



**UNIVERSITE SAAD DAHLAB DE BLIDA 1
FACULTE DE TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT DE MECANIQUE**

**Projet de Fin d'études
Pour l'obtention de diplôme de
Master en Génie Mécanique
Spécialité : Energétique**

**Détermination des performances d'un cycle organique
de Rankine relié à un concentrateur solaire
parabolique et à un concentrateur à miroir de Fresnel**

Proposé et encadré par :

Pr. Boussad Boumeddane

Etudié par :

Djeldjellani Billel

Guebli Nedjmeddine

Fékkache Abdelbasset

Année universitaire 2020/2021

Remerciement

Au terme de ce travail, nous adressons mes remerciements les plus sincères à mon encadreur **le Professeur Boussad Boumeddane**, pour nous avoir permis de bénéficier de son grand savoir dans la matière, pour sa disponibilité, sa pédagogie, ses compétences, sa modestie et son aide précieuse tout au long de ce projet même pendant les moments les plus difficiles.

Je remercie tous les enseignants de département de Mécanique et le personnel administratif et technique, qui ont contribué de près ou de loin à ma formation durant ces cinq années.

Je remercie toutes les personnes qui m'ont soutenu, d'une façon ou d'une autre, m'éprouvons incessamment leur estime et amabilité.

Je termine ces remerciements en saluant vivement les membres du jury pour l'honneur qu'ils me font en acceptant de lire et juger ce travail.

DEDICACE

Je tiens à dédier ce mémoire :

A ma chère mère et à mon cher père, en témoignage de leur gratitude de leurs dévouement, de leurs soutien permanent durant toutes mes année d'études, leurs sacrifices illimités, leurs réconforts moral , ils ont consenti tant d'effort pour mon éducation, mon instruction et pour me voir atteindre ce but, pour tout cela et pour ce qui ne peut être dit, mes affections sans limite.

A toute ma famille et à mes chers amis chacun en son nom, à ceux qui ont aidé à réaliser ce modeste travail et pour leurs encouragements, ainsi qu'à tous mes enseignants.

Enfin à tous mes camarades de la classe de la promotion d'énergétique (2020-2021).

Table des matière

Remerciements.....	II
Dédicaces.....	III
Résumé.....	VI
Liste des figures.....	IX
Liste des tableaux.....	x
Liste des symboles.....	xi
INTRODUCTION GÉNÉRALE.....	1
CHAPITRE 1 : LE CYCLE ORGANIQUE DE RANKINE.....	4
1.1 Introduction.....	5
1.2 Les applications du cycle organique de Rankine.....	6
1.2.1 Biomasse.....	6
1.2.2 Géothermique.....	8
1.2.3 Récupération de chaleur fatale.....	9
1.2.4 Energie solaires.....	10
1.3 Comparaison du ORC et le cycle de Rankine simple.....	11
1.3.1 Le cycle Rankine simple.....	11
1.3.2 Diagramme T-S.....	12
1.3.3 Point d'ébullition.....	13
1.3.4 Durée de vie des pièces.....	13
1.3.5 Fluide de travail.....	13
1.3.6 Taille des composants.....	13
1.3.7 Rendement.....	13
1.3.8 Propriétés environnementales et de sécurité.....	13
CHAPITRE 2 : ORC RELIE A UN CONCENTRATEUR PARABOLIQUE.....	15
2.1 Concentrateur parabolique.....	16
2.1.1 Introduction.....	16
2.1.2 Principe de fonctionnement.....	16
2.1.3 Miroir cylindro parabolique.....	17
2.1.4 Le tube récepteur.....	18
2.1.5 Les paramètres géométriques.....	18
2.1.5.1 La longueur cylindro parabolique.....	19

Table des matière

2.1.5.2 La distance focale	19
2.1.5.3 L'angle d'ouverture	19
2.1.5.4 La largeur d'ouverture	20
2.1.6 Les paramètres optique.....	20
2.1.6.1 La surface du miroir et la surface d'ouverture	20
2.1.6.2 Le facteur de concentrateur « C »	21
2.2 Le fluide de travail	21
2.3 ORC parabolique étudié.....	30
2.3.1 Modélisation des composants	30
2.3.2 Schéma ORC parabolique	34
2.3.3 Principe de fonctionnement.....	34
2.4 Analyse Théorique d'un Système ORC parabolique	35
CHAPITRE 3 : ORC RELIE A UN CONCENTRATEUR MIROIR DE FRESNEL	39
3.1 Concentrateur miroir de Fresnel.....	40
3.1.1 Introduction.....	40
3.1.2 Principe de fonctionnement.....	40
3.1.3 Les avantages et les inconvénients de concentrateur de Fresnel	41
3.1.4 Les éléments d'un concentrateur à réflecteur linéaire de Fresnel	42
3.2 L'huile diathermique.....	43
3.3 ORC relié à une concentrateur Fresnel étudié	44
3.3.1 Modélisation des composants	44
3.3.2 Schéma ORC relié à concentrateur Fresnel	44
3.3.3 Principe de fonctionnement.....	44
3.4 Analyse Théorique d'un Système ORC relié à concentrateur Fresnel	45
CHAPITRE 4 : Résultats et discussions	49
4.1 Sélection du fluide organique de travail	50
4.2 Comparaison.....	60
4.3 Conclusion.....	68
Conclusion général.....	69
Bibliographie.....	71

Résumé

Résumé :

Ce travail examine l'utilisation des ORC alimentés par un concentrateur solaire pour convertir l'énergie thermique relativement à basse température en électricité.

Une étude thermodynamique et théorique d'un système ORC relié à un concentrateur solaire parabolique ainsi qu'un ORC relié à un concentrateur à miroir de Fresnel, est effectuée en se concentrant également sur l'importance de la sélection du fluide de travail et choisissez le meilleur concentrateur pour notre cycle par une modélisation à l'aide de Engineering Equation Solver (EES) car il fournit une grande base de données de fluides organiques.

Afin d'étudier l'effet de la température, Les deux systèmes ont été examinés en utilisant cinq fluides organiques : R245fa, Toluène, Benzène, Isobutane, n-Butane.

Les variations des résultats pour chaque fluide de travail prouvent que la sélection du fluide de travail et du concentrateur sont des facteurs très importants à prendre en compte lors de la conception des systèmes ORC.

ملخص

يدرس هذا العمل استخدام ORCs التي تعمل بالطاقة بواسطة مكثف للطاقة الشمسية لتحويل الطاقة الحرارية ذات درجة الحرارة المنخفضة نسبياً إلى كهرباء.

يتم إجراء دراسة ديناميكية حرارية ونظرية لنظام ORC متصل بمكثف شمسي مكافئ بالإضافة إلى ORC متصل بمركز مرآة Fresnel ، مع التركيز أيضاً على أهمية اختيار سائل العمل واختيار أفضل مركز لدورتنا عن طريق النمذجة باستخدام برنامج حل المعادلات الهندسية (EES) لأنه يوفر قاعدة بيانات كبيرة للسوائل العضوية.

من أجل دراسة تأثير درجة الحرارة ، تم فحص النظامين باستخدام خمسة سوائل عضوية: R245fa ، التولوين ، البنزين ، الايزوبيوتان ، n-البيوتان.

تثبت الاختلافات في النتائج لكل مائع عامل أن اختيار سائل العمل والمكثف عوامل مهمة للغاية يجب مراعاتها عند تصميم أنظمة ORC.

Abstract

This work examines the use of ORCs powered by a solar concentrator to convert relatively low temperature thermal energy into electricity.

A thermodynamic and theoretical study of an ORC system connected to a parabolic solar concentrator as well as an ORC connected to a Fresnel mirror concentrator, is carried out also focusing on the importance of the selection of the working fluid and choose the best concentrator for our cycle by modeling using Engineering Equation Solver (EES) because it provides a large database of organic fluids.

In order to study the effect of temperature, the two systems were examined using five organic fluids: R245fa, Toluene, Benzene, Isobutene, n-Butane.

The variations in results for each working fluid prove that the selection of working fluid and concentrator are very important factors to consider when designing ORC systems.

Liste des figures

Figure 1.1 : les applications du cycle organique de Rankine.....	6
Figure 1.2: Principe de fonctionnement d'un système ORC de biomasse.....	8
Figure 1.3 : Cycle organique de Rankine géothermique.....	9
Figure 1.4 : Principe de fonctionnement d'un système ORC à récupération de chaleur.....	10
Figure 1.5 : Schéma de cycle organique Rankine solaire avec surchauffeur et récupérateur...11	
Figure 1.6 : Schéma de cycle Rankine simple avec surchauffeur.....	11
Figure 1.7: Diagramme de Rankine simple.....	12
Figure 2.1 : Un collecteur cylindro-parabolique.	16
Figure 2.2 : Modes de poursuite solaire d'un CCP.	17
Figure 2.3 : Miroir cylindro-parabolique.	17
Figure 2.4 : Le tube récepteur.	18
Figure 2.5 : Paramètres géométriques d'un cylindro parabolique.	19
Figure 2.6 : Surface d'ouverture du collecteur et du récepteur.	20
Figure 2.7 : Pompe volumétrique.	30
Figure 2.8 : Echangeur récupérateur ORC.	31
Figure 2.8: Évaporateur de toluène pour système ORC.	32
Figure 2.10 : ORC Turbine.....	33
Figure 2.11 : Echangeur condenseur ORC.	33
Figure 2.12 : Schéma ORC relié à concentrateur parabolique.	34
Figure 2.13 : Définition isentropique pour une pompe.	35
Figure 2.14 : Configuration du cycle d'un échangeur de chaleur.	36
Figure 3.1 : Concentrateur solaire de type Fresnel.	40
Figure 3.2 : Le concentrateur linéaire de Fresnel.	41
Figure 3.3: Schéma ORC relié à concentrateur miroir de Fresnel.	44
Figure 4.1. Rendement globale Vs Fluide organique.....	55
Figure 4.2. W net et Fluide organique.....	56
Figure 4.3. VER et Fluide organique.....	57
Figure 4.4. VER et W_Net 170°C température.....	57
Figure 4.5. VER et W_Net 300°C température.....	58
Figure 4.6. VER et Rendement globale 170°C température.....	58
Figure 4.7. VER et Rendement globale 300°C température.....	59
Figure 4.8. W_Net et Rendement globale 170°C température.....	59
Figure 4.9. W_Net et Rendement globale 300°C température.....	60
Figure 4.10. Température de la source chaude et les échangeurs.....	64
Figure 4.11. Température de Benzène dans le cycle ORC.....	65
Figure 4.12. Puissance calorifique transférée de Benzène dans le cycle ORC.....	65
Figure 4.13. Comparaison efficacité des échangeurs.....	66
Figure 4.14. W_net entre concentrateur Parabolique et Fresnel.....	66
Figure 4.15. Diagramme T-S ORC processus (Benzène) concentrateur parabolique.....	68

Liste des tableaux

Tableau 2.1 : La température et pression critique pour différents fluides organiques purs qui peuvent être considéré comme fluide de travail.....	27
Tableau 3.1 : Classification des technologies de linéaires Fresnel.	42
Tableau 4.1 : Valeurs limites de température et de pression pour chaque fluide.....	52
Table 4.2 : Variables d'entrée et valeurs du paramètre géométrique des échangeurs de chaleur.....	53
Table 4.3 : Variables d'entrée et valeurs du paramètre géométrique des échangeurs de chaleur.....	54
Tableau 4.4 : Performance ORC (Parabolique/Fresnel)	61
Tableau 4.5 : L'efficacité ORC (Parabolique/Fresnel) en [kW]	61
Tableau 4.6 : Performance ORC	62
Tableau 4.7 : Performance ORC.....	63

Liste des symboles

Abréviations

ORC : Cycle Organique de Rankine
EES : Engineering Equation Solver
IEA : International Energy Agency
CFC : Chlorofluorocarbone.
HCFC : Hydro chlorofluorocarbone
HFC : Hydrofluorocarbure
HC : Hydrocarbures

Nomenclature

\dot{W} : Puissance (watt)
h : Enthalpie spécifique (kJ/kg)
 \dot{Q} : Chaleur (watt)
 \dot{m} : Débit massique (kg/s)
 ε : Efficacité
 η : Rendement (%)
T : Température (°C)
P : Pression (bar)
U : Coefficient de transfert de chaleur
S : Entropie (kJ/kg°C)
M : Masse molaire (g/mol)
A : la surface .
 ΔT : est la différence de température (°C).
y : est la distance entre le point focale et la courbe de la parabole.
f : La focale de parabole.
 ψ : L'angle d'ouverture.
a : le produit de la largeur de l'ouverture.
l : la longueur.
C : Le facteur de concentration.
G_{in} : l'éclairement direct.
G_a : l'ouverture du collecteur.
 θ : Angle.
 ξ : moitié du diamètre apparent.
S : l'écart.
Q : position.

Indices

cyc : Cycle

eva : évaporateur

c : condenseur

éco : économiseur

sur : surchauffeur

is : isentropique

t : turbine

p : pompe

rec : récupérateur

ech : échangeur de la chaleur

f : fluide de travail

h : huile diathermique

en : entrée

out : sortie

Introduction Générale

Introduction générale

Introduction générale

Accompagnant l'augmentation de la population mondiale, la demande totale d'énergie a augmenté dans le monde, soit une augmentation de 2% par année IEA (International Energy Agency, 2010) et selon l'édition 2017 des perspectives énergétiques de BP, la demande mondiale d'énergie augmentera encore plus, soit une croissance moyenne de 1,3% par an, tirée par une prospérité croissante dans les pays en développement, partiellement compensée par des gains rapides d'efficacité énergétique, si les tendances de croissance actuelles se poursuivent, la demande dépassera la disponibilité de ressources dans un avenir prévisible.

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

L'utilisation des ressources renouvelables comme sources de chaleur thermique de basse qualité ont motivé l'utilisation plus large de l'ORC. Ce système implique les mêmes composants que dans une centrale à vapeur conventionnelle (une chaudière, une turbine, un condenseur et une pompe). Cependant, le fluide de travail est un composant organique caractérisé par une pression de vapeur supérieure et une température d'ébullition inférieure à celle de l'eau et permettant la génération d'énergie à partir de températures de source de chaleur à basse température. On sait que les cycles de vapeur sont inefficaces pour convertir des sources de chaleur inférieures à 300°C en raison de l'exigence inhérente que la vapeur soit surchauffée avant la détente. De nombreux fluides organiques ne nécessitent pas de surchauffe, ce qui leur permet d'atteindre une meilleure efficacité que la vapeur à basse température.

Le succès de la technologie ORC peut s'expliquer en partie par sa fonctionnalité modulaire: un système ORC similaire peut être utilisé, avec peu de modifications, en conjonction avec diverses sources de chaleur. Ce succès a été renforcé par la haute maturité technologique de la plupart de ses composants, en raison de leur utilisation intensive dans les applications de réfrigération. De plus, contrairement aux cycles de puissance conventionnels, la génération d'énergie locale et à petite échelle est rendue possible par cette technologie. Aujourd'hui, les cycles de Rankine organiques sont disponibles dans le commerce dans la plage de puissance MW. Cependant, très peu de solutions sont réellement adaptées à l'échelle kW.

Ce travail présente l'étude thermodynamique d'un système ORC solaire actuelle et expose les principales applications cibles, principalement basé sur les cycles sous-critiques, car la technologie s'est révélée moins coûteuse que pour les cycles supercritiques. La modélisation et la simulation d'un tel cycle sont décrites et des questions telles que le choix de fluides de travail ou l'optimisation du cycle sont étudiées en détail.

Introduction générale

Chapitre 1

L'historique de la technologie ORC est discuté depuis les origines jusqu'aux technologies récentes. Une revue du cycle Rankine conventionnel est également donnée avec les principales différences qui le distingue du système ORC. Le chapitre conclut en discutant ses applications et son utilisation dans le monde aujourd'hui.

Chapitre 2

Une analyse théorique du système ORC relié à un concentrateur parabolique. Une brève discussion de l'analyse de pincement est également donnée. Des modèles individuels pour les différents composants ORC sont également donnés et décrits. Le chapitre se termine en analysant la sélection du fluide de travail et les méthodes qu'il comporte.

Chapitre 3

Une analyse théorique du système ORC relié à un concentrateur de Fresnel. Une brève discussion de l'analyse de pincement est également donnée. Des modèles individuels pour les différents composants ORC sont également donnés et décrits. La dernière partie du chapitre décrit les 5 fluides de travail différents de quelques familles de fluides qui ont été choisis pour être utilisés dans l'enquête.

Chapitre 4

Les résultats obtenus à partir des concentrateurs solaires (Parabolique et Fresnel) en particulier, une attention particulière a été portée au choix du fluide de travail, et à une analyse de sensibilité visant à évaluer les performances des deux systèmes utilisant des fluides organiques spécifiques. Le fluide est le meilleur, des analyses paramétriques et des optimisations sont effectuées afin de déterminer tous les paramètres de conception et opérationnels qui offrent les meilleures performances.

Chapitre 1 : Le cycle organique de Rankine

Chapitre 1 : Le cycle organique de Rankine

1.1 Introduction :

L'épuisement des ressources d'énergie fossiles et les impacts de leur utilisation sur l'environnement (par exemple le changement climatique, la destruction ou l'appauvrissement de la couche d'ozone) encouragent fortement la recherche de moyens de produire de l'électricité à base de ressources renouvelables (géothermie, biomasse et solaire). Par ailleurs, une part importante de l'énergie dissipée par les procédés industriels, se perd sous forme de rejets thermiques, qui non seulement diminuent le rendement de ces procédés mais contribuent aussi aux impacts sur l'environnement par l'usage de ressources fossiles. Or, ces rejets se présentent sous forme de chaleur à basse température qui ne peut pas être utilisée pour la production d'électricité par le cycle traditionnel de Rankine fonctionnant avec la vapeur d'eau. Depuis quelques décennies, le cycle organique de Rankine (Organique Rankine Cycle – ORC), qui a le même principe que le cycle classique de Rankine mais avec un fluide organique, suscite beaucoup d'intérêt dans le domaine de la valorisation de rejets thermiques et de la production d'électricité à partir des ressources renouvelables d'énergie (ex. géothermie, soleil et biomasse). Dans ce chapitre, une revue bibliographique générale des principaux cycles thermodynamiques, dont le principe est similaire à celui de l'ORC sont présentés. Il s'agit des cycles de Carnot, de Rankine et de Lorenz. Les cycles réversibles de Carnot et de Lorenz seront utilisés dans la suite de ce mémoire comme cycles de référence pour l'analyse exégétique du cycle organique de Rankine.

Le **Cycle de Rankine organique (ORC)** est nommé pour son utilisation d'un fluide organique de masse moléculaire élevée avec un liquide-vapeur changement de phase, ou point d'ébullition, se produisant à une température inférieure à celle du changement de phase eau-vapeur. Le fluide permet cycle de Rankine récupération de chaleur à partir de sources à basse température telles que la combustion de la biomasse, chaleur perdue, chaleur géothermique, étangs solaires etc. La chaleur à basse température est convertie en travail utile, qui peut lui-même être converti en électricité

Signes régissant le fonctionnement eurent lieu au 19eme siècle. Sur le plan scientifique Sadi Carnot avec ses "Réflexions sur la puissance motrice du feu et sur les machines propres à développer cette puissance" en 1824 et Rudolf Clausius en 1850 définissent le second principe de la thermodynamique. James Prescott Joule définit le premier principe de la thermodynamique en mettant en évidence l'équivalence entre travail et chaleur. On doit également citer Emile Clapeyron, Julius Robert Von Mayer, William Rankine, William Thomson, Gustave-Adolf Hirn pour leur travaux qui formalisèrent la thermodynamique macroscopique. Ces avancées scientifiques ouvrirent la voie aux ingénieurs pour améliorer le moteur à vapeur. On rechercha d'abord à concevoir des chaudières fonctionnant à plus haute pression pour augmenter la température d'évaporation et ainsi le rendement et la puissance. Puis l'augmentation des pressions nécessita un fractionnement de la détente : d'abord les machines devinrent à double expansion et à la fin du 19ème la triple expansion voire la quadruple expansion étaient devenue la norme pour les grandes installations et les navires. La fin de ce siècle voit l'apparition des premières turbines à vapeur de Charles Parsons qui vont permettre de nouveaux progrès. Celles-ci étant capables de plus grands taux de détente et acceptant de la vapeur surchauffée elles permettent la réalisation de cycles à resurchauffe.

Chapitre 1 : Le cycle organique de Rankine

D'autres fluides que l'eau furent essayés. Dès 1825 Thomas Howard construit une machine fonctionnant à l'alcool éthylique constituant le premier cycle organique de Rankine.

Quelques applications de ces cycles verront les jours, entre autre pour la propulsion de navires associant un cycle à éther à un cycle à vapeur d'eau. [01]

Au le début 20^{ème} siècle les moteurs à apport de chaleur externe sont largement supplantés par les moteurs à combustion interne pour les applications de faible puissance. Un regain d'intérêt pour ce type de machines à lieu à partir des années 1970 principalement pour des applications à basses et moyennes température pour des applications de récupération de chaleur fatale ou de production d'énergies renouvelables telles que la géothermie ou le solaire.

1.2 Les applications du cycle organique de Rankine :



Figure 1.1 : les applications du cycle organique de Rankine

1.2.1 La biomasse :

Les centrales biomasses sont des centrales où l'on produit de la chaleur par la réaction de combustion de matière organique. Elle englobe plusieurs systèmes complexes, du système le plus simple qui implique de faire brûler du bois, à des systèmes complexes de gazéification ou un gaz avec un PCI relativement élevé est utilisé ou encore la pyrolyse (de déchets ultimes comme par exemple les déchets d'hôpitaux) ou la carbonisation où l'on récupère du charbon. Tous ces procédés produisent une grande quantité d'énergie chaleur. Si la gestion de nos forêts et des ressources exploitables du sol est maîtrisée, nous pouvons par ce schéma d'équilibre utiliser les produits de l'environnement pour contrôler notre émission de surplus de dioxyde de carbone. En effet, si, par exemple, les déchets des scieries sont valorisés par ce procédé, en replantant le même nombre d'arbres qui a été consommé, nous pouvons, par le

Chapitre 1 : Le cycle organique de Rankine

phénomène de photosynthèse équilibrer naturellement la concentration en carbone de la planète.

La maxime « Rien ne se perd, rien ne se crée, tout se transforme » attribuée à Lavoisier, qui est simplement la reformulation d'une phrase du philosophe grec Anaxagore : « Rien ne naît ni ne périt, mais des choses déjà existantes se combinent, puis se séparent de nouveau » est ici la pensée directive à adopter pour que plus aucun impact ne soit oublié à long terme. Pour l'instant, les installations ORC sont exploitées principalement en Italie, Autriche, Suisse et en Allemagne. La majorité de ces installations utilisent la biomasse forestière comme carburant solide. La biomasse est la première source d'énergie renouvelable en France. En Roumanie, celle-ci est également présente en grande quantité. Une multitude de projets d'exploitation de la biomasse voient le jour pour pouvoir augmenter la part de production d'énergie renouvelable. Nous pouvons citer par exemple le projet de valorisation de la sciure de bois mis en œuvre dans le village de Tasca (région de Bucovine-Moldavie) ; il fait appel à une technique moderne de combustion qui a permis de trouver une solution à deux problèmes : l'un, écologique, posé par le rejet non contrôlé de déchets de scierie et l'autre, énergétique, à savoir l'approvisionnement en chaleur du village de Tasca et de sa population. [03]

La biomasse est une ressource disponible en quantité et est particulièrement adaptée à la production d'énergie renouvelable sous forme d'électricité et de chaleur dans de petites centrales ORC de cogénération.

Ces types d'installations permettent :

- Le développement des industries du bois dans les territoires ruraux et forestiers.
- La sécurisation de l'approvisionnement en électricité d'un territoire et la réduction des besoins en lignes de transmission électrique en offrant une production décentralisée.
- Une solution de débouchés locale, pérenne et sécurisée pour l'industrie du bois et la sylviculture.
- Une optimisation des rendements énergétiques des scieries en valorisant au maximum la chaleur produite (séchage des produits, production de granulés de bois).
- La création d'emplois locaux dans l'exploitation de la centrale ORC et dans la filière d'approvisionnement en combustible.

Pour qu'une centrale à la biomasse soit exploitée pour une utilisation quotidienne, il est essentiel qu'elle livre une disponibilité élevée et que les frais de fonctionnement et d'entretien soient aussi faibles que possible. Dans de nombreux cas, les centrales ne sont pas exploitées par les producteurs d'énergie mais bien par des entrepreneurs qui souhaitent exploiter à des fins de cogénération leurs matières résiduelles en plus de leur corps de métier. Il est donc particulièrement important que la centrale soit autonome et nécessite peu d'attention. Les centrales ORC offrent cette possibilité, car elles peuvent être exploitées sans surveillance constante. Bien entendu, l'efficacité est également déterminante puisque cela détermine la

Chapitre 1 : Le cycle organique de Rankine

consommation de carburant, et ainsi le temps de retour sur investissement du système. Pour les puissances électriques de moins de 2 MW, les centrales ORC s'avèrent plus efficaces que des turbines à vapeur conventionnelles.

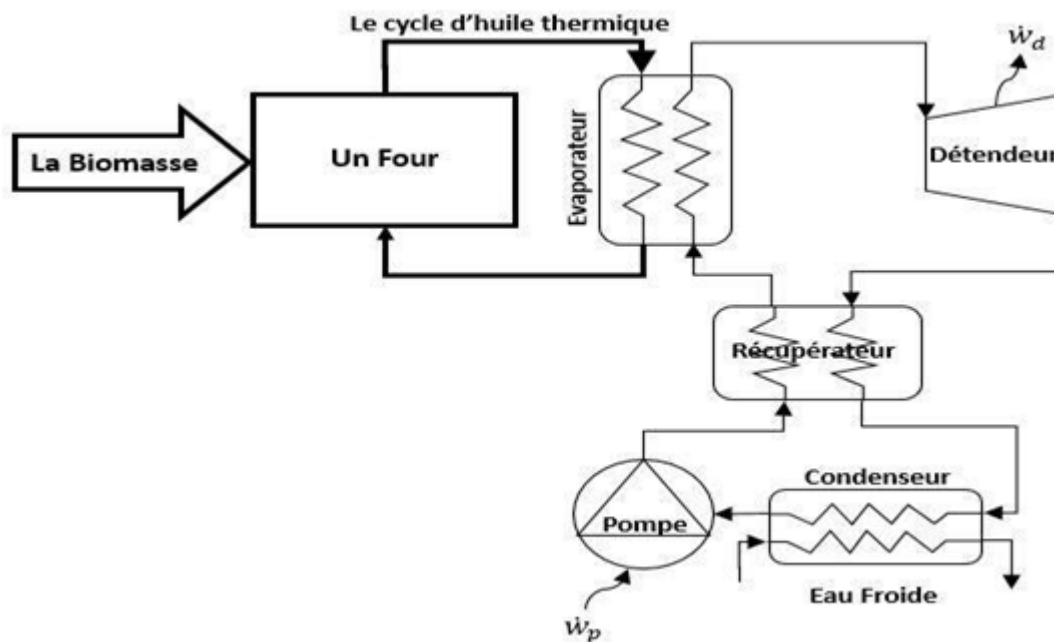


Figure 1.2 : Principe de fonctionnement d'un système ORC de biomasse.

1.2.2 Géothermie :

La géothermie est une énergie dite du sol. La chaleur sous terre augmente plus l'on creuse (en moyenne de 3 K par 100 mètres de profondeur). C'est l'exploitation de la chaleur stockée dans la croûte terrestre depuis des millions d'années. Cette énergie thermique est disponible lorsque la roche est suffisamment friable et donc gorgée d'eau. Car c'est la plupart du temps l'eau qui est utilisée pour réaliser la captation thermique.

La géothermie est considérée comme inépuisable, mais il faut bien comprendre que si l'on effectue une extraction plus vite que le temps de régénération du flux de réchauffement de la croûte terrestre (flux solaire et dégradation thermonucléaire naturelle) il risque d'y avoir un déséquilibre catastrophique. Mais ce scénario est loin d'être atteint car la géothermie profonde dépend des sources internes de la terre qui sont chiffrées à une durée de vie en milliards d'années et la géothermie de surface dépend directement des apports solaires.

Cette énergie est en général diffuse et rarement concentrée, avec un flux moyen de 0,1 MW/km² et un niveau de température faible. La puissance exploitable économiquement est donc en règle générale réduite. Il arrive cependant qu'elle soit plus concentrée à proximité des failles tectoniques entre plaques terrestres, en particulier des formations volcaniques ou encore dans des formations géologiques favorables, comme dans le Bassin parisien. C'est pourquoi il faut distinguer plusieurs types d'utilisation de la géothermie suivant ses caractéristiques locales:

Chapitre 1 : Le cycle organique de Rankine

- la géothermie de surface à basse température: 5C°-15C°,
- la géothermie profonde 50C°-95C°, jusqu'à 2 000 m de profondeur,
- la géothermie très profonde à haute et très haute température, jusqu'à 10 000 m
- la géothermie volcanique de type geysir.

Son exploitation durable implique un débit d'extraction d'énergie limité au flux de chaleur alimentant la ressource, à défaut de l'épuiser pour une certaine période et ce même si certains sites géothermiques peuvent atteindre jusqu'à 0,2 W/m².

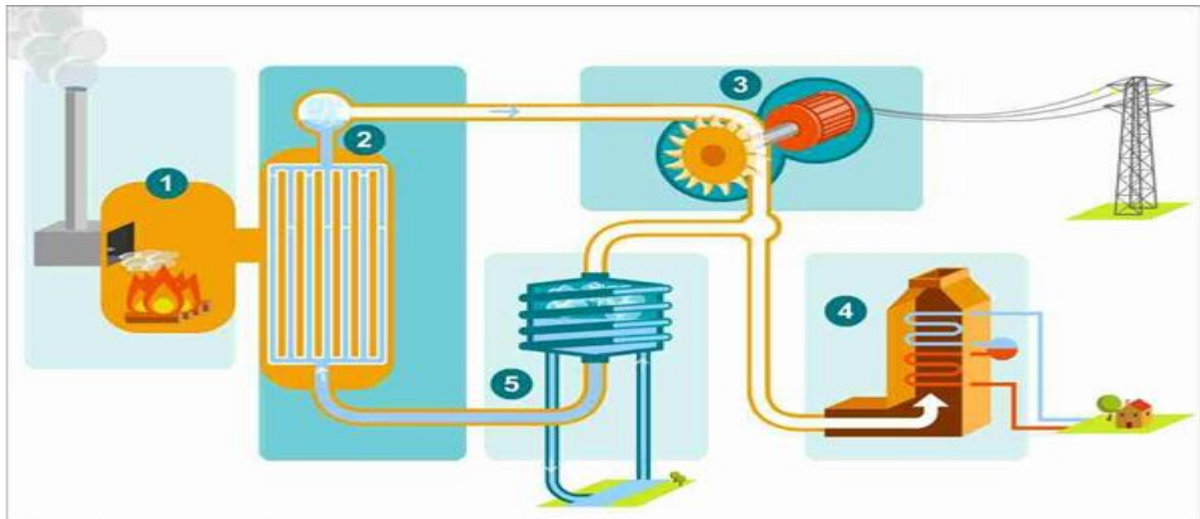


Figure1.3 : cycle organique de Rankine géothermique

1.2.3 Récupération de chaleur fatale :

L'un des systèmes ORC les plus intéressants du point de vue énergétique est la récupération de la chaleur issue de différents procédés industriels (Four, refroidissement, Cowper, Cokerie). Les procédés impliquant des hautes températures sont :

- La conversion de l'énergie, impliquant la production de vapeur surchauffée
- Les fours à ciment (1400°C)
- La réduction du minerai de fer (1250°C)
- La stérilisation dans l'industrie agroalimentaire
- Les procédés de séchage.

Une grande partie de la quantité de chaleur est perdue sous forme d'effluents thermiques. Une première piste serait une cascade thermique, pour utiliser cette chaleur directement pour réchauffer un autre procédé par exemple ou encore produire de l'eau chaude sanitaire. Mais les demandes en industrie ne sont souvent pas en adéquation avec l'énorme production de

Chapitre 1 : Le cycle organique de Rankine

chaleur. De plus, les industries sont rarement connectées à un réseau thermique qui demande un investissement financier conséquent. Or l'électricité est omniprésente et chaque industrie est directement reliée au réseau pour une revente avantageuse.

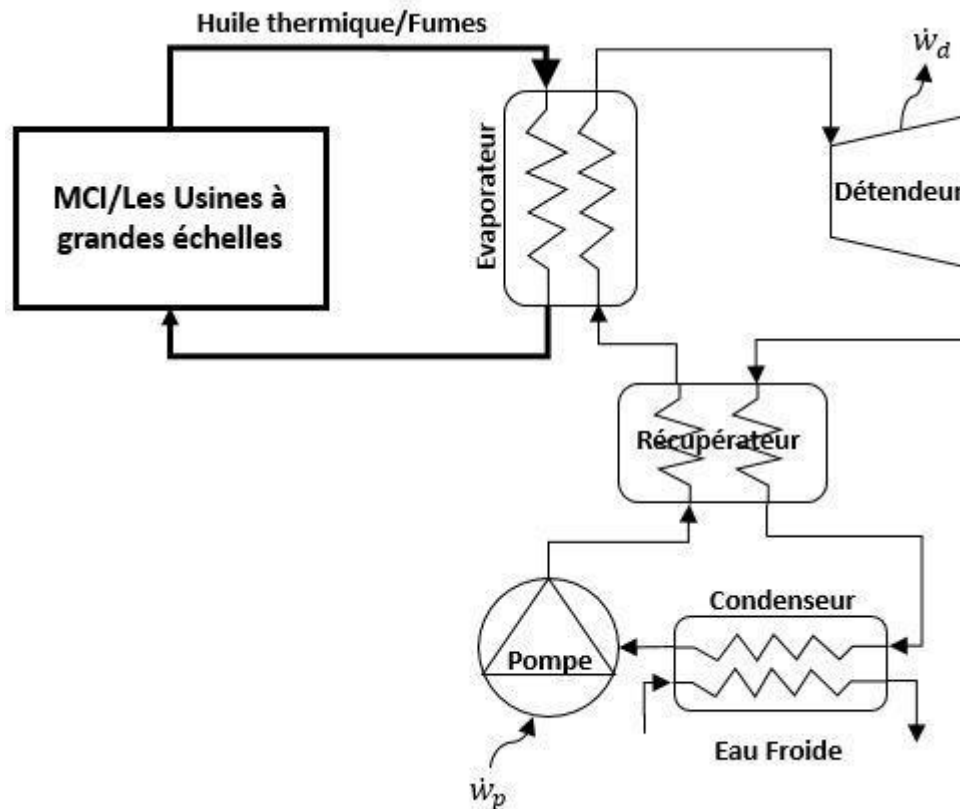


Figure 1.4 : Principe de fonctionnement d'un système ORC à récupération de chaleur.

1.2.4 Energie solaire :

Les centrales solaires thermodynamiques utilisent une grande quantité de miroirs qui font converger les rayons solaires vers un fluide caloporteur chauffé à haute température. Pour ce faire, les miroirs réfléchissants doivent suivre le mouvement du soleil afin de capter et de concentrer les rayonnements tout au long du cycle solaire quotidien. Le fluide produit de l'électricité par le biais de turbines à vapeur ou à gaz. Il existe quatre grands types de centrales solaires thermodynamiques : les centrales à miroirs cylindro-paraboliques et leur variante à miroirs de Fresnel, les centrales à tour et enfin les concentrateurs paraboliques Dish-Stirling. [15]

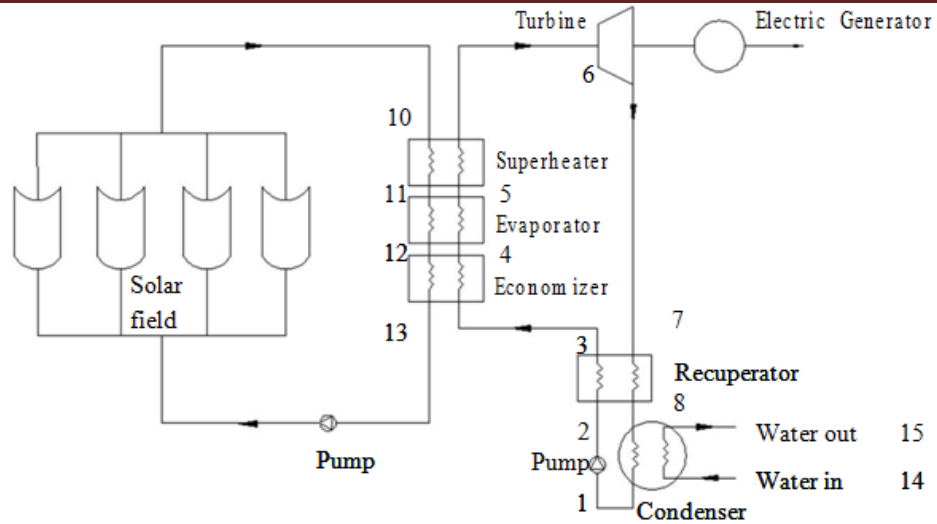


Figure 1.5 : Schéma de cycle organique Rankine solaire avec surchauffeur et récupérateur.

[15]

1.3 Comparaison entre le cycle Rankine organique et le cycle Rankine simple :

1.3.1 Cycle Rankine simple :

par définition, le cycle de Rankine organique est comme le cycle de Rankine simple mais ce dernier n'utilise que de l'eau comme fluide de travail

Au début c'était un cycle ouvert : l'eau est comprimée, vaporisée, détendue puis rejetée dans l'atmosphère. Maintenant, les cycles en boucle fermée sont préférés pour son efficacité et son non gaspillage. [09]

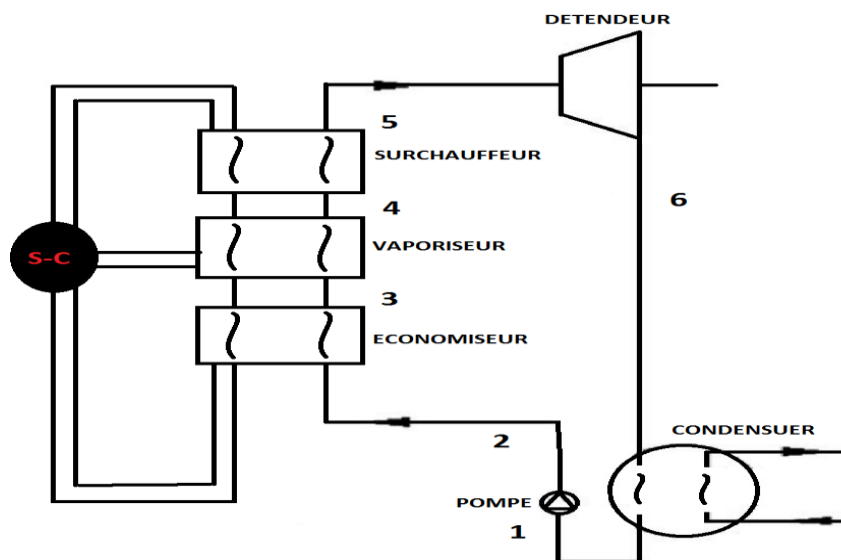


Figure 1.6: schéma de cycle Rankine simple avec surchauffeur.

Chapitre 1 : Le cycle organique de Rankine

1.3.2 Diagramme T-S :

Le diagramme T-s permet de visualiser l'évolution de l'eau au cours du cycle. il représente mieux les irréversibilités dans les échangeurs de chaleur et dans la turbine Figure 1.7. Les différentes phases du cycle peuvent être décrites comme suit :

- 1-2 : Compression du liquide dans la pompe. Les points 2 et 1 coïncident presque sur le diagramme de T-s : si le fluide n'est pas compressible et si la pompe est isentropique, il n'y a pas d'augmentation de l'entropie et la température reste constante.
- 2-3 : Préchauffage liquide. Dans le cycle idéal, cette transformation est isobare. La température et l'entropie sont augmentées.
- 3-4 : Vaporisation: Le liquide a atteint sa température de saturation et commence à bouillir. La température est constante, l'entropie augmente ;
- 4-5 : Surchauffe: La vapeur est surchauffée dans la chaudière. La température et l'entropie augmentent.
- 5-6 : Détente: Dans le cycle idéal, la détente est isentropique (c.-à-d. que la ligne 5-6 est verticale). Dans le cycle réel, des irréversibilités sont générées et augmentent l'entropie.
- 6-1 : Condensation: à la fin de la détente, la vapeur commence à se condenser, jusqu'à ce qu'il ne reste plus que du liquide. La température est constante, l'entropie diminue.

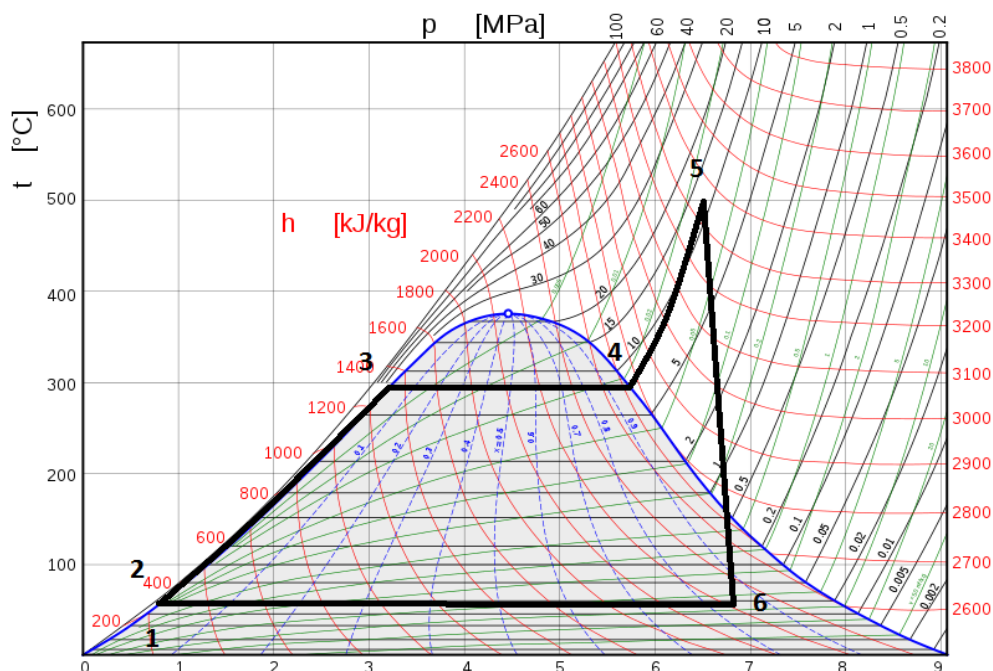


Figure 1.7: diagramme de Rankine simple.

Chapitre 1 : Le cycle organique de Rankine

1.3.3 Point d'ébullition :

La majorité des fluides ORC comparativement à l'eau ont un Point d'ébullition faible. En raison de la faible Point d'ébullition, le fluide de travail ORC nécessite une source de chaleur de basse température par rapport à l'eau pour s'évaporer et récupérer une faible énergie thermique provenant des sources de chaleur, Cela permet, entre autres, de produire de l'électricité à partir de sources de chaleur géothermique.

1.3.4 Durée de vie des pièces :

Comme indiqué précédemment, les fluides organiques restent généralement surchauffés à la fin de l'expansion. Il n'est donc pas nécessaire de les surchauffer dans les cycles ORC, contrairement aux cycles de vapeur.

L'absence de condensation réduit également le risque de corrosion sur l'aube de la turbine, et augmente sa durée de vie jusqu'à 40 ans au lieu de quelques ans pour les turbines à vapeur.

1.3.5 Le fluide de travail :

Dans le cycle conventionnel de Rankine, l'eau est le seul fluide de travail pouvant être utilisé alors que dans une ORC, il y a plus d'une centaine de fluides de travail différents qui peuvent être utilisés. La découverte de nouveaux fluides de travail pour le système ORC est un processus continu. L'eau a de nombreux avantages comme : la disponibilité et rentabilité, l'ininflammabilité; Non-toxicité, stabilité chimique, faible viscosité et respect de l'environnement. Les données de sécurité et d'environnement pour la plupart des fluides de travail ne sont pas facilement disponibles.

1.3.6 Taille des composants :

La taille des composants est très dépendante du débit volumique du fluide de travail car les chutes de pression augmentent avec le carré de la vitesse du fluide. Il est donc nécessaire d'augmenter le diamètre hydraulique des échangeurs de chaleur et le diamètre des tuyaux pour réduire cette vitesse. La taille de la turbine est à peu près proportionnelle au débit volumique.

1.3.7 Le rendement :

Le rendement des cycles de Rankine organiques actuels à haute température ne dépasse pas 26 %. Les cycles de Rankine à vapeur typiques présentent un rendement thermique supérieur à 30 %, mais avec une conception de cycle plus complexe (en termes de nombre de composants ou de taille). La même tendance est constatée pour les sources de chaleur à basse température : les cycles de Rankine à vapeur restent plus efficaces que les cycles ORC.

1.3.8 Propriétés environnementales et de sécurité :

Le fluide de travail comme l'eau ne présente aucun danger pour l'environnement car il est non toxique, inflammable, n'a aucun potentiel de réchauffement de la planète et aucun potentiel d'appauvrissement de la couche d'ozone. De nombreux fluides de travail

Chapitre 1 : Le cycle organique de Rankine

organiques ne sont pas respectueux de l'environnement car ils ont un potentiel d'appauvrissement de la couche d'ozone et certains provoquent des effets de serre qui sont nocifs pour l'environnement. Certains fluides de travail organiques ont la caractéristique d'une toxicité élevée et d'une inflammabilité élevée. [12]

Chapitre 2 : ORC relié à un concentrateur parabolique

Chapitre 2 : ORC relié à un concentrateur parabolique

2.1 Concentrateur parabolique :

2.1.1 Introduction :

La technologie des concentrateurs solaires cylindro-paraboliques est actuellement la plus répandue, l'application la plus importante de cette technologie est la production de l'électricité. En 1984, la première centrale solaire commerciale, SEGS I était installée en Californie par la société Luz International Limited. La centrale thermique solaire à CCP est constituée de trois éléments principaux :

- le champ solaire, qui utilise une série de longs concentrateurs cylindro-paraboliques.
- le système de transfert de la chaleur.
- le système de génération électrique (Turbine + Générateur).

2.1.2 Principe de fonctionnement :

Le capteur cylindro-parabolique est constitué d'un miroir cylindro-parabolique linéaire qui collecte et concentre le rayonnement solaire sur un tube récepteur placé le long de sa ligne focale. Pour les systèmes à miroirs cylindro-paraboliques, les facteurs de concentration atteignent 80. La structure portante est munie de joints de dilatation assurant la compatibilité entre les dilatations thermiques inégales des divers composants. Le rôle du mécanisme de poursuite est d'adapter l'inclinaison du capteur de manière à ce que la radiation solaire incidente soit toujours perpendiculaire au réflecteur. de cette manière, la radiation est réfléchie au foyer de la parabole et concentre sur un tube récepteur dans lequel circule le fluide caloporteur. L'ensemble de concentrateur cylindro-parabolique est mobile, il est orienté selon un axe nord sud et suit la course de soleil d'est en ouest. [10] Un collecteur cylindro-parabolique est constitué de deux principales entités, voire la figure 2.1 et figure 2.2 [7]



Figure 2.1: un collecteur cylindro-parabolique.

Chapitre 2 : ORC relié à un concentrateur parabolique

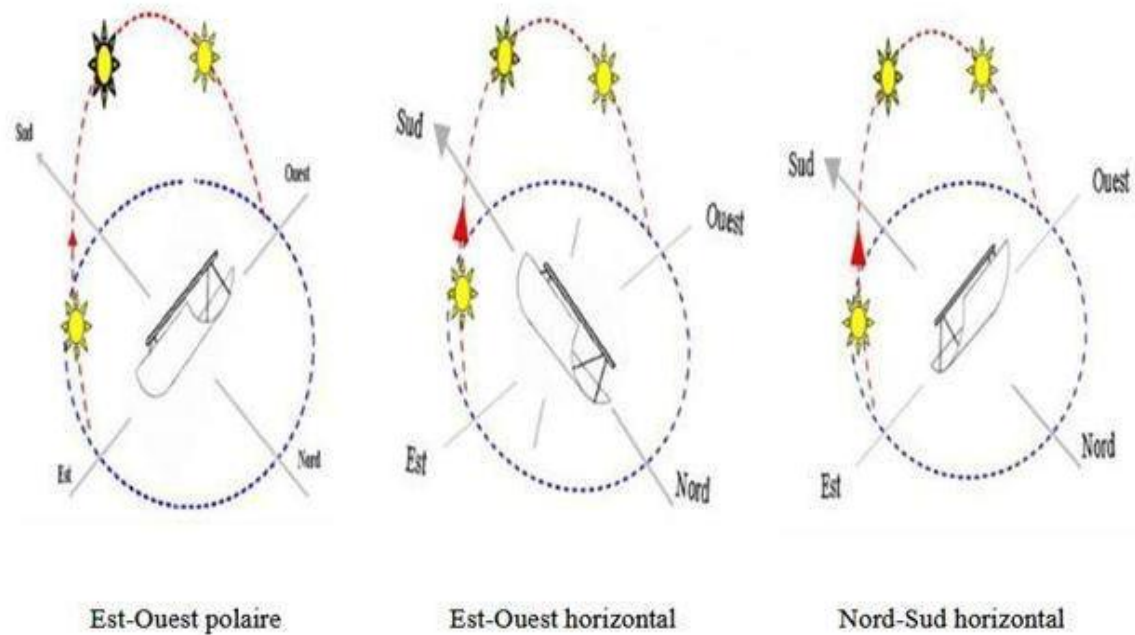


Figure 2.2: Modes de poursuite solaire d'un CCP.

2.1.3 Le miroir cylindro-parabolique :

Le miroir est le système qui permet de collecter et de concentrer le rayonnement solaire. Le miroir cylindro-parabolique est une surface réfléchissante qui concentre le rayonnement solaire incident à son foyer (focale linéaire) composée de segments de miroirs paraboliques. Pour les grandes installations où une température du fluide de transfert très élevée est recherchée, le miroir cylindro-parabolique est constitué de panneaux en verre pauvre en fer relativement épais, cintrés à chaud, argentés et vernis en face arrière. Ils sont autoportants, ce qui permet de les assembler directement sur un support fixé au sol.



Figure 2.3: Miroir cylindro-parabolique.

Chapitre 2 : ORC relié à un concentrateur parabolique

2.1.4 Le tube récepteur :

Le tube récepteur est placé à la focale (linéaire) du miroir cylindro parabolique et l'espace interne entre le tube en verre et le tube métallique absorbant est maintenu sous vide pour éliminer les pertes thermiques par convection. Le tube récepteur est le lieu de la conversion thermique de l'énergie solaire. Il est composé d'un ensemble sous vide d'un tube enveloppe en verre et d'un tube absorbant en acier inoxydable recouvert d'une couche sélective dont le facteur d'absorption doit être le plus proche possible de l'unité.

Le tube absorbant doit avoir une conductivité, une diffusion thermique et une inertie chimique vis à vis du fluide de transfert (huile) qui va circuler en son sein appropriées. Il est muni à ses extrémités de soufflets métalliques qui font office de joints de dilatation. Le diamètre extérieur du tube absorbant est fonction des dimensions du miroir associé. Le tube récepteur doit absorber autant de flux solaire concentré que possible, et le convertir en énergie thermique, cette chaleur est transférée à un fluide (généralement de l'huile). Le récepteur absorbe l'énergie réfléchie par le concentrateur et la transfère au fluide de travail du cycle de puissance. [21]

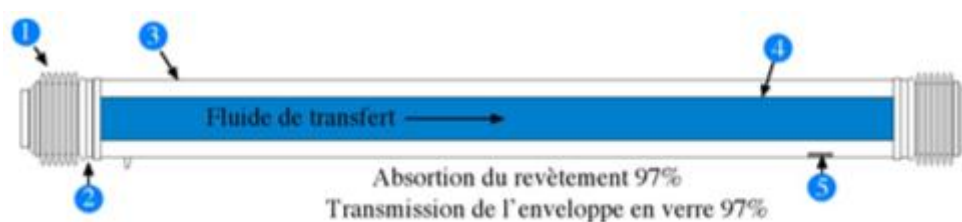


Figure 2.4 : Le tube récepteur.

- 1-soufflet métallique
- 2-soudure verre-métal
- 3-enveloppe en verre
- 4-tube absorbant
- 5-dispositif chimique de maintien du vide (Guetter)

2.1.5 Les paramètres géométriques :

Les quatre paramètres suivants sont utilisés pour caractériser la forme et la taille d'un cylindro parabolique: la longueur de cylindro-parabolique, la distance focale, la largeur de l'ouverture et l'angle d'ouverture. Figure 2.5

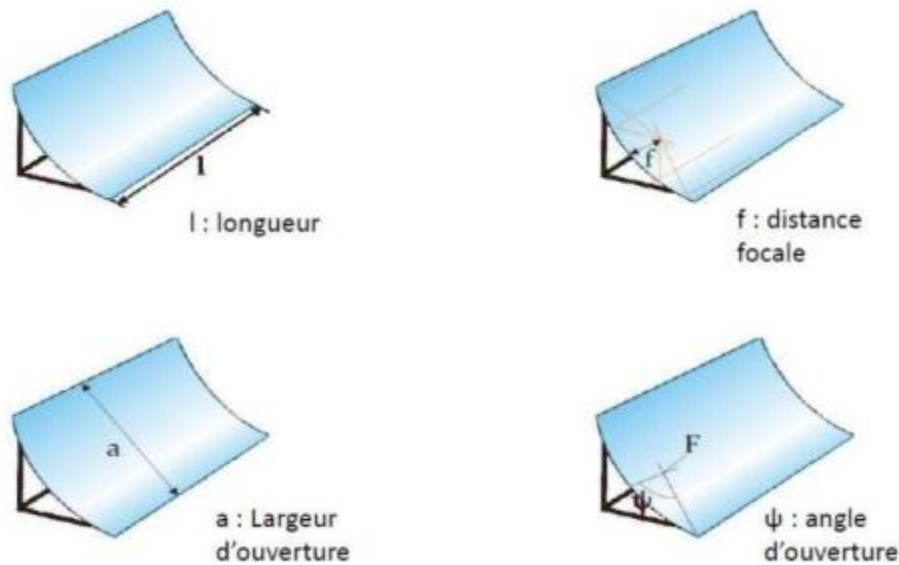


Figure 2.5 : Paramètres géométriques d'un cylindro parabolique.

2.1.5.1 La longueur de cylindro parabolique l :

C'est la longueur du miroir, elle peut atteindre les 4.06 m.

2.1.5.2 La distance focale:

C'est la distance entre le point focale et la courbe de la parabole.

La focale de la parabole (f ou F) est le paramètre qui décrit la forme de la parabole.

L'équation de parabole est:
$$y = \frac{1}{4f} \cdot x^2 \quad (2.1)$$

2.1.5.3 L'angle d'ouverture (ψ):

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

$$\tan \psi = \frac{\frac{a}{f}}{2 - \frac{1}{8} \cdot \frac{(a)^2}{f}} \quad (2.2)$$

Chapitre 2 : ORC relié à un concentrateur parabolique

2.1.5.4 La largeur de l'ouverture :

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

2.1.6 Les paramètres Optiques :

2.1.6.1 La surface du miroir et la surface d'ouverture:

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

$$A_a = a \cdot l \quad (2.3)$$

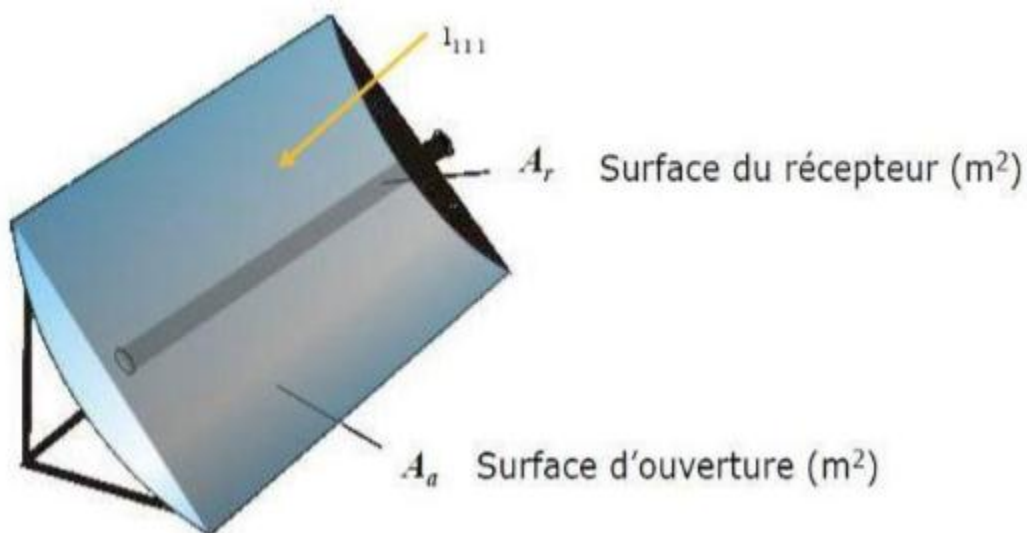


Figure 2.6 : Surface d'ouverture du collecteur et du récepteur

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

$$A = \left(\frac{a}{2} \mathbf{J}_{1 + \frac{a^2}{16f^2}} + 2 \cdot f \cdot \ln \left(\frac{a}{4f} \mathbf{J}_{1 + \frac{a^2}{16f^2}} \right) \right) \cdot l \quad (2.4)$$

Chapitre 2 : ORC relié à un concentrateur parabolique

2.1.6.2 Le facteur de concentration C :

Le taux de concentration est l'un des paramètres principaux du collecteur, il est décisif pour les températures de fonctionnement possible de la centrale cylindro parabolique. Le rapport de concentration C est défini comme le rapport de la densité de flux radiant à la ligne focale G_{in} à l'éclairement direct à l'ouverture du collecteur G_a :

$$C = \frac{G_{in}}{G_a} \quad (2.5)$$

Ou bien

$$C = A_0 / A_r \quad (2.6)$$

A_0 est la surface d'ouverture, et A_r la surface de l'absorbeur.

2.2 Le fluide de travail

Le choix du fluide de travail est très important pour la performance et l'économie du système ORC car il affecte l'efficacité du système, la taille des composants du système, la conception de la machine de la détente, la stabilité du système, la sécurité et les préoccupations environnementales. Le processus de sélection du fluide dépend essentiellement des propriétés physiques, thermodynamiques, de sécurité et environnementales du fluide de travail. Différente des caractéristiques des autres cycles thermodynamiques, la sélection du fluide de travail du système ORC est une tâche plus compliquée pour les deux raisons suivantes [30]: Les conditions de travail et les types de sources de chaleur de l'ORC varient largement: de la source de chaleur à basse température de 80°C (par exemple géothermique, collecteur solaire) à la chaleur à haute température de 500°C (par exemple la biomasse) ; À l'exception de certaines substances dont les températures critiques sont trop basses ou trop élevées, des centaines de substances peuvent être utilisées comme ORC, notamment les hydrocarbures, les hydrocarbures aromatiques, les éthers, les perfluorocarbones, les CFC, les alcools, les siloxanes et les composés inorganiques (qui ne devraient pas être intrinsèquement un ORC) etc...[23]

Il existe aussi quelques méthodes de sélection d'un fluide de travail pour un system ORC bien spécifié. Dans ce travail nous allons décrire les trois méthodes suivantes :

- La méthode de dépistage.
- La méthode de la carte de fonctionnement .
- L'approche thermo-économique.

- **Les propriétés Thermodynamiques et Physiques**

La relation entre les propriétés des fluides de travail et les critères communs de performance économique et thermodynamique de l'ORC, d'un point de vue théorique et analytique, est la suivante:

Chapitre 2 : ORC relié à un concentrateur parabolique

La chaleur latente de vaporisation :

La chaleur latente à vaporisation élevée permet d'ajouter la plus grande partie de la chaleur disponible pendant l'opération de changement de phase, évitant ainsi de devoir réguler la surchauffe et la détente de la vapeur par chauffage régénératif afin de permettre un plus grand rendement. [32] Du point de vue du travail net,[33] les fluides avec une chaleur latente plus élevée produisent une plus grande production de travail unitaire lorsque les températures et d'autres paramètres sont définis.

Cependant, lorsque la source de chaleur est une chaleur perdue, les fluides organiques ayant une chaleur de vaporisation spécifique inférieure sont préférés. La chaleur de vaporisation inférieure du fluide de travail provoque le processus de transfert de chaleur dans l'évaporateur principalement à température variable. Par conséquent, le profil de température du fluide de travail dans l'évaporateur suit mieux le profil de température du fluide de chauffage dans la source de chaleur [29].

La densité de la vapeur :

Une densité de vapeur élevée est d'une importance clé, en particulier pour des fluides présentant une pression de condensation très faible (par exemple des huiles de silicones). Une faible densité conduit à un débit volumique plus élevé: les pertes de charge dans les échangeurs de chaleur augmentent et la taille de détendeur doit être augmentée. Cela a un impact non négligeable sur le coût du système.

La chaleur spécifique :

La chaleur spécifique du liquide doit être faible afin de réduire le travail consommé par la pompe et augmenter indirectement la production. On peut montrer qu'une

Plus grande valeur de C_p (liquide) conduit à un travail de pompage plus faible pour R236ea que pour R227ea. [33]

La température critique :

Si la température de condensation et le rapport de la température d'évaporation et de la température de condensation sont fixes, le rapport de pression augmente avec le facteur acentrique et la température critique. [25] Pendant ce temps, pour des températures d'évaporation et de condensation données, une configuration de cycle de bon rendement est obtenue uniquement à partir de fluides avec une température critique élevée, bien que le rendement du système soit une fonction faible de la température critique. Ceci implique cependant une faible pression de condensation qui pourrait entrer en conflit avec la conception de la turbine et de l'installation. Inversement, une pression de condensation élevée, entraînant une température basse, est souvent en opposition à une bonne configuration thermodynamique.

Chapitre 2 : ORC relié à un concentrateur parabolique

Le point d'ébullition :

La plupart des études ont montré que le fluide qui présente le meilleur rendement thermique est celui qui a le point d'ébullition le plus élevé puisque la température d'ébullition est plus élevée si la température critique est plus élevée pour un fluide de la même famille. Mais ce n'est pas vrai quand les fluides ne sont pas dans la même famille. [30]

Le point de congélation du fluide :

Il doit être inférieur à la température la plus basse du cycle.

La masse moléculaire :

Le travail de la détente a tendance à être en relation inverse avec la masse moléculaire, ce qui signifie que les turbines pour les fluides lourds tendent à avoir une faible vitesse périphérique et un petit nombre d'étapes. La masse moléculaire élevée a un impact positif sur l'efficacité de la turbine. Cependant, les fluides avec une pression critique élevée et une masse moléculaire élevée nécessitent une zone de transfert de chaleur plus élevée. [30]

La viscosité :

Une faible viscosité à la fois dans les phases liquide et vapeur est nécessaire pour maintenir de faibles pertes par friction dans les échangeurs de chaleur et les tuyaux.

La conductivité :

Une conductivité élevée est nécessaire pour obtenir un coefficient de transfert de chaleur élevé dans les échangeurs de chaleur.

Pression d'évaporation acceptable :

Comme indiqué avec de l'eau, les pressions élevées entraînent généralement des coûts d'investissement plus élevés et une complexité accrue.

Pression positive de la jauge de condensation :

La pression basse doit être supérieure à la pression atmosphérique afin d'éviter l'infiltration d'air dans le cycle.

Température de stabilité élevée :

Contrairement à l'eau, les fluides organiques subissent généralement des détériorations chimiques et se décomposent à des températures élevées. La température maximale de la source de chaleur est donc limitée par la stabilité chimique du fluide de travail.

Le point triple d'un fluide :

C'est la température et la pression auxquelles coexistent les phases solide, liquide et gazeuse. Tout fluide de travail ORC devrait avoir une température de point triple inférieure à du cycle. Si le cycle approche la température du point triple, il y a un risque que le fluide se

Chapitre 2 : ORC relié à un concentrateur parabolique

solidifie et cause des défaillances de l'équipement. En règle générale, il est souhaitable d'avoir une température de point triple inférieur à celui de l'eau.

- **La Sécurité :**

Les considérations de sécurité humaine sont également importantes pour sélectionner un fluide de travail. Une préoccupation de sécurité est la possibilité pour un fluide de travail de brûler ou d'exploser. Il est souhaitable de choisir un fluide avec un point d'éclair élevé, qui est la température à laquelle la phase liquide d'un fluide dégage suffisamment de vapeur pour être allumée par une source externe.

Il est également souhaitable de choisir un fluide ayant une limite inférieure d'explosivité (LIE) élevée, qui est la concentration de la vapeur de fluide (% en volume) dans l'air qui explose si elle est allumée par une source externe. La limite supérieure d'explosivité (LSE) est la Concentration d'un fluide à laquelle il devient trop riche pour s'enflammer. Ensemble, la LIE et la LSE définissent une gamme de concentrations sur lesquelles la vapeur de fluide est explosive dans l'air. [23]

Un autre problème de sécurité est la toxicité d'une substance, qui fait référence aux dommages directs qui peuvent être infligés à une personne par l'exposition à la substance. Les limites acceptables de toxicité pour un fluide de travail dans un ORC dépendent de l'application. Par exemple, l'introduction d'une substance toxique dans un système par ailleurs bénin peut être un mauvais choix, mais l'utilisation d'une substance toxique dans une usine industrielle déjà équipée pour manipuler des matières dangereuses peut ajouter peu de risques ou de coûts.

- **L'impact environnemental :**

Au cours des dernières années, beaucoup de fluides de travail ont été éliminés en raison de leurs caractéristiques inamicales dans l'environnement et de plus en plus de fluides de travail sont encore en cours d'élimination. La plupart des fluides de travail éliminés sont dus à leur fort potentiel de réchauffement de la planète et à leur potentiel d'appauvrissement de la couche d'ozone. Il est important de noter que si certains fluides de travail ont de très bonnes propriétés thermodynamiques, ils peuvent ne pas convenir en tenant compte des aspects de sécurité et d'environnement. Des exemples de fluides de travail qui ont été éliminés sont des CFC et des HCF (comme R-11, R-12, R-113, R-114 et R-115), tandis que d'autres seront éliminés en 2020 ou 2030 (comme R-21, R-22, R-123, R-124, R-141 et R-142b). [30]

- **Le Coût :**

Toute conception de système pratique nécessite une prise en compte des coûts de mise en œuvre. Les fluides déjà utilisés dans la réfrigération ou dans l'industrie chimique sont plus faciles à obtenir et plus rentables. Les fluides à faible débit permettent des tailles d'équipement plus petites. Les fluides à faible débit peuvent être identifiés par leur température critique élevée, leur pression critique élevée et leur faible température d'ébullition.

Chapitre 2 : ORC relié à un concentrateur parabolique

Pour des fluides similaires, une température critique plus élevée correspond à une chaleur latente plus importante. Ainsi, un fluide ayant des températures critiques élevées nécessitera typiquement un débit massique plus faible qu'un fluide ayant une température critique inférieure pour atteindre un débit de transfert de chaleur donné dans le fluide. De plus, une pression critique élevée, pour un fluide correspond à une pression de saturation élevée à la température maximale. Les vapeurs à haute pression sont plus denses que les vapeurs à basse pression, de sorte que le même débit massique nécessite un débit volumique inférieur à celui d'un fluide à haute pression. Si la pression est trop élevée, les épaisseurs de paroi requises pour les tubes et l'équipement commenceront à faire augmenter les coûts. De plus, une température de bas point d'ébullition correspond à une pression élevée dans le

Condenseur, ce qui augmente la densité du fluide dans le condenseur et diminue le débit Volumique. [16]

- **Méthodes de sélection du fluide de travail :**

La méthode de dépistage :

Cette méthode est de loin la méthode la plus utilisée pour la sélection des fluides de travail dans la littérature scientifique: elle consiste à construire un modèle de simulation en régime permanent du cycle ORC et à le faire fonctionner avec différents fluides de travail. Le modèle proposé peut être plus ou moins détaillé et les indicateurs de performance du cycle sélectionnés peuvent varier.

Il peut être démontré que malgré la multiplicité des études sur les fluides de travail, aucun fluide n'a été identifié comme optimal pour la ORC. Cela est dû aux différentes hypothèses nécessaires pour effectuer la comparaison des fluides.

La méthode de la carte de fonctionnement :

Le choix des fluides de travail est étroitement lié aux types de machines de détente utilisées dans le système ORC. Dans certaines conditions, lorsqu'un fluide de travail est sélectionné, tous les types de machines de détente ne sont pas adaptés aux conditions de travail imposées, et il est nécessaire de concevoir d'autres détendeurs. Cependant, en raison de la limitation inhérente aux différents types de détendeurs, la sélection du fluide de travail doit être déterminée en combinant avec les limitations des machines de détente. Pour les détendeurs d'admission radiale, il existe plusieurs paramètres limités, tels que la vitesse de pointe, la vitesse de rotation, la vitesse spécifique et le nombre maximal de Mach dans la buse et le rotor du détendeur, etc. Pour les détendeurs à déplacement positif, ils sont principalement limités par le rapport de volume interne intégré et le volume balayé.

Les cartes de fonctionnement des différents fluides de travail se chevauchent souvent, ce qui signifie que cette méthode doit donc être considérée uniquement comme un outil de présélection.

Chapitre 2 : ORC relié à un concentrateur parabolique

L'Approche Thermo-économique :

Cette approche permet de prendre en compte, à travers leur coût, les effets des propriétés du fluide de travail, tels que l'effet de la densité de vapeur sur la taille de l'équipement. Par conséquent, plusieurs considérations doivent être prises en compte lors de l'utilisation de cette approche, telles que celles indiquées ci-dessous :

- L'ORC de récupération de chaleur résiduelle considéré.
- Les fluides de travail considéré.
- Paramètres du modèle thermodynamique.
- Optimisation thermodynamique.
- Optimisation thermo-économique.
- Influence des conditions de travail.

L'approche thermo-économique est la méthode la plus efficace pour la sélection des fluides de travail, car elle optimise l'économie du système. Cependant, sa mise en œuvre est plus complexe que les deux méthodes précédentes: une fonction de coût doit être affectée à chaque composant et des algorithmes d'optimisation multiparamétriques doivent être utilisés. En raison de l'effort de calcul élevé impliqué, cette analyse ne peut être effectuée que pour quelques fluides de travail. Une présélection doit donc être effectuée.

Tableau 2.1 : La température et pression critique pour différents fluides organiques purs qui peuvent être considéré comme fluide de travail. [34]

Chapitre 2 : ORC relié à un concentrateur parabolique

Nom	Nom courte	Pcrit (bar)	Tcrit (°C)
Les Hydrocarbures (HCs)			
Isobutane	R-600a	36.4	135
N-butane	R-600	37.9	152
Isopentane	R-601a	33.7	187
N-pentane	R-601	33.6	196
N-hexane	-	30.6	235
Cyclohexane	-	40.7	280
N-heptane	-	27.3	267
N-octane	-	25	296
N-nonane	-	22.7	321
Benzène	-	48.8	298
Toluène	-	41.3	319
Les Hydrofluorocarbures (HFCs)			
Difluoromethane	R-32	57.4	78
1,1,1,2-Tetrafluoroethane	R-134a	40.6	101
1,1,1-Trifluoroethane	R-143a	37.6	73
1,1,1,3,3,3-Hexafluoropropane	R-236fa	31.9	124
1,1,1,2,3,3,3-Heptafluoropropane	R-227ea	28.7	101
1,1,1,2,3,3-Hexafluoropropane	R-236ea	34.1	139
1,1,1,3,3-Pentafluoropropane	R-245fa	36.1	153
1,1,2,2,3-Pentafluoropropane	R-245ca	38.9	174
Les Hydrochlorofluorocarbures (HCFCs)			
1,1-Dichloro-2,2,2-trifluoroethane	R-123	36.6	183
2-Chloro-1,1,1,2-tetrafluoroethane	R-124	36.2	122
1,1-Dichloro-1-fluoroethane	R-141b	42.1	204
1-Chloro-1,1-difluoroethane	R-142b	40.6	137
Les Siloxanes			
Hexamethyldisiloxane	MM	19.1	245
Octamethyltrisiloxane	MDM	14.4	291
Decamethyltetrasiloxane	MD2M	12.2	326
Dodecamethylpentasiloxane	MD3M	9.3	354
Octamethylcyclotetrasiloxane	D4	13.1	312
Les Alcools			
Méthanol	-	81.0	240
Ethanol	-	40.6	241

Chapitre 2 : ORC relié à un concentrateur parabolique

- **Conclusion pour choix de fluide de travail :**

Pour les différents types de sources de chaleur à température constante ou variable, les critères de sélection du fluide pour la performance du cycle, la fiabilité, la sécurité, l'impact environnemental et le coût doivent être pris en compte. Différentes méthodes de sélection du fluide de travail comme celles décrites ci-dessus peuvent être utilisées pour la présélection et finale, le dépistage étant la méthode la plus préférée et la plus facile pour la présélection. La performance thermodynamique est généralement la considération primordiale, et les fluides secs présentent un net avantage sur les fluides humides pour des rendements de conversion de cycle. Une température critique élevée est également corrélée positivement avec le rendement de conversion de l'ORC, ce qui rend les hydrocarbures à chaîne plus longue tels que le décane plus efficaces que les hydrocarbures plus petits tels que l'hexane.

Le choix du fluide affectera également considérablement le coût de l'équipement ORC, une pression critique élevée et une température d'ébullition normale basse étant des qualités souhaitables. Les hydrocarbures à petite chaîne tels que l'hexane permettent un équipement plus petit et un coût en capital moins élevé que les hydrocarbures à longue chaîne tels que le décane. Les facteurs de sécurité et d'environnement doivent être pris en compte pour tout choix de fluide, et les limites admissibles pour ces facteurs dépendent du contexte dans lequel le cycle sera utilisé.

Les propriétés du fluide sélectionné [35]

Le benzène :

Le benzène est de formule (C_6H_6), à température ambiante, un liquide incolore, à forte odeur aromatique, moins dense que l'eau dans laquelle il est pratiquement insoluble (0,180 g pour 100 g à 25 °C). Il est miscible à la plupart des solvants organiques et forme des mélanges azéotropiques avec l'eau, certains alcools et hydrocarbures.

Masse moléculaire : 78,11 g/mol

Température de fusion : 5,5 °C

Température d'ébullition : 80,1 °C

Masse volumique à 20 °C : 0,879 g/cm³

Densité des vapeurs : 2,70 par rapport à l'air

Température critique : 288,5 °C

Pression critique : 4,83 MPA

Le R-245fa :

Le R-245fa est un composé hydrofluorocarbure (HFC). Il est utilisé en installation neuve dans les domaines du conditionnement d'air industriel, en climatisation des bâtiments et pour les

Chapitre 2 : ORC relié à un concentrateur parabolique

systèmes de récupération d'énergie en ambiance élevée. Il peut aussi être employé dans des installations de grandes puissances équipées de compresseurs centrifuges (un ou plusieurs étages), en remplacement du HCFC R-123.

Formule chimique : $\text{CF}_3\text{CH}_2\text{CHF}_2$

Point d'ébullition : 15.14 1atm/°C

Point de fusion : -25 °C

Pression critique : 3.651 Mpa

Masse moléculaire : 134.048 g/mol

Température critique : 154.01 °C

Densité : 0.5161 g/cm³

L'isobutane :

L'isobutane ou 2-méthylpropane est un hydrocarbure de formule brute C_4H_{10} que l'on trouve sous forme de gaz dans les conditions habituelles de température et de pression. C'est un isomère du butane. Il est utilisé comme fluide réfrigérant sous le nom de R600a (ou technologie "Greenfreeze")

Formule brute : C_4H_{10}

Point d'ébullition : -11.7°C (261.5 k)

Point de fusion : -159,6 °C

Pression critique : 36.48 bar

Masse moléculaire : 58.12 g/mol

Température critique : 134.9°C

Densité : 2.51 kg/m³

Le toluène :

Le toluène est un liquide aux conditions normales de température et de pression. Il est quasi-insoluble dans l'eau (0,535 g l⁻¹ à 25 °C), mais miscible a beaucoup de solvants organiques (acétone, oxyde de diéthyle, chloroforme, éthanol, etc.), et soluble dans l'acide acétique glacial.

Formule chimique : C_7H_8

Point d'ébullition : 110°C

Point de fusion : -95°C

Pression critique : 4 MPA

Masse moléculaire : 92.14.g/mol

Température critique : 320,8 °C.

Densité : 867 kg/m³

Le n-butane :

Le butane est un hydrocarbure saturé de la famille des alcanes et de formule brute C_4H_{10} . Il existe sous deux formes isomères, le n-butane et l'isobutane ou 2-méthylpropane.

Chapitre 2 : ORC relié à un concentrateur parabolique

Un alcane incolore et inflammable qui existe sous deux formes similaires, toutes deux présentes dans le gaz naturel. L'isomère stable, le n-butane est principalement utilisé dans la fabrication de caoutchouc et de carburants (comme le Calor Gas).

Masse moléculaire : 58,12 g/mol
Température de fusion : -138 °C
Température d'ébullition : -1 °C
La masse volumique: 573 kg/m³
Température critique : 151.85°C
Pression critique : 38.0 bar

2.3 ORC parabolique étudié :

2.3.1 Modélisation des composants :

Pompe (1-2) :

Pour un cycle de Rankine il est nécessaire que la pompe fournisse un très faible débit à une pression élevée ce qui limite le choix aux pompes volumétriques. Parmi les types de pompes les plus courantes possibles on peut citer les pompes à piston, à engrenages, à membrane ou à palettes. Cet organe n'est pas le plus critique dans un cycle de Rankine dans le sens où la puissance qu'elle absorbe est relativement faible devant celle de la machine de détente. De plus les pompes pouvant convenir à une application en cycle de Rankine sont courantes dans l'industrie. [12]

Les pompes à piston et à membranes sont celles qui permettent les pressions les plus hautes (jusqu'à plusieurs centaines de bars) mais occasionnent une discontinuité du débit.

Les pompes à engrenage et à palettes fournissent un débit stable mais leurs pressions maximum sont plus limitées.

La pompe d'alimentation comme le détendeur est modélisée uniquement d'un point de vue thermodynamique. Il est considéré comme adiabatique et son rendement isentropique est constant et, un débit et une pression max de 40L/s et 120bars respectivement.

Plusieurs études peuvent montrer que les pompes volumétriques sont les plus préférées.

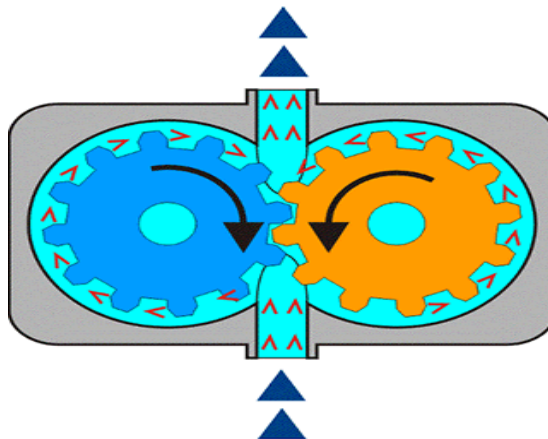


Figure 2.7 : pompe volumétrique.

Chapitre 2 : ORC relié à un concentrateur parabolique

Le récupérateur :

Le récupérateur est un échangeur qui assure le préchauffage du fluide organique en utilisant l'énergie disponible par le flux de sortie de la turbine.

Dans le récupérateur, les équations utilisées pour calculer le coefficient de transfert thermique côté calandre et tube sont les mêmes que celles appliquées dans l'économiseur et le surchauffeur.



Figure 2.8 : Echangeur récupérateur ORC

Les échangeurs du concentrateur solaire (3-6) :

Il s'agit d'un processus de transfert de chaleur sous pression continue. Le capteur solaire chauffe le fluide de travail de la sortie de la pompe à l'entrée de la turbine passant par trois échangeurs : l'économiseur, l'évaporateur et le surchauffeur.

Economiseur :

L'économiseur est un échangeur qui reçoit le fluide organique du récupérateur et assure son chauffage jusqu'à l'état liquide saturé. La température du fluide de travail est supposée constante à l'intérieur de l'échangeur et égale à la température de saturation à la pression de service. L'estimation du coefficient de transfert de chaleur est basée sur le calcul des propriétés thermo physiques des fluides, qui a été effectué en utilisant les équations d'état bien connues incluses dans le logiciel EES.

Cependant, les propriétés thermo physiques font varier les points d'état thermodynamique du fluide de travail : liquide saturé et vapeur sèche saturée. L'évaluation du coefficient de transfert de chaleur côté tube est extrêmement difficile en raison du processus d'évaporation qui a lieu dans ce composant.

Chapitre 2 : ORC relié à un concentrateur parabolique

Ceci est principalement dû à la présence simultanée de deux phases, liquide et vapeur, caractérisées par des propriétés thermodynamiques très différentes.

Évaporateur :

L'évaporateur est aussi un échangeur de chaleur, le mélange (liquide, gaz) issu du détendeur va bouillir ou s'évaporer dans l'évaporateur en absorbant la chaleur de l'huile du concentrateur parabolique, c'est l'étape d'évaporation totale.



Figure 2.9 : Évaporateur de toluène pour système ORC

Surchauffeur :

Un échangeur thermique sert à augmenter l'efficacité thermique consiste à chauffer le gaz de travail en échangeant la chaleur avec le concentrateur solaire parabolique (par l'huile diathermique), un chauffage supplémentaire à pression fixe entraîne une augmentation de la température et du volume spécifique.

Turbine :

La turbine convertit la pression dynamique ou la quantité de mouvement du fluide à grande vitesse en énergie mécanique tout en passant à travers une série d'aubes. Le fluide sortant a généralement une faible pression et une chute d'enthalpie globale se produit lors du passage dans les machines. Les turbomachines sont plus couramment utilisées pour des applications de moyenne à grande échelle et sont bien connues pour leur plus grande efficacité.



Figure 2.10 : ORC Turbine.

Condenseur :

Aussi un échangeur, Le processus de condensation implique la présence simultanée de deux phases : liquide et vapeur. La transition de phase se produit à l'extérieur des tubes tandis que l'eau froide refroidit le gaz provenant du récupérateur.

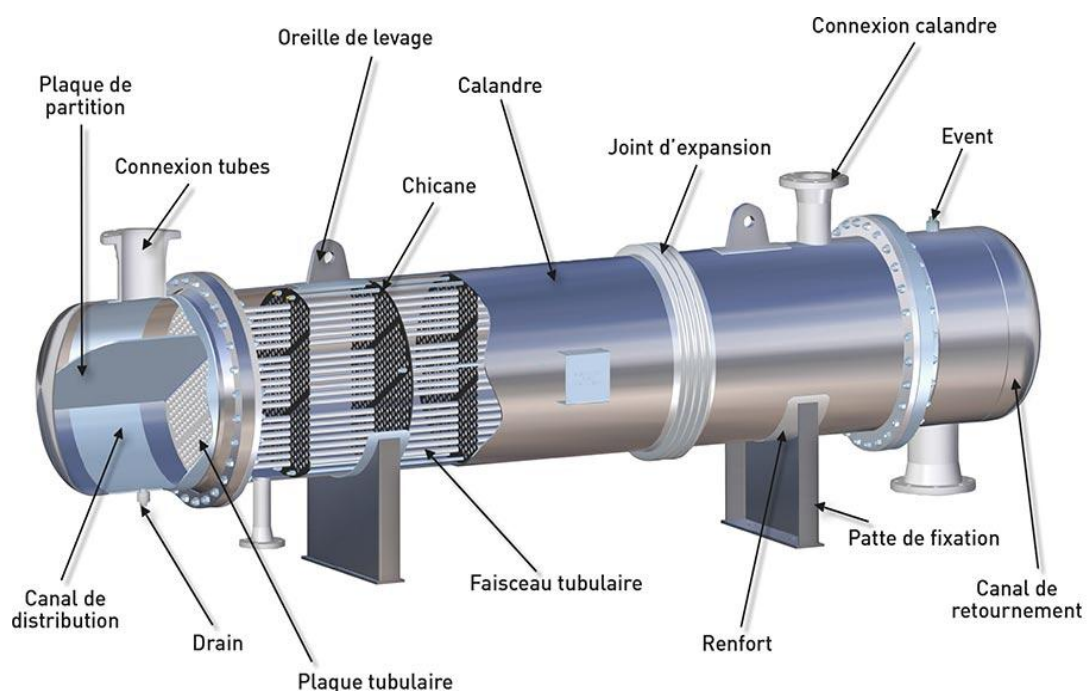


Figure 2.11 : échangeur condenseur ORC.

Chapitre 2 : ORC relié à un concentrateur parabolique

2.4 Analyse Théorique d'un Système ORC relié à concentrateur parabolique.

Pompe (1-2) :

La puissance mécanique utilisée par la pompe est donnée par :

$$\dot{W}_p = \dot{W}_{p,is} / \eta_{p,is} = \dot{m}_f (h_{2s} - h_1) / \eta_{p,is} \quad (2.7)$$

$$\eta_{p,is} = \frac{h_{2s} - h_1}{h_2 - h_1} \quad (2.8)$$

Donc

$$\dot{W}_p = \dot{m}_f (h_2 - h_1) \quad (2.9)$$

Où \dot{W}_p est la puissance idéale de la pompe, \dot{m}_f est le débit massique du fluide de travail, $\eta_{p,is}$ le rendement isentropique de la pompe, et h_1 , h_{2s} et h_2 sont les enthalpies du fluide de travail organique à l'entrée, la sortie de la pompe pour le cas idéal, et la sortie de la pompe pour le cas réel, respectivement. [15]

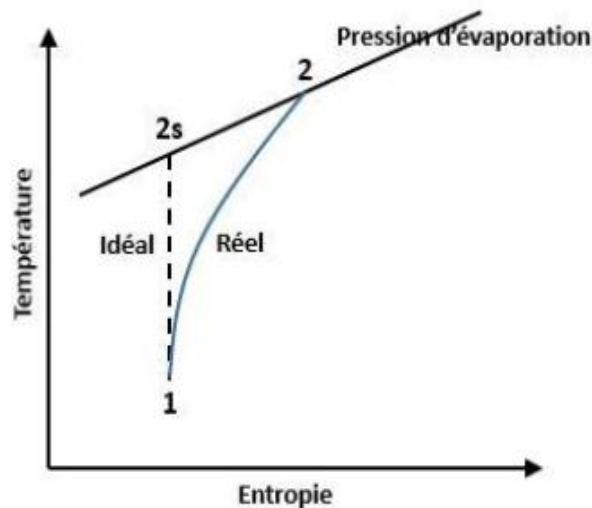


Figure 2.13 : Définition isentropique pour une pompe.

Le récupérateur (2-3) et (7-8) :

Le taux de chaleur :

$$\dot{Q}_{rec1} = \dot{m}_f (h_3 - h_2) \quad (2.10)$$

$$\dot{Q}_{rec2} = \dot{m}_f (h_8 - h_7) \quad (2.11)$$

Chapitre 2 : ORC relié à un concentrateur parabolique

$$\dot{Q}_{\text{rec}} = \dot{Q}_{\text{rec1}} + \dot{Q}_{\text{rec2}} \quad (2.12)$$

Où h_8 , h_3 et h_7 , h_2 sont les enthalpies du fluide de travail organique à la sortie et à l'entrée du récupérateur, respectivement.

L'efficacité de l'échangeur de chaleur est donnée par :

$$\varepsilon_{\text{ech}} = \dot{Q}_{\text{ech}} / \dot{Q}_{\text{ech,max}} = \frac{h_7 - h_8}{h_7 - h_2} = \frac{h_3 - h_2}{h_7 - h_2} \quad (2.13)$$

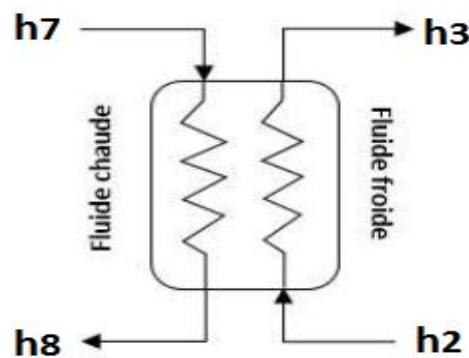


Figure 2.14 : Configuration du cycle d'un échangeur de chaleur.

Les échangeurs du concentrateur solaire (3-6) :

Economiseur (3-4) :

Le taux de transfert de chaleur d'économiseur est donné par :

$$\dot{Q}_{\text{éco}} = \dot{m}_f (h_4 - h_3) \quad (2.14)$$

Où h_4 et h_3 sont les enthalpies du fluide de travail organique à la sortie et à l'entrée de l'économiseur, respectivement.

Le taux de transfert de chaleur d'économiseur peut être déterminé comme :

$$\dot{Q}_{\text{éco}} = UA_{\text{éco}} \Delta T_{\text{éco}} \quad (2.15)$$

Où U coefficient de transfert de chaleur, $A_{\text{éco}}$ est la surface d'économiseur et $\Delta T_{\text{éco}}$ est la différence de température entre l'huile et le fluide dans l'économiseur.

Evaporateur (4-5) :

Le taux de transfert de chaleur d'évaporateur est donné par :

Chapitre 2 : ORC relié à un concentrateur parabolique

$$\dot{Q}_{\text{éva}} = \dot{m}_f(h_5-h_4) \quad (2.16)$$

Où h_5 et h_4 sont les enthalpies du fluide de travail organique à la sortie et à l'entrée de l'évaporateur, respectivement.

Le taux de transfert de chaleur de l'évaporateur peut être déterminé comme :

$$\dot{Q}_{\text{éva}} = UA_{\text{éva}} \Delta T_{\text{éva}} \quad (2.17)$$

Où U coefficient de transfert de chaleur, $A_{\text{éva}}$ est la surface d'évaporateur et $\Delta T_{\text{éva}}$ est la différence de température entre l'huile et le fluide dans l'évaporateur.

Surchauffeur (5-6) :

Le taux de transfert de chaleur de la surchauffeur est donné par :

$$\dot{Q}_{\text{sur}} = \dot{m}_f(h_6-h_5) \quad (2.18)$$

Où h_6 et h_5 sont les enthalpies du fluide de travail organique à la sortie et à l'entrée du surchauffeur, respectivement.

Le taux de transfert de chaleur du surchauffeur peut être déterminé comme :

$$\dot{Q}_{\text{sur}} = UA_{\text{sur}} \Delta T_{\text{sur}} \quad (2.19)$$

Où U coefficient de transfert de chaleur, A_{sur} est la surface de surchauffeur et ΔT_{sur} est la différence de température entre l'huile et le fluide dans le surchauffeur.

Le taux de transfert de chaleur du concentrateur parabolique est donné par :

$$\dot{Q}_e = \dot{Q}_{\text{in}} = \dot{Q}_{\text{sur}} + \dot{Q}_{\text{éva}} + \dot{Q}_{\text{éco}} = \dot{m}_f(h_6-h_3) \quad (2.20)$$

Le taux de transfert de chaleur du concentrateur parabolique peut être déterminé comme :

$$\dot{Q}_e = \dot{Q}_{\text{in}} = UA_{\text{éco}} \Delta T_{\text{éco}} + UA_{\text{éva}} \Delta T_{\text{éva}} + UA_{\text{sur}} \Delta T_{\text{sur}} \quad (2.21)$$

Turbine (6-7) :

La puissance de la turbine est donnée par :

Chapitre 2 : ORC relié à un concentrateur parabolique

$$\dot{W}_t = \dot{W}_{t,is} \eta_{t,is} = \dot{m}_f(h6-h7s) \eta_{t,is} = \dot{m}_f(h6-h7) \quad (2.22)$$

où $\dot{W}_{t,is}$ est la puissance idéale de la turbine, $\eta_{t,is}$ est le rendement isentropique de la turbine, $h7s$ et $h7$ sont les enthalpies du fluide organique de travail à la sortie de la turbine pour le cas idéal et pour le cas réel, respectivement.

Condenseur (8-1) :

Le taux de chaleur du condenseur peut être exprimé comme suit :

$$\dot{Q}_c = \dot{Q}_{out} = \dot{m}_f(h1-h8) \quad (2.23)$$

Puissance nette :

La puissance nette produite par l'ORC peut être exprimée comme suit :

$$\dot{W}_{net} = \dot{W}_t - \dot{W}_p \quad (2.24)$$

Rendement du cycle :

Le rendement thermique est défini comme le rapport entre la puissance nette du cycle et le taux d'apport de chaleur comme suit :

$$\eta_{th} = \frac{\dot{W}_{net}}{\dot{Q}_{in}} = \frac{(h6-h7) - (h2-h1)}{h6-h3} \quad (2.25)$$

Chapitre 3 : ORC relié à un concentrateur miroir de Fresnel

Chapitre 3 : ORC relié à un concentrateur miroir de Fresnel

3.1 Concentrateur miroir de Fresnel :

3.1.1 Introduction :

La technologie des capteurs solaires du type Fresnel a pris la place dans le domaine des procédés solaires à concentration, dont l'intérêt est de développer cette technique de conversion de l'énergie solaire.

Cette technologie qui a été inventé par le physicien français Augustin Fresnel a pour but d'utiliser dans le système optique des phares de signalisation marine [12], ces types ont été appliqué premièrement pour la concentration solaire par Francia (1968), qui a développé les deux types des réflecteurs de Fresnel à un et à deux axes de poursuite.

Leur concept est simple et facile par rapport aux autres capteurs solaires à concentration de même la famille, sont formée de miroirs plans, ils sont moins chers que les autres types des capteurs solaires à effet de concentration. Ce système met en œuvre des miroirs plans, très légèrement incurvés, disposés en lames parallèles qui s'inclinent par rotation de manière à éclairer un récepteur tubulaire fixe. Avec une performance optique diminuée de 30 ou 40% par rapport aux capteurs solaires cylindro-paraboliques.

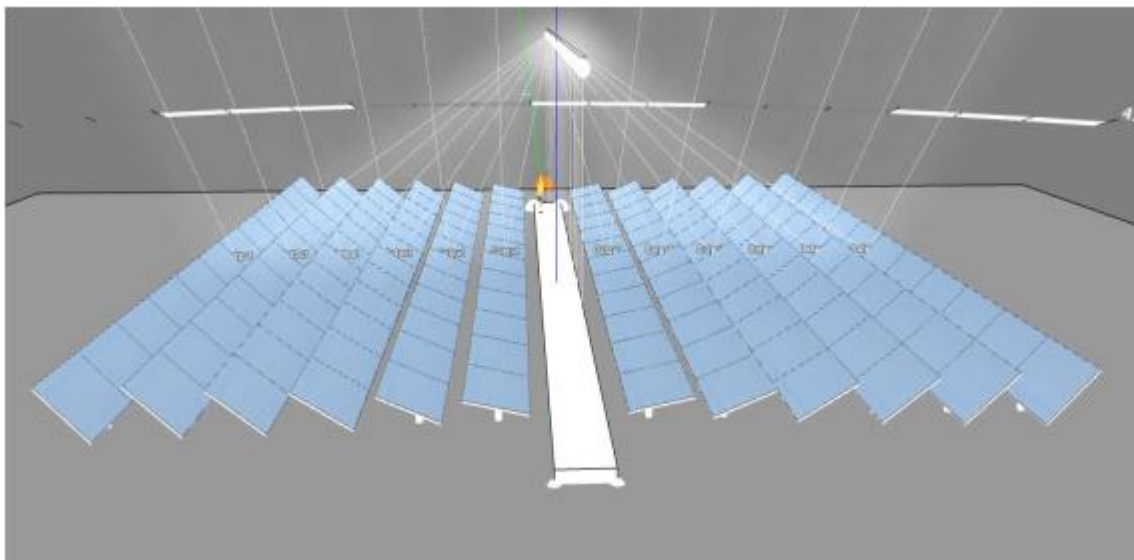


Figure 3.1 : concentrateur solaire de type Fresnel

3.1.2 Principe de fonctionnement :

Le principe de fonctionnement de ce type de capteur à concentration repose sur un système de miroirs plans Réflecteurs Linéaires Compacts (RLC), dont l'orientation de chacun de ces miroirs vers un récepteur en suivant la course du soleil pour rediriger et concentrer en permanence les rayonnements solaires directs vers un ou deux tubes absorbeurs fixes ou mobiles(**Figure 3.1**).

L'énergie solaire concentrée sert à chauffer un fluide caloporteur circulant dans un tube horizontal ou la température de travail peut atteindre 500°C, ensuite grâce à un cycle de

Chapitre 3 : ORC relié à un concentrateur miroir de Fresnel

Rankine nous pouvons produire de l'électricité ou l'utiliser directement dans divers procédés tels que le chauffage et le séchage.

Un fluide caloporteur généralement l'eau est chauffée entre 200 et 500°C en circulant dans ce tube horizontal. Cette énergie thermique est transférée à un autre circuit par des échangeurs pour

produire de la vapeur, ce dernier sert à fonctionner une turbine qui produit de l'électricité. Un exemple d'une centrale solaire en France dans les Pyrénées orientales étendue sur 15 hectares présenté dans la **Figure 3.2**, les miroirs qui concentreront les rayons du soleil pour produire de la vapeur d'eau et faire ainsi tourner une turbine.

La centrale pourra stocker 3 heures l'énergie thermo-solaire produite par ses miroirs de Fresnel montées sur les dispositifs de poursuite. [27]

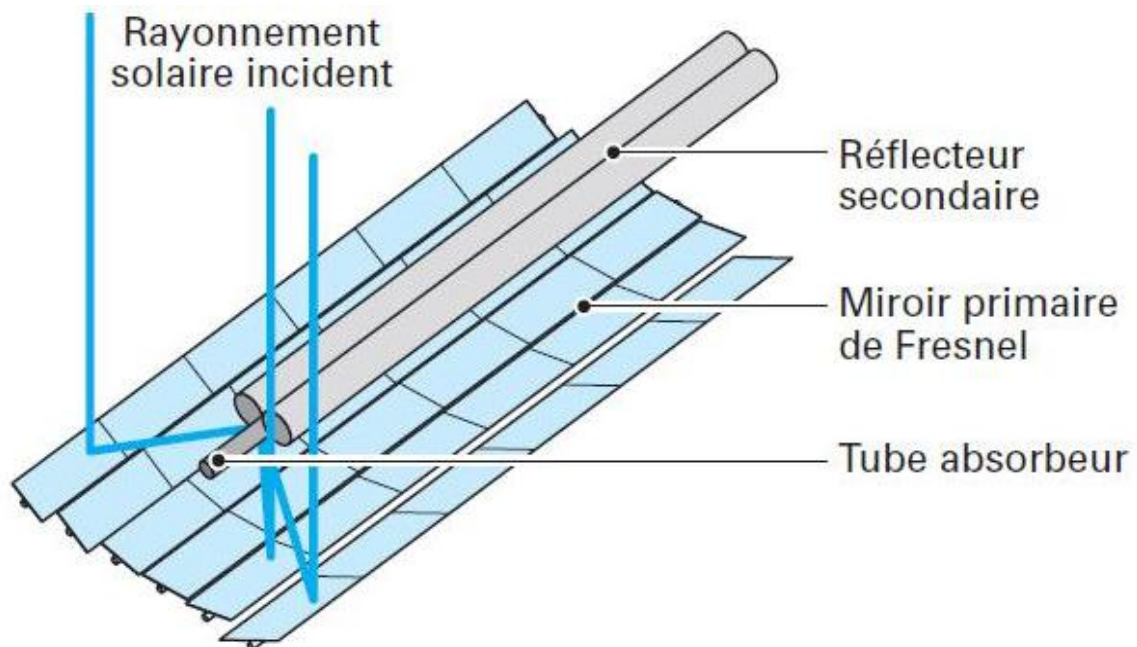


Figure 3.2 : le concentrateur linéaire de Fresnel.

3.1.3 Les avantages et les inconvénients de concentrateur de Fresnel

Il existe à ce jour plusieurs types de linéaires de Fresnel (Tableau 3.1):

Tableau 3.1: Classification des technologies de linéaires Fresnel

Chapitre 3 : ORC relié à un concentrateur miroir de Fresnel

Types de linéaire		Avantages	Inconvénients
Fonction des réflecteurs primaires	Miroirs plans de taille variable	Bon ratio de concentration	Mise en œuvre difficile pour les miroirs de petites dimensions
	Miroirs plans de taille identique	Bon ratio de concentration	Effet cosinus
	Miroirs incurvés	Bon ratio de concentration	Mise en œuvre difficile
Fonction du récepteur	Récepteurs Horizontaux	Meilleur ratio de concentration	Isolation de la partie supérieure pour réduire les pertes radiatives
	Récepteurs Verticaux	Double concentration sur les faces latérales du récepteur	Faible contribution des miroirs proches du centre du concentrateur
	Récepteurs Triangulaires	Bon ratio de concentration	Grande occupation d'espace
Fonction de l'inclinaison du concentrateur	Concentrateur Compact	Réduction des pertes par effet cosinus	Automatisation difficile
	Concentrateur plat horizontal	Mise en œuvre simple	importantes pertes par effet cosinus
Fonction de l'orientation du concentrateur	Ligne focale en est-ouest	Pour des latitudes supérieures à 50 °	Décalage journalier de la tache focale
	Ligne focale en nord-sud	Meilleur ratio de concentration	Décalage saisonnier de la tache focale

3.1.4 Éléments d'un concentrateur à Réflecteur Linéaire de Fresnel :

Le concentrateur à Réflecteur Linéaire de Fresnel (concentrateur LFR) est généralement composé:

- du réflecteur ou miroir de Fresnel : plusieurs bandes de miroirs réfléchissent et concentrent le rayonnement sur le récepteur.

- du récepteur : positionné au-dessus du miroir de Fresnel pour intercepter le rayonnement concentré. La conception du récepteur peut varier. Il est souvent composé d'un réflecteur secondaire, qui concentre encore avec un facteur de 1 à 3 le rayonnement. Il permet de réduire la surface de l'absorbeur, ce qui limite les pertes, par rapport aux performances à concentration avec miroir de Fresnel. Il peut aussi contribuer à l'homogénéité du flux de puissance collecté sur l'élément absorbeur.

Un élément absorbeur souvent un tube, mais parfois, plusieurs tubes, voire une surface plane. Cet élément joue le rôle d'échangeur : le fluide caloporteur collecte l'énergie du rayonnement sous forme d'énergie thermique. [28]

Chapitre 3 : ORC relié à un concentrateur miroir de Fresnel

Les hypothèses simplificatrices suivantes sont faites :

- Le système est bien motorisé pour suivre le soleil dans le plan Est-ouest ;
- Les miroirs ont une réflexion spéculaire ;
- Les rayons solaires ont une incidence axiale.

Les miroirs sont caractérisés par trois paramètres :

a) leur inclinaison : θ_n (m)

$$\theta_n = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left\{ \frac{\theta_{n-1} + \left(\frac{w}{2}\right) \cos(\theta_{n-1})}{f + \left(\frac{w}{2}\right) \sin(\theta_{n-1})} \right\} \quad (3.1)$$

b) l'écart entre deux miroirs consécutifs : S_n (m)

$$S_n = w \sin \theta_{n-1} \tan(2 \theta_n + \xi_0) \quad (3.2)$$

ξ_0 : moitié du diamètre apparent du soleil

Leur position par rapport à l'axe du concentrateur : Q_n (m)

$$Q_n = Q_{n-1} + w \cos \theta_{n-1} + S_n \quad (3.3)$$

3.2 Huile diathermique :

Parfois il est avantageux d'utiliser un milieu intermédiaire pour transférer la chaleur de la source chaude vers l'évaporateur. Un milieu le plus probable est une huile thermique. La sélection de l'huile diathermique a une grande influence dans tout système ORC. L'huile reçoit l'énergie thermique et fournit la chaleur au fluide organique. Les principales caractéristiques de la bonne huile diathermique sont:

- Bonne stabilité thermique et chimique.
- Chaleur spécifique élevée.
- Non toxique.
- Faible inflammabilité.
- Bonne compatibilité matérielle.
- Faible viscosité.
- À bas prix.

Chapitre 3 : ORC relié à un concentrateur miroir de Fresnel

l'entropie augmente. Enfin, il passe au surchauffeur, qui a le rôle de chauffer le gaz. Les trois échangeurs (économiseur, évaporateur, surchauffeur) tirent la chaleur de l'huile qui sort du concentrateur miroir de fresnel.[29]

Le gaz chaud et comprimé fait tourner la turbine, qui à son tour fait tourner le générateur pour produire de l'électricité. Le gaz diminue en température et en pression puis passe dans le récupérateur et se refroidit grâce à l'échange thermique avec le liquide sortant de la pompe. Enfin, il se passe vers le condenseur, où il le refroidit et assure son retour à son état liquide.

3.4 Analyse Théorique d'un Système ORC relié à concentrateur Fresnel :

Pompe (1-2) :

La puissance mécanique utilisée par la pompe est donnée par :

$$\dot{W}_p = \dot{W}_{p,is} / \eta_{p,is} = \dot{m}_f (h_{2s} - h_1) / \eta_{p,is} \quad (3.4)$$

$$\eta_p = \frac{h_{2s} - h_1}{h_2 - h_1} \quad (3.5)$$

Donc :

$$\dot{W}_p = \dot{m}_f (h_2 - h_1) \quad (3.6)$$

Où \dot{W}_p est la puissance idéale de la pompe, \dot{m}_f est le débit massique du fluide de travail, $\eta_{p,is}$ le rendement isentropique de la pompe, et h_1 , h_{2s} et h_2 sont les enthalpies du fluide de travail organique à l'entrée, la sortie de la pompe pour le cas idéal, et la sortie de la pompe pour le cas réel, respectivement.

Le récupérateur (2-3) et (7-8) :

Le taux de chaleur :

$$\dot{Q}_{rec1} = \dot{m}_f (h_3 - h_2) \quad (3.7)$$

$$\dot{Q}_{rec2} = \dot{m}_f (h_8 - h_7) \quad (3.8)$$

$$\dot{Q}_{rec} = \dot{Q}_{rec1} + \dot{Q}_{rec2} \quad (3.9)$$

Où h_8 , h_3 et h_7 , h_2 sont les enthalpies du fluide de travail organique à la sortie et à l'entrée du récupérateur, respectivement.

Chapitre 3 : ORC relié à un concentrateur miroir de Fresnel

L'efficacité de l'échangeur de chaleur est donnée par :

$$\varepsilon_{ech} = \dot{Q}_{ech} / \dot{Q}_{ech,max} = \frac{h_7 - h_8}{h_7 - h_2} = \frac{h_3 - h_2}{h_7 - h_2} \quad (3.10)$$

Les échangeurs du concentrateur solaire (3-6) :

Economiseur (3-4) :

Le taux de transfert de chaleur d'économiseur est donné par :

$$\dot{Q}_{éco} = \dot{m}_f(h_4 - h_3) \quad (3.11)$$

Où h_4 et h_3 sont les enthalpies du fluide de travail organique à la sortie et à l'entrée de l'économiseur, respectivement.

Le taux de transfert de chaleur de l'économiseur peut être déterminé comme :

$$\dot{Q}_{éco} = UA_{éco} \Delta T_{éco} \quad (3.12)$$

Où U coefficient de transfert de chaleur, $A_{éco}$ est la surface d'économiseur et $\Delta T_{éco}$ est la différence de température entre l'huile et le fluide dans l'économiseur.

Evaporateur (4-5) :

Le taux de transfert de chaleur d'évaporateur est donné par :

$$\dot{Q}_{éva} = \dot{m}_f(h_5 - h_4) \quad (3.13)$$

Où h_5 et h_4 sont les enthalpies du fluide de travail organique à la sortie et à l'entrée de l'évaporateur, respectivement.

Le taux de transfert de chaleur de l'évaporateur peut être déterminé comme :

$$\dot{Q}_{éva} = UA_{éva} \Delta T_{éva} \quad (3.14)$$

Où U coefficient de transfert de chaleur, $A_{éva}$ est la surface d'évaporateur et $\Delta T_{éva}$ est la différence de température entre l'huile et le fluide dans l'évaporateur.

Chapitre 3 : ORC relié à un concentrateur miroir de Fresnel

Surchauffeur (5-6) :

Le taux de transfert de chaleur de la surchauffeur est donné par :

$$\dot{Q}_{\text{sur}} = \dot{m}_f(h_6-h_5) \quad (3.15)$$

Où h_6 et h_5 sont les enthalpies du fluide de travail organique à la sortie et à l'entrée du surchauffeur, respectivement.

Le taux de transfert de chaleur du surchauffeur peut être déterminé comme :

$$\dot{Q}_{\text{sur}} = UA_{\text{sur}} \Delta T_{\text{sur}} \quad (3.16)$$

Où U coefficient de transfert de chaleur, A_{sur} est la surface de surchauffeur et ΔT_{sur} est la différence de température entre l'huile et le fluide dans le surchauffeur.

Le taux de transfert de chaleur du concentrateur à miroir de Fresnel est donné par :

$$\dot{Q}_e = \dot{Q}_{\text{in}} = \dot{Q}_{\text{sur}} + \dot{Q}_{\text{éva}} + \dot{Q}_{\text{éco}} = \dot{m}_f(h_6-h_3) \quad (3.17)$$

Le taux de transfert de chaleur du concentrateur à miroir de Fresnel peut être déterminé comme :

$$\dot{Q}_e = \dot{Q}_{\text{in}} = UA_{\text{éco}} \Delta T_{\text{éco}} + UA_{\text{éva}} \Delta T_{\text{éva}} + UA_{\text{sur}} \Delta T_{\text{sur}} \quad (3.18)$$

Turbine (6-7) :

La puissance de la turbine est donnée par :

$$\dot{W}_t = \dot{W}_{t,\text{is}} \eta_{t,\text{is}} = \dot{m}_f(h_6-h_7s) \eta_{t,\text{is}} = \dot{m}_f(h_6-h_7) \quad (3.19)$$

où $\dot{W}_{t,\text{is}}$ est la puissance idéale de la turbine, $\eta_{t,\text{is}}$ est le rendement isentropique de la turbine, h_7s et h_7 sont les enthalpies du fluide organique de travail à la sortie de la turbine pour le cas idéal et pour le cas réel, respectivement.

Condenseur (8-1) :

Le taux de chaleur du condenseur peut être exprimé comme suit :

$$\dot{Q}_c = \dot{Q}_{\text{out}} = \dot{m}_f(h_1-h_8) \quad (3.20)$$

Chapitre 3 : ORC relié à un concentrateur miroir de Fresnel

Puissance nette :

La puissance nette produite par l'ORC peut être exprimée comme suit :

$$\dot{W}_{\text{net}} = \dot{W}_t - \dot{W}_p \quad (3.21)$$

Rendement du cycle :

Le rendement thermique est défini comme le rapport entre la puissance nette du cycle et le taux d'apport de chaleur comme suit :

$$\eta_{\text{th}} = \frac{\dot{W}_{\text{net}}}{\dot{Q}_{\text{in}}} = \frac{(h_6 - h_7) - (h_2 - h_1)}{h_6 - h_3} \quad (3.22)$$

Chapitre 4 : Résultat et discussion

Chapitre 4 : Résultat et discussion

Le modèle de simulation présenté dans la section suivante a été utilisé pour effectuer des analyses visant à révéler les paramètres de stabilisation/conception optimaux pour les deux ORC à l'étude. En particulier, une attention particulière a été consacrée à la sélection du fluide de travail, et à une analyse de sensibilité visant à évaluer les performances des deux systèmes utilisant certains fluides organiques communs. Ainsi, pour le fluide considéré comme le meilleur, des analyses paramétriques et des optimisations ont été réalisées afin de déterminer tous les paramètres de conception et de fonctionnement qui maximisent les performances économiques thermiques du système.

4.1. Sélection du fluide organique de travail :

La sélection des fluides organiques est l'un des processus de conception les plus importants pour une centrale électrique ORC.

Ce choix dépend en grande partie du niveau de température de la source de chaleur en étudiant deux concentrateurs solaires (parabolique et miroir de Fresnel). Les critères de sélection sont différents, les propriétés thermodynamiques et l'impact environnemental des fluides doivent être pris en compte.

Plusieurs études sur les critères de sélection des liquides organiques sont disponibles dans la littérature scientifique. Malgré des résultats différents, selon des finalités différentes, la plupart des études s'accordent sur le fait que les critères d'optimisation à considérer sont : le rendement, la puissance mécanique générée, le taux d'expansion volumique (VER) et le rendement explicatif (Béjan, 1982). D'un point de vue thermodynamique, le cycle optimal a un rendement initial plus élevé.

Cependant, le rendement thermique permet de ne trouver que des informations thermodynamiques sur le cycle. Puisqu'il n'apporte aucune information technique, un autre paramètre important devient : le taux d'expansion volumique (VER).[23]

Equation :
$$VER = \frac{\dot{V}_{ex,out}}{\dot{V}_{ex,in}}$$

Plus le VER est élevé, plus le volume de fluide est élevé débit massique à la sortie du détendeur. Cela provoque une croissance du détendeur, des tuyaux et du condenseur car une augmentation de coût de la centrale. De plus, si l'expander est une turbine, une haute valeur de VER, jointe avec une masse de fluide élevée débit, peut générer un problème de flux supersonique à l'intérieur de l'étage final de la turbine, l'objectif est donc de réduire au fur et à mesure autant que possible le VER.

Chapitre 4 : Résultat et discussion

Les performances du cycle ont été évaluées à l'aide de deux valeurs de température d'entrée d'huile thermique différentes pour deux concentrateurs.

T10 : est la température dégagée par le concentrateur parabolique.

T10' : est la température dégagée par le concentrateur miroir Fresnel.

Le tableau 2 présente les caractéristiques géométriques des échangeurs de chaleur, le débit massique d'huile thermique, les variables d'entrée communes et les valeurs des paramètres géométriques des échangeurs de chaleur. A noter que la température de sortie du fluide à la sortie des collecteurs cylindriques équivalents n'est limitée que par le type de fluide de service choisi.

Par conséquent, dans cette étude, les niveaux de température suivants des sources de chaleur ont été mesurés : une température du concentrateur miroir de Fresnel ($T10' = 170\text{ °C}$) et une température du concentrateur parabolique ($T10 = 300\text{ degrés Celsius}$).

Le groupe de fluides organiques à l'étude dans cette étude est présentée dans le **tableau 4.1**.

Tableau 4.1. Valeurs limites de température et de pression pour chaque fluide

Fluides	Critique Température [°C]	Critique Pressure [Bar]	Maximum Température [°C]
Toluène	318,6	41,26	426
R245fa	154,01	36,51	166
Benzène	288,87	48,94	476
Isobutane (R600a)	134,67	36,40	296
n-Butane (R600)	151,97	37,96	315

Chapitre 4 : Résultat et discussion

Variables d'entrée :

Débit massique d'huile diathermique	m_{ORC}	1500 [kg/hr]
Température d'entrée d'eau de refroidissement	$T_{w,in}$	20 [°C]
Différence de température à la sortie du condenseur	$\Delta T_{w,out}$	5 [°C]

Propriétés de l'huile thermique: [17]

Substance	Min/Max température (°C)	Densité (kg/m ³)	Chaleur spécifique (kJ/kg.C)	Conductivité thermique (w/m.C)
THERMINOL VP-1	12.78/398.9	1067.6	1.532	0.1368
Type de concentrateur	Miroir Fresnel		Parabolique	
Température enregistrée	170 °C		300 °C	

Table 4.2. Variables d'entrée et valeurs du paramètre géométrique des échangeurs de chaleur

Chapitre 4 : Résultat et discussion

Tableau 4.3. Résultats de simulation pour différents fluides de travail et température de source de chaleur :

Heat source		m_{ORC}	T_{ev}	T_{cond}	T_6	P_{ev}	P_{cond}	VER	W_{net}	
Température	FLUID	[kg/hr]	[°C]	[°C]	[°C]	[bar]	[bar]		[kW]	η_g
T10'=170°C	Toluène	121.90	149.20	67.46	168.70	2.71	0.25	10.330	2.33	0.14
	R245fa	772.10	108	30	153.90	15.10	1.77	8.670	8.34	0.16
	Benzène	147.70	144	54.61	167.50	5.15	0.43	10.980	3.34	0.16
	Isobutane	534.60	96.43	30	133.90	18.56	4.04	4.870	8.69	0.14
	n-Butane	430.10	104.30	30	143	16.57	2.84	6.070	8.40	0.15
T10 = 300°C	Toluène	507.20	219.20	67.46	268.30	10.36	0.25	40.990	17.80	0.22
	R245fa				Non défini					
	Benzène	582.80	205.40	54.61	257	15.66	0.43	34.890	22.08	0.23
	Isobutane	1227	114.20	30	203.40	25.66	4.04	6.502	29.49	0.17
	n-Butane	1059	125.70	30	215	24.43	2.84	8.710	30.45	0.19

Considérant les propriétés physiques des fluides montrés dans le **tableau 4.1**, les simulations à niveau de température 170°C peuvent être effectuées en utilisant tous les fluides inclus dans ce tableau. Inversement, le R245fa ne peut pas être utilisé avec la source de chaleur à température 300°C parce que la différence entre l'entrée d'huile diathermique température et la température maximale, autorisées par les équations d'état de l'EES, est trop élevée. Les résultats des simulations sont illustrés à la **Fig. 4.1-4.3** et au **Tableau 4.3**.

La tendance de l'efficacité est comme on peut attendre d'elle, **Fig. 4.1**. Montée de l'entrée d'huile diathermique température, l'efficacité du cycle augmente. Cette croissance est particulièrement appréciée pour les substances à haute température critique. Passer du plus bas au plus haut température source de chaleur, le Toluène, la substance avec le température critique la plus élevée (318,6°C), Benzène montre la plus grande croissance du rendement, de 9 % à 22 %, au contraire isobutane, qui a le plus bas critique (134,7°C), montre la plus faible augmentation, de 12% à 17%. En effet, lorsque la température critique est élevée, une augmentation de la température de la source de chaleur est suivie d'une croissance de l'ébullition.

Fig. 4.2. Montrent la fixation de la source de chaleur, les hydrocarbures isobutane, n-butane et réfrigérant R245fa montrent leur capacité à générer plus de puissance que les autres fluides,

Chapitre 4 : Résultat et discussion

en particulier pour la source de chaleur à température 170°C. Ce comportement est strictement lié à la température critique des fluides. En effet pour les hydrocarbures légers la température critique plus basse, la température d'évaporation plus basse et le débit massique de fluide de travail plus élevé afin d'éviter que le fluide organique n'atteigne la température d'entrée de l'huile diathermique. Le débit massique élevé couplé à la faible température de condensation et la température élevée d'entrée du détendeur expliquent bien l'augmentation de la puissance mécanique. Ces tendances s'expliquent bien en comparant les performances des hydrocarbures légers au Toluène. Il est bien connu que le toluène a la température critique la plus élevée et montre, pour chaque température de source de chaleur, la production d'énergie mécanique la plus faible, le fluide de travail le plus bas débit massique et la température d'évaporation plus élevée. Néanmoins, l'écart de puissance mécanique produit entre le toluène et le meilleur fluide de travail diminue fortement en passant d'une source de chaleur à 170°C à 300°C. Pour la source de chaleur la température à 170°C, la puissance mécanique générée par l'isobutane est sept fois supérieure à celle du toluène tandis que pour la source de chaleur à température 300°C cette différence est un peu moins de deux. Cet aspect souligne à nouveau l'influence du niveau de température de la source de chaleur sur le critère de choix du fluide de travail. Enfin, il convient de noter que le Toluène a la température de condenseur la plus élevée, égale à 67,46°C. Même si une température élevée du condenseur réduit la production d'électricité et l'efficacité globale du système.

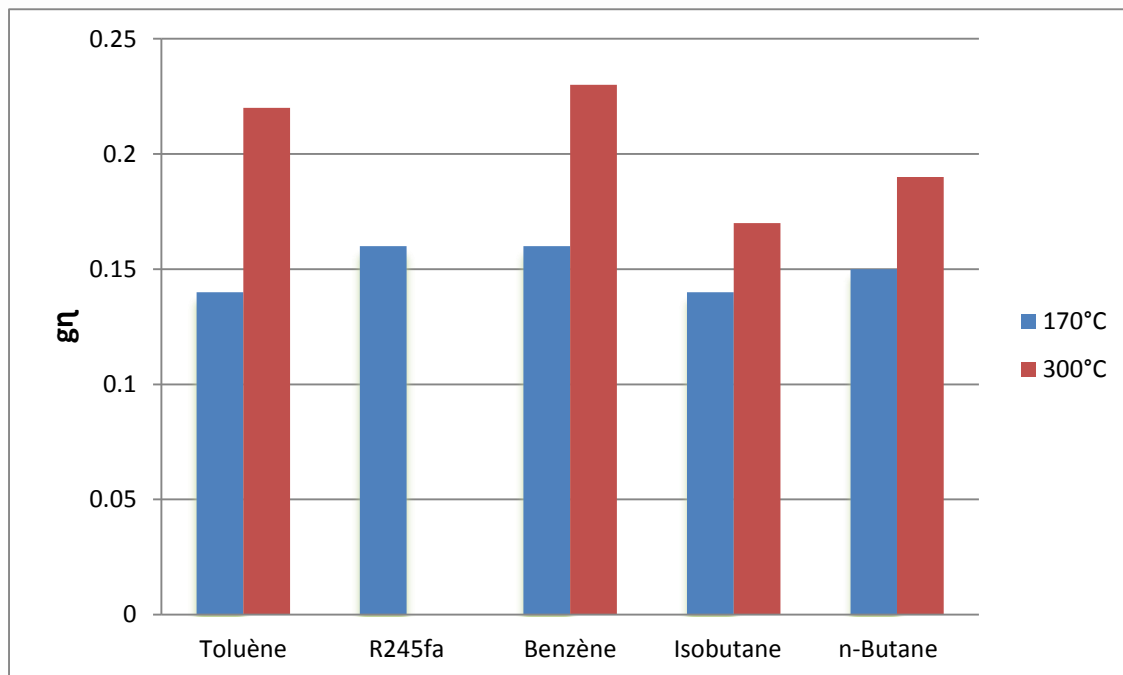


Fig. 4.1. Rendement globale et Fluide organique

Chapitre 4 : Résultat et discussion

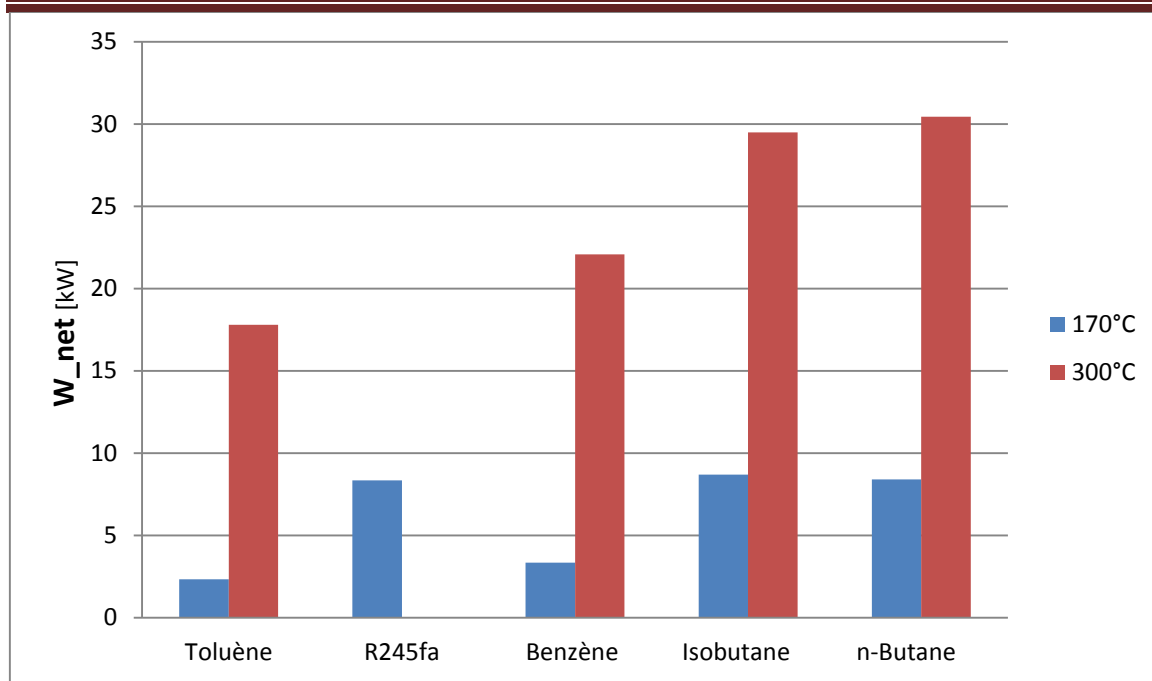


Fig. 4.2. W net et Fluide organique

Le VER montre une tendance complètement différente, **Fig. 4.3**. Elle est strictement liée au taux d'expansion, c'est-à-dire à la pression d'ébullition et de condensation. En augmentant le niveau de température de la source de chaleur, le taux d'expansion augmente, en raison de la température d'ébullition plus élevée et de la croissance progressive du VER. Compte tenu de la température plus basse de la source de chaleur, la substance avec la valeur VER la plus basse est l'isobutane, 4,06, à la place le pire fluide est le n-pentane avec une valeur VER égale à 6,43. Les différences de valeurs VER deviennent significatives à mesure que la température de la source de chaleur augmente. À 170°C, le rapport VER du n-pentane à l'isobutane est de 1,58 et il augmente lentement en passant d'une source de chaleur à température plus basse à plus élevée jusqu'à 2,76 à 300°C. Au contraire, d'autres substances comme le toluène ou le benzène affichent une tendance complètement différente. À la température inférieure de la source de chaleur, leurs valeurs VER sont presque les mêmes que celles de l'isobutane, 4,10 et 4,96 respectivement. À mesure que la température de la source de chaleur augmente, le VER évolue rapidement la croissance. En fait, à la température la plus élevée de la source de chaleur, les valeurs VER du toluène et du benzène sont de 40,99 et 34,89 et leurs rapports par rapport à l'isobutane VER sont respectivement de 6,30 et 5,37. Cette tendance est essentiellement due à l'augmentation de la pression d'ébullition qui se produit lorsque la température de la source de chaleur augmente. En effet plus la pression d'ébullition est élevée, plus le taux d'expansion est élevé et plus le VER est élevé. Enfin, la **fig. 4** montre que l'isobutane a la plus faible valeur de VER, indépendamment de la température de la source de chaleur.

Chapitre 4 : Résultat et discussion

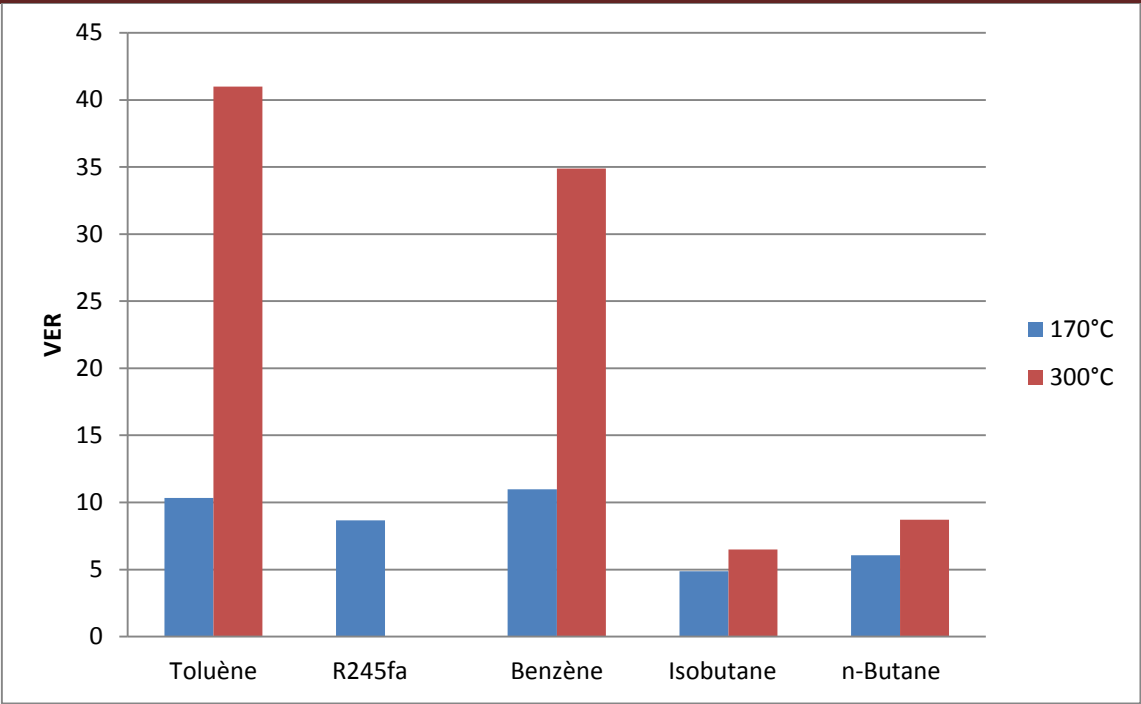


Fig. 4.3. VER et Fluide organique

La figure 4.4-4.5 compare les valeurs VER à la résistance mécanique générée par le cycle avec une différence de température de la source de chaleur. Il est bien connu que le meilleur fluide doit avoir la génération de puissance mécanique la plus élevée et le taux de dilatation volumique (VER) le plus faible. L'isobutane à ces caractéristiques pour chaque source de chaleur de température, suivi de près par le n-butane. Il est à noter que plus la température de la source de chaleur est élevée, plus l'écart VER entre l'isobutane et le n-butane est faible et plus la puissance mécanique du n-butane est élevée.

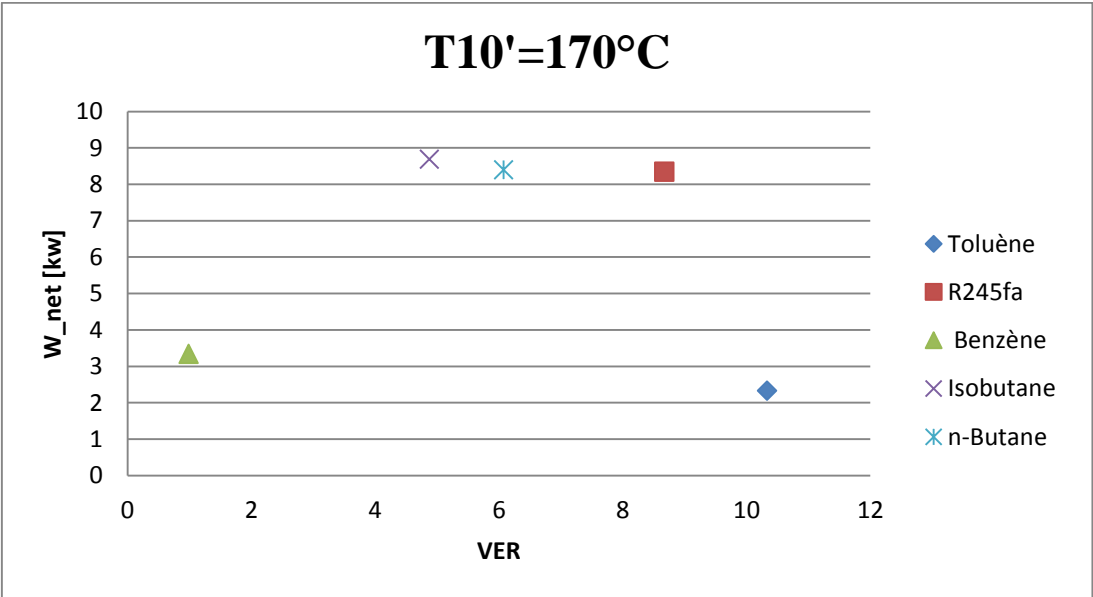


Fig. 4.4. VER et W_Net 170°C température

Chapitre 4 : Résultat et discussion

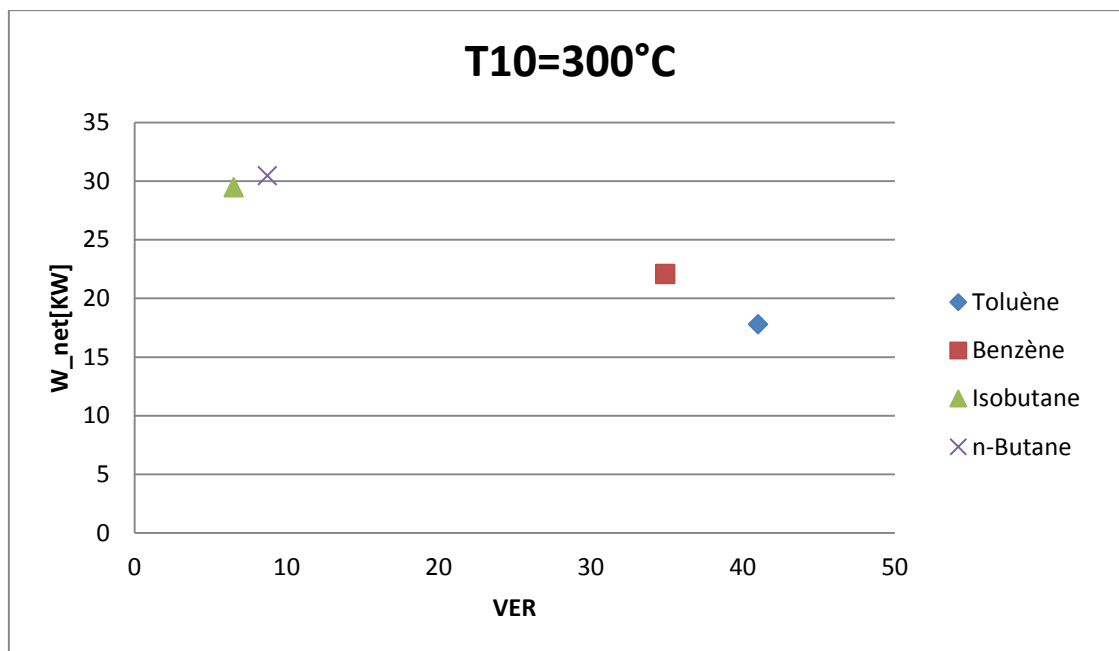


Fig. 4.5. VER et W_Net 300°C température

Au lieu de cela, les **figures 4.6 et 4.7** montrent que l'isobutane et le n-butane ont une efficacité de cycle inférieure mais également des valeurs VER inférieures. À 170°C, l'efficacité de l'isobutane et Toluène est inférieure de 17,6 % à la valeur d'efficacité la plus élevée (Benzène), **Fig. 4.6**. Cela signifie que dans la sélection des fluides, la différence VER entre le meilleur et le pire fluide a plus d'influence sur l'efficacité.

La figure 4.7 montre également la même tendance. Dans ce cas, l'efficacité de l'isobutane est inférieure de 26,1% à celle du benzène, mais leur rapport VER est de 5,37, en d'autres termes, la valeur VER du benzène est plus de cinq fois supérieure à celle de l'isobutane.

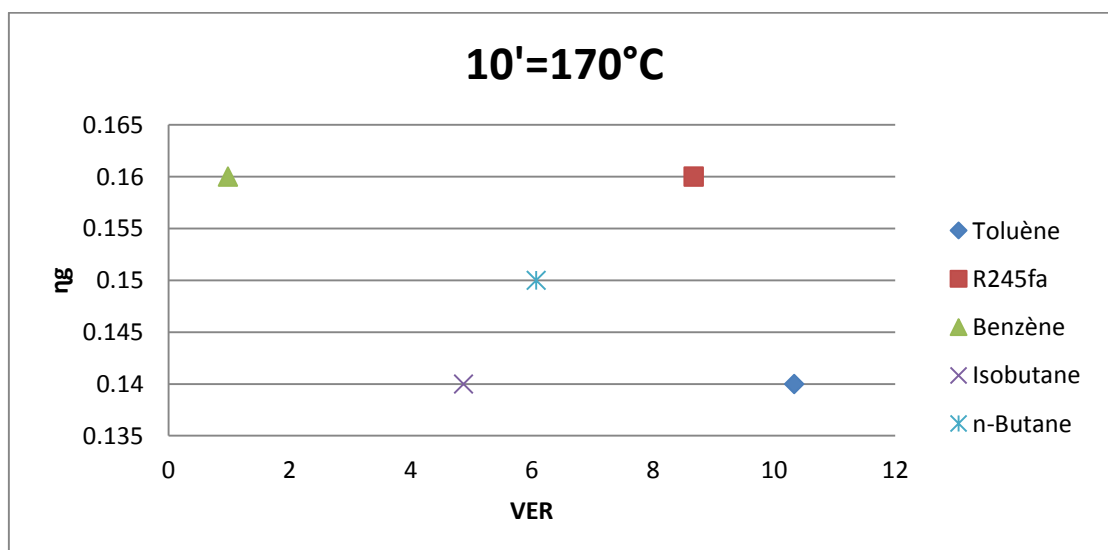


Fig. 4.6. VER et Rendement globale 170°C température

Chapitre 4 : Résultat et discussion

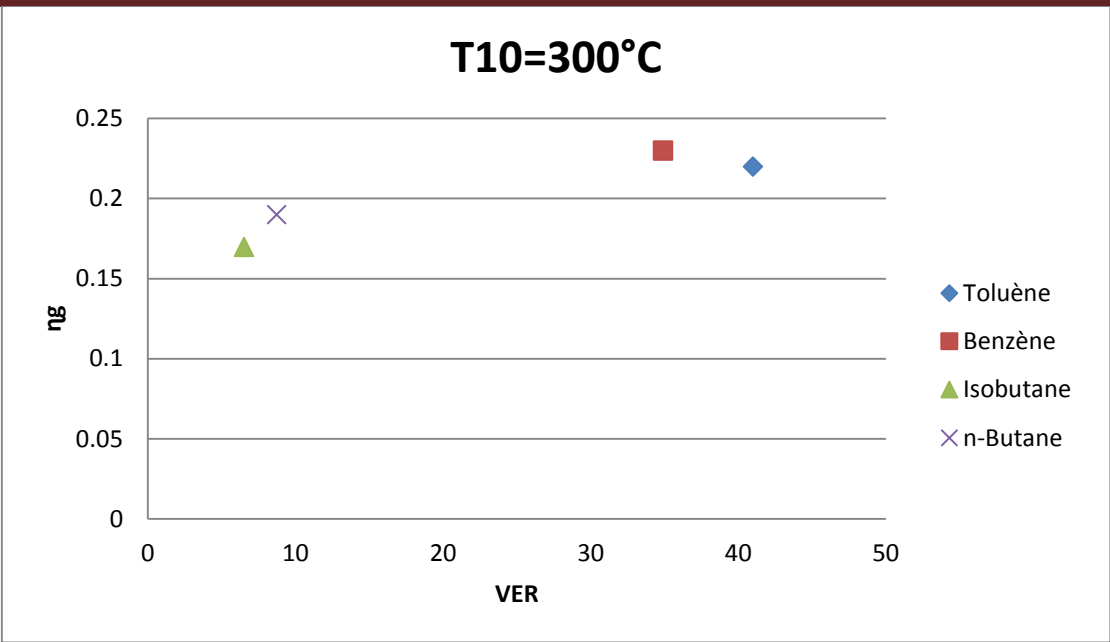


Fig. 4.7. VER et Rendement globale 300°C température

Fig. :4.8_4.9 comparer les valeurs de rendement globale à la puissance mécanique générée par le cycle (w_net) entre deux température déférant (170°C et 300°C).

La comparaison des deux figures montre que le R245fa et Benzène sont proches de la même efficacité à basse température (170°C), tandis que le Benzène est plus performant à haute température (300°C).

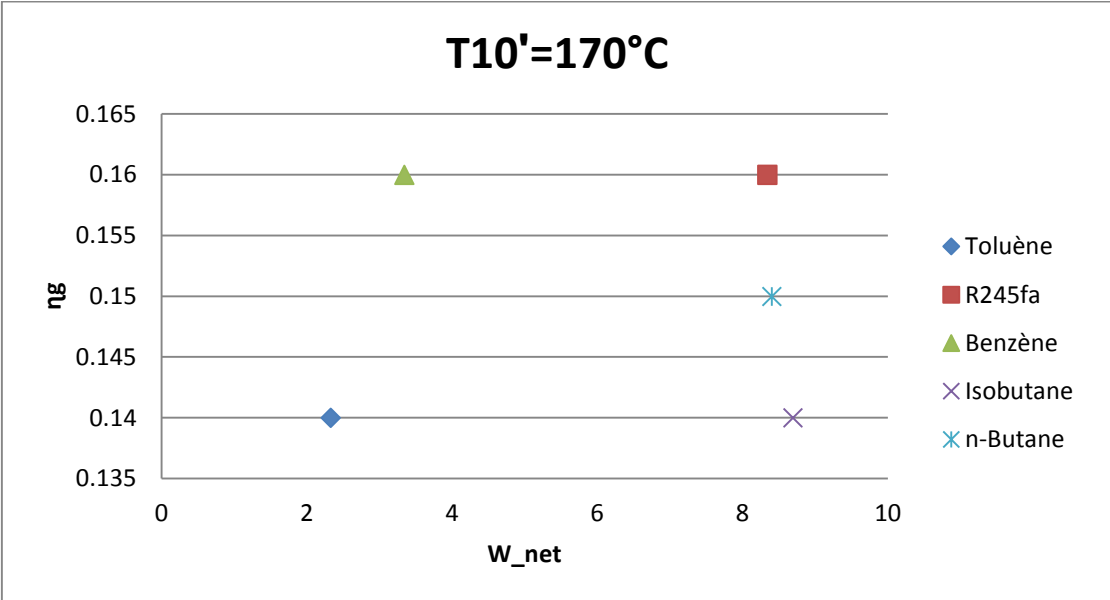


Fig. 4.8. W_Net et Rendement globale 170°C température

Chapitre 4 : Résultat et discussion

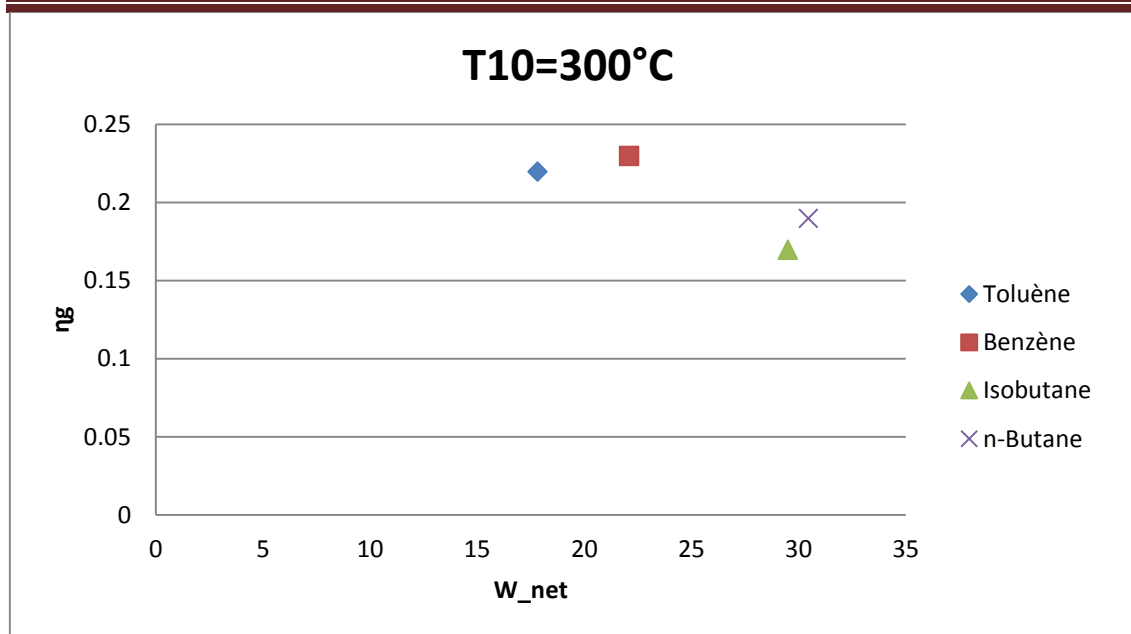


Fig. 4.9. W_Net et Rendement globale 300°C température

Le tableau 4.4 présente une comparaison de la performance globale entre les deux concentrateurs (Parabolique-Fresnel). En analysant les données du **tableau 4.5**, on constate que l'efficacité des fluides en concentrateurs Parabolique augmente significativement leurs performances par rapport à leurs moindres performances en concentrateurs de Fresnel, comme à la fois Toluène, Benzène, Isobutane et n-Butane Leur efficacité est passée de (0.14 ,0.16, 0.14 et 1.15) à (0.22, 0.23, 0.17 et 0.19) en ordre.

On note également l'absence de performance de R245fa en concentrateur parabolique à cause de sa température max est 166°C.

La même chose s'est produite dans le **tableau 4.5**, qui compare l'efficacité des deux concentrateurs, qui est considérée comme une mesure de la production d'énergie électrique, Étant donné que l'efficacité de concentrateur de Fresnel est très faible par à pour à concentrateur parabolique. Il suffit de noter la forte augmentation de Benzène de 3.34 à 22.08 [kW].

Chapitre 4 : Résultat et discussion

Tableau 4.4. Performance ORC (Parabolique/Fresnel) :

Rendement des fluides	parabolique	Miroir de Fresnel
Toluène	0.22	0.14
R245fa	Non défini	0.16
Benzène	0.23	0.16
Isobutane	0.17	0.14
n-Butane	0.19	0.15

Tableau 4.5. L'efficacité ORC (Parabolique/Fresnel) en [kW] :

Rendement des fluides	parabolique	Miroir de Fresnel
Toluène	17.80	2.33
R245fa	Non défini	8.34
Benzène	22.08	3.34
Isobutane	29.49	8.69
n-Butane	30.45	8.40

4.2. Comparaison :

Toutes les simulations suivantes ont été référées au benzène sur la base des résultats pour une comparaison précise du miroir parabolique et de Fresnel.

De plus, ils sont largement utilisés et disponibles et malgré leur inflammabilité, la température de flash est de 365°C, ce qui est supérieur à la température maximale du cycle.

Dans cette étude, on suppose que la température de la source de chaleur (huile thermique de la boucle solaire) et le débit massique sont respectivement égaux à 170 °C (pour Fresnel), 300 °C (pour le parabolique) et 1500 kg/h.

Les analyses suivantes ont été effectuées à partir des deux concentrateurs (parabolique et Fresnel) du système ORC. Les valeurs géométriques des échangeurs de chaleur et les performances du cycle ORC sont présentées dans le **tableau 4.6-4.7**.

Chapitre 4 : Résultat et discussion

Tableau 4.6. Performance ORC :

Centrale solaire Parabolique :						
Débit massique d'huile		\dot{m}_{oil}			5000 [kg/h]	
Température [°C]						
T10	T11	T12	T13			
300,0	294,8	282,7	270,0			
Puissance calorifique transférée			\dot{Q}		103,4 [kW]	
Circuit de refroidissement du condenseur						
Débit massique d'eau		\dot{m}_{eau}			14 709 [kg/h]	
Température d'entrée		$T_{w,\text{en}}$			10 [°C]	
Température de sortie		$T_{w,\text{out}}$			20 [°C]	
Système ORC						
Débit massique de fluide		\dot{m}_{ORC}			730.1 [kg/h]	
Température [°C]						
T1	T2	T3	T4 = T5	T6	T7	T8
40,0	41,2	100,3	230,4	280,8	130,4	61.30
Pression d'ébullition			P_{ev}		15.66 [bar]	
Pression du condenseur			P_{cond}		0.43 [bar]	
Puissance calorifique transférée [kW]						
Economizer	Evaporator	Superheater	Récupérateur	Condenser		
39	53.3	85.46	31	43.9		
Énergie électrique générée			W_{net}		22,59 [kW]	
Efficacité globale					22,05 %	
Economizer	Evaporator	Superheater	Récupérateur	Condenser		
67.8%	48.9%	76.7%	57.4%	26.3%		

Chapitre 4 : Résultat et discussion

Tableau 4.7. Performance ORC:

Centrale solaire de Fresnel :						
Débit massique d'huile		\dot{m}_{oil}			5000 [kg/h]	
Température [°C]						
T10	T11	T12	T13			
170,0	158,0	150,0	139,0			
Puissance calorifique transférée			\dot{Q}		103,4 [kW]	
Circuit de refroidissement du condenseur						
Débit massique d'eau		\dot{m}_{eau}			14 709 [kg/h]	
Température d'entrée		$T_{w,\text{en}}$			10 [°C]	
Température de sortie		$T_{w,\text{out}}$			20 [°C]	
Système ORC						
Débit massique de fluide		\dot{m}_{ORC}			730.1 [kg/h]	
Température [°C]						
T1	T2	T3	T4 = T5	T6	T7	T8
29.2	30,0	62.5	116.2	162.4	108.9	52.5
Pression d'ébullition			P_{ev}		15.66 [bar]	
Pression du condenseur			P_{cond}		0.43 [bar]	
Puissance calorifique transférée [kW]						
Economizer	Evaporator	Superheater	Récupérateur	Condenser		
31.7	42.02	60.30	20.95	28.83		
Énergie électrique générée			W_{net}		17,59 [kW]	
Efficacité globale					17,35 %	
Economizer	Evaporator	Superheater	Récupérateur	Condenser		
54.8%	31%	65.6%	42.5%	18.1%		

Chapitre 4 : Résultat et discussion

Pour simplifier les résultats des deux tableaux, les résultats seront représentés sur les **figures 4-(10,11, 12,13 et 14)**.

La figure 4.10 montre la différence entre la température de l'entrée d'huile T11 et des échangeurs de chaleur (Superheater, Evaporator et Economizer) pour chacun de concentrateur parabolique et concentrateur de Fresnel.

Où la température de l'entrée d'huile dans le concentrateur parabolique était estimée à 300, alors que dans le concentrateur de Fresnel elle était estimée à 170 au même moment de l'étude. Nous concluons que le concentrateur parabolique chauffe la source de chaleur (huile) plus rapide que le concentrateur de Fresnel de 56%.

Puis on remarque une diminution de la température des deux entrées thermiques qui servent à chauffer les échangeurs de chaleur, dans le concentrateur parabolique la température atteinte de Superheater 294,8°C, Evaporator 282,7°C et Economizer 270,0°C tandis que dans le concentrateur de Fresnel la température atteinte de Superheater 158°C, Evaporator 150°C et Economizer 139°C.

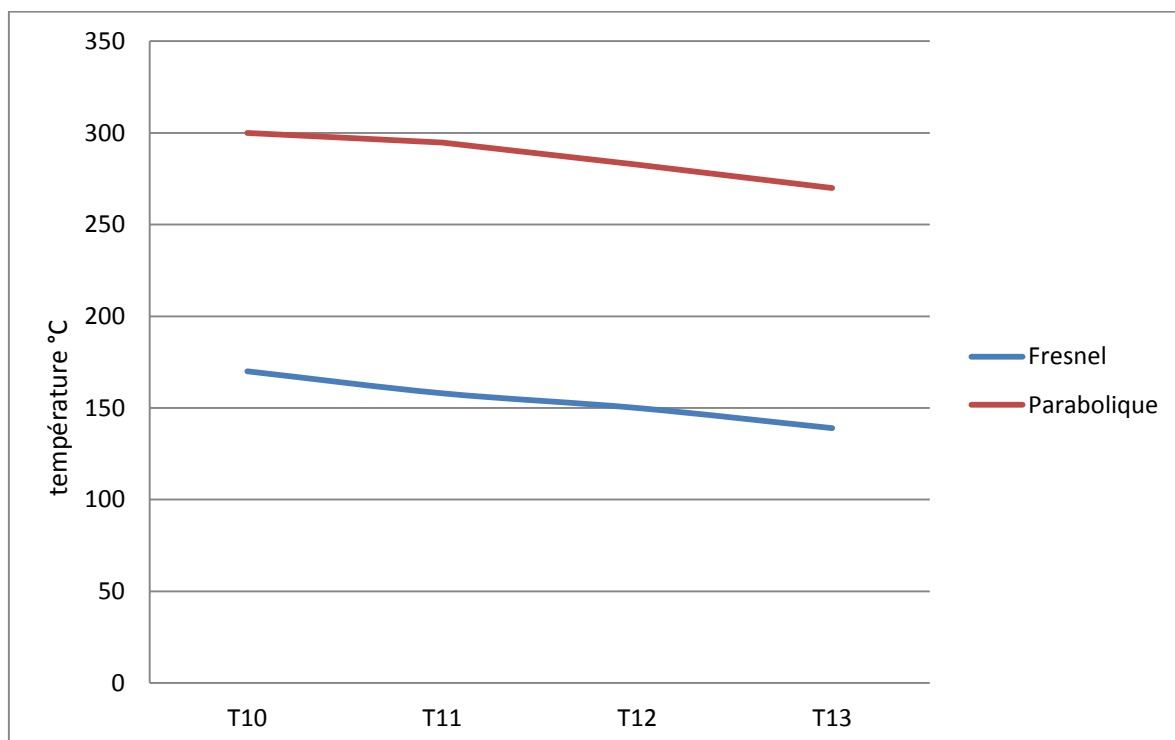


Fig. 4.10. Température d'huile et les échangeurs

Chapitre 4 : Résultat et discussion

La **figure 4.11** représente la température du benzène dans le cycle ORC

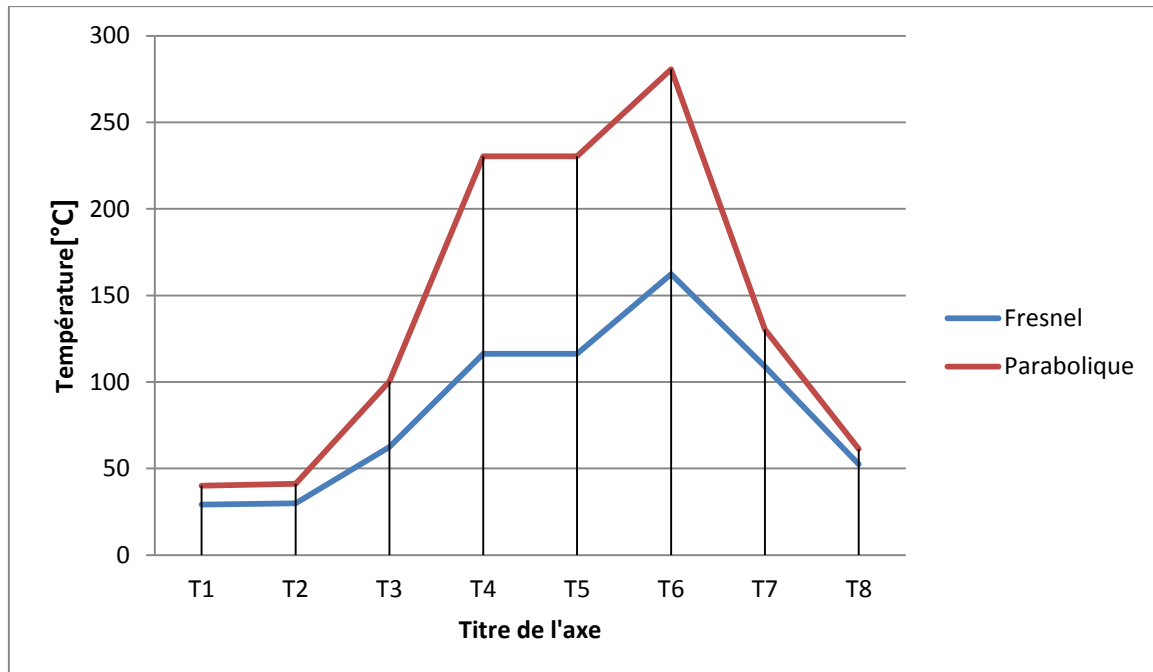


Fig. 4.11. Température de Benzène dans le cycle ORC

La **figure 4.12** représente la Puissance calorifique transférée de Benzène dans le cycle ORC

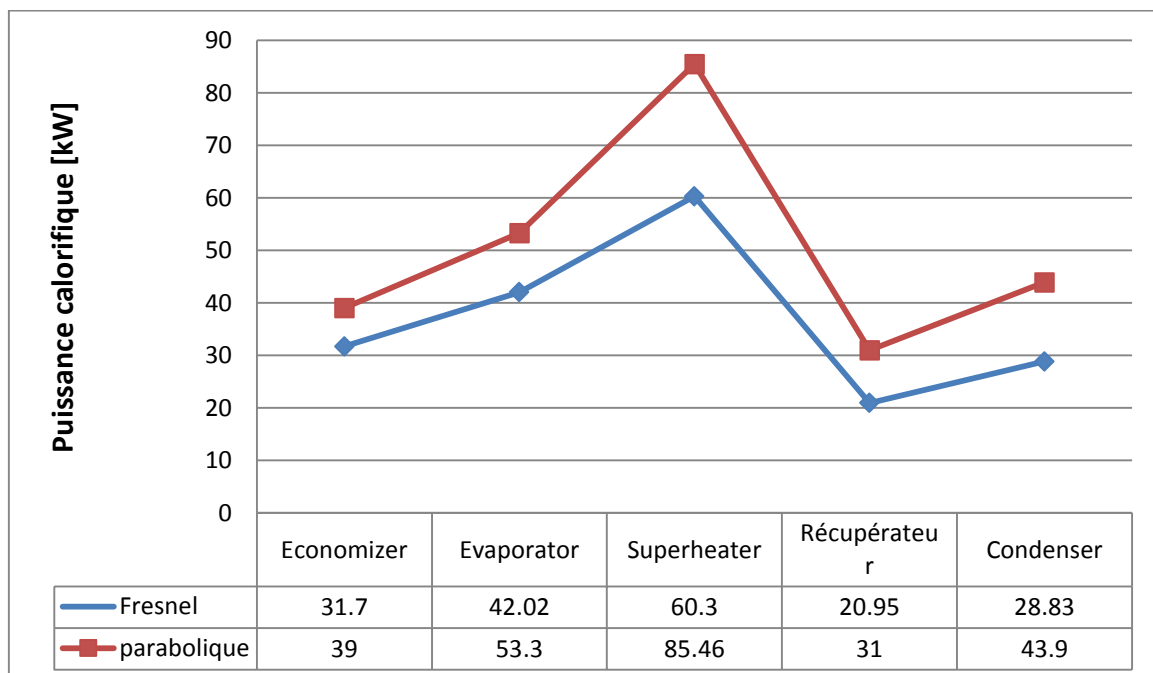


Fig. 4.12. Puissance calorifique transférée de Benzène dans le cycle ORC

Chapitre 4 : Résultat et discussion

La **figure 4.13** représente l'efficacité des échangeurs de Fresnel et Parabolique

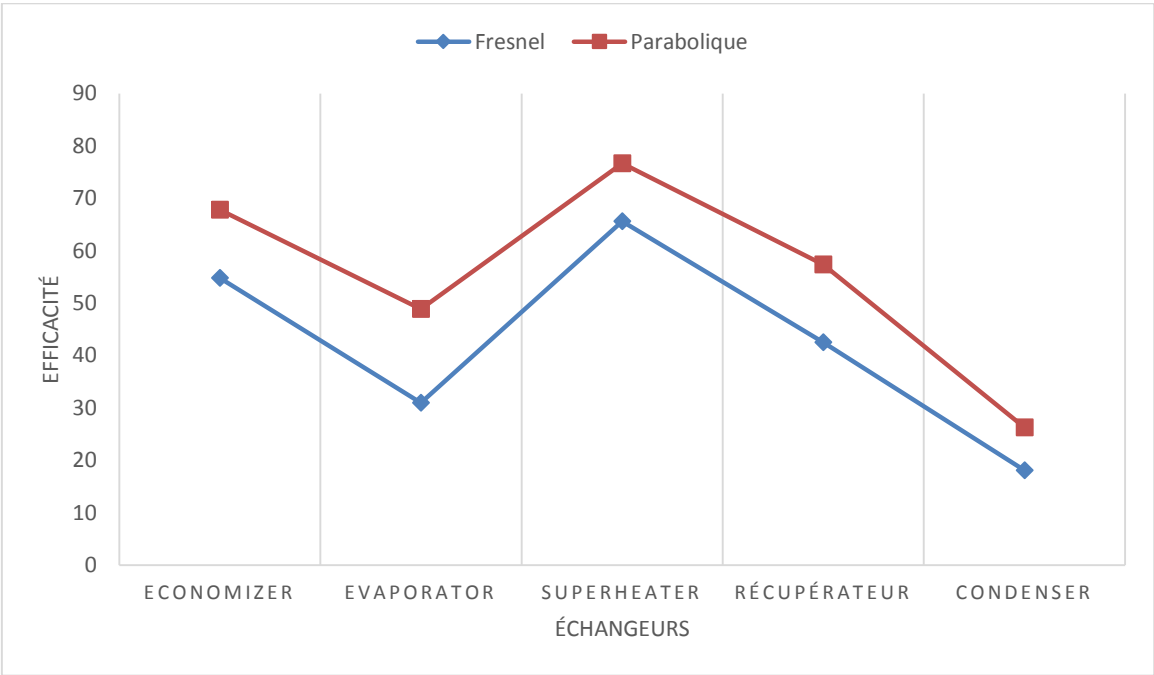


Fig. 4.13. Comparaison efficacité des échangeurs

La **figure 4.14** représente la W_{net} entre concentrateur Parabolique et Fresnel

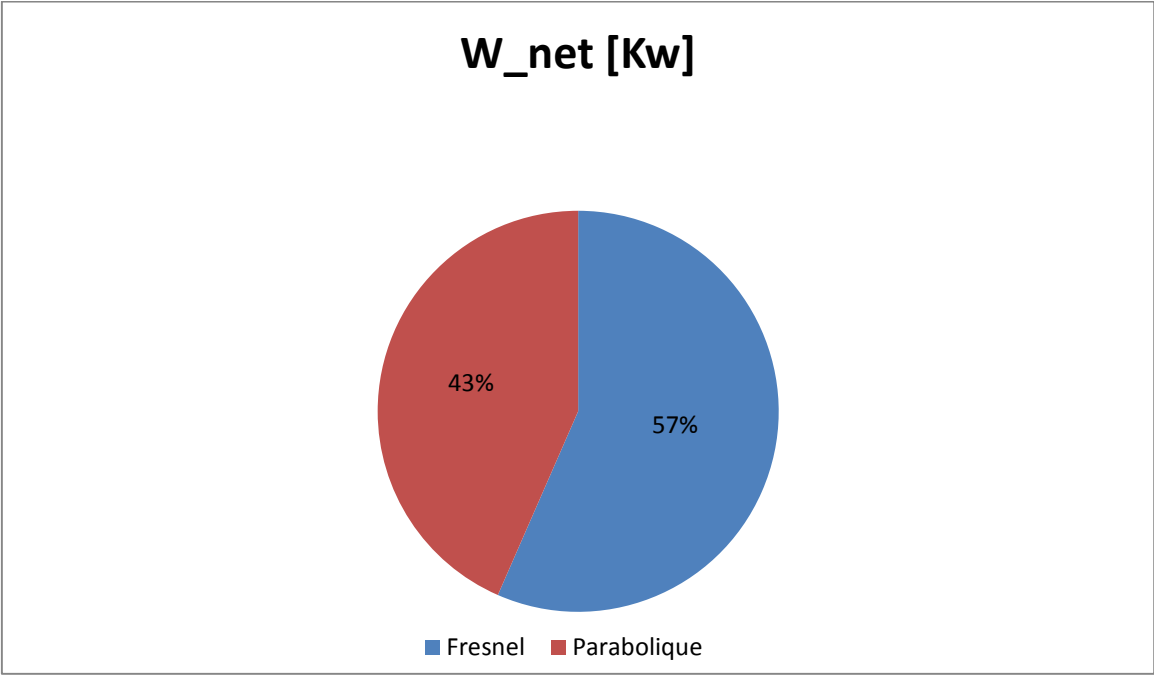


Fig. 4.14. W_{net} entre concentrateur Parabolique et Fresnel

Chapitre 4 : Résultat et discussion

La figure 4.15 montre une représentation du cycle thermodynamique du système à l'étude (Benzène) dans le graphique température-entropie. Le principe de fonctionnement du système peut être résumé comme suit :

Le fluide de travail quitte le condenseur sous forme de liquide saturé (état point 1) à la pression du condenseur. Ensuite, il est comprimé par la pompe à la pression de l'évaporateur et quitte la pompe elle-même sous forme de liquide sous-refroidi. Il circule à l'intérieur du récupérateur où il est préchauffé par la vapeur surchauffée (état point 2). Ensuite, le flux entre dans le générateur de vapeur, qui est divisé en trois échangeurs de chaleur différents : Economizer, Evaporator et Superheater.

Le fluide de travail, chauffé par l'huile diathermique, sort de l'Economizer sous forme de liquide saturé (état point 4) à la pression d'évaporation. Le chauffage se poursuit à l'intérieur de l'Evaporator jusqu'à ce que l'état de vapeur saturée soit atteint (état point 5). Ensuite, le fluide organique est surchauffé à l'intérieur du dernier échangeur de chaleur (état point 6).

Le cycle se poursuit avec la détente de la pression maximale à celle de le condenser (état point 7).

Le fluide de travail s'écoule dans le récupérateur où il assure le préchauffage du liquide sous-refroidi grâce à sa température élevée. Il quitte le récupérateur encore sous forme de vapeur surchauffée (état point 8) et atteint le condenseur. Ici se déroule la dernière phase du cycle.

Le flux est condensé par un fluide froid, à savoir de l'eau qui peut également être utilisée à des fins de cogénération à basse température et sort à nouveau du condenseur sous forme de liquide saturé (état point 1)

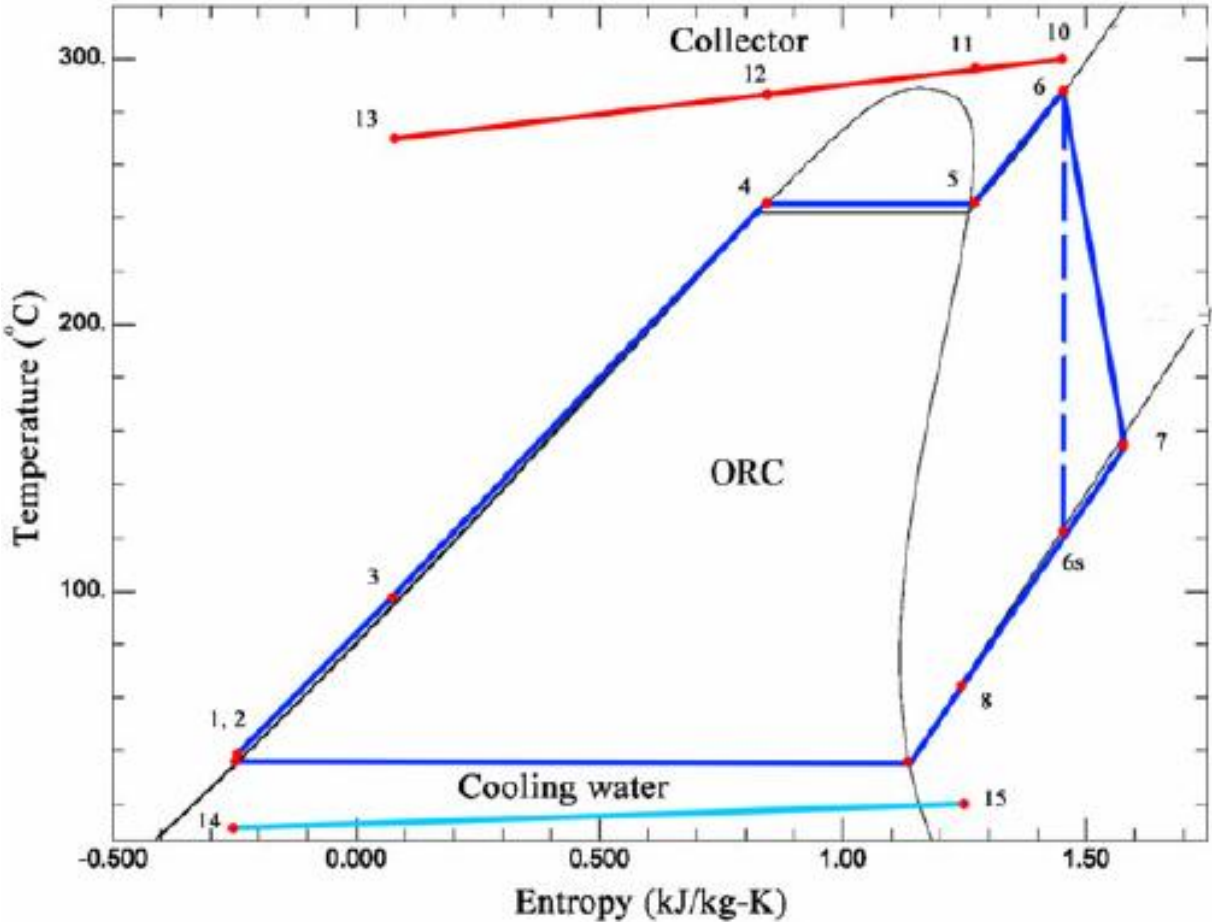


Fig. 4.15. Diagramme T-S ORC processus (Benzène) concentrateur parabolique

4.3. Conclusions :

Dans cette étude, un cycle ORC couplé à un concentrateur solaire parabolique et miroir de Fresnel a été étudié à petite échelle adapté à la production d'électricité distribuée. Cinq fluides de travail ont été examinés en cycle avec différentes températures et pressions de travail. En raison du faible débit massique des fluides organiques. Trois échangeurs de chaleur (Economizer, Evaporator et Superheater) ont été utilisés comme chaudière, entre le capteur solaire et le moteur ORC. L'effet des caractéristiques du cycle telles que la pression et la température d'entrée de la turbine sur l'efficacité du cycle, la puissance de sortie, l'efficacité du collecteur et le courant des échangeurs de chaleur ont été étudiés. Le cycle a été optimisé en termes de pression et deux températures déférant (170°C et 300°C) pour maximiser l'efficacité thermique. Parmi ces fluides, le Benzène montre les meilleures performances en termes d'efficacité (23,28%) et suivi du Toluène, n-Butane, Butane, Isobutane.

Le R245fa montre une efficacité de 16,67% dans les meilleures conditions principalement en raison de la température relativement basse.

THERMINOL VP-1 a été utilisé dans les deux concentrateurs solaire (parabolique et miroir de Fresnel) comme huile thermique commerciale largement utilisée et les spécifications du site pour le concentrateur solaire étaient basées sur la ville de Hassi-R'Mel. Pour les moteurs ORC solaires à grande échelle, un bon choix serait un concentrateur solaire parabolique, ce qui pourrait augmenter l'efficacité du cycle et la puissance de sortie. L'augmentation de la température de certains fluides organiques entraîne une amélioration continue de l'efficacité, mais la principale raison de l'efficacité relativement faible de ces fluides organiques est liée à des problèmes de sécurité tels que l'inflammabilité et l'explosion. Trouver une solution pourrait augmenter l'efficacité du cycle et faire du cycle organique de Rankine un cycle fiable, moteur à haut rendement pour la production d'énergie distribuée.

Conclusion générale

Conclusion générale

Conclusion générale :

La technologie ORC a connu une croissance significative depuis le début des années 2000 avec des augmentations énormes vues après l'année 2015 et s'est révélée efficace dans la production de travail à basse température avec des rendements et travail net du cycle raisonnables.

Deux modèles d'ORC fonctionnant à l'énergie solaire ont été étudiés dans le cadre de ce travail. Les performances des ORC évaluées ont été déterminées à l'aide de critères thermodynamiques. Parmi les mesures de performance utilisées dans ce travail figurent l'énergie produite, l'énergie dégagée, le rendement thermique. Cinq fluides de travail organiques R245fa, Toluène, Benzène, Isobutane, n-Butane ont été examinés pour le cycle organique de Rankine relié à un concentrateur parabolique et le cycle organique de Rankine relié à un concentrateur miroir de Fresnel.

Le benzène est le plus performant en termes de rendement thermique et puissance nette des fluides examinés pour les deux cycles. L'effet de la température ambiante a également été étudié pour les deux cycles. Il a été déterminé que la quantité d'irradiation solaire et les températures ambiantes influentes sur la quantité d'électricité produite.

Il a été étudié un ORC parabolique au deuxième chapitre, Sa température d'huile atteint 300 degrés Celsius et ORC miroir Fresnel au troisième chapitre, Sa température d'huile atteint 170 degrés Celsius en utilisant les mêmes fluides de travail organiques secs. Le benzène avait le rapport de pression et la plage de température les plus élevés et absolument a donné les meilleurs résultats parmi les examens fluides.

Le changement de source de chaleur s'est également avéré être un facteur important, comme le montrent les résultats, et que le concentrateur parabolique est meilleur que le concentrateur miroir de Fresnel, ce qui signifie que les températures plus élevées C'est souvent mieux comme source de chaleur.

Bibliographie :

- [01] Thomas Tartière et Marco Astolfi (2017), A World Overview of the Organic Rankine Cycle Market - IV International Seminar on ORC Power Systems, ORC2017 13-15 September 2017, Milano, Italy;
- [02] Colonna P, Casati E, Trapp C, et al. (2015) Organic Rankine Cycle Power Systems: From the Concept to Current Technology, Applications, and an Outlook to the Future. ASME. J. Eng. Gas Turbines Power;
- [03] Macchi E. (2016), Chapter 1 - Theoretical basis of the Organic Rankine Cycle in Organic Rankine Cycle (ORC) Power Systems: Technologies and Applications, 2016 ISBN: 978-0-08-100510-1;
- [04] Astolfi, M., Martelli E., Pierobon L. (2016) Chapter 7 - Thermodynamic and technoeconomic optimization of Organic Rankine Cycle systems in Organic Rankine Cycle (ORC) Power Systems: Technologies and Applications, 2016 ISBN: 978-0-08- 100510-1;
- [05] A project by Thomas Tartière, Map Template by Derek Eder. www.orc-world-map.org/ : 30/02/2018;
- [06] P. Lolos and E. Rogdakis (2009), A Kalina power cycle driven by renewable energy sources, vol. 34, (2009), pp. 457-464;
- [07] M.B. Ibrahim and R.M. Kovach, A Kalina cycle application for power generation, vol. 18, (1993), pp. 961-969;
- [08] C. Dejfors, E. Thorin, and G. Svedberg, Ammonia-water power cycles for direct-fired cogeneration applications, Energy Conversion and Management, vol. 39, 1998, pp. 1675-1681;
- [09] S. Quoilin, Technological and Economical Survey of Organic Rankine Cycle Systems. (2009);
- [10] <https://www.clean-energy-ideas.com/category/geothermal/geothermal-power>
- [11] Master's thesis by Kevin J. DiGenova (2011), Design of Organic Rankine Cycles for Conversion of Waste Heat in a Polygeneration Plant, Massachusetts Institute of Technology;
- [12] Sylvain Quoilin and Vincent Lemort, The Organic Rankine Cycle: Thermodynamics, Applications and Optimization ; Energy Systems Research Unit, University of Liège, Belgium;
- [13] Sylvain Quoilin and Vincent Lemort, The Organic Rankine Cycle: Thermodynamics, Applications and Optimization ; Energy Systems Research Unit, University of Liège, Belgium;
- [14] E.H. Wang, H.G. Zhang, B.Y. Fan, M.G. Ouyang, Y. Zhao, Q.H. Mu. Study of working fluid selection of Organic Rankine Cycle (ORC) for engine waste heat recovery. Energy, 36 (2011), pp. 3406–3418;
- [15] Performance Analysis of Organic Rankine Cycle Integrated with a Parabolic Through Solar Collector Milad Ashouri¹, Mohammad Hossein Ahmadi , Michel Feidt

Bibliographie

- [16] El-Wakil MM. Power plant technology. McGraw-Hill; 2002.
- [17] Therminol Heat Transfer Fluids by Solutia Inc. Therminol VP 1, <http://www.therminol.com/pages/products/vp-1.asp>; 2012.
- [18] Bianchi M, De Pascale A. Bottoming Cycles for Electric Energy Generation: Parametric Investigation of Available and Innovative Solutions for the Exploitation of Low and Medium Temperature Heat Sources. *Applied Energy*, 2011, 88, pp. 1500-1509.
- [19] Bundela PS, Chawla V. Sustainable development through waste heat recovery. *American Journal of Environmental Sciences* 2010;6(1):83–9.
- [20] M.B. Ibrahim and R.M. Kovach, A Kalina cycle application for power generation, vol. 18, (1993), pp. 961-969;
- [21] P. Lolos and E. Rogdakis (2009), A Kalina power cycle driven by renewable energy sources, vol. 34, (2009), pp. 457-464;
- [22] Master's thesis by Jaiyejeje Sunday Obafunmi (2014), Thermodynamic Analysis of Organic Rankine Cycles: Eastern Mediterranean University;
- [23] Junjiang Bao and LiZhao (2013) A review of working fluid and expander selections for organic Rankine cycle, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 24(2013)325–342 ;
- [24] Maizza V, MaizzaA. Unconventional working fluids inorganic Rankine-cycles for waste energy recovery systems. *Applied Thermal Engineering* 2001; 21(3):381–90;
- [25] Chen H, Goswami D Y, Stefanakos EK. A review of thermodynamic cycles and working fluids for the conversion of low-grade heat. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2010;14(9):3059–67;
- [26] Bejan, A., 1993. Heat Transfer. 1st Edn., John Wiley and Sons, New York, ISBN-10: 0471502901, pp: 675.
- [27] P. GARCIA, "Outils d'évaluation technico-économique et d'aide à la conception des centrales solaires thermodynamiques du futur," Docteur, Sciences Pour l'Ingénieur, Université de Perpignan, 2007.
- [28] R. GUILLO. (22/06/2010). Portail d'information dédié aux Energies renouvelables [Online]. Available: http://www.ecosources.info/dossiers/Centrale_miroir_Fresnel_solaire_thermodynamique.
- [29] Agence Nationale pour la Promotion et Rationalisation de l'Utilisation de l'énergie (APRUE). Le programme national de développement des énergies renouvelables. 2016. www.aprue.org.dz/.
- [30] Panna L S, Sarvia R M et Bhagoria J L 2009. "Thermal performance of linear Fresnel reflecting solar concentrator with trapezoidal cavity absorbers". *Applied Energy*, Volum 87, Pages 541-550

Bibliographie

- [31] Quoilin, S., S. Declaye and V. Lemort, 2010. Expansion machine and fluid selection for the organic rankine cycle. Proceedings of the 7th International Conference on Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics, (HTFMT' 10), Turkey.
- [32] Rayegan, R. and Y.X. Tao, 2011. A procedure to select working fluids for Solar Organic Rankine Cycles (ORCs). *Renew. Energy*, 36: 659-670. DOI: 10.1016/j.renene.2010.07.010
- [33] Dai, Y., J. Wang and L. Gao, 2009. Parametric optimization and comparative study of Organic Rankine Cycle (ORC) for low grade waste heat recovery . *Energy Conversion Manage.*, 50: 576-582. DOI: 10.1016/j.enconman.2008.10.018
- [34] Besma Chekchek, 2014 ; *Analyse thermodynamique d'une centrale thermique hybride solaire /gaz* ;
Thèse de magister, Université hadj lakhdar Batna, Algérie.
- [35] New Energy Algeria (NEAL), *Spécifications Techniques et Valeurs Garanties*, offre commerciale
n° 4D/6109. Chap.1.3, pp : 1-44. V. 10/10/2017