

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR

ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE ABDERRAHMANE MIRA BEJAIA

FACULTE DE TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE

MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du diplôme de

MASTER

Filière : Génie Mécanique

Spécialité : Énergétique

Réalisé par :

MAKHOLOUFI Samir

KACIMI Kahina

Thème

**Étude paramétrique d'une installation
Énergétique solaire à base de cycle de Rankine**

Soutenu le 21.06.2023 devant le jury composé de :

Mr. **A. DJERRADA**

Président

Mr. **N. BOUTALBI**

Rapporteur

Mr. **M. HAMDI**

Examineur

Année Universitaire 2022-2023

Remerciements

Le plus grand Merci tout d'abord revient à « Dieu » qui, lui seul, nous a guidés dans le bon sens durant notre vie et qui nous a donné le courage, la volonté, et la force pour élaborer ce travail.

*On tient à exprimer nos vifs remerciements et témoigner notre profonde gratitude à Mr **N.BOUTALBI** enseignant à l'université Abderrahmane MIRA de Bejaia, pour son soutien et l'attention qu'il nous a apportée et pour nous avoir guidés tout au long de ce travail. Ses précieux conseils nous ont été d'une grande utilité.*

On remercie vivement les membres de jury d'avoir accepté de juger ce travail.

Enfin, On remercie tous ceux qui ont contribué, de près ou de loin à l'élaboration de ce mémoire.

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à toutes les personnes qui Me sont chers.

À mes chers parents, qui se sont sacrifiés pour m'offrir un climat idéal de travail et qui n'ont jamais cessé de me témoigner leurs affections et de m'apporter leurs soutient depuis Toujours, que le Bon Dieu les garde et les protège.

À tous mes chers amis À tous mes amis de l'université de Bejaia, Surtouts Spécialité génie mécanique.

Sommaire

Dédicaces	ii
Sommaire	iii
Liste des figures	vi
Liste des tableaux	viii
NOMENCLATURE	ix
Introduction générale.....	1
CHAPITRE I: Généralités et Analyse bibliographique	
I.1 Introduction	3
I.2 Définition de l'énergie	3
I.3 Différentes sources d'énergie	4
I.3.1 Energie classique non renouvelable	4
I.3.2 Energie renouvelable	4
I.3.3 Energie solaire	4
I.4 Différents types des centrales solaires thermodynamiques	5
I.4.1 Différentes technologies utilisées	5
I.4.2 Principe de fonctionnement des installations solaires thermodynamiques	7
I.4.3 Exemple sur les composants de la centrale solaire cylindro-parabolique	8
I.5 Fluides caloporteurs utilisés	8
I.6 Stockage d'énergie thermique	10
I.6.1 Méthodes stockées l'énergie thermique	10
I.6.2 Fonctionnement d'un procédé de stockage d'énergie thermique	13
I.6.3 Centrale électrique à cycle combiné avec intégration de l'énergie	14
I.6.4 Rendement de conversion chaleur d'origine organique électricité annuels pour différentes centrale hybride	15
I.7 Turbine à vapeur	15
I.7.1 Définition	15
I.7.2 Description d'une installation turbine à vapeur	16
I.7.3 Classification des turbines à vapeur	17
I.7.4 Domaine d'application	21

I.7.5	Différentes transformations énergétiques dans une installation turbine à vapeur	21
I.8	Cycle de Rankine	22
I.9	Avantages et les Inconvénients de la turbine à vapeur	23
I.10	Revue bibliographique	24
I.11	Conclusion	27

CHAPITRE II: Position de problème

II.1	Introduction	28
II.2	Présentation du logiciel EES	28
II.3	Modélisation de l'installation thermodynamique de l'énergie solaire	29
II.3.1	Modélisation du panneau solaire	29
II.3.2	Modélisation du fluide de travail	29
II.3.3	Modélisation du cycle Rankine	29
II.3.4	Modélisation du stockage thermique	30
II.3.5	Optimisation de l'installation	30
II.4	Modélisation mathématique	30
II.4.1	Collecteurs solaires	30
II.4.2	Stockage d'énergie thermique	34
II.4.3	Premier principe de la thermodynamique des systèmes ouverts	35
II.4.4	Deuxième principe de la thermodynamique	35
II.4.5	Bilan énergétique	36
II.5	Données de l'étude	41
II.5.1	Partie solaire	41
II.5.2	Partie cycle Rankine	41
II.6	Méthodes numériques de simulation du problème d'optimisation	42
II.7	Conclusion	43

CHAPITRE III : Résultats et Discussions

III.1	Introduction	43
III.2	Les résultats donnés par le logiciel EES :	43
III.3	Etude de l'influence de quelques paramètre sur le rendement du capteur solaire	45
III.3.1	Influence de débit massique	45
III.3.2	Influence la température du fluide de travail à la entrée du collecteur solaire	46
III.3.3	Influence la température du fluide de travail à la sortie du collecteur solaire	47
III.4	Effet de la température d'évaporateur	50

III.4.1 Effet de la température d'évaporateur sur le rendement énergétique.....	50
III.4.2 Effet de la température d'évaporateur sur le travail net	51
III.5 Effets de la pression de condensation.....	52
III.5.1 Effet de la pression de condenseur sur le rendement énergétique.....	52
III.5.2 Effet de la pression de condenseur sur le travail net	53
III.6 Effets du travail massique de cycle	54
III.7 Conclusion.....	54
Conclusion générale	55
Références bibliographiques	56
Résumé	59

Liste des figures

Figure I.1: Quatre types de concentration possibles dans les centrales solaires thermodynamiques.	6
Figure I.2: Stockage deux-cuves indirect vs stockage deux-cuves direct.	7
Figure I.3: Composantes de base d'une centrale solaire cylindro-parabolique.....	8
Figure I.4: Schéma d'une Stockage thermique par chaleur sensible.....	10
Figure I.5: Stockage thermique par changement de phase.	11
Figure I.6: Stockage thermo-chimique couplé à un système solaire thermique.	12
Figure I.7: Différentes manières physiques de stocker l'énergie thermique.	12
Figure I.8: Différents modes d'utilisation d'une unité de stockage thermique dans une centrale solaire.	13
Figure I.9: Intégration d'énergie solaire au cycle vapeur d'un cycle combiné gaz/vapeur.....	14
Figure I.10: Schéma d'une turbine à vapeur	16
Figure I.11: Mode de fonctionnement de la vapeur	18
Figure I.12: Turbine axial et radial.....	18
Figure I.13: Différents de turbines à vapeur	19
Figure I.14: Différents de turbines à vapeur	20
Figure I.15: Différente transformation énergétique solaire dans une installation turbine vapeur.	21
Figure I.16: Schéma d'un cycle de Rankine diagramme (T-S)	22
Figure I.17: Distribution des miroirs entre deux tubes d'absorbeurs	24
Figure I.18: Variation de la puissance électrique du cycle ORC en fonction de la masse collecteur solaire	25
Figure I.19: Variation du rendement énergétique du cycle ORC en fonction de la pression d'évaporateur ORC	26
Figure II.1: Schéma d'une installation thermodynamique de l'énergie solaire.	29
Figure II.2: Collecteur solaire.	30
Figure II.3: Réservoir de stockage l'énergie thermique.....	34
Figure II.4: Schéma de principe d'une turbine à vapeur	36
Figure II.5: Cycle de Rankine simple	37
Figure II.6: Schéma descriptive de la pompe	37
Figure II.7: Schéma descriptive de la chaudière	38

Figure II.8: Schéma descriptive d'une turbine à vapeur.....	39
Figure II.9: Schéma descriptive de condenseur	40
Figure III.1: Variation rendement du collecteur solaire et rendement du cycle Rankine	45
Figure III.2: Variation rendement du collecteur solaire et rendement du cycle Rankine en fonction de l'efficacité thermique.	46
Figure III.3: Variation rendement du collecteur solaire et rendement du cycle Rankine en fonction de température du fluide de travail à la sortie.....	47
Figure III.4: Variation du rendement énergétique du cycle ORC en fonction de la température d'évaporateur ORC.	50
Figure III.5: Effet de la température d'évaporation sur le travail net du cycle.....	51
Figure III.6: Variation de l'efficacité énergétique du cycle ORC en fonction de la pression de condenseur.....	52
Figure III.7: Effet de pression de condensation sur le travail net du cycle.....	53
Figure III.8: Variation de l'efficacité énergétique du cycle ORC en fonction de travail massique net.	54

Liste des tableaux

Tableau I.1: Quelques fluides caloporteurs.....	9
Tableau I.2: Rendements de conversion chaleur d'origine organique-électricité annuels pour différentes centrale hybride.....	15
Tableau I.3: Avantages et les inconvénients de la turbine à vapeur.	23
Tableau II.1: Données de l'étude débit massique de collecteur solaire.	41
Tableau II.2: Données de l'étude de la température de fluide sortie du collecteur solaire	41
Tableau II.3: Données de l'étude de la température de fluide entrée du collecteur solaire.	41
Tableau II.4: Données de l'étude du cycle ORC.....	42
Tableau III.1: Les résultats de $\eta=f(m)$	43
Tableau III.2: Les résultats de $\eta=f(T_{fs})$	44
Tableau III.3: Les résultats de $\eta=f(T_{fe})$	44
Tableau III.4: Caractéristiques thermodynamiques des points du cycle ORC pour le fluide R123.	48
Tableau III.5: Performances du cycle ORC pour le fluide R123.	48
Tableau III.6: Caractéristiques thermodynamiques des points du cycle ORC pour le fluide R123.	48
Tableau. III.7: Performances du cycle ORC pour le fluide R245fa.	49
Tableau. III.8: Caractéristiques thermodynamiques des points du cycle ORC pour le fluide R600a.	49
Tableau III.9: Performances du cycle ORC pour le fluide R600a.	49

NOMENCLATURE

Symboles	Définition	Unité (SI)
A_c	Surface des panneaux solaires	[m ²]
C	Capacité thermique totale du système	[J/K]
C_p	Capacité thermique spécifique du fluide	[J/kg K]
G	rayonnement global incident.	[W/m ²]
Q_{col}	La puissance thermique requise	[W]
η	Rendement de conversion de collecteur solaire	[%]
Q	Energie thermique stockée	[J]
Q_f	Chaleur consommée à la source froide	[kJ/kg]
Q_c	Chaleur consommé à la source chaude	[kJ/kg]
\dot{Q}_f	Puissance de condenseur	[W]
\dot{m}	Débit massique	[kg/s]
S	Entropie	[kJ/kg k]
h	Enthalpie spécifique	[kJ/kg]
ΔT	Ecart de température au niveau de la source thermique	[K]
\dot{W}	Puissance	[W]
p	Pression	[Pas]
η_{Th}	Rendement thermique de l'installation	[%]
W	Travail	[kJ/kg]
T	Température	[K]
T_{fs}	T Température <i>de sortie du fluide</i>	[K]
T_{fe}	Température <i>de entrèe du fluide</i>	[K]

Abréviations

EES	Engineering Equation Solver
Evp	Evaporateur
In	Entrée
Net	Nette
ORC	Organique Rankine Cycle
ppe (P)	Pompe
Out	Sortie
Tv (T)	Turbine à vapeur

Introduction générale

Introduction générale

À mesure que la population mondiale augmente, la demande énergétique globale augmente de 2 % par année, AIE (Agence internationale de l'énergie, 2010), selon l'édition 2017 du BP Energy Outlook, la demande mondiale d'énergie augmentera en particulier avec les améliorations de l'efficacité énergétique alimentées par la prospérité croissante des pays en développement, Si la croissance actuelle se maintient à environ 1,3 % par année, la demande dépassera la disponibilité des ressources dans un avenir prévisible.

La récupération de la chaleur à basse température, qui comprend la chaleur perdue, la chaleur solaire, la biomasse, l'énergie éolienne, l'énergie géothermique, etc., pourrait être un moyen durable de résoudre la crise énergétique, Par rapport à la chaleur perdue, à l'énergie éolienne, l'énergie géothermique et à la biomasse, l'énergie solaire présente des avantages en raison de sa facilité.

Les sources d'énergie renouvelables ont souvent des limites en raison de leur intermittence et de leurs difficultés de stockage, si la limitation du stockage est importante pour les sources d'énergie telles que l'énergie solaire ou photovoltaïque, elle est moins pour l'énergie solaire à concentration qui utilise généralement des systèmes de stockage thermique ou peut être mélangée à d'autres sources d'énergie (gaz naturel, biomasse, etc.)[1].

L'énergie solaire est une source d'énergie renouvelable propre et inépuisable, cette source d'énergie permet de produire de l'électricité à partir de panneaux photovoltaïques ou de centrales solaires thermiques grâce à la lumière du soleil captée par des panneaux solaires, il existe différentes centrales telles que les centrales thermiques à vapeur et à cycle combiné.

Ces centrales connaissent un développement important malgré leurs limites, elles présentent 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.

La technologie solaire se base sur des collecteurs qui captent le rayonnement solaire et chauffent un fluide caloporteur à haute température, ce fluide peut ensuite être utilisé pour générer de l'électricité, par exemple via le cycle de Rankine, un cycle thermodynamique utilisé pour générer de l'électricité à partir de la vapeur.

L'une des composantes essentielles du cycle Rankine, qui est largement utilisé dans les installations énergétiques, est la turbine à vapeur, la turbine à vapeur joue un rôle crucial dans la conversion de l'énergie thermique en énergie mécanique, permettant ainsi la production d'électricité à grande échelle.

Le but de notre travail est d'étudier paramétriques d'une installation énergétique solaire à base de cycle Rankine c'est-à-dire une centrale solaire intégrée dans le cycle Rankine.

Pour atteindre cet objectif, nous avons organisé le manuscrit comme suit :

Après, l'introduction générale, nous divisons le travail en trois chapitres, dont :

Le premier chapitre présente une étude bibliographique de l'énergie solaire qui porte aussi sur les différents types de centrales solaires thermiques à vapeur, leurs principes de fonctionnements et leurs caractéristiques et les méthodes stockées l'énergie thermique, à la fin de ce chapitre on mentionne certains avantages et inconvénients de centrale à vapeur.

Le second chapitre est réservé à la présentation intitulé orientation du problème contient les lois et principes de la thermodynamique que nous utilisons dans notre modélisation mathématique nécessaires pour calcul de la centrale solaire étudiée, le stockage thermique et pour simuler les performances énergétiques de cycle Rankine simple pertinents pour le fonctionnement de la turbine à vapeur.

Le troisième et le dernier chapitre est réservé pour la simulation et la discussion des résultats obtenus sous forme des tableaux et des courbes à l'aide du logiciel EES.

Enfin, on a terminé avec une conclusion générale.

Chapitre I
Généralités et Analyse
bibliographique

Généralités et Analyse bibliographique

I.1 Introduction

L'épuisement des énergies fossiles et leurs impacts sur l'environnement ont conduit à la recherche de sources d'énergie renouvelables pour la production d'électricité.

L'énergie solaire est une source renouvelable prometteuse en raison de son faible impact environnemental et de son potentiel économique.

Les centrales solaires thermiques sont des installations énergétiques solaires qui utilisent des miroirs pour concentrer les rayons du soleil afin de produire de l'électricité [2], les capteurs solaires se divisent en deux familles :

- Les capteurs solaires plans pour la production d'eau chaude sanitaire et de chauffage.
- les concentrateurs solaires pour la production d'énergie solaire thermodynamique à haute température.

I.2 Définition de l'énergie

Le mot « énergie » vient du grec « energeia », qui signifie « travail ou force en action »
L'énergie, c'est la capacité d'un système à produire des actions : générer un mouvement de la lumière ou de la chaleur, changer la température ou transformer la matière.

L'énergie est la grandeur qui permet de caractériser un changement d'état dans un système:

- Modification de la température (énergie thermique).
- Modification de la vitesse (énergie cinétique).
- Modification de la composition chimique (énergie chimique, combustion).
- Modification de la composition atomique (énergie nucléaire).

I.3 Différentes sources d'énergie

I.3.1 Energie classique non renouvelable

L'énergie classique est un terme général qui désigne toutes les sources d'énergie non renouvelables telles que les énergies fossiles (pétrole, gaz naturel et charbon) qui sont aujourd'hui les trois principales sources d'énergie fossile dans le monde, mais aussi l'énergie nucléaire, en fait, l'énergie nucléaire utilise des réactions de fission ou de fusion nucléaires pour produire de l'énergie.

I.3.2 Energie renouvelable

Il s'agit d'une énergie qui est produite à partir de sources naturelles qui se renouvellent constamment, telles que l'énergie solaire, l'énergie éolienne, l'énergie hydraulique, l'énergie géothermique et la biomasse.

Les sources d'énergie renouvelable ne s'épuisent pas et peuvent être utilisées de manière durable sans compromettre les besoins énergétiques des générations futures, Les énergies renouvelables sont également appelées "énergies propres" ou "énergies vertes" car leur exploitation a des impacts environnementaux limités en termes d'émissions de gaz à effet de serre et de pollution, et Parmi les différentes d'énergies renouvelables, on retrouve en tête, l'énergie solaire.

I.3.3 Energie solaire

L'énergie solaire (l'énergie demain) est une énergie propre et renouvelable qui peut aider à réduire la dépendance aux combustibles fossiles et à réduire les émissions de gaz à effet de serre, il peut être utilisé dans une variété d'applications, de la production d'électricité à grande échelle à l'alimentation de petites applications domestiques, en passant par le chauffage et le refroidissement des bâtiments.

Ce type d'énergie renouvelable provient directement de la captation du rayonnement solaire (qui fournit un rayonnement solaire direct), des capteurs spécifiques sont utilisés pour absorber et redistribuer l'énergie solaire selon deux modes de fonctionnement principaux :

- Solaire PV (Panneaux Solaires Photovoltaïques) : l'énergie solaire est captée pour produire de l'électricité.
- Énergie solaire thermique (chauffe-eau solaire, chauffage, panneaux solaires thermiques) : la chaleur du soleil est captée et redistribuée, et est rarement utilisée pour produire de l'électricité.

I.4 Différents types des centrales solaires thermodynamiques

I.4.1 Différentes technologies utilisées

Il existe plusieurs filières de la technologie solaire thermodynamique, notamment :

a. Collecteur Fresnel-linéaire (La filière à concentration avec stockage thermique)

Dans ce système, la chaleur produite par la concentration du rayonnement solaire est stockée dans un matériau isolant pour être utilisée ultérieurement, lorsque le soleil n'est plus présent, cela permet de produire de l'électricité en continu, même la nuit ou lorsque le ciel est couvert.

b. Collecteur parabolique (La filière à concentration sans stockage thermique)

Dans ce système, la chaleur produite par la concentration du rayonnement solaire est directement utilisée pour produire de l'électricité, ce système est moins efficace que celui avec stockage thermique, car il ne peut produire de l'électricité que lorsque le soleil est présent.

c. Collecteur cylindro-parabolique

Dans ce système, des miroirs cylindro-paraboliques sont utilisés pour concentrer le rayonnement solaire sur des tubes contenant un fluide caloporteur, la chaleur produite est ensuite utilisée pour produire de la vapeur, qui alimente une turbine pour produire de l'électricité.

d. Centrales à tour

Dans ce système, des miroirs sont disposés sur le sol pour concentrer le rayonnement solaire sur une tour située au centre, le facteur de mise au point peut dépasser 1000, permettant d'atteindre de grandes températures, de 600 ° C à 1000 ° C [3], la chaleur produite est utilisée pour produire de la vapeur, qui alimente une turbine pour produire de l'électricité.

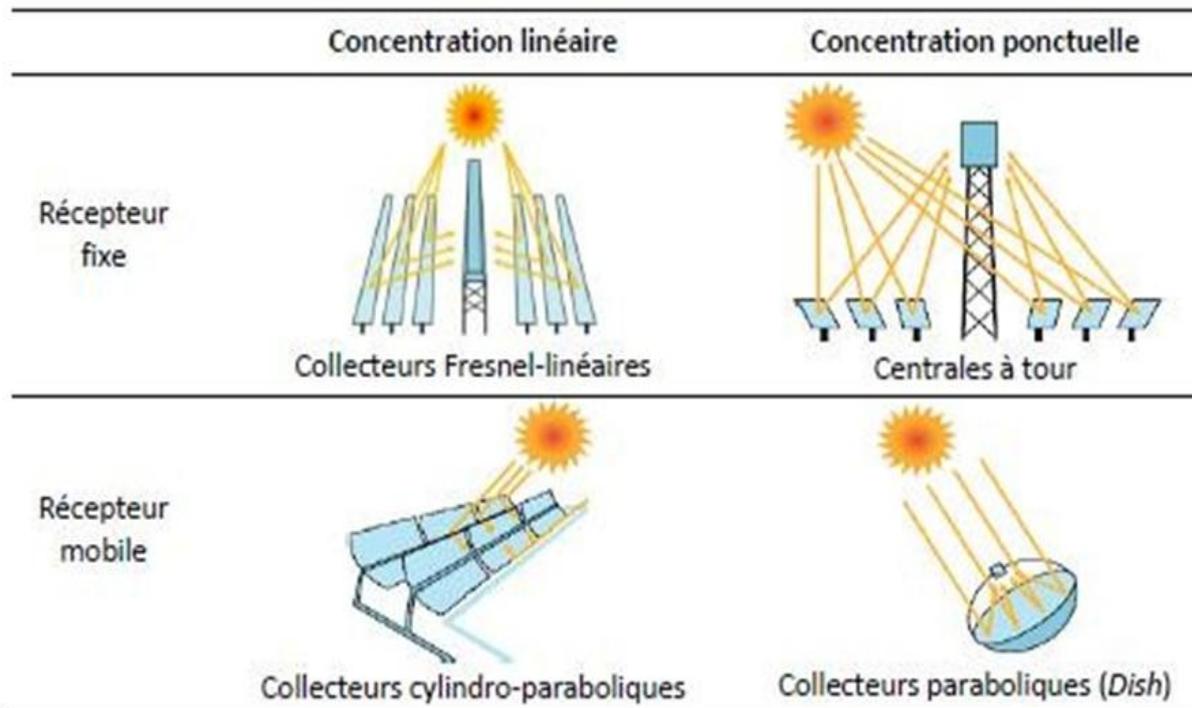


Figure I.1: Quatre types de concentration possibles dans les centrales solaires thermodynamiques [3].

Remarque

- Lorsque les panneaux solaires sont sales ou tachés, cela peut affecter leur capacité à convertir la lumière solaire en énergie électrique, la saleté, la poussière, les feuilles mortes, les excréments d'oiseaux et autres débris peuvent obstruer la surface des panneaux solaires, ce qui réduit la quantité de lumière solaire qui atteint les cellules photovoltaïques à l'intérieur des panneaux, cela peut entraîner une diminution de la production d'énergie solaire, ce qui peut avoir un impact sur l'efficacité et la rentabilité de l'installation solaire, en fonction de la quantité de saleté ou de taches présentes sur les panneaux solaires, l'effet sur la production d'énergie peut varier, mais il est généralement conseillé de nettoyer régulièrement les panneaux solaires pour optimiser leur performance.
- L'heure de la journée joue un rôle important dans la quantité d'énergie solaire que les panneaux solaires peuvent capter, à midi, lorsque le Soleil est directement au-dessus de la tête, les panneaux solaires sont exposés à la plus grande quantité d'énergie solaire possible. Cela signifie que les panneaux solaires produiront plus d'énergie électrique à midi qu'à d'autres moments de la journée.

I.4.2 Principe de fonctionnement des installations solaires thermodynamiques

Il existe deux modes de fonctionnement : la génération directe et indirecte d'électricité, dans le premier cas, le fluide qui circule dans le champ solaire est le même que celui qui actionne la turbine, tandis que dans le second cas, le fluide caloporteur circulant dans le champ solaire réchauffe un fluide de travail qui alimente la turbine.

Les centrales solaires thermodynamiques sont composées de trois blocs :

a. Premier bloc

Est un système de captation solaire constitué réflecteur/ concentrateur, Communément appelé champ solaire, il capte les radiations solaires directes et les concentre sur un récepteur dans lequel s'écoule un fluide caloporteur.

Durant cette étape le rayonnement solaire est converti en puissance thermique.

b. Second bloc

Est un système de stockage et de restitution d'énergie thermique qui permet de décaler la production d'électricité de la ressource solaire et de pallier ainsi à son intermittence.

c. Troisième bloc

Est un système de conversion thermodynamique composé de deux éléments :

L'élément principal est une turbine qui transforme l'énergie thermique du fluide de travail en énergie mécanique et la turbine couplée à un générateur électrique transforme l'énergie mécanique en électricité.

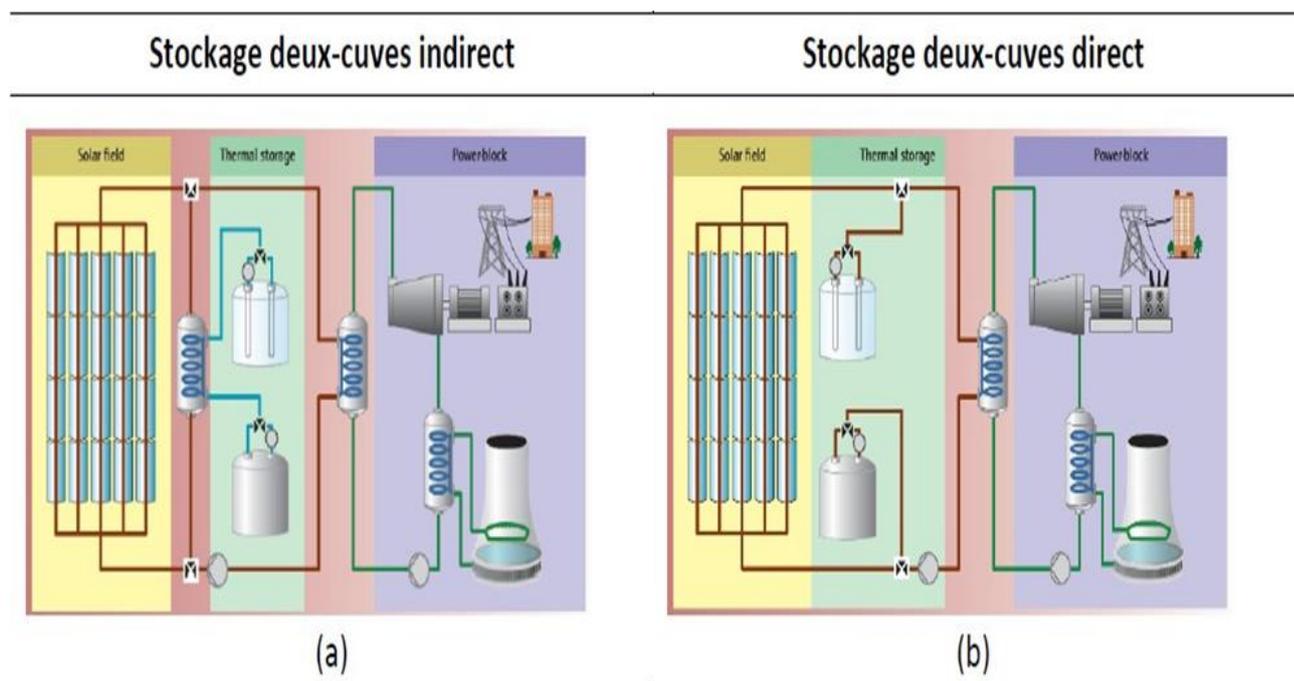


Figure I.2: Stockage deux-cuves indirect vs stockage deux-cuves direct [4].

I.4.3 Exemple sur les composants de la centrale solaire cylindro-parabolique

Les éléments clés d'une centrale solaire cylindro-parabolique sont les suivants, comme illustré dans la figure (I.3) :

- Le champ solaire est la section réceptive de l'installation où l'énergie thermique est produite à partir de la radiation solaire, les collecteurs sont interconnectés en série et en parallèle pour former un réseau efficace.
- La dimension du champ solaire est déterminée par la quantité de puissance désirée et la température du fluide caloporteur en sortie, qui représente l'équivalent de l'alimentation en combustible des centrales thermiques [5].
- Le système de transport et de stockage de chaleur est utilisé pour acheminer le fluide caloporteur (vapeur d'eau ou autre) selon la température de la source chaude et le système utilisé.
- Le système de conversion de chaleur en électricité est basé sur un cycle thermodynamique, Permettant la production d'électricité à partir de la chaleur générée par la radiation solaire.

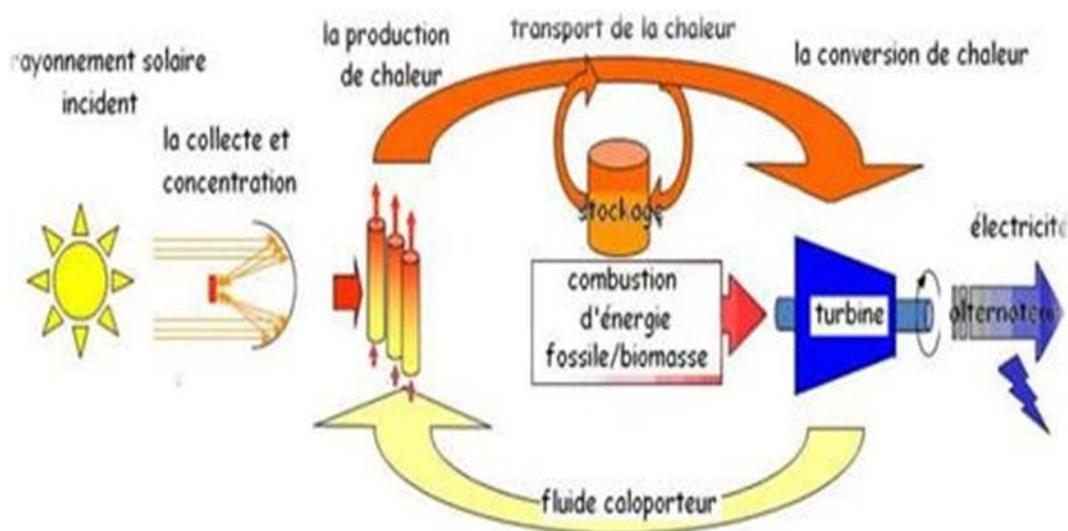


Figure I.3 : Composantes de base d'une centrale solaire cylindro-parabolique.

I.5 Fluides caloporteurs utilisés

Le choix du fluide caloporteur est crucial car il détermine la température maximale possible, affecte la technologie et les matériaux utilisés dans le récepteur et peut affecter la capacité de stockage, dans certains cas, le fluide caloporteur est utilisé directement comme fluide thermodynamique, il existe plusieurs types de fluides caloporteurs [6], notamment :

- Les huiles qui sont souvent utilisées dans les centrales paraboliques cylindriques en raison de leur bon coefficient d'échange.

- Les sels fondus qui sont des mélanges binaires ou ternaires à base de nitrates de sodium et de potassium, qui ont une densité élevée et sont de très bons.
- Les fluides organiques tels que le butane et le propane, qui ont une température d'évaporation basse et sont utilisés comme fluides thermodynamiques dans un cycle de Rankine (R11, R13, SES36, R114, R123, R124, R141b, R152a, R227ea, R245fa, R245ca, R290 (propane), R365mfc, RC318, C5F12, R600 (butane), R600a (isobutane)).
- L'eau liquide est considérée comme le fluide de transfert idéal en raison de son excellent coefficient d'échange et de sa forte capacité thermique, et elle est souvent utilisé directement comme fluide thermodynamique dans un cycle de Rankine.

Fluide / exemple	Température de fonctionnement du caloporteur	Type de capitation	Type de fluide
Sels fondus ($\text{NaNO}_3 / \text{KNO}_3$)	350 à 565°C	Cylindro-paraboliques/Fresnel/ Héliostats et centrales à tours	Fluide caloporteur
Huiles thermiques (Therminol VP1, Downterm A)	~ 350°C	Cylindro-paraboliques/Fresnel	Fluide caloporteur
Eau et vapeur d'eau	40 à 450°C	Cylindro-paraboliques/Fresnel	Fluide caloporteur/ de travail
Air	500 à 1200°C	Héliostats et centrales à tours/ Miroirs paraboliques	Fluide caloporteur / de travail

Tableau I.1: Quelques fluides caloporteurs.

I.6 Stockage d'énergie thermique

I.6.1 Méthodes stockées l'énergie thermique

Le stockage d'énergie thermique est une étape importante après la conversion d'énergie en chaleur utilisable, qui permet de stocker l'énergie pour une utilisation ultérieure et ainsi maximiser l'efficacité énergétique.

Il existe plusieurs méthodes pour stocker l'énergie thermique produite par l'énergie solaire et nous les mentionnons :

a. Stockage thermique par chaleur sensible

Ce principe est utilisé dans une centrale thermodynamique pour stocker la chaleur emmagasinée pendant la journée, le fluide caloporteur qui transporte la chaleur circule jusqu'à un échangeur thermique relié à deux réservoirs de sels fondus, les sels fondus froids passent à travers l'échangeur et emmagasinent à leur tour la chaleur du fluide, ils sont ensuite stockés dans un réservoir de sels chauds.

Au coucher du soleil, le circuit s'inverse et les sels chauds circulent vers le réservoir à sels froids, la chaleur est ainsi cédée au fluide caloporteur pour alimenter une turbine et produire de l'électricité, cette méthode est similaire au fait de poser une pierre près d'un feu et de la déplacer pour profiter de la chaleur qu'elle restitue dans le temps, ou encore à l'utilisation d'un ballon d'eau chaude ou d'une bouillote pour stocker de la chaleur.

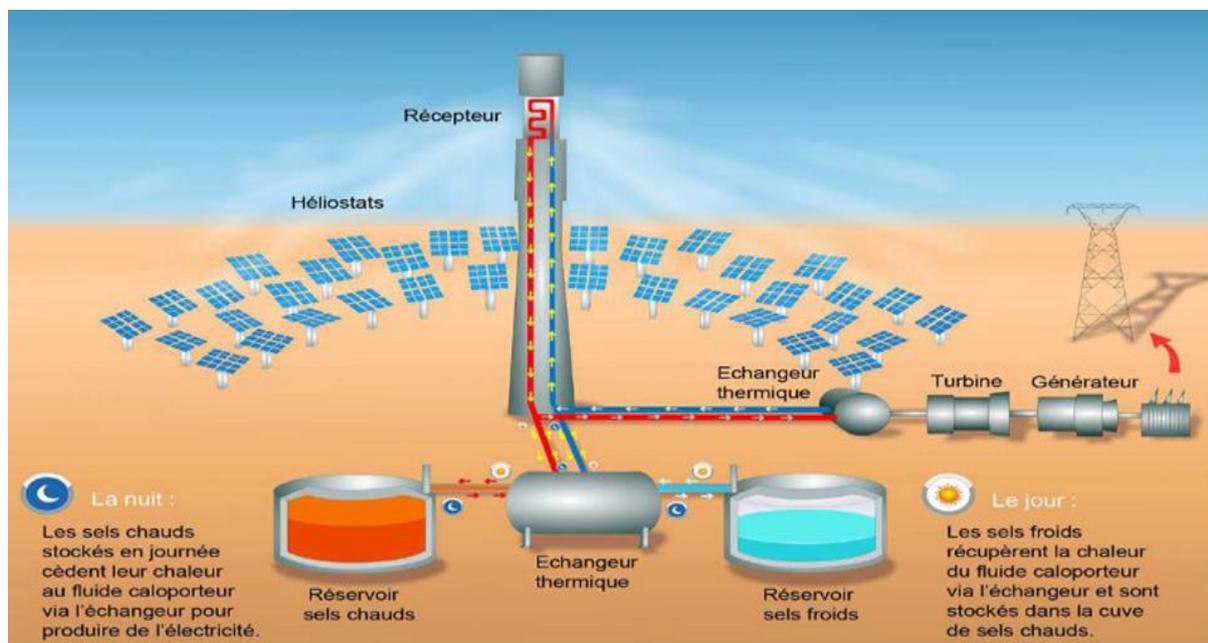


Figure I.4: Schéma d'une Stockage thermique par chaleur sensible.

b. Stockage thermique par changement de phase

Le principe du stockage de la chaleur en utilisant des matériaux à changement de phase (MCP), ces matériaux passent d'un état solide à liquide lorsqu'ils sont chauffés, par exemple la paraffine, le MCP est placé dans une cuve de stockage sous forme solide à température ambiante, traversée par des tuyaux en cuivre contenant de l'eau, lorsque l'eau chaude arrive, la paraffine se réchauffe et passe de la forme solide à liquide, stockant ainsi la chaleur, en revanche, si c'est de l'eau froide qui circule, la paraffine va céder sa chaleur en se solidifiant. Dans une installation classique, le MCP est placé dans un grand réservoir avec des tubes pour transporter le fluide caloporteur.

Les MCP et les fluides peuvent être différents en fonction de la quantité de chaleur à stocker, ce système permet de stocker efficacement l'énergie thermique pour une utilisation ultérieure.

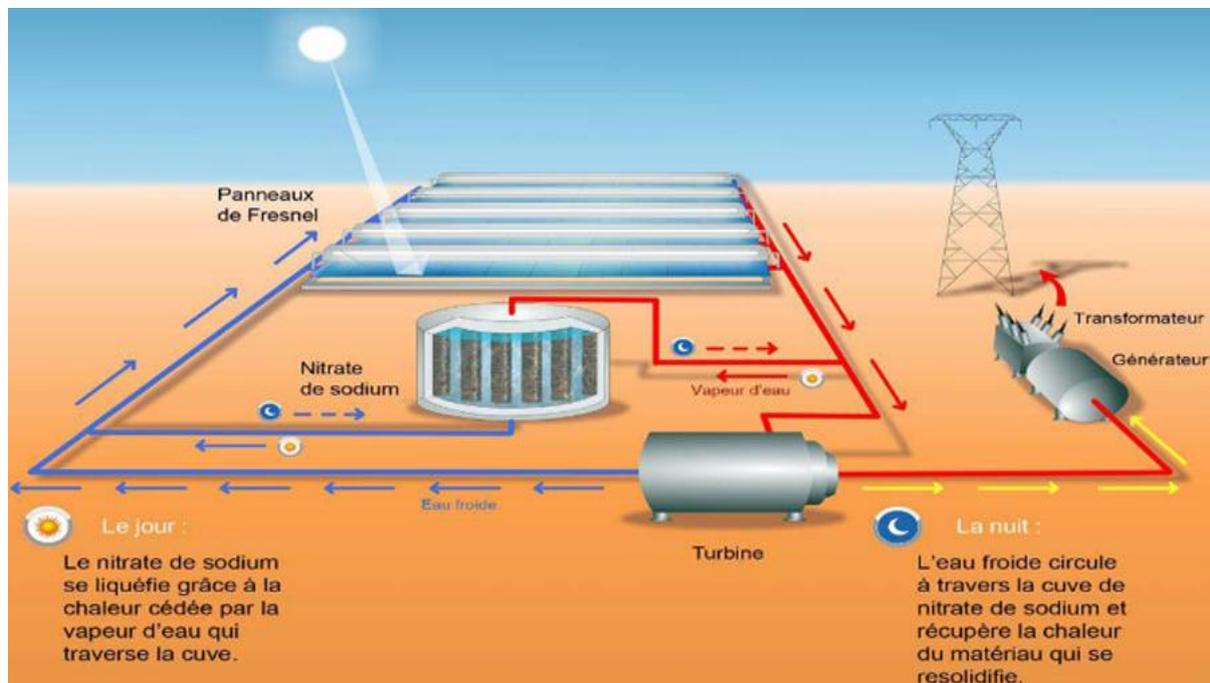


Figure I.5: Stockage thermique par changement de phase.

c. Stockage thermochimique

Le fonctionnement d'un système de chauffage écologique pour l'habitat, qui utilise un réactif (du bromure de strontium) stocké dans une cuve.

Pendant l'été, le système solaire combiné fournit de l'eau chaude qui, via un échangeur eau-air, cède sa chaleur à l'air extérieur pour sécher le réactif. Le réactif peut être stocké sous cette forme sèche pendant plusieurs mois, en hiver, le circuit est inversé et l'air extérieur frais et humide circule à travers le réactif, qui en se ré humidifiant, dégage de la chaleur grâce à une réaction chimique exothermique, l'air chauffé est dirigé vers un échangeur où il cède sa chaleur à l'eau

qui circule jusqu'au ballon pour une utilisation sanitaire, ce système permet d'utiliser une source d'énergie solaire pour chauffer l'eau et l'air de l'habitat de manière efficace et écologique qui est ensuite stocké dans un réservoir isolé.

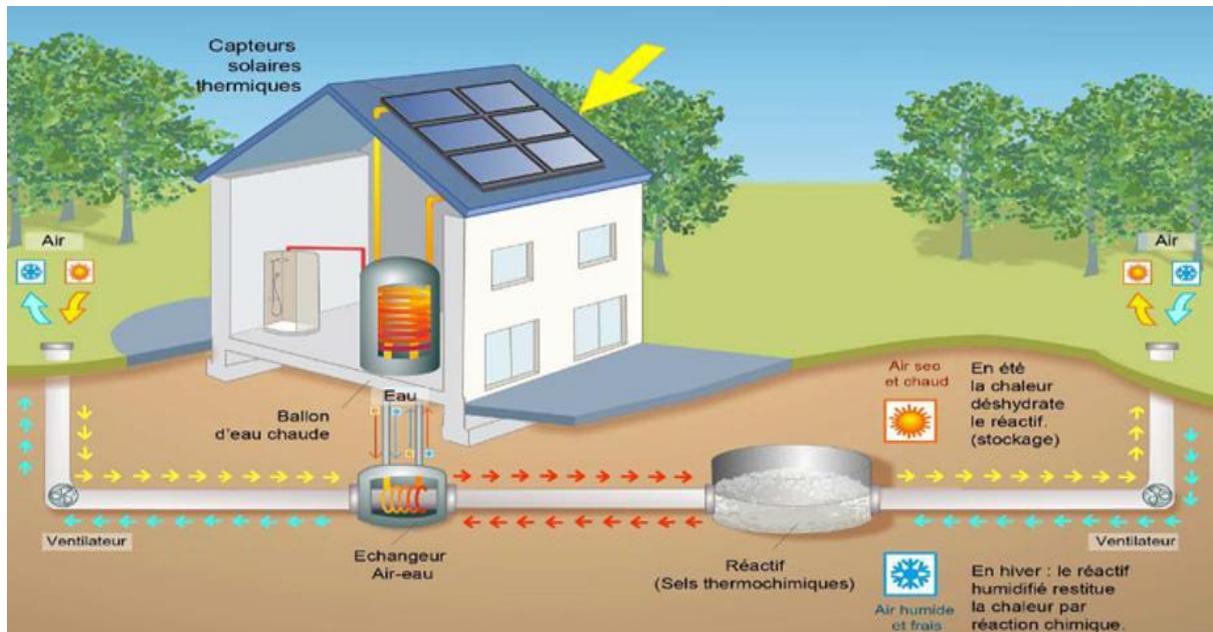


Figure I.6: Stockage thermochimique couplé à un système solaire thermique.

En ce qui concerne le choix de l'endroit où stocker la chaleur de l'énergie solaire, cela dépend des besoins et des contraintes spécifiques du projet. Par exemple, pour une maison individuelle, le stockage dans un réservoir d'eau chaude peut être une option pratique et abordable, pour des projets plus importants, comme des centrales électriques solaires, des réservoirs d'air chaud ou des MCP peuvent être plus adaptés.

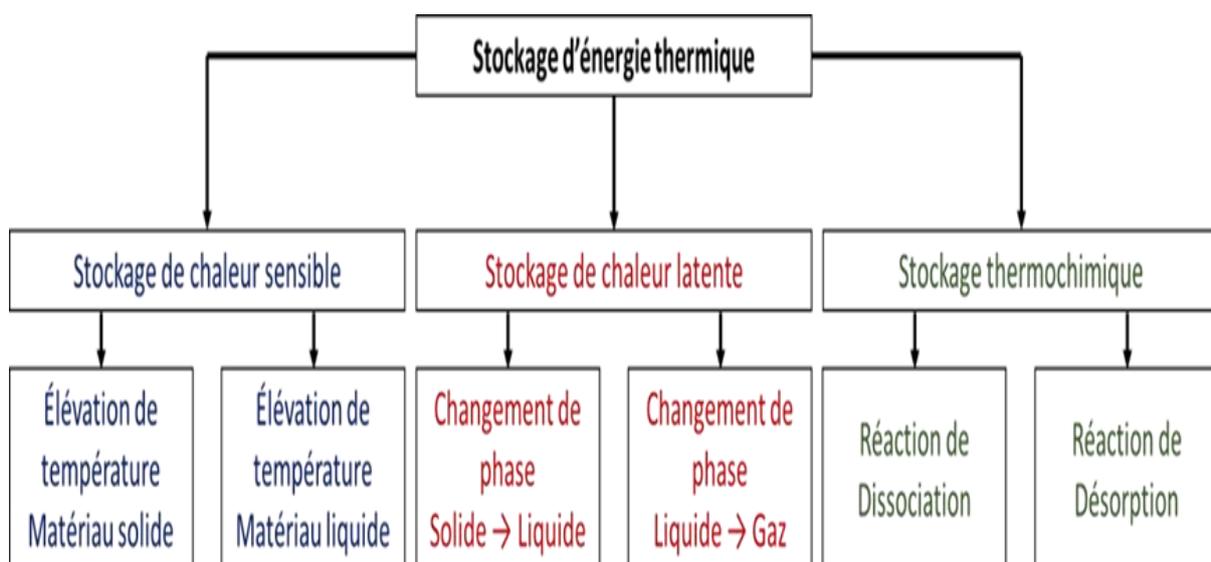


Figure I.7: Les différentes manières physiques de stocker l'énergie thermique.

I.6.2 Fonctionnement d'un procédé de stockage d'énergie thermique

Le procédé de stockage de l'énergie thermique se fait en trois étapes : la charge, le stockage et la décharge, différentes options de pilotage peuvent être utilisées en fonction des variations de l'ensoleillement et de la demande en électricité, les principaux modes d'utilisation d'un système de stockage thermique comprennent le lissage des transitoires de la puissance thermique.

Le déplacement de la période de production électrique, l'extension de la période de production électrique et la concentration de la production électrique aux heures de pointe, les tailles de stockage associées varient en fonction du mode d'utilisation, allant d'un stockage de petite taille pour le lissage des transitoires à un très grand stockage pour la concentration de la production électrique aux heures de pointe.

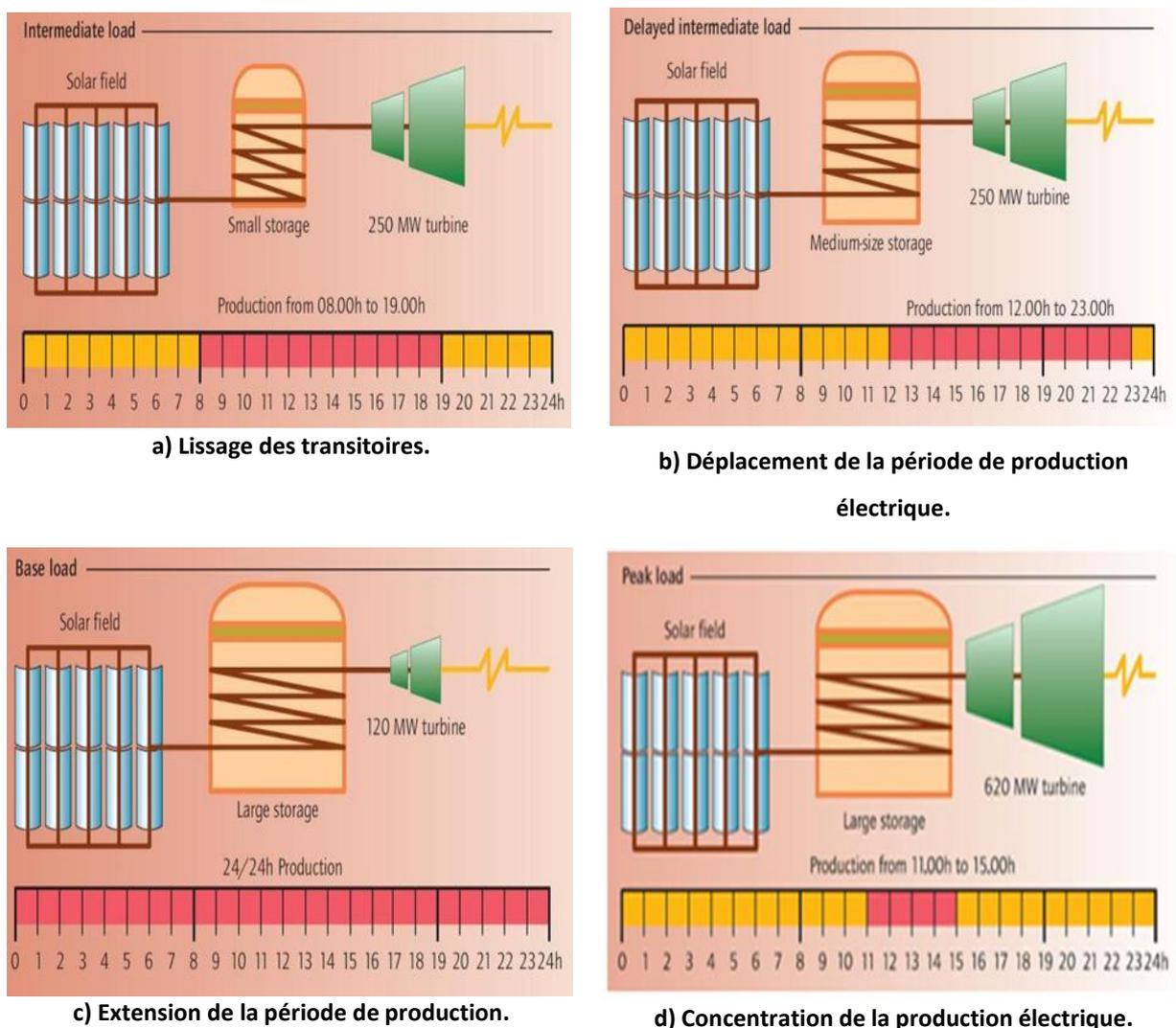


Figure I.8: Différents modes d'utilisation d'une unité de stockage thermique dans une centrale solaire [7].

I.6.3 Centrale électrique à cycle combiné avec intégration de l'énergie

Le concept de cette centrale solaire est basé sur son intégration dans une centrale à cycle combiné, comme le montre la figure (I.9), cette technique est principalement utilisée pour produire de grandes quantités d'énergie, la vapeur produite par le champ solaire est injectée dans le cycle eau-vapeur de la centrale à cycle combiné, ce qui augmente la puissance de la turbine à vapeur et permet de produire des mégawatts d'électricité supplémentaires, sans avoir besoin d'utiliser du gaz naturel supplémentaire, ce type de centrale ne nécessite pas de système de stockage et fonctionne comme une centrale à cycle combiné conventionnelle durant la nuit. Les cycles combinés hybrides thermique/solaire en sont aujourd'hui à leurs premiers développements.

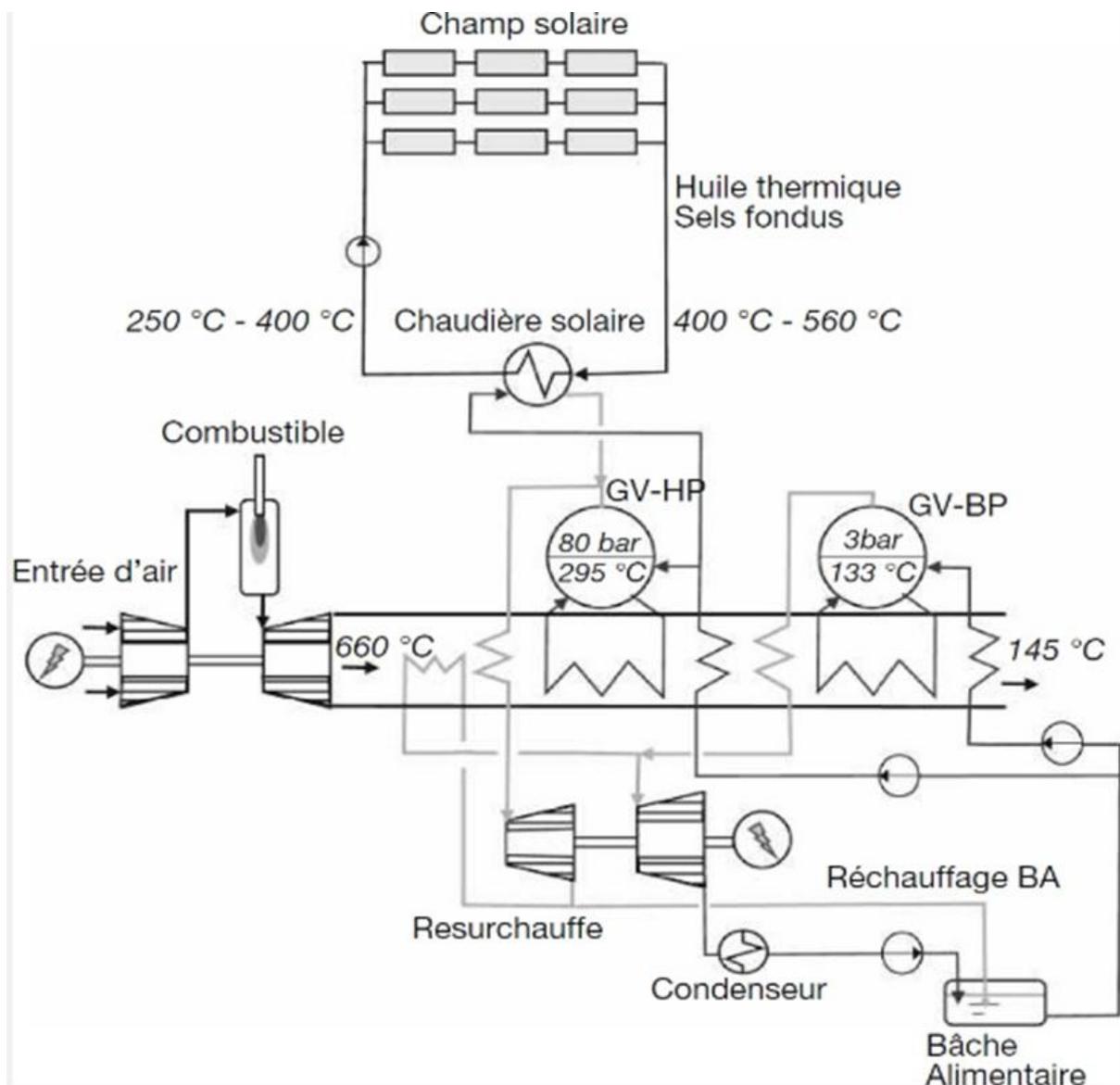


Figure I.9: Intégration d'énergie solaire au cycle vapeur d'un cycle combiné gaz/vapeur.

I.6.4 Rendement de conversion chaleur d'origine organique électricité annuels pour différentes centrale hybride

Grandeur	Unité	Hybride sans stockage sans IC	Hybride avec stockage sans IC	Hybride sans stockage avec IC	Hybride avec stockage avec IC
Puissance électrique installée	MW	1,00	1,00	1,08	1,01
Surface de capteurs (marge 10 %)	m ²	1 089	2 352	922	1 732
Energie stockée par jour	kWh.j ⁻¹		9 547		6 549
Volume de stockage	m ³		66		45
Rendement thermique sans solaire avec IC		48,5 %	48,5 %	50,2 %	50,2 %
Rendement thermique sans solaire sans IC	%	48,5 %	48,5 %	54,3 %	54,3 %
Productible électrique annuel	MWh.an ⁻¹	8 322	8 322	8 322	8 322
Rendement de conversion chaleur électricité crête soleil au zénith		69,9 %	69,9 %	66,6 %	66,6 %
Rendement de conversion combustible électricité annuel		52,2 %	57,2 %	55,8 %	57,2 %

Tableau I.2: Rendements de conversion chaleur d'origine organique-électricité annuels pour différentes centrale hybride.

I.7 Turbine à vapeur

I.7.1 Définition

La turbine à vapeur est un type de moteur thermique qui fonctionne selon le cycle thermodynamique de Clausius-Rankine, ce moteur utilise en général de la vapeur d'eau comme fluide moteur, qui subit un changement d'état au cours du cycle, la vapeur est détendue, ce qui permet de transformer son énergie thermique en énergie mécanique de rotation de l'arbre de la turbine, cette énergie mécanique peut ensuite être utilisée pour entraîner un dispositif mécanique tournant.

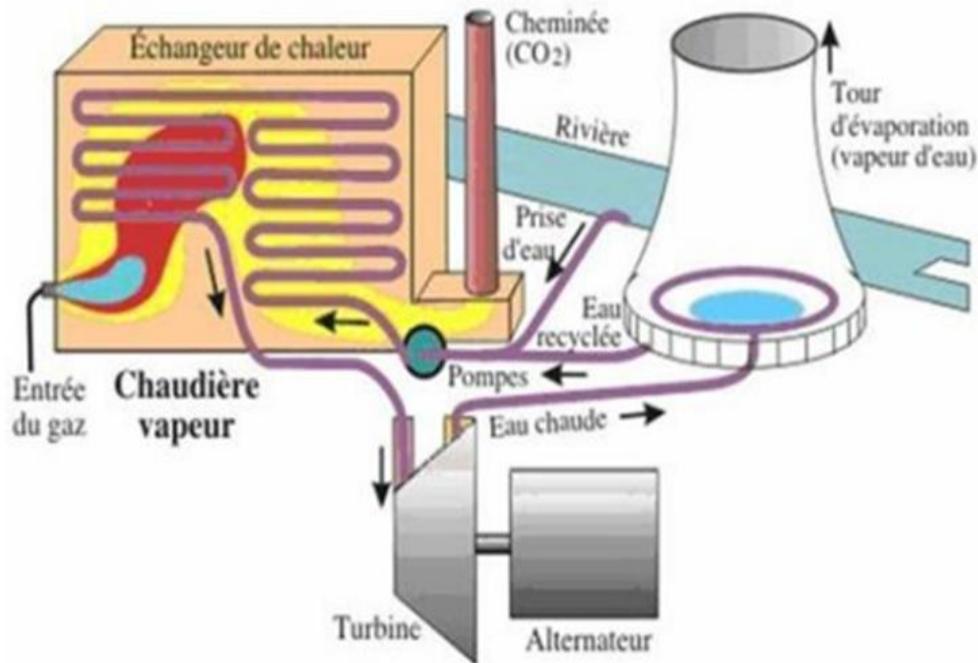


Figure I.10: Schéma d'une turbine à vapeur [8].

I.7.2 Description d'une installation turbine à vapeur

Une centrale thermique est un ensemble de différentes parties qui travaillent ensemble pour produire de l'électricité, ces parties ont une influence directe sur l'efficacité globale de la centrale, et certaines d'entre elles sont particulièrement importantes.

Voici un aperçu de ces parties clés :

- **Chaudière** : c'est l'organe principal de la centrale thermique, où le combustible (généralement du charbon, du gaz naturel ou du pétrole) est brûlé pour produire de la chaleur, cette chaleur est ensuite utilisée pour produire de la vapeur d'eau.
- **Turbine à vapeur** : cette turbine est alimentée par la vapeur produite par la chaudière. Elle utilise la pression de la vapeur pour faire tourner des rotors, ce qui produit de l'énergie mécanique.
- **Condenseur** : après avoir traversé la turbine, la vapeur doit être refroidie et transformée en eau pour pouvoir être réutilisée dans la chaudière, le condenseur permet de réaliser cette opération en faisant circuler de l'eau froide à travers des tubes qui sont en contact avec la vapeur.
- **Pompes** : les pompes sont utilisées pour faire circuler l'eau à travers les différentes parties de la centrale, par exemple elles sont utilisées pour faire remonter l'eau du condenseur vers la chaudière.

- **Alternateur** : cet équipement est utilisé pour transformer l'énergie mécanique produite par la turbine en énergie électrique, il fonctionne en utilisant des aimants pour générer un courant électrique.
- **Transformateur** : une fois que l'électricité a été produite par l'alternateur, elle doit être transformée en une tension adaptée pour être utilisée dans les réseaux électriques, C'est le rôle du transformateur.
- **Equipements auxiliaires** : il s'agit de tous les autres équipements nécessaires pour faire fonctionner la centrale thermique, comme les systèmes de contrôle, les systèmes de refroidissement.

I.7.3 Classification des turbines à vapeur

- Les turbines à vapeur peuvent être classées selon plusieurs critères, notamment :
- La méthode de fonctionnement de la vapeur.
- Le sens d'écoulement de la vapeur.
- La nature du fonctionnement thermodynamique.
- La méthode de transmission de l'énergie thermique.
- Le mode de construction [9].

Il existe plusieurs critères pour classer les turbines à vapeur, parmi lesquels :

a. Méthode de fonctionnement de la vapeur

On peut distinguer deux types de turbines :

- **Turbines à action** : la détente de la vapeur se produit uniquement dans les canaux fixes, tandis que les canaux mobiles transforment l'énergie cinétique en travail mécanique pour le rotor.
- **Turbines à réaction** : la détente se produit dans les canaux fixes et les canaux mobiles, et le rotor est généralement sous la forme d'un tambour sur lequel sont fixées, les aubes mobiles, les derniers étages d'une turbine multicellulaire à action sont généralement à réaction [9].

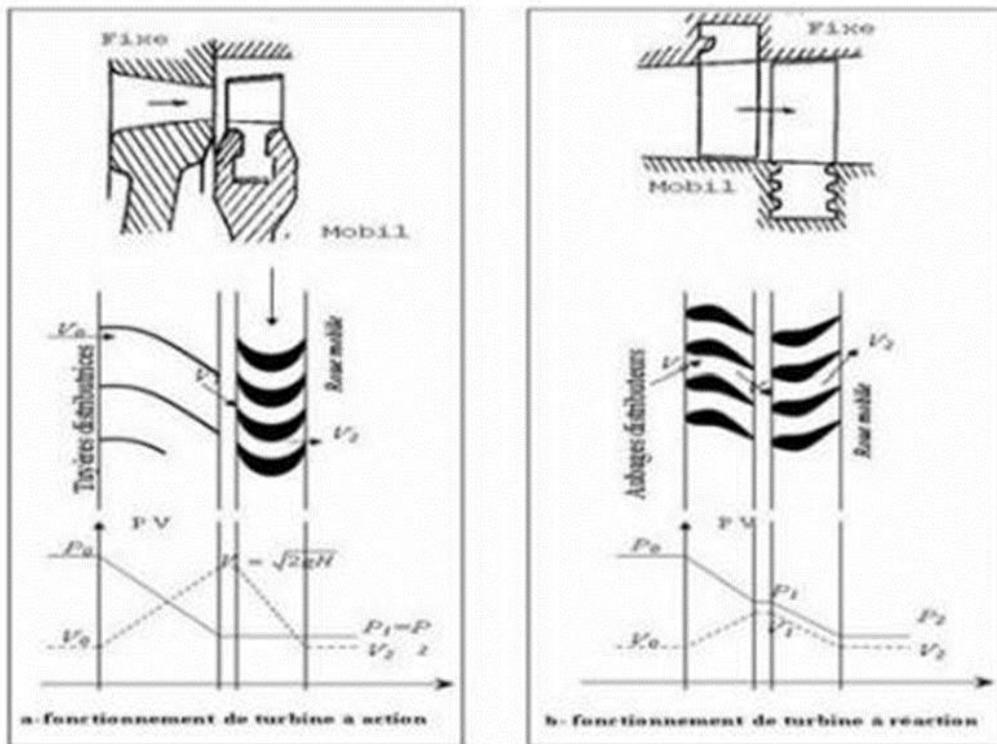


Figure I.11: Mode de fonctionnement de la vapeur [9].

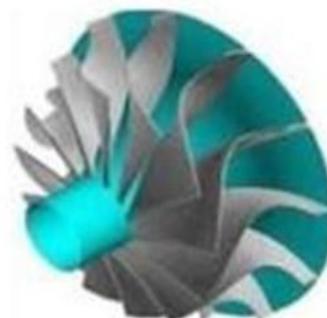
b. Sens d'écoulement de la vapeur

On peut distinguer deux types de turbines en fonction de l'orientation de l'écoulement :

- **Turbine axiale** : c'est le type le plus courant où les aubes sont disposées radialement sur la roue, ce qui nécessite un déplacement de la vapeur presque parallèle à l'axe de la turbine.
- **Turbine radiale** : l'écoulement de la vapeur se fait dans toutes les directions perpendiculaires à l'axe de la turbine [9].



(a) Turbine axiale.



(b) Turbine radiale.

Figure I.12: Turbine axiale et radiale.

c. Nature de fonctionnement thermodynamique

Il existe deux types de turbines en fonction de la pression de la vapeur à la sortie :

- **Turbine à soutirage et condensation** : la vapeur sortant de la turbine est à une pression très proche du vide, ce qui dépend de la température de l'eau froide dans le condenseur.
Ce type de turbine est utilisé pour produire à la fois de l'électricité et de la chaleur, par exemple pour le chauffage urbain, ou pour entraîner des bateaux, des turbocompresseurs et des turbosoufflantes.
- **Turbine à soutirage et contre pression** : la vapeur à la sortie de la turbine est à une pression supérieure à la pression atmosphérique, ce type de turbine est utilisé pour produire de l'électricité, et la vapeur d'échappement est utilisée dans différents processus industriels, tels que la production de papier ou de textiles [10].

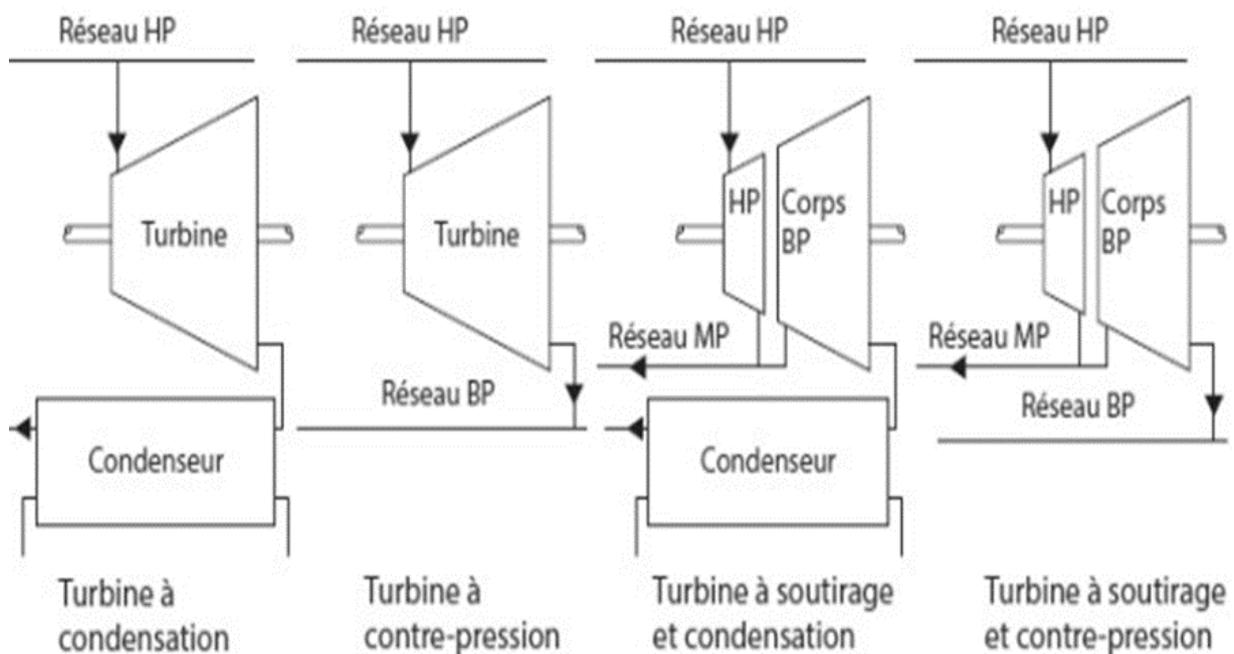


Figure I.13: Différents de turbines à vapeur [11].

d. Mode de transmission d'énergie thermique

Il y a deux types de transmission pour la production d'énergie mécanique :

- **Transmission directe** : où l'énergie est transmise directement à la génératrice à la même vitesse de rotation.
- **Transmission indirecte** : qui nécessite l'utilisation d'un réducteur de vitesse, comme c'est le cas pour les turbines de bateaux où les vitesses des hélices sont plus faibles. cette information est issue de la référence I.14a et I.14b [9].

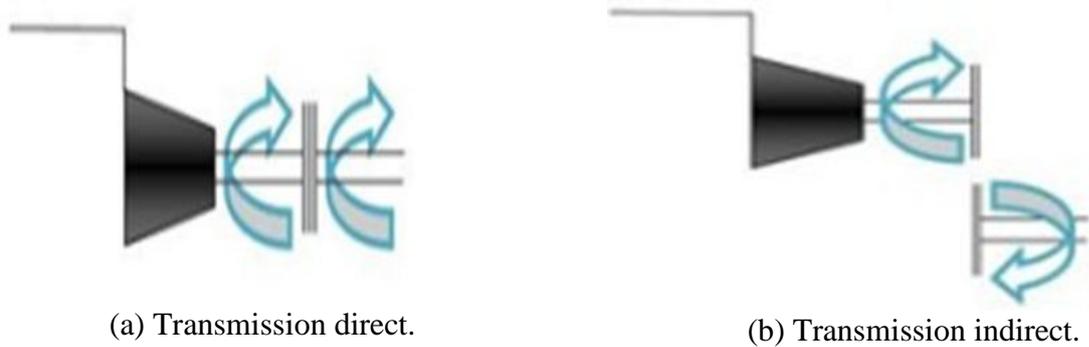


Figure I.14: différents de turbines à vapeur [11].

e. Mode de construction

Il existe deux types de turbines pour la production d'énergie mécanique :

- **Turbine à un corps** : est conçue pour les puissances faibles ou moyennes, allant jusqu'à 20 MW.
- **Turbine à plusieurs corps** : est utilisée pour les centrales thermiques de grande puissance, et elle est composée de deux ou trois corps, à savoir haute pression (HP), moyenne pression (MP) et basse pression (BP), les turbines à vapeur modernes sont toutes de type axial et à plusieurs étages, à l'exception de celles utilisées pour entraîner de petites machines auxiliaires, ces informations sont tirées de la référence [9].

f. Principe de fonctionnement d'une turbine à vapeur

La turbine à vapeur est un type de moteur thermique qui fonctionne selon le cycle thermodynamique appelé cycle de Rankine, ce cycle est caractérisé par un changement d'état du fluide moteur, qui est généralement de la vapeur d'eau.

Les étapes du cycle de Rankine comprennent typiquement :

- La mise en pression de l'eau liquide par une pompe et son envoi vers la chaudière.
- Le chauffage et la vaporisation de l'eau.
- La surchauffe de la vapeur.
- La détente et le refroidissement de la vapeur dans la turbine, ce qui fournit de l'énergie mécanique.
- La condensation de la vapeur détendue au contact d'une source froide sous vide partiel, ces informations sont issues de la référence [12].

I.7.4 Domaine d'application

Les turbines à vapeur sont couramment utilisées pour la production d'électricité et la propulsion des navires, ainsi que dans des systèmes de cogénération où la vapeur est générée à haute pression dans une chaudière et extraite de la turbine pour être utilisée dans un processus industriel, ces turbines peuvent également être utilisées en cycle combiné pour récupérer de la chaleur et sont utilisées pour entraîner diverses machines industrielles, pompes, compresseurs et générateurs, avec une puissance nominale allant de quelques centaines de watts à plus de 1300 MW [13].

I.7.5 Différentes transformations énergétiques dans une installation turbine à vapeur

Avant d'expliquer comment fonctionne la centrale, il est utile de rappeler les différentes étapes de transformation de l'énergie qui ont été utilisées pour produire l'électricité.

En résumé, il y a trois étapes principales :

- Premièrement, la transformation de l'énergie chimique stockée dans le combustible en énergie thermique dans la chaudière.
- Deuxièmement, la transformation de l'énergie thermique en énergie mécanique dans la turbine.
- Enfin, la transformation de l'énergie mécanique en énergie électrique dans l'alternateur.

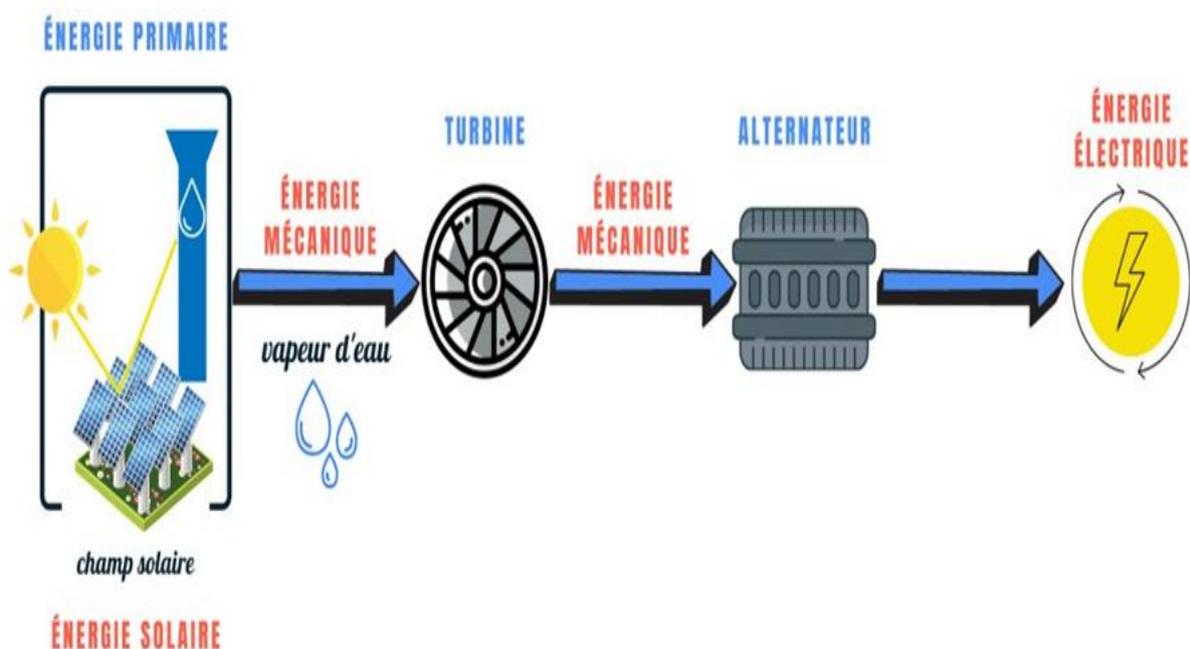


Figure I.15: La différente transformation énergétique solaire dans une installation turbine vapeur.

I.8 Cycle de Hirn

Le cycle de Hirn est une variante du cycle de Rankine dans lequel la vapeur sortant de la chaudière est surchauffée à une température supérieure à la température critique, le cycle de Rankine avec surchauffe (cycle Hirn) est à base des machines utilisant la vapeur d'eau dans les centrales thermiques, il comporte étapes suivantes [14] :

- ✓ L'eau liquide est mise en pression par une pompe (1) et envoyé vers la chaudière.
- ✓ l'eau est chauffé, vaporisée (2) et surchauffée (3).
- ✓ la vapeur se détend et se refroidit dans la turbine (4) en fournissant de l'énergie mécanique.
- ✓ La vapeur d'étendue est condensée (5) au contact de la source froide sous vide partiel

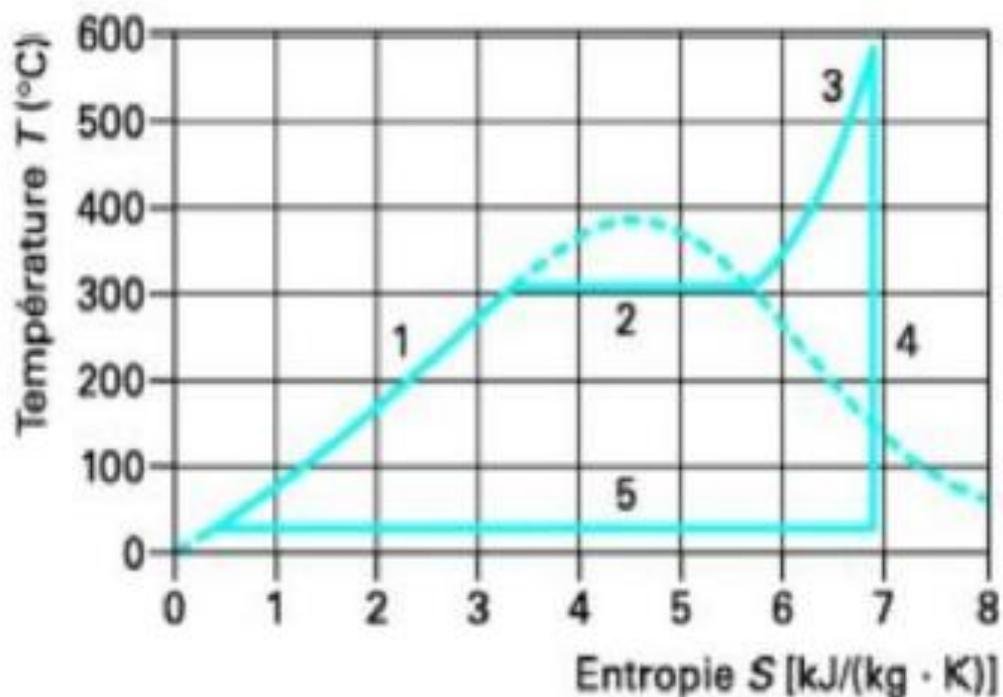


Figure I.16: diagramme (T-S) de cycle de Hirn [14].

I.9 Les avantages et les inconvénients de la turbine à vapeur

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> ✓ La turbine à vapeur étant un moteur thermique rotatif, elle est particulièrement adaptée pour être utilisée pour entraîner un générateur électrique. ✓ L'efficacité thermique d'une turbine à vapeur est généralement supérieure à celle d'un moteur alternatif. ✓ Rapport puissance et poids très élevé par rapport aux moteurs alternatifs. ✓ Moins de pièces mobiles que les moteurs alternatifs. ✓ Les turbines à vapeur conviennent aux grandes centrales thermiques, ils sont fabriqués dans une variété de tailles jusqu'à 1,5 GW de turbine utilisées Pour produire de l'électricité. 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ La maintenance des centrales à vapeur est compliquée. ✓ Coût de nuit relativement élevé. ✓ Les turbines à vapeur sont moins efficaces que les moteurs alternatifs en fonctionnement à charge partielle. ✓ Ils ont un démarrage plus long que les turbines à gaz et sûrement que les moteurs alternatifs. ✓ Moins sensible aux changements de la demande de puissance par rapport aux turbines à gaz et aux moteurs alternatifs.

Tableau I.3: les avantages et les inconvénients de la turbine à vapeur.

I.10 Revue bibliographique

- Mills et Morrison [15], ont présenté une analyse d'un concept LFR compact adapté pour le champ solaire à grande échelle à l'aide de deux récepteurs, un sur chaque côté du réflecteur, et ils ont proposé une nouvelle configuration de tube absorbeur.

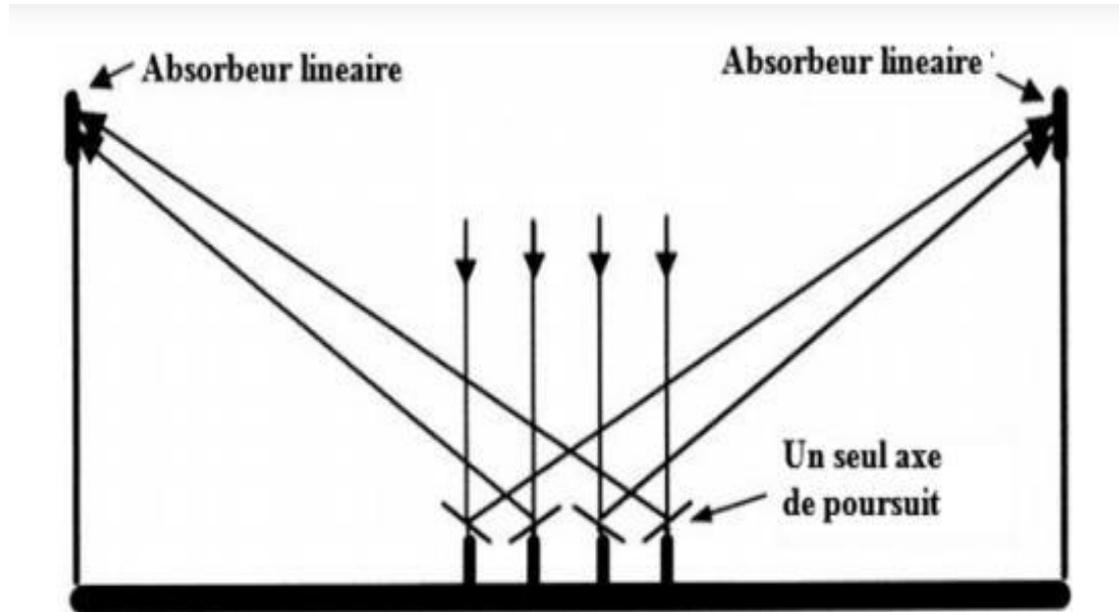


Figure I.17: Distribution des miroirs entre deux tubes d'absorbeurs [15].

- Zhihao Wu, Yitung Chen[16], Ont mené une étude sur l'influence de différents paramètres sur les performances d'un système de génération d'énergie solaire avec un cycle Rankine à fluide organique, leur article, intitulé "Parametric study of a solar organic Rankine cycle system for electricity generation", a été publié dans la revue Applied Energy en 2012.

Les chercheurs ont mené une étude sur les performances d'un système de génération d'énergie solaire utilisant un cycle Rankine à fluide organique, leur étude visait à évaluer l'impact de différents paramètres sur les performances du système, notamment la température de l'eau chaude à la sortie du capteur solaire, la température de l'évaporateur, la température de condensation, la pression d'évaporation, le débit massique, ainsi que le type et les propriétés du fluide de travail.

Les résultats ont montré que la température de l'eau chaude à la sortie du capteur solaire, la température de l'évaporateur et la pression d'évaporation sont les paramètres les plus influents sur les performances du système, une augmentation de ces paramètres a entraîné une augmentation du rendement du système et de la puissance de sortie, le type et les propriétés du fluide de travail ont également un impact significatif sur les performances du système.

L'étude a permis de mieux comprendre les paramètres qui influencent les performances du système solaire à cycle Rankine et de fournir des informations utiles pour l'optimisation du système.

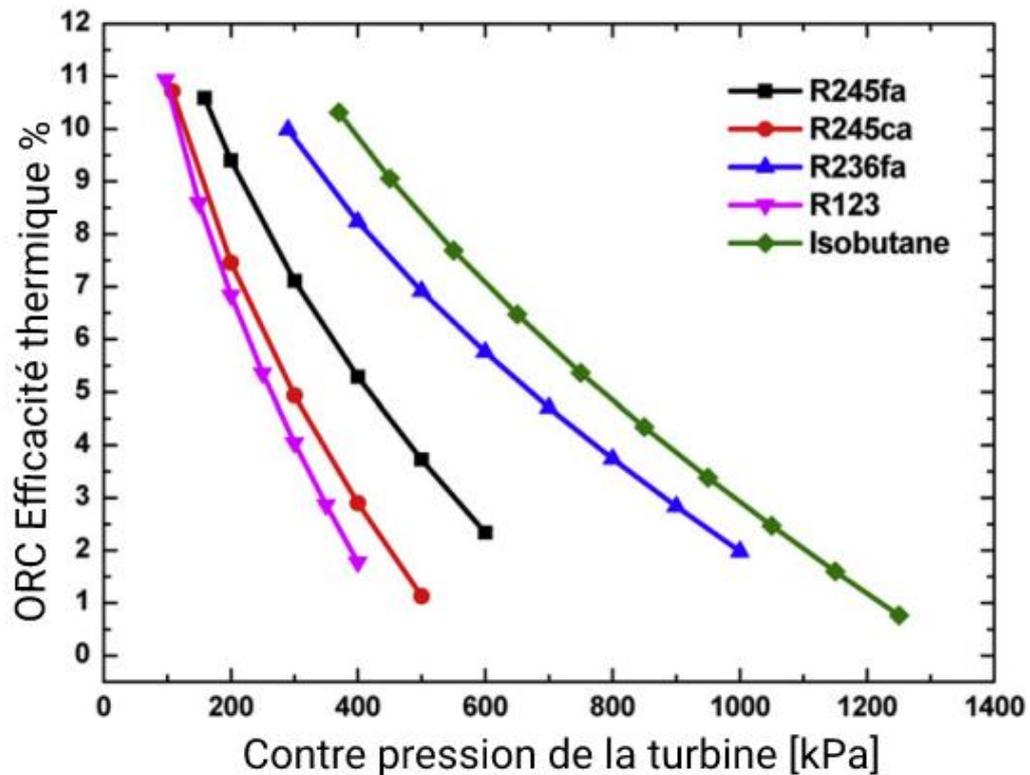


Figure I.18: effet de la contre pression de la turbine sur l'efficacité thermique du système ORC [16].

- E. Galloni, G. Fontana et S. Staccone [17]. Sont des chercheurs qui ont collaboré pour mener une étude approfondie sur la conception et l'analyse expérimentale d'une mini-centrale électrique basée sur le cycle Rankine organique (ORC) utilisant le fluide de travail R245fa, l'objectif principal de leur recherche était d'évaluer les performances de ce système ORC en utilisant ce fluide spécifique.

Pour atteindre cet objectif, ils ont réalisé des expériences soigneusement conçues afin de mesurer les performances thermodynamiques et énergétiques du cycle ORC, tout en évaluant l'efficacité globale du système. Grâce à leurs analyses et à leurs résultats, ils ont pu fournir des informations précieuses sur les caractéristiques de performance de la mini-centrale ORC étudiée.

Leurs travaux ont permis de déterminer des mesures telles que le rendement, la puissance électrique produite et l'efficacité énergétique de cette installation spécifique, de plus ils ont abordé les avantages et les limitations associés à l'utilisation du fluide R245fa dans cette configuration particulière.

Grâce à leur recherche approfondie et à leurs résultats, ces chercheurs ont contribué à l'avancement des connaissances dans le domaine des systèmes ORC et de l'utilisation des fluides spécifiques tels que le R245fa.

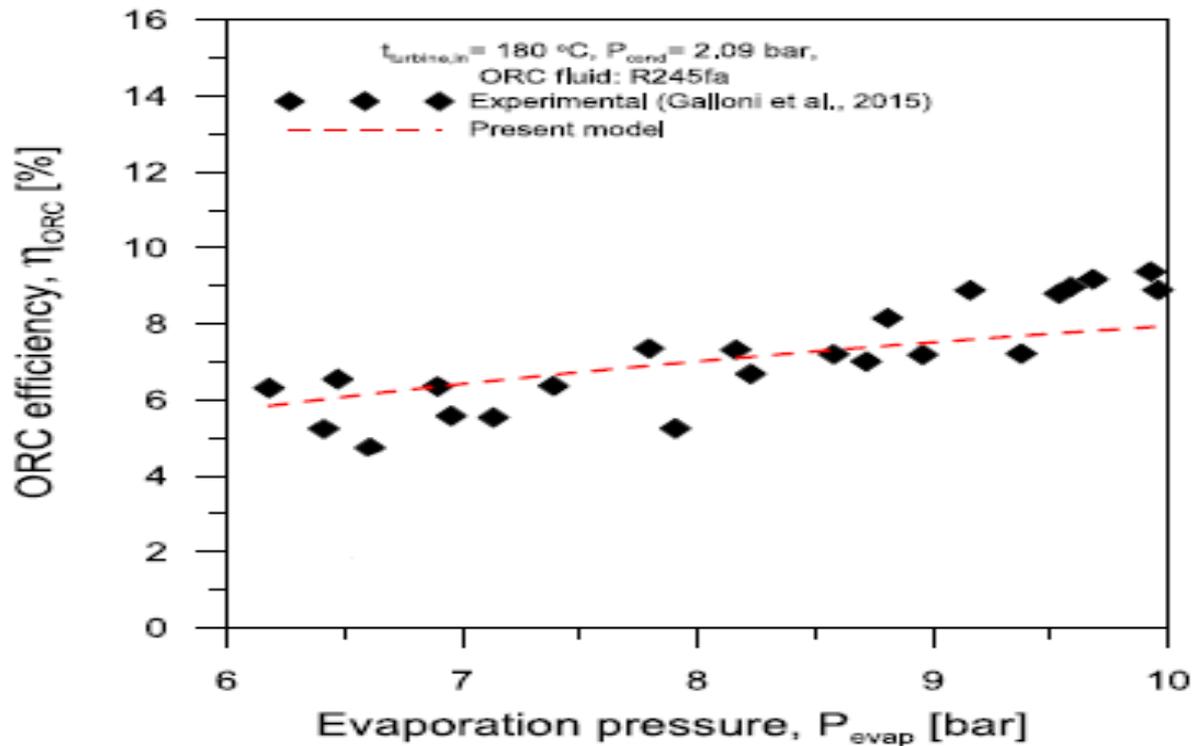


Figure I.19: Variation du rendement énergétique du cycle ORC en fonction de la pression d'évaporateur ORC [17].

- Murat Aydin et Oktay Baysal [18], ont étudié l'impact de différents paramètres de fonctionnement sur les performances d'un système solaire avec un cycle Rankine à fluide organique, leur article, intitulé "Parametric investigation of a solar organic Rankine cycle for electricity generation", a été publié dans la revue Energy Conversion and Management en 2013.

Dans leur étude, les chercheurs ont mené une analyse paramétrique d'un système solaire à cycle Rankine à fluide organique pour la production d'électricité.

Les chercheurs ont mené une étude pour évaluer l'impact de différents paramètres sur les performances d'un système solaire à cycle Rankine à fluide organique, ils ont identifié les paramètres les plus influents tels que la température de l'eau chaude à la sortie du capteur solaire et la température de l'évaporateur, ainsi que la pression d'évaporation et le type de fluide de travail.

Les résultats ont montré que l'augmentation de la température de l'eau chaude à la sortie du capteur solaire et de la température de l'évaporateur conduit à une augmentation du

rendement et de la puissance de sortie, les chercheurs ont également évalué l'impact des incertitudes des données d'entrée sur les performances du système, l'étude a permis de mieux comprendre les paramètres influents et d'identifier les incertitudes les plus critiques des données d'entrée.

- Hossam A. Gabbar, Ahmed E. Elsayed [19], ont mené une étude sur l'optimisation des performances d'un système de génération d'énergie solaire avec un cycle Rankine à fluide organique en utilisant une approche de conception de surface de réponse, leur article, intitulé "Performance optimization of a solar organic Rankine cycle using a response surface methodology", a été publié dans la revue Applied Energy en 2015.

Dans cette étude, les chercheurs ont utilisé une approche de conception de surface de réponse pour optimiser les performances d'un système de génération d'énergie solaire avec un cycle Rankine à fluide organique, ils ont examiné les effets des paramètres tels que la température d'entrée de l'eau chaude, la température d'évaporation, la température de condensation, la pression d'évaporation et le débit massique du fluide de travail sur les performances du système.

Les résultats ont montré que la température d'entrée de l'eau chaude et la pression d'évaporation étaient les deux paramètres les plus influents sur les performances du système, les performances optimales ont été atteintes pour une température d'entrée de l'eau chaude de 98°C, une pression d'évaporation de 2,5 MPa et un débit massique de fluide de travail de 0,017 kg/s, l'utilisation de cette approche a permis aux chercheurs de modéliser les performances du système et de déterminer les paramètres optimaux pour une performance maximale.

I.11 Conclusion

En conclusion de ce chapitre, nous avons souligné que l'exploitation de l'énergie solaire implique l'utilisation de diverses technologies en fonction du type de solaire (photonique, thermique ou thermodynamique) et de l'application spécifique visée (production d'eau chaude, courant continu ou alternatif).

Le choix des technologies appropriées est donc essentiel pour optimiser l'utilisation de l'énergie solaire, et nous avons présenté une vue d'ensemble des centrales thermiques à vapeur.

L'objectif était d'exposer les principaux composants de ces centrales ainsi que leur principe de fonctionnement, tout en mettant en avant leurs avantages et leurs inconvénients.

Chapitre II

Position de problème

Position de problème

II.1 Introduction

L'utilisation de l'énergie solaire est en constante croissance pour répondre aux besoins croissants en énergie propre et renouvelable, l'une des technologies les plus courantes pour convertir l'énergie solaire en électricité est le cycle Rankine, un cycle thermodynamique utilisé pour produire de la vapeur et entraîner une turbine et pour optimiser les performances d'une installation énergétique solaire à base de cycle Rankine, il est crucial d'effectuer des études paramétriques pour déterminer les paramètres clés tels que la température du fluide caloporteur, la pression et la composition du fluide de travail.

Cette étude se concentrera sur lancer une simulation numérique à l'aide de logiciel EES les paramètres critiques d'une installation énergétique solaire à base de cycle Rankine pour optimiser sa performance et assurer une utilisation efficace de l'énergie solaire.

II.2 Présentation du logiciel EES

EES (Engineering Equation Solver) EES est un logiciel conçu pour résoudre n équations non linéaires pour n inconnues, le programme peut simplifier les grands problèmes, tels que minimiser le risque d'erreurs de calcul.

Cependant, il est surtout utile pour les problèmes nécessitant une solution itérative ou pour les problèmes paramétriques, ou l'on fait varier une propriété pour évaluer l'effet sur l'efficacité du cycle, la puissance produite, le nombre des heures de fonctionnement, etc. nous utiliserons également EES pour résoudre des problèmes plus complexes et ouverts. Qui ne peuvent pas être facilement résolus à la main [20].

EES peut être utilisé pour de nombreuses applications d'ingénierie, il convient parfaitement à l'enseignement des cours de génie mécanique et à la pratique de l'ingénierie [20].

En ce qui concerne notre thème d'étude, EES peut être utilisé pour modéliser la partie de solaire et la partie cycle Rankine, effectuer des analyses paramétriques pour évaluer les performances d'une installation énergétique solaire à base de cycle Rankine, les paramètres tels que le débit massique et la température de fluide travail (caloporteur) à la rentrée et à la sortie de collecteur solaire et après la température d'évaporateur, la pression du condenseur, l'efficacité du générateur de vapeur et les caractéristiques du fluide de travail peuvent être ajustés pour étudier leur effet sur la performance de l'installation.

II.3 Modélisation de l'installation thermodynamique de l'énergie solaire

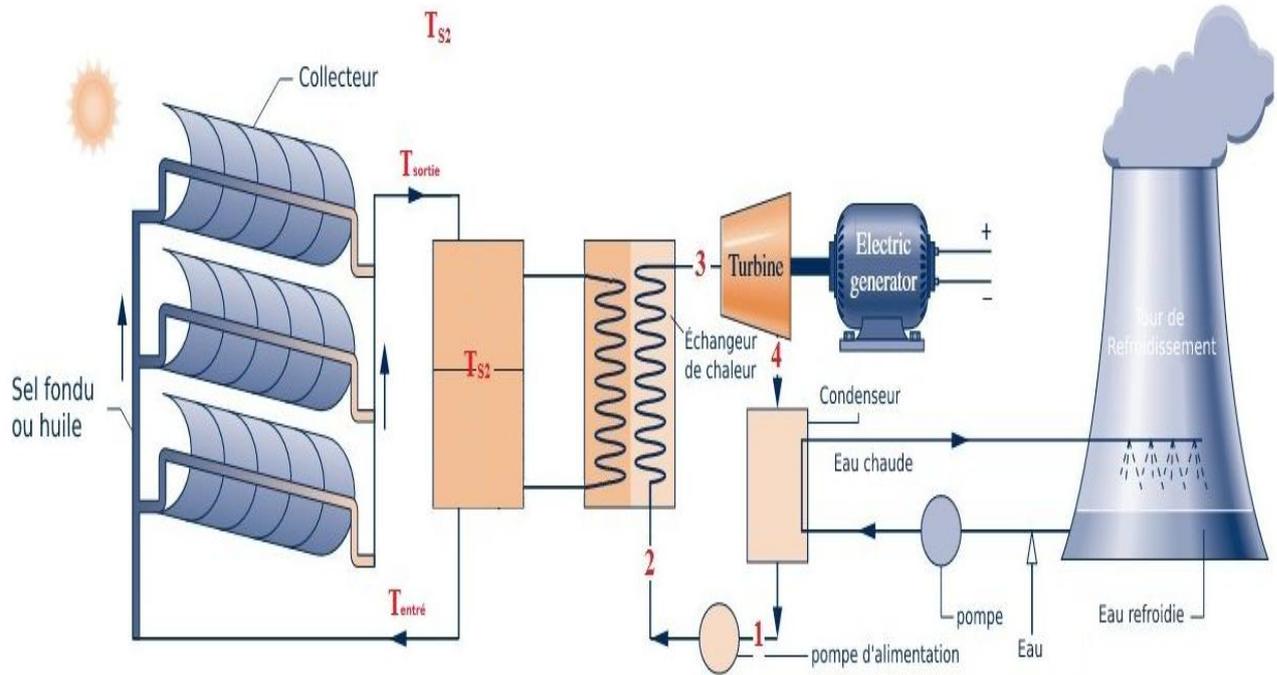


Figure II.1: Schéma d'une installation thermodynamique de l'énergie solaire.

II.3.1 Modélisation du panneau solaire

Le premier élément à modéliser est le panneau solaire, qui convertit l'énergie solaire en chaleur, il est possible de modéliser le panneau solaire à l'aide d'un modèle thermodynamique basé sur les équations de transfert de chaleur et de masse, il est également possible d'utiliser des données expérimentales pour modéliser le comportement du panneau solaire.

II.3.2 Modélisation du fluide de travail

Le fluide de travail utilisé dans le cycle Rankine doit être modélisé, les propriétés thermodynamiques du fluide de travail sont importantes pour déterminer le rendement du cycle, les équations de l'état peuvent être utilisées pour modéliser le comportement du fluide de travail.

II.3.3 Modélisation du cycle Rankine

Le cycle Rankine est un cycle thermodynamique utilisé pour convertir la chaleur en électricité, il est composé d'un évaporateur, d'un turbogénérateur, d'un condenseur et d'une pompe, la modélisation du cycle Rankine implique l'utilisation des équations de la thermodynamique pour déterminer les performances du cycle.

II.3.4 Modélisation du stockage thermique

Pour maximiser l'utilisation de l'énergie solaire, il peut être utile d'ajouter un système de stockage thermique à l'installation, ce système permet de stocker l'énergie thermique produite pendant la journée pour une utilisation ultérieure, la modélisation du stockage thermique implique la modélisation des propriétés thermodynamiques du matériau de stockage et du comportement thermique du système.

II.3.5 Optimisation de l'installation

Une fois que les différentes parties de l'installation ont été modélisées, il est possible d'optimiser l'installation en modifiant certains paramètres tels que la température du fluide de travail, la taille du panneau solaire et du stockage thermique, et le cycle thermodynamique lui-même.

II.4 Modélisation mathématique

II.4.1 Bilan énergétique d'un capteur solaire

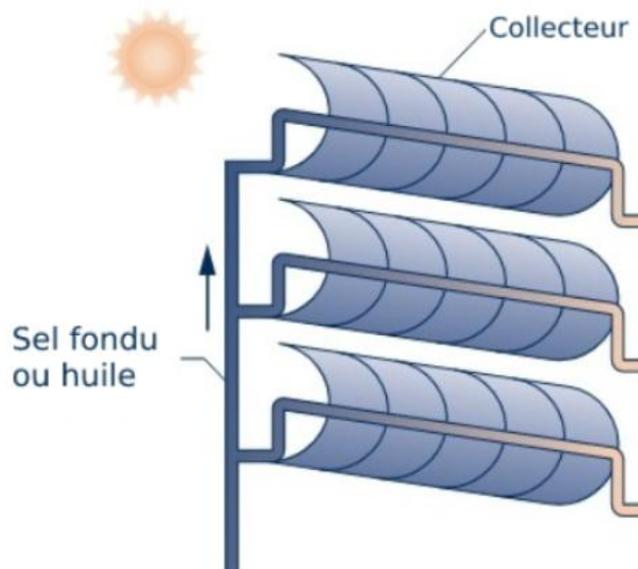


Figure II.2: Collecteur solaire

On va établir les bilans énergétiques globaux d'un capteur solaire thermique pour ces principaux composants :

➤ **La vitre reçoit :**

- La puissance P_v rayonnée par le soleil et absorbée par la vitre

$$P_v = \alpha_v \times G \times A_v \quad (\text{II.1})$$

α_v : Absorptivité de la vitre.

A_v : surface de la vitre.

G : rayonnement global incident.

- une quantité d'énergie q_{rav} cédée par l'absorbeur par rayonnement :

$$q_{rav} = h_{rav} \times A_v \times (T_{ab} - T_{vi}) \quad (\text{II.2})$$

- une quantité d'énergie q_{cva} cédée par l'absorbeur par convection :

$$q_{cva} = h_{cva} \times A_v \times (T_{ab} - T_{vi}) \quad (\text{II.3})$$

➤ **La vitre cède :**

- La puissance P_v rayonnée par le soleil et absorbée par la vitre

$$P_v = \alpha_v \times G \times A_v \quad (\text{II.4})$$

- une quantité d'énergie q_{rav} cédée par l'absorbeur par rayonnement :

$$q_{rav} = h_{rav} \times A_v \times (T_{ab} - T_{vi}) \quad (\text{II.5})$$

- une quantité d'énergie q_{cva} cédée par l'absorbeur par convection :

$$q_{cva} = h_{cva} \times A_v \times (T_{ab} - T_{vi}) \quad (\text{II.6})$$

➤ **La vitre cède :**

- une quantité d'énergie par convection q_{cva} vers le milieu ambiant :

$$q_{cva} = h_{cva} \times A_v \times (T_{ve} - T_a)$$

(II.7)

- une quantité d'énergie par rayonnement q_{rvc} vers le ciel :

$$q_{rvc} = h_{rvc} \times A_v \times (T_{ve} - T_a) \quad (\text{II.8})$$

➤ **L'absorbeur reçoit :**

- une puissance rayonnée par le soleil, transmise par la vitre et absorbée par l'absorbeur P_{ab} , donnée par l'équation suivante :

$$P_{ab} = \alpha_{ab} \times r_v \times G \times A_{ab} \quad (\text{II.9})$$

Où :

α_{ab} : absorptivité de l'absorbeur.

r_v : transmissivité de la vitre.

A_{ab} : surface de l'absorbeur.

➤ **L'absorbeur cède :**

- Une quantité d'énergie par convection au fluide caloporteur q_{caf} :

$$q_{caf} = h_{caf} \times A_{fa} \times (T_{ab} - T_f) \quad (\text{II.10})$$

- Une quantité d'énergie par convection q_{cva} à la vitre.

$$q_{cva} = h_{cva} \times A_v \times (T_{ab} - T_{vi}) \quad (\text{II.11})$$

- Une quantité d'énergie par rayonnement q_{rav} à la vitre.

$$q_{rav} = h_{rav} \times A_v \times (T_{ab} - T_{vi}) \quad (\text{II.12})$$

- Une quantité d'énergie par conduction q_{cdai} à l'isolant.

$$q_{caf} = \frac{(T_{ab} - T_{ii})}{\varphi_1} + \frac{(T_{ab} - T_{il})}{\varphi_2} \quad (\text{II.13})$$

φ_1 et φ_2 : Les résistances thermiques.

➤ **Le fluide reçoit :**

- une quantité d'énergie par convection q_{caf} de l'absorbeur :

$$q_{caf} = h_{caf} \times A_{fa} \times (T_{ab} - T_f) \quad (\text{II.14})$$

➤ **Le fluide cède :**

- une quantité d'énergie par convection q_{cfi} à l'isolant :

$$q_{cfi} = h_{cfi} \times A_{fi} \times (T_f - T_{ii}) \quad (\text{II.15})$$

➤ **L'isolant reçoit :**

- une quantité d'énergie par convection q_{cfi} cédée par le fluide caloporteur.

$$q_{cfi} = h_{cfi} \times A_{fi} \times (T_f - T_{ii}) \quad (\text{II.16})$$

- une quantité d'énergie par conduction q_{cdai} cédée par l'absorbeur.

$$q_{caf} = \frac{(T_{ab} - T_{ii})}{\varphi_1} + \frac{(T_{ab} - T_{il})}{\varphi_2} \quad (\text{II.17})$$

➤ **L'isolant cède :**

- une quantité d'énergie par rayonnement q_{ris} au sol :

$$q_{ris} = h_{ris} \times A_i \times (T_{ie} - T_s) \quad (\text{II.18})$$

- une quantité d'énergie par convection q_{cia} au milieu ambiant :

$$q_{cia} = h_{cia} \times A_i \times (T_{ie} - T_a) \quad (\text{II.19})$$

✚ Le rendement d'un capteur solaire

❖ Rendement instantané du capteur

Le rendement instantané est défini comme étant le rapport de la puissance thermique utile récupérée par le fluide caloporteur (P_u) et la puissance solaire arrivant sur le plan incliné du capteur (P_{ab}).

Selon la référence [21], la norme C.E.C stipule que l'étude la plus significative des performances thermiques d'un capteur plan est de déterminer son rendement instantané donné par la relation suivante :

$$n_i = \frac{P_u}{P_{ab}} = \frac{P_u}{A_c \times G} \quad (\text{II.20})$$

Ou : P_{ab} : la puissance solaire arrivant sur le capteur.

P_u : la puissance utile récupérée par le fluide caloporteur.

A_c : surface du capteur.

G : flux solaire global incident.

Le rendement instantané du capteur en fonction du débit massique est donné par [22] :

$$n_i = m \times c_p \times \left[\frac{(T_{fs} - T_{fe})}{A_c \times G} \right] \quad (\text{II.21})$$

Avec :

m : débit massique de l'eau

c_p : Chaleur spécifique de l'eau.

T_{fs} : Température de sortie du fluide.

T_{fe} : Température d'entrée du fluide.

A_c : Surface du capteur solaire.

G : flux de chaleur global incident.

II.4.2 Modélisation de stockage d'énergie thermique

Après la collecte de l'énergie solaire par un collecteur solaire, il est essentiel de transférer cette énergie au fluide caloporteur pour produire de la chaleur sensible. Une fois transférée, cette énergie peut être stockée et utilisée ultérieurement.



Figure II.3: Réservoir de stockage l'énergie thermique.

Voici les équations de base pour modéliser le stockage d'énergie thermique :

a. Capacité thermique de l'ensemble du système

$$C = m \cdot C_p \quad (\text{II.22})$$

C_p : La chaleur spécifique (en J/Kg.K).

C : La capacité thermique totale du système (en J/K).

m : La masse totale du fluide de travail dans le système (en kg).

b. Energie thermique stockée dans le réservoir

$$Q = m \cdot C_p \cdot (T_f - T_i) \quad (\text{II.23})$$

Q : L'énergie thermique stockée (en J).

T_f : La température finale du fluide dans le réservoir (en K).

T_i : La température initiale du fluide dans le réservoir (en K).

c. Variation de l'enthalpie du fluide de travail à travers le cycle Rankine

$$\Delta h = h_3 - h_2 \quad (\text{II.24})$$

Δh : La variation d'enthalpie (en J/kg).

h_2 : L'enthalpie à la sortie du condenseur (en J/kg).

h_3 : L'enthalpie à la sortie de la turbine (en J/kg).

II.4.3 Premier principe de la thermodynamique des systèmes ouverts

Le premier principe de la thermodynamique stipule que pour amener un système thermodynamique d'un état initial à un état final déterminé, il faut lui fournir un travail indépendant de son environnement, cette loi est établie par des observations expérimentales et s'exprime en termes d'énergie, le premier principe de la thermodynamique s'écrit alors :

$$\dot{W} + \dot{Q} = q_m[(h_2 - h_1) + (\frac{c_2^2}{2} - \frac{c_1^2}{2}) + g(z_2 - z_1)] \quad (\text{II.25})$$

\dot{W} : Travail net fourni par le système (en J).

\dot{Q} : Chaleur nette transférée vers le système (en J).

q_m : Débit massique du fluide entrant ou sortant du système (kg/s).

h_2 et h_1 : Enthalpies spécifiques du fluide à l'entrée et à la sortie du système (en J/Kg).

c_1 et c_2 : Vitesses spécifiques du fluide à l'entrée et à la sortie du système (en m/s).

g : Accélération due à la gravité (en m/s^2).

z_2 et z_1 : Hauteurs du fluide à l'entrée et à la sortie du système, respectivement (en m).

II.4.4 Deuxième principe de la thermodynamique

Le deuxième principe de la thermodynamique énonce que les phénomènes physiques sont irréversibles, en particulier lors des échanges thermiques, cette loi d'évolution établit que toute transformation d'un système thermodynamique s'accompagne d'une augmentation du désordre global, qui inclut le désordre du système et celui de l'environnement, cette création d'entropie est exprimée par la relation :

$$\Delta S_{\text{global}} = \Delta S_{\text{creation}} = \Delta S_{\text{syst}} + \Delta S_{\text{ext}} \geq 0 \quad (\text{II.26})$$

Ou :

ΔS_{global} : Le changement d'entropie global d'un système.

$\Delta S_{\text{creation}}$: Le changement d'entropie créée dans un système.

ΔS_{syst} : Le changement d'entropie du système en lui-même.

ΔS_{ext} : Le changement d'entropie du milieu extérieur.

II.4.5 Bilan énergétique

a. Cycle de Rankine

Le cycle Rankine est un processus thermodynamique utilisé pour produire de l'électricité à partir de la vapeur d'eau dans les centrales électriques, il est composé de quatre éléments principaux : un générateur de vapeur, une turbine à vapeur, un condenseur et une pompe, l'eau est vaporisée dans le générateur de vapeur, la vapeur est ensuite envoyée à travers la turbine à vapeur pour produire de l'électricité, puis la vapeur est refroidie et condensée dans le condenseur pour être réutilisée dans le cycle, le cycle Rankine simple est considéré comme "simple" car il ne contient qu'un seul générateur de vapeur et une turbine à vapeur.

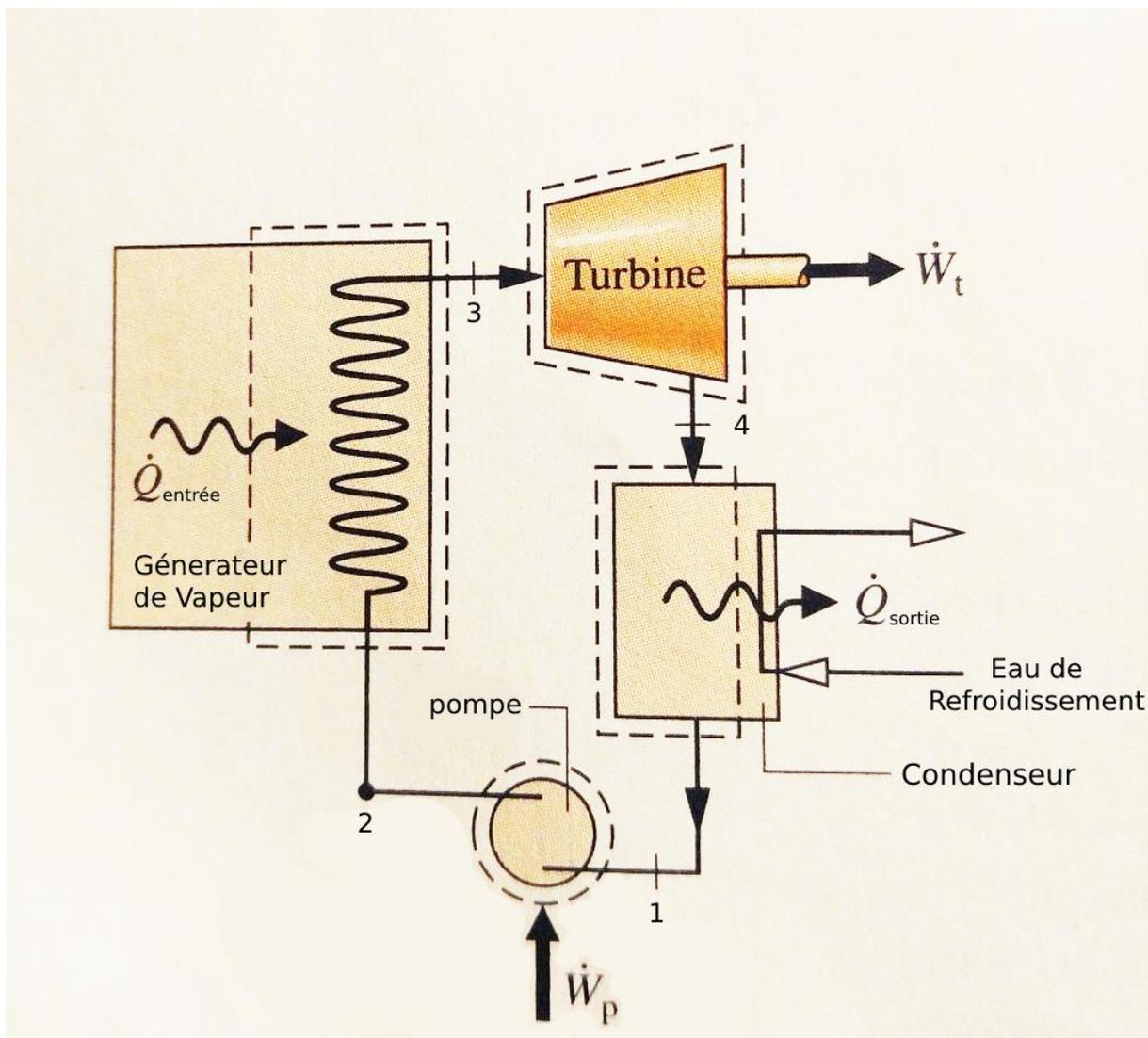


Figure II.4: Schéma de principe d'une turbine à vapeur.

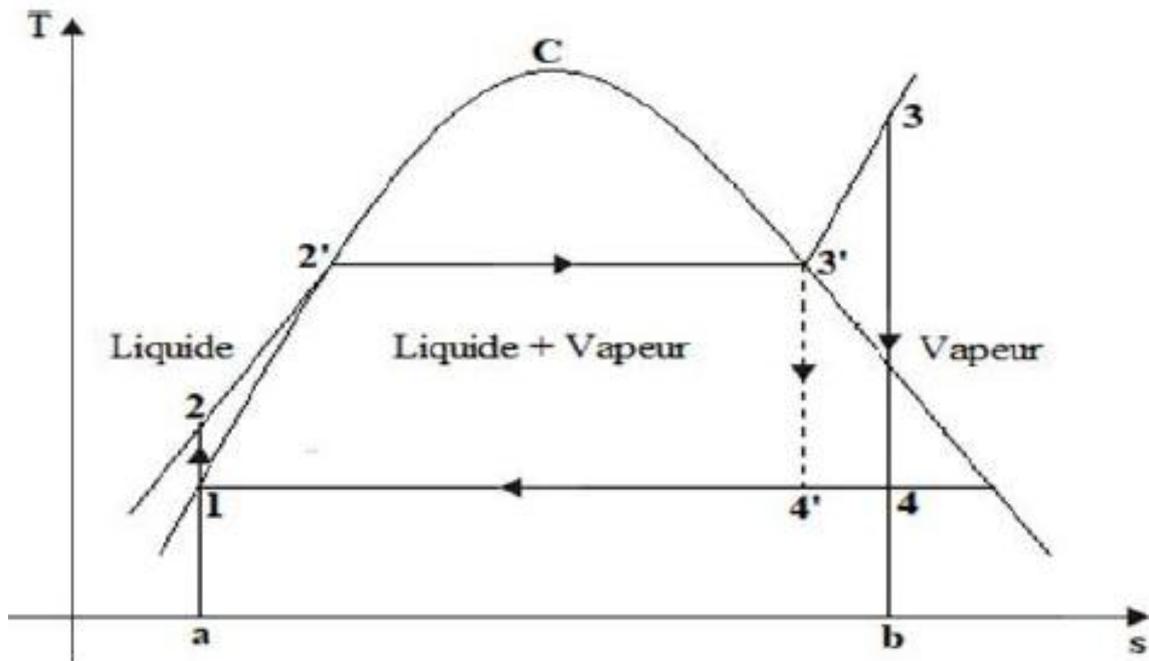


Figure II.5: cycle de Rankine-Hirn (T-S)

b. Application sur la pompe d'alimentation

Consiste à pomper le fluide (eau) à une pression élevée afin de permettre sa circulation à travers l'ensemble des composants de la centrale.

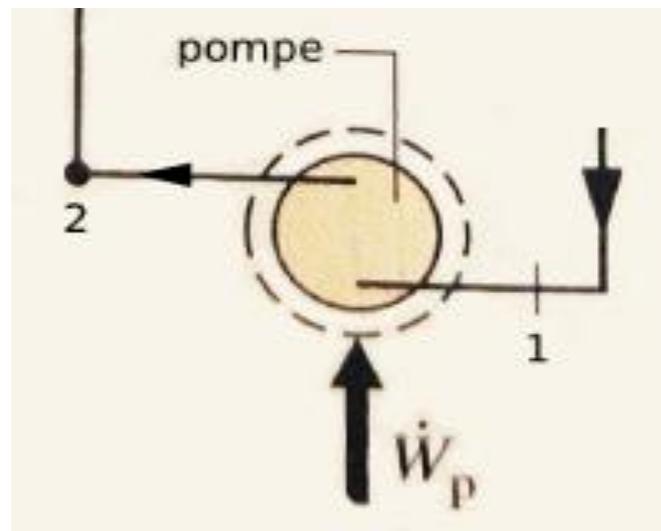


Figure II.6: Schéma descriptif de la pompe

- Travail massique de la pompe :

$$W_{ppe} = (h_2 - h_1) > 0 \quad (\text{II.27})$$

$$\eta_f = h_2 - h_{2s} \quad (\text{II.28})$$

Donc
$$h_2 = \eta_f + h_{2s} \quad (\text{II.29})$$

Alors
$$W_{ppe} = (\eta_f + h_{2s}) - h_1 \quad (\text{II.30})$$

Comme le rapport du travail théorique nécessaire à la compression sans frottement, au travail réel nécessaire à la compression en présence du frottement.

$$\eta_s = \frac{W_s}{w_r} = \frac{h_{2s} - h_1}{h_2 - h_1} \quad (\text{II.31})$$

$$h_2 = h_1 + \frac{(h_{2s} - h_1)}{\eta_s} \quad (\text{II.32})$$

- **Travail des systèmes ouverts se calcule par :**

Soit $\delta W = v dp$ (II.33)

Alors $W_{ppe} = \int_1^2 v dp$ (II.34)

$$v = v_1 = v_2$$

$$W_{ppe} = v_1 (p_2 - p_1) \quad (\text{II.35})$$

Il est à noter que ($W_{ppe} = v_1 (p_2 - p_1)$) résulte de l'hypothèse que le fluide est incompressible.

$$W_{ppe} = (h_2 - h_1) = v_1 (p_2 - p_1) \quad (\text{II.36})$$

L'enthalpie massique h_1 qui n'est que rarement donnée par les tables thermodynamiques :

$$h_2 = h_1 + v_1 (p_2 - p_1) \quad (\text{II.37})$$

- **Puissance mécanique de la pompe :**

$$\dot{W}_{ppe} = \dot{m} (h_2 - h_1) \quad (\text{II.24})$$

\dot{m} : Le débit massique de l'installation.

c. Application sur le générateur de vapeur

Echange de chaleur isobare dans la chaudière jusqu'à l'état de vapeur saturé.

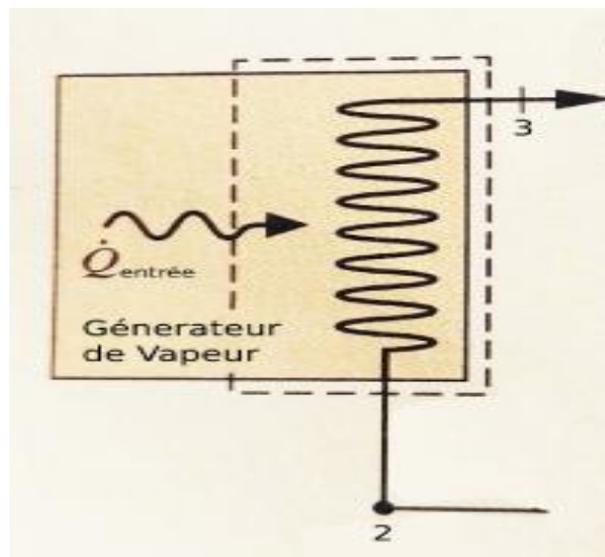


Figure II.7: Schéma descriptif de générateur de vapeur.

Toujours en négligeant les variations des énergies, cinétique et potentielle et en remarquant que le cycle ne reçoit que de la chaleur à la source chaude

- Chaleur à la source chaude

$$Q_C = (h_3 - h_2) > 0 \quad (\text{II.38})$$

- Puissance

$$\dot{Q}_C = \dot{m} (h_3 - h_2) > 0 \quad (\text{II.39})$$

d. Application sur la turbine

La turbine à vapeur produit de l'électricité en entraînant un générateur électrique

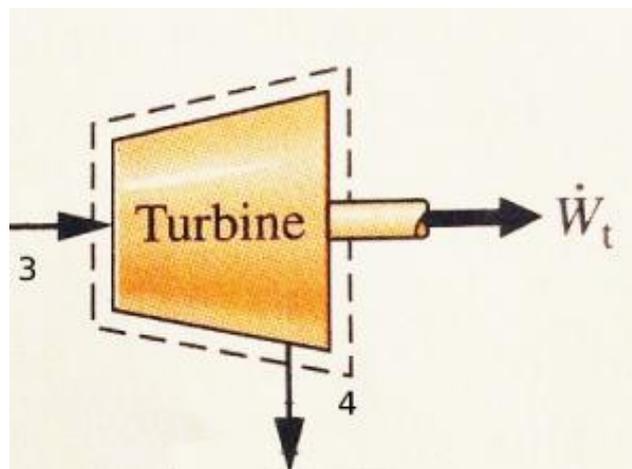


Figure II.8: Schéma descriptif d'une turbine à vapeur.

Soit :

$$W + Q = (h_4 - h_3) + \frac{1}{2} (c_4^2 - c_3^2) + g (z_4 - z_3) \quad (\text{II.40})$$

En négligeant les variations des énergies, cinétique et potentielle et en supposant la turbine adiabatique on obtient :

- **Travail massique de la turbine :**

$$W_{TV} = (h_4 - h_3) < 0 \quad (\text{II.41})$$

Ou bien

$$W_{eT} = (h_3 - h_4) > 0 \quad (\text{II.42})$$

- **Rendement isentropique de la turbine est donnée par :**

$$\eta_{TV} = \frac{W_{TV}}{W_{TV, isn}} \quad (\text{II.43})$$

Ou encore :

$$\eta_{TV} = \frac{(h_3 - h_4)}{(h_3 - h_{4s})} \quad (\text{II.44})$$

h_{4s} est déterminé en fonction de s_{4s} et p_4

$$S_{4S} = S_3 \quad h_4 = h_3 - \eta_{TV} (h_3 - h_{4S}) \quad (\text{II.45})$$

- **Puissance mécanique de la turbine est donnée par :**

$$\dot{W}_{tv} = \dot{m} \cdot W_{TV} \quad (\text{II.46})$$

e. Application sur condenseur

Il reçoit et condense la vapeur provenant de l'échappement de la turbine, il joue le rôle de réserve d'eau pour la tranche.

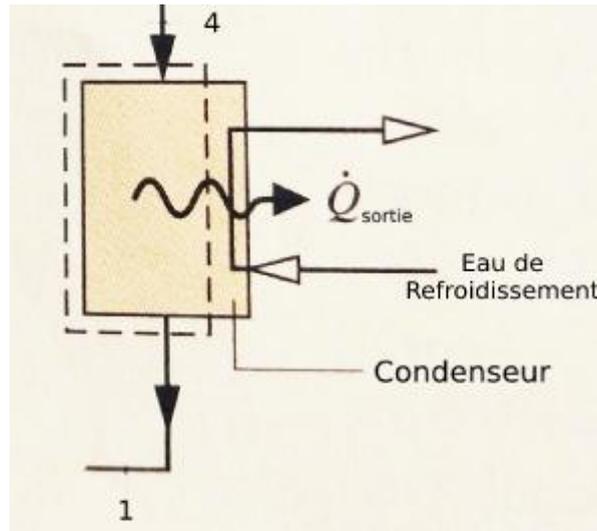


Figure II.9: Schéma descriptif de condenseur.

- **Chaleur rejetée**

$$Q_f = (h_1 - h_4) < 0 \quad (\text{II.47})$$

Ou bien
$$Q_{ef} = (h_4 - h_1) > 0 \quad (\text{II.48})$$

- **Puissance de condenseur :**

$$Q_f = \dot{m} \cdot (h_4 - h_1) \quad (\text{II.49})$$

f. Expression analytique du rendement thermique est finalement

Notons que le titre en vapeur est amélioré par la surchauffe ($x_4 > x_4'$)

$$\eta_{Th} = \frac{W_{net}}{Q_c} \quad (\text{II.50})$$

$$\eta_{Th} = \frac{W_{TV} - W_{ppe}}{Q_c} \quad (\text{II.51})$$

Ou encore
$$\eta_{Th} = \frac{(h_3 - h_4) - (h_2 - h_1)}{(h_3 - h_2)} \quad (\text{II.52})$$

Ou bien en utilisant les quantités de chaleur :

$$\eta_{Th} = 1 + \frac{Q_F}{Q_C} = 1 + \frac{(h_1 - h_4)}{(h_3 - h_2)} \quad (\text{II.53})$$

II.5 Données de l'étude

II.5.1 Partie solaire

- Les caractéristiques du capteur utilisé dans cette étude sont les suivants :

a. Influence du débit massique m

Débit m (Kg/s)	0	0.001	0.002	0.003	0.004	0.005	0.006	0.007	0.008	0.01
T_{fe} (k)	308.15	308.15	308.15	308.15	308.15	308.15	308.15	308.15	308.15	308.15
T_{fs} (k)	338.15	338.15	338.15	338.15	338.15	338.15	338.15	338.15	338.15	338.15
A_c (m ²)	2.4	2.4	2.4	2.4	2.4	2.4	2.4	2.4	2.4	2.4
C_p (J/Kg.K)	4185	4185	4185	4185	4185	4185	4185	4185	4185	4185
G (W/m ²)	907	907	907	907	907	907	907	907	907	907

Tableau II.1: Données de l'étude débit massique de collecteur solaire.

b. Influence de la température de sortie du fluide T_{fs}

Débit m (kg/s)	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
T_{fe} (k)	308.15	308.15	308.15	308.15	308.15	308.15	308.15	308.15	308.15	308.15
T_{fs} (k)	308.15	318.15	323.15	328.15	333.15	338.15	343.15	348.15	353.15	358.15
A_c (m ²)	2.4	2.4	2.4	2.4	2.4	2.4	2.4	2.4	2.4	2.4
C_p (J/Kg.K)	4185	4185	4185	4185	4185	4185	4185	4185	4185	4185
G (W/m ²)	907	907	907	907	907	907	907	907	907	907

Tableau II.2: Données de l'étude la température de sortie du fluide du collecteur.

c. Influence de la température d'entrée du fluide T_{fe}

Débit m (Kg/s)	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
T_{fe} (k)	283.15	288.15	293.15	298.15	303.15	308.15	313.15	318.15	323.15	323.15
T_{fs} (k)	323.15	323.15	323.15	323.15	323.15	323.15	323.15	323.15	323.15	323.15
A_c (m ²)	2.4	2.4	2.4	2.4	2.4	2.4	2.4	2.4	2.4	2.4
C_p (J/Kg.K)	4185	4185	4185	4185	4185	4185	4185	4185	4185	4185
G (W/m ²)	907	907	907	907	907	907	907	907	907	907

Tableau II.3: Données de l'étude la température d'entrée du fluide du collecteur.

II.5.2 Partie cycle Rankine

Les hypothèses suivantes sont adoptées pour la modélisation de cycle Rankine :

- Chaque composante est considérée comme un système ouvert fonctionnant en régime permanent.

- Les pertes de friction, et les pertes thermiques sont négligées (adiabatique réversible).
- Les chaleurs massiques des courants de la source et de la charge sont constantes.
- Le fluide moteur à la sortie du condenseur est à l'état de liquide saturé.
- Le volume spécifique du fluide moteur est constant pendant le pompage.
- On néglige les variations des énergies cinétiques et potentielles.
- La pompe et la turbine un fonctionnement isentropique.

t_{tv} : température de la turbine à vapeur (K)	400
P_{tv} : Pression de la turbine (kPa)	5000
P_C : Pression de condenseur (kPa)	3
T_0 (K)	200
η_{TV} : Rendement isentropique de la turbine (%)	89
η_{pp} : Rendement isentropique de la pompe (%)	92
m : Débit massique de cycle Rankine (kg/s)	1

Tableau II.4: Données de l'étude du cycle ORC.

II.6 Méthodes numériques de simulation du problème d'optimisation

Dans le contexte de ce mémoire portant sur l'étude paramétrique d'une installation énergétique solaire sur le cycle Rankine, les méthodes numériques de simulation sont utilisées pour résoudre le problème d'optimisation associé.

Plus précisément, la résolution numérique du problème d'optimisation du cycle ORC peut être effectuée à l'aide des méthodes d'optimisation intégrées dans EES (Engineering Equation Solver ou solveur d'équation pour l'ingénierie), ce logiciel est principalement un outil mathématique utilisé pour résoudre des systèmes d'équations et des modèles thermodynamiques spécifiques à l'eau et aux fluides organiques utilisés dans ce contexte.

Les méthodes d'optimisations intégrées dans le logiciel EES permettent de calculer les enthalpies à des températures et des pressions spécifiques, en effet, le logiciel EES propose plusieurs algorithmes pour résoudre les problèmes d'optimisation.

Le choix de ce logiciel repose sur les raisons suivantes :

- Il intègre des bases de données thermodynamiques.
- Il offre des méthodes de résolution d'équations.
- Il dispose d'une interface graphique adaptée pour les besoins de cette étude.

II.7 Conclusion

Au cours de ce chapitre, nous avons présenté l'étude paramétrique d'une installation énergétique solaire à base de cycle Rankine, notamment le stockage thermique et l'ensemble des calculs ont été orientés en fonction des données disponibles.

Cette étude permet d'optimiser les performances de l'installation et de maximiser son rendement énergétique (rendement du cycle Rankine), il est donc crucial de prendre en compte tous ces paramètres pour concevoir une installation solaire efficace et durable.

Chapitre III

Résultats et Discussions

Résultats et Discussions

III.1 Introduction

Ce chapitre vise à présenter et analyser nos résultats en expliquant l'impact de certains paramètres de capteur sur le rendement de collecteur solaire, les performances énergétiques des cycles organiques.

Tout d'abord, nous allons présenter la validation de notre modèle en le comparant aux données réelles de la centrale thermique, afin d'évaluer sa fiabilité, ensuite, nous présenterons graphiquement les résultats obtenus lors de l'analyse des sept configurations, à l'aide de schémas et de diagrammes T-s, ces représentations permettront d'analyser les valeurs obtenues à chaque point du cycle pour chaque composant du système et pour chaque configuration, et nous procéderons à une comparaison entre les différents fluides étudiés.

Enfin, nous discuterons des perspectives d'amélioration et des recommandations pour des travaux futurs visant à optimiser davantage les installations énergétiques solaires à base de cycle Rankine.

III.2 Les résultats donnés par le logiciel EES :

Dans le souci d'obtenir des résultats, une procédure de calcul a été adoptée pour l'ensemble des variations des paramètres opératoires, les étapes que contient cette procédure sont toutes basées sur les résultats obtenus en exploitant l'EES.

➤ Partie solaire

Voici les résultats des calculs énergétiques pour le système solaire :

▪ Débit massique m

Débit m (Kg/s)	Rendement du collecteur solaire (η)
0	0
0.001	0.0577
0.002	0.1154
0.003	0.1730
0.004	0.2307

Tableau III.1: Les résultats de $\eta=f(m)$.

- **Température du fluide de travail à la sortie du collecteur solaire**

T_{fs} (k)	Rendement du collecteur solaire (η)
308.15	0
318.15	0.1923
323.15	0.2884
328.15	0.3845
333.15	0.4806

Tableau III.2: Les résultats de $\eta=f(T_{fs})$.

- **Température d'entrée du fluide caloporteur Tfe**

T_{fe} (k)	Rendement du collecteur solaire (η)
303.15	0.3845
308.15	0.2884
313.15	0.1923
318.15	0.0961
323.15	0

Tableau III.3: Les résultats de $\eta=f(T_{fe})$.

III.3 Etude de l'influence de quelques paramètres sur le rendement du capteur solaire

III.3.1 Influence du débit massique m sur le rendement

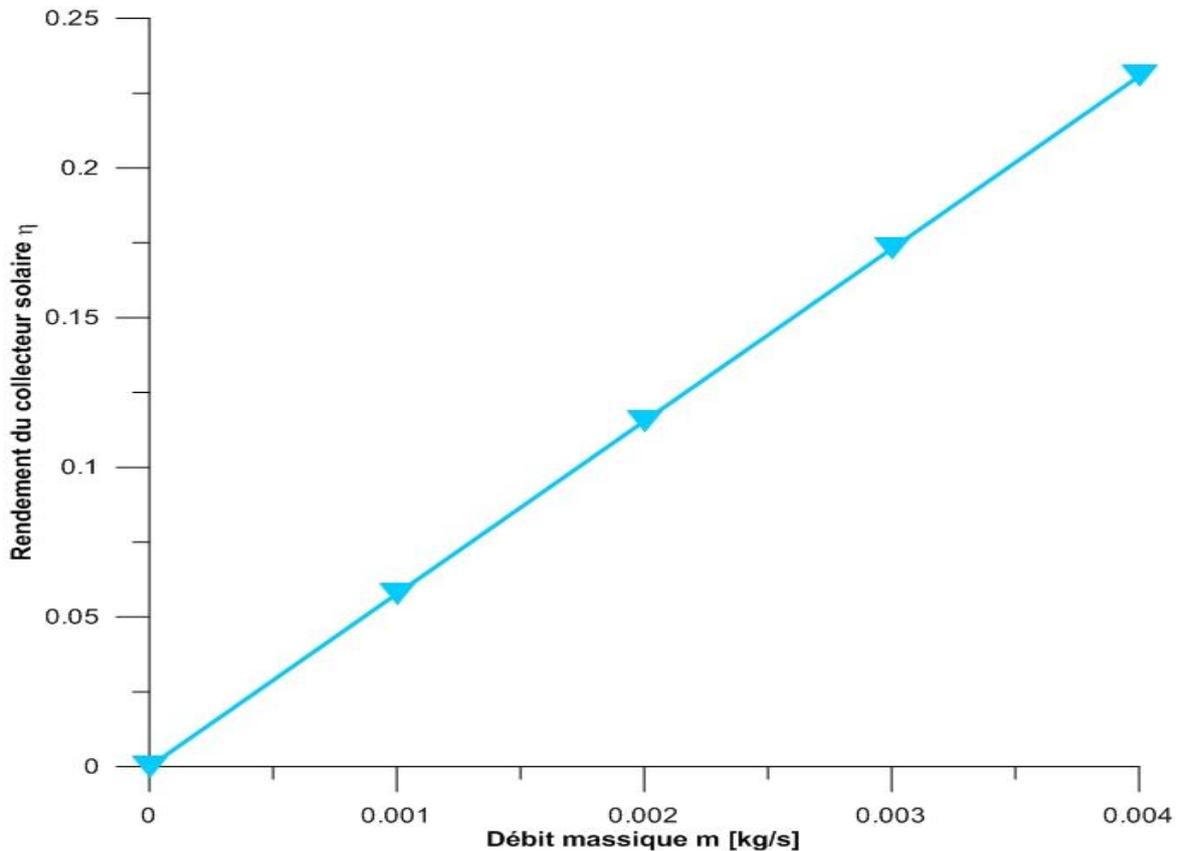


Figure III.1: Variation du rendement du collecteur avec le débit massique.

Variation du rendement du collecteur avec le débit massique m :

La variation du rendement du collecteur solaire avec le débit massique est significative. Lorsque le débit massique est nul, aucun rendement n'est obtenu car aucune chaleur n'est extraite du collecteur solaire sans circulation du fluide caloporteur, à mesure que le débit massique augmente, le rendement du collecteur solaire augmente également. Cela est dû à une meilleure extraction de chaleur du collecteur lorsque le fluide caloporteur circule plus rapidement, en augmentant le débit massique, on obtient une augmentation proportionnelle du rendement du collecteur solaire ainsi, un débit massique plus élevé permet d'optimiser la conversion de l'énergie solaire en énergie thermique utilisable.

Il est important de prendre en compte cette relation lors de la conception et de l'optimisation d'une installation solaire afin de maximiser le rendement du collecteur solaire.

III.3.2 Influence de la température de sortie du fluide T_{fs}

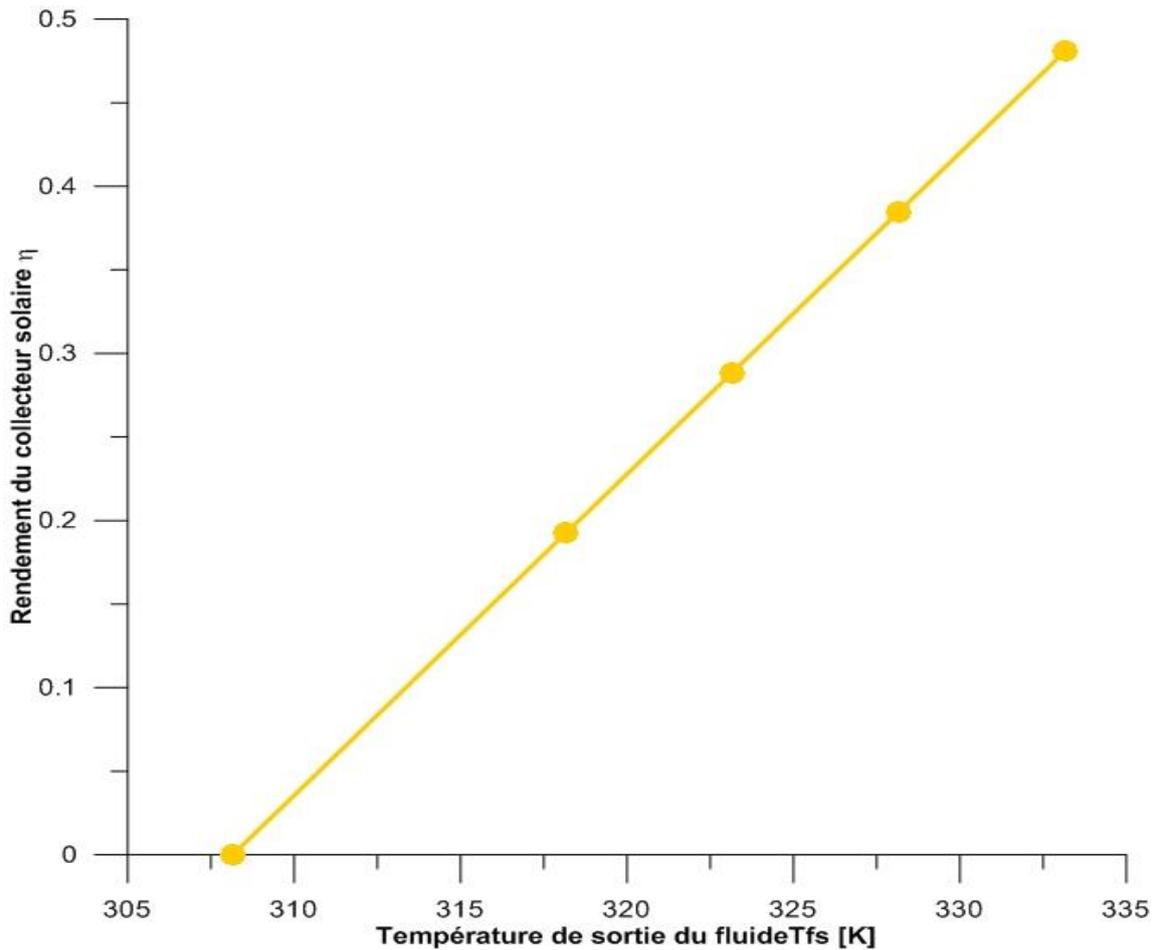


Figure III.2: Variation du rendement du collecteur solaire avec le changement de T_{fs} .

Variation du rendement du collecteur solaire avec le changement de la température du fluide de travail à la sortie (T_{fs}) est significative, lorsque la température est de 308.15 K, le rendement est nul, indiquant une conversion inefficace de l'énergie solaire en chaleur utilisable, à mesure que la température augmente, le rendement du collecteur solaire s'améliore. Par exemple, à 318.15 K, le rendement atteint 0.1923, montrant une amélioration significative de la conversion de l'énergie solaire en chaleur, cette tendance se poursuit avec des augmentations de température, entraînant une augmentation proportionnelle du rendement. À 323.15 K, le rendement est de 0.2884, et à 333.15 K, il atteint 0.4806.

Ces résultats soulignent l'importance d'une température élevée du fluide de travail pour maximiser le rendement des collecteurs solaires dans un cycle Rankine. Maintenir des températures plus élevées permet une meilleure absorption de la chaleur solaire et une conversion plus efficace en énergie thermique. Ces informations sont cruciales pour la conception et l'optimisation des systèmes solaires afin d'obtenir des performances optimales.

III.3.3 Influence de la température d'entrée du fluide caloporteur T_{fe}

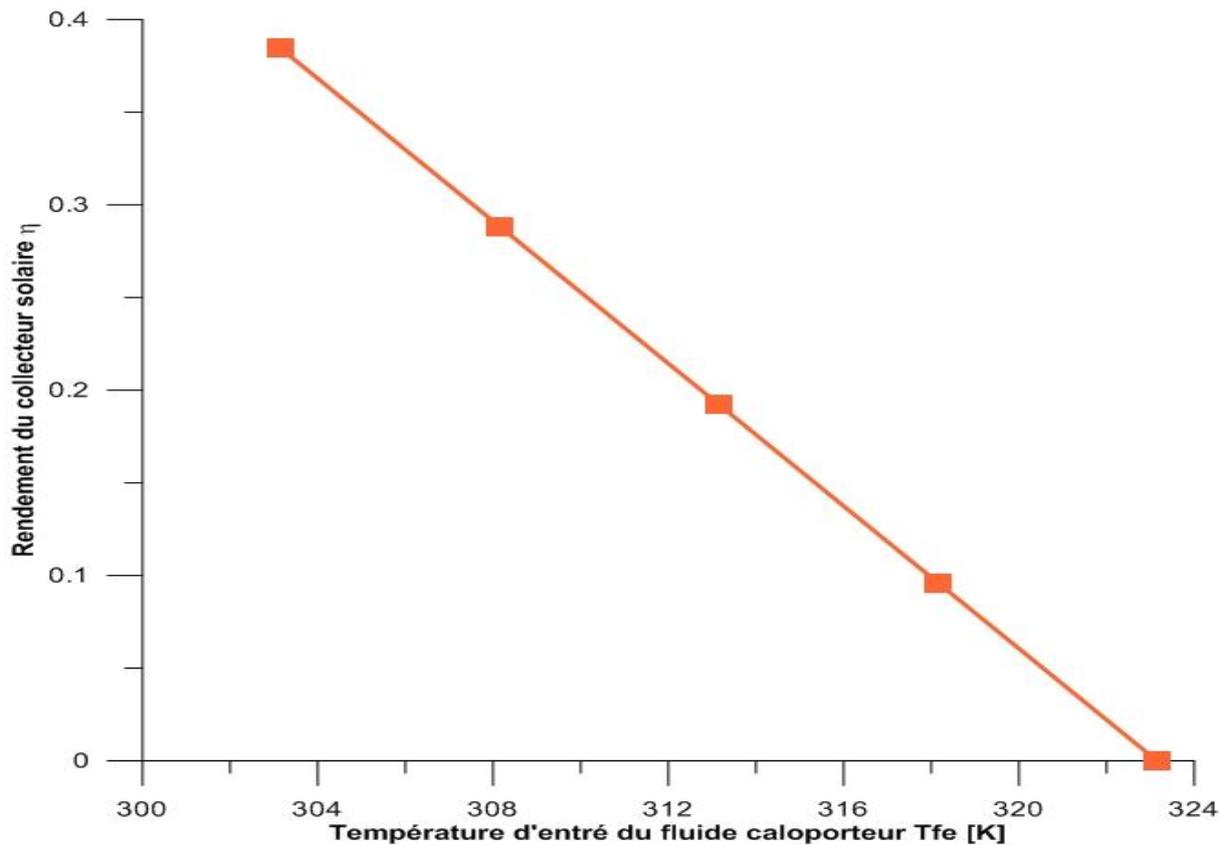


Figure III.3: Variation du rendement du collecteur solaire avec le changement de T_{fe} :

Lorsque la température du fluide caloporteur à l'entrée (T_{fe}) est de 303.15 K, un rendement élevé de 0.3845 est obtenu, indiquant une conversion efficace de l'énergie solaire en chaleur utilisable, à mesure que la température du fluide caloporteur à l'entrée augmente, le rendement du collecteur solaire diminue progressivement. Par exemple, à une température de 308.15 K, le rendement est de 0.2884, et à 313.15 K, il est de 0.1923.

Cette tendance se poursuit avec l'augmentation de la température du fluide caloporteur à l'entrée. À chaque augmentation de température, on observe une diminution correspondante du rendement du collecteur solaire. Par exemple, à 318.15 K, le rendement est de 0.0961, et à 323.15 K, le rendement atteint 0, cette diminution du rendement avec l'augmentation de la température du fluide caloporteur à l'entrée est normale, une température plus élevée à l'entrée signifie que le fluide caloporteur absorbe déjà une partie de la chaleur disponible, ce qui réduit la quantité d'énergie solaire pouvant être convertie en chaleur utilisable.

Ces résultats soulignent l'importance de maintenir une température optimale du fluide caloporteur à l'entrée pour maximiser le rendement du collecteur et le rendement de cycle Rankine solaire dans une installation solaire à cycle Rankine.

Partie cycle Rankine

Après avoir effectué des calculs énergétiques sur le cycle ORC, les résultats obtenus sont les suivants :

❖ Cas du fluide fluor éthane (R123)

Points	T (K)	P (kPa)	h (kJ/kg)	S (kJ/kg k)
1	230.5	3	159.2	0.8381
2	231.8	5000	162.6	0.8392
3	400.0	5000	340.2	1.4070
4	230.5	3	296.0	1.4310

Tableau III.4: Caractéristiques thermodynamiques des points du cycle ORC pour le fluide R123.

Calcul	Valeurs	Unités
W_{tv}	44.24	kJ/kg
W_{pp}	3.337	kJ/kg
W_{net}	40.91	kJ/kg
Q_c	177.6	kJ/kg
Q_f	136.7	kJ/kg
η_{th}	0.2303	%

Tableau III.5: Performances du cycle ORC pour le fluide R123.

❖ Cas du fluide peta fluor pane (R245fa)

Points	T (K)	P (kPa)	h (kJ/kg)	S (kJ/kg k)
1	224.0	3	139.2	0.7549
2	225.2	5000	142.7	0.7561
3	400.0	5000	380.9	1.5280
4	224.0	3	319.9	1.5620

Tableau III.6: Caractéristiques thermodynamiques des points du cycle ORC pour le fluide R123.

Calcul	Valeurs	Unités
W_{tv}	60.97	kJ/kg
W_{pp}	3.560	kJ/kg
W_{net}	238.1	kJ/kg
Q_c	177.6	kJ/kg
Q_f	180.7	kJ/kg
η_{th}	0.2411	%

Tableau III.7: Performances du cycle ORC pour le fluide R245fa.

❖ **Cas du fluide isobutane (R600a)**

Points	T (K)	P (kPa)	h (kJ/kg)	S (kJ/kg k)
1	197.4	3	156.9	1.7400
2	209.9	5000	182.3	1.8640
3	400.0	5000	703.7	3.5400
4	197.4	3	533.2	3.6460

Tableau III.8: Caractéristiques thermodynamiques des points du cycle ORC pour le fluide R600a.

Calcul	Valeurs	Unités
W_{tv}	170.5	kJ/kg
W_{pp}	25.37	kJ/kg
W_{net}	145.1	kJ/kg
Q_c	521.4	kJ/kg
Q_f	376.3	kJ/kg
η_{th}	0.2783	%

Tableau III.9: Performances du cycle ORC pour le fluide R600a.

III.4 Effet de la température d'évaporateur

Dans cette partie, nous étudions l'effet de la température d'évaporation sur les performances du cycle ORC en tenant compte des trois fluides sélectionnés (R600a, R123 et 245fa).

Pour ce faire, certains paramètres de fonctionnement sont fixés dont la pression de condensation $P_{Cond} = 3 \text{ kPa}$.

D'autre part, on fait varier la température d'évaporation du côté ORC sur une plage de température 300 K à 600K.

III.4.1 Effet de la température d'évaporateur sur le rendement énergétique

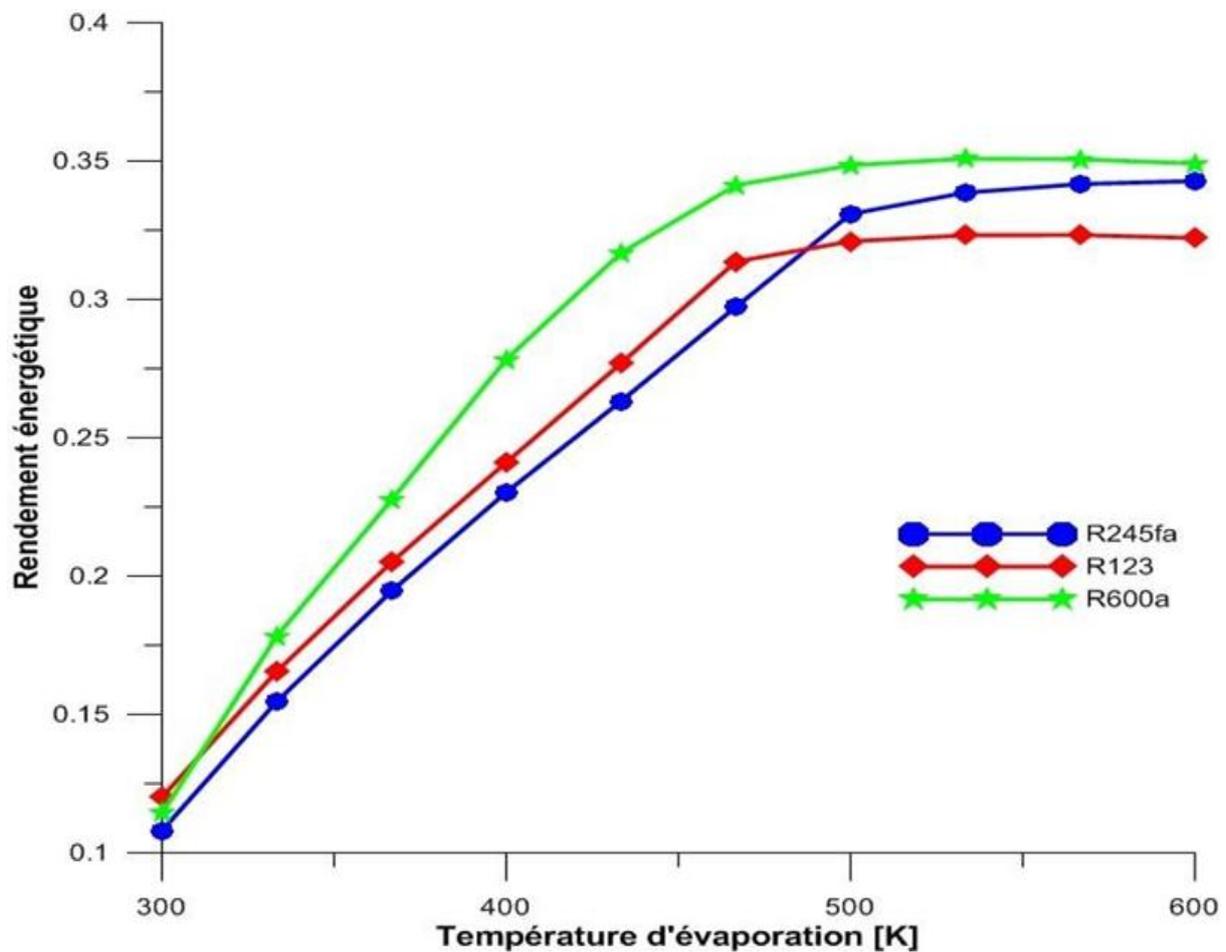


Figure III.4: Variation du rendement énergétique du cycle ORC en fonction de la température d'évaporateur ORC.

Les résultats de la figure III.4 montrent que la température d'évaporation de l'ORC a un effet positif sur l'efficacité énergétique du cycle ORC, le rendement énergétique augmente considérablement pour les trois fluides organiques étudiés, mais en comparant les résultats trouvés pour les trois fluides, nous trouvons que l'efficacité énergétique dans le cas d'un

fluide R600a est plus élevée par rapport aux autres, on peut voir que le rendement énergétique passe de 11.43 % à 34.91%.

Cela suggère que (les caractéristiques) le fluide R600a est plus efficace en termes de conversion de la chaleur en énergie mécanique dans le cycle ORC par rapport aux autres fluides étudiés.

III.4.2 Effet de la température d'évaporateur sur le travail net

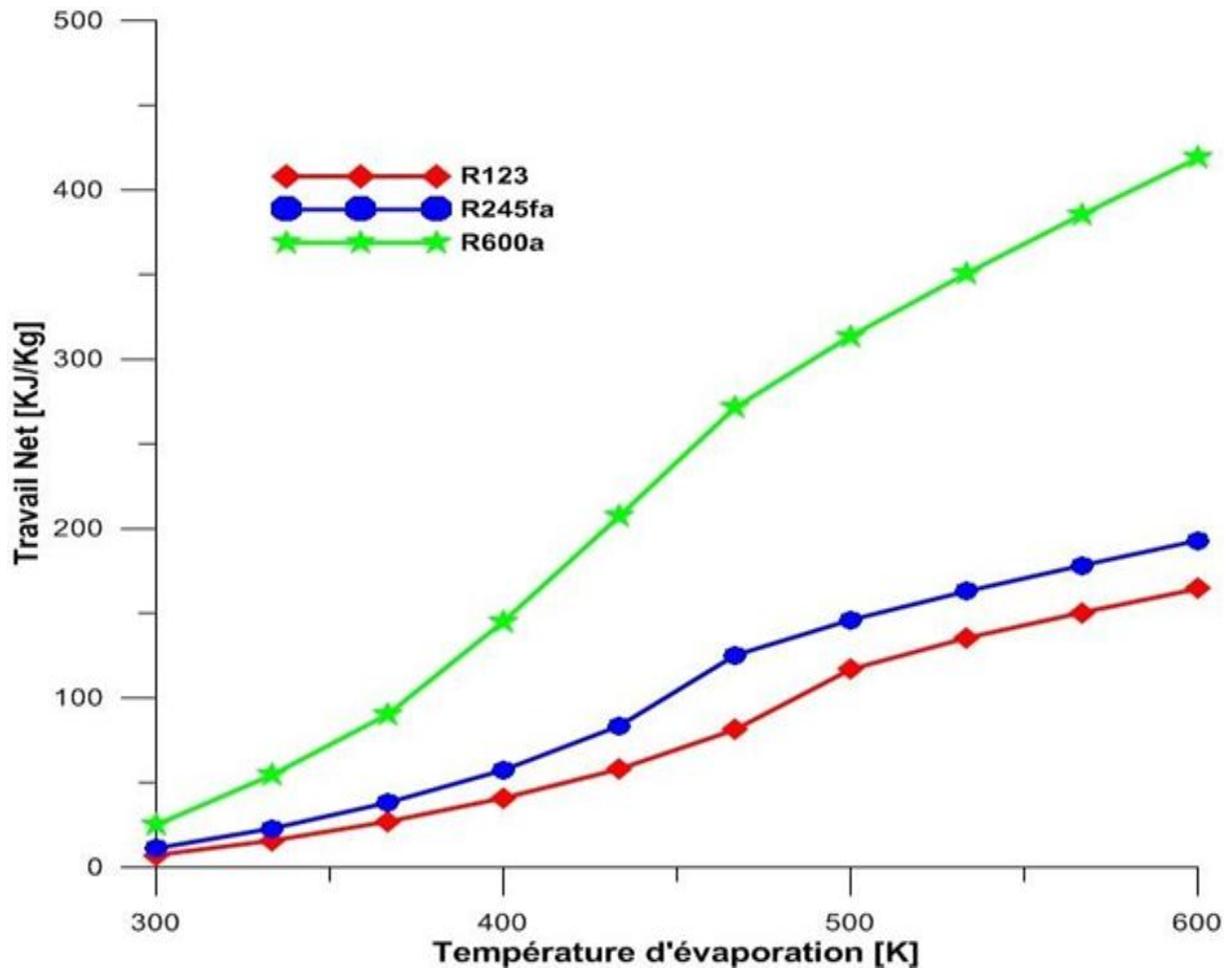


Figure III.5: Effet de la température d'évaporation sur le travail net du cycle.

La figure III.5 indique que le travail net augmente lorsque les fluides de travail sont légèrement surchauffés, la valeur maximale atteinte pour le fluide R600a est 418,8 [KJ/kg] à la température 600K, ce qui est supérieur aux autres fluides, Globalement les fluides se comportent de la même manière, les résultats montrent que le travail net dépend bien de l'augmentation de l'enthalpie spécifique à différentes températures pour chaque fluide de travail.

III.5 Effets de la pression de condensation

Dans cette partie, nous étudions l'effet de la pression de condensation sur les performances du cycle ORC en tenant compte des trois fluides sélectionnés. Pour ce fait, certains paramètres de fonctionnement sont fixés dont la température d'évaporateur $t_{ev}=200K$.

D'autre part, on fait varier la pression de condensation du côté ORC sur une plage de température 2 kPa à 5 kPa.

III.5.1 Effet de la pression de condenseur sur le rendement énergétique

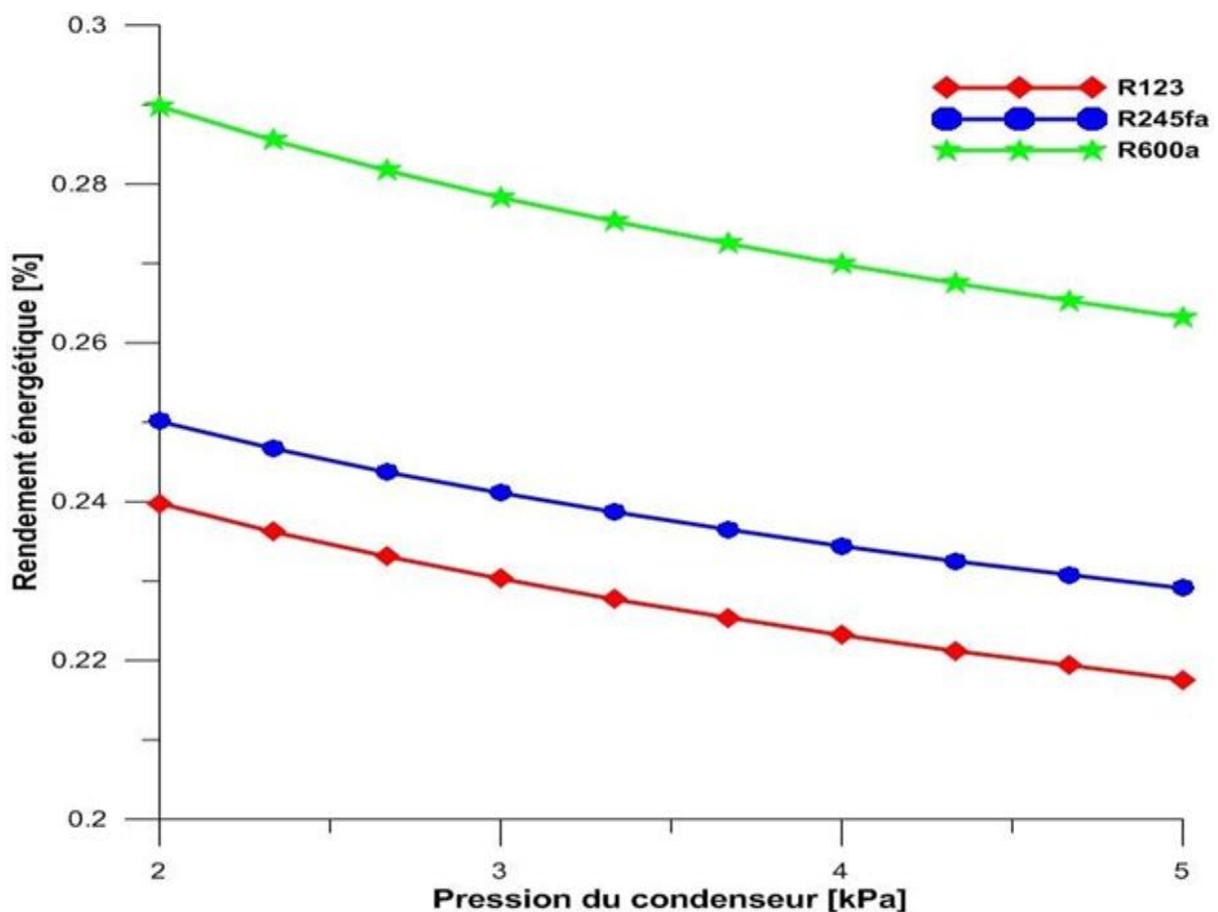


Figure III.6: Variation de l'efficacité énergétique du cycle ORC en fonction de la pression de condenseur.

La figure III.6 indique que l'augmentation de la pression de condensation a un impact négatif sur le rendement du cycle, les trois fluides se comportent presque de la même façon, l'efficacité du fluide R600a a diminué de 28,98% jusqu'à 26,32%, le R245fa a diminué de 25,01% jusqu'à 22,91% et aussi le fluide R123 a diminué de 23,98% jusqu'à 21,76%. Donc ces résultats indiquent que le cycle ORC seront plus efficaces dans les cas où des températures de condensation plus basse peuvent être atteints.

III.5.2 Effet de la pression de condenseur sur le travail net

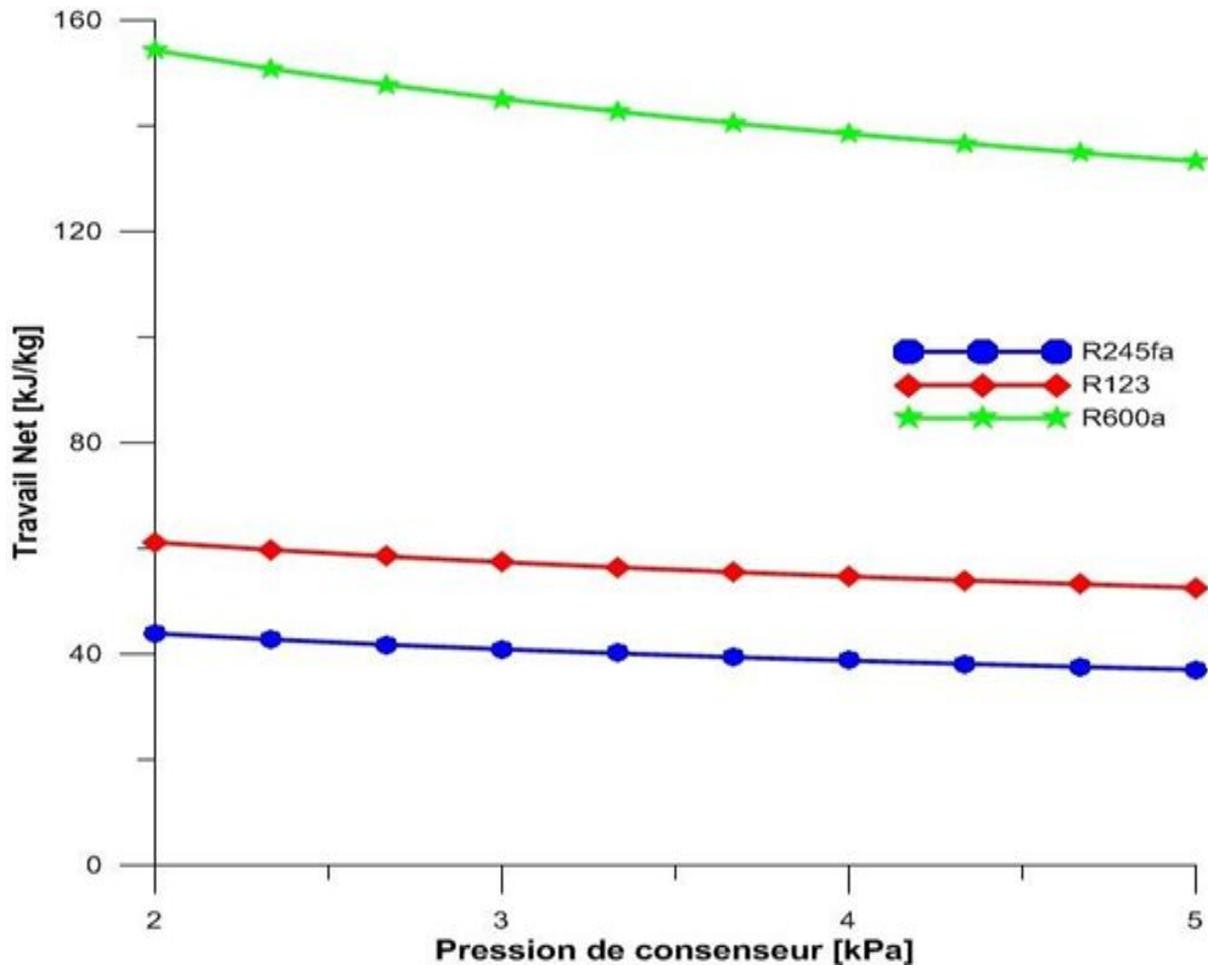


Figure III.7: Effet de pression de condensation sur le travail net du cycle.

La figure III.7 indique que les trois fluides de travail perdent de travail lorsque la pression de condensation est augmentée, donc ils ont aussi un impact négatif sur le cycle ORC. La température de condensation détermine la pression de condensation, donc l'augmentation de la température augmente également la pression, ce qui réduit à son tour le rapport de pression du détendeur car il y a une température et une pression d'évaporation fixés qui affectent le travail net, ce sont toutes des pertes significatives dans le travail net et par conséquent, une attention particulière doit être accordée à la température de condensation.

Et une fois de plus ont confirmé que le système ORC fonctionne efficacement avec un travail net dans les cas où une température de condensation plus faible peut être réalisée.

III.6 Effets du travail massique de cycle

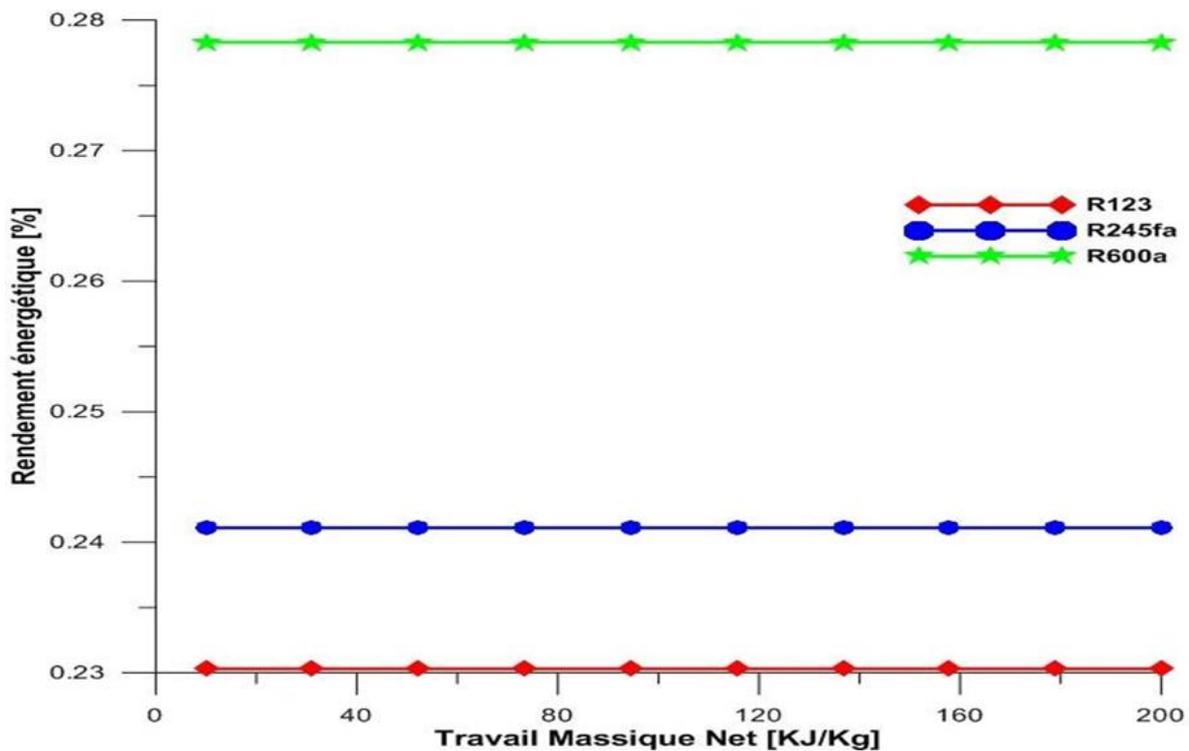


Figure III.8: Variation de l'efficacité énergétique du cycle ORC en fonction de travail massique net.

Dans ce cas, la figure III.8 indique que le rendement énergétique reste stable (constant) et ne change pas pour les 03 fluides R600a reste constant à 27.83%, R245fa reste constant à 24.11% et R123 reste constant à 23.03% quelles que soient les variations de travail massique. Cela suggère que le système parvient à maintenir une efficacité constante dans la conversion de l'énergie.

III.7 Conclusion

Ce chapitre présente les résultats d'une étude paramétrique approfondie sur une installation énergétique solaire basée sur le cycle Rankine, les simulations numériques ont mis en évidence l'influence significative des quelques paramètres du collecteur solaire et certains paramètres au niveau des différents composants du ORC, l'optimisation précise de ces paramètres est essentielle pour atteindre une amélioration significative du rendement énergétique de l'installation solaire.

Toutefois, il est crucial de considérer les variations de la température de l'évaporateur et de la pression de condenseur pour éviter toute détérioration des performances.

Ces résultats soulignent l'importance de considérer attentivement ces paramètres pour maximiser l'efficacité des installations solaires basées sur le cycle Rankine.

Conclusion Générale

Conclusion générale

Les installations énergétiques solaires à base de cycle Rankine sont des technologies prometteuses pour la production d'électricité à partir de l'énergie solaire, ces systèmes, connus sous le nom de cycles organiques de Rankine (ORC), permettent de convertir la chaleur solaire en électricité en utilisant des fluides organiques comme agents de travail, l'étude paramétrique de ces installations vise à optimiser leurs performances en analysant les différents paramètres qui influencent leur fonctionnement.

Dans cette étude, les résultats obtenus montrent l'influence significative du débit massique et de la température du fluide de travail (à la sortie et l'entrée) sur les rendements des panneaux solaires ces variations démontrent l'importance de choisir soigneusement ces paramètres pour optimiser les performances du système solaire thermique et maximiser l'utilisation de l'énergie solaire.

En suite dans cette étude nous intéressons à l'analyse énergétique d'un système ORC, en mettant l'accent sur l'amélioration de ses performances en fonction de différents fluides organiques tels que le R600a, le R245fa et le R123. L'analyse énergétique nous permettra de déterminer les travaux réalisés par chaque composant du système ORC ainsi que l'efficacité énergétique globale du cycle, de plus, nous chercherons à sélectionner le fluide organique le plus adapté à cette installation en considérant ses propriétés thermodynamiques, physiques, environnementales et de sécurité.

La sélection des fluides de travail constitue un aspect crucial dans la conception d'un système ORC performant, cette tâche complexe nécessite de prendre en compte les propriétés thermodynamiques, physiques, environnementales et de sécurité de chaque fluide, afin de trouver le meilleur compromis, les températures de condensation et de vaporisation optimales doivent également être déterminées pour assurer le bon fonctionnement du système.

En conclusion, cette étude paramétrique vise à améliorer les performances d'une installation énergétique solaire à base de cycle Rankine en analysant les différents paramètres qui influencent son fonctionnement, l'analyse énergétique ainsi que la sélection appropriée des fluides de travail joueront un rôle essentiel dans l'optimisation de cette technologie, permettant ainsi de maximiser son efficacité énergétique et d'exploiter au mieux l'énergie solaire disponible.

Références bibliographique

Références bibliographiques

- [1] Sylvain, Q. (2007). Les centrales solaires à concentration. Université de Liège Faculté des sciences appliquées.
- [2] En ligne Malanima, P. (2020). Consommation d'énergie mondiale une base de données 1820-2018. Université de Harvard. <https://histecon.Fas.Harvard.edu/energyhistory/DATABASE%20Monde%20Énergie%20Consommation>.
- [3] Power, C. S. (2010). Technology roadmap concentrating solar power. *Current*, 5, 1-52.
- [4] Shouman, ER, & Khattab, NM (2015). Avenir économique de l'énergie solaire à concentration (CSP) pour la production d'électricité en Égypte. *Revue des énergies renouvelables et durables*, 41, 1119-1127.
- [5] Stoian, P., & Vlad, E. APPLICATION DE LA THERMODYNAMIQUE À VITESSE FINIE (FST) AU SYSTÈME CARDIOVASCULAIRE HUMAIN.
- [6] Fernández-García, A., Zarza, E., Valenzuela, L., & Pérez, M. (2010). Capteurs solaires paraboliques et leurs applications. *Revue des énergies renouvelables et durables*, 14 (7), 1695-1721.
- [7] ACHOUR, L. (2018). Méthodes d'analyse de système de production: Application à la stratégie de la production d'énergie dans les centrales hybrides d'électricité (Doctoral dissertation, Université de Batna 2).
- [8] Ibdjaoudene, T., & Mahiout, M. (2017). Elaboration d'un programme de calcul de rendement énergétique d'un capteur cylindro-parabolique (Doctoral dissertation, Université Mouloud Mammeri Tizi-Ouzou).
- [9] Sylvain, Q. (2007). Les centrales solaires à concentration. Université de Liège Faculté des sciences appliquées.
- [10] A. Gama, M. Haddadi et A. Malek «Étude et réalisation d'un concentrateur cylindro-parabolique avec poursuite solaire aveugle». *Revue des Énergies Renouvelables*, Vol. 11, N°3 (2008) Pp 437 – 451.

- [11] M. B. Habeebullah, A. M. Khalifa, and I. Olw, The oven receiver an approach toward the revival of concentrating solar cookers, *Solar Energy*, Vol.
- [12] Principe de fonctionnement de la solaire thermodynamique .Syndicat des énergies renouvelables 13-15, rue de la Baume 75008 Paris. Mai 2010.
- [13] Zeghib, I., & Kerbache, T. (2017). Etude et réalisation d'un concentrateur solaire parabolique.
- [14] T. Nordine, « influence des paramètres du système de détente sur le fonctionnement de la centrale thermique de Cap-Djenat », mémoire de fine d'étude, université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2012.
- [15] Zhihao Wu, Yitung Chen, Hua Tian, Yaxin Zhang, and Wenjie Tian. "Parametric study of a solar organic Rankine cycle system for electricity generation." *Applied Energy* 96 (2012): 296-303.
- [16] E. Galloni, G. Fontana, S. Staccone, Design and experimental analysis of a mini ORC (organic Rankine cycle) power plant based on R245fa working fluid, *Energy* 90 (2015) 768–775.
- [17] Murat Aydin and Oktay Baysal. "Parametric investigation of a solar organic Rankine cycle for electricity generation." *Energy Conversion and Management* 74 (2013): 227-235.
- [18] Hossam A. Gabbar, Ahmed E. Elsayed, et al. "Performance optimization of a solar organic Rankine cycle using a response surface methodology." *Applied Energy* 139 (2015): 222-232.
- [19] A. Haselbacher, "Thermal Energy Storage – Motivation, Options, and Overview of Current Modeling and Experimental Efforts", *SFERA Winter School 2015 on Thermal Energy Storage*, pp. 5-55, 2015.
- [20] KLEIN, Sanford A. et ALVARADO, F. L. EES: Engineering equation solver for the Microsoft Windows operating system. F-Chart software, 1992.
- [21] P, H, Communay. Héliothermique : le gisement solaire, méthodes et calculs, Groupe de Recherche et d'Édition, France. (2002).

G.iordanou, flat-plate solar collectors for water heating with improved heat transfer for application in climatic, thesis, university of durham, (2009).

[22] N, Bellel. Contribution à la réalisation et simulation d'un capteur plan à eau type collecteur; thèse de magistère, Université de Constantine. (1989).

Résumé

Ce mémoire présente une étude paramétrique approfondie d'une installation énergétique solaire basée sur le cycle Rankine, il met en évidence l'importance du stockage thermique et du choix du fluide de travail pour optimiser les performances du système, l'analyse énergétique se concentre sur l'efficacité du cycle Rankine dans la production d'énergie à partir de sources de chaleur basse température, telles que l'énergie solaire.

Le mémoire débute par une étude bibliographique sur les centrales solaires thermodynamiques, suivie d'une explication du fonctionnement des turbines à vapeur et du cycle Rankine simple.

Il souligne également l'importance de la sélection adéquate du fluide de travail, les parties suivantes se focalisent sur l'analyse énergétique du cycle Rankine, réalisée à l'aide du logiciel ESS, l'effet des températures de fonctionnement sur l'efficacité énergétique est étudié en prenant en compte trois fluides organiques différents, l'étude aboutit à la sélection du fluide R600a comme le plus adapté à cette installation solaire.

Mots clés : étude paramétrique, installation énergétique solaire, Collecteur solaire, système solaire thermique, Cycle Rankine, fluides de travail, efficacité énergétique, turbine à vapeur, rendement thermique.

Abstract

This thesis presents an in-depth parametric study of a solar energy installation based on the Rankine cycle, it highlights the importance of thermal storage and the choice of working fluid to optimize system performance, Energy analysis focuses on the efficiency of the Rankine cycle in producing energy from low temperature heat sources, such as solar energy.

The dissertation begins with a bibliographic study on thermodynamic solar power plants, followed by an explanation of the operation of steam turbines and the simple Rankine cycle. It also emphasizes the importance of proper selection of the working fluid, The following parts focus on the energy analysis of the Rankine cycle, carried out using the ESS software, the effect of operating temperatures on energy efficiency is studied by considering three different organic fluids, the study leads to the selection of the R600a fluid as the most suitable for this solar installation.

Keywords: parametric study, solar energy installation, solar collector, solar thermal system, Rankine Cycle, working fluids, energy efficiency, steam turbine, thermal efficiency.