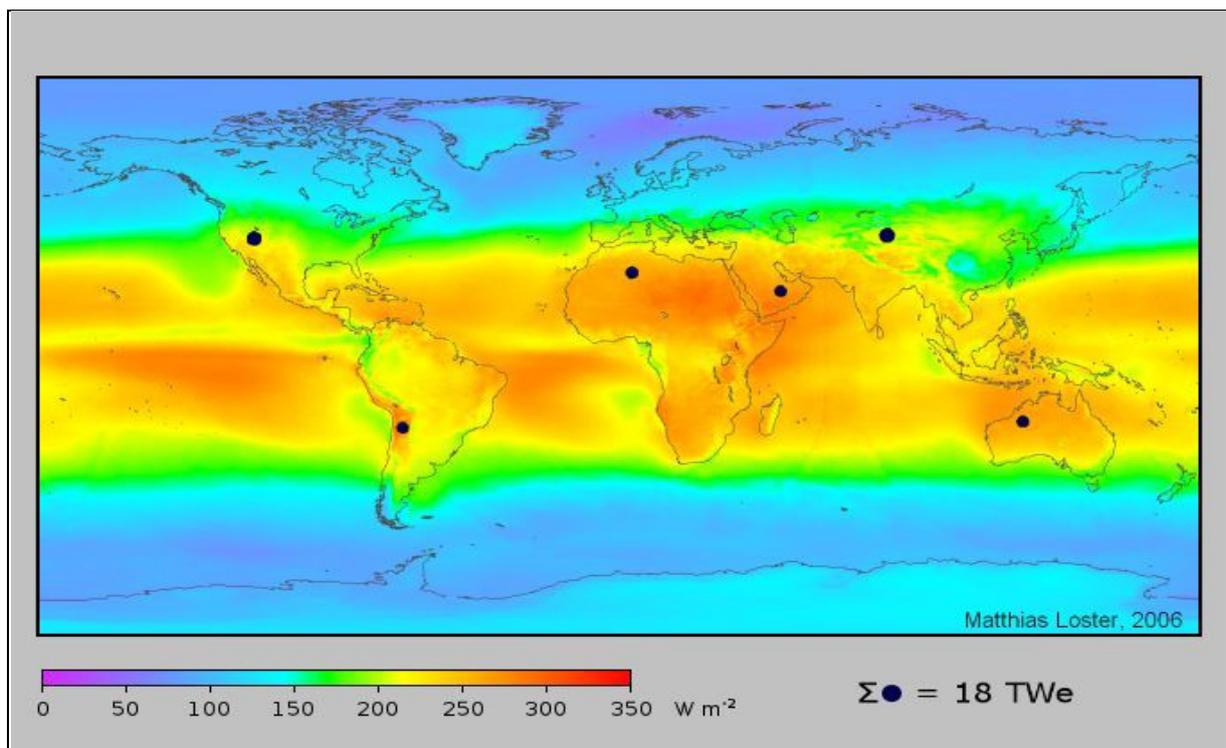


Figure (I.8): irradiation solaire moyenne [3]

2.3.2. Zones prometteuses

Les endroits les plus prometteurs pour l'implantation de ces technologies sont ceux du sud-ouest des États Unis, l'Amérique du Sud, une grande partie de l'Afrique, les pays méditerranéens et du Moyen Orient, les plaines désertiques d'Inde et du Pakistan, la Chine, l'Australie, etc... [5]

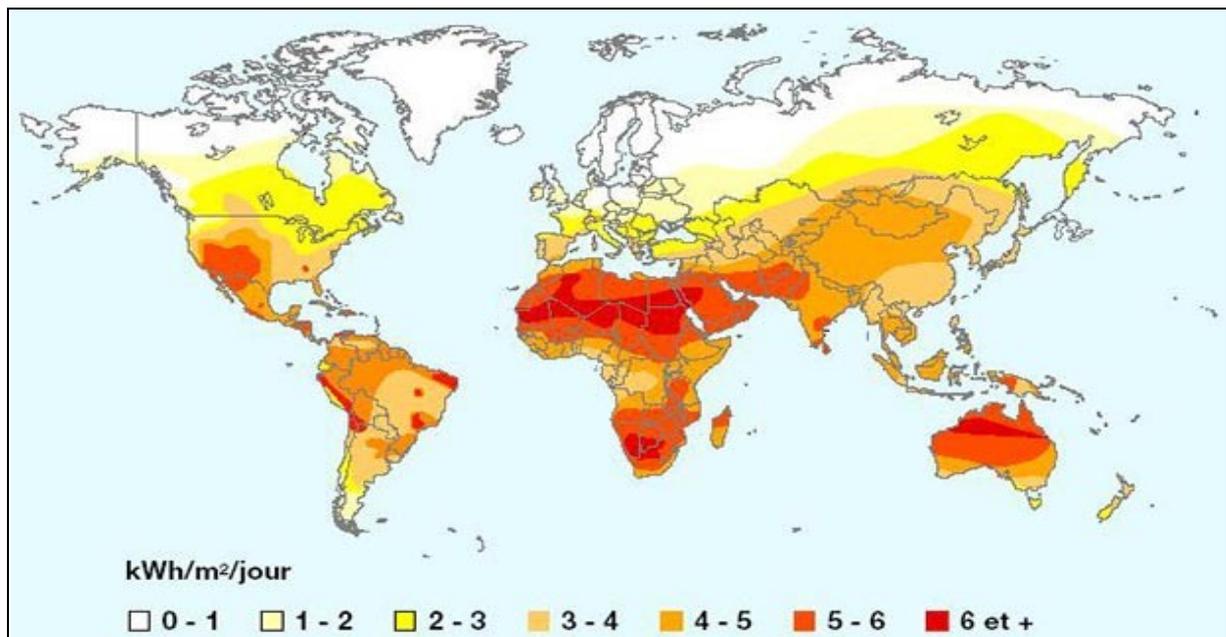


Figure (I.9) : Irradiation journalière dans le monde [5]

2.3.3. Principes régissant les concentrateurs solaires

Comme le projet présenté dans ce mémoire consiste l'étude des centrales solaires thermiques à concentrateurs, il est important de bien comprendre les principes qui régissent ses systèmes de collecte de l'énergie solaire. Nous nous intéresserons ici aux principes appliqués aux concentrateurs simples, tels que les miroirs et lentilles qui sont dans le domaine de l'optique imageante, mais qui sont aussi généralement applicables aux autres types de concentrateurs.

a. Principe d'optique du concentrateur

En raison de la grandeur du soleil et de sa distance par rapport à nous, le disque solaire sous-tend un demi-angle θ_s de $0,27^\circ$ lorsque nous le regardons.

A cet effet, puisque le soleil n'est pas une source ponctuelle, il y a une limite théorique quant à la concentration de la radiation solaire que nous pouvons faire. Le niveau de concentration solaire C est donné par l'équation suivante

$$C = \frac{A}{A_{abs}} \quad (I.2)$$

A est l'ouverture du concentrateur et A_{abs} est la grandeur de l'absorbeur qui reçoit tout le rayonnement solaire concentré. Il est possible de déterminer le niveau maximum théorique de concentration solaire atteignable. Soit le diamètre d d'une image livrée par un système optique imageant ayant une focale F :

$$d = 2 \times F \times \sin\theta_s \quad (I.3)$$

Nous rappelons que θ_s , est le demi angle sous tendu par l'objet observé par le système optique, qui dans notre cas est le soleil. Nous calculons alors que le diamètre de l'image solaire sera de $0,0094.F$.

Le nombre- f ($f/\#$) est une propriété des systèmes optiques qui est le ratio de la distance focale F du système optique sur son diamètre d'ouverture D .

$$f/\# = \frac{F}{D} \quad (I.4)$$

Il est théoriquement établi que le nombre- f ne peut être inférieur à 0,5. En prenant ce nombre- f minimum de 0,5 et les équations plus haut on a :

$$C = \frac{A}{A_{abs}} = \left(\frac{D}{a}\right)^2 = \left(\frac{D}{2 \times F \times \sin\theta_s}\right)^2 = \left(\frac{1}{2 \times (\text{nombre } -f) \times \sin\theta_s}\right)^2 \approx 45000 \quad (I.5)$$

Comme on peut le voir, le niveau de concentration théorique maximum du soleil est de 45000. Une preuve thermodynamique faite par Rabl, permet également d'en arriver au même résultat [4].

b. Système de poursuite

Afin que l'énergie solaire puisse être collectée au point focal du concentrateur, ce dernier doit suivre le mouvement du soleil tout au long de son déplacement au courant de la journée. Plus le collecteur a une dimension juste par rapport à la grandeur du point focal, plus le concentrateur doit suivre précisément le déplacement du soleil. Si la poursuite du soleil n'est pas suffisamment précise, les rayons seront renvoyés hors foyer et non récupérés par le collecteur. Il est possible de diminuer la précision nécessaire en surdimensionnant le collecteur par rapport à la grandeur du point focal. Par contre, cette mesure aura pour effet de diminuer le niveau de concentration possible atteignable par le système. Les concentrateurs à symétrie radiale, tel que le concentrateur parabolique, doivent suivre le mouvement du soleil longitudinalement et latitudinalement. Par contre les concentrateurs à symétrie longitudinale, tel que le concentrateur parabolique linéaire, peuvent suivre le soleil selon un seul de ces deux axes [4].

3. Aperçu sur la technologie**3.1. Historique de l'exploitation de l'énergie solaire**

L'histoire de l'utilisation de l'énergie solaire thermique à concentration commence en Grèce au VIII^{ème} av. JC. En effet, lors de la cérémonie d'ouverture des premiers Jeux Olympiques de 776 av. JC, la flamme olympique était allumée par les rayons du soleil à l'aide du skaphia, miroir ardent, l'ancêtre du miroir parabolique.

En Europe, il faut attendre le XVI^{ème} siècle et la venue de Léonard de Vinci pour redonner un souffle aux technologies solaires. En 1515, Léonard de Vinci invente un nouveau concentrateur solaire: un système du type CLFR (Compact Linear Fresnel Reflector). Cependant, ce système semble n'avoir existé que sur le papier.

En 1615, Salomon de Gaus construit une pompe solaire. La force motrice était fournie à partir de l'air chauffé par le rayonnement solaire.

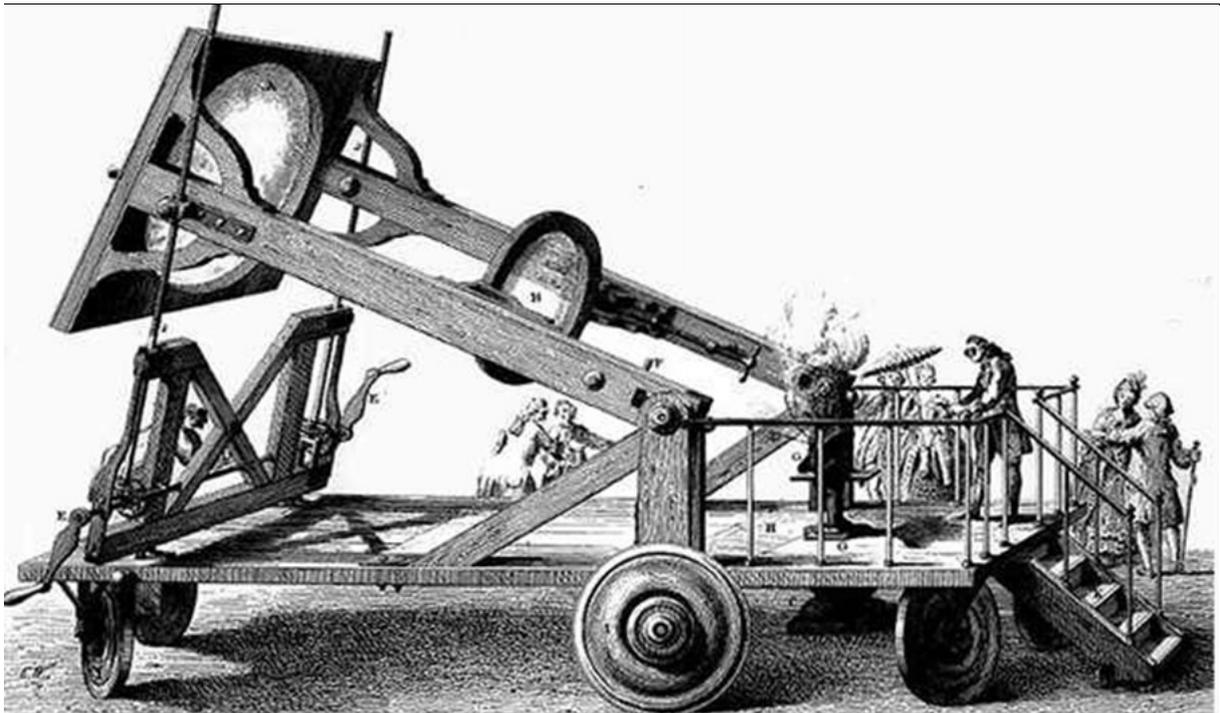


Figure (I.10) : Le cuiseur solaire d'Antoine Laurent de Lavoisier [5]

Les expériences autour de l'énergie solaire s'enchaînent. En 1774, Antoine Laurent de Lavoisier, chimiste, philosophe et économiste, invente un cuiseur solaire composé de lentilles convergentes afin de fondre des métaux [5].

En 1874, le premier distillateur solaire voit le jour à Las Salinas, sur le haut plateau d'Atacama au Chili, qui produit 23 tonnes d'eau douce par jour ensoleillé. Quelques décennies plus tard, le physicien anglais Charles Vernon Boys invente et met en œuvre le premier capteur cylindro-parabolique en 1912. Il crée ainsi la première centrale électrique solaire à Meadi en Égypte, utilisée pour le pompage de l'eau d'irrigation.

Il faudra ensuite attendre la fin de la seconde guerre mondiale pour retrouver de nouvelles avancées dans le domaine du solaire thermique. Le français Félix Trombe a l'idée d'utiliser un projecteur DCA abandonné par les allemands à Meudon (Hauts-de-Seine). En 1946, il le transforme en four solaire et grâce à ses recherches encourageantes, il construit en 1949 un nouveau four solaire à Mont-Louis (Pyrénées-Orientales) d'une puissance de 50kW.

En 1963, l'italien Giovanni Francia et le français Marcel Perrot installent le premier système CLFR (Compact Linear Fresnel Reflector) à Marseille, près de 450 ans après son invention par Léonard de Vinci.

Pendant ce temps là, le four de Mont-Louis connaît de bons résultats. Ainsi le gouvernement français construit un four solaire de taille quasi industrielle à Odeillo. Mis en service en 1970, le four solaire d'Odeillo a une puissance de 1MW [6].

En 1983, EDF et le CNRS construisent Thémis, la première centrale française électro solaire à tour d'une puissance de 2500 kW. Cependant la politique du tout nucléaire aura raison d'elle, puisqu'elle fermera ses portes 3 années plus tard.

La compagnie américano-israélienne Luz International commence en 1985 à construire des centrales utilisant le concept cylindro-parabolique dans le désert californien. Les 9 centrales privées totalisent en 1991 une puissance installée de 354 MW [7].

Andasol, la plus puissante centrale solaire cylindro-parabolique thermodynamique d'Europe, est inaugurée près de Guadix en Andalousie (Espagne) en 2008. Elle a une capacité de 50 MWe. La centrale PS20, tour solaire d'une capacité de 20 MWe, est lancée en 2009.

Des systèmes à concentration solaire “dishes” construits au XIX^{ème} siècle par Augustin Mouchot et Abel Pifre (par exemple destiné à la production de glace en 1878). Ils construisirent ensuite une unité de dessalement d'eau en Algérie [8].

D'autres systèmes similaires construits vers 1884 par l'ingénieur américain John Ericsson, utilisant des concentrateurs cylindro-paraboliques.

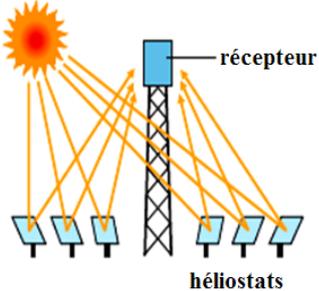
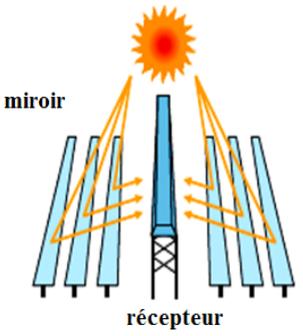
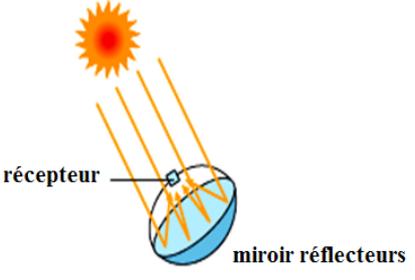
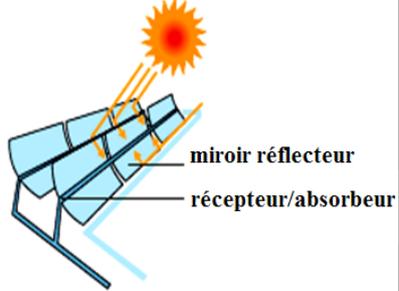
En 1907 à Philadelphie, Shuman dévoile un système solaire thermodynamique non concentré permettant de pomper de l'eau. En 1913, il construit pour un village situé sur le Nil, en Égypte, une unité d'irrigation (produisant plus de 1300 m³/h !) Utilisant des collecteurs cylindro- paraboliques : les collecteurs produisent de la vapeur pour un moteur [8].

3.2. Etat actuel de la technologie

Les centrales solaires thermodynamiques utilisent une grande quantité de miroirs qui font converger les rayons solaires vers un fluide caloporteur chauffé à haute température.

Il existe différents types de centrales solaires mais toutes sont basées sur le même principe, les quatre principales technologies de collecte et de concentration du flux solaire sont décrites dans le tableau I.1.

Tableau (I.1) : Les quatre principales technologies de collecte et de concentration du flux solaire

	Concentration ponctuelle	Concentration linéaire
Fixes	<p>Centrales à tour</p> 	<p>Collecteurs Fresnel linéaires</p> 
Mobiles	<p>Collecteurs paraboliques</p> 	<p>Collecteurs cylindro-paraboliques</p> 

Ce liquide chauffe à son tour l'eau d'une chaudière à vapeur, l'air d'une turbine à gaz simple ou d'un cycle combiné ou aussi le gaz d'un moteur Stirling. Ces éléments peuvent être associés à un alternateur pour produire de l'électricité. La vapeur d'eau est alors condensée (retourne à l'état liquide) grâce à une tour de refroidissement. [9]

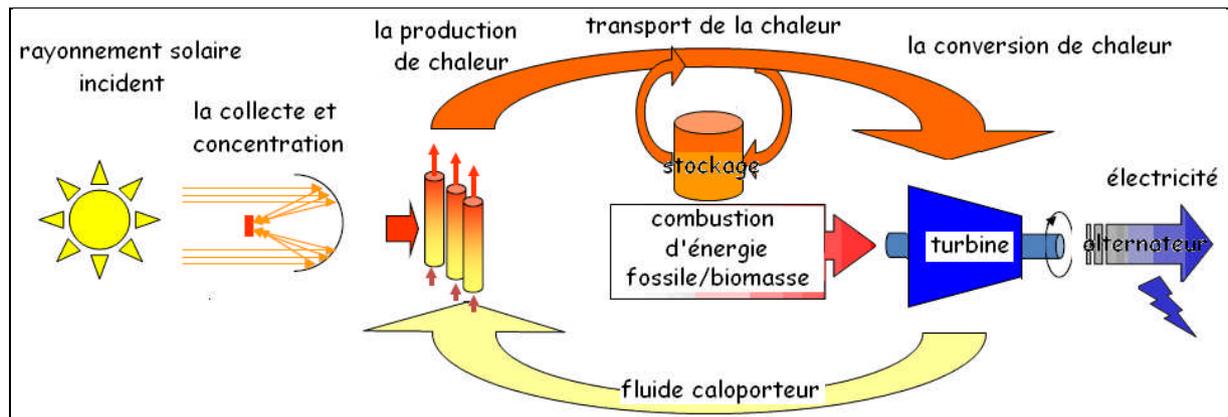


Figure (I.11) : Schéma de principe d'une centrale solaire

La figure donne le schéma de principe d'une centrale solaire associée à une turbine à vapeur. Plusieurs installations sont opérationnelles à travers le monde, nous citons :

3.2.1. Les centrales à tour

- La centrale, fonctionne avec 3 tours solaires thermiques, Ivanpah d'une puissance de 337MW est mise en service en février 2014 en Californie, les États-Unis [10].

- La centrale, ayant 15 h de stockage de chaleur, opère avec tour solaire thermique et héliostats, Gemasolar avec une puissance de 19,9MW et mise en service en mai 2011 en Séville, l'Espagne [11].

- La centrale PS20, produisant avec une tour solaire thermique et héliostats, une puissance de 20MW est mise en service en avril 2009 en Séville, l'Espagne [12].

3.2.2. Les centrales à miroirs paraboliques

- Comme exemple, nous avons la centrale Tessera, qui est la première installation industrielle à miroir parabolique et moteur Stirling, à puissance 1.5MW par parabole, en Peoria, les États-Unis [13].

3.2.3. Les centrales à miroirs cylindro-paraboliques

- Cette technologie est appliquée dans la centrale Solana À l'est de Gila Bend, désert de Mojave en Arizona en États-Unis de puissance de 280MW opérationnelle depuis octobre 2013 avec 6 h de stockage de chaleur [14].

- Nous citons aussi la centrale SEGS dans les États-Unis, désert de Mojave en Californie ayant une puissance de 354MPW fonctionnant avec 9 unités [15].

- Les centrales de Solaben 1, 2, 3, 6 à Logrosán dans la Province de Cáceres en Espagne opérationnelles depuis 2012-2013 produisent une puissance de 200MW [16].

3.2.4. Les centrales à miroirs de Fresnel

- Les applications de cette technologie sont multiples, en états-unis, Bakersfield, la centrale Kimberlina produit 5MW depuis 2008.

- En inde, Dhursar, Jaisalmer, Rajasthan, est installée la centrale Rajasthan Sun Technique depuis 2014, produisant 100MW.

3.3. Recherches et projets

Les professionnels du programme SolarPaces de l'aie et de Greenpeace international, estiment avec optimisme que les installations d'énergie solaire thermodynamique pourraient atteindre une capacité installée de près de 37 GW en 2025 (soit 95,8 twh) et même 600 à 800 GW en 2040.

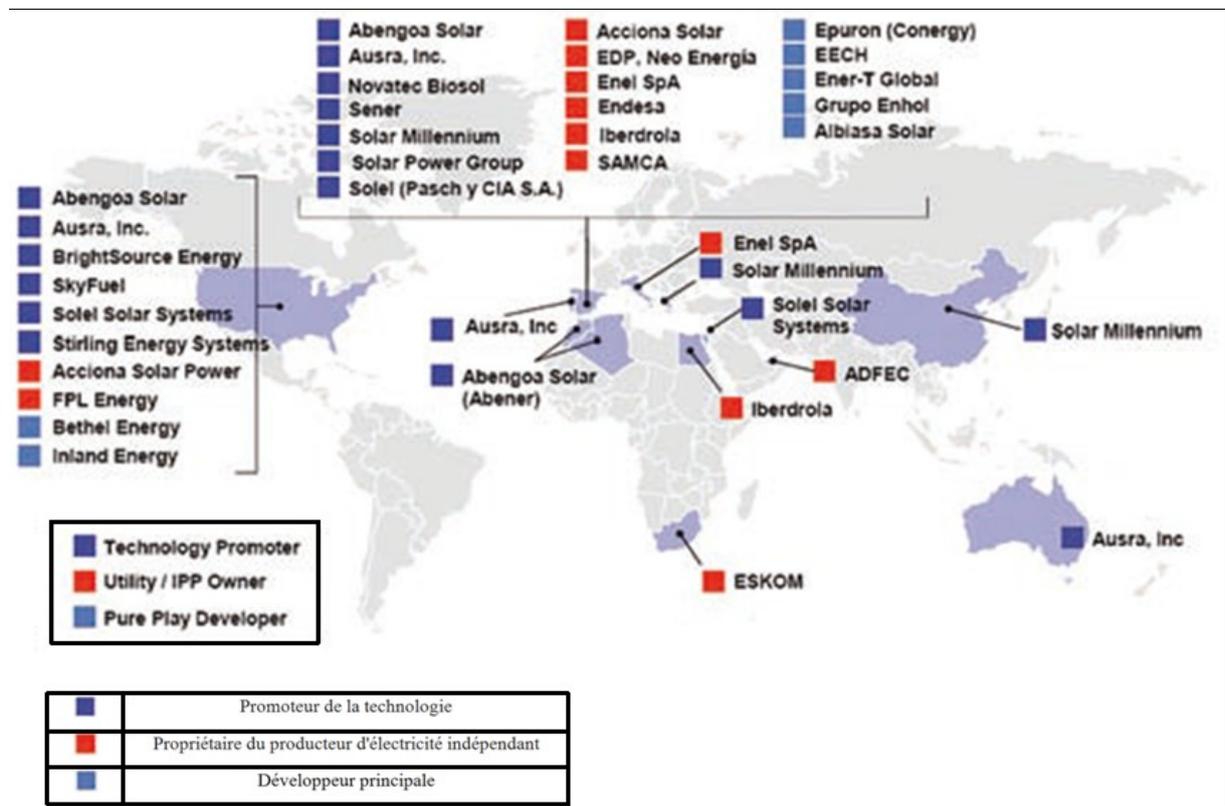


Figure (I.12): Les zones favorables pour l'exploitation du potentiel solaire

Les centrales à miroirs cylindro-paraboliques sont aujourd'hui les technologies les plus anciennes et matures du secteur, constituant 95% des capacités thermodynamiques installées. Les tours solaires et les centrales à miroirs de Fresnel sont actuellement en phase d'expérimentation préindustrielle. Les tours solaires représentent déjà 1/3 des projets annoncés.

3.3.1. En Espagne

L'Espagne tout en étant le leader des applications des technologies solaire de concentration envisage l'installation de la centrale Andasol, d'une puissance de 50MW avec 7,5 h de stockage de chaleur, en 2020 à Guadix dans la province de Grenade.

On cite aussi une autre centrale parabole, Puertollano 5-6-7 d'une puissance de 32,4MW à Puertollano dans la province de Ciudad Real, dont la date de réalisation reste indéterminée.

Le projet ARCHETYPE SW 550 et ARCHETYPE 30+ est en voie de réalisation à Passo Martino(CT), Sicile, exploitant des Miroirs cylindro-parabolique avec stockage de chaleur, intégré avec biomasse et désalinisation en cogénération, pour produire une puissance nominale de 30MW.

3.3.2. Aux États-Unis

Les États-Unis envisage l'installation de plusieurs centrales solaires thermoélectriques fonctionnant avec les technologies les plus répondues, nous citons par exemples :

- Le projet PalenSolar Power, ayant une puissance de 500MW à tour solaire, localisé à la Comté de Riverside, Californie [15].

- Le projet Hualapai Valley, produisant une puissance de 340MW utilisant les miroirs cylindro-paraboliques, localisé à Mojave Country, Arizona [16].

- Ainsi que le projet Enviromission-Australia à tour cheminée solaire de puissance de 200MW à Arizona [17].

3.3.3. Dans le reste du monde

La technologie du solaire thermodynamique est de plus en plus répandue dans tout le monde, et les projets suivants le montrent :

La Chine a un projet de 200MW à réaliser à Mongolie-Intérieure, dans les délais les plus brefs possibles fonctionnant à tour solaire [17].

Dans le cadre du programme solaire marocain et comme première réalisation à Ouarzazate, le Maroc vise la production de 1840MW en utilisant les miroirs cylindro-paraboliques et la tour solaire [18].

Centrale Pedro de Valdivia est en projet à Maria Elena, province d'Antofagasta, Chili, ayant un investissement de 5900M\$ pour une puissance de 360MW [19].

Iran compte exploiter la technologie du parabole avec système de poursuite pour la centrale de Mashhad et produire une puissance de 72MW [20].

En Afrique du Sud, Groblershoop, il est prévu l'installation de la centrale Bokpoort à miroir cylindro-parabolique produisant 50MW Avec 9 h de stockage de chaleur [21].

3.4. Aspect économique**3.4.1. Perspectives et marché**

Selon les scénarios prospectifs établis sous l'égide de l'Agence internationale de l'énergie (AIE), le solaire thermodynamique à concentration est appelé à jouer un rôle significatif dans la production électrique mondiale à l'horizon 2050 : dans son rapport de 2014, l'AIE prévoit que le solaire thermodynamique à concentration (toutes filières confondues) représentera 11 % de la production d'électricité en 2050, soit 4 350 tWh avec une capacité installée de près de 1 000 GW, dont 229 GW aux États-Unis, 204 GW au Moyen-Orient, 186 GW en Inde, 147 GW en Afrique et 118 GW en Chine ; 53 GW seraient exportés de l'Afrique du Nord vers l'Europe.

La baisse des coûts moyens de production de 168 \$/MWh en 2015 à 71 \$/MWh pour des centrales avec stockage les rendrait compétitives dans les pays les plus ensoleillés, en pointe et demi-pointe, vers 2020 et en base vers 2030 ; ces centrales pourraient également produire de la chaleur pour les processus industriels et le dessalement d'eau de mer et de l'hydrogène pour remplacer le gaz naturel (3 % des besoins d'énergie en 2050)

Dans les scénarios les plus optimistes, tels que ceux établis dans le cadre du programme, AIE Solarpaces (en), la European Solar Thermal Electricity Association et Greenpeace anticipent une capacité installée de 1 500 GW au niveau mondial. Ces perspectives supposent le développement rapide d'une filière industrielle solaire thermodynamique à concentration, sachant qu'en 2014, le parc de centrales en service comporte une quarantaine de sites au niveau mondial [22].

3.4.2. Coûts de production

Une étude de l'IRENA (Agence internationale de l'énergie renouvelable) publiée en 2013 évalue les coûts de production actualisés de l'électricité (LCOE) renouvelable en 2012 ; pour le solaire thermodynamique, elle fournit les coûts suivants :

- Technologies cylindro-parabolique et Fresnel, sans système de stockage : 0,19 à 0,38 \$/kWh (hypothèses : coût d'investissement : 3400 à 4 600 \$/kW ; facteur de charge : 20 à 27 %) le bas de la fourchette correspond à des projets très compétitifs (hors OCDE) dans des pays bénéficiant d'un ensoleillement exceptionnel ;
- Avec un système de stockage de six heures : 0,17 à 0,37 \$/kWh ;
- Centrales à tour (technologie moins mature selon l'étude) : 0,20 à 0,29 \$/kWh avec système de stockage de six heures à sept heures 30, et 0,17 à 0,24 \$/kWh avec stockage de 12-15 h.

Le coût est fortement corrélé à l'ensoleillement : partant d'une base à 2 100 kWh/m²/an (ensoleillement DNI typique pour l'Espagne), le coût LCOE diminue de 4,5 % pour chaque tranche de 100 kWh/m²/an en plus. Ces coûts de 2012 devraient continuer à baisser en fonction des progrès technologiques et des économies d'échelle.

Le coût minimum de 0,17 \$/kWh, soit 170 \$/MWh, équivaut à 126 €/MWh ; en comparaison, une étude du Fraunhofer Institute parue en novembre 2013 évalue le LCOE des centrales photovoltaïques du sud de l'Allemagne (indice solaire de 1 200 kWh/m²/an) entre 79 et 98 €/mwh, et un contrat récemment signé au Texas faisait ressortir un coût de 54 €/mwh⁵ ; le coût du solaire thermodynamique reste donc largement supérieur à celui du photovoltaïque, mais avec l'avantage du stockage qui lui confère une valeur nettement plus élevée. [23]

4. Conclusion

Les intérêts d'une mobilisation de plus en plus importante des énergies renouvelables, et de l'énergie solaire de concentration en particulier, sont immenses et toucheront, certainement d'une façon différenciée, tous les pays et auront un impact bénéfique sur l'ensemble de la biosphère. Pour les uns, il y aura les possibilités d'investissements, d'exportations de technologies et de savoir-faire, ainsi que la garantie de couverture durable des besoins en énergies par des vecteurs propres à des prix stables.

Mais ce développement nécessite une volonté de coopération globale ainsi que la mise en place des mesures adéquates avec la vitesse critique que nécessite l'état du développement et de la dégradation de l'environnement dans les différents pays. L'agence internationale pour les énergies renouvelables (IRENA) nouvellement créée est une étape importante dans cette direction.

Chapitre II

Présentation des éléments de la centrale thermique à concentrateur

Chapitre II : Présentation des éléments de la centrale thermique à concentrateur

1. Introduction

L'énergie solaire étant peu dense, il est nécessaire de la concentrer, via des miroirs réflecteurs, pour obtenir des températures exploitables.

1.1. Principe de fonctionnement

Le rayonnement peut être concentré sur un récepteur linéaire ou ponctuel. Le récepteur absorbe l'énergie réfléchie par le miroir et la transfère au fluide thermodynamique. Ce fluide étant à hautes température et pression fait tourner une turbine pour l'obtention de l'énergie mécanique, qui sera à la suite utilisée pour des besoins industriels.

Nous voyons alors que pour la conversion de l'énergie solaire à une énergie mécanique facilement exploitable, nous passons par deux étapes :

La conversion thermo-solaire ;

La conversion thermodynamique.

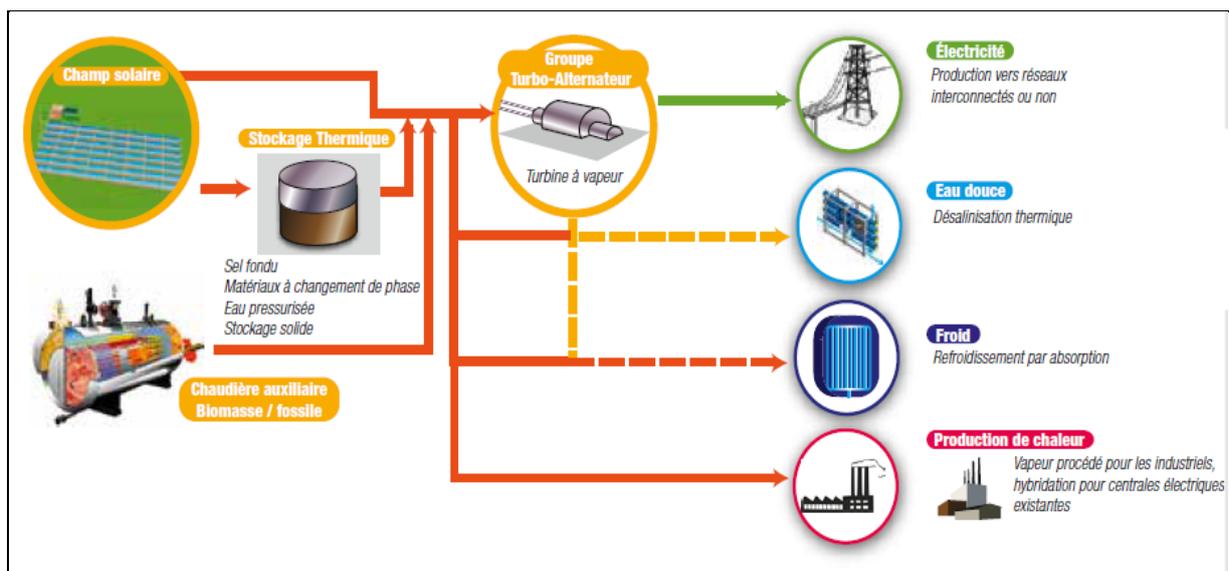


Figure (II.1) : Schéma de principe d'une centrale solaire à concentration

Le cycle solaire quotidien est connu et sa durée est limitée, d'où le besoin de stocker l'énergie obtenue pour l'utiliser lors de l'absence de la source énergétique ; dans le but d'augmenter les performances des centrales thermo-solaires, une chaudière d'appoint est souvent utilisée pour élever la température du fluide thermodynamique.

2. La conversion thermo-solaire

Les centrales solaires thermodynamiques utilisent une grande quantité de miroirs qui font converger les rayons solaires vers un fluide caloporteur chauffé à haute température. Pour ce faire, les miroirs réfléchissants doivent suivre le mouvement du soleil afin de capter et de concentrer les rayonnements tout au long du cycle solaire quotidien [24].

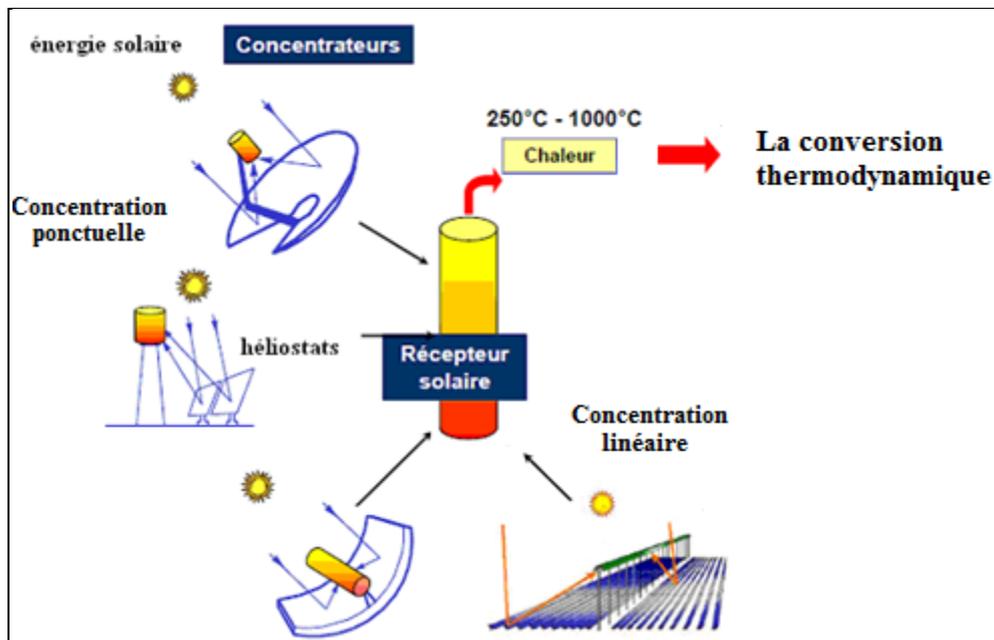


Figure (II.2) : Schéma global de la conversion thermo-solaire

Comme le montre la figure(II.2), on distingue deux arrangements pour concentrer les rayons solaires, concentration ponctuelle et concentration linéaire.

Chaque technologie diffère des autres du point de vue performances, la figure suivante illustre leurs limites d'utilisation.

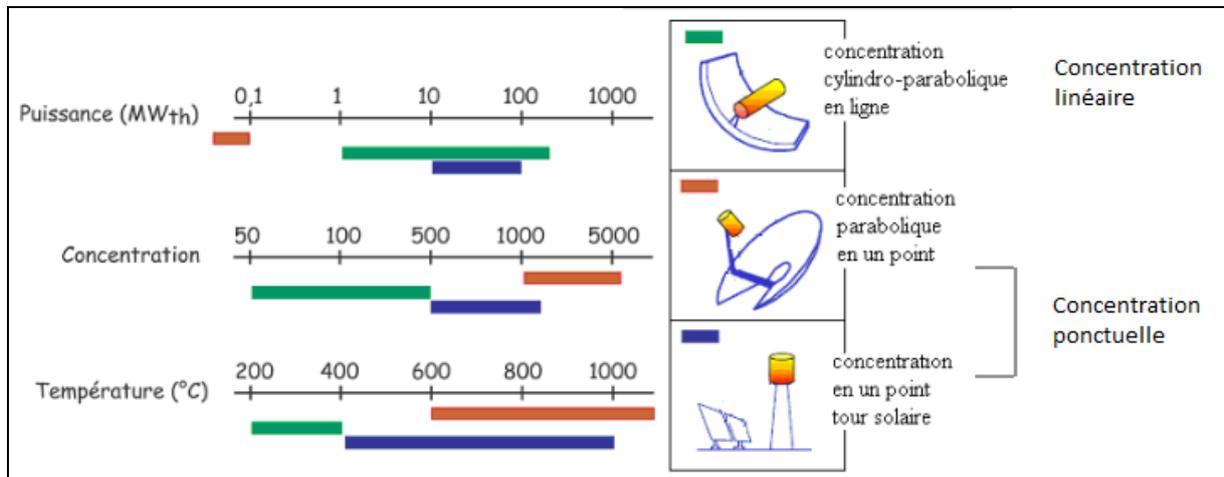


Figure (II.3) : Comparaison des technologies solaires à concentration

2.1. Concentration linéaire :

Le rayonnement solaire est concentré sur un ou plusieurs tube(s) absorbeur(s) installé(s) le long de la ligne focale des miroirs. Ces tubes contiennent un fluide caloporteur porté à une température de l'ordre de 200 à 400°C [25].

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

2.1.1. Centrales à miroirs cylindro-paraboliques:

C'est la technologie la plus répandue aujourd'hui. Le foyer d'une parabole est un point, celui d'un miroir cylindro-parabolique est un axe, sur lequel est placé un tube absorbeur (le récepteur) de couleur noire, pour capter un maximum de rayonnement. Dans ce tube circule le fluide caloporteur, qui se réchauffe jusqu'à une température d'environ 500°C et qui est ensuite centralisé et transporté jusqu'au bloc de génération électrique. L'ensemble miroir cylindro-parabolique/récepteur suit le mouvement du soleil [24].

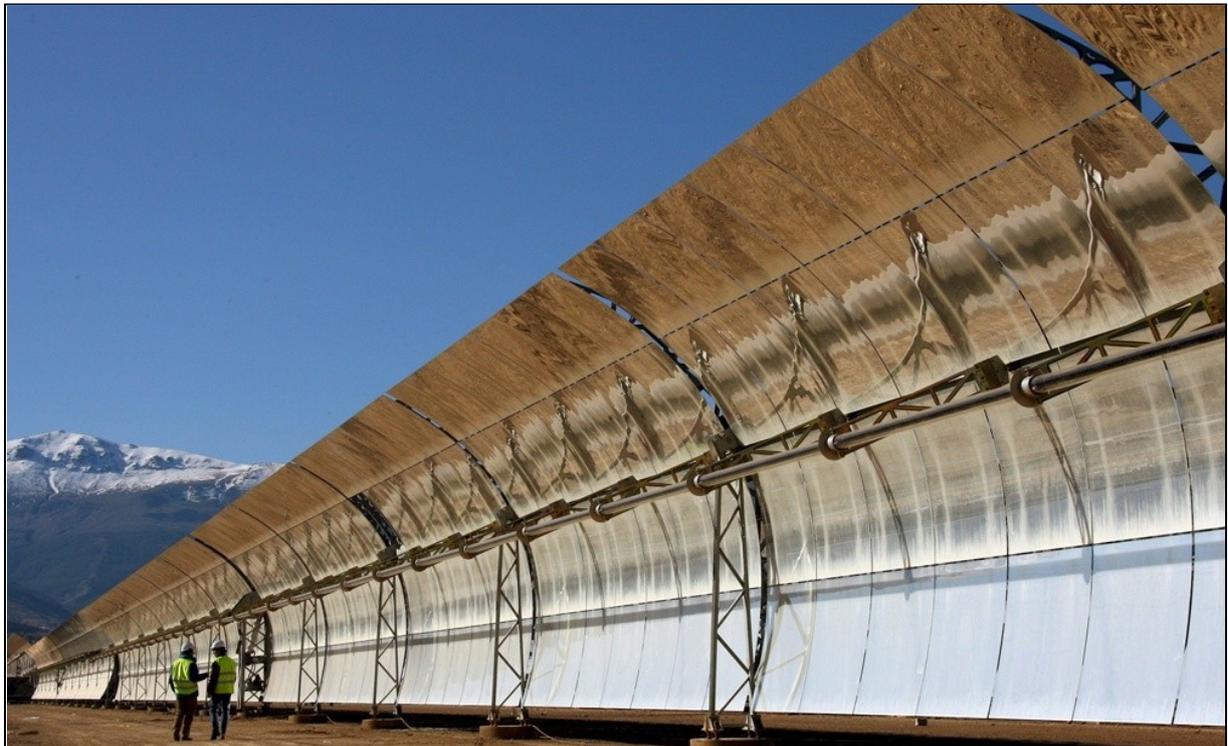


Figure (II.4) : Installation à Miroirs cylindro-paraboliques d'Andasol, Espagne [24]

Cette technologie est appliquée dans la centrale Solana à l'est de Gila Bend, désert de Mojave en Arizona aux États-Unis de puissance de 280MW opérationnelle depuis octobre 2013 avec 6 h de stockage de chaleur.

2.1.2. Centrales solaires à miroirs de Fresnel:

Plutôt que de courber les miroirs (processus industriel coûteux), les miroirs de Fresnel « miment » la forme cylindro-parabolique avec des miroirs très légèrement incurvés, et placés à un même niveau horizontal. Seuls les miroirs bougent, la structure et le tube absorbant sont tous deux stationnaires. Les coûts des centrales solaires à miroirs de Fresnel sont donc inférieurs à ceux des centrales à miroirs cylindro-paraboliques tant à l'installation qu'à la maintenance.



Figure (II.5) : Centrale solaires à miroirs de Fresnel, Fresdemo, Espagne [24]

La focalisation est toutefois dégradée dans ce système (puisque la parabole n'est pas parfaite) : le pari est donc que la baisse de coût « compense » la dégradation de l'efficacité d'un point de vue économique. Ce type de système est encore relativement peu répandu [24].

2.1.3. Eléments de l'installation

L'installation à concentration linéaire nécessite un certain équipement pour la conversion thermo-solaire.

a. Collecteur

Le collecteur (le capteur) est le composant de base du champ solaire. Il est composé d'un réflecteur parabolique (miroir) ou d'un ensemble de longs miroirs plans, d'une structure métallique, d'un tube récepteur et du système de poursuite solaire [24].

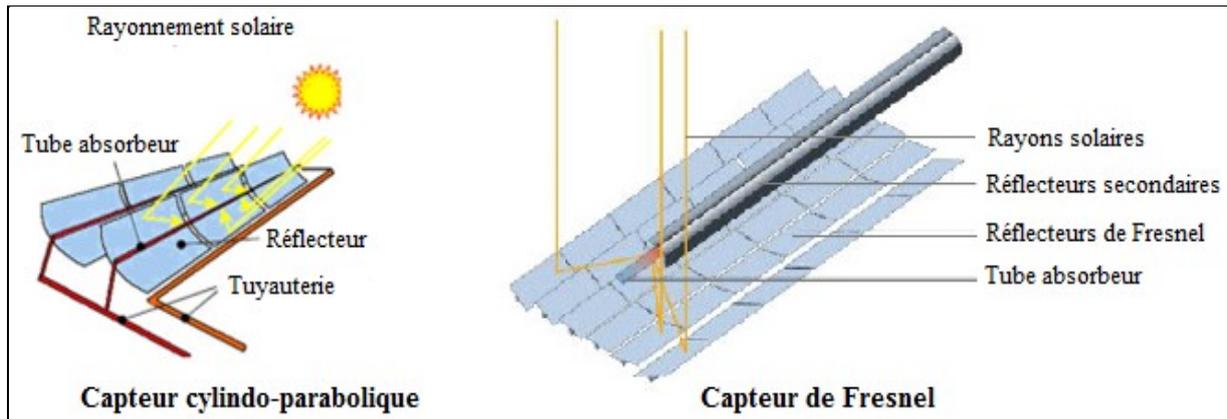


Figure (II.6) : Schéma d'un capteur de concentration linéaire

- *Les miroirs réflecteurs* sont composés de verre pauvre en fer, dont la transmissivité atteint 98%. Ce verre est recouvert d'une pellicule d'argent en sa partie inférieure, et d'un enduit spécial de protection. Un réflecteur de bonne qualité peut réfléchir 97% du rayonnement incident. Le facteur de concentration pour un capteur cylindro-parabolique est approximativement 80.
- *Le mécanisme de poursuite (le tracking)* a pour rôle d'adapter l'inclinaison du capteur de manière à ce que la radiation solaire incidente soit toujours perpendiculaire au réflecteur. De cette manière, la radiation est réfléchi au foyer de la parabole et concentrée sur un tube récepteur dans lequel circule le fluide caloporteur.
- *La structure métallique* doit être suffisamment solide pour résister aux importantes contraintes mécaniques liées aux conditions environnementales. Elle doit de plus être munie d'extrémités assurant la compatibilité entre les dilatations thermiques inégales de l'acier et du verre.
- *Le tube collecteur* doit avoir les caractéristiques suivantes :
 - Bonne absorption du rayonnement : son coefficient d'absorption doit être aussi élevé que possible afin d'éviter toute réflexion du rayonnement incident.
 - Pertes thermiques limitées : La température du tube dépassant généralement 400°C, les pertes par échanges convectifs et radiatifs sont très importantes. Afin de les limiter, le tube est entouré d'une enveloppe de verre sous vide [24].

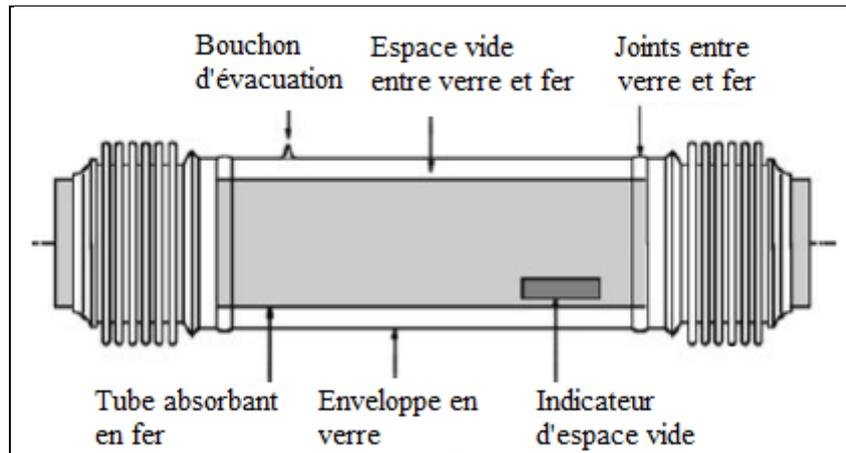


Figure (II.7) : Schéma de principe d'un tube collecteur [24]

b. Champ solaire

Le champ solaire est un regroupement de capteurs solaires ; ces collecteurs sont connectés en série pour former de longues files qui à leur tour sont connectées en parallèle. La taille du champ solaire dépend de la puissance désirée et de la température du fluide caloporteur en sortie.

Le champ solaire peut avoir plusieurs configurations en fonction de la manière dont il est alimenté en fluide caloporteur. Dans tous les cas, la tuyauterie de sortie est la plus courte possible pour minimiser les pertes à l'ambiance [24] .

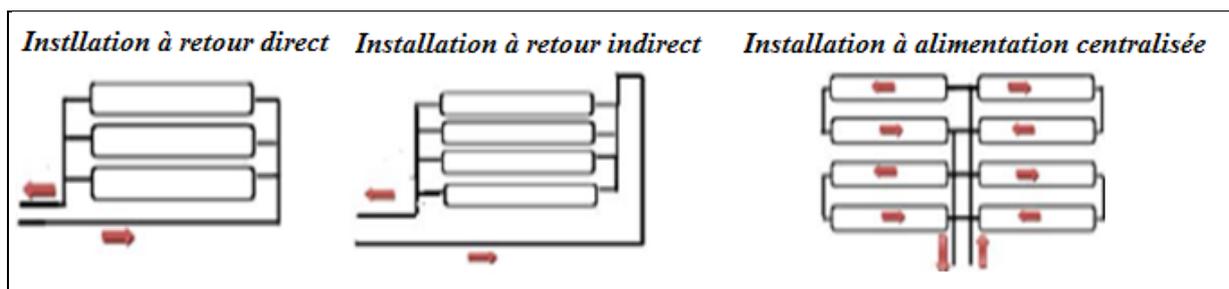


Figure (II.8): Différentes configurations de champs solaires [24]

- Installation à retour direct

C'est la configuration la plus simple et celle qui est la plus utilisée. Son inconvénient principal est le déséquilibre entre les pressions à l'entrée et à la sortie de chaque rangée de collecteurs.

Chapitre II *Présentation des éléments de la centrale thermique à concentrateur*

En effet, la distance parcourue par le fluide passant dans la dernière rangée est plus courte que celle parcourue par le fluide de la première rangée. Les pertes de charge sont donc plus ou moins importantes et le débit n'est pas identique pour chaque rangée de collecteurs. Des vannes ajustant la perte de charge doivent alors être installées sur chaque rangée de collecteurs.

- *Installation à retour indirect*

Les pertes de charge sont équilibrées pour chaque rangée en effectuant une boucle à l'entrée du champ solaire. La longueur totale de tuyauterie est légèrement augmentée, ainsi que les pertes à l'ambiance.

- *Installation à alimentation centralisée*

Le but de ce type d'installation est de minimiser la longueur totale de tuyauterie. Comme pour l'installation à retour direct, des vannes d'ajustement de la perte de charge sont nécessaires sur chaque rangée de capteurs [24].

2.2. Concentration ponctuelle

Le rayonnement solaire est concentré environ 1 000 fois à destination d'un foyer unique de taille réduite. La température peut atteindre de 500 à 1 000°C.

On distingue deux technologies de concentration ponctuelle ; centrale à tour et héliostats et centrale à concentrateur parabolique [25].

2.2.1 Centrales à tour

Des centaines de miroirs (les héliostats), uniformément répartis, suivent la course du soleil individuellement, réfléchissent et concentrent le rayonnement solaire sur un récepteur central situé au sommet d'une tour, dans lequel circule le fluide caloporteur. Le facteur de concentration peut dépasser 1000, ce qui permet d'atteindre des températures importantes, de 600 °C à 1000 °C.

Par rapport à un système cylindro-parabolique, la tour solaire offre l'avantage de ne pas avoir à faire circuler de fluide dans l'ensemble du champ de miroirs : les pertes thermiques sont donc significativement réduites. Par ailleurs, le niveau de concentration de l'irradiation peut être bien supérieur [24].



Figure (II.9) : Champs solaire dans la centrale Solar One en Californie [24]

2.2.2. Centrales à miroir parabolique Dish-Stirling:

Le récepteur ayant la même forme que les paraboles de réception satellite, les capteurs paraboliques fonctionnent d'une manière autonome. La parabole concentre le rayonnement sur un foyer en son point focal afin d'actionner un moteur dit « Dish-Stirling ». Sa taille dépend évidemment de la puissance solaire requise



Figure (II.10) : Centrale à Paraboles solaires Dish-Stirling à Albuquerque, Australie [24]

Le concentrateur s'oriente automatiquement, il possède deux degrés de liberté afin de poursuivre efficacement le soleil. Ce tracking s'effectue de façon tout à fait autonome, contrairement aux capteurs cylindro-paraboliques. Le rapport de concentration de ce système est souvent supérieur à 2000 et le récepteur peut atteindre une température de 1000 °C.

Un de leurs principaux avantages est la modularité : ils peuvent en effet être installés dans des endroits isolés, non raccordés au réseau électrique [24].

3. Conversion thermodynamique

3.1. Fonctionnement général

La source chaude (énergie solaire) chauffe (directement ou indirectement) le fluide caloporteur qui passe de l'état liquide à l'état vapeur, la vapeur ainsi produite est admise dans une turbine à vapeur où sa détente provoque la rotation des roues de cette dernière, accouplée à un alternateur, l'énergie mécanique est transformée en énergie électrique.

A la sortie de la turbine, la vapeur est condensée dans un condenseur ; l'énergie de condensation peut être utilisée pour des besoins divers ; alimenté par une source froide (eau de mer, eau de rivière...), elle se retrouve à l'état liquide et ce condensat est renvoyé dans le système d'alimentation en fluide caloporteur pour un nouveau cycle de vaporisation.

La cogénération consiste à produire conjointement de l'électricité et de la chaleur destinée à un procédé industriel ou au chauffage urbain, afin d'améliorer le rendement global [26].

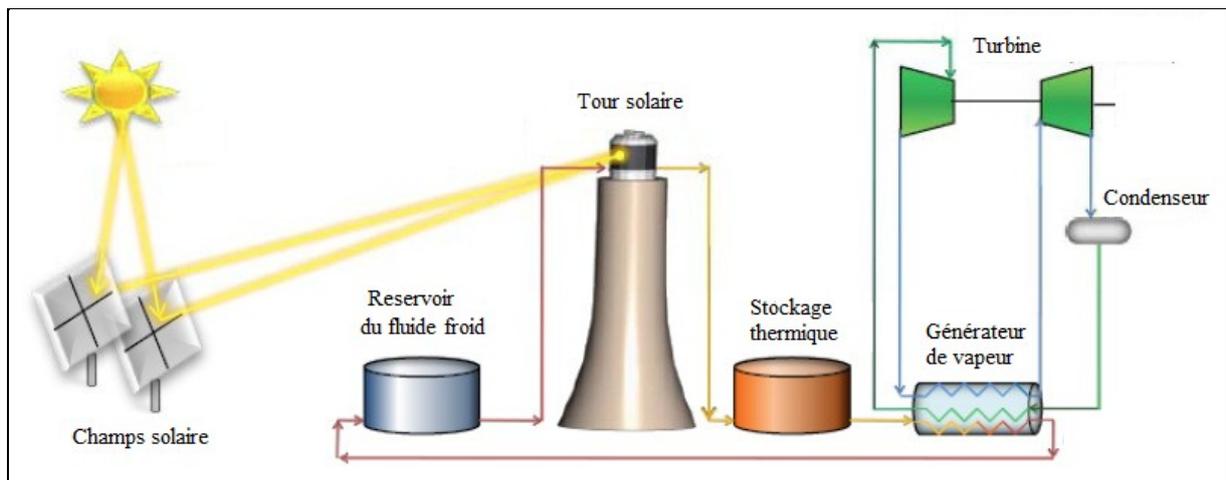


Figure (II.11) : Principe de fonctionnement d'une centrale thermique solaire à concentration [26]

3.2. Les composants de l'installation

Avant d'étudier la construction des cycles thermodynamiques à vapeur, nous révisons brièvement le mode de fonctionnement des composants les plus courants des centrales.

3.2.1. La chaudière

Au début de l'ère industrielle, le mot chaudière désignait un foyer et son échangeur dans de grosses installations de cuisine et de chauffage.

Dans son acception moderne, il désigne un appareil (voire une installation industrielle, selon sa puissance) permettant de transférer en continu de l'énergie thermique à un fluide caloporteur (généralement de l'eau).

L'énergie thermique transférée (source de chaleur) peut être soit la chaleur dégagée par la combustion (de charbon, de fioul, de gaz, de bois, de déchets, etc.), soit la chaleur contenue dans un autre fluide (chaudière de récupération sur gaz de combustion ou gaz de procédés

chimiques, chaudière « nucléaire » recevant la chaleur du circuit primaire, etc.), soit encore d'autres sources de chaleur (chaudières électriques, par exemple). Les chaudières sont aussi bien des systèmes industriels que domestiques.

À l'intérieur de la chaudière ce fluide caloporteur peut être soit uniquement chauffé (c'est-à-dire qu'il reste en phase liquide), soit chauffé et vaporisé, soit chauffé, vaporisé puis surchauffé (donc avec passage de phase liquide à phase gazeuse) [27].

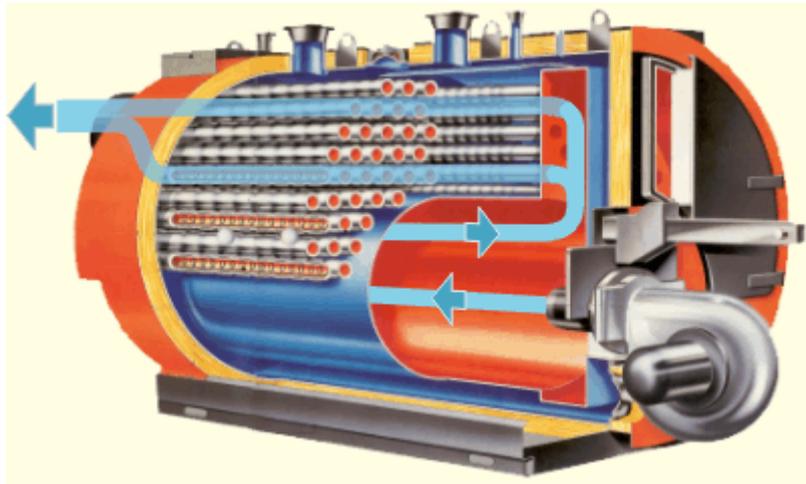


Figure (II.12) : Illustration d'une chaudière [27]

3.2.2. Turbine

La turbine est la pièce maîtresse de toute centrale à vapeur, c'est l'organe qui transforme l'énergie thermique en énergie mécanique.

Une turbine est constituée d'un rotor comprenant un arbre sur lequel sont fixées des aubes et d'un stator constitué d'un carter portant des déflecteurs fixes, généralement constitué de deux parties assemblées selon un plan axial. Elle comprend en outre un tore d'admission segmenté et un divergent d'échappement dirigé vers le condenseur.

Longue de plusieurs dizaines de mètres dans les installations modernes, elle est équilibrée avec grand soin, mise en place dans son coffrage et si elle fait l'objet d'attention adéquate, peut délivrer de la puissance mécanique pendant plusieurs dizaines d'années sans aucune interruption [28].

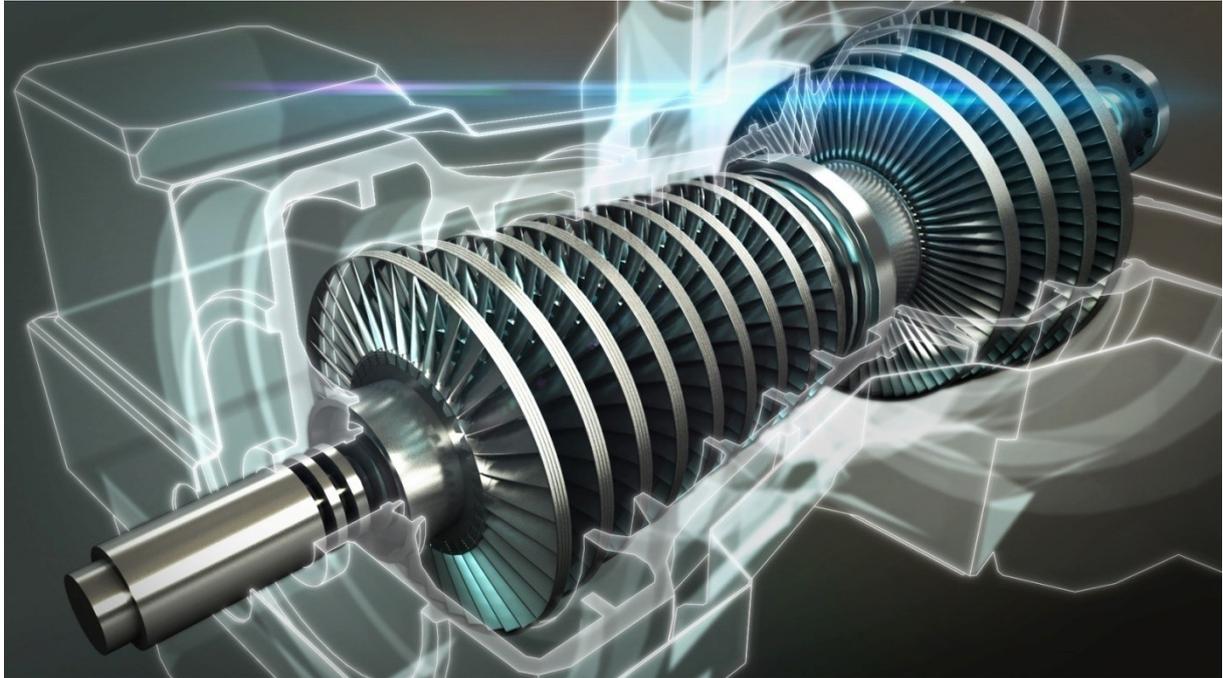


Figure (II.13) : Schéma d'une turbine axiale industrielle [28]

3.2.3. Condenseur

Le condenseur, composant le moins glorieux de l'installation, est en charge de rejeter toute la chaleur dont l'ingénieur ne sait plus faire usage. Le fluide y est toujours refroidi et condensé à pression constante, ce qui ne nécessite pas de pièce mobile.

Technologiquement, le condenseur est un élément simple : on met simplement la canalisation de vapeur en contact avec un circuit de température basse. Usuellement, ce circuit de refroidissement est constitué d'eau extérieure provenant d'une rivière ou de la mer [28].

Il en existe deux grandes familles :

- Condenseurs à fluides séparés, sans contact entre la vapeur et le fluide réfrigérant ;
- Condenseurs à contact direct entre le mélange de la vapeur à condenser et le fluide réfrigérant [29].

3.2.4. Pompe

Les pompes répondent toutes au même besoin : déplacer un liquide d'un point à un autre. Pour déplacer ce liquide, il faut lui communiquer de l'énergie. Les pompes accomplissent cette fonction.

Le moteur qui alimente les pompes transforme l'énergie thermique ou électrique en énergie mécanique pour permettre le mouvement des organes des pompes. Cette énergie mécanique est retransmise au fluide.

Cette énergie retransmise au fluide se traduit sous forme de débit (énergie cinétique) et de pression (énergie potentielle). Ces énergies vont s'échanger et se consommer dans les circuits de l'installation.

On peut classer les pompes de plusieurs façons ; les mouvements retransmis aux organes des pompes sont comme tous les mouvements mécaniques de deux grands types :

- rotatif ;
- rectiligne (alternatif) [30].

3.3. Cycles thermodynamiques

Le travail des centrales solaires thermoélectrique est de transformer l'énergie solaire en énergie électrique. Cette transformation se fait le plus souvent de manière tout à fait conventionnelle grâce à une turbine à vapeur d'eau couplée à un alternateur. Nous avons cependant signalé la voie originale du générateur Stirling, étudiée pour les petites unités autonomes, et fait allusion à l'utilisation possible d'un cycle combiné [31].

3.3.1. Cycle de RANKINE

Le cycle de RANKINE est le transformateur thermomécaniques le mieux connu parce qu'il est le plus anciennement mis en œuvre par l'industrie moderne. Dans ce cycle, la chaleur est transportée par, habituellement, l'huile synthétique depuis les collecteurs jusqu'à la chaudière, où l'eau est évaporée. La vapeur est ensuite détendue dans la turbine, condensée et comprimée puis renvoyée dans l'évaporateur. Il est utilisé aussi bien dans les centrales cylindro-paraboliques que dans les centrales à tour, (voir schéma du cycle Figure II.14).

L'utilisation d'un cycle de RANKINE nécessite des températures élevées ; sa température maximale de fonctionnement est de 565°C et son efficacité chute si la température de la vapeur à l'entrée de la turbine est inférieure à 300 °C. Le champ solaire doit donc obligatoirement être de taille importante si l'on veut optimiser le rendement du cycle.

Le refroidissement par eau des cycles de RANKINE est conseillé (en effet un refroidissement par air augmenterait le LEC d'environ 10%), ce qui pose la contrainte d'une source d'eau abondante et bon marché à proximité de la centrale [31].

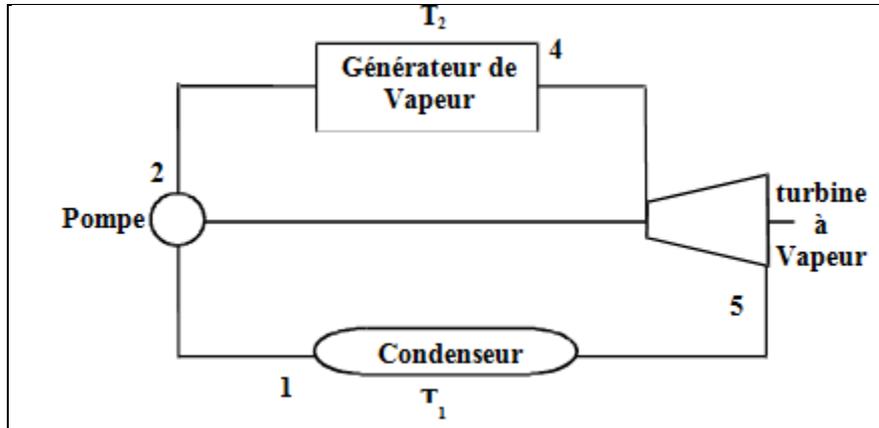


Figure (II.14) : Cycle de RANKINE [31]

3.3.2. Cycle de Brayton

Pour le cycle de Brayton conventionnel, on utilise une turbine à gaz à cycle ouvert dans laquelle de l'air est comprimé et brûlé avec un combustible dans une chambre à combustion. Les gaz de combustion chauds sont détendus dans une turbine couplée à un générateur électrique. Dans un cycle fermé, le fluide de travail est comprimé, chauffé et ensuite détendu dans une turbine. Les gaz sont ensuite refroidis, puis comprimés et recyclés. Ce cycle est utilisé dans les centrales à tour; il peut l'être aussi dans les centrales paraboliques [31].

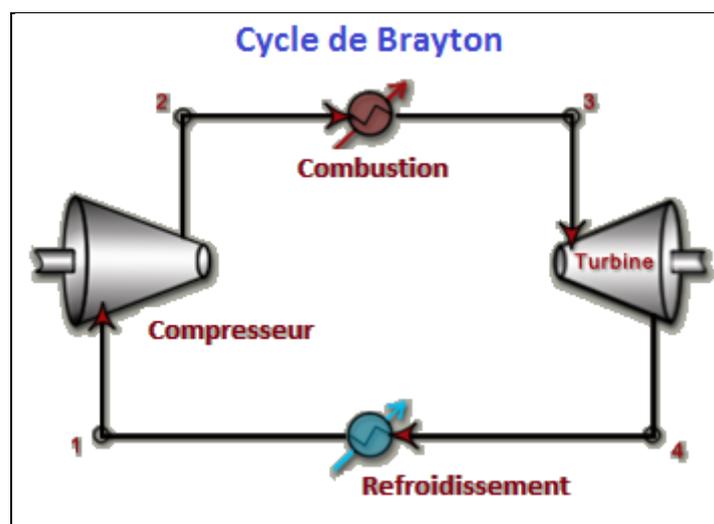


Figure (II.15) : Cycle de Brayton [31]

3.3.3. Cycle combiné

Le cycle combiné est constitué par une cascade des deux cycles suivants :

- Un cycle à gaz (cycle de Brayton) qui épuise les calories du caloporteur entre la température maximum, supposée élevée, et une température intermédiaire compatible avec les exigences du cycle suivant,
- Un cycle à vapeur apte à épuiser au mieux les calories restantes en même temps que de recycler les pertes du cycle de tête.

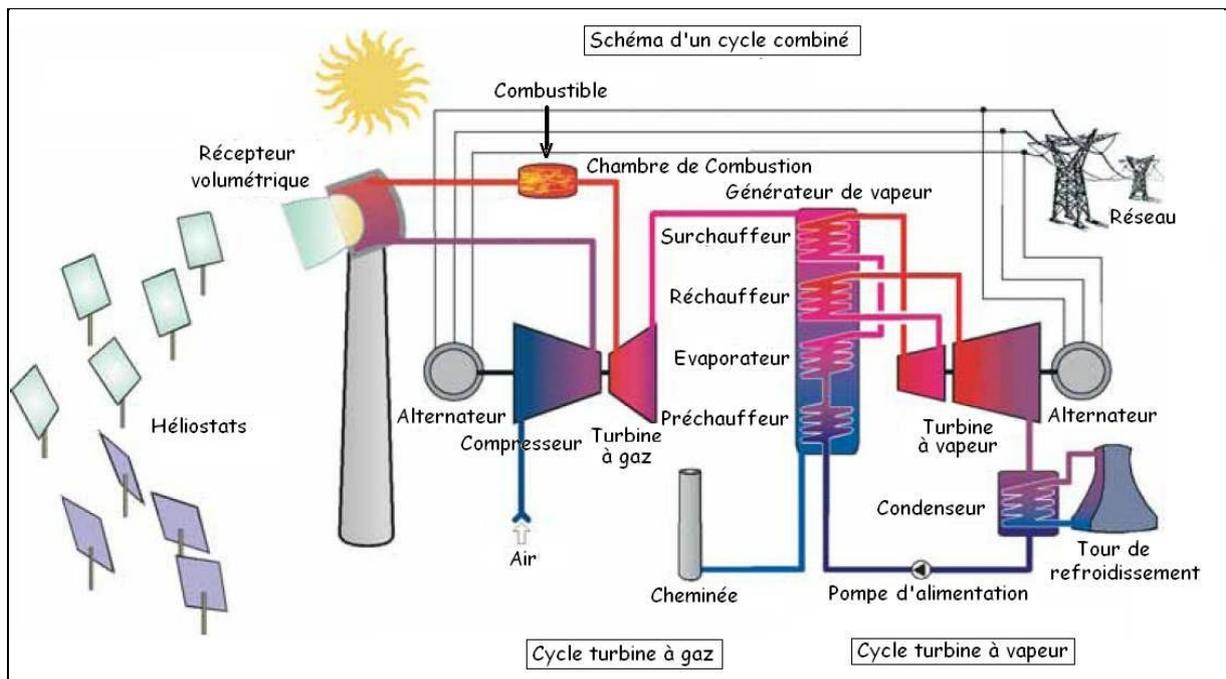


Figure (II.16) : Schéma d'un cycle combiné (centrale à tour) [31]

Un tel cycle est capable d'atteindre des rendements dépassant les 50% s'il dispose d'une source de chaleur à plus de 700°C. Le cycle combiné, à cause de son excellent rendement, est donc l'avenir de la filière « centrale à tour », mais on peut légitimement se demander si, comme dit l'humoriste, il n'est pas destiné à le rester !!! [31].

3.3.4. Cycle de HIRN

Dans le cycle à surchauffe, on amène la vapeur à une température supérieure à la température de l'équilibre liquide-vapeur. Ce cycle à vapeur surchauffée possède deux avantages essentiels par rapport au cycle de base de RANKINE:

- la surchauffe augmente la température d'utilisation de la chaleur ;

- la surchauffe permet d'effectuer un cycle sec (il n'y a pas de vapeur humide dans la machine motrice) si la surchauffe a été choisie de telle sorte qu'en fin de détente on se trouve sur la courbe de vapeur saturante à la température du condenseur [31].

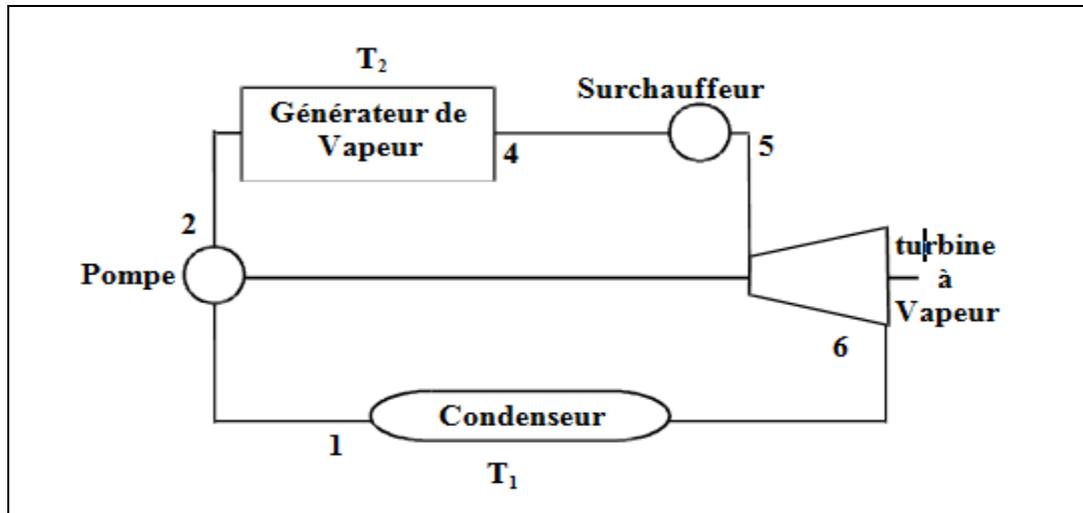
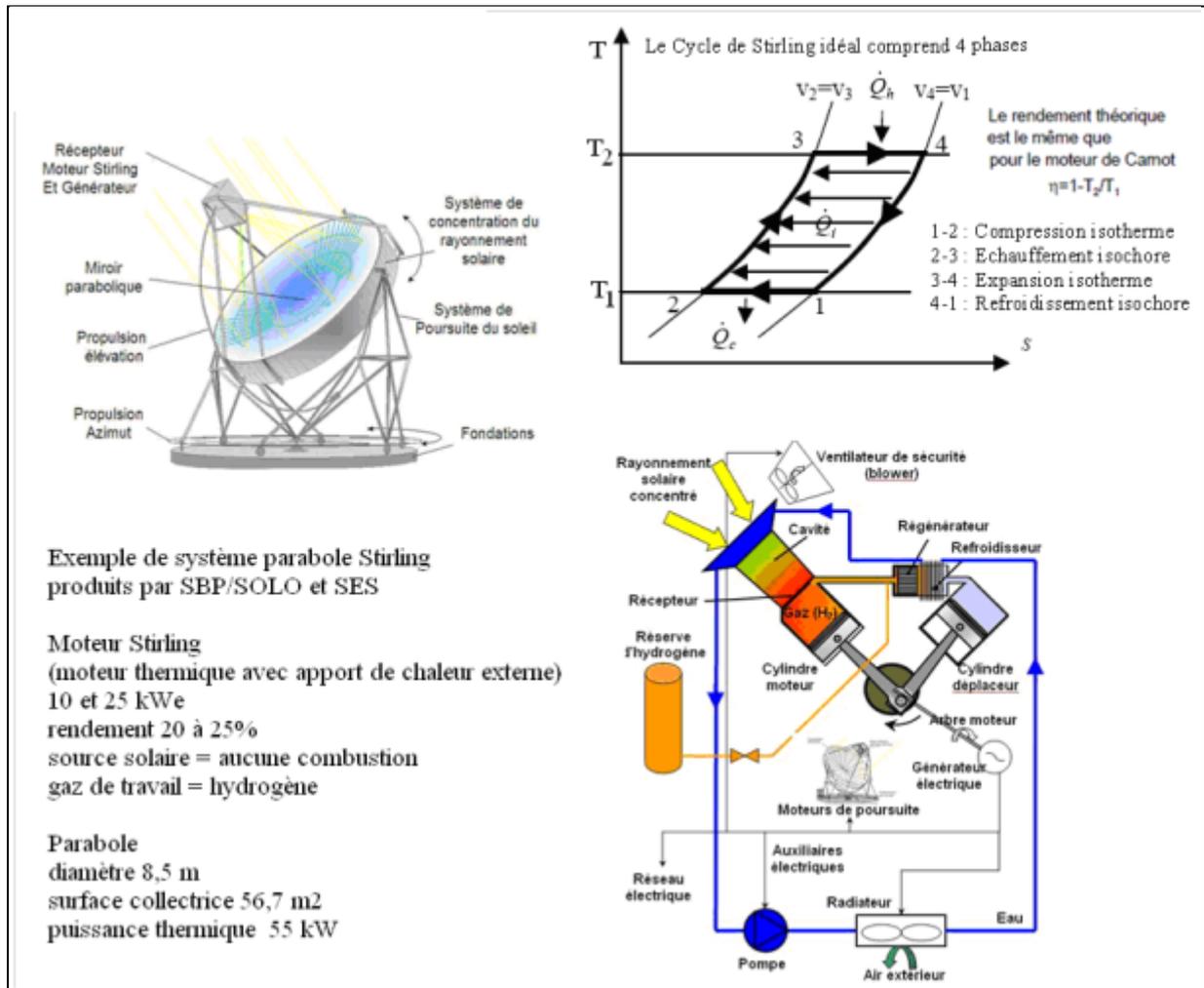


Figure (II.17) : Cycle de HIRN [31]

3.3.5. Cycle de Stirling

Ce transformateur thermomécanique est considéré depuis plus d'un siècle comme le meilleur des moteurs thermiques vu que son rendement théorique est élevé. C'est ainsi que la première tentative de construire une « parabole Stirling » date de 1887. Il s'agit d'un moteur à piston à chauffage externe, utilisant couramment l'hélium ou l'hydrogène comme fluide thermodynamique [31].



4. Transport et stockage de chaleur

L'énergie thermique est produite dans un site écarté d'où elle doit être convertie en énergie mécanique, cette dernière est transformée à son rôle en énergie électrique utile toute la journée, c'est-à-dire pas seulement pendant l'ensoleillement, d'ici le besoin de transporter et de stocker l'énergie thermique pour que la production soit constante toute la journée voir tous les mois de l'année [32].

4.1 Fluides caloporteurs

L'énergie thermique provenant du rayonnement solaire collecté est convertie grâce à un fluide caloporteur puis un fluide thermodynamique. Dans certains cas, le fluide caloporteur est utilisé directement comme fluide thermodynamique. Le choix du fluide caloporteur détermine la température maximale admissible, oriente le choix de la technologie et des matériaux du récepteur et conditionne la possibilité et la commodité du stockage.

Un bon fluide caloporteur doit prendre en compte les conditions suivantes:

- être chimiquement stable lorsqu'il atteint une forte température, en particulier lors de la stagnation du capteur;
- posséder des propriétés antigel en corrélation avec les conditions météorologiques locales;
- posséder des propriétés anticorrosives selon la nature des matériaux présents dans le circuit capteur;
- posséder une chaleur spécifique et une conductivité thermique élevées afin de transporter efficacement la chaleur;
- être non-toxique et avoir un faible impact sur l'environnement;
- avoir une basse viscosité afin de faciliter la tâche de la pompe de circulation;
- être facilement disponible et bon marché [32].

Citant les fluides caloporteurs les plus utilisés :

4.3.1. Eau

L'eau liquide est, à priori, un fluide de transfert idéal. Elle offre un excellent coefficient d'échange et possède une forte capacité thermique. En outre, elle peut être utilisée directement comme fluide thermodynamique dans un cycle de RANKINE. Cependant son utilisation implique de travailler à des pressions très élevées dans les récepteurs en raison des hautes températures atteintes, ce qui pose problème pour les technologies cylindro-paraboliques [32].

4.3.2. Huiles

Les huiles sont des fluides monophasiques qui présentent un bon coefficient d'échange. Leur gamme de température est limitée à environ 400 °C. C'est le fluide le plus couramment employé dans les centrales à collecteurs cylindro-paraboliques.

4.3.3. Sels fondus

Les sels fondus à base de nitrates de sodium et de potassium offrent un bon coefficient d'échange et possèdent une densité élevée. Ils sont donc également de très bons fluides de stockage. Leur température de sortie peut atteindre 650 °C. Leur association avec un concentrateur à tour et un cycle de RANKINE constitue une combinaison déjà éprouvée.

4.3.4. Gaz

Les gaz tels l'hydrogène ou l'hélium peuvent être utilisés comme fluides thermodynamiques et entraîner les moteurs Stirling qui sont associés aux collecteurs paraboliques.

L'air peut être utilisé comme fluide caloporteur ou comme fluide thermodynamique dans les turbines à gaz.

4.3.5. Fluides organiques

Les fluides organiques (butane, propane, etc.) possèdent une température d'évaporation relativement basse et sont utilisés comme fluide thermodynamique dans un cycle de RANKINE [32].

4.2. Stockage thermique

Le fonctionnement des systèmes solaires de production d'électricité est fortement contraint par les intermittences de la ressource. Pour y remédier, certaines centrales thermodynamiques utilisent le stockage thermique. Ce stockage ne permet que rarement de réduire les coûts mais augmente considérablement la valeur de l'électricité produite en perfectionnant la production de la centrale. Le stockage permet d'accroître la durée de fonctionnement (facteur de capacité) des centrales par rapport aux heures d'ensoleillement disponibles, qui passe typiquement de 20% sans stockage à 30-50% avec stockage. Il s'agit de stocker et de restituer l'énergie thermique à la puissance requise et à température élevée [32].

La capacité de stockage s'exprime souvent en heures de production à pleine charge en l'absence de rayonnement solaire.

4.2.1. Systèmes de stockage

On distingue les systèmes de stockage suivants :

a. Systèmes basés sur la chaleur sensible

Les systèmes basés sur la chaleur sensible dans un milieu liquide (huile ou sels), ou gazeux (vapeur) sont aujourd'hui assez bien maîtrisés. Pour ces technologies, le rendement est supérieur à 95% et le coût modéré (10 à 30 €/kWh). Cependant cette technique de stockage impose une variation en température du matériau utilisé entre la charge et la décharge du stockage, qui perturbe la stabilité en pression/température de la boucle vapeur. Par ailleurs le stockage de chaleur sensible dans une centrale à capteur cylindro-parabolique est problématique car la faible différence de température entre l'entrée et la sortie du champ (environ 100°C) impose des volumes de stockage (et donc des coûts) bien supérieurs à ceux des centrales à tour à capacité équivalente.

b. Systèmes basés sur la chaleur latente

Le stockage de chaleur latente présente deux intérêts majeurs : les phases de stockage et de restitution se font à température constante imposée par le matériau utilisé, et les capacités volumiques de stockage sont plus importantes que dans le cas de la chaleur sensible.

Si le changement de phase liquide-vapeur présente les plus fortes capacités, le volume excessif de vapeur produite favorise le changement d'état liquide-solide. Néanmoins cette approche est encore au stade expérimental et nécessite encore des travaux complémentaires.

c. Systèmes basés sur le stockage par cycle thermochimique

Ce stockage met en œuvre le stockage de l'énergie dans la chaleur de réaction de procédés chimiques réversibles. Sa faisabilité a été démontrée dans le cadre du projet européen SOLZINC (2001-2005) concernant la carbo-réduction solaire du ZnO pour la production d'hydrogène.

4.2.2. Classification

Suivant la capacité voulue et la technologie de la centrale, les différents types de stockages thermiques sont classés en :

a. Stockage découplé

Le stockage découplé, dans deux bacs, pour lequel le fluide caloporteur est aussi fluide de stockage (stockage direct), est une solution éprouvée pour les centrales à caloporteur sels fondus (THEMIS, SolarTwo). Il s'agit même du premier mode de stockage testé sur les centrales solaires. En effet, la nécessité d'avoir un fluide de transfert entre le système de concentration/conversion de la source solaire et le système de production d'électricité a rapidement conduit à la combinaison des fonctions de transfert et de stockage de ce même fluide. Il peut aussi être envisagé en stockage tampon (capacité très faible) pour les installations DSG sous la forme d'un accumulateur de vapeur.

b. Stockage en parallèle

Le stockage en parallèle peut être en by-passe. Constitué de deux bacs, c'est une solution classique pour les centrales à caloporteur huile (Andasol). Constitué d'un seul bac, il peut correspondre à un stockage de chaleur sensible (à stratification) ou latente (par Matériaux à Changement de Phase ou vapeur).

c. Stockage en série

Dans le stockage en série, la chaleur n'est stockée qu'à un seul niveau de température en sortie de récepteur, pour atténuer les variations de température du caloporteur dans l'échangeur de chaleur. Dans le cas de la DSG il faut prévoir un by-pass supplémentaire du GTA pour pouvoir le charger hors production, sous peine de faire passer de l'eau liquide en entrée de l'étage de détente.

d. Stockage intégré à l'échangeur

Le stockage intégré à l'échangeur pourrait être une option intéressante, même si la conception d'un tel composant paraît complexe et la capacité de stockage limitée [33].

5. Conclusion

La concentration du rayonnement solaire permet de produire la chaleur (températures élevées) nécessaire pour le fonctionnement des machines thermodynamiques classiques.

La technologie solaire thermodynamique permet de réduire la superficie de captage solaire pour une puissance donnée (jusqu'à 100 MW au km²) et d'améliorer le rendement des cycles thermodynamiques (selon les machines utilisées et les cycles mis en oeuvre).

Au final, ces derniers soient couplés à des alternateurs, le rendement de conversion solaire/électricité moyen net annuel se situe autour de 15%.

Mais la concentration a un besoin impératif du rayonnement "direct" du soleil ; les centrales commerciales doivent se trouver dans les zones fortement ensoleillées et souvent désertiques (ensoleillement direct allant au-delà de 2000 kWh/m²/an).

Les capteurs solaires doivent être munis d'un système de poursuite du soleil de sorte que les rayons solaires soient focalisés sur l'absorbeur de chaleur.

La chaleur produite par le solaire à concentration est ainsi fondée sur la disponibilité du rayonnement solaire ; le stockage thermique pendant les heures d'ensoleillement est nécessaire pour servir à générer la puissance en fonction d'une courbe de charge. Le stockage thermique est plus facile et économique (dans des sels fondus par exemple) que le stockage de l'électricité.

Chapitre III

Etude thermodynamique de la turbine à vapeur

Chapitre III : Etude thermodynamique de la turbine à vapeur.

1. Introduction

L'utilisation de l'énergie solaire par voie thermodynamique, dans le but de produire un travail utile, nécessite la maîtrise et le savoir-faire dans deux domaines, la captation et la concentration solaire, en compagnie de la conversion thermodynamique des différents aspects de l'énergie.

Pour concentrer les rayons solaires plusieurs technologies, décrites dans le chapitre précédant, sont disponibles, il nous reste de savoir choisir la mieux adaptée pour notre recherche.

En suite, il faut étudier les différents cycles thermodynamiques, pour en tirer le plus avantageux, permettant l'attente des hauts niveaux d'efficacité et de performance tout en fournissant les moindres coûts possibles avec la garantie d'une longue durée de vie de fonctionnement, ainsi qu'un service de maintenance facile et modéré.

2. Choix de la technologie solaire

2.1. Tour solaire

Le concept du récepteur solaire central est l'approche privilégiée pour atteindre des températures élevées dans les grandes installations adapté pour générer de l'énergie électrique ou la chaleur industrielle [35].

2.1.1. Héliostat

Le champ d'héliostats est contrôlé par un système informatique qui utilise le principe de "l'intelligence distribuée".

Le système de commande des héliostats est capable d'une multitude de fonctions différentes, comme par exemple:

- Le contrôle des héliostats par groupe, par ligne ou individuellement,
- Surveiller l'état de fonctionnement des héliostats,
- Détecter les erreurs de fonctionnement d'héliostats, c-à-dire les moteurs en panne [35].

Le rendement optique comprend l'effet cosinus, ombrage, le blocage, miroir réfléchissant, atténuation atmosphérique, et le déversement au niveau du récepteur.

La combinaison de tous les facteurs mentionnés précédemment, exige optimisation des performances du champ héliostat pour déterminer une mise en place efficace.

L'un des procédures classiques, les plus efficace et répandu, est le modèle radial en quinconce, initialement proposé par l'Université de Houston dans les années 1970.

2.1.2. Le récepteur

Pour une irradiation solaire de 300 à 1000kW/m² la température du récepteur varie de 500 à 1200°C, comme suit

Tableaux (III.1) : Température et fluides utilisés pour les récepteurs

Récepteurs	Température [°C]	Matériaux et fluides utilisés
Récepteurs volumétriques	850	fer
	1200	Céramique
Récepteurs tubulaires	500 ~ 600	Vapeur, sodium, sels fondus
	800 ~ 900	Gaz

Les pertes thermiques et optiques sont les paramètres clés pour quantifier l'efficacité d'un récepteur solaire [35].

$$\eta_{Rec} = (\alpha \cdot \tau_F) + (\alpha \cdot \varepsilon_F) \frac{\sigma T_F^4}{C_\phi} - \varepsilon(\alpha + \tau_F) \frac{\sigma T^4}{C_\phi} - U \frac{(T - T_a)}{C_\phi} \quad (III.1)$$

Où : T : Température de l'absorbeur, [°C] ;

T_F : Température de la fenêtre transparente, [°C] ;

T_a : Température ambiante, [°C] ;

C_ϕ : Rayonnement solaire concentré, [W] ;

$\alpha \cdot \tau_F$: Efficacité ;

τ_F : Transmissivité de la fenêtre ;

ρ_F : Réflectivité thermique de la fenêtre ;

α : Absorptivité de l'absorbeur ;

ε : Émissivité de l'absorbeur ;

U : Coefficient de perte de chaleur, [W/°C].

2.1.3. Tour

La tour qui supporte le récepteur peut être réalisée en acier ou en béton. Des tours en acier sont généralement utilisés pour des systèmes plus petits, tandis que les tours en béton sont plus économiques pour les systèmes plus larges.

2.2. Centrale à concentrateurs cylindro-paraboliques

Les collecteurs cylindro-paraboliques sont des dispositifs de concentration solaire linéaire qui travaillent dans la gamme de température 150-400°C.

Les valeurs habituelles du rapport de concentration solaire sont environ 20, bien que la valeur maximale théorique est de l'ordre de 70.

Lorsque le rayonnement solaire atteint la surface d'un collecteur cylindro-parabolique, une quantité importante de celle-ci est perdue en raison de plusieurs différents facteurs, qui, dans l'ordre croissant d'importance sont:

Les pertes géométriques ;

Les pertes thermiques ;

Les pertes optiques.

Le pic d'efficacité optique est 0.8, sa formule est [35]:

$$\eta_{op} = \rho \times \gamma \times \tau \times \alpha \quad (\text{III.2})$$

α : Absorptivité du tuyau d'absorption interne en acier est au alentour de 0,95 ;

ρ : Réflectivité de la surface réfléchissante du collecteur est autour de 0,93 ;

τ : Transmissivité du tube en verre externe est environ 0,93 ;

γ : Facteur dû aux imperfections des réflecteurs, de l'ordre de 0,95.

Le rendement optique est habituellement de l'ordre de 0,70 à 0,76. La température moyenne que la vapeur peut être fournie avec cette technologie est au-dessous de 200°C permettant son acquisition à 175°C et avec une pression de 2 MPa.

Néanmoins, les expériences réalisées en Espagne ont prouvé la faisabilité technique de collecteurs cylindro-paraboliques horizontaux à 100 bars / 400°C.

Avantages et inconvénients des différents branchements séries/parallèle :

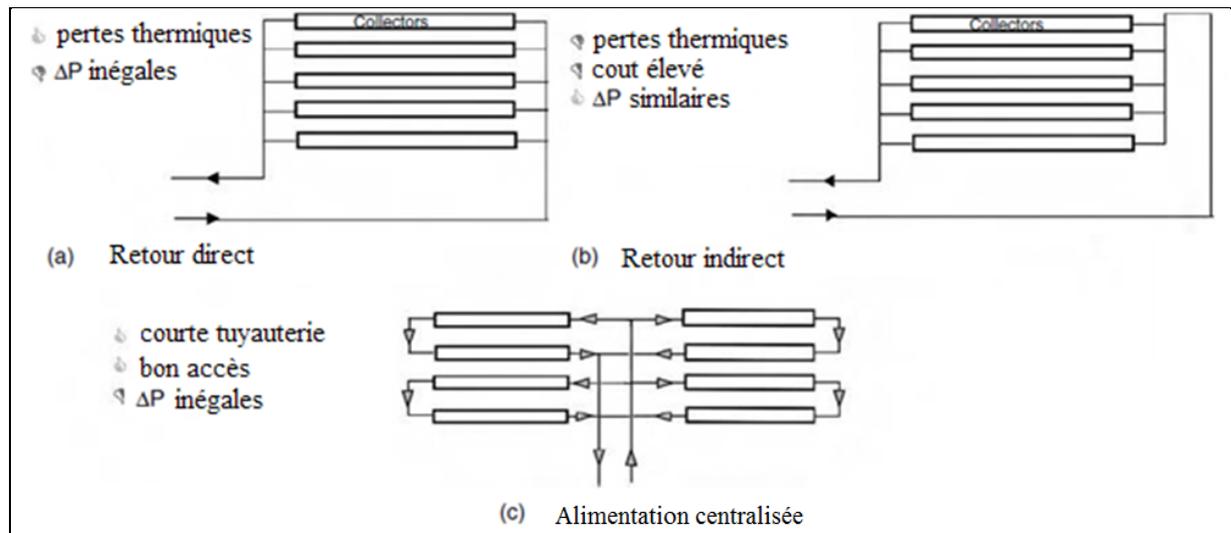


Figure (III.1) : Avantages et inconvénients

2.3. Capteur parabole/Stirling

Avec les technologies actuelles, un système parabolique/Stirling de puissance de 5kW nécessite un concentrateur ayant un diamètre de 5,5m, et pour 25kW le diamètre devrait augmenter à 10m. Les moteurs Stirling sont préférables pour cette technologie due à leur grande efficacité (0,4 d'efficacité thermodynamique), pour le fait que c'est un système condensé (40-70kW/L), ainsi que pour leur potentiel pour une opération à longue durée de vie avec peu de maintenance.

Chaque concentrateur est libre est indépendant du reste des concentrateurs, ce qui permet l'augmentation rapide de puissance générée par un groupe de concentrateurs.

L'avancement de la technologie a permis d'atteindre des records mondiaux en concentration solaire dépassant les 3000 soleils, avec d'excellentes performances, mais leurs coûts de productions sont très élevés, environ 300\$/m².

L'efficacité globale du système peut être définie comme :

$$\eta = \eta_C \eta_R \eta_{Stir} \eta_{Gen} = \frac{P}{A_{CI}} \quad (III.3)$$

Où : η_C : Efficacité du concentrateur ;

η_R : Efficacité du récepteur ;

η_{Stir} : Efficacité du moteur Stirling ;

η_{Gen} : Efficacité du générateur ;

P : Puissance nette générée, [W] ;

A_C : Surface du concentrateur, [m²] ;

I : Irradiation normale directe, [W/m²] [35].

2.4. Récapitulation

Tableau (III. 2) : Comparaison entre les différents capteurs solaires [36]

Concentrateur Caractéristiques	Cylindro- parabolique	Tour solaire	Linéaire Fresnel	Parabole/ Stirling
Capacité typique MW	10 – 300	10 - 200	10 – 200	0,01 - 0,025
Maturité de la technologie	Commercialement prouvé	Projets commerciaux pilotes	Projets pilotes	Projets démonstrateurs
Fournisseurs clés	AbengoaSolar, SolarMillenuim, Sener, Acciona, Siemens, NextEra, ACS, SAMCA..	AbengoaSolar, BroghtSource, eSolar, Solar Reserve, Terresol...	NovatecSolar, Areva Solar...	Non donné
Risques de développement	Faible	Moyen	Moyen	Moyen
Température de fonctionnement [°C]	350-550	250-565	390	550-750
Pic du rendement [%]	14-20	25-35 avec cycle combiné	18	30
Efficacité nette solaire/électrique annulaire [%]	11-16	7-20	13	12-25
Rendement optique	**	**	*	***
Facteur capacité annuelle [%]	25 - 28 (sans stockage) 29 - 43 (7h de stockage)	55 (10h de stockage)	22 - 24	25 - 28
Concentrateur collecteur	70 - 80 soleils	➤ 1000 Soleils	➤ à 60 soleils	➤ 1300 soleils

Récepteur	Attaché au collecteur, design complexe	Surface externe ou récepteur concave, fixe	Fixe, pas de ventilation secondaire	Attaché aux collecteurs
Système de stockage	Indirect double cuve sels fondus à 380°C ou direct à 550°C	direct double cuve sels fondus à 550°C	Stockage vapeur pressurisée court-terme (<10min)	Pas de stockage, stockage chimique en développement
Hybridation	Oui et direct	Oui	Oui, direct (chaud. à vap)	Non prouvé
Cycles	Cycle vapeur RANKINE surchauffé	Cycle vapeur RANKINE surchauffé	Cycle vapeur RANKINE saturé	Stirling
Condition vapeur [°C/bar]	380 à 540 / 100	540/100 à 160	260/50	Non donné
Pente maximale du champ solaire [%]	< 1 – 2	< 2 - 4	< 4	10% ou plus
Lot nécessaire [m³ /MWh]	3 (refroidi. humide) 0,3 (refroi. sec)	2 –3 (refroidi. humide) 0,25 (refroi. sec)	3 (refroidi. humide) 0,2 (refroi. sec)	0,05 – 0,1 (lavage miroirs)
Adaptabilité au refroidi. par air	Faible à bonne	Bonne	faible	Très bonne
Stockage par sels fondus	Commercialement disponible	Commercialement disponible	Possible mais non prouvé	Possible mais non prouvé
Occupation de sol	Importante	Importante	Moyenne	Faible
Perspectives d'amélioration	Limitées	Significative	Significative	Via production de masse
Combustible solaire	Non	oui	Non	Oui

3. Etude des cycles thermodynamiques les plus utilisés**3.1. les fluides utilisés**

Nous avons constaté que l'utilisation de l'énergie solaire thermique avec l'un des cycles cités dans le chapitre précédent, peut être réalisée suivant deux méthodes, chaque méthode a ses pouvoirs et faiblesse, ça dépend des températures et pressions souhaitées, et la qualité des équipements utilisés.

3.1.1. Fluide seul:

Comme étant fluide caloporteur et fluide thermodynamique, ce même agent de transport de calorie circule dans le concentrateur et capte l'énergie solaire et continue sa circulation suivant le cycle thermodynamique souhaité ;

a. Avantage

- Simplicité du cycle
- Diminution du nombre d'équipement, d'ici réduction des frais

b. Inconvénients

- Difficulté du contrôle et optimisation des performances.

3.1.2. Deux fluides :

Afin de faire l'échange de chaleur entre les deux fluides : caloporteur et thermodynamique, le fluide caloporteur suit un circuit fermé pour la charge et décharge de calories, au niveau des concentrateur et échangeur de chaleur qui est le générateur de vapeur pour le deuxième fluide thermodynamique qui subit des changements d'état suivant le cycle de conversion utilisé et produit le travail demandé.

a. Avantages

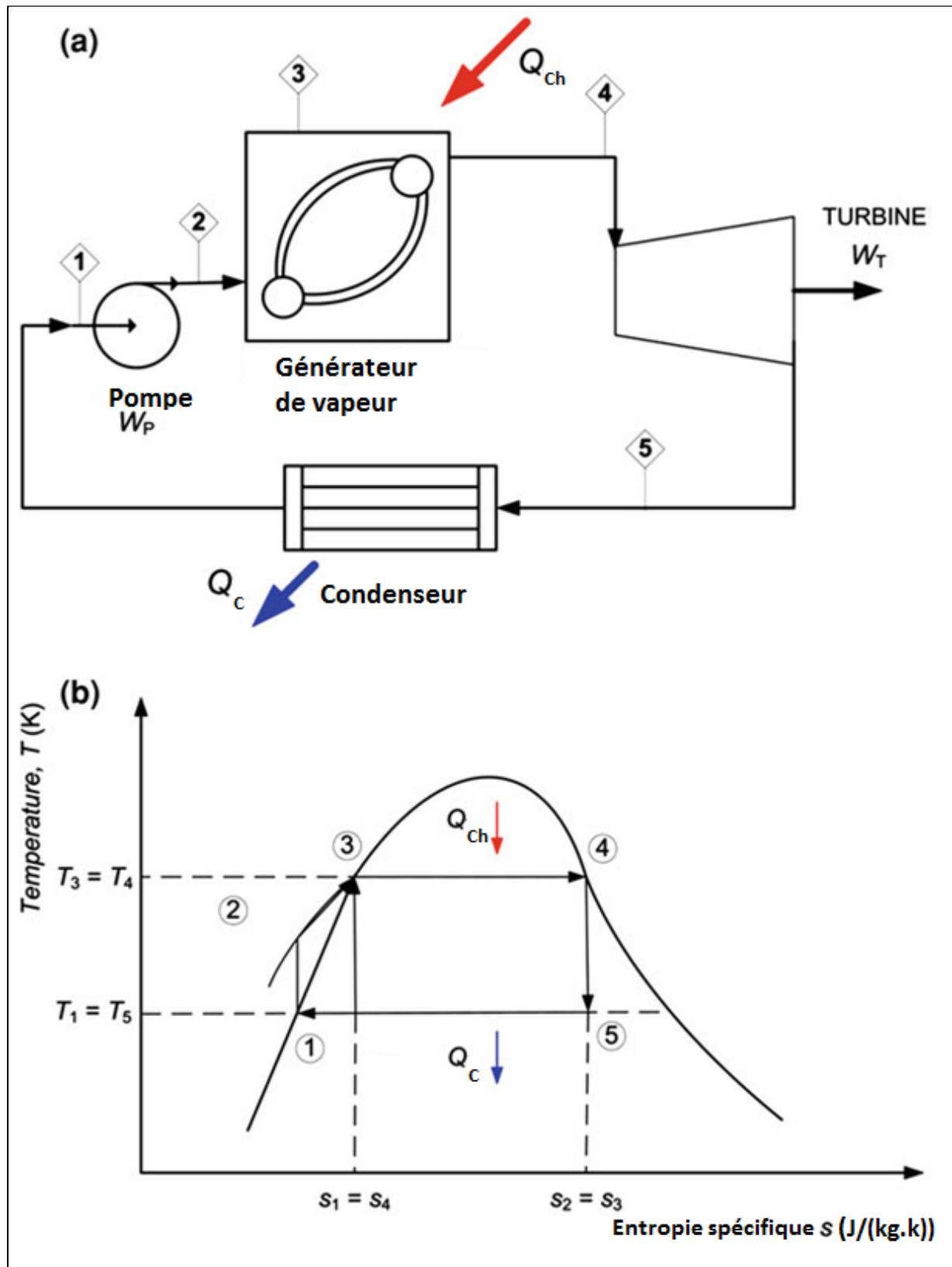
- Maitrise des paramètres
- Possibilité de stockage
- Travailler avec différentes pressions
- Facilité de maintenance

b. Inconvénients

- Pertes de charge
- Pertes thermiques
- Complexité de l'installation.

3.2. Cycle simple de RANKINE

Le cycle de RANKINE simple est basé sur quatre processus réversibles comme le montre la Figure (III.2) (a). Le fluide le plus couramment utilisé dans ce cycle est de l'eau. Le liquide saturé dans l'état 1 subit un processus de compression isentropique pour atteindre le liquide comprimé à l'état 2. Ensuite, le liquide comprimé est entraîné vers le générateur de vapeur, où de la chaleur Q_{Ch} est ajoutée pour obtenir de la vapeur saturée à l'état 4. Un travail utile est produit dans une machine de détente, comme une turbine à vapeur, dans un processus isentropique cédant fluide à l'état 5. Enfin, il se produit de la condensation en enlevant de la chaleur dans le condenseur Q_C pour fermer le cycle et le fluide retourne à l'état initial 1.



Figure(III.2) : (a) Composants de base d'un cycle de RANKINE simples ;

(b) Diagramme de température et entropie spécifique

Bilans thermiques des différents éléments de l'installation sont :

- chaudière

$$q_{Ch} = h_4 - h_2 \quad (III.4)$$

- condenseur

$$q_C = h_5 - h_1 \quad (III.5)$$

- pompe

$$w_P = h_2 - h_1 \quad (III.6)$$

- turbine

$$w_t = h_4 - h_5 \quad (III.7)$$

- travail utile

$$w_u = w_t - w_P = q_{Ch} - q_C \quad (III.8)$$

La puissance nette totale du cycle, W ; elle peut être obtenue selon l'équation (III.9) :

$$W = \dot{m} \times w_u \quad (III.9)$$

où, \dot{m} est le débit massique.

Le rendement se calcule comme suit :

$$\eta = \frac{w_u}{q_{Ch}} = \frac{q_{Ch} - q_C}{q_{Ch}} \quad (III.10)$$

Avec :

h_i : Enthalpies de différents points ;

q_{Ch} : Chaleur de chaudière ;

q_C : Chaleur de condenseur ;

w_P : Travail de pompe ;

w_t : Travail de la turbine.

Remarque :

Le fluide thermodynamique à la sortie de la turbine est à l'état vapeur humide ce qui endommage la turbine et réduit remarquablement sa durée de vie, automatiquement celle de toute l'installation induisant un lourd coût et temps de maintenance.

3.3. Cycle HIRN de vapeur

En examinant de près le schéma T-s du cycle de RANKINE simple, il est possible de constater qu'à la sortie de la turbine (état 5) un mélange de liquide et de vapeur est présent et ceci peut causer des dommages aux aubes de la turbine par l'érosion.

La façon de contourner le problème, se fait par l'introduction d'une première modification sur le cycle de RANKINE simple. Un surchauffeur est installé à la sortie de la chaudière pour surchauffer la vapeur saturée à des températures plus élevées.

Il est clair qu'en chauffant le fluide de travail à des températures plus élevées, une meilleure efficacité thermique sera également obtenue sans augmentation supplémentaire de la pression de travail. Cependant, il y a un coût supplémentaire de la phase de surchauffe sur les charges monétaires de l'installation.

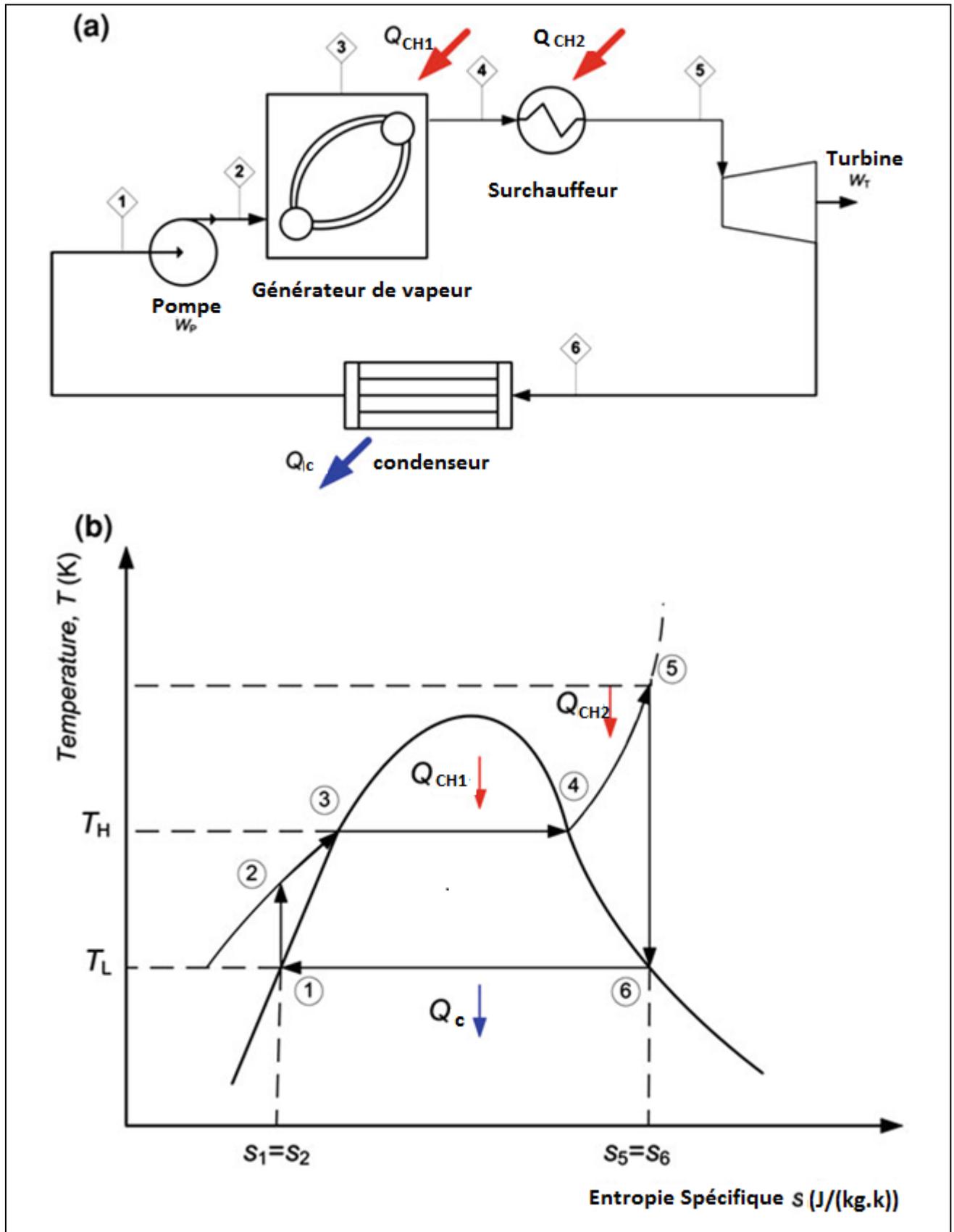


Figure (III.3) : (a) Cycle de HIRN de la vapeur ; (b) Diagramme T-s

Bilans thermiques des différents éléments de l'installation sont :

- chaudière

$$q_{Ch1} = h_4 - h_2 \quad (\text{III.11})$$

- surchauffeur

$$q_{Ch2} = h_5 - h_4 \quad (\text{III.12})$$

- chaleur totale

$$q_{Ch} = q_{Ch1} + q_{Ch2} = h_5 - h_2 \quad (\text{III.13})$$

- condenseur

$$q_C = h_6 - h_1 \quad (\text{III.14})$$

- pompe

$$w_P = h_2 - h_1 \quad (\text{III.15})$$

- turbine

$$w_t = h_5 - h_6 \quad (\text{III.16})$$

- travail utile

$$w_u = w_t - w_P = q_{Ch1} + q_{Ch2} - q_C \quad (\text{III.17})$$

La puissance nette totale du cycle W peut être obtenue selon l'équation (III.18) :

$$W = \dot{m} \times w_u \quad (\text{III.18})$$

Où, \dot{m} est le débit massique.

Le rendement se calcule comme suit :

$$\eta = \frac{w_u}{q_{Ch}} = \frac{q_{Ch1} + q_{Ch2} - q_C}{q_{Ch1} + q_{Ch2}} = \frac{w_t - w_P}{q_{Ch}} \quad (\text{III.19})$$

Avec :

q_{Ch1} : Chaleur de chaudière

q_{Ch2} : Chaleur de surchauffeur

Remarque :

Ce cycle est déjà performant, mais l'ajout d'un resurchauffe peut augmenter son rendement.

3.4. Cycle de HIRN avec surchauffe

La configuration précédente du cycle de RANKINE peut résoudre le problème de la vapeur humide à la sortie de la turbine. Cependant, il apporte un nouveau problème qui est d'augmenter la température d'entrée à la turbine. Pour résoudre ce problème, la solution est de détendre la vapeur à une pression intermédiaire et à diriger la vapeur vers le générateur de vapeur pour la réchauffer.

Le schéma de cette configuration peut être vu dans la Figure (III.4) (a). Le diagramme T -s est représenté sur la figure (III.4) (b).

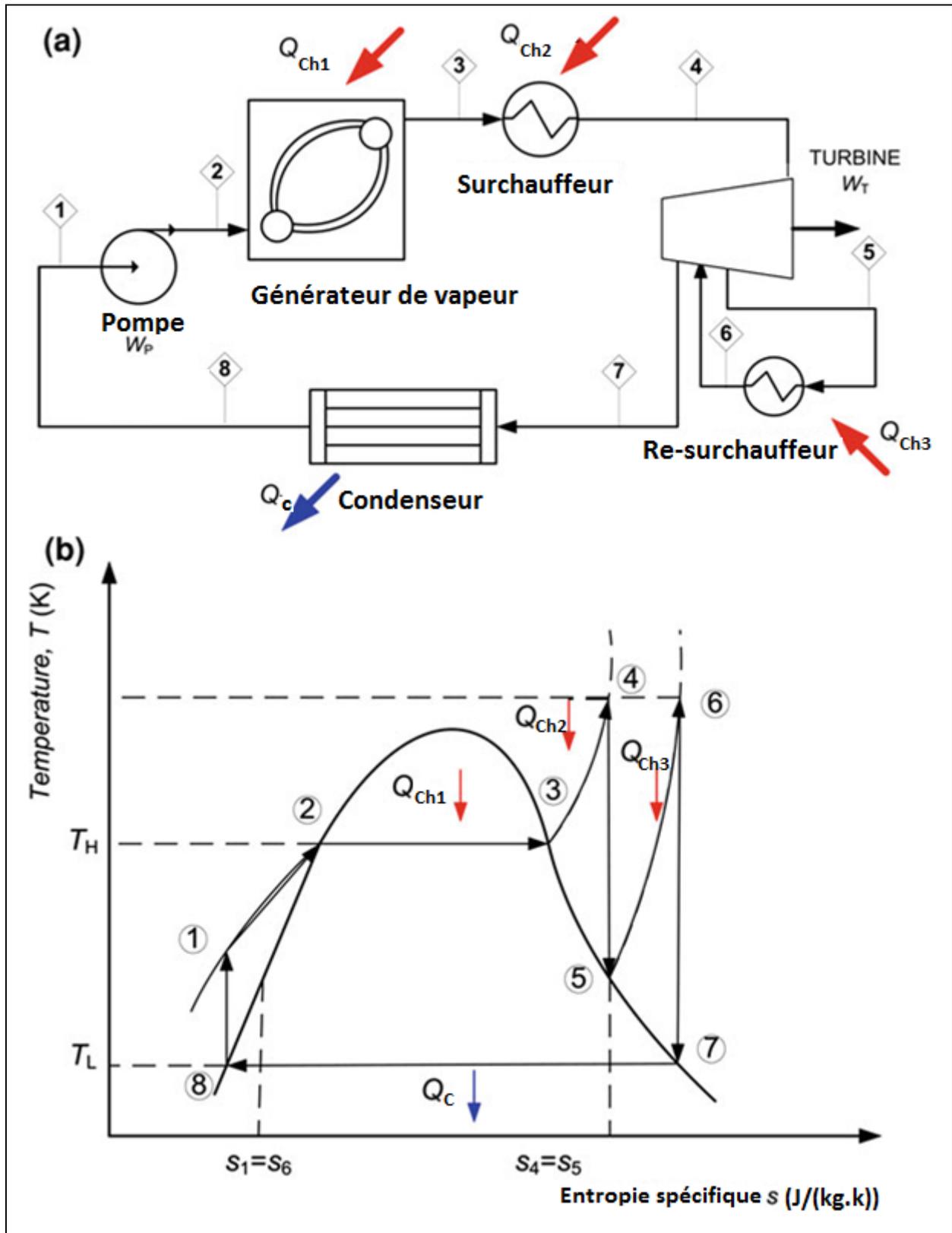


Figure (III.4) (a) : Un cycle de HIRN avec réchauffage de vapeur; (b) Diagramme T-s

Bilans thermiques des différents éléments de l'installation sont :

- chaudière

$$q_{Ch1} = h_3 - h_1 \quad (III.20)$$

- surchauffeur

$$q_{Ch2} = h_4 - h_3 \quad (III.21)$$

- réchauffeur

$$q_{Ch3} = h_6 - h_5 \quad (III.22)$$

- chaleur totale

$$q_{Ch} = q_{Ch1} + q_{Ch2} + q_{Ch3} = h_6 - h_5 + h_4 - h_1 \quad (III.23)$$

- condenseur

$$q_C = h_6 - h_1 \quad (III.24)$$

- pompe

$$w_P = h_1 - h_8 \quad (III.25)$$

- turbine 1

$$w_{t1} = h_4 - h_5 \quad (III.26)$$

- turbine 2

$$w_{t2} = h_6 - h_7 \quad (III.27)$$

- turbine

$$w_t = w_{t1} + w_{t2} = h_4 - h_5 + h_6 - h_7 \quad (III.28)$$

- travail utile

$$w_u = w_t - w_P \quad (III.29)$$

$$w_u = h_6 - h_7 + h_4 - h_5 - (h_1 - h_8) \quad (III.30)$$

$$= h_6 - h_5 + h_4 - h_1 - (h_7 - h_8)$$

$$w_u = q_{Ch} - q_C \quad (III.31)$$

La puissance nette totale du cycle W peut être obtenue selon l'équation (III.32) :

$$W = \dot{m} \times w \quad (III.32)$$

où, \dot{m} est le débit massique.

Le rendement se calcule comme suit :

$$\eta = \frac{w_u}{q_{Ch}} = \frac{q_{Ch} - q_C}{q_{Ch}} \quad (III.33)$$

$$\eta = 1 - \frac{h_7 - h_8}{h_6 - h_5 + h_4 - h_1} \quad (III.34)$$

3.5. Les pertes dans les cycles de RANKINE et alternatifs fluides actifs

Dans un cycle réel, une turbine à vapeur n'est pas une détente isentropique et les pertes internes sont dues au frottement fluide avec des aubes de turbine. On définit le rendement isentropique de la turbine par cette formule :

$$\eta_t = \frac{w_{t-r}}{w_{t-s}} = \frac{w_{t-r}}{h_i - h_{f-s}} \quad (\text{III.35})$$

$$\rightarrow w_{t-r} = \eta_t (h_i - h_{f-s}) \quad (\text{III.36})$$

Où, w_{t-r} : Travail réel de la turbine ;

w_{t-s} : Travail isentropique de la turbine ;

h_i : Enthalpie spécifique de la vapeur à la turbine d'entrée ;

h_{f-s} : Enthalpie spécifique finale après détente isentropique.

Les avantages d'une telle installation, sont les suivants.

- Il est plus facile de cette façon d'obtenir un point final dans la zone de vapeur surchauffée ce qui garantit la longévité de la turbine.
- D'autre part, le travail récupéré est plus important, ce qui augmente la puissance récupérée pour le même débit de vapeur.
- Ces avantages sont obtenus au prix d'une plus grande complexité de l'installation et d'un prix plus élevé.

3.6. Cycle HIRN avec surchauffe réel

L'équation (III.36) donne l'expression du travail réel de la turbine, on le remplace dans l'expression du rendement, et on obtient :

$$\eta = \frac{w_u}{q_{Ch}} = \frac{w_{t-r} - w_p}{q_{Ch}} \quad (\text{III.37})$$

$$\eta = \frac{\eta_t (h_6 - h_{7'} + h_4 - h_{5'}) - (h_1 - h_8)}{h_6 - h_5 + h_4 - h_1} \quad (\text{III.38})$$

4. Conclusion

Après avoir étudié et comparé les différentes technologies solaires, Tableau (III.2), on opte pour l'utilisation de la meilleure en termes de performance et d'efficacité, on choisit l'utilisation des centrales à tours solaires.

L'étude des différents cycles thermodynamiques, nous a permis de voir la différence entre ses performances et les avantages vis-à-vis chacun d'entre eux, ce qui nous a aidé de choisir le mieux adapté pour notre installation.

L'assemblage entre les deux savoir-faire scientifiques, la thermo-solaire et la thermodynamique, est considéré comme un processus énergétique permettant de produire un travail utile à partir des ressources solaires disponibles le jour pour l'utiliser à volonté, cette transformation est à titre de recherche et développement continu et productive.

Chapitre IV

**Simulation de l'installation
et interprétation des
résultats**

Chapitre IV : Simulation de l'installation et interprétation des résultats

1. Introduction

Parmi les divers systèmes utilisables pour produire un travail utile par voie thermodynamique, les systèmes à tour solaire sont les plus intéressants, dû à leur exploitation et concentration de l'énergie solaire.

Toute fois leur conception demande une soigneuse étude thermodynamique afin d'obtenir un rendement satisfaisant.

Une centrale solaire thermodynamique est un ensemble d'équipements conçu dans le but de produire un travail, à partir de l'énergie solaire et après un procédé thermodynamique.

Les fluides de travail du système sont :

- un fluide caloporteur, qui transmet l'énergie solaire ;
- un fluide thermodynamique, qui circule dans l'installation de production.

Ce chapitre est consacré à la simulation de la centrale solaire thermodynamique, en utilisant l'eau (H₂O) comme fluide thermodynamique, pour mieux comprendre son fonctionnement et d'en déduire, par la suite, des actions pour améliorer ses performances.

Dans ce but, des modifications géométriques sont faites sur cette installation, et par la suite, l'effet des pressions et températures est examiner.

2. Conditions météorologiques et géographiques de la région

Notre site se trouve dans la région de Tlemcen, les paramètres géologiques et météorologiques sont importantes pour notre analyse, d'ici nous jugeons indispensable de les citer.

2.1. Conditions géographiques de la région [37]

La Wilaya de Tlemcen occupe une position de choix au sein de l'ensemble national. Elle est située sur le littoral Nord-ouest du pays et dispose d'une façade maritime de 120 km. C'est une wilaya frontalière avec le Maroc, avec une superficie de 9017,69 Km². Le Chef lieu de la wilaya est située à 432 km à l'Ouest de la capitale, Alger.

La wilaya est limitée par:

- La mer méditerranée au Nord ;
- La wilaya d'Ain Témouchent à l'Est ;
- La wilaya de Sidi Bel Abbes à l'Est- Sud –Est ;
- La wilaya de Naama au Sud.
- Le Maroc à l'Ouest.

Tableau (IV.1) : Données géographiques de Tlemcen [38]

Les données géographiques	Valeurs
Latitude	35,0°N
Longitude	-1,5°E
Altitude	806 m

2.2. Conditions météorologiques

Le climat de la région de Tlemcen est sec et chaud en été alors qu'il est humide et froid en hiver. La température, l'humidité relative et le rayonnement solaire définissent ses changements. Ces éléments sont variables, mais on peut estimer une moyenne mensuelle comme l'indique le Tableau IV.2.

Tableau (IV.2) : Données météorologiques de Tlemcen

Mois	Température de l'air	Humidité relative	Rayonnement solaire quotidien - horizontal	Pression atmosphérique	Vitesse du vent
	°C	%	kWh/m ² /j	kPa	m/s
Janvier	10,2	73,5	2,98	98,0	1,9
Février	11,2	73,9	3,92	97,9	2,0
Mars	13,4	72,0	5,14	97,7	2,0
Avril	15,3	66,8	6,56	97,4	2,4
Mai	18,4	65,7	7,15	97,4	2,4
Juin	22,4	61,6	7,65	97,5	2,5
Juillet	25,6	58,2	7,57	97,5	2,4
Août	26,1	59,2	6,89	97,5	2,3
Septembre	23,1	64,9	5,75	97,5	2,1
Octobre	19,2	69,6	4,29	97,6	1,9
Novembre	14,8	71,7	3,14	97,7	2,1
Décembre	11,6	73,9	2,65	97,9	2,1
Annuel	17,6	67,5	5,31	97,6	2,2

3. Description de l'installation

La centrale est destinée pour l'exploitation de l'énergie solaire concentrée, dans l'intérêt de la convertir en énergie thermique, puis mécanique suivant un cycle thermodynamique, pour qu'elle soit finalement disponible à des fins variées.

Afin d'étudier les paramètres thermodynamiques, dans le but de perfectionner le rendement thermodynamique de l'installation, des changements ont été fait sur le cycle RANKINE de l'implantation énergétique. Notre approche consiste à ajouter un surchauffe et voir son influence sur l'amélioration des performances de notre machine.

3.1. Bilans massique et énergétique

Pour déterminer le bilan thermique d'un composant, il est nécessaire de connaître avec précision les enthalpies du fluide de travail à l'état liquide et gazeux en fonction de la température et la pression.

D'après le premier principe de la thermodynamique, les bilans énergétiques de chaque élément nous donnent les équations suivantes :

$$q_{Ch} = h_4 - h_2 \quad (VI.1)$$

$$q_C = h_5 - h_1 \quad (VI.2)$$

$$w_P = h_2 - h_1 \quad (VI.3)$$

$$w_t = h_4 - h_5 \quad (VI.4)$$

$$w_u = w_t - w_P = q_{Ch} - q_C \quad (VI.5)$$

Le rendement se calcule comme suit :

$$\eta = \frac{w_u}{q_{Ch}} = \frac{q_{Ch} - q_C}{q_{Ch}} \quad (VI.6)$$

Avec :

h_i : Enthalpies massique des différents points, [kJ/kg] ;

q_{Ch} : Chaleur massique de chaudière, [kJ/kg] ;

q_C : Chaleur massique de condenseur, [kJ/kg] ;

w_P : Travail massique de pompe, [kJ/kg].

En remplaçant les équations (VI.1) et (VI.2) dans l'expression du rendement, nous obtenons :

$$\eta = \frac{h_4 - h_2 - (h_5 - h_1)}{h_4 - h_2} \quad (IV.7)$$

$$\eta = \frac{h_4 - h_2 - (h_5 - h_1)}{h_4 - h_2 + h_1 - h_1} \quad (IV.8)$$

$$\eta = \frac{h_4 - h_5 - (h_2 - h_1)}{h_4 - h_1 - (h_2 - h_1)} \quad (IV.9)$$

Avec : $w_P = h_2 - h_1 = v \cdot dP \quad (IV.10)$

v : volume massique.

Il en résulte l'expression finale du rendement :

$$\eta = \frac{h_4 - h_5 - v \cdot dP}{h_4 - h_1 - v \cdot dP} \quad (IV.11)$$

3.1.2. Cycle de HIRN

Le cycle de HIRN fonctionne suivant cinq transformations comme le montre le schéma suivant :

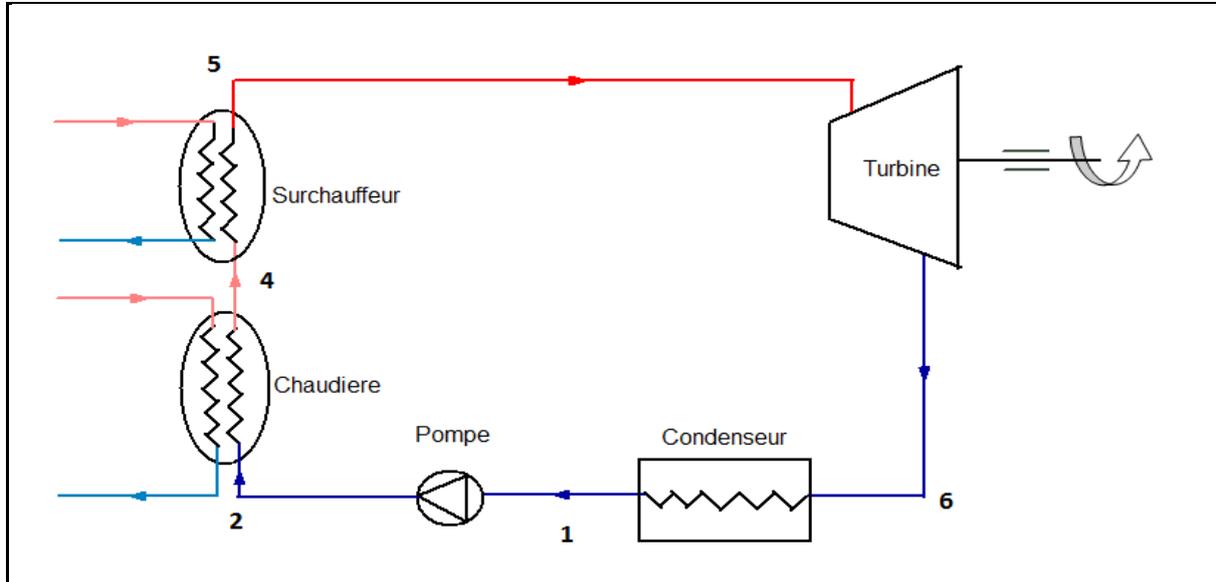


Figure (IV.3) : Schéma de principe du cycle de HIRN

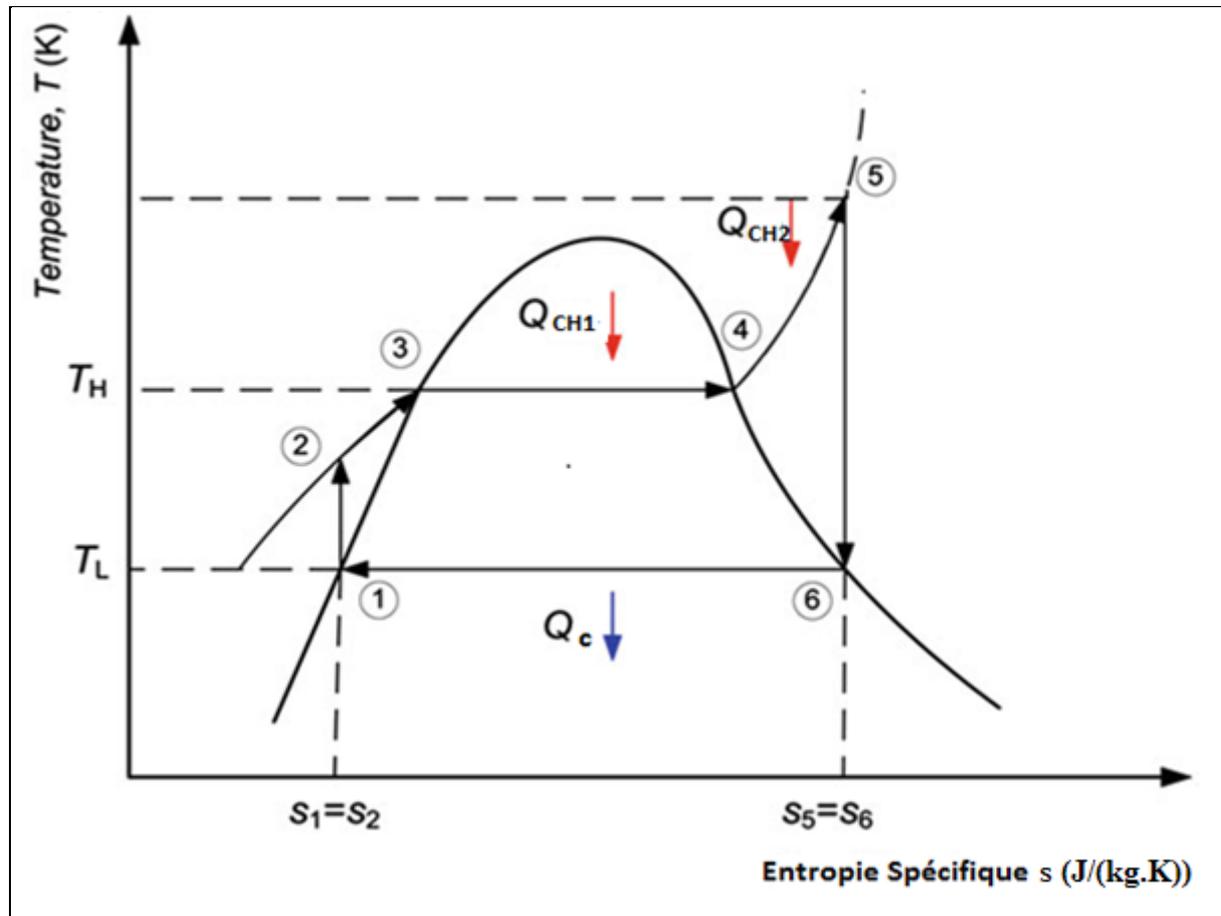


Figure (IV.4) : Diagramme température-entropie

D'après le premier principe de la thermodynamique, le bilan énergétique de chaque élément nous donne les équations suivantes :

$$q_{Ch1} = h_4 - h_2 \quad (\text{VI.12})$$

$$q_{Ch2} = h_5 - h_4 \quad (\text{VI.13})$$

$$q_{Ch} = q_{Ch1} + q_{Ch2} = h_5 - h_2 \quad (\text{VI.14})$$

$$q_C = h_6 - h_1 \quad (\text{VI.15})$$

$$w_P = h_2 - h_1 \quad (\text{VI.16})$$

$$w_t = h_5 - h_6 \quad (\text{VI.17})$$

$$w_u = w_t - w_P = q_{Ch1} + q_{Ch2} - q_C \quad (\text{VI.18})$$

Le rendement se calcule comme suit :
$$\eta = \frac{w_u}{q_{Ch}} \quad (\text{VI.19})$$

Avec :

q_{Ch1} : Chaleur massique de la chaudière, [kJ/kg] ;

q_{Ch2} : Chaleur massique du surchauffeur, [kJ/kg] ;

w_u : Travail massique utile, [kJ/kg] ;

En remplaçant les équations (VI.14) et (VI.15) dans l'expression du rendement, nous obtenons :

$$\eta = \frac{h_5 - h_2 - (h_6 - h_1)}{h_5 - h_2} \quad (\text{IV.20})$$

$$\eta = \frac{h_5 - h_2 - (h_6 - h_1)}{h_5 - h_2 + h_1 - h_1} \quad (\text{IV.21})$$

$$\eta = \frac{h_5 - h_6 - (h_2 - h_1)}{h_5 - h_1 - (h_2 - h_1)} \quad (\text{IV.22})$$

Avec :
$$w_P = h_2 - h_1 = v \cdot dP \quad (\text{IV.23})$$

v : volume massique.

Il en résulte l'expression finale du rendement :

$$\eta = \frac{h_5 - h_6 - v.dP}{h_5 - h_1 - v.dP} \quad (\text{IV.24})$$

3.2. Etude de la centrale

La centrale est composée de deux grandes parties :

- thermo-solaire ;
- installation à vapeur.

3.2.1. Etude de la partie thermo-solaire

Dans la partie thermo-solaire, on choisit l'installation à tour solaire à cause de ses performances élevées, elle est composée d'un champ d'héliostats poursuivant le soleil le long de la journée et d'un récepteur situé dans le sommet d'une tour permettant la collecte de tous les rayons solaires d'une façon concentrée.

eSolar (Chapitre III tableau(III.2)), un fournisseur leader dans les implantations des centrales solaires à tour, a remporté une subvention du ministère de l'Énergie des États-Unis pour développer un modèle de référence pour une implantation solaire efficace. Le résultat a été une usine en fusion optimisée de sel fondu de puissance conçu pour un déploiement rapide et capable de produire des heures de puissance après le coucher du soleil.

eSolar utilise 47,000 miroirs réflecteurs, en verre de réflectivité maximale et absorptivité minimale, de 2,2 m² de surface de captation, occupant 103,000 m² et alimentant le récepteur en 50MW.

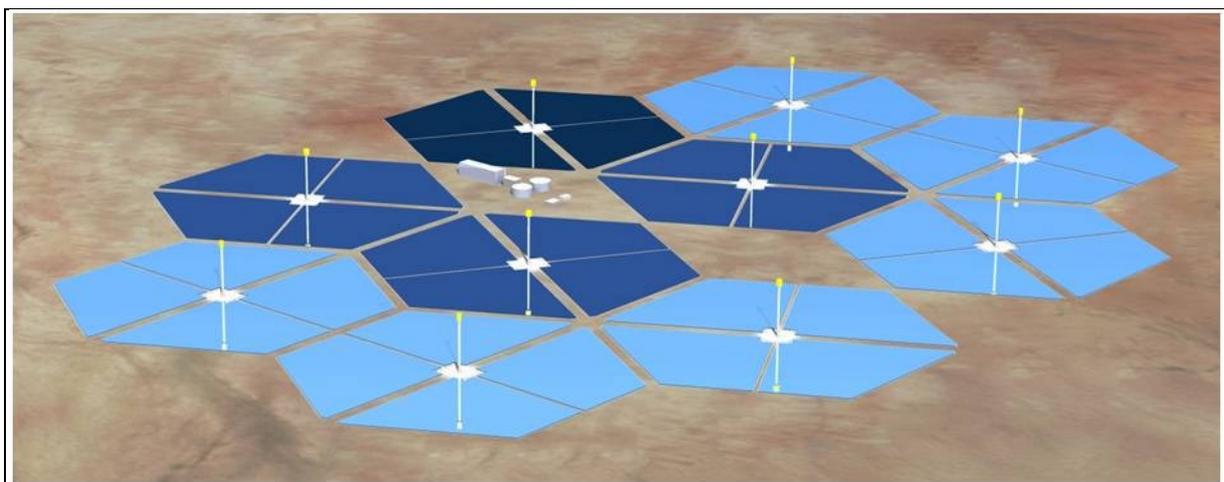


Figure (IV.5) : Disposition du champ solaire, d'après eSolar [38]

L'absorbeur est un récepteur en sel fondu, disposé sur une tour en acier monopôle, de 100 m de hauteur, qui peut chauffer le sel de nitrate de 288°C jusqu'à atteindre une température maximale de 565°C.

Le système de stockage thermique, constitué de grands réservoirs de sel froid et chaud, est situé dans le bloc d'alimentation, ainsi que le générateur de vapeur de sel fondu, et en prenant en considération la réduction de température après l'échange thermique avec le fluide thermodynamique, qui est l'eau, sa température maximale atteint 540 °C [38].

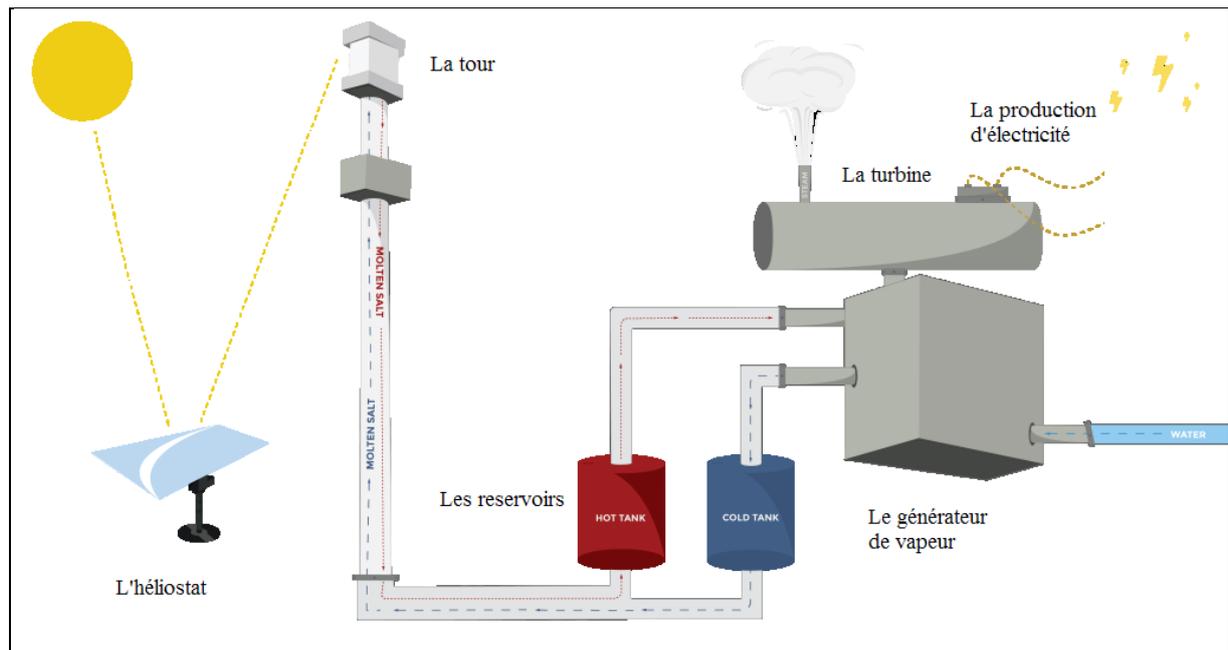


Figure (IV.6) : schéma simplifiée de l'implantation [38]

Donc, d'après les caractéristiques des produits de eSolar, le rendement des réflecteurs solaire est de l'ordre de 89% et celui de l'absorbeur est 91%, d'ici le rendement optique globale est le produit des rendements cités avant, et il vaut 81%.

3.2.2. Etude de la partie thermodynamique

Etude de la partie thermodynamique consiste l'étude des performances du cycle de RANKINE et le cycle de HIRN.

Notre étude consiste en premier lieu à voir l'influence des pressions sur les performances de l'installation et ensuite faire varier la température de surchauffe et en tirer ses effets.

- Deux méthodes sont utilisables pour le calcul des différents paramètres thermodynamiques : T, P, v, h et s :

- Méthode graphique : utilisation des diagrammes de Mollier (h, s), Clapeyron (P, v) et enthalpique (T, h);
- Méthode analytique : utilisation des tableaux des propriétés thermodynamiques de l'eau liquide, liquide saturé, humide, vapeur saturée et vapeur surchauffée.

Notre choix était de travailler avec les tables des paramètres thermodynamiques (méthode analytique) extraits des équations empiriques, à cause de leur précision.

- Hypothèses de travail :

Le choix de la pression de travail varie entre 1 à 7 bars pour la basse pression et de 10 à 30 bars pour la haute pression, et la température de surchauffe varie entre 200 et 540°C.

L'intervalle de température est exigé, d'après l'installation de concentration solaire ; alors que la marge de pression dépend essentiellement des capacités des éléments de l'installation thermodynamique, la pompe et la turbine coûtent cher et sont de grandes dimensions si ses capacités sont remarquables, alors pour diminuer à la fois les coûts d'investissement et la complexité de l'installation nous choisissons des équipements simples et performants, satisfaisant les demandes en pression citées avant.

a. Exemple de calcul des paramètres

- **Pour le cycle de RANKINE**

On a l'équation du rendement (IV.11), on détermine les différents paramètres thermodynamiques de chaque point dans le cycle de RANKINE, ces paramètres sont tabulés dans les tables thermodynamiques de l'eau (voir l'annexe).

Traitons le cycle fonctionnant avec 2 bars comme basse pression et 10 bars comme haute pression, par exemple, montré dans la figure suivante :

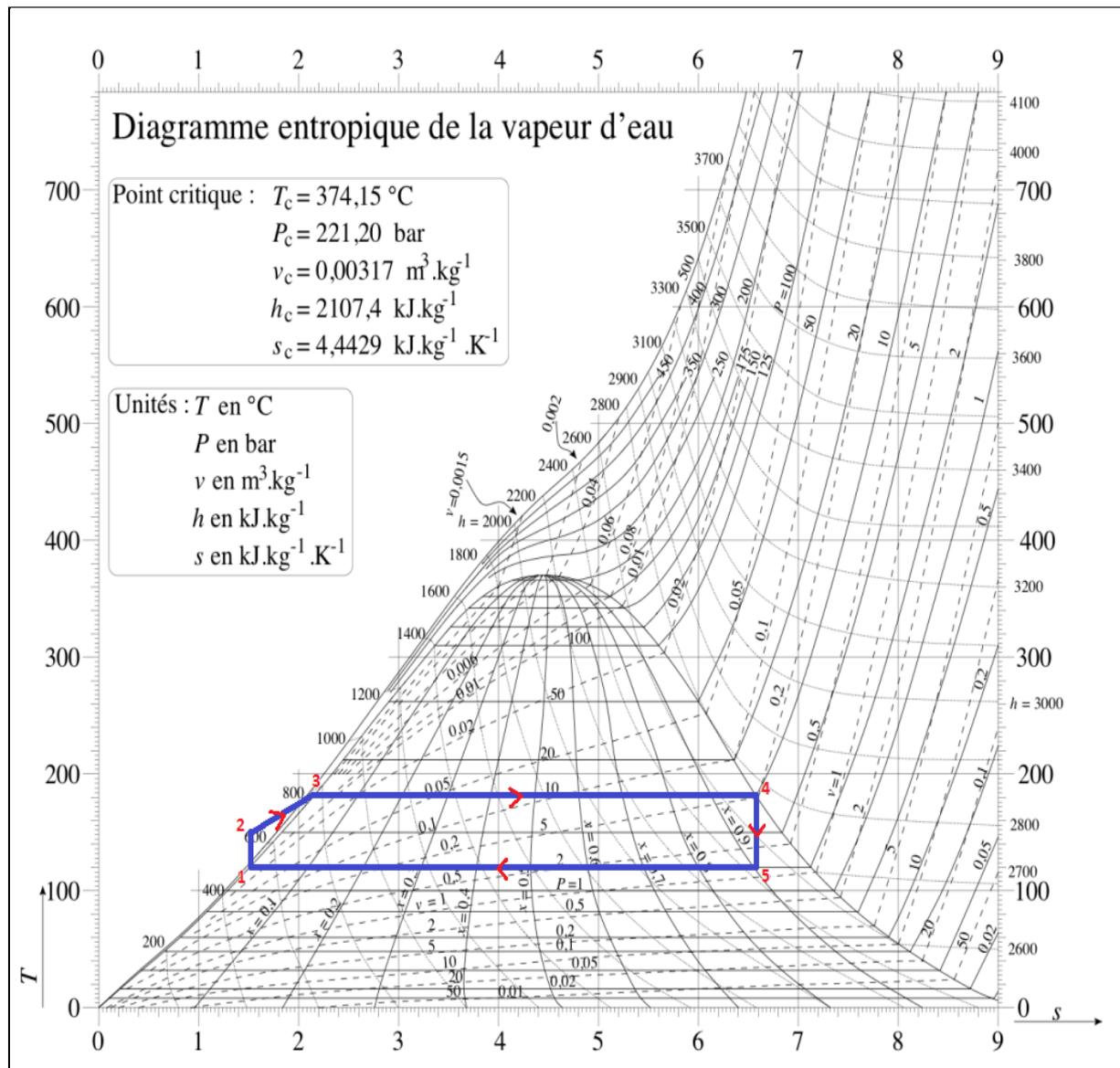


Figure (IV.7) : Cycle théorique de RANKINE entre 2 et 10 bars

Point 1 :

$$\left\{ \begin{array}{l} P_1 = 2 \text{ bars} \\ x_1 = 0 \end{array} \right. \xrightarrow{\text{A partir de l'annexe 2}} \left\{ \begin{array}{l} T_1 = 120,2 \text{ °C} \\ h_1 = 504,7 \text{ kJ/kg} \\ v_1 = 1,0605 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{kg} \\ s_1 = 1,5301 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K}) \end{array} \right.$$

Point 2 :

$$\left\{ \begin{array}{l} P_2 = 10 \text{ bars} \\ s_1 = s_2 = 1,5301 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K}) \end{array} \right.$$

Point 3 :

$$\left\{ \begin{array}{l} P_3 = 10 \text{ bars} \\ x_3 = 0 \end{array} \right. \xrightarrow{\text{A partir de l'annexe 2}} \left\{ \begin{array}{l} T_3 = 179,9^\circ\text{C} \\ h_3 = 762,81 \text{ kJ/kg} \\ s_3 = 2,1387 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K}) \end{array} \right.$$

Point 4 :

$$\left\{ \begin{array}{l} P_4 = 10 \text{ bars} \\ T_4 = 179,9^\circ\text{C} \end{array} \right. \xrightarrow{\text{A partir de l'annexe 2}} \left\{ \begin{array}{l} h_4 = 2778,1 \text{ kJ/kg} \\ s_4 = 6,5863 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K}) \end{array} \right.$$

Point 5 :

$$\left\{ \begin{array}{l} P_5 = 2 \text{ bars} \\ T_5 = 120,2^\circ\text{C} \\ s_5 = s_4 = 6,5863 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K}) \end{array} \right.$$

Calcul de x_5 pour calculer h_5 :

$$x_5 = \frac{s_5 - s_1}{s_v - s_1}, \quad \text{avec } s_v = 7,1271 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K}) : \text{entropie de vapeur saturée}$$

$$\text{AN : } x_5 = \frac{6,5863 - 1,5301}{7,1271 - 1,5301}$$

$$x_5 = 0,9034$$

$$h_5 = x_5 (h_v - h_1) + h_1, \quad \text{avec } h_v = 2201,9 \text{ kJ/kg} : \text{enthalpie de vapeur saturée}$$

$$\text{AN : } h_5 = 0,9034(2201,9 - 504,7) + 504,7$$

$$h_5 = 2493,9428 \text{ kJ/kg}$$

$$\text{Calcul du rendement : } \eta = \frac{h_4 - h_5 - v \cdot dP}{h_4 - h_1 - v \cdot dP}$$

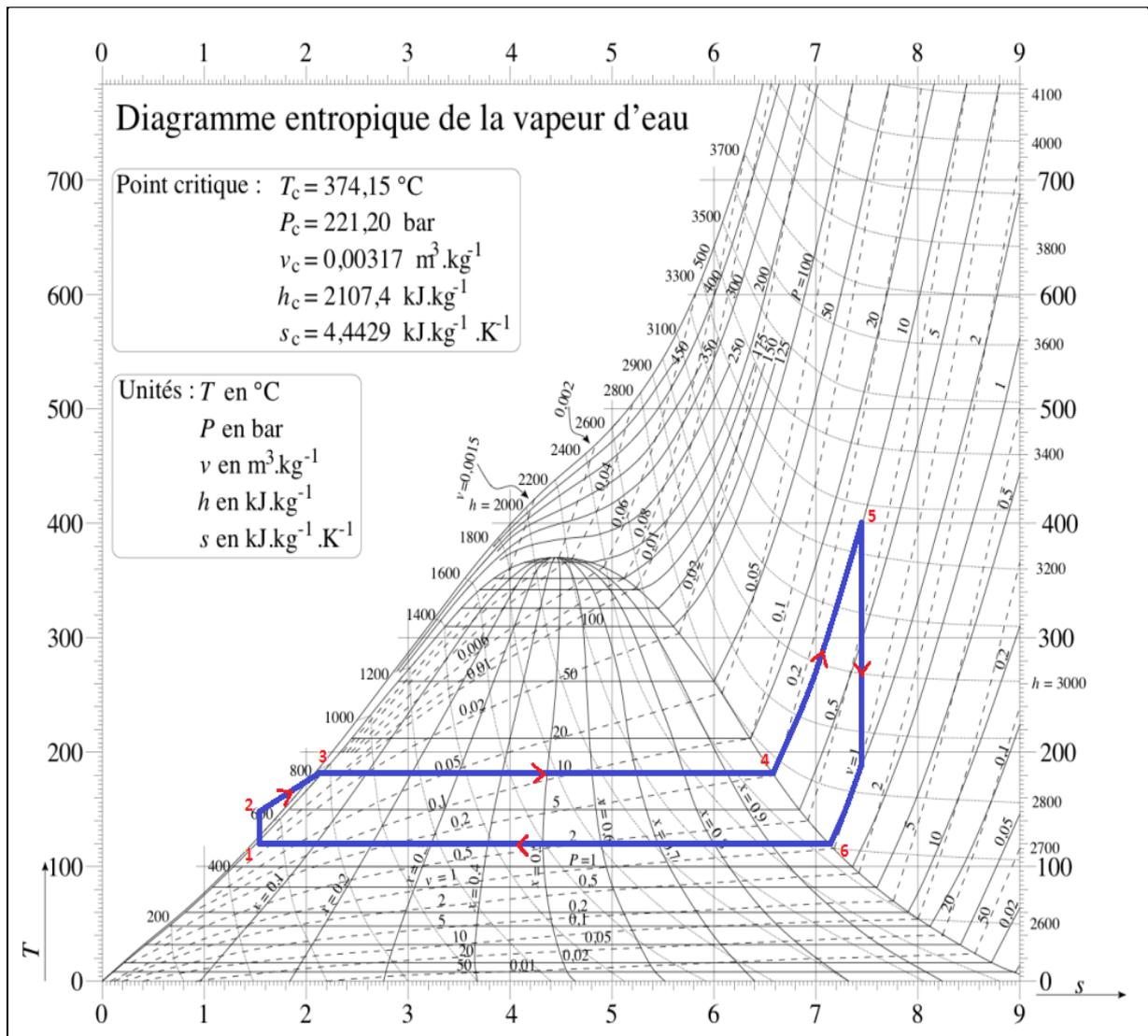
$$\text{AN : } \eta = \frac{(2778,1 - 2493,9428) \cdot 10^3 - 1,0605 \cdot 10^{-3} \cdot (10 - 2) \cdot 10^5}{(2778,1 - 504,7) \cdot 10^3 - 1,0605 \cdot 10^{-3} \cdot (10 - 2) \cdot 10^5}$$

$$\eta = 12,4 \%$$

- Pour le cycle de HIRN

Par la même méthode que le cycle de RANKINE, on a l'équation du rendement (IV.24), on détermine les différents paramètres thermodynamiques de chaque point dans le cycle de HIRN, ces paramètres sont tabulés dans les tables thermodynamique de l'eau (voir l'annexe).

Traisons le cycle fonctionnant avec 2 bars comme basse pression et 10 bars comme haute pression à une température de surchauffe de 400 °C, par exemple :



Figure(IV.8) : cycle de HIRN entre 2 et 10 bars à 400°C

Point 1 :

$$\left\{ \begin{array}{l} P_1 = 2 \text{ bars} \\ x_1 = 0 \end{array} \right. \xrightarrow{\text{A partir de l'annexe 2}} \left\{ \begin{array}{l} T_1 = 120,2 \text{ °C} \\ h_1 = 504,7 \text{ kJ/kg} \\ v_1 = 1,0605 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{kg} \\ s_1 = 1,5301 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K}) \end{array} \right.$$

Point 2 :

$$\begin{cases} P_2 = 10 \text{ bars} \\ s_1 = s_2 = 1,5301 \text{ kJ}/(\text{kg. K}) \end{cases}$$

Point 3 :

$$\begin{cases} P_3 = 10 \text{ bars} \\ x_3 = 0 \end{cases} \quad \xrightarrow{\text{A partir de l'annexe 2}} \quad \begin{cases} T_3 = 179,9^\circ\text{C} \\ h_3 = 762,81 \text{ kJ}/\text{kg} \\ s_3 = 2,1387 \text{ kJ}/(\text{kg. K}) \end{cases}$$

Point 4 :

$$\begin{cases} P_4 = 10 \text{ bars} \\ T_4 = 179,9^\circ\text{C} \end{cases} \quad \xrightarrow{\text{A partir de l'annexe 2}} \quad \begin{cases} h_4 = 2778,1 \text{ kJ}/\text{kg} \\ s_4 = 6,5863 \text{ kJ}/(\text{kg. K}) \end{cases}$$

Point 5 :

$$\begin{cases} P_5 = 10 \text{ bars} \\ T_5 = 400^\circ\text{C} \end{cases} \quad \xrightarrow{\text{A partir de l'annexe 3}} \quad \begin{cases} h_5 = 3263,9 \text{ kJ}/\text{kg} \\ s_5 = 7,4651 \text{ kJ}/(\text{kg. K}) \end{cases}$$

Point 6 :

$$\begin{cases} P_6 = 2 \text{ bars} \\ s_6 = s_5 = 7,4651 \text{ kJ}/(\text{kg. K}) \end{cases} \quad \xrightarrow{\text{A partir de l'annexe 1}} \quad h_6 = 2986 \text{ kJ}/\text{kg}$$

h_6 est obtenue a partir du diagramme du Mollier (voir diagramme annexe).

Calcul du rendement :
$$\eta = \frac{h_5 - h_6 - v.dp}{h_5 - h_1 - v.dp}$$

$$\text{AN : } \eta = \frac{(3263,9 - 2986) \cdot 10^3 - 1,0605 \cdot 10^{-3} \cdot (10 - 2) \cdot 10^5}{(3263,9 - 504,7) \cdot 10^3 - 1,0605 \cdot 10^{-3} \cdot (10 - 2) \cdot 10^5}$$

$$\eta = 15,2 \%$$

b. Cycle de RANKINE

- Pour une P_H constante :

Pour étudier l'influence de la basse pression dans le cycle de RANKINE sur son rendement, on garde une haute pression constante et on fait varier les basses pressions, par la même méthode de calcul citée dans l'exemple précédent on obtient les résultats montrés dans le tableau suivant :

Tableau (IV.3) : Déterminations des différents paramètres h_i et x_5 en fonction des basses pressions

P_H	P_B	h_1	h_3	h_4	h_5	x_5
[bars]	[bars]	[kJ/kg]	[kJ/kg]	[kJ/kg]	[kJ/kg]	/
10	2	504,7	762,81	2778,1	2493,9428	0,9034
	1,5	467,11	762,81	2778,1	2448,6438	0,8884
	1	417,36	762,81	2778,1	2387,2888	0,8724
15	2	504,7	844,84	2792,2	2438,266	0,8781
	1,5	467,11	844,84	2792,2	2394,197	0,8655
	1	417,36	844,84	2792,2	2334,53	0,849
20	2	504,7	908,79	2799,5	2397,389	0,8595
	1,5	467,11	908,79	2799,5	2354,2379	0,84759
	1	417,36	908,79	2799,5	2295,755	0,8318
25	2	504,7	962,11	2803,1	2364,578	0,8446
	1,5	467,11	962,11	2803,1	2322,1915	0,8332
	1	417,36	962,11	2803,1	2264,682	0,8181
30	2	504,7	1008,4	2804,2	2321,448	0,825
	1,5	467,11	1008,4	2804,2	2295,041	0,8209
	1	417,36	1008,4	2804,2	2238,36	0,8064

- Pour une P_B constante :

Pour étudier l'influence de la haute pression dans le cycle de RANKINE, sur son rendement, on garde une haute pression constante et on varie les hautes pressions, par la même méthode de calcul citée dans l'exemple précédent on obtient les résultats montrés dans le tableau suivant :

Tableau (IV.4) : Déterminations des différents paramètres h_i et x_i en fonction des hautes pressions

P_B	P_H	h_1	h_3	h_4	h_5	x_5
[bars]	[bars]	[kJ/kg]	[kJ/kg]	[kJ/kg]	[kJ/kg]	/
3	10	561,47	762,81	2778,1	2529,26	0,914
	15	561,47	844,84	2792,2	2502,7525	0,897
	20	561,47	908,78	2799,5	2460,4941	0,8574
	30	561,47	1008,4	2804,2	2397,85	0,848
5	10	640,23	762,81	2778,1	2648,8	0,9526
	15	640,23	844,84	2792,2	2588,73	0,924
	20	640,23	908,78	2799,5	2544,57	0,903
	30	640,23	1008,4	2804,2	2479,11	0,8721
7	10	697,22	762,81	2778,1	2710,19	0,974
	15	697,22	844,84	2792,2	2648,19	0,944
	20	697,22	908,78	2799,5	2602,66	0,9221
	30	697,22	1008,4	2804,2	2535,4	0,8896

c. **Cycle de HIRN**

- Pour une P_H constante :

Pour étudier l'influence de la basse pression ainsi que celui de la température de surchauffe dans le cycle de HIRN sur son rendement, on fixe la haute pression et on fait varier les basses pressions et la température de surchauffe, en utilisant la même méthode de calcul présentée dans l'exemple de calcul (cycle de HIRN, voir page 77), on aura les résultats montrés dans les tableaux suivants :

- Pour $P_H = 10$ bars :

Tableau (IV.5) : Détermination des paramètres h_i et x_i en fonction des températures ($P_H = 10$ bars)

P_H	P_B	T	h_1	h_3	h_4	h_5	h_6	x_6
[bars]	[bars]	[K]	[kJ/kg]	[kJ/kg]	[kJ/kg]	[kJ/kg]	[kJ/kg]	/
10	2	200	504,7	762,81	2778,1	2827,9	2536,3	0,9226
		240	504,7	762,81	2778,1	2920,4	2610,15	0,9662
		280	504,7	762,81	2778,1	3008,2	2674,99	0,9856
		320	504,7	762,81	2778,1	3093,9	2742	/
		360	504,7	762,81	2778,1	3178,9	2787	/
		400	504,7	762,81	2778,1	3263,9	2840	/
10	1,5	200	467,11	762,81	2778,1	2827,9	2490,05	0,9086
		240	467,11	762,81	2778,1	2920,4	2562,23	0,940999
		280	467,11	762,81	2778,1	3008,2	2625,61	0,96946
		320	467,11	762,81	2778,1	3093,9	2683,18	0,99532
		360	467,11	762,81	2778,1	3178,9	2738,40	/
		400	467,11	762,81	2778,1	3263,9	2792,22	/
10	1	200	417,36	762,81	2778,1	2827,9	2427,43	0,8901
		240	417,36	762,81	2778,1	2920,4	2797,41	0,92113
		280	417,36	762,81	2778,1	3008,2	2558,84	0,94834
		320	417,36	762,81	2778,1	3093,9	2614,66	0,97306
		360	417,36	762,81	2778,1	3178,9	2666,29	0,9959
		400	417,36	762,81	2778,1	3263,9	2715,95	/

- Pour $P_H = 15$ bars :

Tableau (IV.6) : Détermination des paramètres h_i et x_i en fonction des températures ($P_H = 15$ bars)

P_H	P_B	T	h_1	h_3	h_4	h_5	h_6	x_6
[bars]	[bars]	[K]	[kJ/kg]	[kJ/kg]	[kJ/kg]	[kJ/kg]	[kJ/kg]	/
15	2	200	504,7	844,84	2792,2	2796,8	2442,12	0,87985
		240	504,7	844,84	2792,2	2899,3	2524,03	0,91704
		280	504,7	844,84	2792,2	2992,7	2593	0,94837
		320	504,7	844,84	2792,2	3081,9	2654,26	0,97618
		360	504,7	844,84	2792,2	3169,2	2707	/
		400	504,7	844,84	2792,2	3255,8	2760	/
15	1,5	200	467,11	844,84	2792,2	2796,8	2397,99	0,86723
		240	467,11	844,84	2792,2	2899,3	2478,05	0,90319
		280	467,11	844,84	2792,2	2992,7	2545,47	0,93347
		320	467,11	844,84	2792,2	3081,9	2605,34	0,96036
		360	467,11	844,84	2792,2	3169,2	2660,14	0,98487
		400	467,11	844,84	2792,2	3255,8	2711,4	/
15	1	200	417,36	844,84	2792,2	2796,8	2338,18	0,850614
		240	417,36	844,84	2792,2	2899,3	2415,8	0,885
		280	417,36	844,84	2792,2	2992,7	2481,15	0,91393
		320	417,36	844,84	2792,2	3081,9	2539,20	0,93964
		360	417,36	844,84	2792,2	3169,2	2592,33	0,9632
		400	417,36	844,84	2792,2	3255,8	2641,77	0,98507

- Pour $P_H = 20$ bars :

Tableau (IV.7) : Détermination des paramètres h_i et x_i en fonction des températures ($P_H = 20$ bars)

P_H	P_B	T	h_1	h_3	h_4	h_5	h_6	x_6
[bars]	[bars]	[K]	[kJ/kg]	[kJ/kg]	[kJ/kg]	[kJ/kg]	[kJ/kg]	/
20	2	200	504,7	908,79	2799,5	/	/	/
		240	504,7	908,79	2799,5	2876,5	2458,09	0,8871
		280	504,7	908,79	2799,5	2976,4	2531,90	0,92062
		320	504,7	908,79	2799,5	3096,5	2595,79	0,94963
		360	504,7	908,79	2799,5	3159,3	2653,43	0,97591
		400	504,7	908,79	2799,5	2347,6	2706,7	1
		440	504,7	908,79	2799,5	3335,5	2760	/
20	1,5	200	467,11	908,79	2799,5	/	/	/
		240	467,11	908,79	2799,5	2876,5	2413,96	0,8744
		280	467,11	908,79	2799,5	2976,4	2484,75	0,9062
		320	467,11	908,79	2799,5	3096,5	2548,21	0,9333
		360	467,11	908,79	2799,5	3159,3	2604,55	0,960
		400	467,11	908,79	2799,5	2347,6	2656,62	0,9834
		440	467,11	908,79	2799,5	3335,5	2705,48	/
20	1	200	417,36	908,79	2799,5	/	/	/
		240	417,36	908,79	2799,5	2876,5	2353,28	0,85732
		280	417,36	908,79	2799,5	2976,4	2423,22	0,88829
		320	417,36	908,79	2799,5	3096,5	2483,76	0,9151
		360	417,36	908,79	2799,5	3159,3	2538,38	0,939291
		400	417,36	908,79	2799,5	2347,6	2588,85	0,961646
		440	417,36	908,79	2799,5	3335,5	2636,17	0,982598

- Pour une P_B constante :

Pour étudier l'influence de la haute pression ainsi que celui de la température de surchauffe dans le cycle de HIRN, sur son rendement, on garde une basse pression constante et on fait varier les hautes pressions et la température de surchauffe et on obtient les résultats montrés dans les tableaux suivants :

- Pour $P_B = 3$ bars :

Tableau (IV.8) : Détermination des paramètres h_i et x_i en fonction des températures ($P_B = 3$ bars)

P_B	P_H	T	h_1	h_3	h_4	h_5	h_6	x_6
[bars]	[bars]	[K]	[kJ/kg]	[kJ/kg]	[kJ/kg]	[kJ/kg]	[kJ/kg]	/
3	10	200	561,47	762,81	2778,1	2828,9	2604,11	0,944
		240	561,47	762,81	2778,1	2920,4	2680,45	0,979286
		280	561,47	762,81	2778,1	3008,2	2745,71	/
		320	561,47	762,81	2778,1	3093,9	2813,34	/
		360	561,47	762,81	2778,1	3178,9	2877,04	/
		400	561,47	762,81	2778,1	3263,9	2941,38	/
		440	561,47	762,81	2778,1	3349,3	3006,42	/
		500	561,47	762,81	2778,1	3478,5	3104,37	/
		540	561,47	762,81	2778,1	3566,26	3169,40	/
3	15	200	561,47	844,84	2792,2	2796,8	2506,74	0,899
		240	561,47	844,84	2792,2	2899,3	2591,42	0,93814
		280	561,47	844,84	2792,2	2992,7	2662,77	0,97109
		320	561,47	844,84	2792,2	3081,9	2726,10	/
		360	561,47	844,84	2792,2	3169,2	2786,24	/
		400	561,47	844,84	2792,2	3255,8	2846,27	/
		440	561,47	844,84	2792,2	3342,5	2867,05	/
		500	561,47	844,84	2792,2	3473,1	2996,56	/
		540	561,47	844,84	2792,2	3560,9	3056,22	/
3	20	200	561,47	908,79	2977,5	/	/	/
		240	561,47	908,79	2977,5	2865,5	2523,75	0,90664
		280	561,47	908,79	2977,5	2976,4	2599,55	0,9419
		320	561,47	908,79	2977,5	3069,5	2665,60	0,972425
		360	561,47	908,79	2977,5	3159,3	2725,19	0,99996
		400	561,47	908,79	2977,5	3247,6	2782,09	/
		440	561,47	908,79	2977,5	3335,5	2839,82	/
		500	561,47	908,79	2977,5	3467,6	2924,77	/
		540	561,47	908,79	2977,5	3556,1	2982,49	/
3	30	200	561,47	1008,4	2804,2	/	/	/
		240	561,47	1008,4	2804,2	2824,3	2413,97	0,85613
		280	561,47	1008,4	2804,2	2941,3	2503,32	0,89743
		320	561,47	1008,4	2804,2	3043,4	2575,84	0,930941
		360	561,47	1008,4	2804,2	3138,7	2639,13	0,96019
		400	561,47	1008,4	2804,2	3230,9	2696,52	0,98671
		440	561,47	1008,4	2804,2	3321,5	2750,55	/
		500	561,47	1008,4	2804,2	3456,5	2830,35	/
		540	561,47	1008,4	2804,2	3546,6	2882,20	/

- Pour $P_B = 5$ bars :

Tableau (IV.9) : Détermination des paramètres h_i et x_i en fonction des températures ($P_B = 5$ bars)

P_B	P_H	T	h_1	h_3	h_4	h_5	h_6	x_6
[bars]	[bars]	[K]	[kJ/kg]	[kJ/kg]	[kJ/kg]	[kJ/kg]	[kJ/kg]	/
5	10	200	640,23	762,81	2778,1	2828,9	2694,18	0,9744
		240	640,23	762,81	2778,1	2920,4	2775,20	/
		280	640,23	762,81	2778,1	3008,2	2849,51	/
		320	640,23	762,81	2778,1	3093,9	2922,9	/
		360	640,23	762,81	2778,1	3178,9	2995,41	/
		400	640,23	762,81	2778,1	3263,9	3067,95	/
		440	640,23	762,81	2778,1	3349,3	3140,81	/
		500	640,23	762,81	2778,1	3478,5	3251,25	/
		540	640,23	762,81	2778,1	3566,26	3323,94	/
5	15	200	640,23	844,84	2792,2	2796,8	2592,9	0,9261
		240	640,23	844,84	2792,2	2899,3	2681,4	0,9681
		280	640,23	844,84	2792,2	2992,7	2756,07	/
		320	640,23	844,84	2792,2	3081,9	2825,08	/
		360	640,23	844,84	2792,2	3169,2	2893,39	/
		400	640,23	844,84	2792,2	3255,8	2956,95	/
		440	640,23	844,84	2792,2	3342,5	3027,20	/
		500	640,23	844,84	2792,2	3473,1	3129,48	/
		540	640,23	844,84	2792,2	3560,9	3197,87	/
5	20	200	640,23	908,79	2977,5	/	/	/
		240	640,23	908,79	2977,5	2865,5	2610,16	0,9342
		280	640,23	908,79	2977,5	2976,4	2689,9	0,972
		320	640,23	908,79	2977,5	3069,5	2759,18	/
		360	640,23	908,79	2977,5	3159,3	2824,1	/
		400	640,23	908,79	2977,5	3247,6	2888,85	/
		440	640,23	908,79	2977,5	3335,5	2952,79	/
		500	640,23	908,79	2977,5	3467,6	3047,05	/
		540	640,23	908,79	2977,5	3556,1	3013,34	/
5	30	200	640,23	1008,4	2804,2	/	/	/
		240	640,23	1008,4	2804,2	2824,3	2495,95	0,88011
		280	640,23	1008,4	2804,2	2941,3	2589,33	0,9244
		320	640,23	1008,4	2804,2	3043,4	2665,12	0,96035
		360	640,23	1008,4	2804,2	3138,7	2731,26	0,991715
		400	640,23	1008,4	2804,2	3230,9	2792,52	/
		440	640,23	1008,4	2804,2	3321,5	2852,06	/
		500	640,23	1008,4	2804,2	3456,5	2941,55	/
		540	640,23	1008,4	2804,2	3546,6	3001,55	/

- Pour $P_B = 7$ bars :

Tableau (IV.10) : Détermination des paramètres h_i et x_6 en fonction des températures ($P_B = 7$ bars)

P_B	P_H	T	h_1	h_3	h_4	h_5	h_6	x_6
[bars]	[bars]	[K]	[kJ/kg]	[kJ/kg]	[kJ/kg]	[kJ/kg]	[kJ/kg]	/
7	10	200	697,22	762,81	2778,1	2827,9	2757,39	0,99703
		240	697,22	762,81	2778,1	2920,4	2842,57	/
		280	697,22	762,81	2778,1	3008,2	2922,75	/
		320	697,22	762,81	2778,1	3093,9	3002,65	/
		360	697,22	762,81	2778,1	3178,9	3080,98	/
		400	697,22	762,81	2778,1	3263,9	3159,42	/
		440	697,22	762,81	2778,1	3349,3	3238,22	/
		500	697,22	762,81	2778,1	3478,5	3357,09	/
		540	697,22	762,81	2778,1	3566,26	3436,38	/
7	15	200	697,22	844,84	2792,2	2796,8	2652,49	0,94627
		240	697,22	844,84	2792,2	2899,3	2743,72	0,99042
		280	697,22	844,84	2792,2	2992,7	2822,34	/
		320	697,22	844,84	2792,2	3081,9	2897,60	/
		360	697,22	844,84	2792,2	3169,2	2970,70	/
		400	697,22	844,84	2792,2	3255,8	3043,26	/
		440	697,22	844,84	2792,2	3342,5	3114,81	/
		500	697,22	844,84	2792,2	3473,1	3226,15	/
		540	697,22	844,84	2792,2	3560,9	3300,23	/
7	20	200	697,22	908,79	2977,5	/	/	/
		240	697,22	908,79	2977,5	2865,5	2670,28	0,95788
		280	697,22	908,79	2977,5	2976,4	2752,48	0,99466
		320	697,22	908,79	2977,5	3069,5	2825,64	/
		360	697,22	908,79	2977,5	3159,3	2896,57	/
		400	697,22	908,79	2977,5	3247,6	2965,80	/
		440	697,22	908,79	2977,5	3335,5	3034,67	/
		500	697,22	908,79	2977,5	3467,6	3138,94	/
		540	697,22	908,79	2977,5	3556,1	3208,91	/
7	30	200	697,22	1008,4	2804,2	/	/	/
		240	697,22	1008,4	2804,2	2824,3	2552,54	0,8978
		280	697,22	1008,4	2804,2	2941,3	2603,8	0,944
		320	697,22	1008,4	2804,2	3043,4	2727,02	0,98234
		360	697,22	1008,4	2804,2	3138,7	2795,58	/
		400	697,22	1008,4	2804,2	3230,9	2861,87	/
		440	697,22	1008,4	2804,2	3321,5	2926,24	/
		500	697,22	1008,4	2804,2	3456,5	3023,11	/
		540	697,22	1008,4	2804,2	3546,6	3088,14	/

4. Simulation

Nous avons utilisés le logiciel Mathcad 15.0 pour simulé et tracer les graphes. *Mathcad* est un software mathématique qui nous permet de résoudre, analyser et partager les calculs techniques. Avec son interface bloc-notes unique, le logiciel intègre dans une même feuille de calcul les notations, textes et graphiques mathématiques standard. Il contient des fonctions de calcul numérique et de calcul formel.

Parametric Technology Corporation (PTC) a racheté Mathsoft en avril 2006. Mathcad est aujourd'hui la propriété de PTC, qui est une société qui développe et commercialise plusieurs logiciels, tel que ceux de nos calculs.

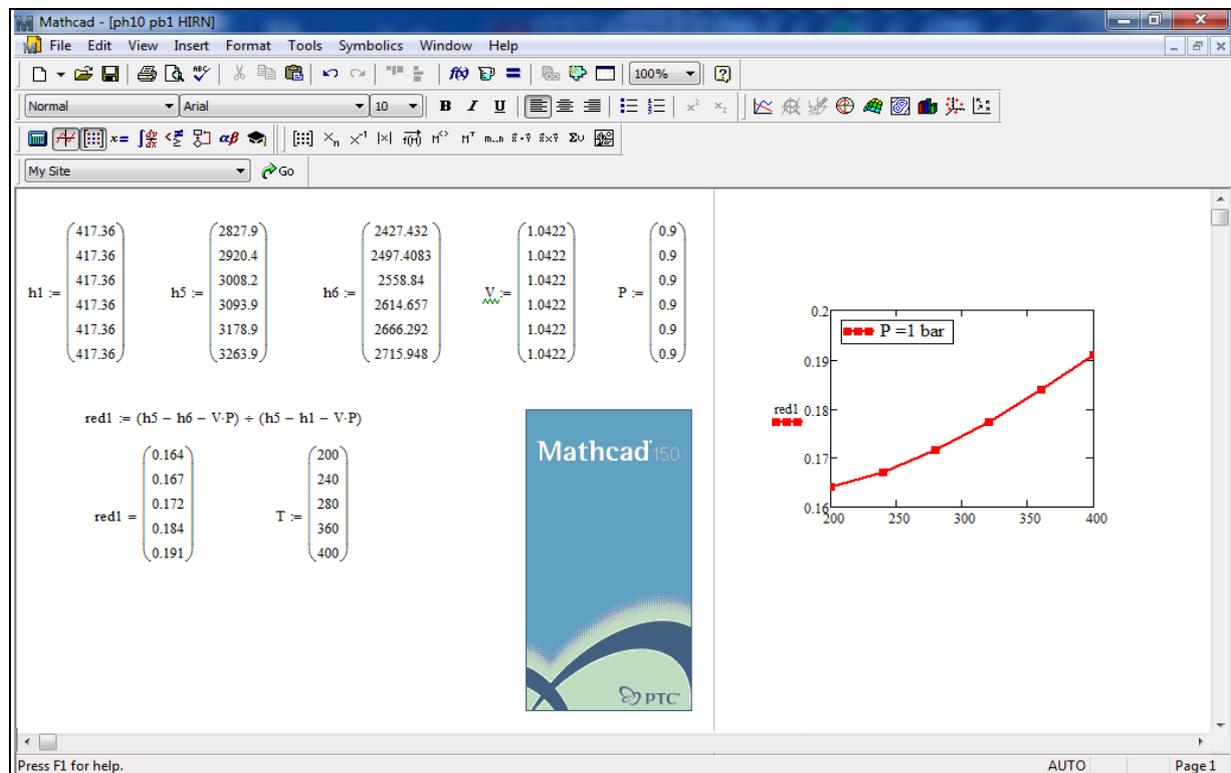


Figure (IV.9) : Interface du logiciel Mathcad

4.1. Contraintes de travail

- ***Haute pression :***

La pression de la chaudière, qui est celle de la sortie de la pompe, est prise égale à la pression de saturation de la solution liquide à la température d'évaporation.

- ***Basse pression :***

La pression basse dans le condenseur, qui est celle de la sortie de la turbine, est égale à la pression de saturation du fluide à la température de condensation.

- ***Températures :***

La chaudière et le surchauffeur à haute pression sont alimentés en parallèle, par une seule source de chaleur qui n'est d'autre que l'énergie solaire concentrée.

4.2. Simulation du cycle de RANKINE

4.2.1. Influence de la basse pression

Ces graphes sont tracés à partir du tableau (IV.8).

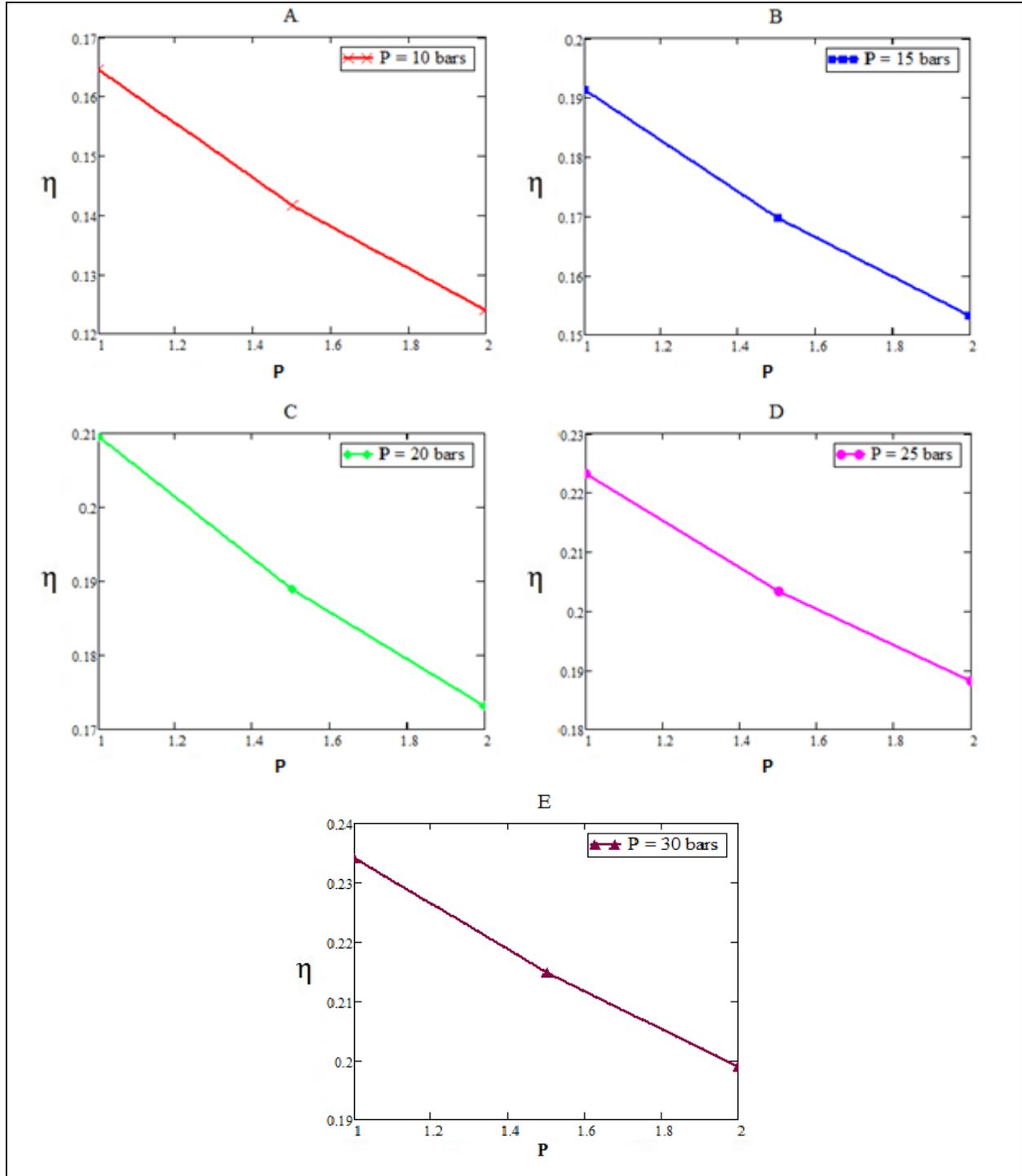


Figure (IV.10) : Variation du rendement en fonction des basses pressions

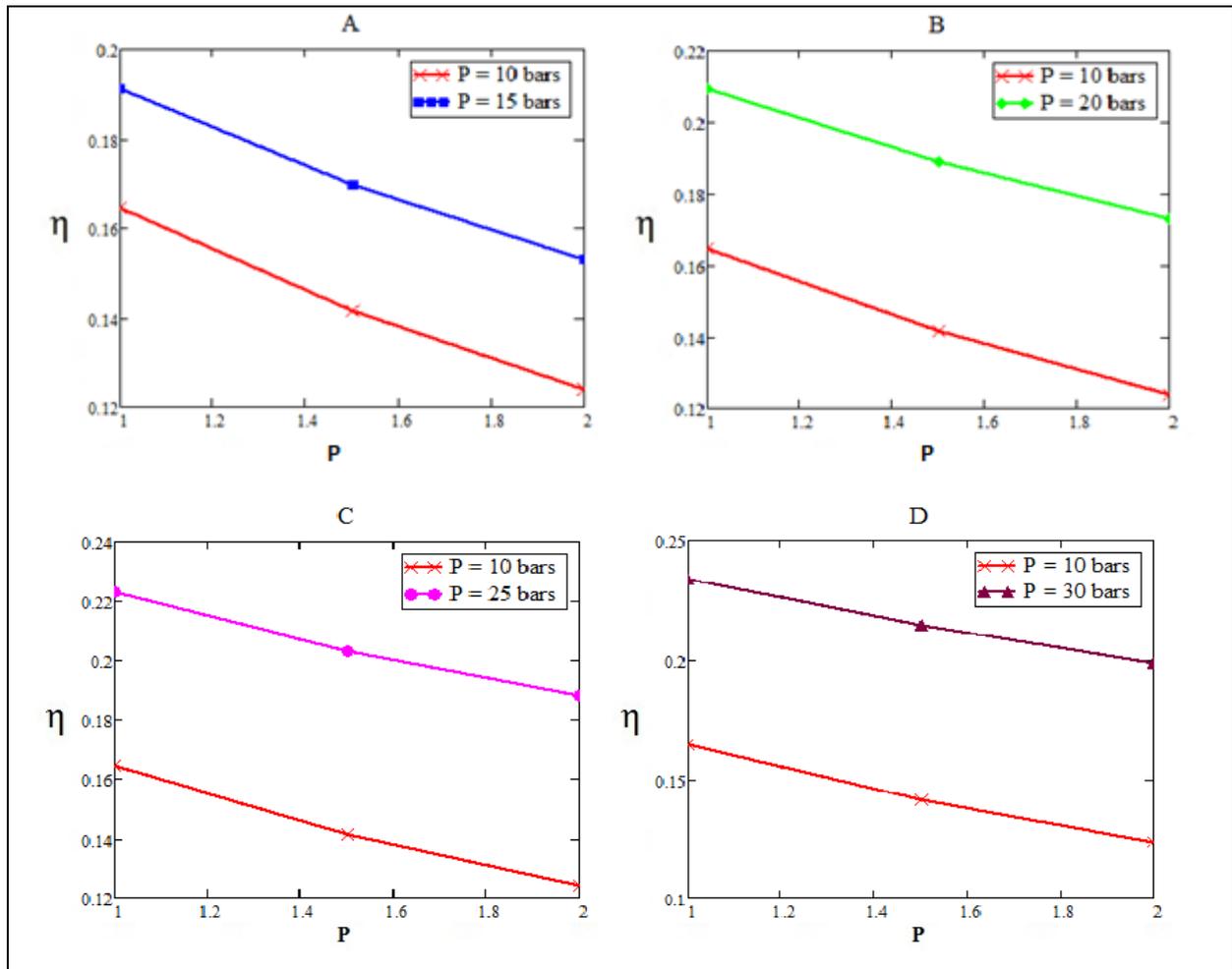


Figure (IV.11) : Variation du rendement en fonction des basses pressions pour deux hautes pressions

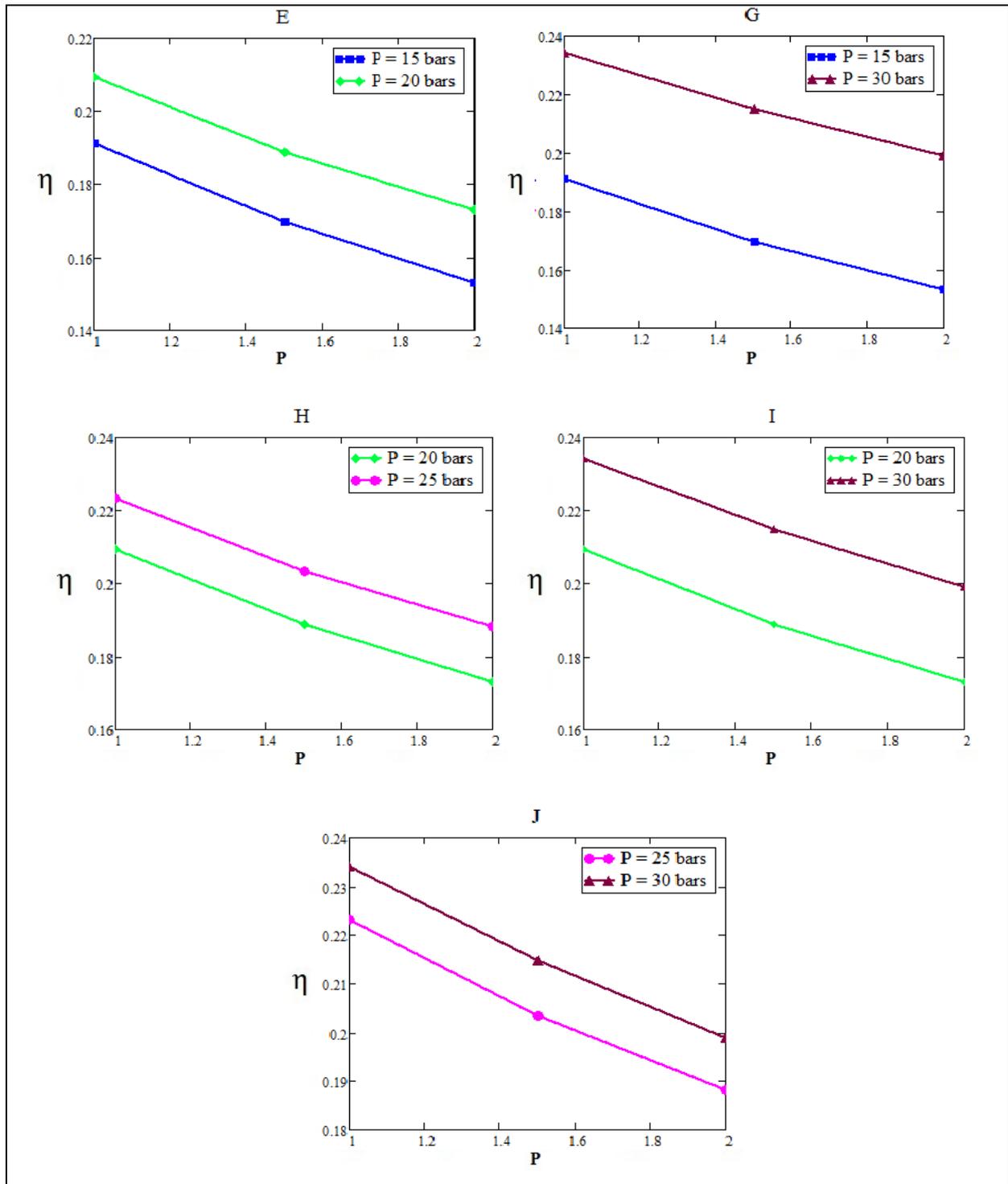


Figure (IV.12) : Variation du rendement en fonction des basses pressions pour deux hautes pressions

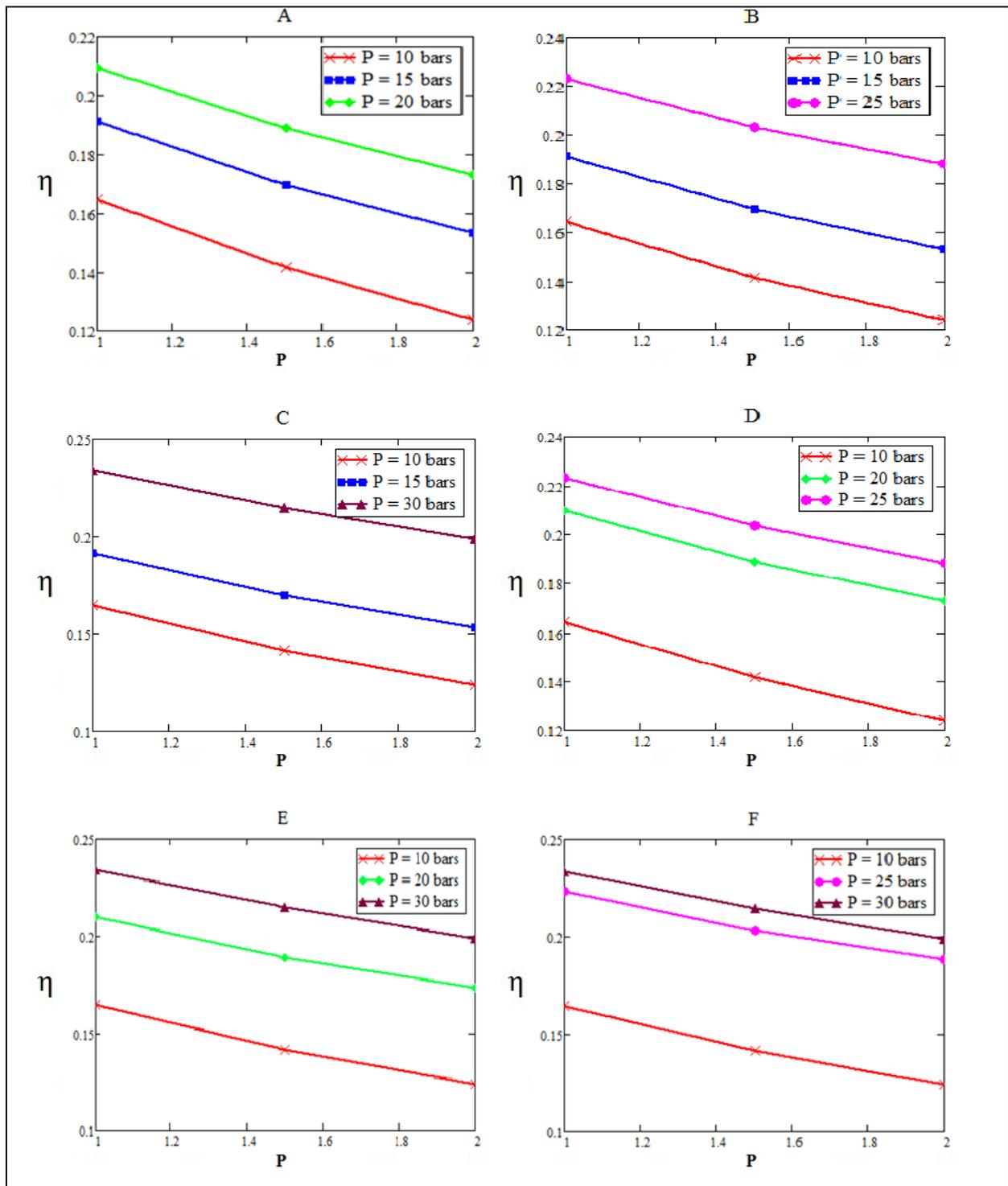


Figure (IV.13) : Variation du rendement en fonction des basses pressions pour trois hautes pressions

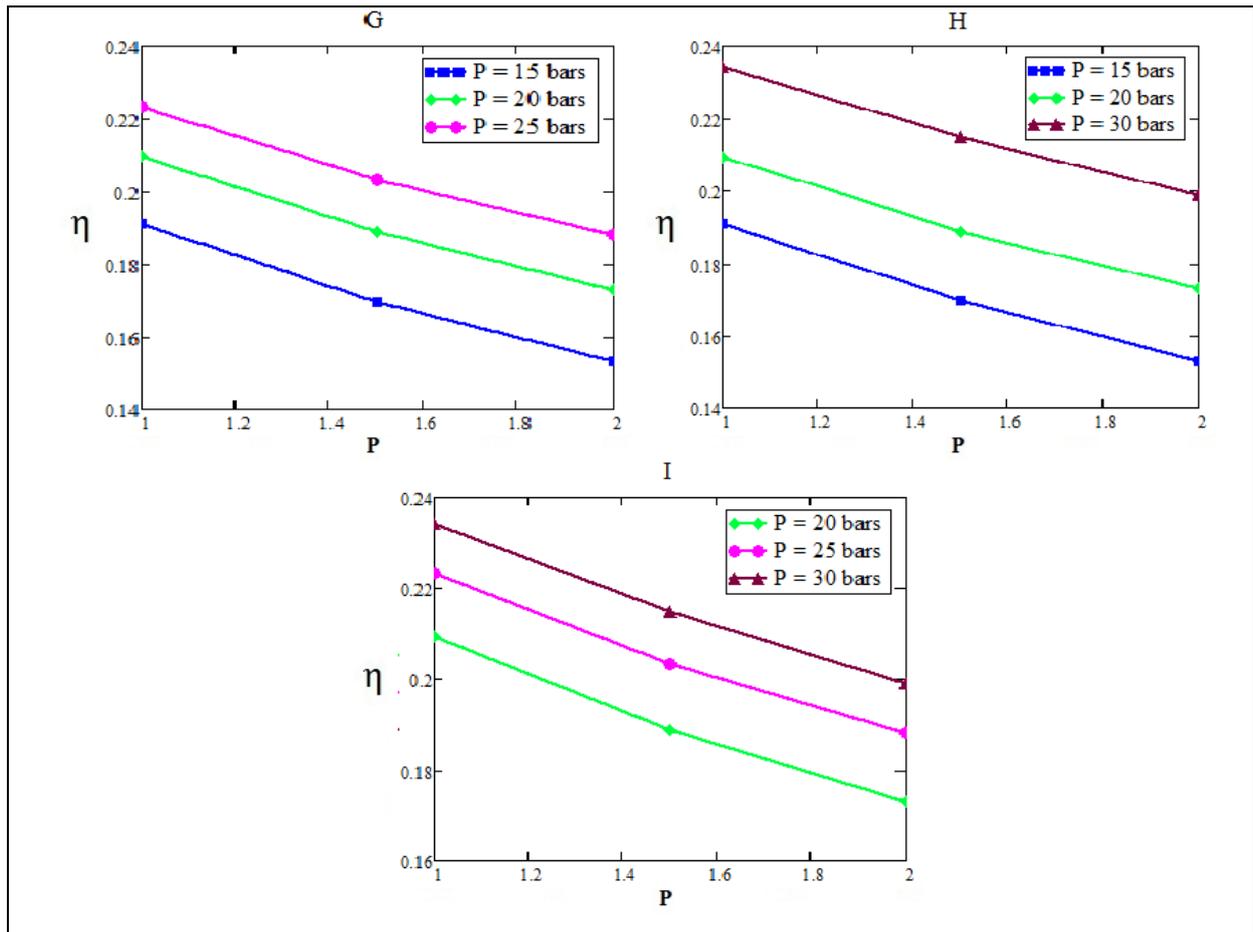


Figure (IV.14) : Variation du rendement en fonction des basses pressions pour trois hautes pressions

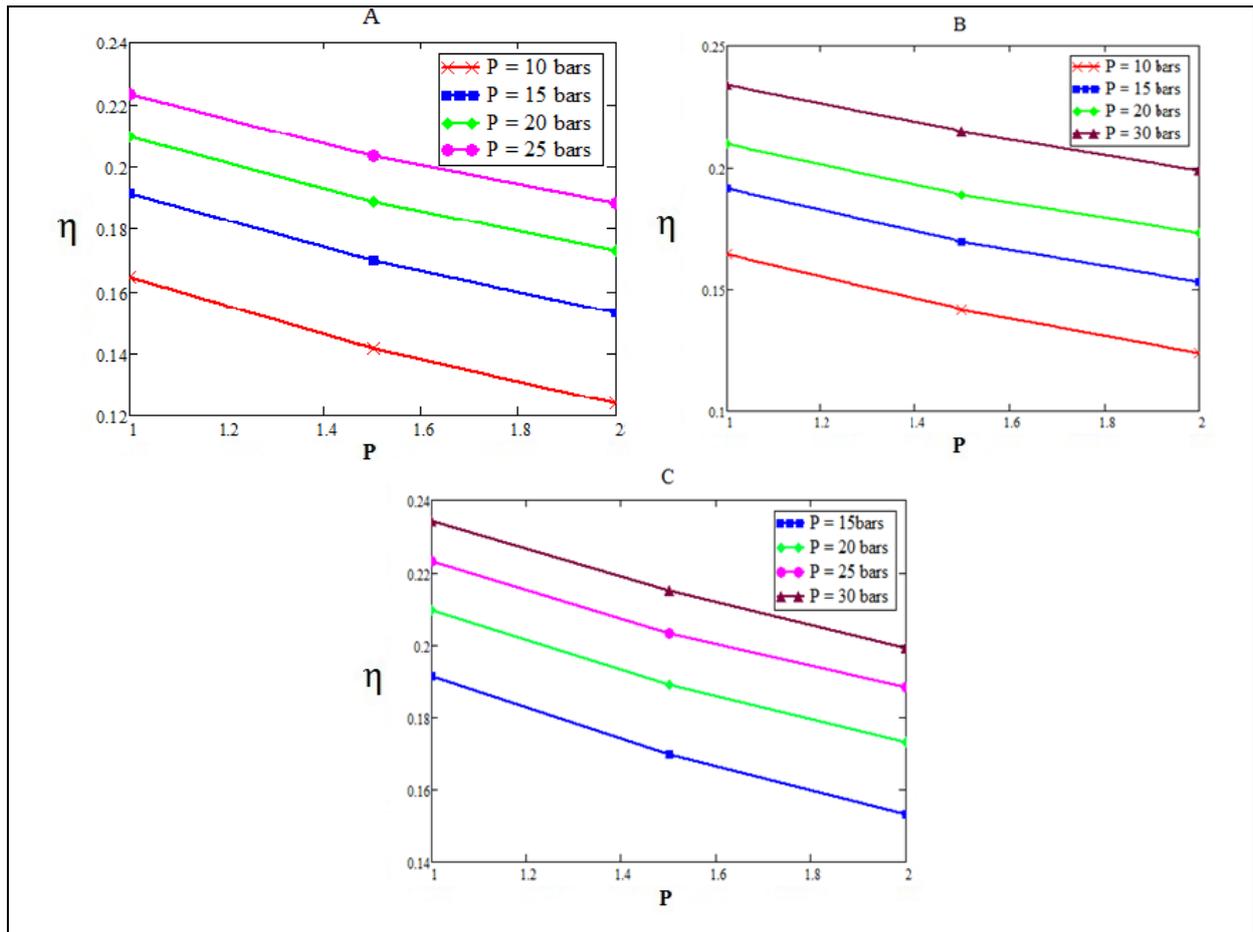


Figure (IV.15) : Variation du rendement en fonction des basses pressions pour quatre hautes pressions

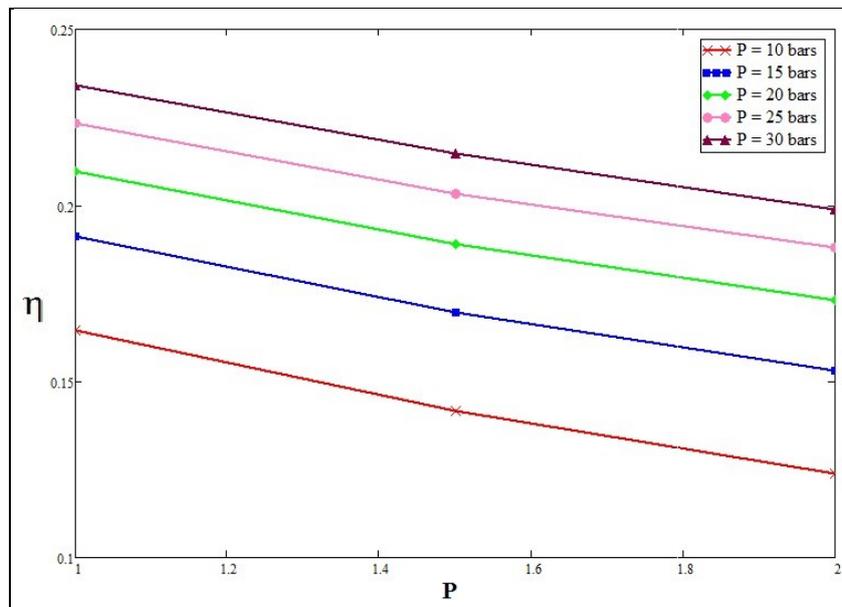


Figure (IV.16) : Variation du rendement en fonction des basses pressions pour différentes hautes pressions

4.2.2. Influence de la haute pression

Ces graphes sont tracés à partir du tableau (IV.4).

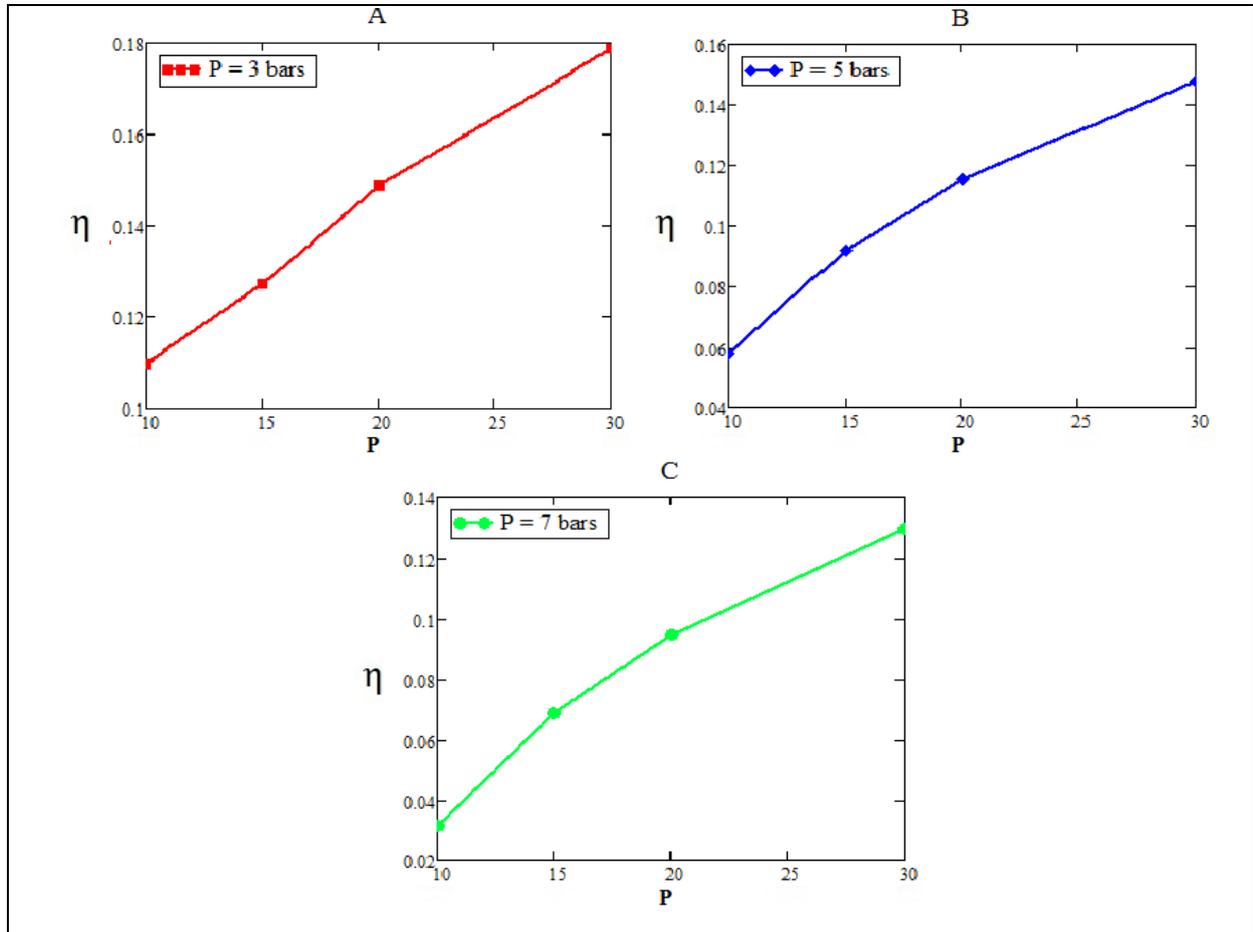


Figure (IV.17) : Variation du rendement en fonction des hautes pressions

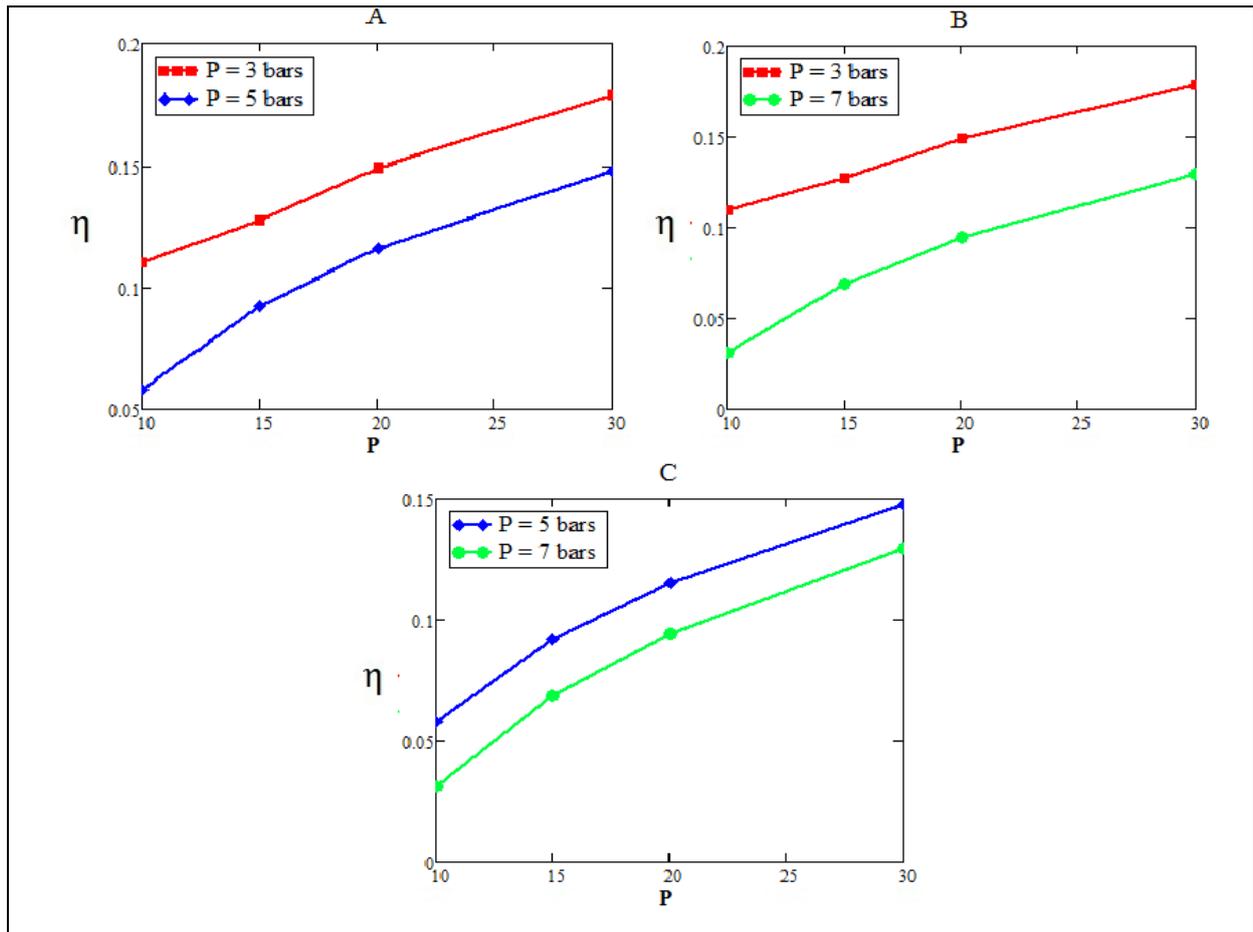


Figure (IV.18) : Variation du rendement en fonction des hautes pressions pour deux basses pressions

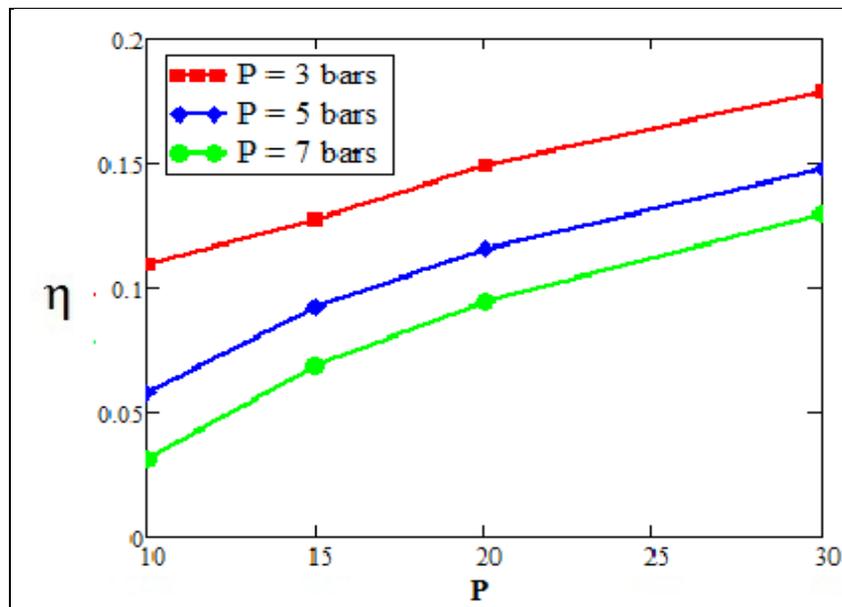


Figure (IV.19) : Variation du rendement en fonction des hautes pressions pour différentes basses pression

4.3. Simulation du cycle de HIRN (variation de la température)

4.3.1. Influence de la basse pression (P_B)a. Pour $P_H = 10$ bars

Ces graphes sont tracés à partir du tableau (IV.5).

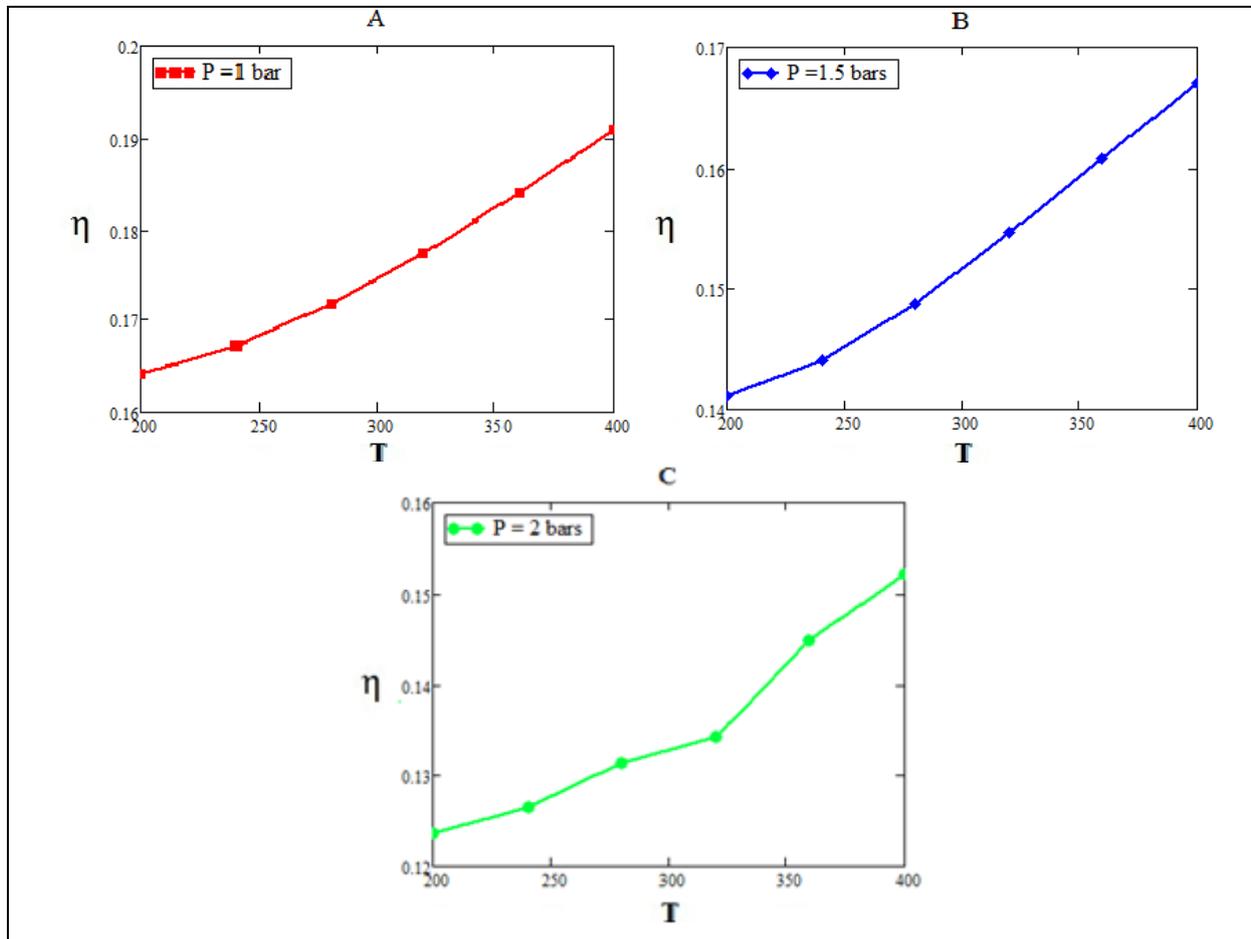


Figure (IV.20) : Variation du rendement en fonction des températures ($P_H = 10$ bars)

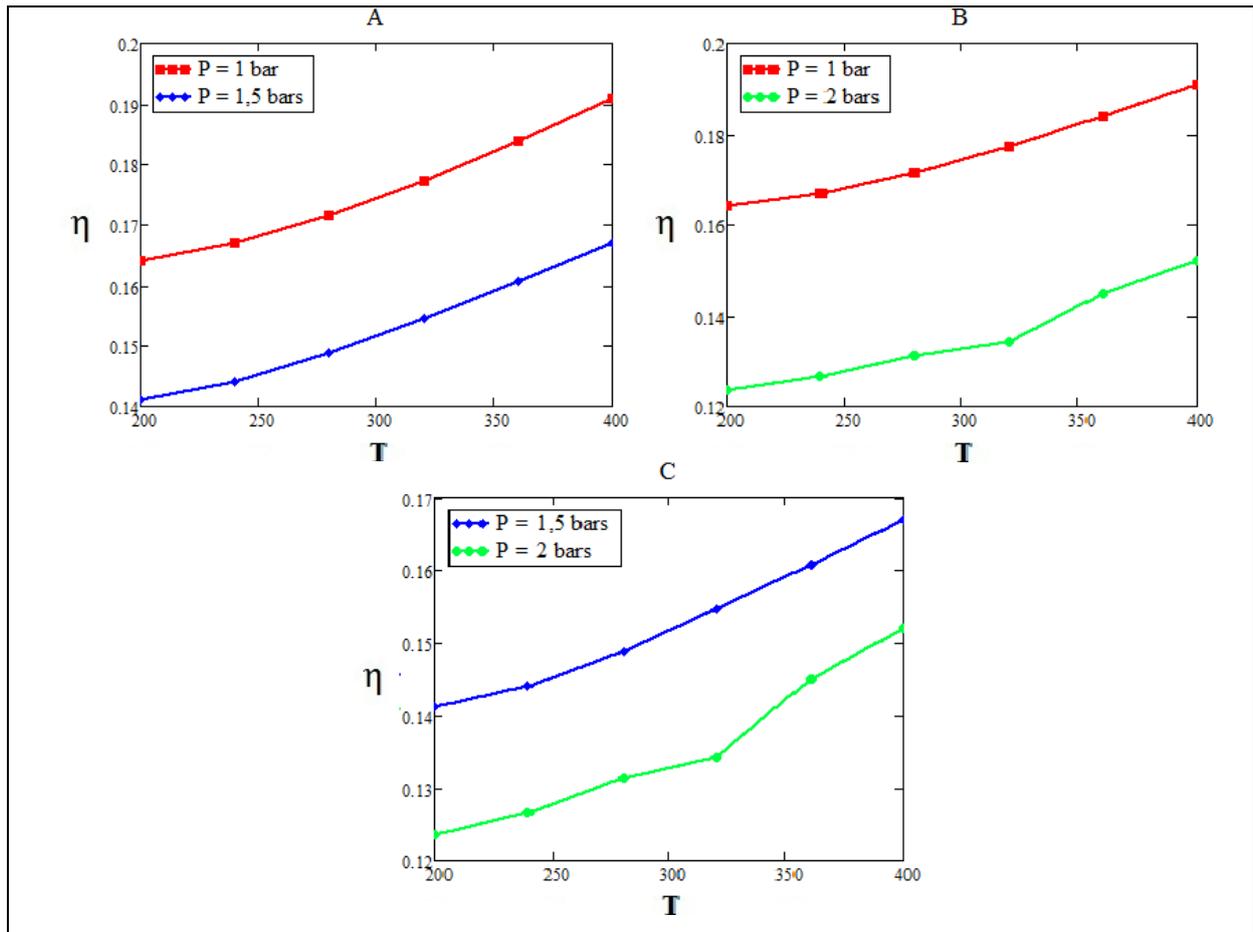


Figure (IV.21) : Variation du rendement en fonction des températures pour deux basses pressions ($P_H = 10$ bars)

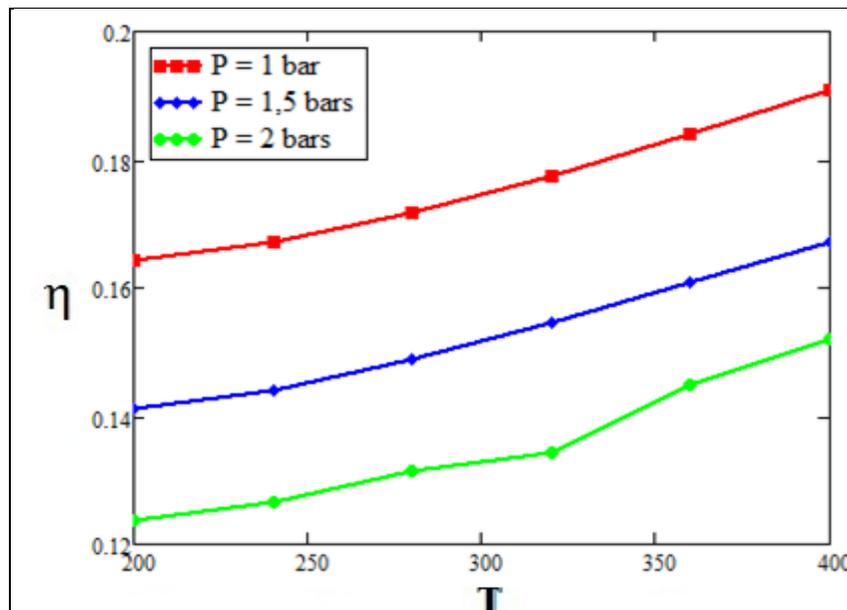


Figure (IV.22) : Variation du rendement en fonction des températures pour différentes basses pression ($P_H = 10$ bars)

b. Pour $P_H = 15$ bars

Ces graphes sont tracés à partir du tableau (IV.6).

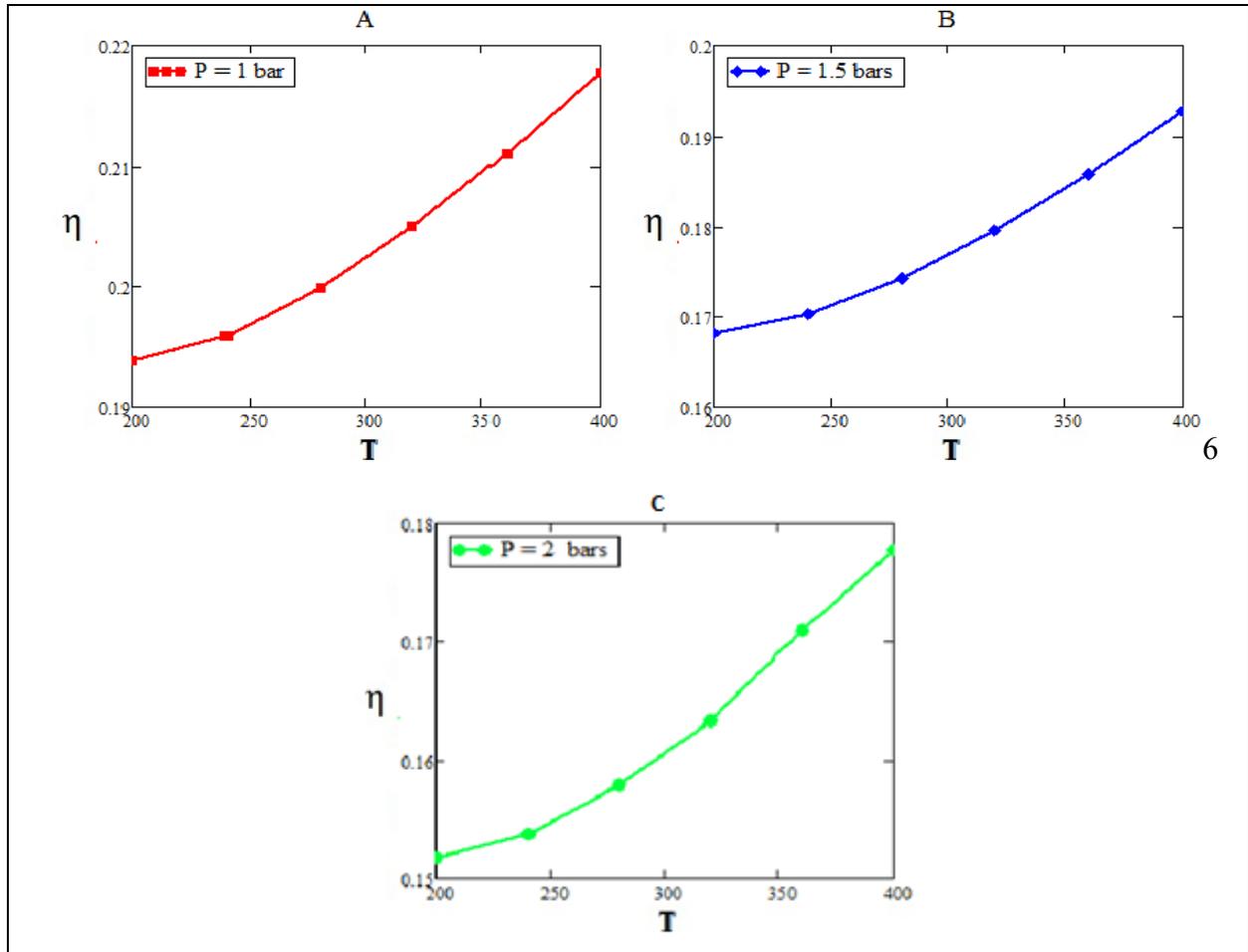


Figure (IV.23) : Variation du rendement en fonction des températures ($P_H = 15$ bars)

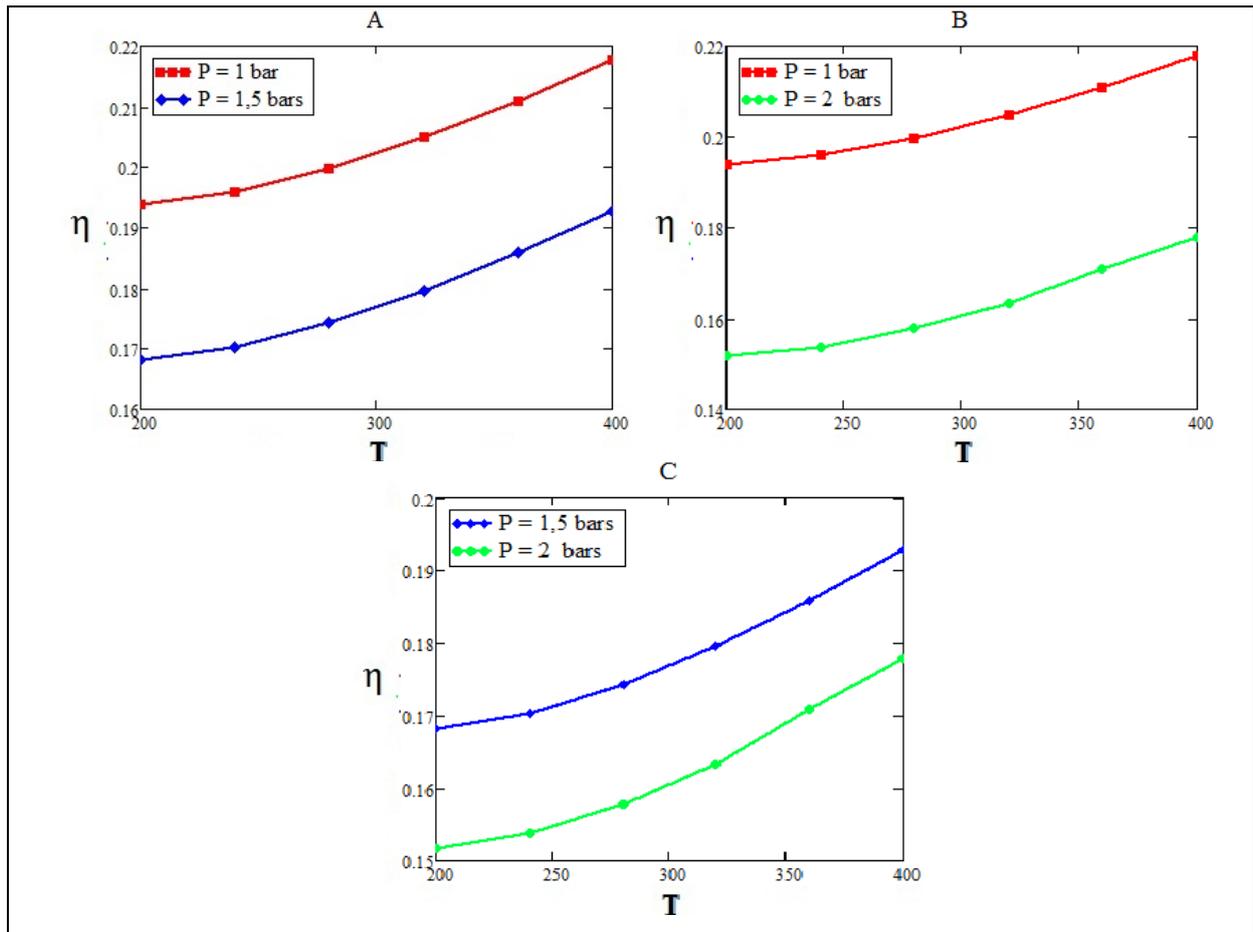


Figure (IV.24) : Variation du rendement en fonction des températures pour deux basses pressions ($P_H = 15$ bars)

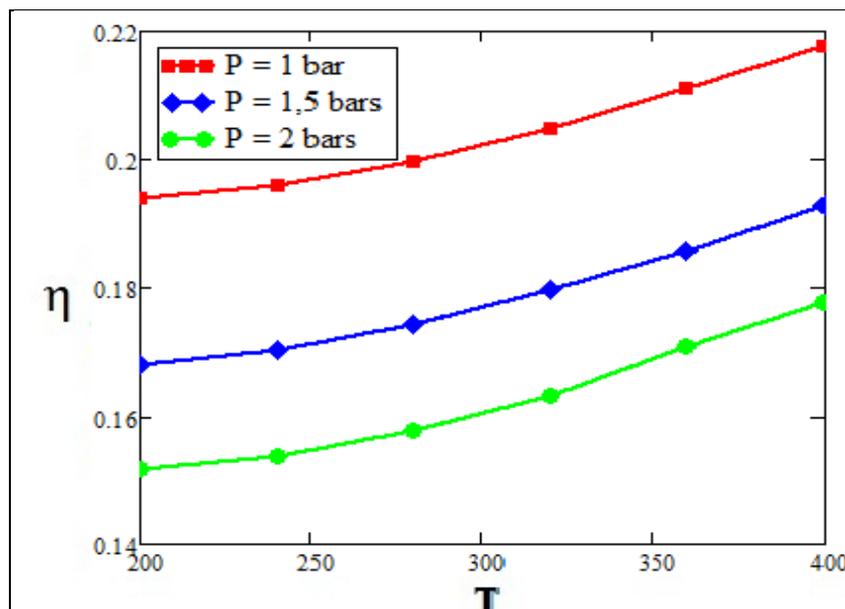


Figure (IV.25) : Variation du rendement en fonction des températures pour différentes basses pressions ($P_H = 15$ bars)

c. Pour $P_H = 20$ bars

Ces graphes sont tracés à partir du tableau (IV.7).

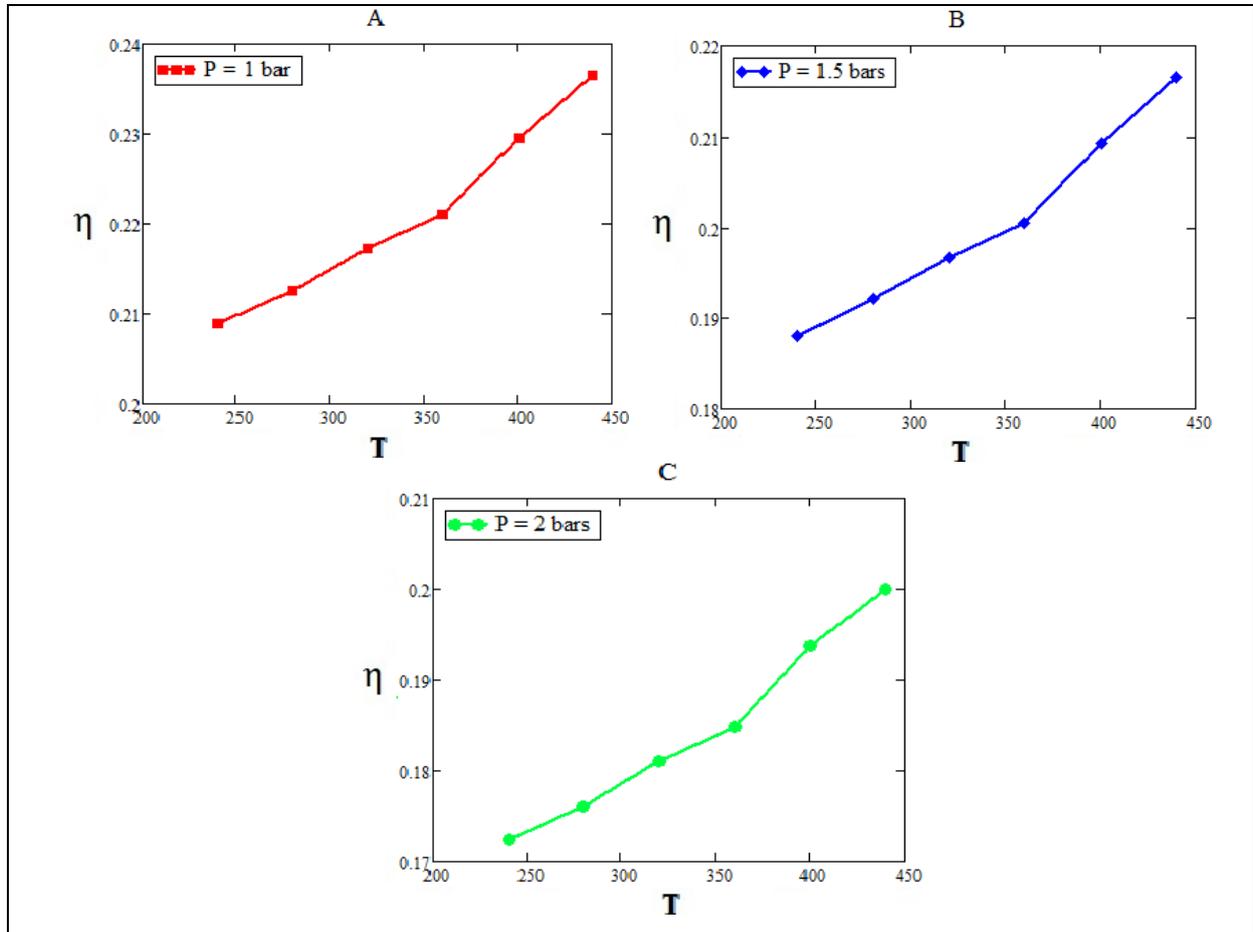


Figure (IV.26) : Variation du rendement en fonction des températures ($P_H = 20$ bars)

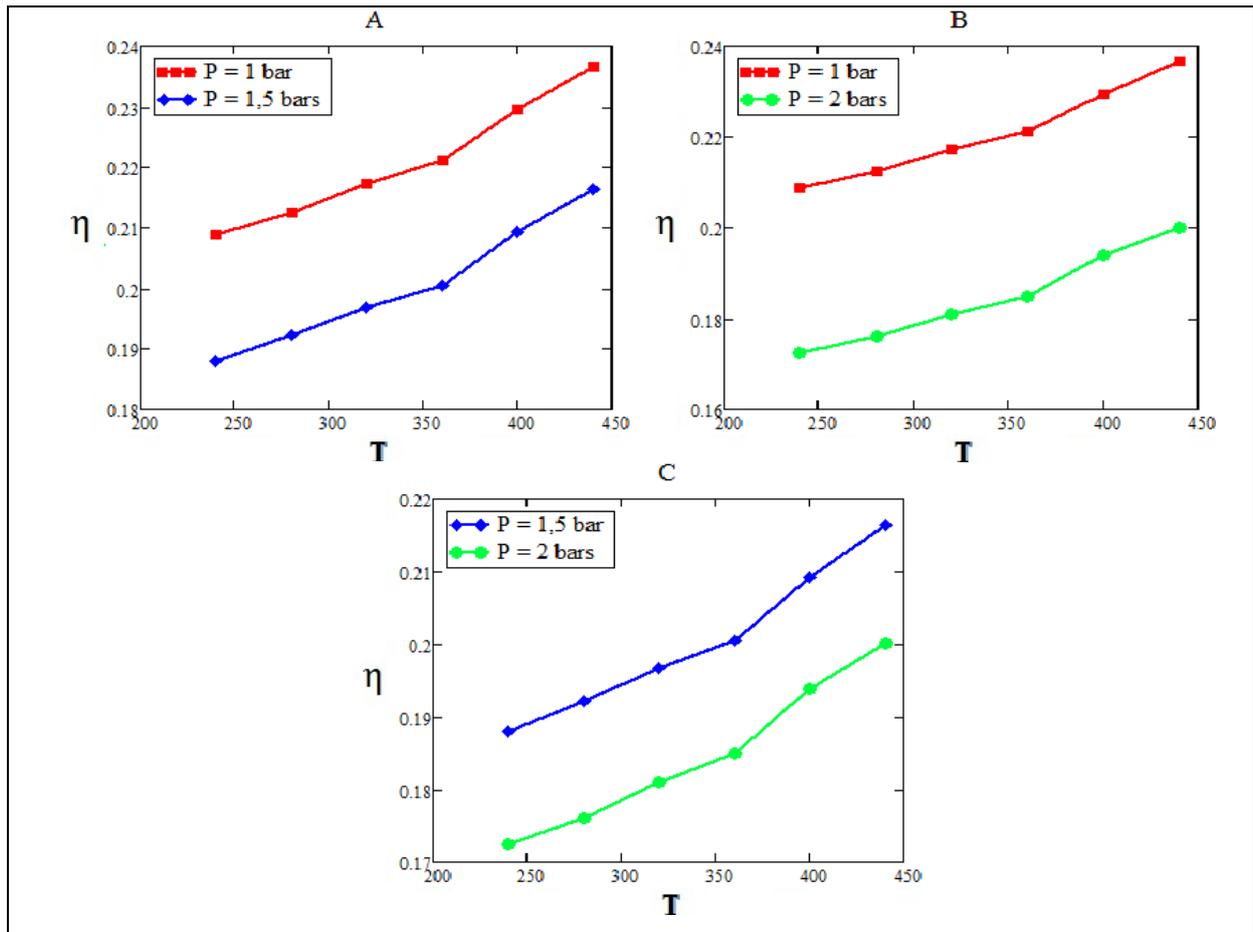


Figure (IV.27) : Variation du rendement en fonction des températures pour deux basses pressions ($P_H = 20$ bars)

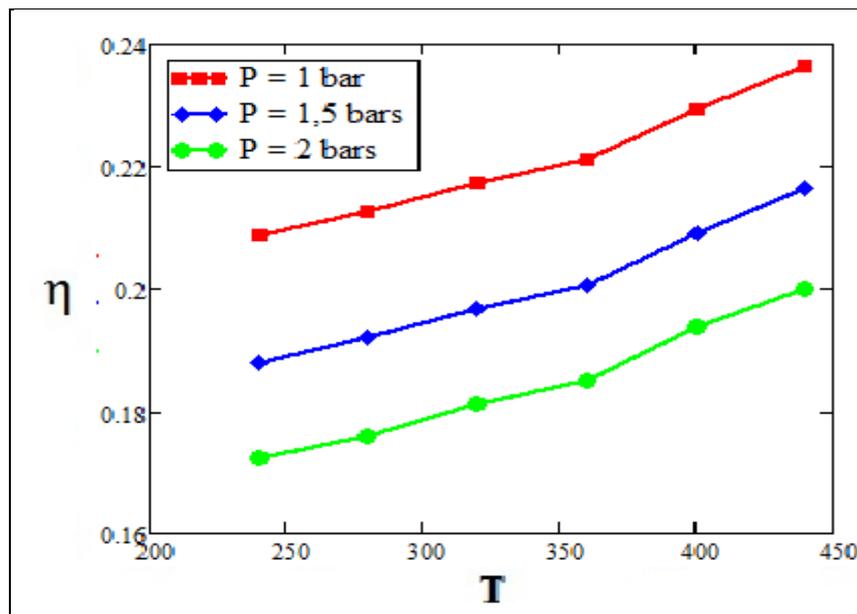


Figure (IV.28) : Variation du rendement en fonction des températures pour différentes basses pression ($P_H = 20$ bars)

4.3.2. Influence de la haute pression

a. Pour $P_B = 3$ bars

Ces graphes sont tracés à partir du tableau (IV.8).

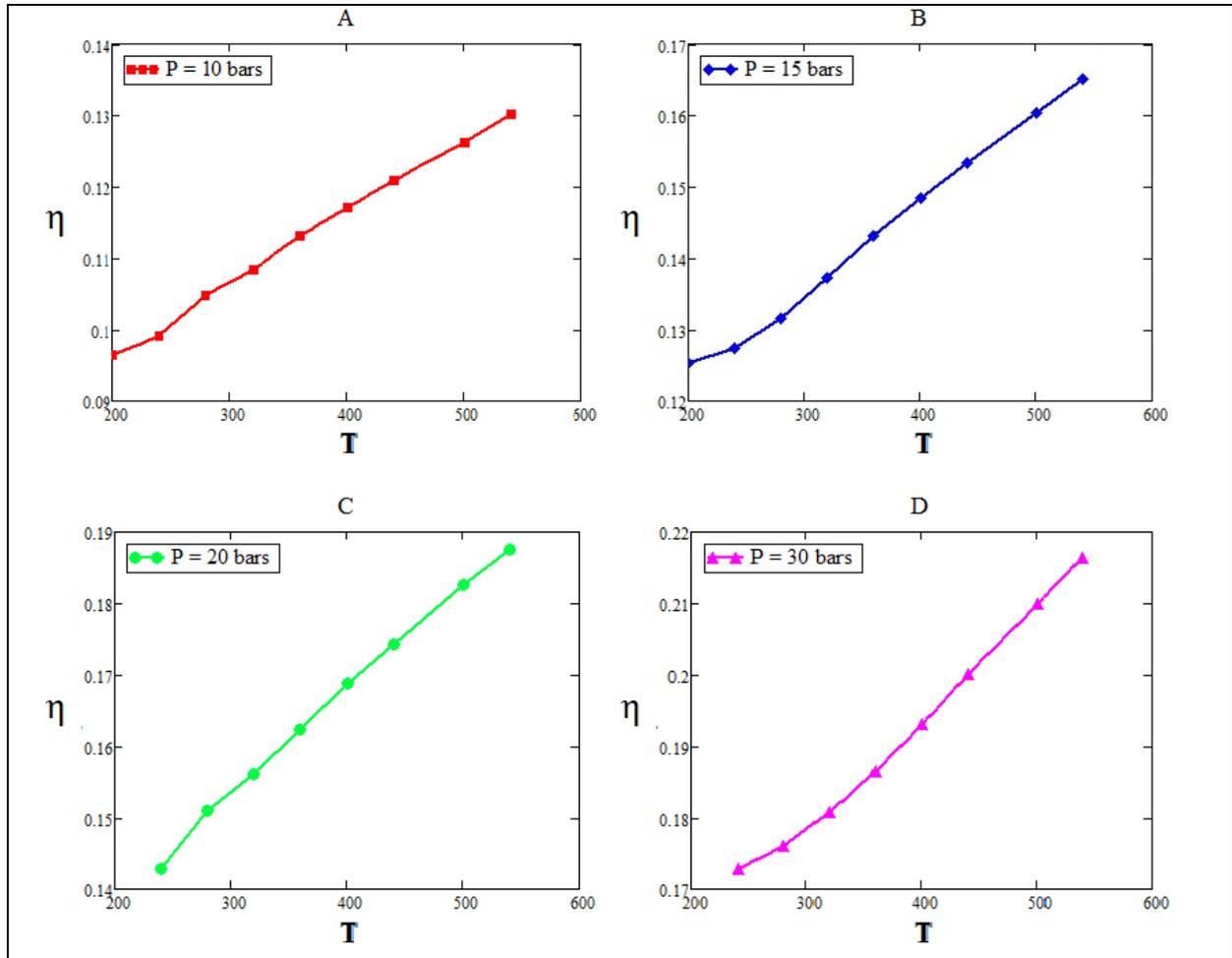


Figure (IV.29) : Variation du rendement en fonction des températures ($P_B = 3$ bars)

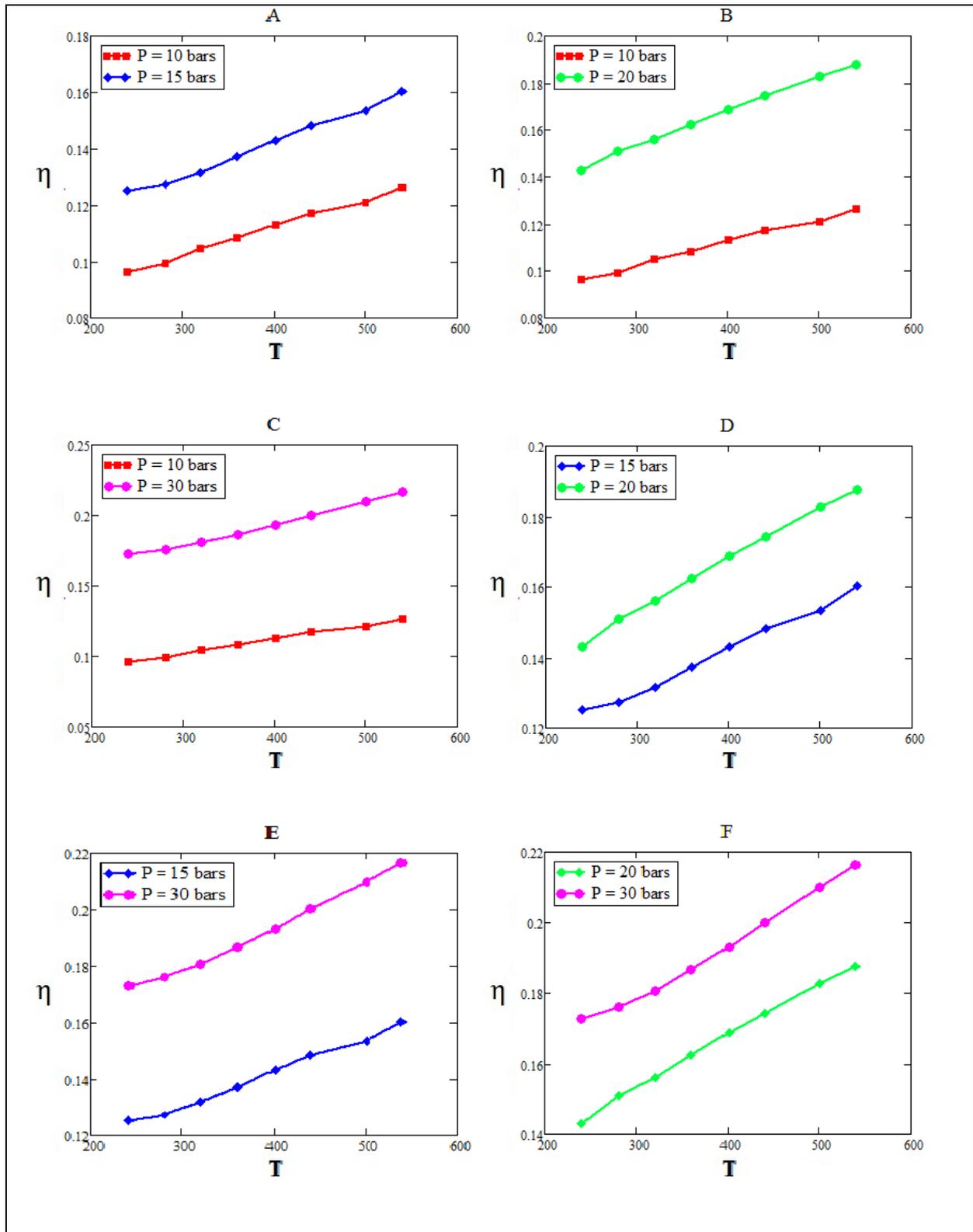


Figure (IV.30) : Variation du rendement en fonction des températures pour deux hautes pressions ($P_B = 3$ bars)

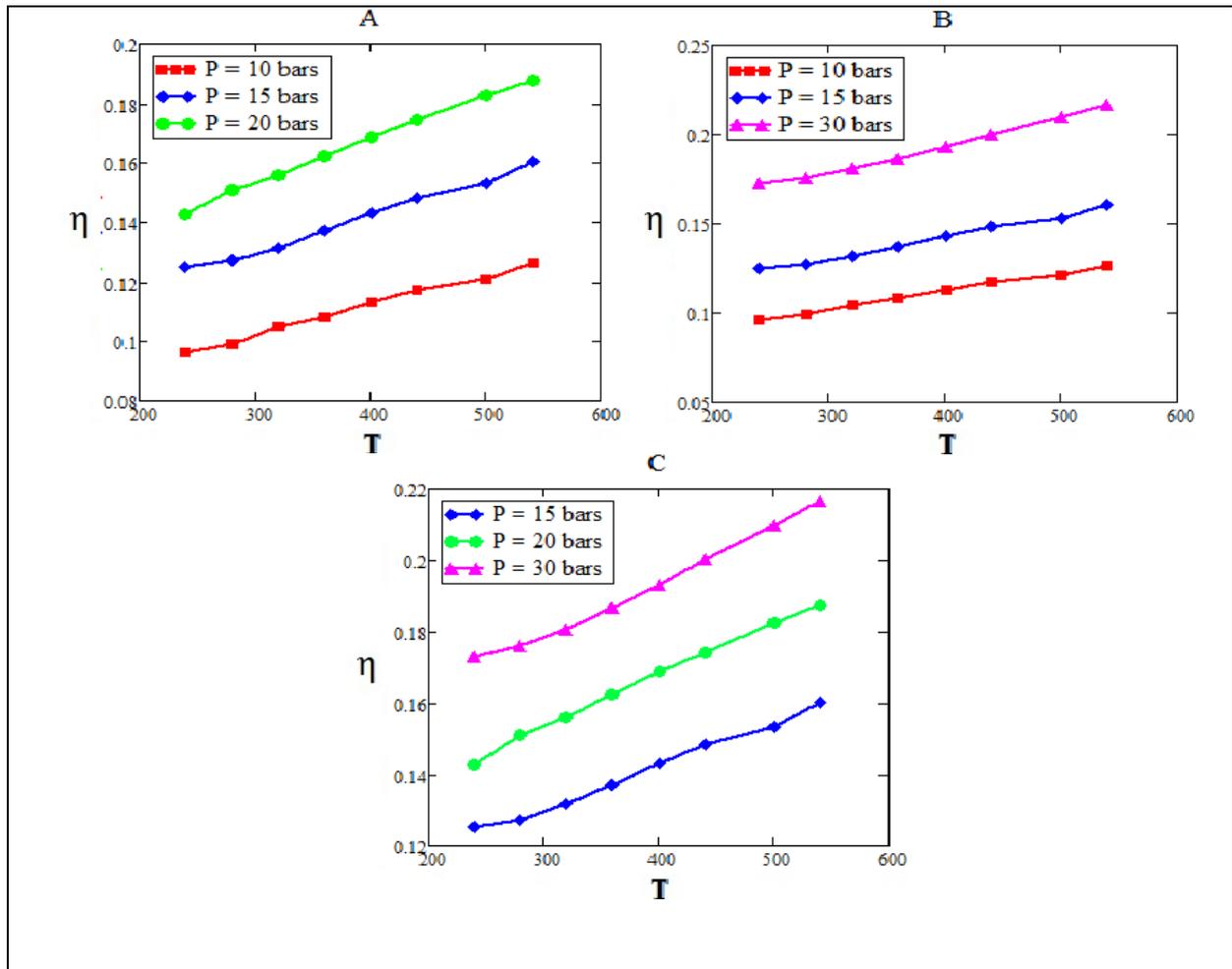


Figure (IV.31) : Variation du rendement en fonction des températures pour trois hautes pressions ($P_B = 3$ bars)

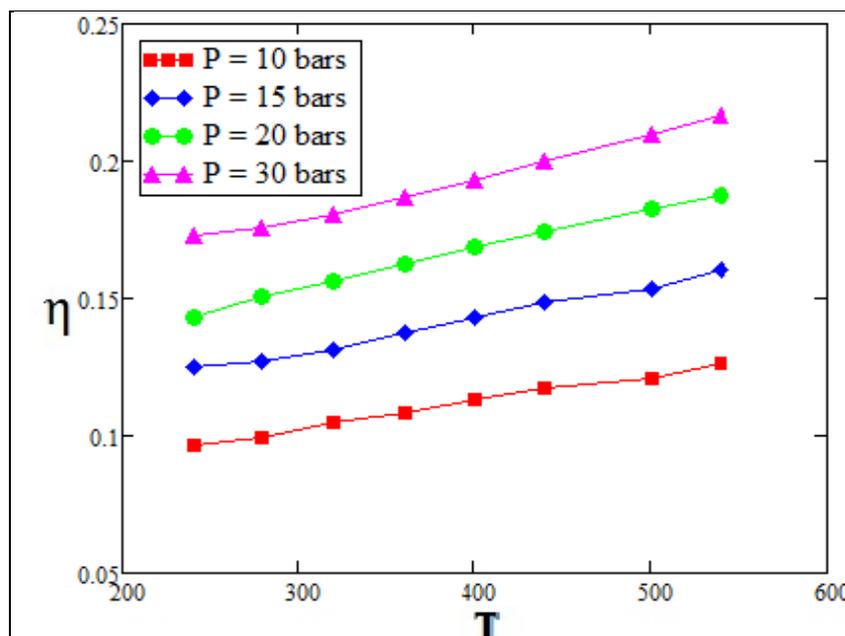


Figure (IV.32) : Variation du rendement en fonction des températures pour différentes hautes pressions ($P_B = 3$ bars)

b. Pour $P_B = 5 \text{ bars}$

Ces graphes sont tracés à partir du tableau (IV.9).

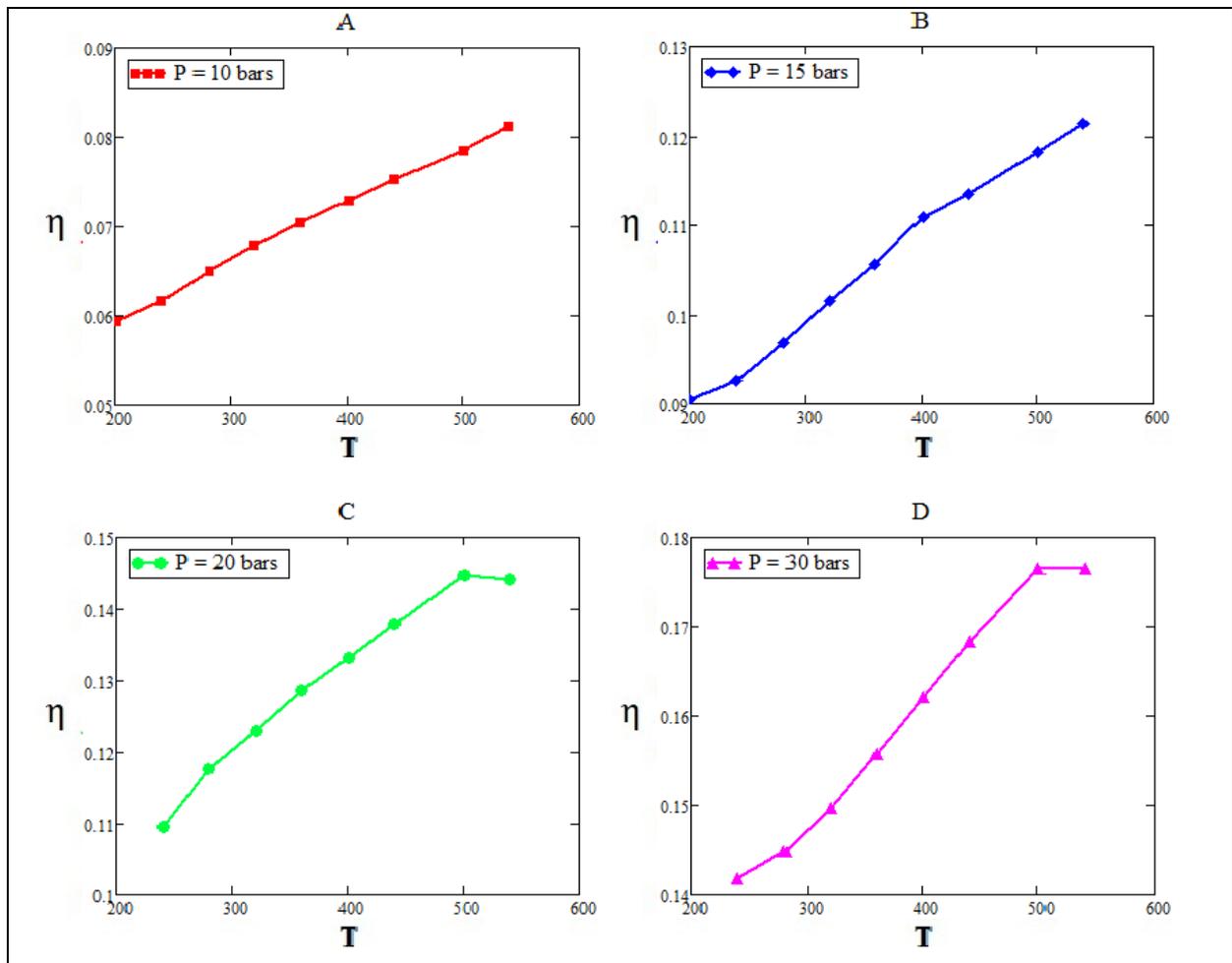


Figure (IV.33) : Variation du rendement en fonction des températures ($P_B = 5 \text{ bars}$)

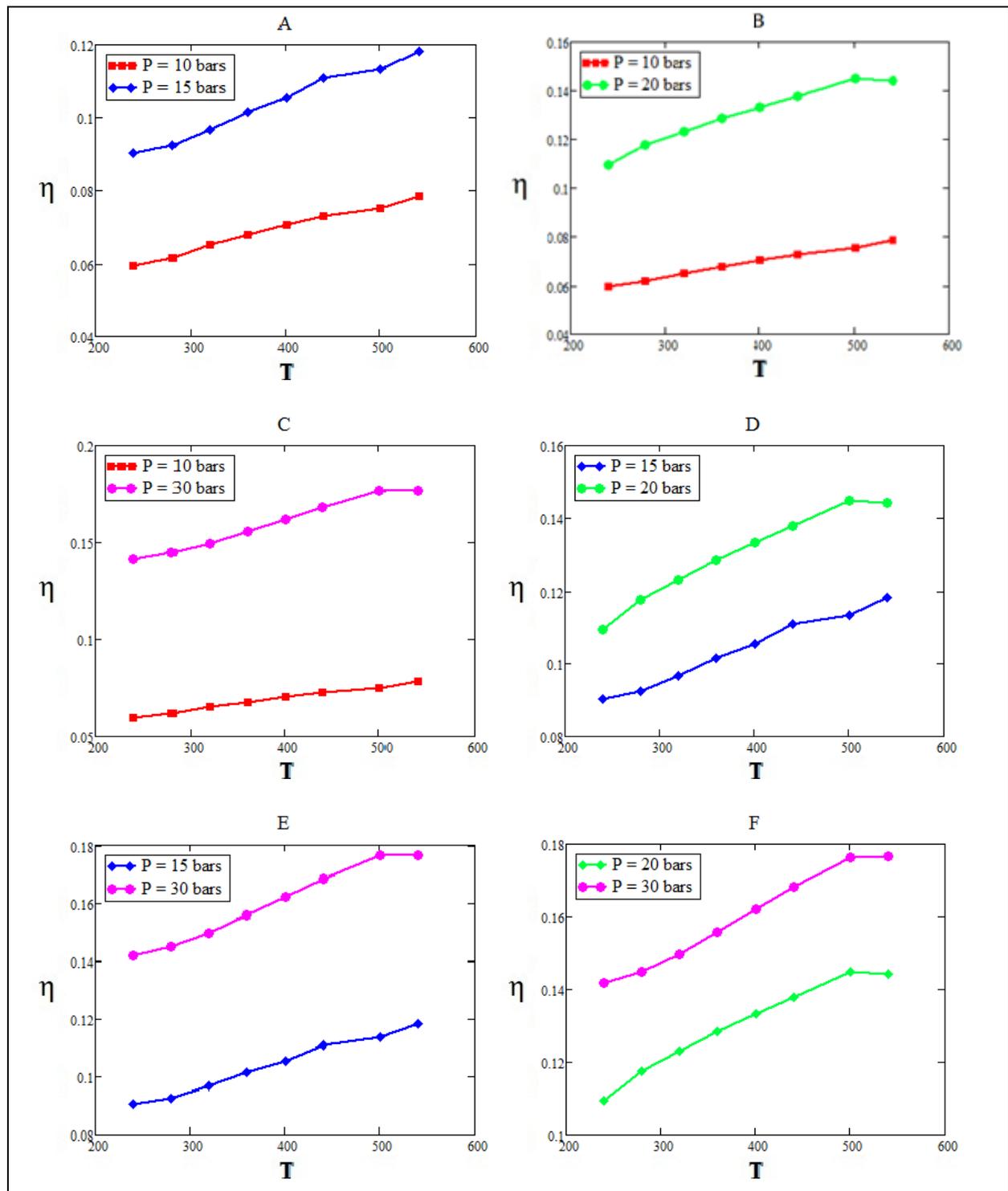


Figure (IV.34) : Variation du rendement en fonction des températures pour deux hautes pressions ($P_B = 5$ bars)

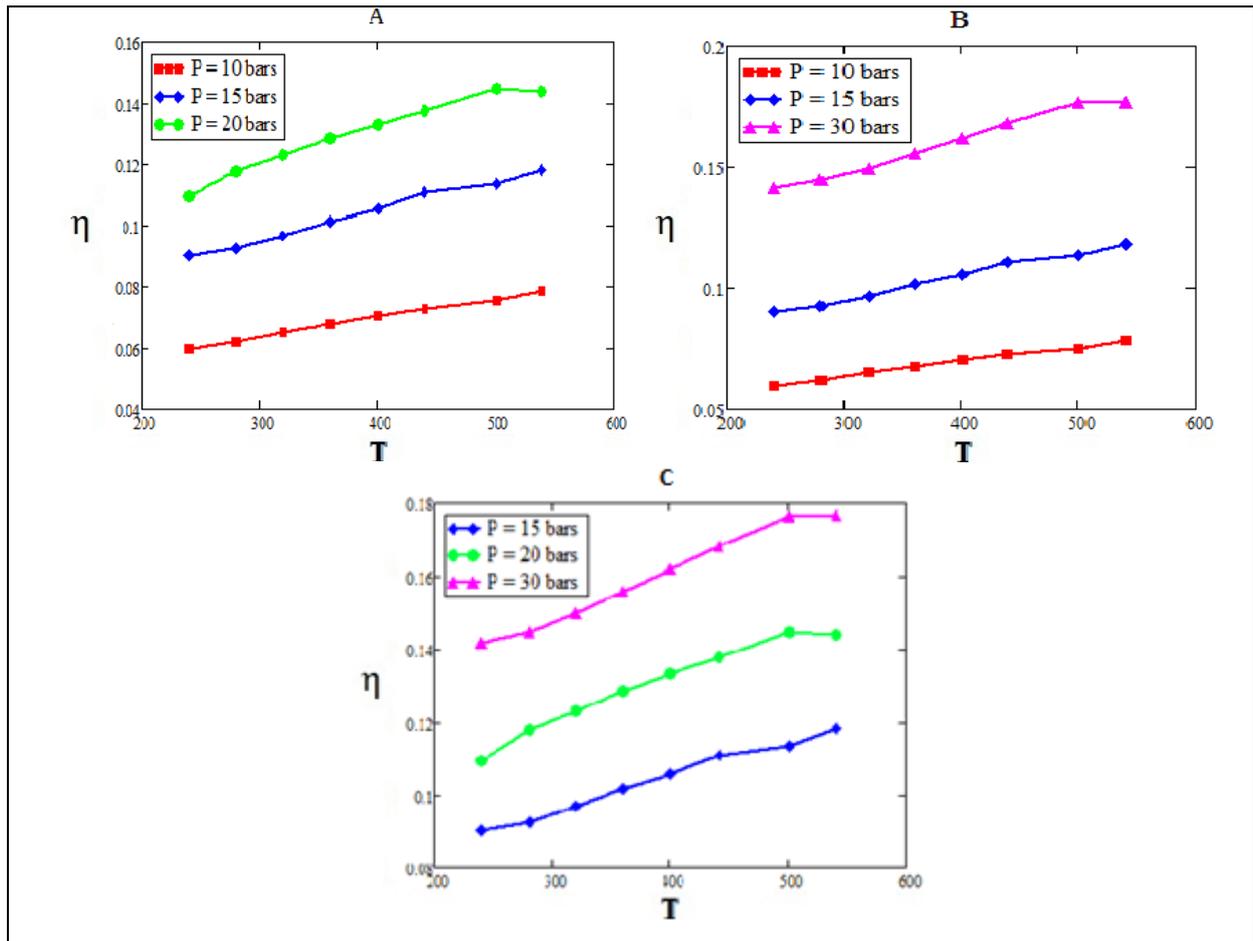


Figure (IV.35) : Variation du rendement en fonction des températures pour trois hautes pressions ($P_B = 5$ bars)

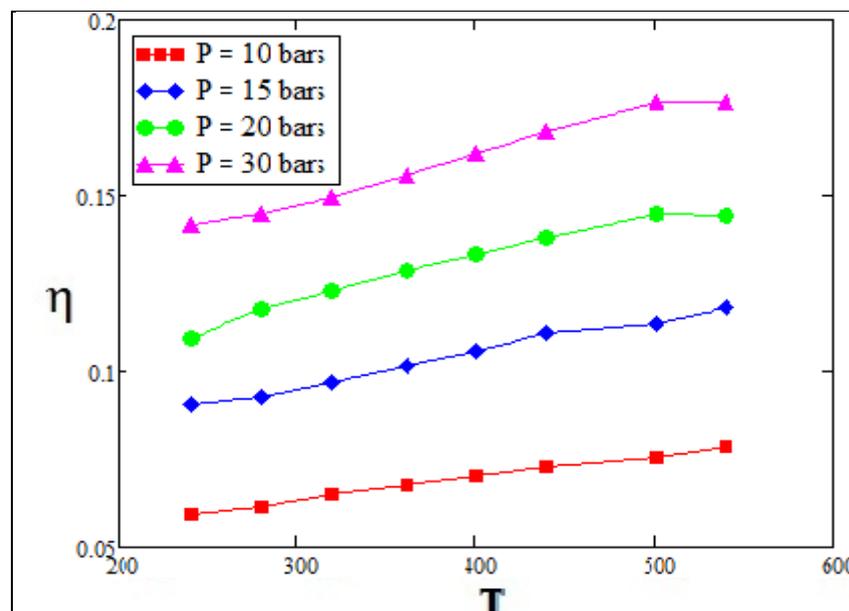


Figure (IV.36) : Variation du rendement en fonction des températures pour différentes hautes pressions ($P_B = 5$ bars)

c. Pour $P_B = 7$ bars

Ces graphes sont tracés à partir du tableau (IV.10).

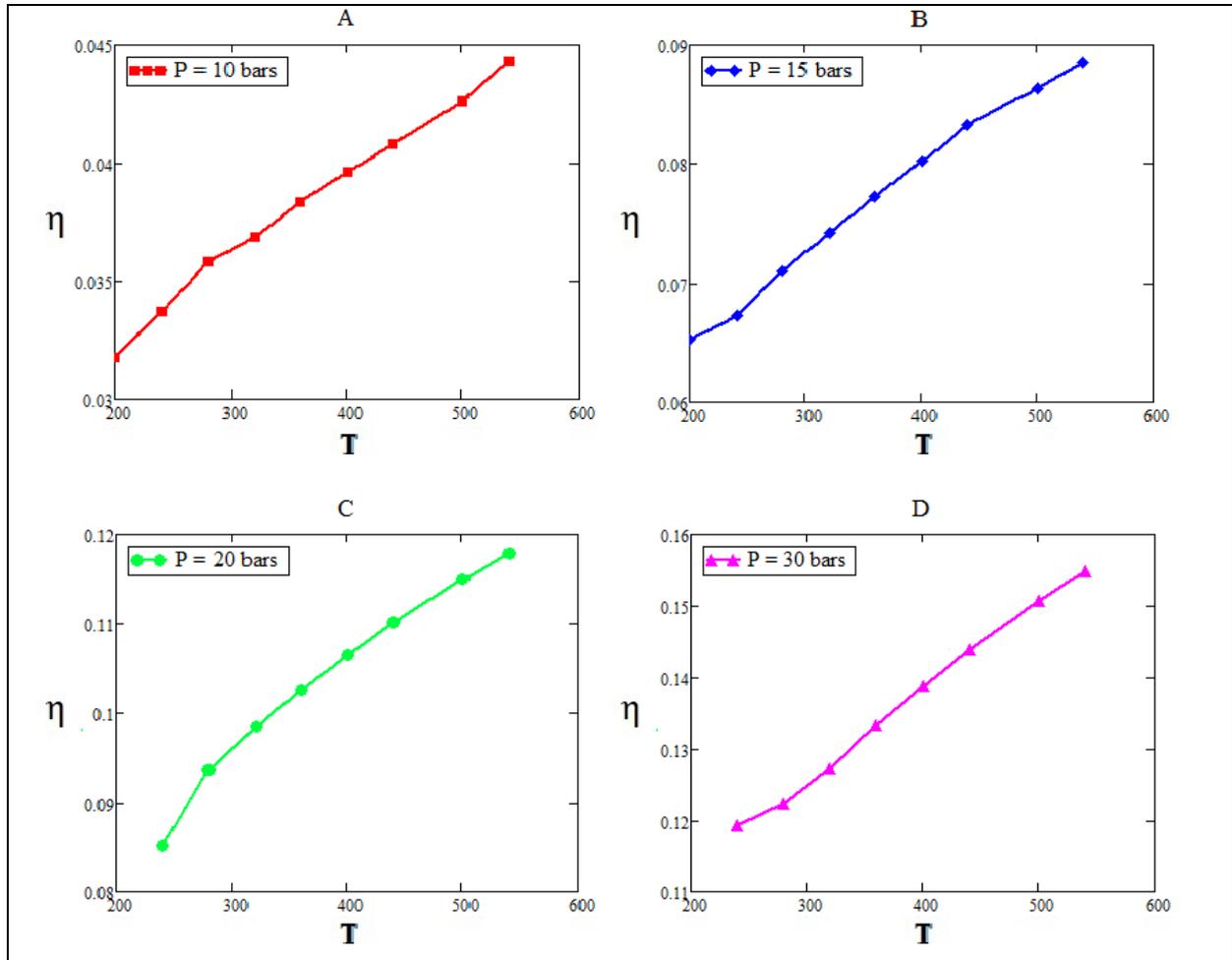


Figure (IV.37) : Variation du rendement en fonction des températures ($P_B = 7$ bars)

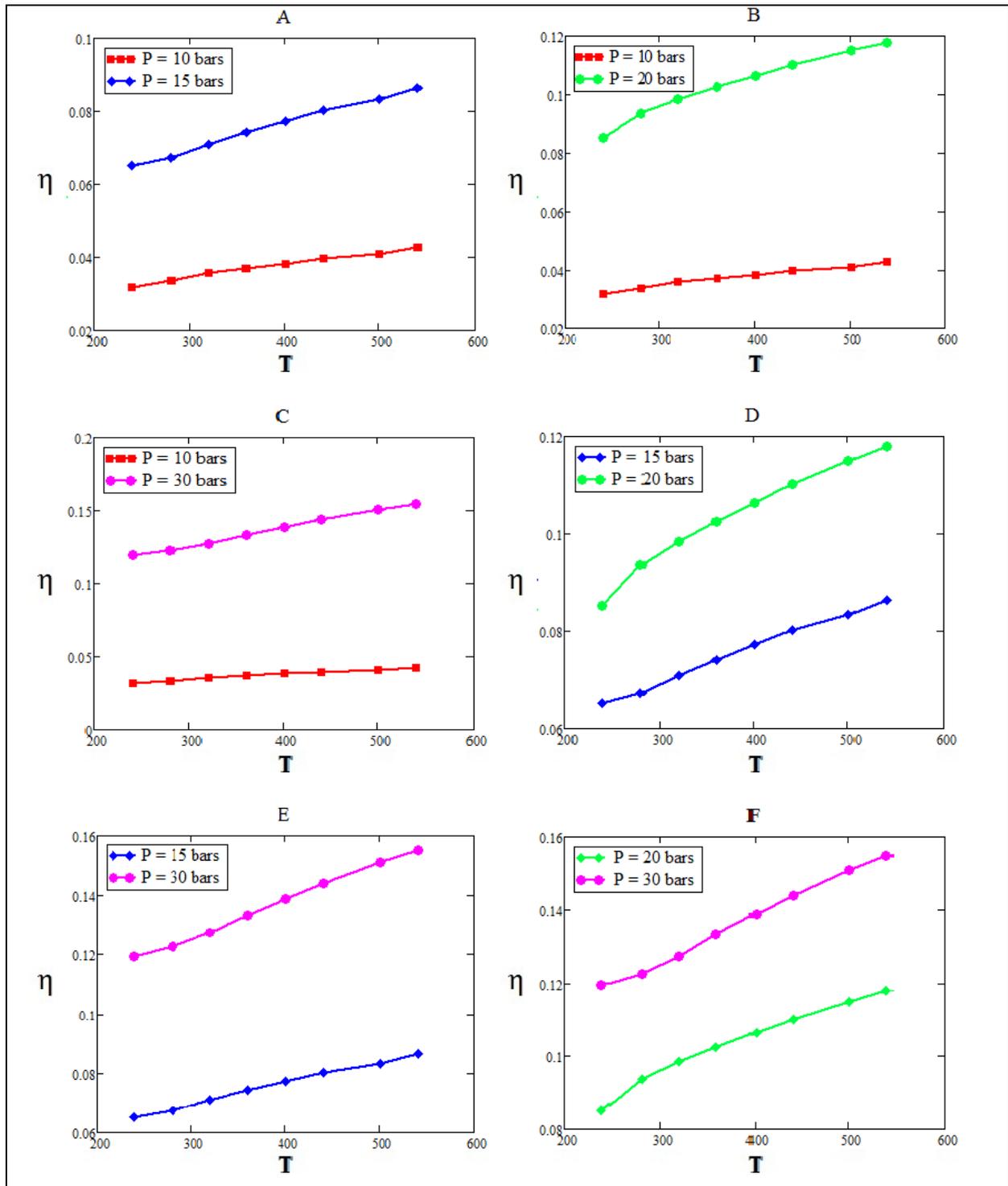


Figure (IV.38) : Variation du rendement en fonction des températures deux hautes pressions ($P_B = 7$ bars)

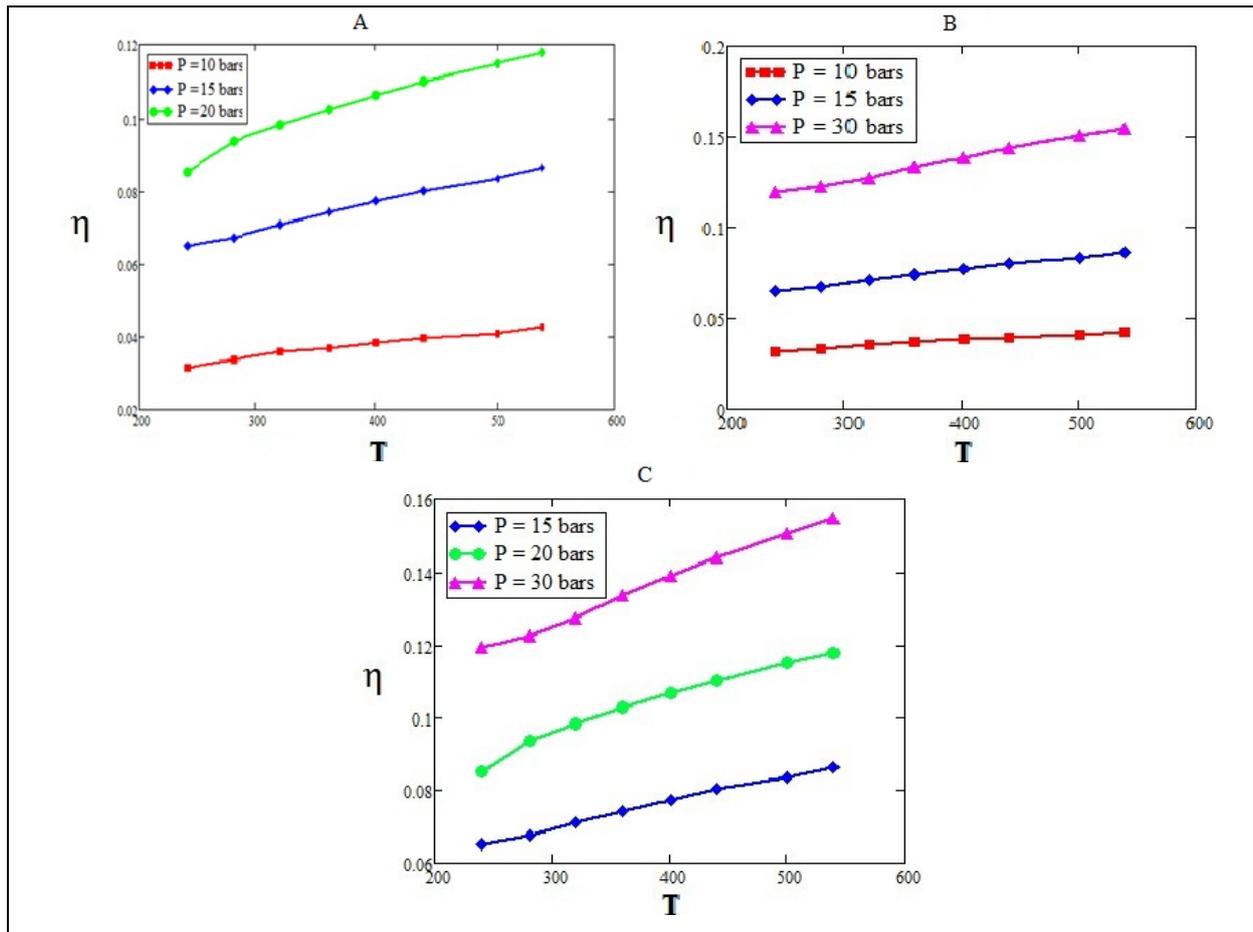


Figure (IV.39) : Variation du rendement en fonction des températures trois hautes pressions ($P_B = 7$ bars)

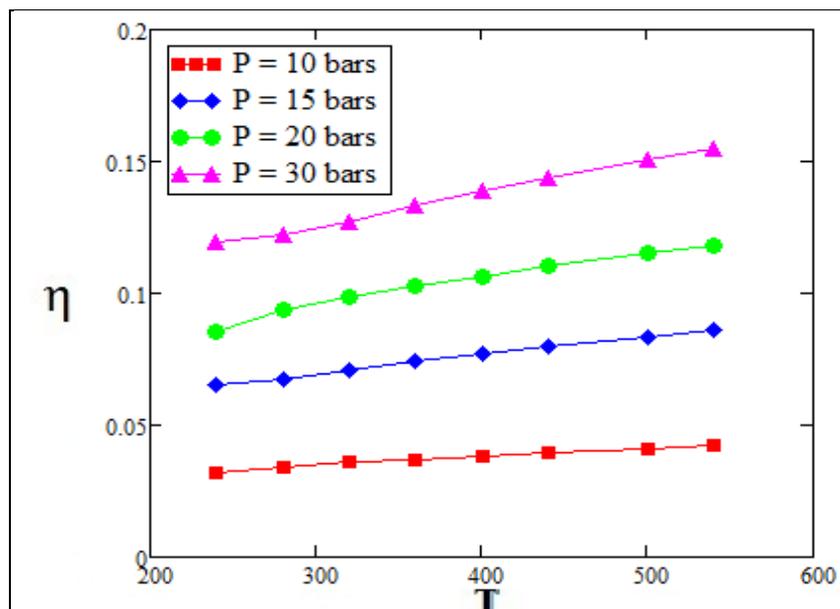


Figure (IV.40) : Variation du rendement en fonction des températures différentes hautes pressions ($P_B = 7$ bars)

4.4. Interprétation des graphes

4.4.1. Cycle de RANKINE

Les figures (IV.10) à (IV.19) présentent la variation du rendement en fonction des pressions. La première partie (IV.10) à (IV.16) consiste à étudier l'influence du choix de la basse pression sur les performances du cycle de RANKINE, alors que la deuxième partie (Figures(IV.17), (IV.18) et (IV.19)) montre l'effet du choix de la haute pression sur le rendement de ce dernier. Pour clarifier et valoriser nos résultats nous avons établi notre étude avec plusieurs valeurs constantes pour la haute pression dans la première partie et de la basse pression dans la dernière.

Dans la première analyse, Figure (IV.10), on a choisi une pression haute de 10 bars pour voir l'influence de la basse pression qu'on l'a fait varier de 1 à 2 bars et nous avons remarqué qu'à l'augmentation de cette dernière, le rendement évolue inversement.

Après avoir fait la même analyse pour des valeurs 15, 20, 25 et 30 bars, nous avons constaté les mêmes résultats, le rendement est inversement proportionnel à la variation de la basse pression. En comparant les graphes obtenus entre eux, nous remarquons qu'à des pressions hautes plus élevées le rendement tend à s'élever, les graphes montrés dans les figures (IV.11) à (IV.16) nous ont permis de comparer chaque rendement avec tous les autres en fonction des basses pressions choisies pour l'étude.

La figure (IV.16) illustre l'aspect de l'effet de la haute pression sur le rendement du cycle de RANKINE, ce qui nous a poussé à faire la deuxième analyse : l'influence de la haute pression sur les performances thermodynamiques.

Ainsi dit, nous avons établi la deuxième analyse, et à partir des résultats, nous avons confirmé ce que nous avons remarqué avant, l'évolution du rendement est directement proportionnelle à la variation de la haute pression.

La valeur de la basse pression était fixée à 3 bars, ensuite on l'a fait varier la haute pression de 10 à 20 bars pour dessiner le graphe dans la figure (IV.17) et en déduire le résultat précédent.

Comme confirmation on a choisi d'autres valeurs de la basse pression, on a trouvé le même résultat après comparaison, entre les graphes des Figure (IV.18) et Figure (IV.19), entre les différents graphes obtenus, on constate que les deux parties d'analyse du cycle de RANKINE sont cohérentes entre elles. Cette dernière confirme la première. Les graphes montrent la diminution du rendement thermodynamique à l'augmentation de la basse pression.

4.4.2. Cycle de HIRN

Les figures (IV.20) jusqu'à (IV.40) présentent le sens de la variation du rendement thermique en fonction de la température du surchauffe pour une installation travaillant suivant le cycle amélioré de HIRN (cycle avec surchauffe).

Notre étude consiste à étudier l'influence de la basse pression ainsi que de la haute pression en fonction de la température de surchauffe sur les performances du cycle de HIRN. Systématiquement, notre travail se divise en deux parties.

Dans la première partie, nous avons choisi une valeur fixe de la haute pression à 10 bars, on a fait varier la température de surchauffe de 200 à 400°C suivant trois valeurs de la basse pression 1, 1.5 et 2 bars, Figure (IV.20) Figure (IV.21) et Figure (IV.22).

Les résultats présentés dans les graphes de la figure (IV.20) montrent nettement l'évolution du rendement en fonction de la température de surchauffe, plus la température est haute plus le cycle possède un rendement meilleur.

Les graphes des figures (IV.20) à (IV.22) enrichissent notre étude ; ils montrent et comparent entre les rendements pour différentes valeurs de la basse pression. Nous remarquons qu'à l'augmentation de la basse pression le rendement est en diminution, ce résultat est similaire à celui obtenu pour le cycle théorique de RANKINE.

Pour plus de validité, on a enrichi notre étude avec d'autres valeurs fixes de la haute pression 15 et 20 bars. Les résultats, montrés dans les figures (IV.23) jusqu'à (IV.28), étaient identiques après avoir suivi les mêmes étapes. L'évolution du rendement est proportionnelle à la variation de la température de surchauffe et inversement proportionnelle à la variation de la basse pression.

La deuxième partie consiste à étudier l'influence du choix de la haute pression sur les performances de notre installation en fonction de la température de surchauffe.

On a choisi une valeur fixe de la basse pression 3 bars, on a fait varier la haute pression de 10 à 30 bars, utilisant le logiciel de calcul Mathcad et après simulation, on constate l'évolution du rendement dans graphes présentés dans les figures (IV.29), (IV.30), (IV.31) et (IV.32), en fonction de la température de surchauffe. Nous voyons que le rendement est proportionnel avec la température de surchauffe.

Après avoir établi les mêmes analyses avec d'autres valeurs de la basse pression le résultat est confirmé. Les graphes des figures (IV.33) jusqu'à (IV.40) comprennent et montrent l'influence de la haute pression sur les performances de l'installation, on déduit alors que plus la haute pression est importante et plus le rendement est en augmentation.

Nous remarquons dans les graphes montrés dans les figures (IV.34), (IV.35) et (IV.36), qu'à des hautes pressions de 20 et 30 bars avec la basse pression de 5 bars, le rendement atteint un pic opérant à partir de la température de 500°C ; ceci s'explique du fait que le cycle atteint un maximum en performance après avoir consommé un taux de chaleur. Alors n'importe quel ajout en chaleur restera inutile et n'augmentera le rendement en aucun cas.

4.5. Récapitulation

4.5.1. Cycle de RANKINE

D'après les résultats données dans les graphes des Figure IV.10 jusqu'à Figure IV.19, le tableau IV.11 récapitule les rendements maximales du cycle de RANKINE.

Tableau (IV.11) : Récapitulation des rendements du cycle de RANKINE

Haute pression P _H bars	Basse pression P _B bars	Rendement η %	
10	1	16.5	16.5
	1.5	14.2	
	2	12.4	
15	1	19.1	19.1
	1.5	17	
	2	15.3	
20	1	17.3	21
	1.5	18.9	
	2	21	
25	1	18.8	22.3
	1.5	23	
	2	22.3	
30	1	20.7	23.4
	1.5	21.5	
	2	23.4	
10	3	11	17.9
15		12.7	
20		14.9	
30		17.9	
10	5	5.8	14.8
15		9.2	
20		11.6	
30		14.8	
10	7	3.1	13
15		6.9	
20		9.4	
30		13	

4.5.2. Cycle de Hirn

D'après les résultats données dans les graphes des Figure IV.20 jusqu'à Figure IV.40, le tableau IV.12 récapitule les rendements maximales du cycle de HIRN.

Tableau (IV.12) : Récapitulation des rendements du cycle de HIRN

Haute pression P _H	Basse pression P _B	Température de surchauffe	Rendement η	
bars	bars	°C	%	
10	1	400	19.1	
	1.5		16.7	
	2		15.2	
15	1		21.8	
	1.5		19.3	
	2		17.8	
20	1		23.7	
	1.5		21.6	
	2		20	
10	3	540	13	
15			16.5	
20			18.8	
30			21.6	
10	5		500	8.1
15				12.1
20				14.4
30				17.7
10	7	540	4.4	
15			8.8	
20			11.8	
30			15.5	

5. Conclusion

Ce chapitre nous a permis de bien comprendre le fonctionnement d'une implantation solaire thermique à concentrateurs, et de voir l'influence des différents paramètres sur son rendement.

Notre étude met en valeur le sens de la variation du rendement thermique en fonction de la basse et haute pression pour une installation travaillant suivant le cycle idéal de RANKINE.

Nous avons aussi étudié et présenté le sens de la variation du rendement thermique en fonction de la température du surchauffe pour une installation travaillant suivant le cycle idéal de HIRN.

Nous remarquons d'une part, pour le cycle de RANKINE qu'à l'augmentation de la basse pression, le rendement décroît pour toutes les valeurs de la haute pression, d'autre part ceci est vérifié pour le cycle de HIRN.

Nous avons étudié l'influence de la haute pression sur le rendement, premièrement concernant le cycle de RANKINE et nous constatons qu'il y a une tendance proportionnelle avec la haute pression, par la suite ces résultats sont bien vérifiés pour le cycle HIRN ; comme le montre les tableaux récapitulatifs des rendements IV.11 et IV.12.

Conclusion générale

Conclusion générale

Ce travail fournit une idée globale des centrales solaires à concentration, à travers les années et son évolution à travers les siècles. Les différents systèmes sont cités, ainsi que les grands aspects de développement. Une description des différents projets déjà opérationnels est rappelée et les perspectives de développement sont évoquées.

Au niveau économique, la technologie des centrales solaires pour la production d'électricité ou de la chaleur est prête pour le marché. Plusieurs types d'installations ont déjà été testés, analysés et implantés avec succès. Une expérience non négligeable a été obtenue dans ce domaine, qui pourra apporter une contribution symptomatique, caractéristique et particulière aux installations futures.

Les prochaines décennies verront plus que probablement la création d'un nombre important de concentrateurs Fresnel, cylindro-paraboliques, paraboliques, et de tours solaires. Les coûts seront ainsi remarquablement diminués et il est éventuellement réalisable que les incitations gouvernementales à de tels systèmes deviennent utiles.

L'implantation de ces systèmes sera sans doute limitée et réservée aux pays de haute irradiation solaire, l'investissement ne semblant pas être justifié dans le court terme pour des pays moins ensoleillés.

A moyen et long terme, les systèmes à concentration contribueront de manière non négligeable aux objectifs de diminution des émissions de CO₂ et aux problèmes de développement et d'alimentation en énergie des régions désertes.

Notre travail consistait à modifier l'installation et changer les paramètres thermodynamiques dans le but d'étudier leur influence sur le rendement de cette installation à la fois suivant le cycle de RANKINE et suivant celui de HIRN.

Dans le cycle de RANKINE, l'étude de l'effet de la basse et de la haute pression prenait place et après avoir simulé suivant plusieurs cas, nous avons conclu que le rendement est

Conclusion générale

directement proportionnel avec l'accroissement de la haute pression alors qu'il est inversement proportionnel avec l'élévation de la basse pression. D'ici on conclue qu'à fur et à mesure que la différence en pression ou le rapport de pression augmente les performances seront meilleures, et on propose d'élever le rapport de compression et de détente dans les prochaines installations thermodynamiques, dans les limites techniques et économiques.

Dans le cycle de HIRN, l'influence de deux paramètres thermodynamiques (température et pression) était étudiée. Après avoir simulé avec plusieurs changements concernant la température de surchauffe, la basse pression et la haute pression, les résultats étaient similaires aux ceux trouvés précédemment, le rendement est directement proportionnel à l'augmentation de la température de surchauffe, il l'est aussi pour la haute pression et il est inversement proportionnel avec l'élévation de la basse pression. D'ici nos suggestions pour les futures implantations thermodynamiques sont d'augmenter le rapport de compression et de détente ainsi qu'élever la température de surchauffe, mais dans les limites de fonctionnement.

Dans le but de perfectionner le fonctionnement d'une implantation solaire thermique et dans le cas où l'investissement est assez onéreux, nous pouvons nous permettre d'ajouter une autre turbine qui effectue la détente des vapeurs après qu'elles soient réchauffées à la sortie de la première turbine ; comme il est clair c'est le fonctionnement du cycle thermodynamique de HIRN avec resurchauffe ; ce qui nous permettra à la suite d'extraire plus de travail utile, sans atteindre de très hautes températures qui augmentent le risque d'endommager des turbines, autrement dit, la réduction de la durée de vie de cette dernière et la demande incessante en maintenance.

Plus de tests, examens et d'études spécifiquement avancés peuvent être réalisés pour vérifier et clarifier le comportement des performances thermiques après la conception de tels changements géométriques sur l'installation thermodynamique, ainsi que d'autres écrits d'intérêts économiques, financiers, écologique et environnementales auront la possibilité d'être mis-à-jour dans le but de mieux faire comprendre l'utilité de telles améliorations réalisables sur les systèmes d'exploitation de l'énergie solaire en particulier et de toutes les énergies renouvelables facilement et abondamment exploitables en général.

Bibliographie

- [1] Le baromètre 2014 des énergies renouvelables 5e édition réalisé et édité par Observ'ER
- [2] The Year of Concentrating Solar Power, US Department of energy, rapport final de l'énergie solaire à concentrateurs publié en 2014
- [3] Stefano Giuliano, Reiner Buck and Santiago Eguiguren : Analysis Of Solar Thermal Power Plants With Thermal Energy Storage And Solar-Hybrid Operation Strategy German Aerospace Centre (DLR),), Institute of Technical Thermodynamics, Solar Research
- [4] Rabl, A. (1975). Comparison of solar concentrators. Solar Energy, Vol 18, No 2, The Olympic Museum, 2nd edition 2007 - The Olympic flame and torch relay
- [5] Er. Nordenskiöld, Journal de la Société des Américanistes, Miroirs convexes et concaves en Amérique, Tome 18, 1926.
- [8] Todd Woody. In California's Mojave Desert, Solar-Thermal Projects Take Off, Yale Environment 360, consulté le 27 janvier 2010.
- [10] Concentrated Solar Power by Novatec Solar, Novatec Solar Germany
- [11] Alex Wilson, Building Green's Product of the Week , Stirling Sun Catcher with Heat Engine Technology, Building Green.com.
- [12] Michael R. Blood et Brian Skoloff, Big Solar Project Planned for Arizona Desert, Solana solar power plant, publié le 10 octobre 2013.
- [13] Michael R. Blood et Brian Skoloff, Huge thermal plant opens as solar industry grows , publié le 13 février 2014.
- [14] Michael R. Blood et Brian Skoloff : U.S. flips switch on massive solar power array that also stores electricity, publié le 10 octobre 2013.

Bibliographie

[16] Site consulté le 23 janvier 2016, <http://www.nytimes.com/francait/article-compagnie-or-argent-first-trust-new-opportunities-mlp-energy-fund-declares-its-monthly-commun-share-distribution-of-0-105-per-share-for-february.aspx?articleid=1638586>.

[17] Fiche technique sur le projet El Reboso III 50-MW Solar Thermal Power Plant http://www.nrel.gov/csp/solarpaces/project_detail.cfm/projectID=50

[18] Project 6835 : Inner Mongolia Erdos, Groove Type Solar Thermal Project, Clean Development Mechanism Project Design Document Form (CDM-PDD) Version rédigé et publié le 28 juillet 2006 par UNFCCC, validé par China Quality Certification Center.

[19] Making solar thermal power generation in India a reality – Overview of technologies, opportunities and challenges, Shirish Garud, Fellow and Ishan Purohit, Research Associate, The Energy and Resources Institute (TERI), India1

[20] Arup Engineering Services Engaged by EnviroMission, Enviromission, publié le 21 avril 2009.

[21] Woody Todd, Pasadena's ESolar lands 2,000-megawatt deal in China , Los Angeles Times, publié le 09 janvier 2010.

[23] Cristian Cifuentes González, Emilio Castillo Dintrans, Jorge Cantallopts Araya : Inversión en la minería chilena - Cartera de proyectos 2015 -2024 DEPP 13/2015 rédigé et publié par Comision Chilena del Cobre

[27] Francis Meunier Aide-mémoire Thermodynamique de l'ingénieur, Dunod, Paris, 2004

[28] Olivier Bonnefoy Thermodynamique Document 2.6, publié le 7 novembre 2014, par Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne

[29] Yann Vaills, Thermodynamique, Licence de Physique et Sciences Pour l'Ingénieur

[30] Olivier Cleynen Thermodynamique de l'ingénieur publié le 21 février 2016 par Creative Commons CC-by-sa

[32] Huitième Jour / Photos : Archives CNIM - Themis-copyright derbi / Février 2014

[33] Alain. Ferrière, Centrales solaires thermodynamiques, Techniques de l'ingénieur BE 8 903.

Bibliographie

[34] Frank Kreith et Richard T. Meyer, Solar Thermal Conversion, publié en novembre 1982
SERI.TP-281-1846

[35] Solar Thermal Power Plants Achievements and Lessons Learned, Exemplified by the SSPS Project in Almeria/Spain.

[37] Agence Nationale de Développement de l'Investissement (ANDI)-2015

[38] C. Tyner D. Wasyluk, SolarPACES 2013 eSolar's modular, scalable molten salt power tower reference plant design.

Webographie:

[6] Ce site est consulté le 19 janvier 2016, [Http://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/solaire-thermodynamique-concentration#quand](http://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/solaire-thermodynamique-concentration#quand),.

[7] [Http://sfp.in2p3.fr/Debat/debatenergie/websfp/rivoire.htm](http://sfp.in2p3.fr/Debat/debatenergie/websfp/rivoire.htm), Connaissance des énergies, solaire thermodynamique à concentration, consulté 19 janvier 2016.

[9] [Http://www.protermosolar.com/](http://www.protermosolar.com/) Association espagnole pour l'industrie solaire thermo-électrique, consulté le 20 janvier 2016.

[15] [Http://www.nytimes.com/external/venturebeat/2008/10/23/23-venturebeat-ausras-first-solar-thermal-plant-starts-up-99529.html](http://www.nytimes.com/external/venturebeat/2008/10/23/23-venturebeat-ausras-first-solar-thermal-plant-starts-up-99529.html), consulté le 23 janvier 2016.

[22] [Http://www.reuters.com/article/morocco-solar-tenderid](http://www.reuters.com/article/morocco-solar-tenderid), consulté le 06 avril 2016.

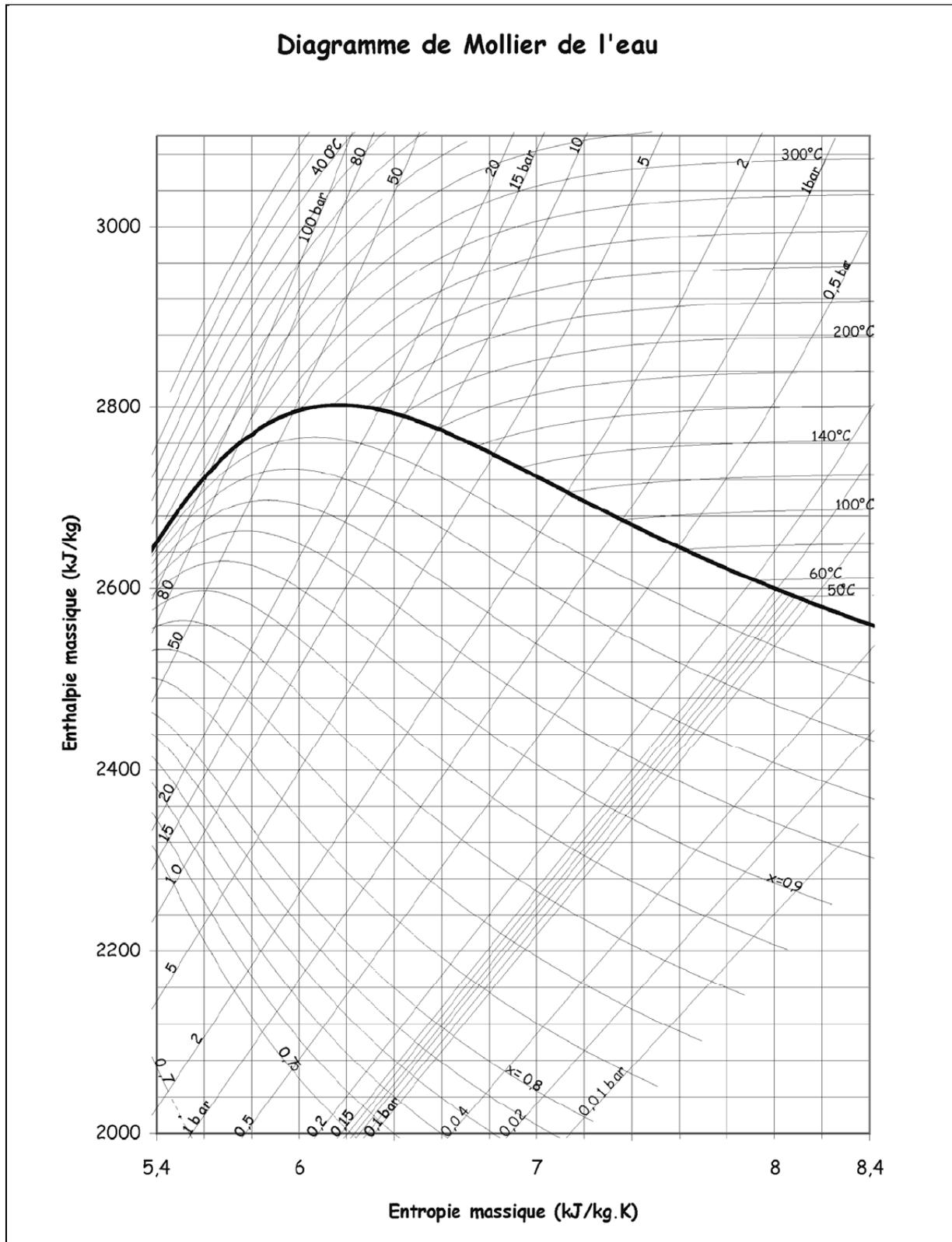
[24] [Http://en.wikipedia.org/wiki/Solar_thermal_collector](http://en.wikipedia.org/wiki/Solar_thermal_collector), consulté le 06 avril 2016.

[25] [Http://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/energie-solaire-exploitation](http://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/energie-solaire-exploitation), consulté le 10 février 2016

[26] [Https://fr.wikipedia.org/wiki/Centrale_thermique#Centrale_solaire](https://fr.wikipedia.org/wiki/Centrale_thermique#Centrale_solaire), consulté le 10 février 2016.

[31] Www. Wikipédia.com, consulté le 10 février 2016.

[36] [Http://www.energie.sia-partners.com/wpfiles/2010/09/comparatif.jpg](http://www.energie.sia-partners.com/wpfiles/2010/09/comparatif.jpg), consulté le 02 mars 2016.



Annexe 1 : Diagramme Mollier (h, s).

Annexe

Vapeur saturée: table de la pression

Pres. kPa P	Temp. °C T	Volume massique m ³ /kg		Énergie interne kJ/kg			Enthalpie kJ/kg			Entropie kJ/kg·K		
		Liquide sat. v _f	Vapeur sat. v _g	Liquide sat. u _f	Évap. u _{fg}	Vapeur sat. u _g	Liquide sat. h _f	Évap. h _{fg}	Vapeur sat. h _g	Liquide sat. s _f	Évap. s _{fg}	Vapeur sat. s _g
0.6113	0.01	0.001 000	206.14	.00	2375.3	2375.3	.01	2501.3	2501.4	.0000	9.1562	9.1562
1.0	6.98	0.001 000	129.21	29.30	2355.7	2385.0	29.30	2484.9	2514.2	.1059	8.8697	8.9756
1.5	13.03	0.001 001	87.98	54.71	2338.6	2393.3	54.71	2470.6	2525.3	.1957	8.6322	8.8279
2.0	17.50	0.001 001	67.00	73.48	2326.0	2399.5	73.48	2460.0	2533.5	.2607	8.4629	8.7237
2.5	21.08	0.001 002	54.25	88.48	2315.9	2404.4	88.49	2451.6	2540.0	.3120	8.3311	8.6432
3.0	24.08	0.001 003	45.67	101.04	2307.5	2408.5	101.05	2444.5	2545.5	.3545	8.2231	8.5776
4.0	28.96	0.001 004	34.80	121.45	2293.7	2415.2	121.46	2432.9	2554.4	.4226	8.0520	8.4746
5.0	32.88	0.001 005	28.19	137.81	2282.7	2420.5	137.82	2423.7	2561.5	.4764	7.9187	8.3951
7.5	40.29	0.001 008	19.24	168.78	2261.7	2430.5	168.79	2406.0	2574.8	.5764	7.6750	8.2515
10	45.81	0.001 010	14.67	191.82	2246.1	2437.9	191.83	2392.8	2584.7	.6493	7.5009	8.1502
15	53.97	0.001 014	10.02	225.92	2222.8	2448.7	225.94	2373.1	2599.1	.7549	7.2536	8.0085
20	60.06	0.001 017	7.649	251.38	2205.4	2456.7	251.40	2358.3	2609.7	.8320	7.0766	7.9085
25	64.97	0.001 020	6.204	271.90	2191.2	2463.1	271.93	2346.3	2618.2	.8931	6.9383	7.8314
30	69.10	0.001 022	5.229	289.20	2179.2	2468.4	289.23	2336.1	2625.3	.9439	6.8247	7.7686
40	75.87	0.001 027	3.993	317.53	2159.5	2477.0	317.58	2319.2	2636.8	1.0259	6.6441	7.6700
50	81.33	0.001 030	3.240	340.44	2143.4	2483.9	340.49	2305.4	2645.9	1.0910	6.5029	7.5939
75	91.78	0.001 037	2.217	384.31	2112.4	2496.7	384.39	2278.6	2663.0	1.2130	6.2434	7.4564
MPa												
0.100	99.63	0.001 043	1.6940	417.36	2088.7	2506.1	417.46	2258.0	2675.5	1.3026	6.0568	7.3594
0.125	105.99	0.001 048	1.3749	444.19	2069.3	2513.5	444.32	2241.0	2685.4	1.3740	5.9104	7.2844
0.150	111.37	0.001 053	1.1593	466.94	2052.7	2519.7	467.11	2226.5	2693.6	1.4336	5.7897	7.2233
0.175	116.06	0.001 057	1.0036	486.80	2038.1	2524.9	486.99	2213.6	2700.6	1.4849	5.6868	7.1717
0.200	120.23	0.001 061	0.8857	504.49	2025.0	2529.5	504.70	2201.9	2706.7	1.5301	5.5970	7.1271
0.225	124.00	0.001 064	0.7933	520.47	2013.1	2533.6	520.72	2191.3	2712.1	1.5706	5.5173	7.0878
0.250	127.44	0.001 067	0.7187	535.10	2002.1	2537.2	535.37	2181.5	2716.9	1.6072	5.4455	7.0527
0.275	130.60	0.001 070	0.6573	548.59	1991.9	2540.5	548.89	2172.4	2721.3	1.6408	5.3801	7.0209
0.300	133.55	0.001 073	0.6058	561.15	1982.4	2543.6	561.47	2163.8	2725.3	1.6718	5.3201	6.9919
0.325	136.30	0.001 076	0.5620	572.90	1973.5	2546.4	573.25	2155.8	2729.0	1.7006	5.2646	6.9652
0.350	138.88	0.001 079	0.5243	583.95	1965.0	2548.9	584.33	2148.1	2732.4	1.7275	5.2130	6.9405
0.375	141.32	0.001 081	0.4914	594.40	1956.9	2551.3	594.81	2140.8	2735.6	1.7528	5.1647	6.9175
0.40	143.63	0.001 084	0.4625	604.31	1949.3	2553.6	604.74	2133.8	2738.6	1.7766	5.1193	6.8959
0.45	147.93	0.001 088	0.4140	622.77	1934.9	2557.6	623.25	2120.7	2743.9	1.8207	5.0359	6.8565
0.50	151.86	0.001 093	0.3749	639.68	1921.6	2561.2	640.23	2108.5	2748.7	1.8607	4.9606	6.8213
0.55	155.48	0.001 097	0.3427	655.32	1909.2	2564.5	655.93	2097.0	2753.0	1.8973	4.8920	6.7893
0.60	158.85	0.001 101	0.3157	669.90	1897.5	2567.4	670.56	2086.3	2756.8	1.9312	4.8288	6.7600
0.65	162.01	0.001 104	0.2927	683.56	1886.5	2570.1	684.28	2076.0	2760.3	1.9627	4.7703	6.7331
0.70	164.97	0.001 108	0.2729	696.44	1876.1	2572.5	697.22	2066.3	2763.5	1.9922	4.7158	6.7080
0.75	167.78	0.001 112	0.2556	708.64	1866.1	2574.7	709.47	2057.0	2766.4	2.0200	4.6647	6.6847
0.80	170.43	0.001 115	0.2404	720.22	1856.6	2576.8	721.11	2048.0	2769.1	2.0462	4.6166	6.6628
0.85	172.96	0.001 118	0.2270	731.27	1847.4	2578.7	732.22	2039.4	2771.6	2.0710	4.5711	6.6421
0.90	175.38	0.001 121	0.2150	741.83	1838.6	2580.5	742.83	2031.1	2773.9	2.0946	4.5280	6.6226
0.95	177.69	0.001 124	0.2042	751.95	1830.2	2582.1	753.02	2023.1	2776.1	2.1172	4.4869	6.6041
1.00	179.91	0.001 127	0.19444	761.68	1822.0	2583.6	762.81	2015.3	2778.1	2.1387	4.4478	6.5865
1.10	184.09	0.001 133	0.17753	780.09	1806.3	2586.4	781.34	2000.4	2781.7	2.1792	4.3744	6.5536
1.20	187.99	0.001 139	0.16333	797.29	1791.5	2588.8	798.65	1986.2	2784.8	2.2166	4.3067	6.5233
1.30	191.64	0.001 144	0.15125	813.44	1777.5	2591.0	814.93	1972.7	2787.6	2.2515	4.2438	6.4953
1.40	195.07	0.001 149	0.14084	828.70	1764.1	2592.8	830.30	1959.7	2790.0	2.2842	4.1850	6.4693
1.50	198.32	0.001 154	0.13177	843.16	1751.3	2594.5	844.89	1947.3	2792.2	2.3150	4.1298	6.4448
1.75	205.76	0.001 166	0.11349	876.46	1721.4	2597.8	878.50	1917.9	2796.4	2.3851	4.0044	6.3896
2.00	212.42	0.001 177	0.09963	906.44	1693.8	2600.3	908.79	1890.7	2799.5	2.4474	3.8935	6.3409
2.25	218.45	0.001 187	0.08875	933.83	1668.2	2602.0	936.49	1865.2	2801.7	2.5035	3.7937	6.2972
2.5	223.99	0.001 197	0.07998	959.11	1644.0	2603.1	962.11	1841.0	2803.1	2.5547	3.7028	6.2575
3.0	233.90	0.001 217	0.06668	1004.78	1599.3	2604.1	1008.42	1795.7	2804.2	2.6457	3.5412	6.1869
3.5	242.60	0.001 235	0.05707	1045.43	1558.3	2603.7	1049.75	1753.7	2803.4	2.7253	3.4000	6.1253
4	250.40	0.001 252	0.04978	1082.31	1520.0	2602.3	1087.31	1714.1	2801.4	2.7964	3.2737	6.0701
5	263.99	0.001 286	0.03944	1147.81	1449.3	2597.1	1154.23	1640.1	2794.3	2.9202	3.0532	5.9734
6	275.64	0.001 319	0.03244	1205.44	1384.3	2589.7	1213.35	1571.0	2784.3	3.0267	2.8625	5.8892
7	285.88	0.001 351	0.02737	1257.55	1323.0	2580.5	1267.00	1505.1	2772.1	3.1211	2.6922	5.8133
8	295.06	0.001 384	0.02352	1305.57	1264.2	2569.8	1316.64	1441.3	2758.0	3.2068	2.5364	5.7432
9	303.40	0.001 418	0.02048	1350.51	1207.3	2557.8	1363.26	1378.9	2742.1	3.2858	2.3915	5.6772
10	311.06	0.001 452	0.018026	1393.04	1151.4	2544.4	1407.56	1317.1	2724.7	3.3596	2.2544	5.6141
11	318.15	0.001 489	0.015987	1433.7	1096.0	2529.8	1450.1	1255.5	2705.6	3.4295	2.1233	5.5527
12	324.75	0.001 527	0.014263	1473.0	1040.7	2513.7	1491.3	1193.6	2684.9	3.4962	1.9962	5.4924
13	330.93	0.001 567	0.012780	1511.1	985.0	2496.1	1531.5	1130.7	2662.2	3.5606	1.8718	5.4323
14	336.75	0.001 611	0.011485	1548.6	928.2	2476.8	1571.1	1066.5	2637.6	3.6232	1.7485	5.3717
15	342.24	0.001 658	0.010337	1585.6	869.8	2455.5	1610.5	1000.0	2610.5	3.6848	1.6249	5.3098
16	347.44	0.001 711	0.009306	1622.7	809.0	2431.7	1650.1	930.6	2580.6	3.7461	1.4994	5.2455
17	352.37	0.001 770	0.008364	1660.2	744.8	2405.0	1690.3	856.9	2547.2	3.8079	1.3698	5.1777
18	357.06	0.001 840	0.007489	1698.9	675.4	2374.3	1732.0	777.1	2509.1	3.8715	1.2329	5.1044
19	361.54	0.001 924	0.006657	1739.9	598.1	2338.1	1776.5	688.0	2464.5	3.9388	1.0839	5.0228
20	365.81	0.002 036	0.005834	1785.6	507.5	2293.0	1826.3	583.4	2409.7	4.0139	.9130	4.9269
21	369.89	0.002 207	0.004952	1842.1	388.5	2230.6	1888.4	446.2	2334.6	4.1075	.6938	4.8013
22	373.80	0.002 742	0.003568	1961.9	125.2	2087.1	2022.2	143.4	2165.6	4.3110	.2216	4.5327
22.09	374.14	0.003 155	0.003 155	2029.6	0	2029.6	2099.3	0	2099.3	4.4298	0	4.4298

Annexe 2 : Propriétés thermodynamiques de l'eau saturée.

Annexe

Vapeur surchauffée

T	v	u	h	s	v	u	h	s	v	u	h	s
P = .010 MPa (45.81)												
Sat.	14.674	2437.9	2584.7	8.1502	3.240	2483.9	2645.9	7.5939	1.6940	2506.1	2675.5	7.3594
50	14.869	2443.9	2592.6	8.1749								
100	17.196	2515.5	2687.5	8.4479	3.418	2511.6	2682.5	7.6947	1.6958	2506.7	2676.2	7.3614
150	19.512	2587.9	2783.0	8.6882	3.889	2585.6	2780.1	7.9401	1.9364	2582.8	2776.4	7.6134
200	21.825	2661.3	2879.5	8.9038	4.356	2659.9	2877.7	8.1580	2.172	2658.1	2875.3	7.8343
250	24.136	2736.0	2977.3	9.1002	4.820	2735.0	2976.0	8.3556	2.406	2733.7	2974.3	8.0333
300	26.445	2812.1	3076.5	9.2813	5.284	2811.3	3075.5	8.5373	2.639	2810.4	3074.3	8.2158
400	31.063	2968.9	3279.6	9.6077	6.209	2968.5	3278.9	8.8642	3.103	2967.9	3278.2	8.5435
500	35.679	3132.3	3489.1	9.8978	7.134	3132.0	3488.7	9.1546	3.565	3131.6	3488.1	8.8342
600	40.295	3302.5	3705.4	10.1608	8.057	3302.2	3705.1	9.4178	4.028	3301.9	3704.7	9.0976
700	44.911	3479.6	3928.7	10.4028	8.981	3479.4	3928.5	9.6599	4.490	3479.2	3928.2	9.3398
800	49.526	3663.8	4159.0	10.6281	9.904	3663.6	4158.9	9.8852	4.952	3663.5	4158.6	9.5652
900	54.141	3855.0	4396.4	10.8396	10.828	3854.9	4396.3	10.0967	5.414	3854.8	4396.1	9.7767
1000	58.757	4053.0	4640.6	11.0393	11.751	4052.9	4640.5	10.2964	5.875	4052.8	4640.3	9.9764
1100	63.372	4257.5	4891.2	11.2287	12.674	4257.4	4891.1	10.4859	6.337	4257.3	4891.0	10.1659
1200	67.987	4467.9	5147.8	11.4091	13.597	4467.8	5147.7	10.6662	6.799	4467.7	5147.6	10.3463
1300	72.602	4683.7	5409.7	11.5811	14.521	4683.6	5409.6	10.8382	7.260	4683.5	5409.5	10.5183
P = .050 MPa (81.33)												
Sat.	.8857	2529.5	2706.7	7.1272	.6058	2543.6	2725.3	6.9919	.4625	2553.6	2738.6	6.8959
150	.9596	2576.9	2768.8	7.2795	.6339	2570.8	2761.0	7.0778	.4708	2564.5	2752.8	6.9299
200	1.0803	2654.4	2870.5	7.5066	.7163	2650.7	2865.6	7.3115	.5342	2646.8	2860.5	7.1706
250	1.1988	2731.2	2971.0	7.7086	.7964	2728.7	2967.6	7.5166	.5951	2726.1	2964.2	7.3789
300	1.3162	2808.6	3071.8	7.8926	.8753	2806.7	3069.3	7.7022	.6548	2804.8	3066.8	7.5662
400	1.5493	2966.7	3276.6	8.2218	1.0315	2965.6	3275.0	8.0330	.7726	2964.4	3273.4	7.8985
500	1.7814	3130.8	3487.1	8.5133	1.1867	3130.0	3486.0	8.3251	.8893	3129.2	3484.9	8.1913
600	2.013	3301.4	3704.0	8.7770	1.3414	3300.8	3703.2	8.5892	1.0055	3300.2	3702.4	8.4558
700	2.244	3478.8	3927.6	9.0194	1.4957	3478.4	3927.1	8.8319	1.1215	3477.9	3926.5	8.6987
800	2.475	3663.1	4158.2	9.2449	1.6499	3662.9	4157.8	9.0576	1.2372	3662.4	4157.3	8.9244
900	2.706	3854.5	4395.8	9.4566	1.8041	3854.2	4395.4	9.2692	1.3529	3853.9	4395.1	9.1362
1000	2.937	4052.5	4640.0	9.6563	1.9581	4052.3	4639.7	9.4690	1.4685	4052.0	4639.4	9.3360
1100	3.168	4257.0	4890.7	9.8458	2.1121	4256.8	4890.4	9.6585	1.5840	4256.5	4890.2	9.5256
1200	3.399	4467.5	5147.3	10.0262	2.2661	4467.2	5147.1	9.8389	1.6996	4467.0	5146.8	9.7060
1300	3.630	4683.2	5409.3	10.1982	2.4201	4683.0	5409.0	10.0110	1.8151	4682.8	5408.8	9.8780
P = .10 MPa (99.63)												
Sat.	.6058	2543.6	2725.3	6.9919	.4625	2553.6	2738.6	6.8959	.4708	2564.5	2752.8	6.9299
150	.6339	2570.8	2761.0	7.0778	.4708	2564.5	2752.8	6.9299	.5342	2646.8	2860.5	7.1706
200	.7163	2650.7	2865.6	7.3115	.5342	2646.8	2860.5	7.1706	.5951	2726.1	2964.2	7.3789
250	.7964	2728.7	2967.6	7.5166	.5951	2726.1	2964.2	7.3789	.6548	2804.8	3066.8	7.5662
300	.8753	2806.7	3069.3	7.7022	.6548	2804.8	3066.8	7.5662	.7163	2650.7	2865.6	7.3115
400	1.0315	2965.6	3275.0	8.0330	.7163	2650.7	2865.6	7.3115	.7726	2964.4	3273.4	7.8985
500	1.1867	3130.0	3486.0	8.3251	.7726	2964.4	3273.4	7.8985	.8319	3477.9	3926.5	8.6987
600	1.3414	3300.8	3703.2	8.5892	.8319	3477.9	3926.5	8.6987	.8893	3129.2	3484.9	8.1913
700	1.4957	3478.4	3927.1	8.8319	.8893	3129.2	3484.9	8.1913	1.0055	3300.2	3702.4	8.4558
800	1.6499	3662.9	4157.8	9.0576	1.0055	3300.2	3702.4	8.4558	1.1215	3477.9	3926.5	8.6987
900	1.8041	3854.2	4395.4	9.2692	1.1215	3477.9	3926.5	8.6987	1.2372	3662.4	4157.3	8.9244
1000	1.9581	4052.3	4639.7	9.4690	1.2372	3662.4	4157.3	8.9244	1.3529	3853.9	4395.1	9.1362
1100	2.1121	4256.8	4890.4	9.6585	1.3529	3853.9	4395.1	9.1362	1.4685	4052.0	4639.4	9.3360
1200	2.2661	4467.2	5147.1	9.8389	1.4685	4052.0	4639.4	9.3360	1.5840	4256.5	4890.2	9.5256
1300	2.4201	4683.0	5409.0	10.0110	1.5840	4256.5	4890.2	9.5256	1.6996	4467.0	5146.8	9.7060
P = .20 MPa (120.23)												
Sat.	.4625	2553.6	2738.6	6.8959	.4708	2564.5	2752.8	6.9299	.5342	2646.8	2860.5	7.1706
150	.4708	2564.5	2752.8	6.9299	.5342	2646.8	2860.5	7.1706	.5951	2726.1	2964.2	7.3789
200	.5342	2646.8	2860.5	7.1706	.5951	2726.1	2964.2	7.3789	.6548	2804.8	3066.8	7.5662
250	.5951	2726.1	2964.2	7.3789	.6548	2804.8	3066.8	7.5662	.7163	2650.7	2865.6	7.3115
300	.6548	2804.8	3066.8	7.5662	.7163	2650.7	2865.6	7.3115	.7726	2964.4	3273.4	7.8985
400	.7163	2650.7	2865.6	7.3115	.7726	2964.4	3273.4	7.8985	.8319	3477.9	3926.5	8.6987
500	.7726	2964.4	3273.4	7.8985	.8319	3477.9	3926.5	8.6987	.8893	3129.2	3484.9	8.1913
600	.8319	3477.9	3926.5	8.6987	.8893	3129.2	3484.9	8.1913	1.0055	3300.2	3702.4	8.4558
700	.8893	3129.2	3484.9	8.1913	1.0055	3300.2	3702.4	8.4558	1.1215	3477.9	3926.5	8.6987
800	.9478	2878.2	3161.7	7.4089	1.1215	3477.9	3926.5	8.6987	1.2372	3662.4	4157.3	8.9244
900	.9852	2895.7	3195.1	7.4852	1.2372	3662.4	4157.3	8.9244	1.3529	3853.9	4395.1	9.1362
1000	1.0110	2901.1	3218.0	7.5360	1.3529	3853.9	4395.1	9.1362	1.4685	4052.0	4639.4	9.3360
1100	1.0262	2911.0	3240.2	7.5716	1.4685	4052.0	4639.4	9.3360	1.5840	4256.5	4890.2	9.5256
1200	1.0330	2923.4	3263.0	7.5953	1.5840	4256.5	4890.2	9.5256	1.6996	4467.0	5146.8	9.7060
1300	1.0330	2923.4	3263.0	7.5953	1.6996	4467.0	5146.8	9.7060	1.8151	4682.8	5408.8	9.8780
P = .30 MPa (133.55)												
Sat.	.4625	2553.6	2738.6	6.8959	.4708	2564.5	2752.8	6.9299	.5342	2646.8	2860.5	7.1706
150	.4708	2564.5	2752.8	6.9299	.5342	2646.8	2860.5	7.1706	.5951	2726.1	2964.2	7.3789
200	.5342	2646.8	2860.5	7.1706	.5951	2726.1	2964.2	7.3789	.6548	2804.8	3066.8	7.5662
250	.5951	2726.1	2964.2	7.3789	.6548	2804.8	3066.8	7.5662	.7163	2650.7	2865.6	7.3115
300	.6548	2804.8	3066.8	7.5662	.7163	2650.7	2865.6	7.3115	.7726	2964.4	3273.4	7.8985
400	.7163	2650.7	2865.6	7.3115	.7726	2964.4	3273.4	7.8985	.8319	3477.9	3926.5	8.6987
500	.7726	2964.4	3273.4	7.8985	.8319	3477.9	3926.5	8.6987	.8893	3129.2	3484.9	8.1913
600	.8319	3477.9	3926.5	8.6987	.8893	3129.2	3484.9	8.1913	1.0055	3300.2	3702.4	8.4558
700	.8893	3129.2	3484.9	8.1913	1.0055	3300.2	3702.4	8.4558	1.1215	3477.9	3926.5	8.6987
800	.9478	2878.2	3161.7	7.4089	1.1215	3477.9	3926.5	8.6987	1.2372	3662.4	4157.3	8.9244
900	.9852	2895.7	3195.1	7.4852	1.2372	3662.4	4157.3	8.9244	1.3529	3853.9	4395.1	9.1362
1000	1.0110	2901.1	3218.0	7.5360	1.3529	3853.9	4395.1	9.1362	1.4685	4052.0	4639.4	9.3360
1100	1.0262	2911.0	3240.2	7.5716	1.4685	4052.0	4639.4	9.3360	1.5840	4256.5	4890.2	9.5256
1200	1.0330	2923.4	3263.0	7.5953	1.5840	4256.5	4890.2	9.5256	1.6996	4467.0	5146.8	9.7060
1300	1.0330	2923.4										

Annexe

Vapeur surchauffée												
<i>T</i>	<i>v</i>	<i>u</i>	<i>h</i>	<i>s</i>	<i>v</i>	<i>u</i>	<i>h</i>	<i>s</i>	<i>v</i>	<i>u</i>	<i>h</i>	<i>s</i>
P = 2.50 MPa (223.99)				P = 3.00 MPa (233.90)				P = 3.50 MPa (242.60)				
Sat.	.079 98	2603.1	2803.1	6.2575	.066 68	2604.1	2804.2	6.1869	.057 07	2603.7	2803.4	6.1253
225	.080 27	2605.6	2806.3	6.2639								
250	.087 00	2662.6	2880.1	6.4085	.070 58	2644.0	2855.8	6.2872	.058 72	2623.7	2829.2	6.1749
300	.098 90	2761.6	3008.8	6.6438	.081 14	2750.1	2993.5	6.5390	.068 42	2738.0	2977.5	6.4461
350	.109 76	2851.9	3126.3	6.8403	.090 53	2843.7	3115.3	6.7428	.076 78	2835.3	3104.0	6.6579
400	.120 10	2939.1	3239.3	7.0148	.099 36	2932.8	3230.9	6.9212	.084 53	2926.4	3222.3	6.8405
450	.130 14	3025.5	3350.8	7.1746	.107 87	3020.4	3344.0	7.0834	.091 96	3015.3	3337.2	7.0052
500	.139 98	3112.1	3462.1	7.3234	.116 19	3108.0	3456.5	7.2338	.099 18	3103.0	3450.9	7.1572
600	.159 30	3288.0	3686.3	7.5960	.132 43	3285.0	3682.3	7.5085	.113 24	3282.1	3678.4	7.4339
700	.178 32	3468.7	3914.5	7.8435	.148 38	3466.5	3911.7	7.7571	.126 99	3464.3	3908.8	7.6837
800	.197 16	3655.3	4148.2	8.0720	.164 14	3653.5	4145.9	7.9862	.140 56	3651.8	4143.7	7.9134
900	.215 90	3847.9	4387.6	8.2853	.179 80	3846.5	4385.9	8.1999	.154 02	3845.0	4384.1	8.1276
1000	.2346	4046.7	4633.1	8.4861	.195 41	4045.4	4631.6	8.4009	.167 43	4044.1	4630.1	8.3288
1100	.2532	4251.5	4884.6	8.6762	.210 98	4250.3	4883.3	8.5912	.180 80	4249.2	4881.9	8.5192
1200	.2718	4462.1	5141.7	8.8569	.226 52	4460.9	5140.5	8.7720	.194 15	4449.5	5139.3	8.7000
1300	.2905	4677.8	5404.0	9.0291	.242 06	4676.6	5402.8	8.9442	.207 49	4675.5	5401.7	8.8723
P = 4.0 MPa (250.40)				P = 4.5 MPa (257.49)				P = 5.0 MPa (263.99)				
Sat.	.049 78	2602.3	2801.4	6.0701	.044 06	2600.1	2798.3	6.0198	.039 44	2597.1	2794.3	5.9734
275	.054 57	2667.9	2886.2	6.2285	.047 30	2650.3	2863.2	6.1401	.041 41	2631.3	2838.3	6.0544
300	.058 84	2725.3	2960.7	6.3615	.051 35	2712.0	2943.1	6.2828	.045 32	2698.0	2924.5	6.2084
350	.066 45	2826.7	3092.5	6.5821	.058 40	2817.8	3080.6	6.5131	.051 94	2808.7	3068.4	6.4493
400	.073 41	2919.9	3213.6	6.7690	.064 75	2913.3	3204.7	6.7047	.057 81	2906.6	3195.7	6.6459
450	.080 02	3010.2	3330.3	6.9363	.070 74	3005.0	3323.3	6.8746	.063 30	2999.7	3316.2	6.8186
500	.086 43	3099.5	3445.3	7.0901	.076 51	3095.3	3439.6	7.0301	.068 57	3091.0	3433.8	6.9759
600	.098 85	3279.1	3674.4	7.3688	.087 65	3276.0	3670.5	7.3110	.078 69	3273.0	3666.5	7.2589
700	.110 95	3462.1	3905.9	7.6198	.098 47	3459.9	3903.0	7.5631	.088 49	3457.6	3900.1	7.5122
800	.122 87	3650.0	4141.5	7.8502	.109 11	3648.3	4139.3	7.7942	.098 11	3646.6	4137.1	7.7440
900	.134 69	3843.6	4382.3	8.0647	.119 65	3842.2	4380.6	8.0091	.107 62	3840.7	4378.8	7.9593
1000	.146 45	4042.9	4628.7	8.2662	.130 13	4041.6	4627.2	8.2108	.117 07	4040.4	4625.7	8.1612
1100	.158 17	4248.0	4880.6	8.4567	.140 56	4246.8	4879.3	8.4015	.126 48	4245.6	4878.0	8.3520
1200	.169 87	4458.6	5138.1	8.6376	.150 98	4457.5	5136.9	8.5825	.135 87	4456.3	5135.7	8.5331
1300	.181 56	4674.3	5400.5	8.8100	.161 39	4673.1	5399.4	8.7549	.145 26	4672.0	5398.2	8.7055
P = 6.0 MPa (275.64)				P = 7.0 MPa (285.88)				P = 8.0 MPa (295.06)				
Sat.	.032 44	2589.7	2784.3	5.8892	.027 37	2580.5	2772.1	5.8133	.023 52	2569.8	2758.0	5.7432
300	.036 16	2667.2	2884.2	6.0674	.029 47	2632.2	2838.4	5.9305	.024 26	2590.9	2785.0	5.7906
350	.042 23	2789.6	3043.0	6.3335	.035 24	2769.4	3016.0	6.2283	.029 95	2747.7	2987.3	6.1301
400	.047 39	2892.9	3177.2	6.5408	.039 93	2878.6	3158.1	6.4478	.034 32	2863.8	3138.3	6.3634
450	.052 14	2988.9	3301.8	6.7193	.044 16	2978.0	3287.1	6.6327	.038 17	2966.7	3272.0	6.5551
500	.056 65	3082.2	3422.2	6.8803	.048 14	3073.4	3410.3	6.7975	.041 75	3064.3	3398.3	6.7240
550	.061 01	3174.6	3540.6	7.0288	.051 95	3167.2	3530.9	6.9486	.045 16	3159.8	3521.0	6.8778
600	.065 25	3266.9	3658.4	7.1677	.055 65	3260.7	3650.3	7.0894	.048 45	3254.4	3642.0	7.0206
700	.073 52	3453.1	3894.2	7.4234	.062 83	3448.5	3888.3	7.3476	.054 81	3443.9	3882.4	7.2812
800	.081 60	3643.1	4132.7	7.6566	.069 81	3639.5	4128.2	7.5822	.060 97	3636.0	4123.8	7.5173
900	.089 58	3837.8	4375.3	7.8727	.076 69	3835.0	4371.8	7.7991	.067 02	3832.1	4368.3	7.7351
1000	.097 49	4037.8	4622.7	8.0751	.083 50	4035.3	4619.8	8.0020	.073 01	4032.8	4616.9	7.9384
1100	.105 36	4243.3	4875.4	8.2661	.090 27	4240.9	4872.8	8.1933	.078 96	4238.6	4870.3	8.1300
1200	.113 21	4454.0	5133.3	8.4474	.097 03	4451.7	5130.9	8.3747	.084 89	4449.5	5128.5	8.3115
1300	.121 06	4669.6	5396.0	8.6199	.103 77	4667.3	5393.7	8.5473	.090 80	4665.0	5391.5	8.4842
P = 9.0 MPa (303.40)				P = 10.0 MPa (311.06)				P = 12.5 MPa (327.89)				
Sat.	.020 48	2557.8	2742.1	5.6772	.018 026	2544.4	2724.7	5.6141	.013 495	2505.1	2673.8	5.4624
325	.023 27	2646.6	2856.0	5.8712	.019 861	2610.4	2809.1	5.7568				
350	.025 80	2724.4	2956.6	6.0361	.022 42	2699.2	2923.4	5.9443	.016 126	2624.6	2826.2	5.7118
400	.029 93	2848.4	3117.8	6.2854	.026 41	2832.4	3096.5	6.2120	.020 00	2789.3	3039.3	6.0417
450	.033 50	2955.2	3256.6	6.4844	.029 75	2943.4	3240.9	6.4190	.022 99	2912.5	3199.8	6.2719
500	.036 77	3055.2	3386.1	6.6576	.032 79	3045.8	3373.7	6.5966	.025 60	3021.7	3341.8	6.4618
550	.039 87	3152.2	3511.0	6.8142	.035 64	3144.6	3500.9	6.7561	.028 01	3125.0	3475.2	6.6290
600	.042 85	3248.1	3633.7	6.9589	.038 37	3241.7	3625.3	6.9029	.030 29	3225.4	3604.0	6.7810
650	.045 74	3343.6	3755.3	7.0943	.041 01	3338.2	3748.2	7.0398	.032 48	3324.4	3730.4	6.9218
700	.048 57	3439.3	3876.5	7.2221	.043 58	3434.7	3870.5	7.1687	.034 60	3422.9	3855.3	7.0536
800	.054 09	3632.5	4119.3	7.4596	.048 59	3628.9	4114.8	7.4077	.038 69	3620.0	4103.6	7.2965
900	.059 50	3829.2	4364.8	7.6783	.053 49	3826.3	4361.2	7.6272	.042 67	3819.1	4352.5	7.5182
1000	.064 85	4030.3	4614.0	7.8821	.058 32	4027.8	4611.0	7.8315	.046 58	4021.6	4603.8	7.7237
1100	.070 16	4236.3	4867.7	8.0740	.063 12	4234.0	4865.1	8.0237	.050 45	4228.2	4858.8	7.9165
1200	.075 44	4447.2	5126.2	8.2556	.067 89	4444.9	5123.8	8.2055	.054 30	4439.3	5118.0	8.0987
1300	.080 72	4662.7	5389.2	8.4284	.072 65	4460.5	5387.0	8.3783	.058 13	4654.8	5381.4	8.2717
P = 15.0 MPa (342.24)				P = 17.5 MPa (354.75)				P = 20.0 MPa (365.81)				
Sat.	.010 337	2455.5	2610.5	5.3098	.007 920	2390.2	2528.8	5.1419	.005 834	2293.0	2409.7	4.9269
350	.011 470	2520.4	2692.4	5.4421								
400	.015 649	2740.7	2975.5	5.8811	.012 447	2685.0	2902.9	5.7213	.009 942	2619.3	2818.1	5.5540
450	.018 445	2879.5	3156.2	6.1404	.015 174	2844.2	3109.7	6.0184	.012 695	2806.2	3060.1	5.9017
500	.020 80	2996.6	3308.6	6.3443	.017 358	2970.3	3274.1	6.2383	.014 768	2942.9	3238.2	6.1401
550	.022 93	3104.7	3448.6	6.5199	.019 288	3083.9	3421.4	6.4230	.016 555	3062.4	3393.5	6.3348
600	.024 91	3208.6	3582.3	6.6776	.021 06	3191.5	3560.1	6.5866	.018 178	3174.0	3537.6	6.5048
650	.026 80	3310.3	3712.3	6.8224	.022 74	3296.0	3693.9	6.7357	.019 693	3281.4	3675.3	6.6582
700	.028 61	3410.9	3840.1	6.9572	.024 34	3398.7	3824.6	6.8736	.021 13	3386.4	3809.0	6.7993
800	.032 10	3610.9	4092.4	7.2040	.027 38	3601.8	4081.1	7.1244	.023 85	3592.7	4069.7	7.0544
900	.035 46	3811.9	4343.8	7.4279	.030 31	3804.7	4335.1	7.3507	.026 45	3797.5	4326.4	7.2830
1000	.038 75	4015.4	4596.6	7.6348	.033 16	4009.3	4589.5	7.5589	.028 97	4		

ملخص

أصبح استخدام الطاقة الشمسية مصدر اهتمام كبير ، وخصوصا في بلدنا حيث لديه ثروة طاغوية كبيرة طول العام. يمكننا استخدام الطاقة الشمسية بصفة مركزة لإنتاج الكهرباء أو الحرارة. مهمتنا هي دراسة العوامل المؤثرة على تشغيل و تركيب محطة حرارية تعمل على الطاقة الشمسية المركزة. هذه المحطة تعمل مع برج للطاقة الشمسية و توربينات البخار، مقاصدنا معرفة تأثيرات تغييرات درجة الحرارة و الضغط على المردود بغية تحسرين و الرفع من قيمته.

نفت المحاكاة لمختلفة التعديلات على دورة RANKINE و HIRN، و قد وجدنا أن الزيادة في درجة الحرارة بالنسبة لدورة HIRN، ارتفاع الضغط العالي و الحد من الضغط المنخفض، لكنا الدورتين، يؤدي إلى مردود أفضل.
الكلمات المفتاحية: دراسة العوامل المؤثرة، ونظام للطاقة الشمسية الحرارية، برج الطاقة الشمسية و مردود التوربينات البخارية.

Résumé

L'exploitation de l'énergie solaire est devenue une préoccupation majeure, surtout que notre pays en détient un potentiel solaire important durant l'année. Nous pouvons utiliser l'énergie solaire concentrée pour produire de l'électricité ou pour la production de chaleur. Notre travail consiste à l'analyse paramétrique du fonctionnement d'une installation thermique solaire à concentration. Cette installation travaille avec une tour solaire et une turbine à vapeur, nous avons étudié l'influences de la température de surchauffe, pour le cycle de Hirn, et les haute et basse pressions, pour les deux cycle, sur le rendement afin de proposer une éventuelle amélioration.

Des simulations pour différentes modifications sur le cycle de RANKINE et celui de HIRN ont étaient faites. Nous avons trouvé que l'augmentation de la température de surchauffe, l'accroissement de la haute pression et la réduction de la basse pression conduisent à un rendement meilleur.

Mots clés : Influence de la température et des pressions, installation thermique solaire, tour solaire, turbine à vapeur, rendement thermique d'une turbine à vapeur.

Abstract

The use of solar energy has become a major concern, especially since our country has a significant solar potential during the year. We can use concentrated solar energy to produce electricity or heat production. Our job is to parametric analysis of the operation of a solar thermal system for concentration. This installation works with a solar tower and a steam turbine, we studied the influences of the superheat temperature for the cycle Hirn, and high and low pressure for the two cycle performance to deliver a possible improvement.

Simulations for different modifications of the cycle and of RANKINE have HIRN were made. We found that the increase in the superheat temperature, increasing the high pressure and the reduction of the low pressure lead to a better performance.

Keywords: Influence of temperature and pressure, solar heating system, solar tower, steam turbine, thermal efficiency of a steam turbine.