

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE



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

Projet de Fin d'Etudes Pour l'obtention du Diplôme de Master en Génie
Mécanique

Spécialité : **Energétique**

**Etude Thermodynamique et Paramétrique d'un Cycle
Organique de Rankine Géothermique**

Proposé et encadré par :

➤ Pr.B.Boumeddan

présenté par :

➤ Slimane Khaled
➤ Rerriballah Adda

Année universitaire 2019/2020

Remerciements

Avant tout, je remercie Dieu le tout Puissant, le Miséricordieux, de m'avoir donné le courage, la force, la santé et la persistance et de m'avoir permis de finaliser ce travail dans les meilleurs conditions.

On adresse notre remerciement le Professeur B.Boumeddane qui a très volontiers accepté d'être le promoteur de cette étude, sa grande connaissance dans le domaine et son expérience, joue un rôle important dans le travail du mémoire de fin d'étude.

Mes remerciements s'adressent aussi au président et l'ensemble des membres du jury qui m'ont fait l'honneur de juger ce travail.

Enfin, Je profite aussi de ces lignes pour exprimer toute ma gratitude aux enseignants et monsieur Mostapha Temmar le chef du département de Mécanique université Saad Dahlab Blida 1, qui m'ont encouragé et apporté leur précieux soutien au cours de mes études.

Dédicace

Je dédie ce mémoire à mes parents

Et

Ma famille

Et

Mes amis

SOMMAIRE:

SOMMAIRE:	III
Liste de Figure:	V
LISTE DES TABLAEAU :	VII
Nomenclature :	VIII
Résumé :	IX
INTRODUCTION GÉNÉRALE	XI
Introduction générale.....	1
CHAPITRE 1 : CYCLE ORGANIQUE DE RANKINE	3
1.1-HISTORIQUE :	3
1.2 : Le principe de fonctionnement :	4
1.2.1 : Rôle des Composants d'un model ORC simple :	4
1.3 : Les applications d'un système ORC :	6
1.3.1 : ORC et Solaire thermique :	6
1.3.2 : ORC et Géothermie :	7
1.3.3: ORC ET Biomasses:	8
1.3.4 : ORC et Récupération de la chaleur perdue :	9
1.4 : Les applications d'ORC dans le monde :	11
CHAPITRE 2 : ANALYSE THERMODYNAMIQUE D'UN SYSTÈME ORC/GEO	14
2.1 : Généralité de cycle Géothermie:	14
2.2: LA GÉOTHERMIE DANS LE MONDE	15
2.3 : Les utilisations possibles de la géothermie:	15
2.4 : Les types de la géothermie :	16
2.4.1 : La géothermie haute énergie :	16
2.4.2 : La géothermie basse énergie :	16
2.4.3 : La géothermie très basse énergie :	16
2.6 : Exemples sur des centrales Géothermique :	18
2.6.1 : Central Direct :	18
2.6.2 : CENTRALE A CYCLE BINAIRE	19
2.6.3 : CYCLE DE KALINA	20
2.6.4 : CYCLE COMBINE :	21
2.7 : principe de fonctionnement d'ORC et la Géothermie	21
2.7.1 : Cycle de Rankine	21
2.7.1.2 :Les étapes de principe :	24

2.7.2 : Cycle réel de Rankine :.....	24
2.7.3 : Description du système Cycle organique de Rankine géothermie :	27
2.7.3 : Cycle organique de Rankine :.....	28
2.7.4 : Cycle organique de Rankine avec un Récupérateur	28
2.7.5 : cycle supercritique :.....	29
CHAPITRE 3 : MODALISATION DE SYSTÈME ORC /GEO :	31
3.1 : programme utilisée :	31
3.2 : Modèles d'un system ORC :.....	31
3.2.1 : Modèle du détendeur (turbine) :.....	33
3.2.2 : Modèle de condenseur :.....	33
3.2.3 : Modèle de la pompe :.....	34
3.2.4 : modèle des échangeurs :.....	35
3.2.5 : Performance de système ORC/GEO	36
3.3 : Les fluides de travail utilisés.....	36
3.3.1 : Les caractéristiques des fluides utiles :.....	38
3.4 : La géothermie en Algérie	41
CHAPITRE 4 : RÉSULTAT ET DISCUSSION	44
4.1 : production de travail à partir les cas géothermie choisi :.....	44
4.1.1 : production de travail dans 1 er cas H.Sidi Bou Abdellah (Relizane) T° : 51 C° :.....	45
4.1.2 : Production de travail à 2eme cas H. Essalihine (Khenchela) T° :70C° :.....	46
4.1.3 : Production de travail à 3eme cas H. Chellala (Guelma) T° :98C° :	46
4.2 : Les effets des températures dans ORC :	47
4.2.1 : Les effets de la température à l'entrée de détendeur sur le rendement du cycle :.....	47
4.2.2 : Les effets de la température à l'entrée de détendeur de la surchauffe sur le travail net du cycle :.....	48
4.2.3 Les effets de la température de fluide de refroidissement sur le Rendement net du cycle :	49
4.2.4 : Les effets de la température de fluide de refroidissement sur le travail net du cycle :.	50
4.2.5 : Les effets de la température de panneaux de réinjection sur le travail net du cycle :	51
CONCLUSION GÉNÉRAL.....	52

Liste de Figure:

Figure1. 1: First “direct cycle” power plant, Serrazzano, Italy, 1923 (courtesy of ENEL).....4

Figure 1.2: schéma principe système ORC5

Figure 1.3 SCHÉMA SCHÉMATIQUE DU CYCLE DE RANKINE ORGANIQUE INTÉGRÉ AU SOLAIRE PARABOLIQUE6

Figure1.4 Schéma Géothermie ORC.....8

Figure1.5: Schéma ORC et biomasse.....9

Figure 1. 6 Schéma d’un system Récupération d’énergie ORC.....12

Figure 1. 1: La capacité en MW des installations d’ORC par des années.....13

Figure 2.1 : central de l’énergie géothermique.....14

Figure 2.2 : Principaux pays producteur d’électricité d’origine géothermique en 2016.....15

Figure 2.3 : ORC utilisant une ressource géothermique basse température.....18

Figure2.4 : Schéma Central Direct.....19

Figure 2.5 : Centrale géothermique binaire.....20

Figure 2.6: Schéma de Cycle de KALINA.....20

Figure : 2.7: Centrale géothermique à cycle combiné.....21

Figure 2.8 : Schéma du moteur de Rankine.....22

Figure 2.9 : Cycle idéal de Rankine dans le diagramme T-s de l’eau.....22

Figure 2.10 : Cycle idéal de Hirn dans le diagramme T-s de l’eau.....23

Figure 2.11 : Différence Entre le Cycle à Vapeur Réel et le Cycle de Rankine idéal.....26

Figure 2.12 : Cycle ORC géothermique, et le cycle dans le diagramme T-S.....27

Figure 2.13 : Diagramme schématique et T-S d’un cycle ORC.....28

Figure 2.14 : schéma d’un cycle organique de Rankine avec récupérateur.....29

Figure 2.15 : Diagramme T-S d’un ORC avec récupérateur.....29

Figure 2.16 : Le schéma et le diagramme de T-S d'ORC supercritique.....	30
Figure 3 .1 : Diagramme schématique du système ORC géothermie.....	31
Figure 3.2 : diagramme T-S du cycle ORC.....	31
Figure 3.3 : Définition isentropique pour un détendeur.....	33
Figure 3.4 : Définition isentropique pour une pompe.....	35
Figure 3.5 : Localisation des Resource Géothermique dans L'Algérie.....	42
Figure 4.1 : Cycle de Rankine organique avec paramètres d'entrée et de sortie avec puissance de sortie exemple de fluide R227ea (source:EES).....	44
Figure 4 .2 : Courbe du rendement du cycle avec la température à l'entrée du Détendeur. «Source EES».....	47
Figure 4. 3 : Courbe du travail net du cycle avec la température à l'entrée du détendeur.....	48
Figure 4.4 : Courbe du rendement du cycle avec la température de fluide de refroidissement.....	49
Figure 4.5 : Courbe du travail net du cycle avec la température de fluide de refroidissement	50
Figure 4 .6 : courbe de travail net de cycle avec la température de panneaux de réinjection.....	51

LISTE DES TABLAEAU :

Tableau 2.1 : L'effet des irréversibilités sur la performance du cycle est illustré par les expressions suivantes.....	26
Tableau 3.1 : La température et pression critique pour différents fluides organiques purs qui peuvent être considéré comme fluide de travail.....	37
Tableau 3.2: Données physiques et environnementales des fluides de travail utilisés dans la simulation.....	40
Tableau 3.3 : Principales Caractéristiques physico-chimiques de quelques sources thermales du Nord de l'Algérie.....	42
Tableau 4.1: Les résultats pour les 5 fluides de travail à la température de source chaude de 51[C°] « H.Sidi Bou Abdellah (Relizane))» Source EES.....	45
Tableau 4.2 : Les résultats pour les 5 fluides de travail à la température de source chaude de 70[C°] « H.Essalihine (Khenchela))» (Source EES).....	45
Tableau 4.3: Les résultats pour les 5 fluides de travail à la température de source chaude de 98[C°] « H.Chellala (Guelma))» (Source EES).....	46

Nomenclature :

Parametrs	Unite
\dot{m}_f : débit massique de fluide de travail	Kg / s
\dot{m}_{geo} : débit massique de fluide géothermique	Kg/s
\dot{m}_{cw} : débit massique de fluide de refroidissement	Kg/s
Q_{chaud} : la quantité de chaleur échangée	Kw
h : enthalpie	KJ/KG
C_p = capacité thermique spécifique	KJ/kg° C
T_a = température du fluide géothermique entrant dans l'évaporateur	° C
T_c = Température du fluide géothermique sortant du préchauffeur	°C
T_b : Température du fluide géothermique sortant du l'évaporateur	°C
ΔT_1 : Température du système de chauffage	/
ΔT_2 : Température de system de refroidissement	/
W_{pump} : Travail de la pompe d'alimentation	KW
η_{is_p} Efficacité de la pompe isentropique.	%
W_{tur} : Puissance produite par le turbine	KW
W_{net} : Puissance nette de la centrale	KW
s : Entropie	kJ/kg°C
P : pression	bar
GNC : gaz non condensé	/

Résumé :

Le monde s'intéresse au développement de technologies de production d'énergie propre. Ainsi, de nouvelles perspectives, telles que la conversion thermodynamique de l'énergie solaire ou géothermique, sont offertes à la recherche sur les énergies renouvelables. La géothermie et le soleil sont des sources d'énergies renouvelables les plus abondantes, elles sont gratuites et inépuisables.

L'une des technologies les plus courantes, efficace et d'exploiter ce type de ressource est la technologie du cycle binaire. Le cycle de Rankine organique (ORC) est l'un des principaux types de cycles binaires. La production d'électricité à partir d'énergie géothermique à faible enthalpie à l'aide de l'ORC est une technologie talentueuse.

Dans ce travail, nous étudierons le cycle organique de Rankine fonctionnant avec des sources géothermiques et l'effet des différentes températures sur le travail net et le rendement du cycle. Ce travail nous permet également de comparer cinq fluides différents et d'en connaître les meilleurs.

Abstract :

The world is interested in developing technologies for producing clean energy. Thus, new perspectives, such as the thermodynamic conversion of solar or geothermal energy, are offered to research on renewable energies. Geothermal energy and the sun are the most abundant sources of renewable energy, they are free and inexhaustible.

One of the most common technologies, efficient and to exploit this type of resource is the binary cycle technology. Organic Rankin Cycle (ORC) is one of the main types of binary cycles. Electricity generation from low enthalpy geothermal energy using ORC is a talented technology.

In this work we will study the organic Rankin cycle operating with geothermal sources and the effect of different temperatures on the work and the efficiency of the cycle. This work also allows us to compare five different fluids and know the best ones.

ملخص:

يهتم العالم بتطوير تقنيات لإنتاج طاقة نظيفة. وبالتالي يتم تقديم وجهات نظر جديدة للبحث في الطاقات المتجددة ، مثل التحويل الحراري الديناميكي للطاقة الشمسية أو الطاقة الحرارية الأرضية . الطاقة الحرارية الأرضية والشمس هما أكثر مصادر الطاقة المتجددة وفرة، وهما مصدران لطاقة مجانية وغير نافذة.

واحدة من أكثر التقنيات شيوعًا وفعالة واستغلال هذا النوع من الموارد هي تقنية الدورة الثنائية. دورة رانكين العضوية (ORC) هي واحدة من الأنواع الرئيسية للدورات الثنائية. يعد توليد الكهرباء من الطاقة الحرارية الأرضية المنخفضة المحتوى الحراري باستخدام تقنية ORC موهبة.

في هذا العمل سنقوم بدراسة دورة رانكين العضوية العاملة بمصادر الحرارة الأرضية وتأثير مختلف درجات الحرارة على العمل الصافي و كفاءة الدورة كما يسمح لنا هذا العمل بمقارنة خمسة موائع مختلفة ومعرفة أفضلها.

INTRODUCTION GÉNÉRALE

INTRODUCTION GENERALE

Introduction générale

Durant les dernières années, une augmentation significative des besoins énergétiques, une raréfaction des ressources fossiles et des préoccupations environnementales de plus en plus importantes sont observées. L'objectif mondial est de trouver les meilleures solutions pour trouver des systèmes alternatifs qui contribuent l'économie d'énergie et pour la protection de l'environnement, Pour cela, il faut chercher à développer des centrales thermiques à émissions réduites pour satisfaire des performances environnementales et des centrales à rendement élevé et pour satisfaire ses performances .

Les machines à Cycle Organique de Rankine (ORC) fonctionnent selon le même principe que le cycle de Rankine qui utilise l'eau comme fluide de travail dans des turbines à vapeur. Ces machines permettent de transformer de l'énergie thermique en énergie électrique. La chaleur récupérée va être utilisée pour chauffer puis vaporiser le fluide organique, qui sera ensuite détendu dans une turbine alimentant un générateur. Le fluide est ensuite condensé pour recommencer le cycle. Les récupérations de chaleur dans le process qui abordait essentiellement les récupérations de chaleur pour des besoins en chaleur. Nous aborderons ici la récupération de chaleur pour la production d'électricité, optimisation qui peut avoir tout son sens dans certains cas, et notamment grâce au développement actuel de la technologie ORC (Organique Rankine Cycle). Cette technologie permet par ailleurs la valorisation électrique (et éventuellement thermique) d'autres sources de chaleur renouvelables comme la biomasse, le solaire à concentration et la géothermie.

L'énergie géothermique peut être largement utilisée pour le chauffage et le refroidissement, mais aussi pour produire de l'électricité. compris les sources à basse et haute température, nous pouvons choisir parmi plusieurs options afin d'utiliser ces sources d'énergie géothermique.

Aujourd'hui, la géothermie est la troisième énergie renouvelable effectivement exploitée dans le monde après la biomasse et l'hydraulique. L'utilisation de l'énergie géothermique est en pleine expansion, elle est développée dans une soixantaine de pays, comme par exemple les Etats-Unis, le Japon, l'Islande, la Nouvelle-Zélande, les Antilles françaises et la Suisse.

L'Algérie dispose de nappes et de sources d'eau chaude dont les températures s'échelonnent entre 20°C et 98°C. Au Nord il existe environ 200 sources thermales, dont la température varie de 22°C à 90 °C, et au bassin sédimentaire du bas Sahara compte d'énormes réserves d'eau chaudes varie de 50°C à 56°C.

Ce travail est pressante l'étude thermodynamique et paramétrique d'un système ORC basé sur l'énergie géothermie a base température pour améliorer ces performances par varié les paramètres qui influent sur le travail net et le rendement du cycle.

INTRODUCTION GENERALE

Chapitre 1

L'historique de la technologie ORC, et les applications d'un système ORC et son utilisation dans le monde aujourd'hui.

Chapitre 2 :

Etude thermodynamique du système ORC simple, et cycle géothermique a été faite pour déterminer les différentes puissances des différents composants constituant le système , aperçu sur les différents cycle géothermie . Et certaines des modifications importantes qui peuvent être apportées pour améliorer ses performances.

Chapitre 3 :

Modélisation du cycle géothermique et cycle organique de Rankine ORC_GEO

Et aperçu sur le différent fluide de travail avec trois sources géothermie en L'Algérie

Chapitre 4 :

Les résultats obtenus à partir de trois sources chaudes de températures de 51, 70°C et 98°C sont présentés et discutés. Et l'influence de température l'entrée de détendeur et fluide de refroidissement et réinjection.

Enfin ce travail se termine par une conclusion générale présentant une synthèse des résultats trouvés par logiciel EES.

CHAPITRE 1 : CYCLE ORGANIQUE DE RANKINE

Chapitre 1 : CYCLE ORGANIQUE DE RANKINE

1.1-HISTORIQUE :

Depuis plus de deux siècles, la thermodynamique a permis de comprendre comment transformer l'énergie thermique (chaleur) en énergie mécanique (travail, électricité). Cette transformation est réalisée grâce à des cycles thermodynamiques théorisés par Carnot dont un des plus connus est le cycle de Rankine.

Le cycle de Rankine, qui tient son nom de WILLIAM RANKINE, est un procédé utilisé dans toutes les centrales à vapeur pour transformer l'énergie thermique en énergie électrique.

Guillaume J.M. Rankine a développé une théorie complète du moteur à vapeur dans son manuel réputé de 1859. Pourtant, dès 1825–1826 Thomas Howard a construit un moteur en utilisant "de l'alcool" ou "un éther" comme le liquide travaillant. Les auteurs différents y font allusion et fournissent une description. Il semble que le moteur, avec un pouvoir de design de 24 HP (environ 18 kW), a travaillé pendant une période brève dans Rotherhithe, Surrey, Royaume-UK. [1]

Le 9 janvier 1885, le journal britannique l'Ingénieur a publié un article qui décrit les résultats d'une épreuve exécutée par une commission des ingénieurs navals américains sur un moteur de lancement. Le moteur utilisé comme son liquide travaillant une solution d'eau et d'alcool méthylique (avec 5–15 alcools méthyliques). La commission a fait une comparaison rigoureuse avec la performance du même moteur dans le cas où la vapeur était le liquide travaillant. Cette épreuve a montré que la consommation spécifique du combustible du moteur était 5.07 livres de charbon par cheval-vapeur horaire si la mixture était le liquide travaillant, pendant que la consommation spécifique était 5.76 livres de charbon par cheval-vapeur horaire dans le cas où le moteur a été fait marcher sur la vapeur. Étant donné le prix du marché d'alcool méthylique et de la fuite excessive de liquide du moteur, les résultats économiques étaient nettement défavorables pour le moteur de mixture binaire.[1]

Pourtant, ce n'est que le 20ème siècle la technologie ORC a été développée intensivement. Entre 1961 et 1962, Harry Zvi Tabor et Lucien Bronicki a construit des moteurs Rankine différents en utilisant monochlorobenzène à une température maximum de 140-150 °C et avec la capacité de pouvoir dans la gamme de 2-10 kW.

La première centrale d'ORC binaire géothermique a été installée en 1967 dans la péninsule Kamchatka de l'Union soviétique. Le liquide travaillant était les 12 réfrigérants et l'entraîne a présenté un pouvoir brut de 680 kW. La source d'énergie thermique était de l'eau géothermique à la température basse (80 °C). [15]

Chapitre 1 : CYCLE ORGANIQUE DE RANKINE

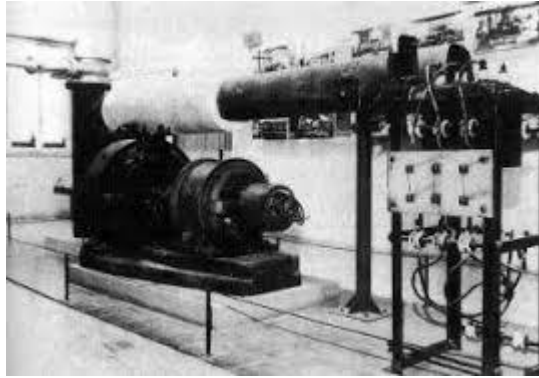


Figure1. 1: First “direct cycle” power plant, Serrazzano, Italy, 1923 (courtesy of ENEL).

Aujourd'hui les systèmes de pouvoir d'ORC sont avec succès employés dans les nombres grandissants pour géothermique et la conversion de pouvoir de biomasse et ont atteint l'intégrité complète et le prix compétitif. Les applications nouvelles et excitantes conduisent beaucoup d'efforts de développement et de recherche, en ouvrant la voie à un avenir encore plus prospère à cette technologie d'énergie renouvelable. [2]

1.2 : Le principe de fonctionnement :

Le principe de base d'un ORC est celui d'une machine diatherme qui consiste à récupérer l'énergie thermique d'un fluide chaud en le refroidissant et de convertir une partie de cette énergie en énergie mécanique (et ensuite en électricité). Le rendement de conversion d'une machine diatherme, défini par le rapport de l'énergie électrique produite sur la quantité d'énergie thermique cédée par le fluide chaud, est limité par le second principe de la Thermodynamique au rendement de Carnot. Ce rendement de Carnot, égal au rapport de la différence de température entre la source chaude et l'environnement et de la température de la source chaude, augmente avec la température de la source chaude. Les cycles Organiques de Rankine (ORC) sont basés sur le cycle de Rankine « classique » à la différence que le fluide de travail est non pas l'eau, mais bien un fluide organique (par exemple, un réfrigérant ou un hydrocarbure) caractérisé par température d'ébullition inférieure (à la même pression). L'avantage des cycles ORC par rapport aux cycles de Rankine à eau dits « classiques » est de permettre une conception plus simple de la chaudière et de sa régulation lorsque le niveau de température de la source chaude est faible. Typiquement, la technologie ORC permet actuellement de récupérer la chaleur de sources chaudes dont la température est comprise entre 90°C et 300°C (seuils technico-économique car en théorie, l'ORC pourrait également récupérer la chaleur d'une source chaude à 28°C...). Pour un cycle à eau, ce seuil de rentabilité se trouve au-delà des 400°C. [3]

1 .2.1 : Rôle des Composants d'un model ORC simple :

Un module ORC comprend 4 composants principaux : un évaporateur, une machine de détente, un condenseur et une pompe.

Chapitre 1 : CYCLE ORGANIQUE DE RANKINE

1.2.1.1 : POMPE : En sortie de pompe, en l'absence de récupérateur sur le cycle, le fluide organique à l'état liquide à haute pression est dirigé vers l'évaporateur.

1.2.1.2 : Evaporateur : Le fluide y est réchauffé jusqu'à la température d'ébullition, vaporisé et éventuellement surchauffé. La vapeur du fluide organique produite dans l'évaporateur (grâce à la chaleur cédée par la source chaude) est ensuite détendue dans la turbine pour produire de l'électricité.

1.2.1.3 : Turbine : En fonction de la nature du fluide, en fin de détente, le fluide est soit à l'état de vapeur surchauffée (fluide sec) ou à l'état diphasique (fluide humide). Dans le cas de l'utilisation d'un fluide sec, la détente dans la turbine ORC se fait en permanence à l'état de vapeur. De plus, en présence d'un fluide sec, il est possible de récupérer une partie de l'énergie thermique (sensible) de la vapeur de fluide organique et d'augmenter ainsi le rendement du cycle en préchauffant le fluide organique en sortie de pompe à travers un échangeur de chaleur appelé « récupérateur » ou « régénérateur » (cf. graphique). A la sortie du récupérateur, la vapeur passe alors dans le condenseur.

1.2.1.4 : Condenseur : Dans le condenseur, le fluide est éventuellement refroidi jusqu'à la température de condensation (fluide sec), condensé et sous-refroidi. Notons que le sous-refroidissement peut être assuré par un échangeur spécialement dédié à cet effet. Le fluide à l'état liquide et à basse pression est ensuite amené à la haute pression au moyen de la pompe.

[3]

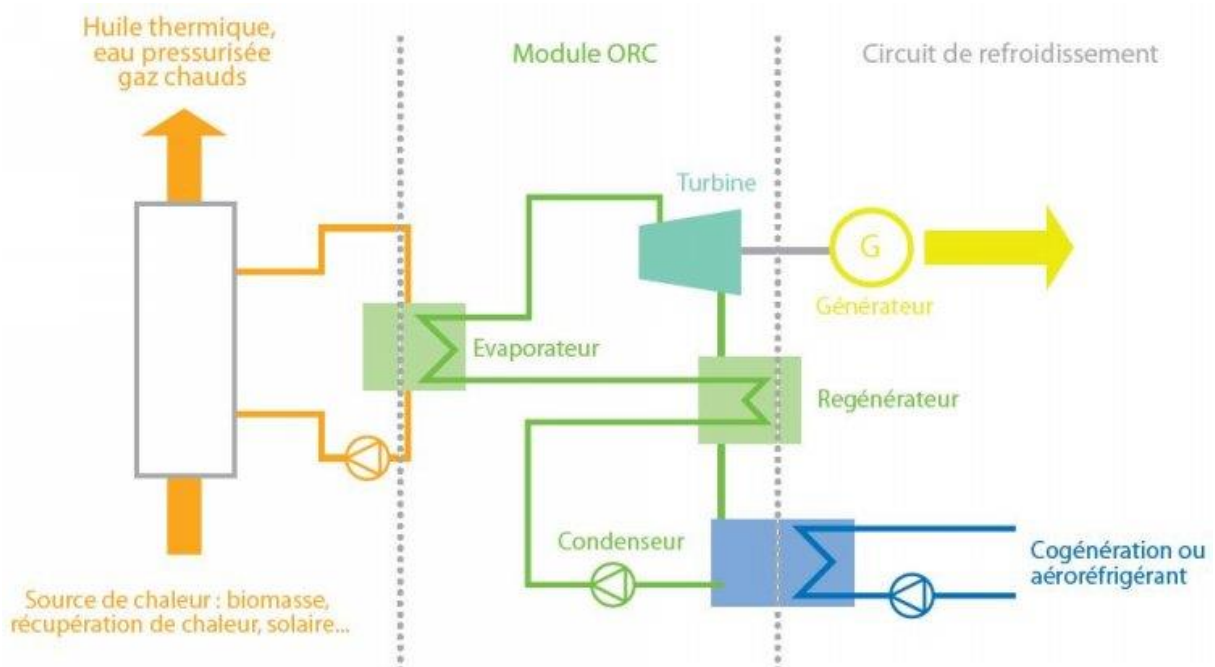


Figure 1.2: schéma principe système ORC

Chapitre 1 : CYCLE ORGANIQUE DE RANKINE

1.3 : Les applications d'un système ORC :

La technologie de l'ORC peut être appliquée à la récupération de chaleur industrielle, mais également au renouvelable : solaire thermique, géothermie et biomasse. De manière générale, elle peut être utilisée pour des applications à « basse » température (soit en dessous de 200°C).

1.3.1 : ORC et Solaire thermique :

Les centrales solaires à concentration constituent en une centaine de miroirs concentrant les rayons du soleil vers un « collecteur ». Cela permet d'avoir une température de fluide caloporteur entre 100 et 500°C. Le système de génération de puissance le plus utilisé est le cycle de Rankine vapeur traditionnel, ou autrement dit la turbine vapeur. Toutefois, la turbine nécessite des températures élevées (l'efficacité diminue si la température descend en dessous de 300°C) et l'investissement turbine est important. Le champ solaire doit donc être obligatoirement de taille importante. Pour des champs solaires plus petits ou à plus faible ensoleillement, la température du collecteur est plus faible (en-dessous de 300°C donc), l'ORC peut être utilisé pour produire de l'électricité.

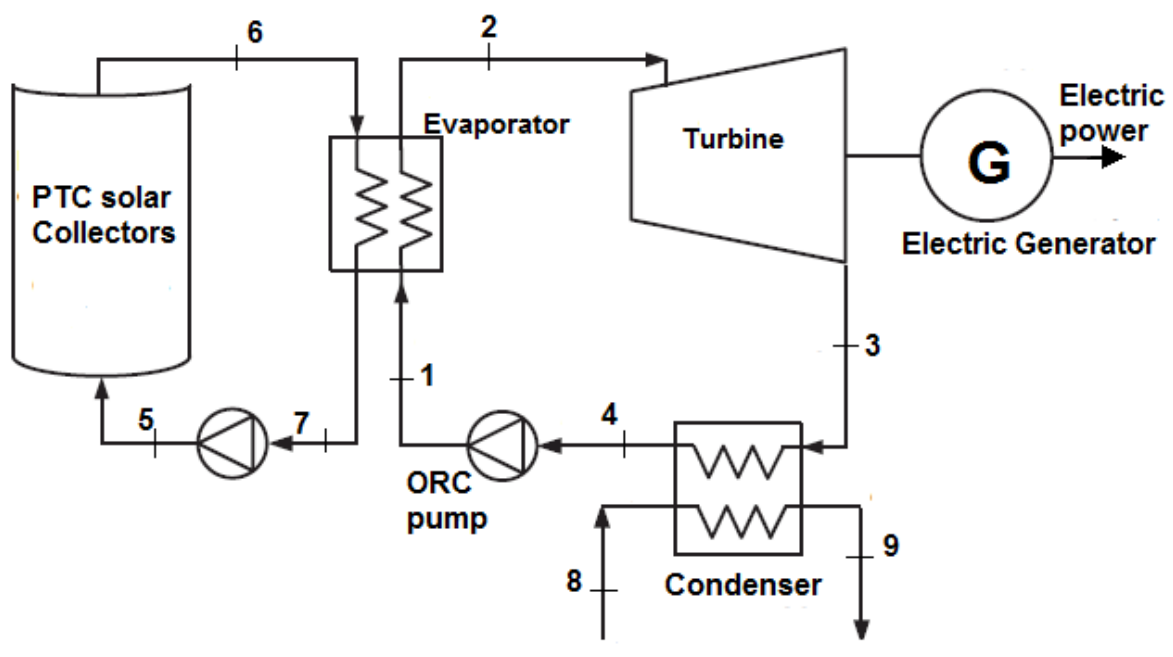


Figure 1.3: SCHÉMA SCHÉMATIQUE DU CYCLE DE RANKINE ORGANIQUE INTÉGRÉ AU SOLAIRE PARABOLIQUE

Chapitre 1 : CYCLE ORGANIQUE DE RANKINE

1.3.2 : ORC et Géothermie :

On distingue trois catégories de réservoirs géothermiques, en fonction de leurs niveaux de température :

- Très basse énergie (max 40°C) : les applications sont le chauffage des bâtiments par échange direct ou pompe à chaleur.
- Basse énergie (entre 50°C et 80°C) : les applications sont le chauffage par géothermie profonde, typiquement pour l'alimentation d'un chauffage urbain.
- Haute énergie (dès 100°C et jusque 200 et 250°C) : les applications sont ici la production d'électricité.

Par ailleurs, on peut également classifier les réservoirs géothermiques en fonction de l'état du fluide géothermique : liquide pressurisé, mélange liquide/vapeur ou vapeur surchauffée (vapeur « sèche »).

Afin de valoriser cette chaleur, il existe plusieurs types de centrale notamment en fonction de la température et de l'état du fluide géothermique :

- Centrale à cycle direct : utilisée dans le cas où le fluide géothermique est de la vapeur « sèche » (elle est au-dessus du point de saturation et ne contient plus de gouttelettes d'eau). Cette vapeur est directement envoyée dans une turbine. Cette turbine pourra également être à condensation ou à contre-pression. Dans ce dernier cas de figure, la vapeur en sortie turbine pourra être récupérée chez un utilisateur de chaleur et on aura donc une cogénération.
- Centrale à cycle indirect à condensation : utilisée dans le cas où la vapeur est trop corrosive. Cette vapeur transmet alors sa chaleur à de l'eau douce qui sera envoyée dans la turbine.
- Centrales à cycle à vaporisation (centrales à simple flash ou double flash) permettent d'exploiter les sites où le fluide géothermique se présente sous forme de liquide pressurisé ou de mélange liquide-vapeur. C'est aujourd'hui le type de centrale le plus employé. Le fluide géothermique commence alors par être détendu dans une chambre à pression inférieure à celle du puits, ce qui permet d'en vaporiser une partie, qui est ensuite détendue dans une turbine. La phase liquide est quant à elle renvoyée vers le puits de réinjection.

Binary Cycle Power Plant Example

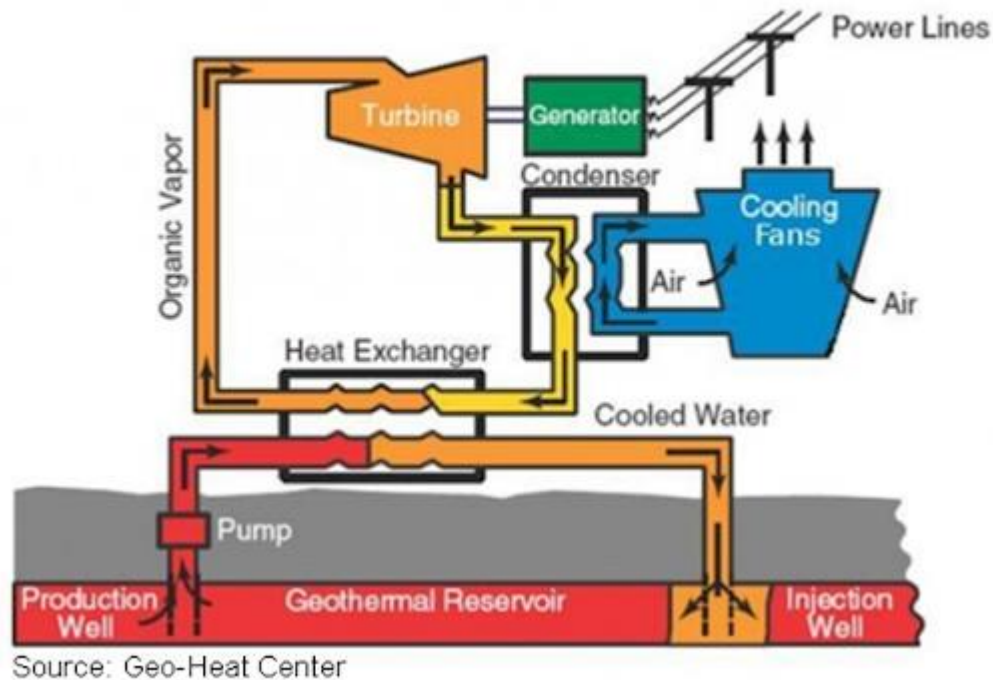


Figure1.4 Schéma Géothermie ORC

1.3.3: ORC ET Biomasses:

La biomasse est brûlée dans une chaudière à huile thermique. Cette huile à 320-330°C alimente ensuite un module ORC pour la production d'électricité. De manière à augmenter l'efficacité globale de la centrale de cogénération, un économiseur sur l'huile, un préchauffeur de l'air de combustion et un économiseur sur l'eau peuvent être utilisés.

.Le fluide organique de l'ORC évolue lui entre des températures d'évaporation et de condensation respectivement de l'ordre de 280°C et de 120°C. Cela permet de produire au condenseur une eau chaude à 90°C qui peut donc également être valorisée à son tour (dans un réseau de chauffage urbain). On parle à ce moment de production combinée de chaleur et d'électricité ou plus simplement de cogénération.

Une centrale ORC à biomasse peut ainsi produire uniquement de l'électricité ou être à cogénération si on valorise la chaleur. Notons que dans la majorité des cas, de manière à maximiser la rentabilité économique de la centrale.

Cette technologie est toutefois évidemment en concurrence avec les centrales thermiques avec turbine à vapeur pour les applications de grandes puissances. Mais la centrale à ORC permet de rendre également possible la cogénération biomasse de petite puissance.

Chapitre 1 : CYCLE ORGANIQUE DE RANKINE

La biomasse, elle, peut-être par exemple du bois ou des déchets verts. Ce type de centrale fonctionnant en mode cogénération est ainsi un exemple de production d'énergie pour les éco-quartiers.

D'un point de vue environnemental, l'installation de petites centrales biomasse est très intéressante car cela permet de réduire le rayon de collecte du combustible (et donc de diminuer le nombre de kilomètres parcourus par les camions).

Rappelons toutefois qu'il est nécessaire, au stade du projet, de mener préalablement une réflexion sur la priorité de l'utilisation de la ressource biomasse (ne brûlons pas le bois qui peut être utilisé comme matière première...).

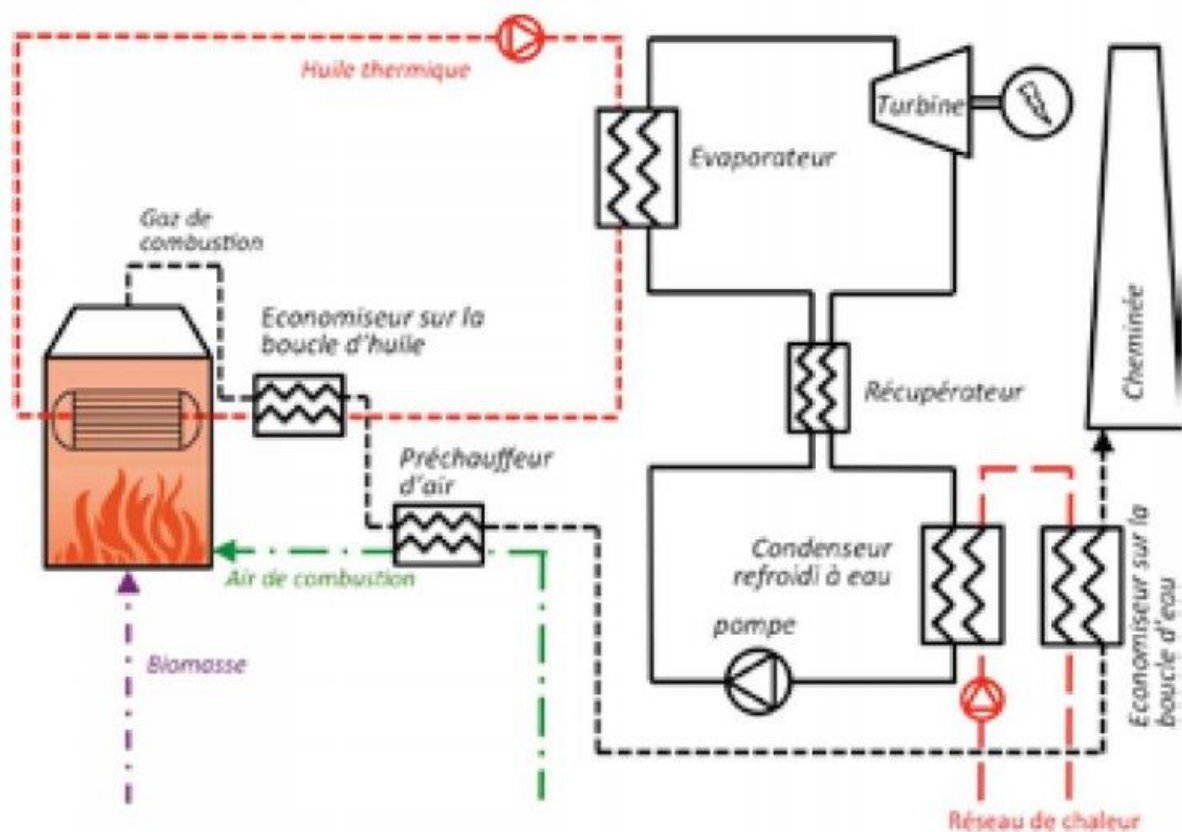


Figure1.5: Schéma ORC et biomasse

1.3.4 : ORC et Récupération de la chaleur perdue :

La chaleur fatale est, au sens premier, un rejet d'énergie thermique non récupéré. En théorie, la chaleur fatale peut être valorisée sous forme de :

- Chaleur
- Electricité

Chapitre 1 : CYCLE ORGANIQUE DE RANKINE

De manière générale, vu les inévitables pertes de rendements et les investissements à consentir, nous considérons que la priorité est de récupérer directement la chaleur pour combler des besoins thermiques lorsque c'est possible.

Toutefois, en entreprise, la chaleur fatale, telle qu'on l'entend au sens premier, peut provenir de nombreuses sources.

Vu le développement des technologies de récupération de chaleur fatale pour la production d'électricité de petite puissance, les sources de chaleur, pour ce cas, pourraient être par exemple :

- Cheminée de chaudière
- Cheminée de four (chaudière) d'huile thermique.
- Les retours condensats.
- les retours d'eau à des températures supérieures à 95°C.
- Au niveau des postes de détente de vapeur,...

Ces différents cas se retrouvent fréquemment dans de nombreuses entreprises. Il est évident que la récupération de chaleur fatale pour la production d'électricité peut y être « concurrente » à la récupération de chaleur pour les besoins en chaleur. Plus on va vers les entreprises moins intensives en énergie, plus cette « concurrence » sera importante. En effet, les installations qui « émettent » de la chaleur fatale sont de plus petites tailles : la puissance thermique est donc plus faible et donc plus facile à valoriser sous forme de chaleur, étant donné que les besoins en chaleur seront plus du même ordre de grandeur que ces rejets en chaleur et que, par ailleurs, les niveaux de température des rejets seront typiquement aux alentours des 100-150°C, et donc directement utilisables dans un échangeur pour valorisation de la chaleur.

Chapitre 1 : CYCLE ORGANIQUE DE RANKINE

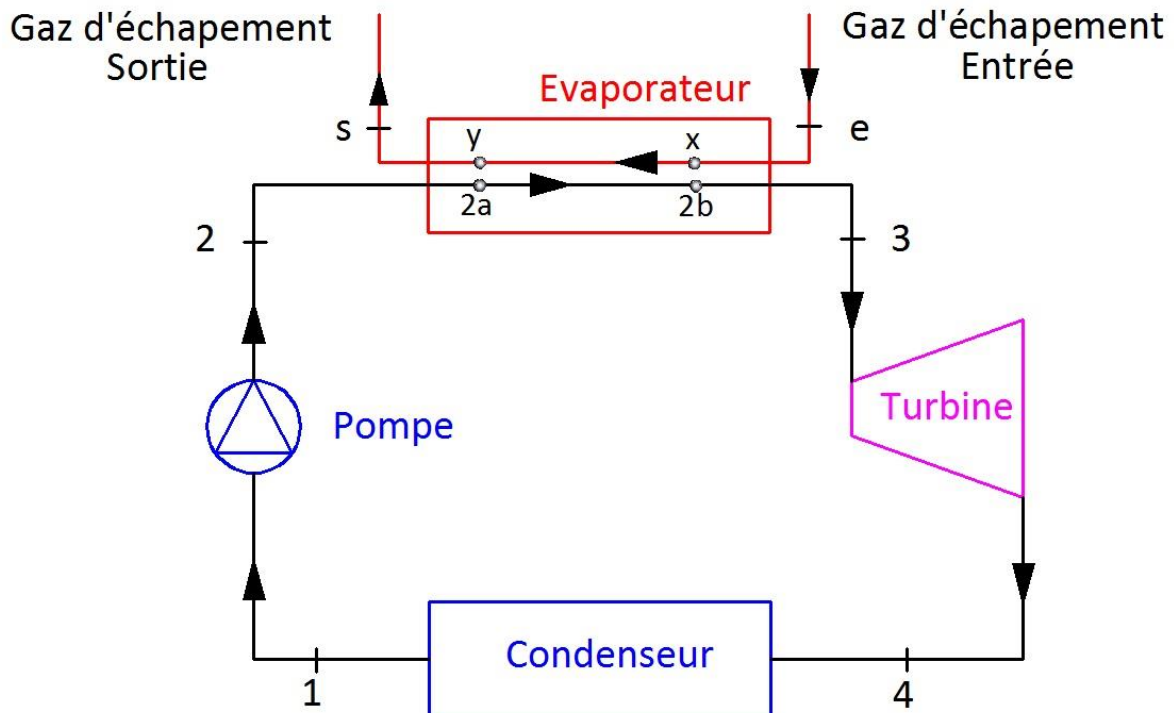


Figure 1. 6 Schéma d'un system Récupération d'énergie ORC

1.4 : Les applications d'ORC dans le monde :

En termes de nombre d'installations, on distingue 3 marchés principaux : la géothermie, la cogénération biomasse et la récupération de chaleur.

Le marché a culminé en 2013, avec 325.5 MW de nouvelle capacité. Depuis, nous pouvons remarquer en bas en 2014 et 2015, avec grossièrement 250 MW étant installés chaque année. Cela peut être en raison d'un déclin dans les applications géothermiques, rattachées aux prix de gaz naturel bas et la compétition contre solaire et le vent (surtout sur le marché américain). Le marché de récupération de chaleur a grandi de façon significative pendant les trois ans derniers, de 14.5 ondes moyennes en 2013 à 116.8 ondes moyennes dans 2015. [4]

Chapitre 1 : CYCLE ORGANIQUE DE RANKINE

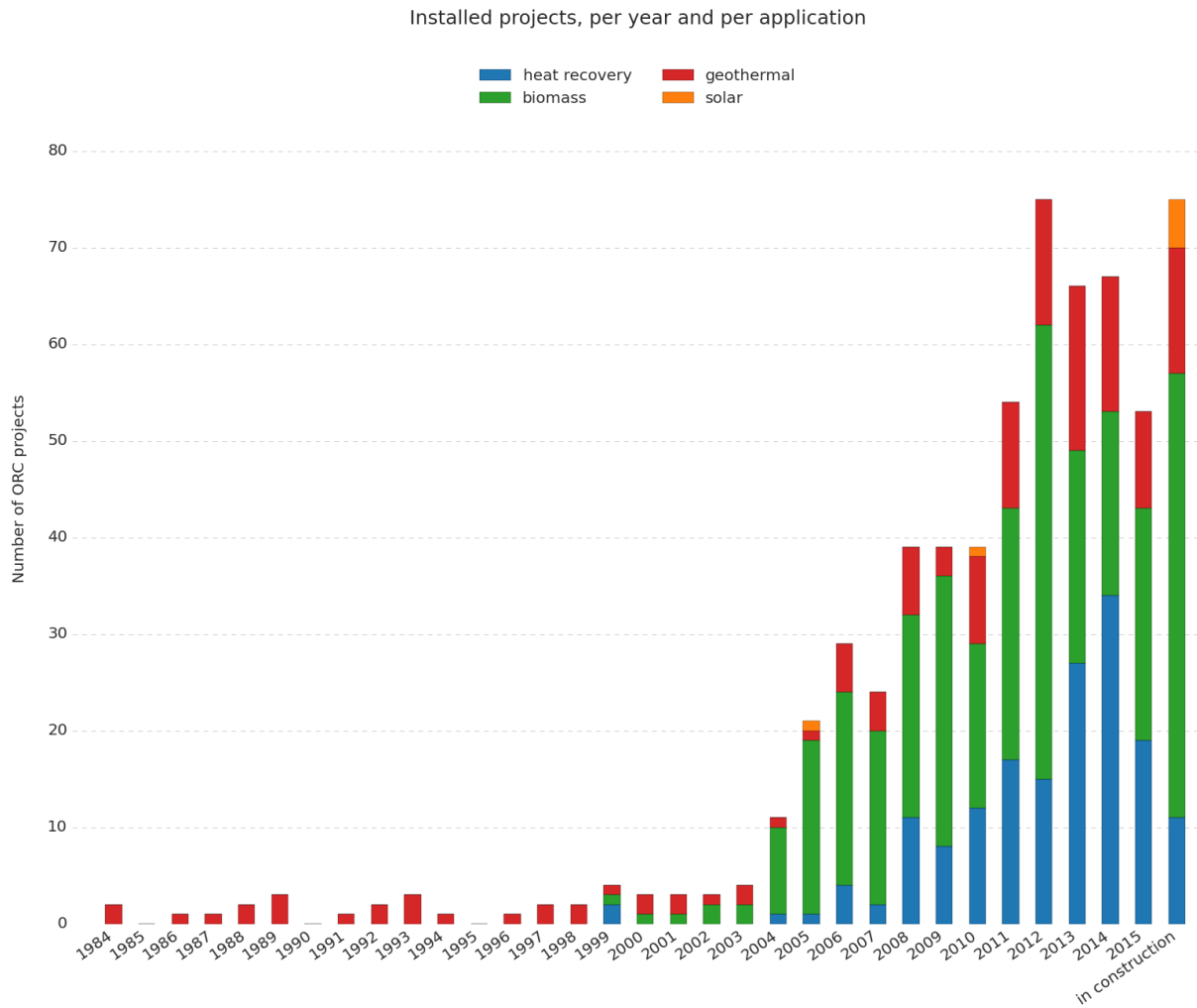


Figure 1. 2 Installations des projets ORC par des années

Chapitre 1 : CYCLE ORGANIQUE DE RANKINE

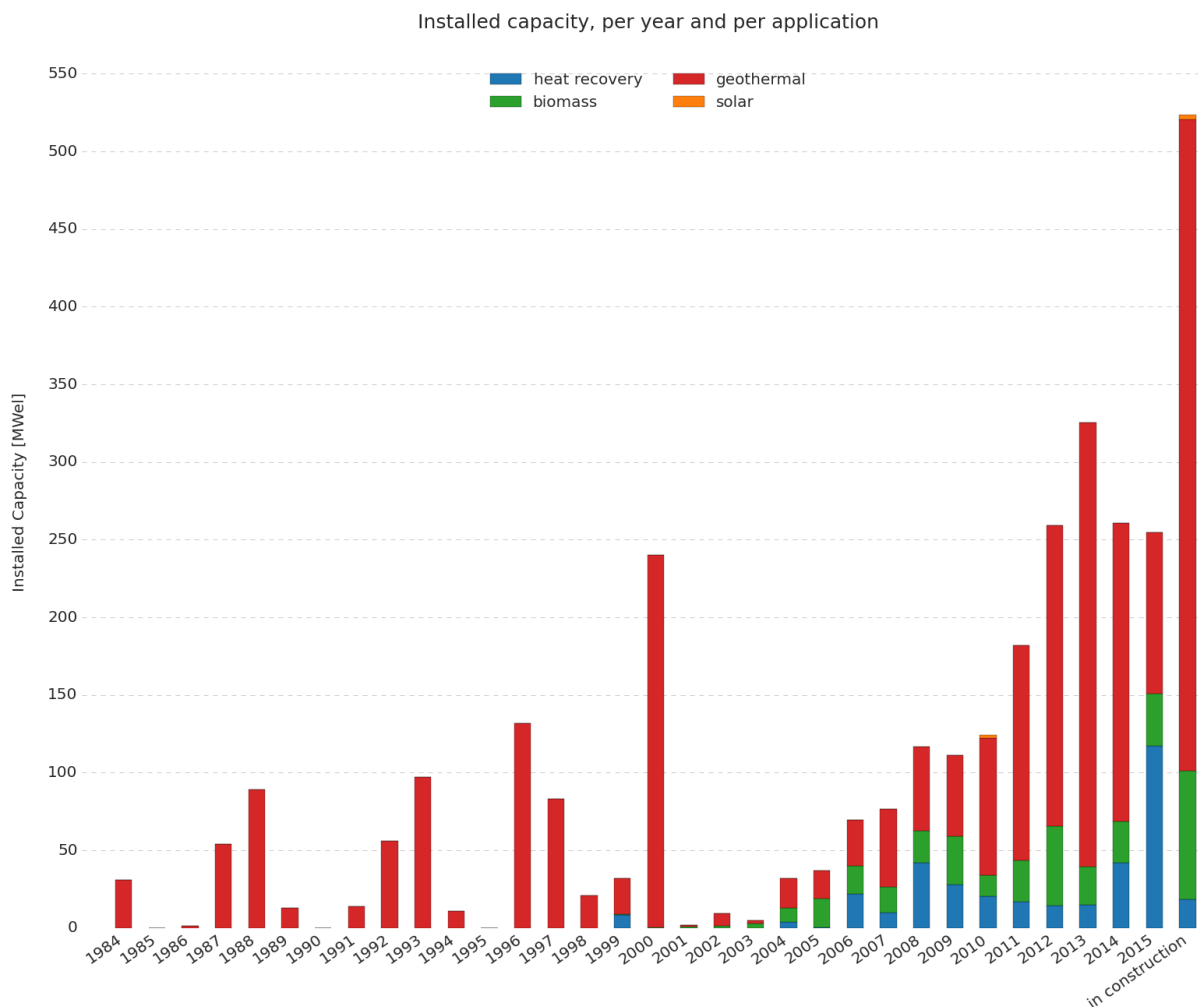


Figure 1. 3: La capacité en MW des installations d'ORC par des années

Avec 349.1 MW de capacité installée dans le monde et 18.5 ondes moyennes de nouvelle capacité dans la construction (10 projets), le marché de récupération de chaleur est toujours à un premier stade, mais passait longtemps la phase de démonstration/prototype. L'application principale est la récupération de chaleur inutilisée des moteurs Diesel ou des turbines du gaz, avec 66.8 de la capacité installée (41 projets). Ces unités sont surtout installées sur les stations de compresseur le long du pipeline du gaz, ou sur les centrales Diesel. Le ciment les usines de tilleul est la première application industrielle, avec 10 projets et un pouvoir installé total de 29 MW. Le gaspillage à l'Énergie (l'incinération) et les industries en métal (l'acier, l'aluminium, les fonderies ...).

CHAPITRE 2 :
ANALYSE
THERMODYNAMIQUE
D'UN SYSTEME
ORC/GEO

2.1 : Généralité de cycle Géothermie:

Aujourd'hui, plus de 50 pays (États-Unis, Islande, Mexique, etc.) utilisent l'énergie géothermique profonde sous forme de vapeur ou d'eau surchauffée pour produire de l'électricité. En 2015, la puissance installée mondiale était de 12,6 GW avec une production d'énergie de 73,5 TWh. La filière de la géothermie profonde est en développement partout sur la planète. En 2020, la puissance installée mondiale devrait atteindre 21,4 GW (investissements publics et privés). Il existe dans le monde différents types de technologies, mais il reste à relever plusieurs défis techniques. Au Canada, le bassin sédimentaire de l'Ouest canadien fait l'objet d'une attention particulière pour son potentiel d'énergie géothermique. En Colombie-Britannique (Meager Creek), dans les Territoires du Nord-Ouest (Fort Liard) et en Saskatchewan (Estevan, projet DEEP), les projets de géothermie hydrothermale – l'exploitation de la chaleur de l'eau chaude présente naturellement dans le sous-sol – sont rendus à l'étape de l'étude technoéconomique. En Alberta, une analyse du potentiel de géothermie profonde a été menée. En 2016, le pays ne possédait encore aucune centrale géothermique. Dans l'est du Canada, les progrès technologiques des dernières années en matière de forage pour accéder aux fluides géothermaux, de création et de gestion de réservoirs géothermiques à plusieurs kilomètres sous terre, etc. laissent présager une exploitation à moyen ou à long terme de l'énergie thermique à de très grandes profondeurs. Au Québec, le potentiel de la géothermie profonde à partir de la roche chaude a été évalué. Toutefois, aucun projet de prospection, de démonstration ou d'exploitation industrielle n'est prévu à moyen ou à long terme. [5]



Figure 2.1 : central de l'énergie géothermique

2.2: LA GÉOTHERMIE DANS LE MONDE

En 2016, la production mondiale d'électricité à partir de la géothermie a représenté 81,7 TWh

Seuls 10 pays dans le monde produisent de l'électricité à partir de la géothermie.

En 2016, sur le podium des plus grands producteurs, nous trouvons : les États-Unis (18,6 TWh), la Nouvelle-Zélande (7,43 TWh) et l'Italie (6,29 TWh).

Par pays, en TWh, en 2016		
Source : International Energy Agency (IEA)		
Philippines	11,07	13,56%
Indonésie	10,66	13,06%
Nouvelle-Zélande	7,42	9,09%
Italie	6,29	7,70%
Mexique	6,15	7,53%
Islande	5,07	6,21%
Turquie	4,81	5,89%
Japon	2,51	3,07%
Kenya	4,2	5,14%
(France)	-0,004	(0%)

Principaux pays producteurs d'électricité
d'origine géothermique en 2016

© EDF

Figure 2.2 : Principaux pays producteur d'électricité d'origine géothermique en 2016

2.3 : Les utilisations possibles de la géothermie:

Les différentes utilisations de l'énergie géothermique sont : l'habitation, tourisme, agriculture, industrie agro-alimentaire... Les utilisations directes de la géothermie sont nombreuses et énergétiquement très efficaces, à condition que la source de chaleur ne dépasse pas, un rayon de 10 km environ. Pour l'utiliser plus loin, il faut la transformer en électricité, avec une perte de puissance très importante, dictée par les lois de la thermodynamique de Carnot : lors du passage de la puissance thermique à la puissance électrique, le rendement ne peut dépasser le maximum théorique d'environ 20%. Ce maximum est fonction des

Chapitre 2 : ANALYSE THERMODYNAMIQUE D'UN SYSTEME ORC/GEO

températures respectives des sources froides et chaudes (Wikipédia). La meilleure solution consiste à faire de la cogénération : production d'électricité, avec récupération de chaleur.

2.4 : Les types de la géothermie :

L'exploitation de la géothermie dépend du type de gisements et du fluide géothermique existant, ainsi, se distingue trois types de géothermie dans le monde :

2.4.1 : La géothermie haute énergie :

La géothermie haute énergie, exploite les gisements de vapeur sèche ou humide (mélange eau et vapeur). Ces gisements se caractérisent par des températures supérieures à 150°C.

On rencontre cette géothermie haute énergie dans les régions volcaniques (volcans) et sismiques (frontières de plaques) ou le gradient géothermique est particulièrement élevé. La géothermie haute énergie est destinée principalement à la production d'électricité. La vapeur, qui est puisée dans le réservoir géothermique, est déchargée dans une turbine, reliée à un alternateur pour la production d'électricité. La vapeur sèche est directement utilisée alors que la vapeur humide qui est plus fréquente nécessite l'utilisation d'un séparateur. Un exemple de ce type de géothermie est donné par la centrale de Bouillante en Guadeloupe-France.

2.4.2 : La géothermie basse énergie :

La géothermie basse énergie se caractérise par une température comprise entre 30°C et 150°C, elle est rencontrée à une profondeur moyenne de 1000 à 2500 m, dans les formations perméables remplies d'eau situées principalement dans les bassins sédimentaires de grandes dimensions. Elle est destinée principalement au chauffage urbain et au chauffage de serres.

2.4.3 : La géothermie très basse énergie :

La géothermie très basse énergie est rencontrée à de faibles profondeurs (nappes phréatiques) ou la température est de l'ordre de 10 à 30°C. Elle est utilisée entre autre pour la pisciculture, l'horticulture et le séchage de produits agricoles.

2.5 : installation Géothermie:

L'énergie géothermique provient de l'accroissement de température au fur et à mesure que l'on pénètre plus profondément dans l'écorce terrestre, soit du fait du gradient naturel (3 °C/100 m, avec un flux moyen de 60 mW/m²), soit du fait de singularités géophysiques (réservoirs géothermiques naturels des roches poreuses à haute température)

On a coutume de distinguer trois grandes catégories de réservoirs, en fonction de leurs niveaux de température :

- la haute température (> 220 °C)
- la température intermédiaire (100 – 200 °C)
- la basse température (50 – 100 °C)

Chapitre 2 : ANALYSE THERMODYNAMIQUE D'UN SYSTEME ORC/GEO

Dans le premier cas, le fluide géothermique peut être essentiellement constitué d'eau ou de vapeur, dans les deux autres il s'agit d'eau, éventuellement sous pression. Une des particularités du fluide géothermique est qu'il ne s'agit jamais d'eau pure : il comporte aussi de nombreuses impuretés, des sels corrosifs (la concentration limite pour qu'une exploitation soit possible est égale à 1,5 mol/kg) et des gaz non condensables (GNC) en quantité variable (0,1-10 %). Nous verrons que cette particularité impose des contraintes spécifiques quant aux cycles thermodynamiques qui peuvent être mis en œuvre.

Pour des raisons environnementales, le fluide géothermique doit généralement être réinjecté dans le réservoir après utilisation, mais ce n'est pas toujours le cas. La conversion thermodynamique de l'énergie géothermique fait appel à quatre principales techniques :

- les centrales dites "directes" peuvent être utilisées si le fluide géothermique est de la vapeur surchauffée qui peut être directement détendue dans une turbine. Historiquement, c'est ce type de centrale qui a été le premier mis en œuvre, à Larderello en Italie dès 1904
- les centrales à vaporisation par flash permettent d'exploiter les sites où le fluide géothermique se présente sous forme de liquide pressurisé ou de mélange liquide-vapeur. C'est aujourd'hui le type de centrale le plus employé. Le fluide géothermique commence alors par être détendu dans une chambre à pression inférieure à celle du puits, ce qui permet d'en vaporiser une partie, qui est ensuite détendue dans une turbine
- les systèmes dits binaires font appel à un fluide thermodynamique secondaire, qui suit un cycle de Rankine fermé, la chaudière étant constituée d'un échangeur de chaleur avec le fluide géothermique
- les systèmes à mélange de fluides, du type cycle de Kalina, variante des systèmes binaires où le fluide thermodynamique n'est plus pur mais constitué de deux fluides afin de réaliser un glissement de température lors de la vaporisation

Des cycles mixtes ou combinés peuvent faire appel à la fois à un système direct ou flash et à un système binaire. Dans ce qui suit, nous présenterons ces différents cycles modélisés avec Thermoptim.

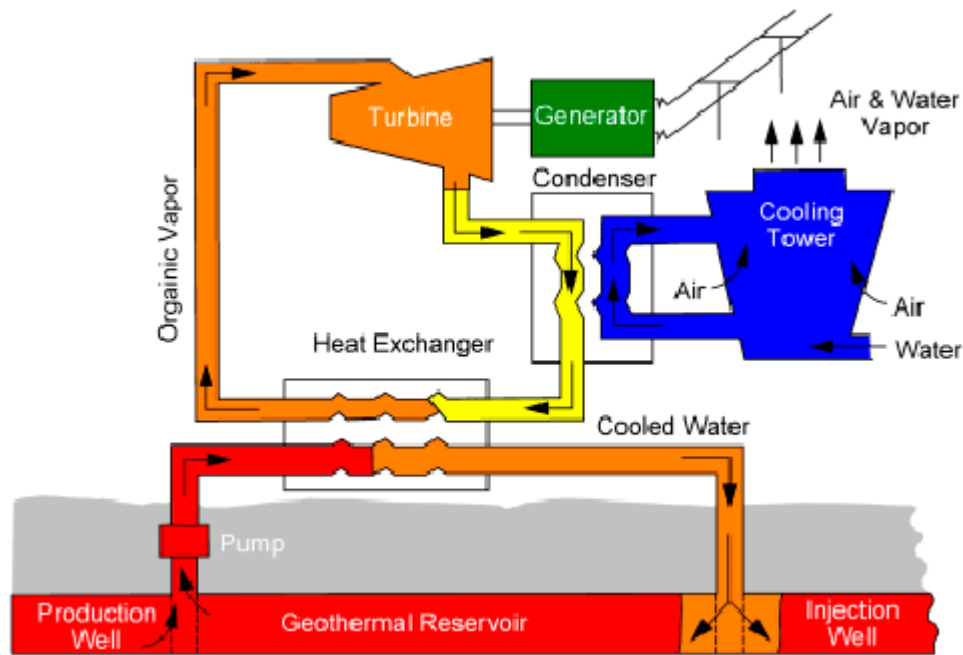


Figure 2.3 : ORC utilisant une ressource géothermique basse température

2.6 : Exemples sur des centrales Géothermique :

2.6.1 : Central Direct :

- Le cycle d'une centrale directe est très proche de celui de Hirn. La différence principale provient de la nécessité d'extraire les GNC si l'on souhaite pouvoir condenser l'eau en sortie de turbine, ce qui permet de détendre la vapeur à des pressions inférieures à l'ambiante. Selon les cas, l'extraction se fait en utilisant un éjecteur entraîné par la vapeur géothermique, ou un compresseur couplé à la turbine.

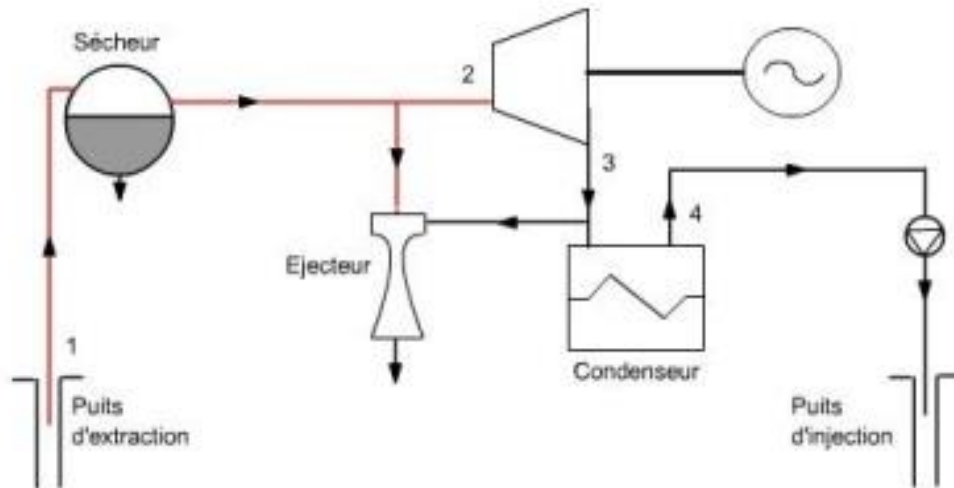


Figure 2.4 : Schéma Central Direct

2.6.2 : CENTRALE A CYCLE BINAIRE

Lorsque la température ou la pression en sortie de puits sont basses, il ne devient plus possible de faire appel à des cycles à détente directe ou à flash. On utilise alors un deuxième fluide thermodynamique, qui suit un cycle de Rankine fermé, avec ou sans surchauffe. Le fluide géothermique transfère alors sa chaleur à ce fluide, avant d'être réinjecté. Une tour de refroidissement permet d'assurer la condensation du fluide technique, dont le choix dépend de multiples considérations, technologiques, environnementales et économiques. Etant donné qu'il s'agit souvent d'un fluide organique, on a coutume de parler de cycle de Rankine organique (ORC, Organique Rankine Cycle en anglais).

La pression et température de condensation du butane peuvent ici être plus basses que pour le fluide géothermique dans les cycles à flash du fait de l'absence d'incondensables dans ce second cycle. Tout comme tout cycle de Hirn, ce cycle peut être amélioré en introduisant judicieusement des réchauffes et/ou des prélèvements.

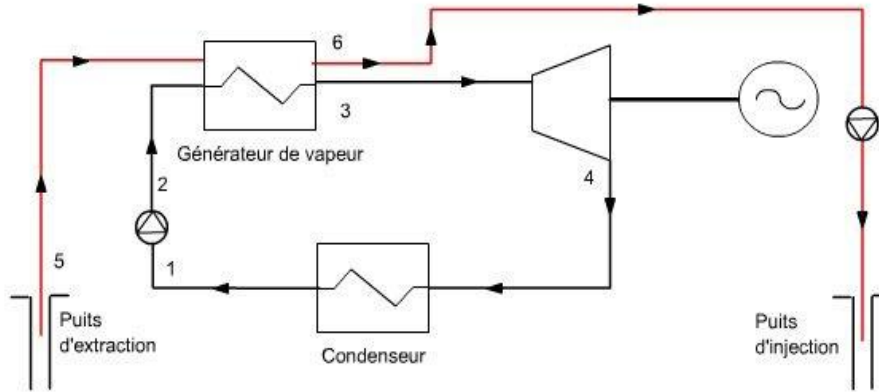


Figure 2.5 : Centrale géothermique binaire

2.6.3 : CYCLE DE KALINA

- Le cycle de Kalina, qui est présenté de manière détaillée dans une autre fiche thématique, utilise comme fluide de travail le système "eau - ammoniac", qui présente un glissement de température important. Le cycle de Kalina remplace le cycle ORC de l'exemple précédent. Compte tenu du glissement de température, les irréversibilités dans les échangeurs entre le fluide géothermique et le fluide de travail sont réduites, et la chaleur géothermique mieux utilisée.

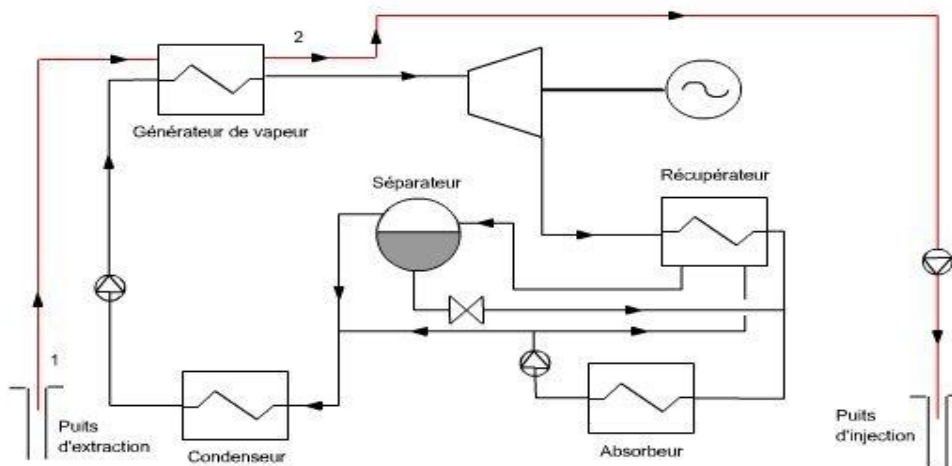


Figure 2.6: Schéma de Cycle de KALINA

2.6.4 : CYCLE COMBINE :

- Comme nous l'avons vu, une des contraintes rencontrées dans les cycles directs ou à flash à condensation est la nécessité d'extraire les incondensables, qui se traduit par une consommation énergétique parasite non négligeable.
- Une solution alternative consiste à utiliser un cycle combiné, associant un cycle direct ou à flash avec un cycle ORC à fluide thermodynamique intermédiaire, la vapeur sortant de la turbine à une pression supérieure à l'atmosphérique, et étant refroidie dans la chaudière du second cycle.
- On obtient alors le cycle combiné de la figure ci-dessous. [6]

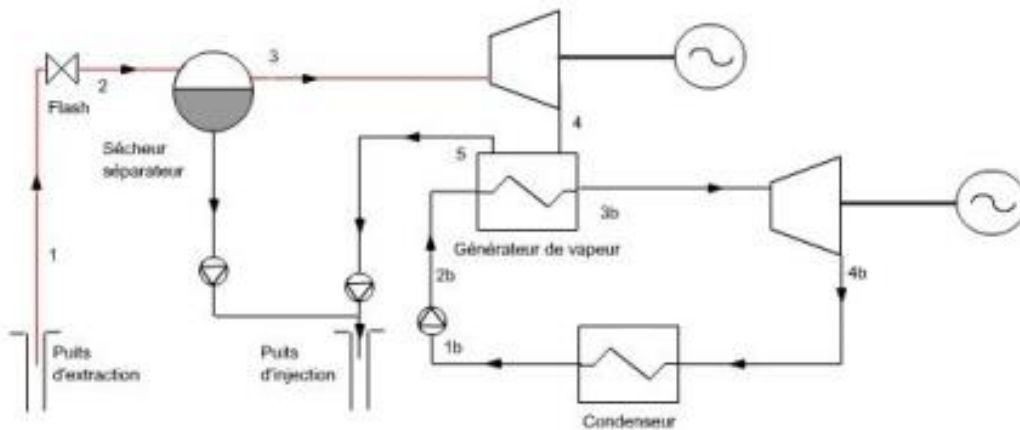


Figure 2.7: Centrale géothermique à cycle combiné

2.7 : principe de fonctionnement d'ORC et la Géothermie

2.7.1 : Cycle de Rankine

Le cycle de Rankine est un cycle thermodynamique moteur qui convertit la chaleur en travail mécanique. C'est le cycle thermodynamique le plus utilisé pour la génération d'électricité. La chaleur est fournie extérieurement à une boucle fermée qui utilise l'eau comme fluide de travail .[7]

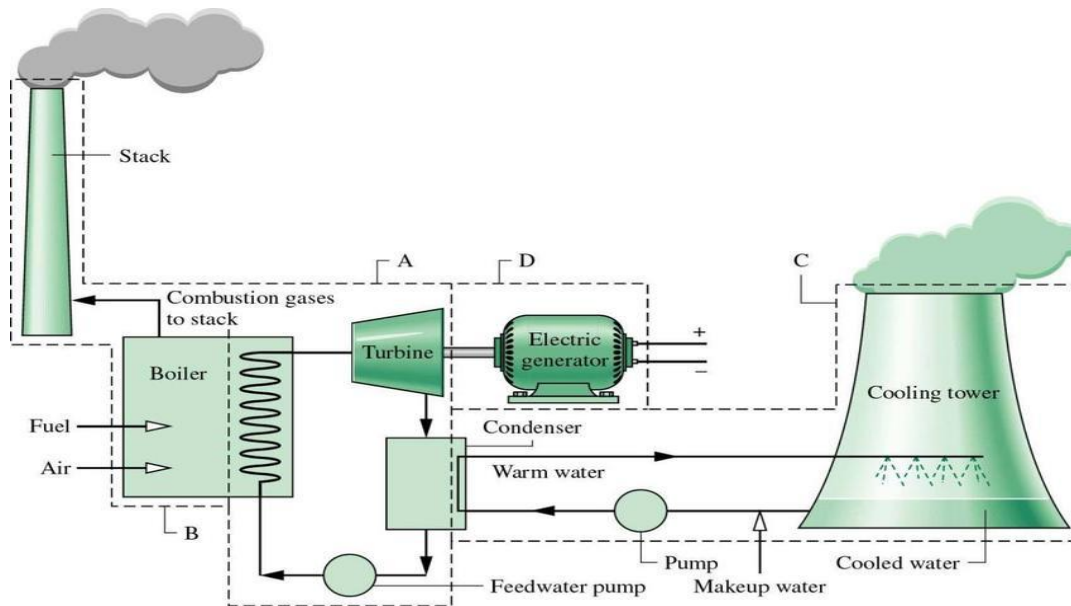


Figure 2.8 : Schéma du moteur de Rankine

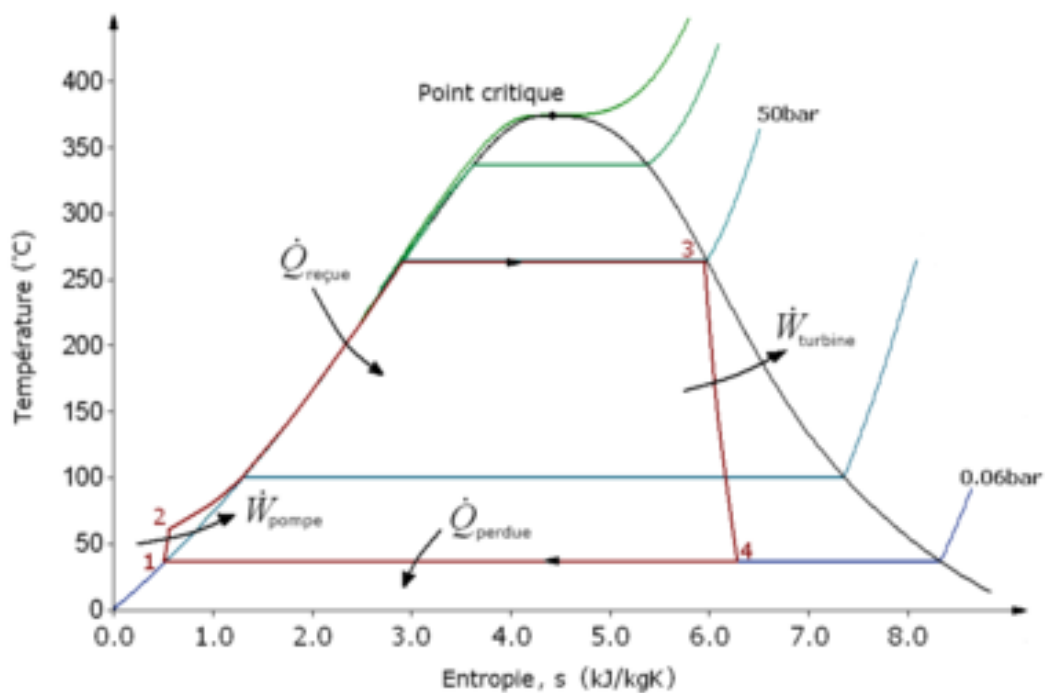


Figure 2.9 : Cycle idéal de Rankine dans le diagramme T-s de l'eau

Le cycle de base de Rankine peut être vu comme une modification du cycle de Carnot. D'un point de vue technique, les procédés de compression et de détente diphasiques demandés par le cycle de Carnot ne sont pas pratiques. Le cycle de Rankine (Figure 2. 8) diffère du cycle de Carnot par la compression isentropique du liquide, suivie d'une transformation isobare de chauffage en chaleur sensible puis de chauffage en chaleur latente.

Un cycle de Rankine à vapeur traditionnel est un moteur de chaleur qui opère entre une source de chaleur et un évier de chaleur. L'eau est pompée à la haute pression, a préchauffé, fait bouillir et a

Chapitre 2 : ANALYSE THERMODYNAMIQUE D'UN SYSTEME ORC/GEO

surchauffé par le transfert de chaleur de la source de chaleur et ensuite la vapeur est développée pour produire le pouvoir. La vapeur de pression basse est condensée par le transfert de chaleur à l'évier de chaleur et aux débuts de cycle. Aux températures basses (<3000C), les cycles de Rankine à vapeur sont tant mal organisés que cher. [12]

Dans lequel le fluide de travail traverse les composants du cycle sans irréversibilités. En particulier: la chute de pression est absente dans la chaudière, le condenseur et les conduites. La turbine et la pompe sont considérées isentropiques. Les procédés du cycle sont des procédés réversibles tels que détaillés ci-dessous:

- 1-2: la compression isentropique dans la pompe (la distance verticale entre les points 1 et 2 est considérablement exagérée pour soucis de clarté).
- 2-3: l'addition de la chaleur à pression constante dans la chaudière.
- 3-4: l'expansion isentropique du fluide de travail de l'état de vapeur saturée à la pression du condenseur dans la turbine.
- 4-1: l'enlèvement de chaleur dans le condenseur fonctionnant à pression constante.

L'inconvénient principal du cycle de Rankine provient de la détente isentropique 3-4 dans le domaine diphasique; cette détente correspondant à une marche en régime humide et donc sujette à des limitations technologiques (érosion d'aubage de la turbine si le titre en vapeur s'éloigne trop de la saturation vapeur: $x < 1$). Pour obtenir en sortie de la turbine une vapeur saturée ($x = 1$), Gustave-Adolphe Hirn (1815-1890), un ingénieur français, a proposé d'introduire en turbine une vapeur surchauffée.

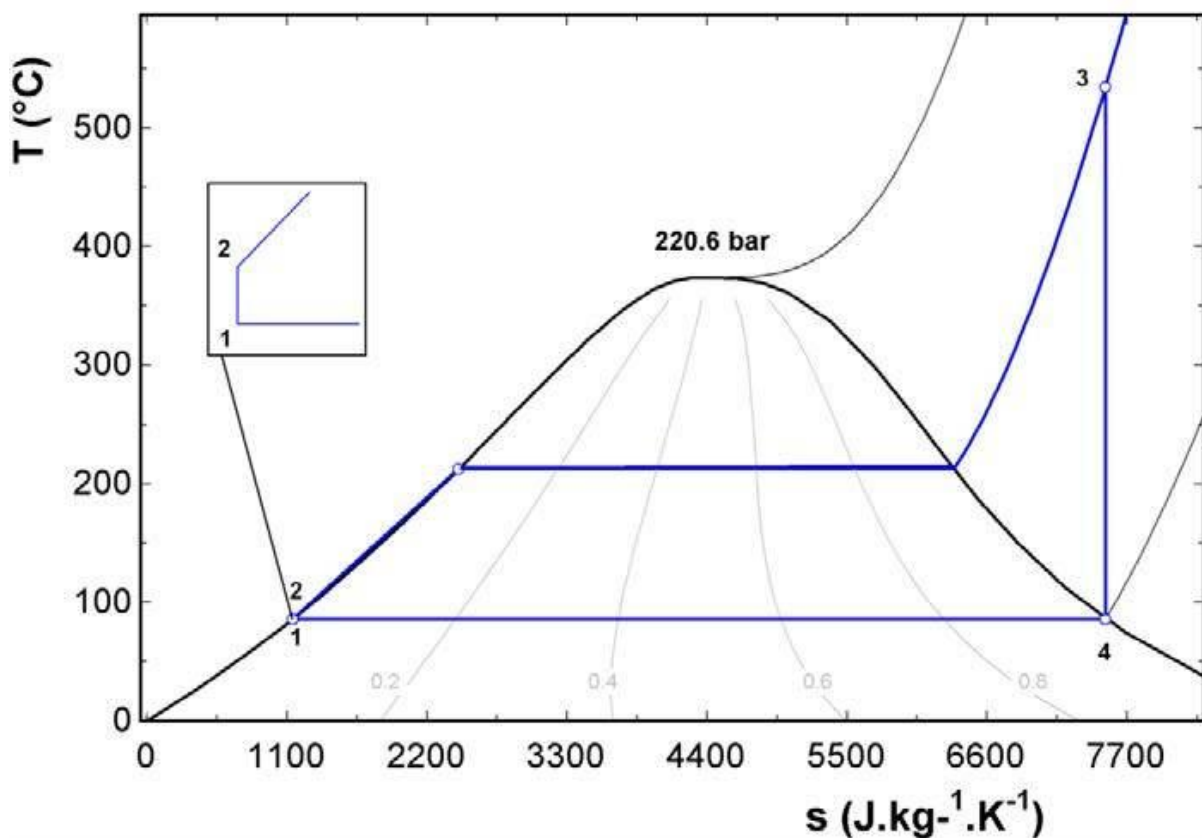


Figure 2.10 : Cycle idéal de Hirn dans le diagramme T-s de l'eau

2.7.1.2 : Les étapes de principe :

- 1-2 : Du liquide froid à basse pression quitte le condenseur. Le liquide va ensuite à la pompe, Le bilan énergétique de la pompe

$$W_p = h_2 - h_1 \quad (2.1)$$

Où w_p est le travail spécifique fait par la pompe (KJ/Kg), h_1 est l'enthalpie à l'entrée de la pompe (KJ/Kg) et h_2 est l'enthalpie à la sortie de la pompe (KJ/Kg).

- 2-3 : pompe le liquide à un liquide/vapeur de haute pression. C'est alors transféré à la chaudière. La chaleur est ajoutée dans la chaudière pour augmenter la température du liquide/vapeur. La Chaleur Est représentée comme Q_{in} .

$$Q_{in} = h_3 - h_2 \quad (2.2)$$

- 3-4: Une haute pression le gaz chaud entre dans la turbine à vapeur de la chaudière. La turbine à vapeur est le promoteur de ce système. Comme la vapeur tourne la turbine, le travail produit par la turbine EST étiqueté comme W_{out} .

$$W_t = h_3 - h_4 \quad (2.3)$$

. Ce travail indique aussi que la génération électrique a dehors été produite électricité.

- 4-1 : La pression basse les sorties chaudes du gaz la turbine à vapeur et va au condensateur. Le condensateur enlevé le chauffe du gaz entrant dans le système. C'est représenté dans le diagramme avec un Q_{in} .

$$Q_{in} = h_1 - h_4 \quad (2.4)$$

- Travail net du cycle :

$$W_{net} = W_t - W_p = Q_{in} - Q_{out} \quad (2.5)$$

- Rendement globale de cycle :

$$\eta_{cycle} = \frac{W_{net}}{Q_{in}} \quad (2.6)$$

2.7.2 : Cycle réel de Rankine :

Le cycle réel de Rankine diffère de cycle idéal en raison des irréversibilités dans les composants du cycle. L'influence des irréversibilités sur la transformation énergétique est détaillée dans [7]. Les irréversibilités et les pertes sont présentées avec les quatre sous-systèmes du cycle de Rankine:

- Irréversibilité dans la pompe: le pompage est accompagné d'une augmentation de l'entropie. Le travail demandé par le procédé réel est donc plus important que dans le cas du procédé idéal. Le transfert de chaleur entre le fluide traversant la pompe et l'environnement est souvent négligé et la pompe est alors considérée adiabatique. L'irréversibilité dans la pompe est donc caractérisée par le rendement isentropique:

-

Chapitre 2 : ANALYSE THERMODYNAMIQUE D'UN SYSTEME ORC/GEO

$$\eta_{is,p} = \frac{W_{is}}{W_r} = \frac{h_2^{is} - h_1}{h_2 - h_1} \quad (2.7)$$

- Irréversibilité dans la turbine: similaire au procédé de pompage, l'irréversibilité du procédé de détente est également caractérisée par un rendement isentropique de la turbine.

Le transfert de chaleur entre le fluide traversant la turbine et l'environnement est souvent négligé et la turbine est alors considérée adiabatique. Le travail produit par le procédé de détente réel est plus petit que le travail dans le cas d'un procédé isentropique.

$$\eta_{is,t} = \frac{w_r}{w_{is}} = \frac{h_3 - h_4}{h_3 - h_4^{is}} \quad (2.8)$$

- Frottement du fluide de travail: les frottements internes et les frottements avec les parois inhérents à l'écoulement du fluide de travail causent des chutes de pression dans la chaudière, le condenseur et les tuyaux de liaisons entre les composants du cycle. Pour compenser ces chutes de pression, le fluide de travail doit être pompé à une pression plus élevée que la pression demandée par le cycle idéal. Cela agrandit la taille de la pompe et donc sa puissance.
- Irréversibilités liées aux transferts de chaleur dans l'évaporateur et le condenseur. Dans la situation idéale, les sources et puits de chaleur sont supposées être, au niveau de la chaudière et du condenseur, à des températures identiques aux températures du fluide qui traverse le cycle. Dans la situation réelle, les différences de température doivent exister afin de permettre les transferts de chaleur. Ces différences de température sont synonyme de créations d'entropie et donc d'irréversibilités. Les encrassements au niveau de la chaudière et du condenseur augmentent les gradients de température nécessaires aux transferts et augmentent donc les irréversibilités. Toutefois, on peut considérer que ces irréversibilités sont des irréversibilités externes, liées aux sources et puits de chaleur, et ne considérer que les irréversibilités dites internes du cycle (pompe, turbine, frottements). Si ces derniers composants fonctionnent de manière réversible, le cycle serait dit alors « intérieurement réversible ».
- Perte thermique: les pertes thermiques causées par le transfert de chaleur entre le fluide de travail circulant dans l'installation avec l'environnement influencent directement le bilan au sens du premier principe. Elles peuvent être aussi vues comme des irréversibilités internes du système car le transfert de chaleur vers l'extérieur est opéré sous un gradient non nul. Cette perte de chaleur se situe dans les tubes de liaisons entre les composants du cycle. Les éventuelles pertes thermiques qui se situent dans les composants du cycle se traitent au niveau de chacun de ceux-ci qui fonctionnerait alors de manière adiabatique ou non. Pour compenser toutes ces pertes thermiques indésirables, plus de chaleur doit être transférée au fluide de travail dans la chaudière.[11]

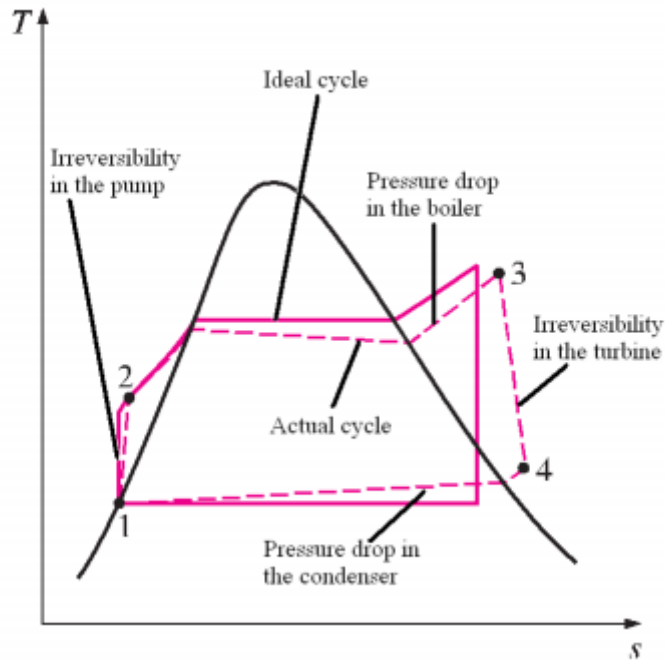


Figure 2.11 : Différence Entre le Cycle à Vapeur Réel et le Cycle de Rankine idéal

:

Tableau 2.2 : L'effet des irréversibilités sur la performance du cycle est illustré par les expressions suivantes

Cycle idéal	Cycle réel
$w_{net} = w_t - w_p$ (2.9)	$w_{net} = \eta_{is,t} w_t - \frac{w_p}{\eta_{is,t}} - w_{p,comp}$ (2.11)
$\eta_{th} = \frac{w_{net}}{Q_h}$ (2.10)	$\eta_{th} = \frac{w_{net}}{Q_h - Q_{loss}}$ (2.12)

Où :

- $w_{p, comp}$ est le travail additionnel nécessaire de la pompe pour compenser les chutes de pression du fluide de travail à travers des tuyaux et les composants du cycle.
- Q_{loss} est la quantité de chaleur additionnelle nécessaire pour compenser la perte thermique du fluide de travail à travers le cycle (excluant le condenseur) à cause du transfert de chaleur entre le fluide de travail et l'environnement.

2.7.3 : Description du système Cycle organique de Rankine géothermie :

Le schéma de base du cycle ORC-GEO est représenté dans la Figure 2.11. Le système se compose de cycle organique de Rankine destiné pour la production de l'énergie mécanique et l'électricité. Le Cycle Rankine Organique (ORC) est considéré comme une technologie efficace pour utiliser la source géothermique basse et moyenne température. L'ORC utilise un fluide de travail secondaire, l'avantage du fluide de travail secondaire est un point d'ébullition plus bas et une pression de vapeur plus élevée à basse température par rapport à la vapeur. Les centrales géothermiques utilisent généralement un géo-fluide qui se situe entre 100°C et 180°C .

L'ORC utilise 6 composantes fondamentales de la production de pouvoir : les échangeurs thermiques, la turbine, générateur, condensateur, les tours de refroidissement et les pompes. Le cycle est un cycle fermé, donc le liquide travaillant n'entre jamais en contact avec l'atmosphère extérieure. [8]

Dans le cycle, un liquide travaillant est préchauffé et s'est évaporé dans un échangeur thermique. Au point 1, la vapeur saturée d'un liquide travaillant entre dans la turbine où il développe et produit le travail. La turbine pousse le générateur électrique à produire l'électricité. Au point 2, la vapeur laisse la turbine après l'expansion adiabatique idéale (les pertes thermodynamiques sont négligées), en s'ensuivant dans la pression plus basse et la température et entre ensuite dans le condensateur. Dans le condensateur la vapeur surchauffée est refroidie par le point saturé 3 et atteint l'état liquide complet (le liquide saturé) au point 4.

La vapeur du fluide de travail est refroidie avec de l'eau de refroidissement dans le condensateur. Le fluide de travail saturé sous forme liquide est à nouveau renvoyé dans le cycle et renvoyé vers l'échangeur de chaleur du point 4 au point 5.

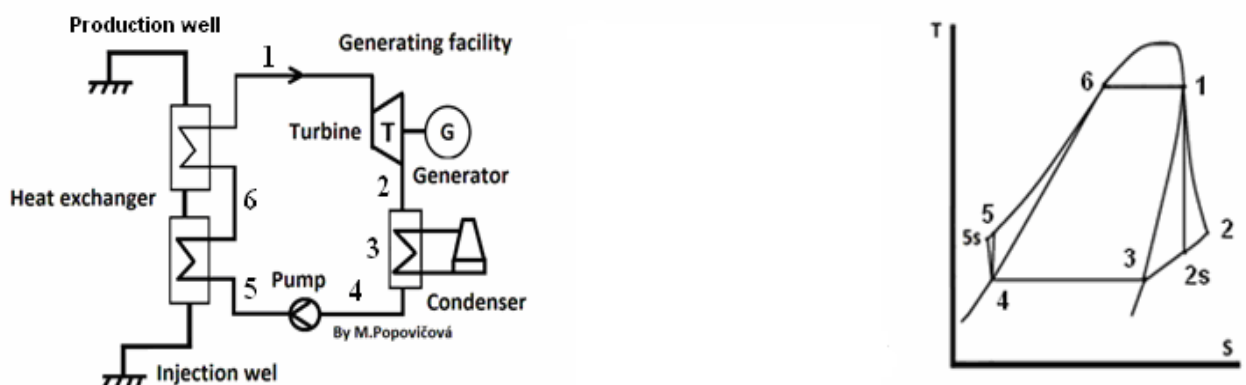


Figure 2.12 : Cycle ORC géothermique, et le cycle dans le diagramme T-S

2.7.3 : Cycle organique de Rankine :

Le cycle organique de Rankine est un cycle traditionnel de Rankine utilisant un composé organique au lieu de l'eau comme fluide de travail. Les fluides organiques sont les fluides de masse moléculaire élevée avec un degré de température d'ébullition inférieur à celui de l'eau. Pour les systèmes de récupération de chaleur à basse température, le fluide de travail utilisé est principalement un fluide organique. La raison principale de ceci est que ceux-ci ont toujours une plus faible chaleur de vaporisation que l'eau et peuvent donc être vaporisés plus facilement avec de la chaleur à basse température. Ces caractéristiques rendent le cycle ORC favorable pour les applications de récupération de chaleur à basse température. Le cycle ORC est préférable pour l'utilisation de l'énergie thermique à basse température grâce à quoi il a une bonne efficacité sur une large plage de température [10].

Le cycle de Rankine fonctionne de la manière suivante : un fluide de travail est chauffé puis vaporisé grâce à une source de chaleur. La vapeur produite est ensuite détendue dans une turbine pour produire de l'énergie mécanique puis de l'électricité grâce à un alternateur. La vapeur détendue est ensuite condensée pour fermer le cycle thermodynamique et fonctionner ainsi en circuit fermé (Figure 2.13).

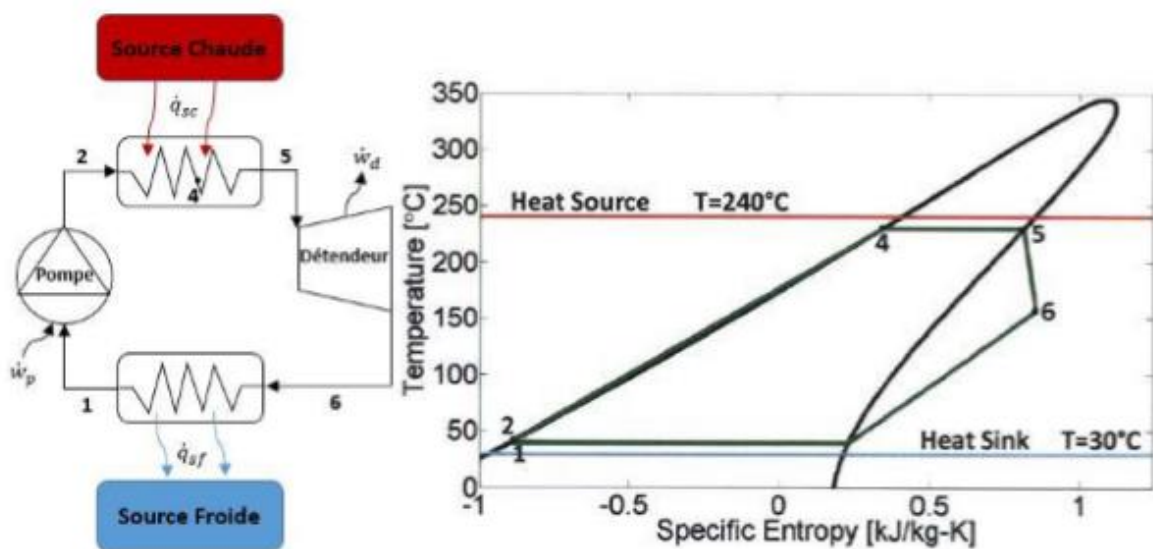


Figure 2.13 : Diagramme schématique et T-S d'un cycle ORC

2.7.4 : Cycle organique de Rankine avec un Récupérateur

Dans les cas où la vapeur du fluide de travail à la sortie de la turbine est suffisamment chaude, on ajoute au cycle de bas un échangeur de chaleur interne (ou récupérateur). Cette énergie est récupérée par échange avec le liquide sortant de la pompe. Cette récupération d'énergie diminue donc la quantité de chaleur demandée pour le préchauffage du fluide avant son entrée dans l'évaporateur et la quantité de chaleur du fluide de travail déchargée au puits froid et donc la taille du condenseur. Avec le récupérateur, la performance du cycle ORC est améliorée mais le système est plus complexe amenant à un coût d'investissement plus élevé. En plus, le récupérateur augmente également la perte de

Chapitre 2 : ANALYSE THERMODYNAMIQUE D'UN SYSTEME ORC/GEO

charge totale du système. La Figure 2. 10 et Figure 2. 11 présentent les diagrammes T-s du fluide de travail et les profils de température de la source thermique et du puits froid pour le cycle ORC simple et pour celui avec un récupérateur.[14]

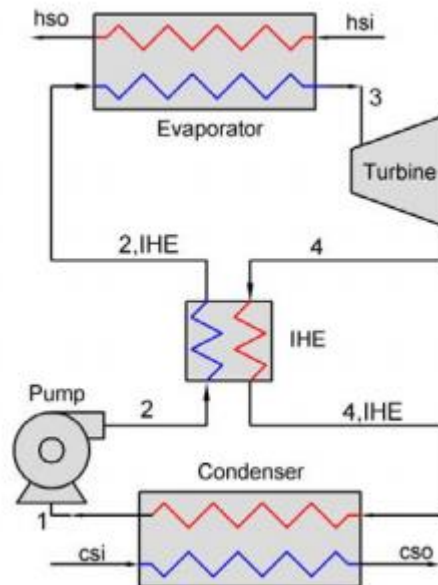


Figure 2.14 : schéma d'un cycle organique de Rankine avec récupérateur

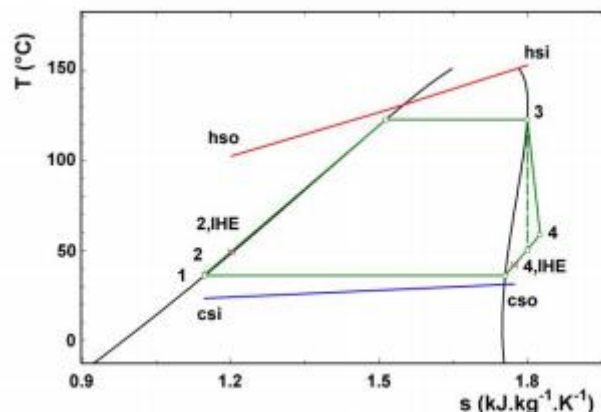


Figure 2.15 : Diagramme T-S d'un ORC avec récupérateur

2.7.5 : cycle supercritique :

Dans de certaines situations, il peut être avantageux d'avoir une exigence de chaleur liquide travaillant qui n'inclut pas de plateau constant de température. C'est accompli en chauffant le fluide travaillant à une pression constante P_{high} qui est plus grand que la pression critique du fluide. la figure (2.15) présenté Le schéma et le diagramme de T-s d'ORC supercritique. D'un liquide saturé à l'État 1, le liquide est pompé à une pression qui excède la pression critique, pour que le liquide supercritique absorbe la chaleur sans un changement de phase. Le niveau de pression doit être choisi pour éviter la condensation significative dans le dilatateur, parce que le sentier public du liquide peut passer en deux région de phase entre l'État 5s et l'État 6. [13]

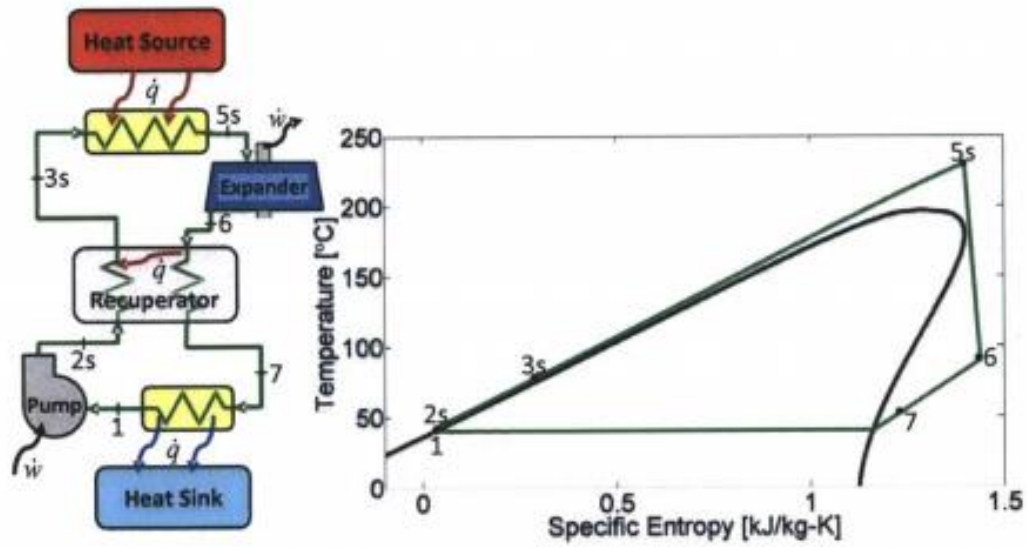


Figure 2.16 : Le schéma et le diagramme de T-S d'ORC supercritique

CHAPITRE 3 :
MODÉLISATION DE
SYSTÈME
ORC /GEO :

Chapitre 3 : Modélisation d'un système ORC/GEO

3.1 : programme utilisée :

Actuellement il y a beaucoup de programmes qui peuvent aider à résoudre des calculs thermodynamiques quelquefois très difficiles. Un des plus simples est EES (Engineering Equation Solver).

La fonction fondamentale fournie par EES est la solution d'un ensemble d'équations algébriques. EES peuvent aussi résoudre des équations différentielles, les équations avec les variables complexes, faire l'optimisation, fournissent la rétrogradation linéaire et non linéaire, produisent des complots de qualité de publication, simplifient des analyses d'incertitude et fournissent des animations.

L'EES est particulièrement utile pour les problèmes de conception dans lesquels les effets d'un ou de plusieurs paramètres doivent être déterminés. Le programme fournit cette capacité avec son tableau paramétrique, qui est similaire à une feuille de calcul. L'utilisateur identifie les variables indépendantes en saisissant leurs valeurs dans les cellules du tableau. L'EES calculera les valeurs des variables dépendantes dans le tableau. La relation entre les variables du tableau peut alors être affichée dans des tracés de qualité publique. L'EES permet également de propager l'incertitude des données expérimentales afin de fournir des estimations de l'incertitude des variables calculées. Avec l'EES, il n'est pas plus difficile de résoudre des problèmes de conception que de résoudre un problème pour un ensemble fixe de variables indépendantes.

3.2 : Modèles d'un system ORC :

Le cycle Organique Rankine utilise un fluide de travail secondaire qui, comparé à la vapeur, a un point d'ébullition bas et une pression de vapeur élevée à basse température.

La figure 3.1 montre le diagramme ORC utilise 6 composantes fondamentales de la production de pouvoir : les échangeurs thermiques, la turbine, générateur, condenseur, les tours de refroidissement et les pompes.

Le fluide de travail est préchauffé et évaporé dans l'échangeur de chaleur, où le milieu de chauffage est saumuré à partir d'une source géothermique. La vapeur saturée qui en résulte pénètre dans la turbine et se dilate. Après la dilatation dans le refroidissement de la turbine et la condensation du fluide de travail a lieu dans le condenseur. À partir du condenseur, le fluide de travail est pompé dans l'échangeur de chaleur. Le fluide de travail est dans un système en boucle fermée, qui est chauffé par la saumure pour s'évaporer puis refroidi pour condenser par l'eau de refroidissement provenant de la tour de refroidissement, qui est également la partie de la centrale.

Chapitre 3 : Modélisation d'un système ORC/GEO

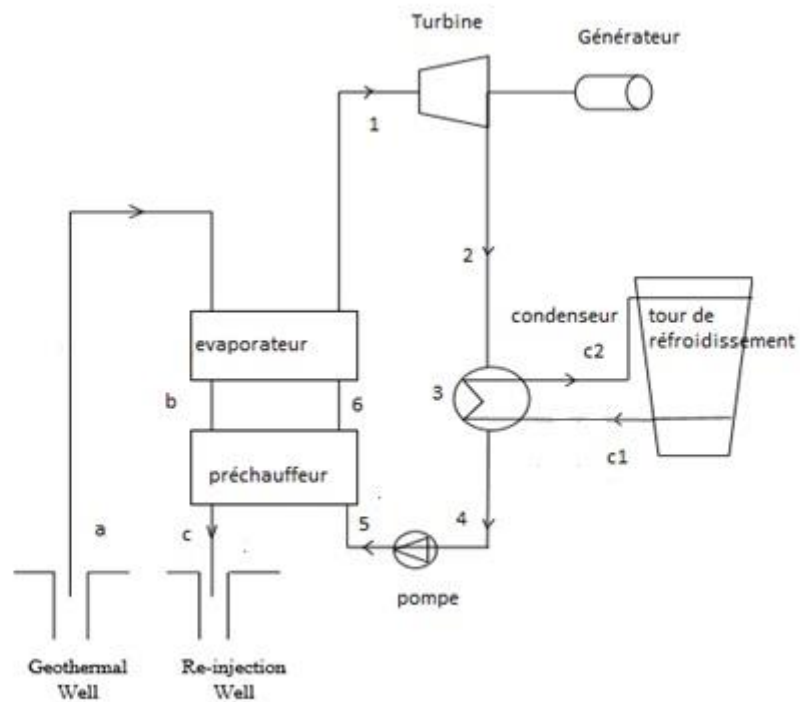


Figure 3.1 : Diagramme schématique du système ORC géothermie

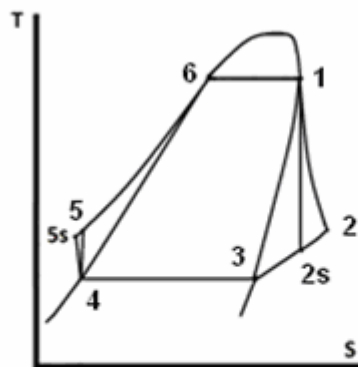


Figure 3.2 : diagramme T-S du cycle ORC

Chapitre 3 : Modélisation d'un système ORC/GEO

3.2.1 : Modèle du détenteur (turbine) :

L'analyse des turbines est la première étape de l'analyse du cycle. (Voir schéma - point 1). Le travail de la turbine, qui produit de l'électricité dans le générateur, est le paramètre principal et le plus intéressant à trouver.

Pour arriver à une conclusion basée sur laquelle des petites centrales géothermiques modélisées produisent le plus d'électricité, il est nécessaire de calculer le travail de la turbine, qui est donné par l'équation :

$$w_t = \dot{m}_f \eta_{is,t} (h_1 - h_{2s}) = \dot{m}_f (h_1 - h_2) \quad (3.1)$$

L'équation pour déterminer l'efficacité de la turbine aide à définir l'enthalpie dans le point 2 en sachant l'efficacité de la turbine, qui est d'habitude donnée par le producteur de la turbine.. L'efficacité des petites turbines du gaz est d'habitude dans une gamme de 70-80%

$$\eta_{is,t} = \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_{2s}} \quad (3.2)$$

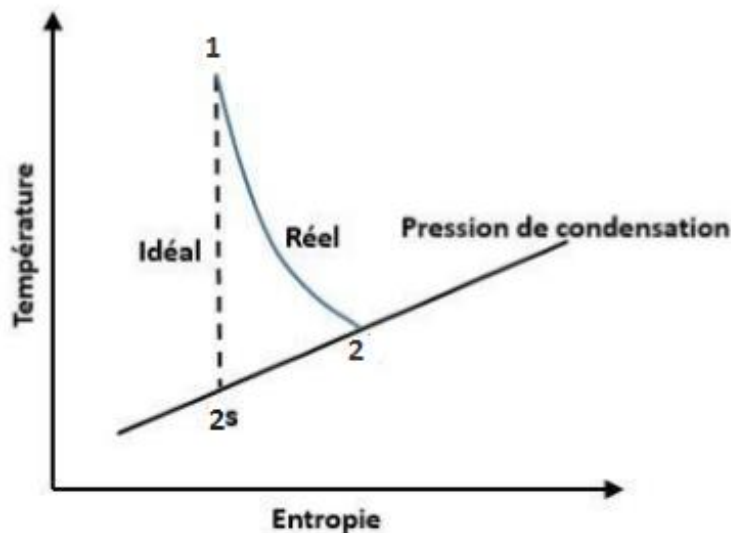


Figure 3.3 : Définition isentropique pour un détenteur

3.2.2 : Modèle de condenseur :

Le fluide de travail qui s'est répandu dans la turbine est condensé dans le condenseur. Le condenseur est un échangeur de chaleur fonctionnant avec deux fluides. Il utilise l'eau de refroidissement de la tour de refroidissement de l'air pour diminuer la température du fluide de travail et de le condenser (pour changer la phase du fluide de travail de la vapeur à l'état liquide).

Chapitre 3 : Modélisation d'un système ORC/GEO

La chaleur rejetée du fluide de travail dans l'eau de refroidissement du condenseur est calculée à l'aide des paramètres d'entrée et de sortie du fluide de travail dans le condenseur :

$$\dot{Q}_c = \dot{m}_f(h_2 - h_4) \quad (3.3)$$

La relation entre le débit massique du fluide de travail et le débit massique de l'eau de refroidissement est donnée par des équations de bilan massique. Les équations de bilan massique aident à trouver le débit massique du fluide de travail ainsi que la température de condensation.

$$\dot{m}_f(h_2 - h_4) = \dot{m}_{eau} c_{p_{eau}}(T_{c2} - T_{c1}) \quad (3.4)$$

$$T_{c2} = T_{c1} + T_{\Delta 1} \quad (3.5)$$

T_{Δ} Augmentation habituelle de la température de l'eau d'entrée dans le condenseur causée par le transfert de chaleur entre l'eau de refroidissement et le fluide de travail.

3.2.3 : Modèle de la pompe :

Le fluide de travail est pompé du condenseur vers l'échangeur de chaleur au moyen d'une pompe d'alimentation. L'analyse de la pompe d'alimentation est basée sur les paramètres d'entrée connus et de sortie calculés en ce point du cycle.

Le travail de la pompe d'alimentation est calculé comme suit :

$$\dot{w}_p = \dot{m}_f(h_5 - h_4) = \dot{m}_f(h_{5s} - h_4) / \eta_{is,p} \quad (3.6)$$

Pour une compression adiabatique irréversible, on introduit le rendement mécanique de la pompe (appelé aussi rendement isentropique) :

$$\eta_{is,p} = \frac{(h_{5s} - h_4)}{(h_5 - h_4)} \quad (3.7)$$

Chapitre 3 : Modélisation d'un système ORC/GEO

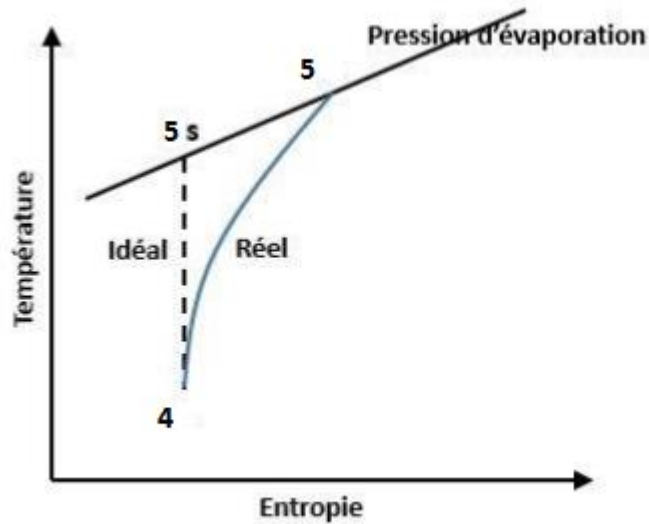


Figure 3.4 : Définition isentropique pour une pompe

3.2.4 : modèle des échangeurs :

Le préchauffeur et l'évaporateur de pointe 5 à pointe 1 sont des composants utilisés pour transférer la chaleur du fluide géothermique au fluide de travail. Ces composants sont souvent appelés échangeurs de chaleur et, dans certains cas, ces deux composants ne forment qu'une seule et même unité. Dans ce cas, le préchauffeur et l'évaporateur sont séparés. Le préchauffeur chauffe le fluide de travail avant qu'il ne pénètre dans l'évaporateur. Lorsque le point d'ébullition est approché, le fluide organique est transféré dans l'évaporateur pour s'évaporer avant d'être envoyé dans la turbine.

$$Q_{\text{geo}} = \dot{m}_{\text{geo}}(h_a - h_c) \quad (3.8)$$

$$Q_{\text{chaude}} = \dot{m}_f(h_1 - h_5) \quad (3.9)$$

$$T_6 = T_a - \Delta T_2 \quad (3.10)$$

$$T_b = T_6 - \Delta T_2 \quad (3.11)$$

Le bilan thermique thermodynamique est donc :

$$\dot{m}_f(h_1 - h_5) = \dot{m}_{\text{geo}}(h_a - h_c) \quad (3.12)$$

Et dans le cas où fluide géothermique contient de gaz dissous et de solides, l'équation précédente devient :

$$\dot{m}_f(h_1 - h_5) = \dot{m}_{\text{geo}}cp(T_a - T_c) \quad (3.13)$$

Chapitre 3 : Modélisation d'un système ORC/GEO

Pour l'évaporateur :

$$Q_{evp} = \dot{m}_{geo} cp(T_a - T_b) \quad (3.14)$$

$$\dot{m}_f(h_6 - h_5) = \dot{m}_{geo} cp(T_a - T_b) \quad (3.15)$$

Pour le préchauffeur :

$$Q_{prh} = \dot{m}_{geo} cp(T_b - T_c) \quad (3.16)$$

$$\dot{m}_f(h_5 - h_4) = \dot{m}_{geo} cp(T_b - T_c) \quad (3.17)$$

3.2.5 : Performance de système ORC/GEO

Le rendement thermique est obtenu en utilisant la première loi de la thermodynamique; voici la répartition du travail produit par la turbine et de la chaleur extraite du fluide géothermique dans le préchauffeur et l'évaporateur.

La chaleur extraite de l'échangeur de chaleur (préchauffeur et évaporateur) est donnée par l'équation 2 et l'efficacité thermique du cycle est donnée par l'équation suivante:

$$\text{Rendement de cycle :} \quad \eta_{cycle} = \frac{w_{net}}{Q_{chaude}} \quad (3.18)$$

$$\text{Le travail net :} \quad w_{net} = w_t - w_p \quad (3.19)$$

3.3 : Les fluides de travail utilisés

L'expérience de ce travail se fait avec les fluides organiques purs comme montré dans le tableau 3.1. Il comprend 5 fluides de travail sélectionnés à partir de différentes études sur la sélection de fluide de travail de telle façon qu'il aura une gamme de température de la source de chaleur variant de (51)C jusqu'à (98)C. [16] Les fluides sélectionnés sont :

- 1, 1,1-Trifluoroethane (R143a)
- 1, 1, 1,2-Tetrafluoroethane (R134a)
- Difluoromethane (R32)
- 1, 1, 1, 3, 3,3-Hexafluoropropane (R236fa)
- 1, 1, 1, 2, 3, 3,3-Heptafluoropropane (R227ea)

Chapitre 3 : Modélisation d'un système ORC/GEO

Tableau 3.1 : La température et pression critique pour différents fluides organiques purs qui peuvent être considéré comme fluide de travail. [17]

Nom	Nom courte	Pcrit (bar)	Tcrit (°C)
Les Hydrocarbures (HCs)			
Isobutene	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 3 : Modélisation d'un système ORC/GEO

3.3.1 : Les caractéristiques des fluides utiles :

3.3.1.1 : 1, 1, 1-Trifluoroéthane (R143a)

Avec la formule CH_3CF_3 , est un composé de fluorocarbure qui est un gaz clair et incolore. Il est utilisé comme réfrigérant seul ou plus souvent comme composant de mélanges mélangés. Contrairement aux CFC utilisés comme réfrigérants, le trifluoroéthane n'a pas d'atomes de chlore et n'est donc pas un produit chimique appauvrissant la couche d'ozone, bien que sa stabilité chimique élevée et son pouvoir absorbant dans l'infrarouge en font un puissant gaz à effet de serre. Il est également utilisé comme propulseur dans les produits d'air en conserve utilisés pour nettoyer les équipements électroniques. Les caractéristiques principales de ce fluide sont [18 ; 19]:

- Masse molaire : 84.04g/mol
- Masse volumique : 1300kg/m³ à 30°C
- Température de fusion : -111°C
- Température d'ébullition : -47.2°C
- Température critique : 72.9°C
- Pression critique : 37.8bar
- Solubilité dans l'eau : 548mg/l à 25°C

3.3.1.2 : 1, 1, 1, 2-Tetrafluoroéthane (R134a)

C'est un hydrocarbure halogéné de formule $C_2H_2F_4$ et il appartient à la classe des HFCs. Il est appelé aussi Solkane ou Norflurane. Il a été désigné pour remplacer certains CFC dont le R12 (il a à peu près les mêmes utilisations). Ce fluide n'a aucun effet sur la couche d'ozone (son ODP est égal à 0) mais il contribue à l'effet de serre (son GWP est estimé à 1400) même si il ne présente aucun danger pour l'homme. Les caractéristiques principales de ce fluide sont [20]:

- Masse molaire : 102.3g/mol
- Masse volumique de la phase liquide (1.013bar et 25°C) : 1206kg/m³
- Point d'ébullition (1.013bar) : -26.6°C
- Point de fusion (1.013bar) : -101°C
- Température critique : 100.9°C
- Pression critique : 40.3bar
- Solubilité dans l'eau (1.013bar et 25°C) : 0.21vol/vol
- Chaleur latente de vaporisation (1.01bar au point d'ébullition) : 215.9kJ/kg

Chapitre 3 : Modélisation d'un système ORC/GEO

3.3.1.3 : 1, 1, 1, 3, 3, 3-Hexafluoropropane R236fa:

Le HFC 236fa est un remplacement du CFC destiné à être utilisé comme réfrigérant et agent d'extinction d'incendie.

Il est utilisé comme propulseur de fusée à gaz froid par le vaisseau spatial Mars Cube One. Lorsqu'il est utilisé comme extincteur, l'hexafluoropropane porte le nom commercial Dupont, FE-36. Le 1, 1, 1, 3, 3, 3-hexafluoropropane est un gaz à effet de serre; son potentiel de réchauffement planétaire est de 6300.

Formule chimique: C₃H₂F₆

- Molar mass [kg/mol] : 0.1520384
- Point d'ébullition (1.013 bar) : -11.73 °C
- Température critique (°C) : 124.92 °C
- Pression critique (kpa) : 320 Kpa
- Limite supérieure d'inflammabilité (%): 12,5 % (v)
- Limite inférieure d'inflammabilité (%): 1,5 % (v)
- Pression de vapeur: 160,32 kPa (25 °C)
- Solubilité dans l'eau: 54 mg/l
- Température d'auto-inflammabilité: 287 °C

3.3.1.4 Difluoromethane R32 :

Les usages. Le difluorométhane est une molécule utilisée comme réfrigérant qui n'a aucun potentiel d'appauvrissement de la couche d'ozone (ODP), un indice de potentiel de réchauffement planétaire (GWP) 675 fois celui du dioxyde de carbone, sur la base d'une période de 100 ans, et il est classé comme A2L - légèrement inflammable par ASHRAE. [27]

- Formule chimique CH₂F₂
- Masse moléculaire 52,024 g · mol⁻¹
- Apparence Gaz incolore
- Densité 1,1 g cm⁻³ (sous forme liquide)
- Point de fusion -136 °C (-213 °F; 137 K)
- Point d'ébullition -52 °C (-62 °F; 221 K)
- log P -0,611
- Pression de vapeur 1518,92 kPa (à 21,1 °C)

Chapitre 3 : Modélisation d'un système ORC/GEO

3.3.1.5 : 1,1,1,2,3,3,3-Heptafluoropropane R227ea :

Le HFC-227ea est utilisé dans les systèmes d'extinction d'incendie dans les installations de traitement de données et de télécommunications, et dans la protection de nombreux liquides et gaz inflammables. Le HFC-227ea entre dans la catégorie des agents propres et est régi par la norme . HFC-227ea entre 6,25% et 9% selon le danger supprimé.

Sa formule chimique est $CF_3-CHF-CF_3$ ou C_3HF_7 . Avec un point d'ébullition de $-16,4^\circ C$, c'est un gaz à température ambiante. Il est légèrement soluble dans l'eau (260 mg / L). [28]

- Formule chimique C_3HF_7
- Masse molaire 170,03 g / mol
- Densité 1,46 g / cm³ à $-16^\circ C$
- Point de fusion $-131^\circ C$ ($-204^\circ F$; 142 K)
- Point d'ébullition $-16,4^\circ C$ ($2,5^\circ F$; 256,8 K)[29]

Le tableau 3.2 ci-dessous montre les propriétés physiques et les données environnementales et de la sécurité des fluides de travail sélectionné pour la simulation. Tous les fluides ont un GWP inférieure à 1000 sauf le R134a avec un GWP de 1370 et même leurs ODP sont nulles sauf le R141b avec un ODP de 0.12 qui était choisi à cause de sa stabilité chimique. Il est visible aussi que tous les fluides ne sont pas toxiques mais les deux hydrocarbures sont extrêmement inflammables avec des petites vies atmosphériques

Tableau 3.2: Données physiques et environnementales des fluides de travail utilisés dans la simulation. [23]

Fluids	Données Physiques			Groupe de Sécurité	Données Environnementales		
	M [g/mol]	Tcrit [°C]	Pcrit [bar]		GWP 100a	ODP	Vie atm [an]
R143a	84.041	72.707	37.61	A2	4180	0.00	47.1
R134a	102.03	101.06	40.59	A1	1370	0.00	13.4
R236fa	152.24	124.92	32	A1	9820	0.00	242
R227a	170.03	101.75	29.25	A1	3580	0.00	38.9
R32	52.024	78.05	57.82	A2L r	716	0.00	5.2

Chapitre 3 : Modélisation d'un système ORC/GEO

3.4 : La géothermie en Algérie

En Algérie la recherche géothermique rentre dans le cadre des activités du Centre de Développement des Energies Renouvelables C.D.E.R. de Bouzaréah et fut aussi l'objet de recherches à la SONATRACH (Direction Recherche et Développement, 1980)

Les études en géothermie ont été menées principalement sur le Nord algérien ; parmi ces études on peut citer [24]...etc.

Ces études montrent que le Nord de l'Algérie compte un nombre important de sources thermales. Près de 200 sources ont été inventoriées, elles sont réparties à travers tout le territoire nord algérien, majoritaires au Nord-Est (voir tableau 3). Parmi les plus importantes, nous pouvons citer Hammam Meskoutine (98°C) à Guelma ; Hammam Boutaleb (52°C) à Sétif et Hammam Bouhanifia (66°C) à Mascara. Ces nombreuses sources thermales émergent principalement à partir des calcaires jurassiques du Nord de l'Algérie.

Trois zones à fort gradient géothermique sont mises en évidence ; au Nord-Ouest, au Nord-Est et au Centre-Nord de l'Algérie, plus particulièrement dans les régions d'Oran, de la Kabylie et de Constantine.

En plus des nombreuses sources thermales dans le Nord du pays, il existe dans le Sud algérien et plus exactement dans le Sahara septentrional une importante réserve en eau thermale qui est la nappe du Continental Intercalaire.

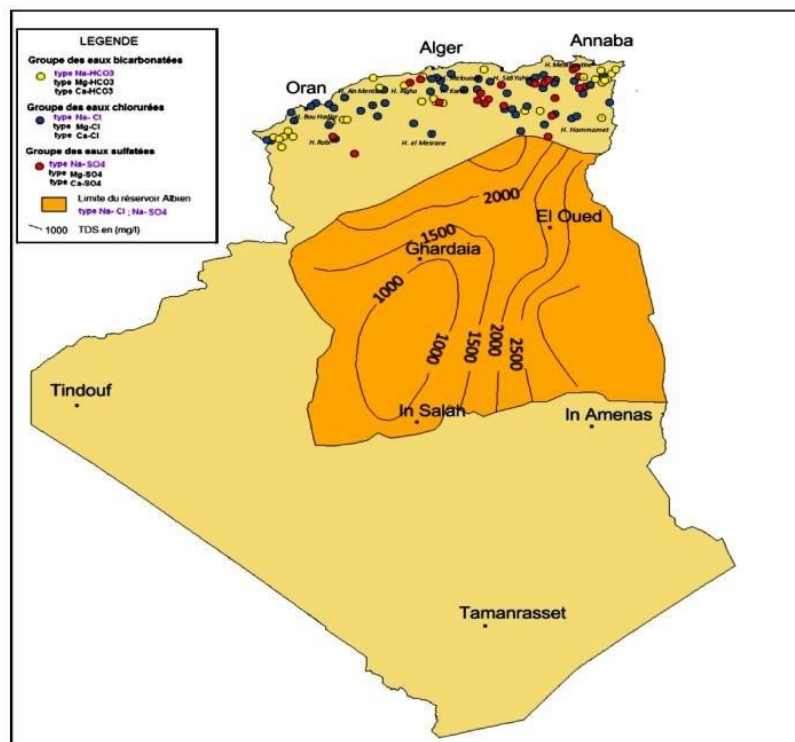


Figure 3.5 : Localisation des Resource Géothermique dans L'Algérie

Chapitre 3 : Modélisation d'un système ORC/GEO

Tableau 3.3 : Principales Caractéristiques physico-chimiques de quelques sources thermales du Nord de l'Algérie

Sources thermales	Région	Faciès chimique	Résidus Secs (mg/l)	Température (°C)	Débit (l/s)
H. Chellala	Guelma	Sulfaté magnésien	1600	98	100
H. Bou Hadjar	Ain-Timouchant	Chloruré sodique	3210	66.5	
H. Bouhanifia	Mascara	Bicarbonaté sodique	1400	66	
H. Boutaleb	Setif	Chloruré sodique	3416	52	-
H. Essalihine	Khenchela	Chloruré sodique	2082	70	-
H. Salhine	Skikda	Sulfaté magnésien	2046	55	-
H. Sidi Bou Abdellah	Relizane	Chloruré sodique	1194	51	-
H. Delaa	M'sila	Sulfaté sodique	1980	42	-
H. Rabi	Saida	Chloruré sodique	1524	47	'
H. Sillal	Bejaia	Chloruré sodique	2221	46	-
H. Ben Haroun	Constantine	Chloruré sodique	3762	42	10

Chapitre 3 : Modélisation d'un système ORC/GEO

En Algérie, depuis fort longtemps les eaux thermales ont été utilisées pour leurs bienfaits thérapeutiques. Les sculptures découvertes dans les régions des hammams indiquent que bien avant l'époque romaine des établissements balnéaires existaient à ces endroits. Mais ce sont surtout les romains qui ont le mieux développé les techniques de captation et de canalisation des eaux thermales. Très souvent, ils ont construit leurs villes à proximité des établissements thermaux afin de tirer le meilleur parti de ces sources thermales.

Aujourd'hui, bien que le potentiel géothermique soit très important dans notre pays, le domaine de l'exploitation reste limité et se restreint principalement à la balnéothérapie et aux utilisations domestiques. [25]

CHAPITRE 4 : RÉSULTAT ET DISCUSSION

Chapitre 4 : RESULTAT ET DISCUSSION

Introduction :

Il convient de noter que les fluides de travail choisis dans ce travail ne sont pas vraiment les fluides optimaux qui existent dans la technologie ORC. Ils ont été choisis afin de fournir une diversité en termes de famille de fluides, de T_{crit} et de P_{crit} et donc de bien comprendre les effets des différents fluides de travail sur le rendement du cycle et le travail net.

4.1 : production de travail à partir les cas géothermie choisi :

Dans la première partie on a varié les 3 cas qui nous avons choisi n'importe quel 3 température de la source chaude, et gardé la température de condensation minimale de 16°C a été réglée, et une température de paroi d'injection fixe de 30 C. avec une pression sat c'est la pression maximale de chaque fluide indique dans les tableaux suivant. Change avec la température de la source chaude afin comparais le travail net et rendement de chaque cas géothermie et chaque fluide de travail.

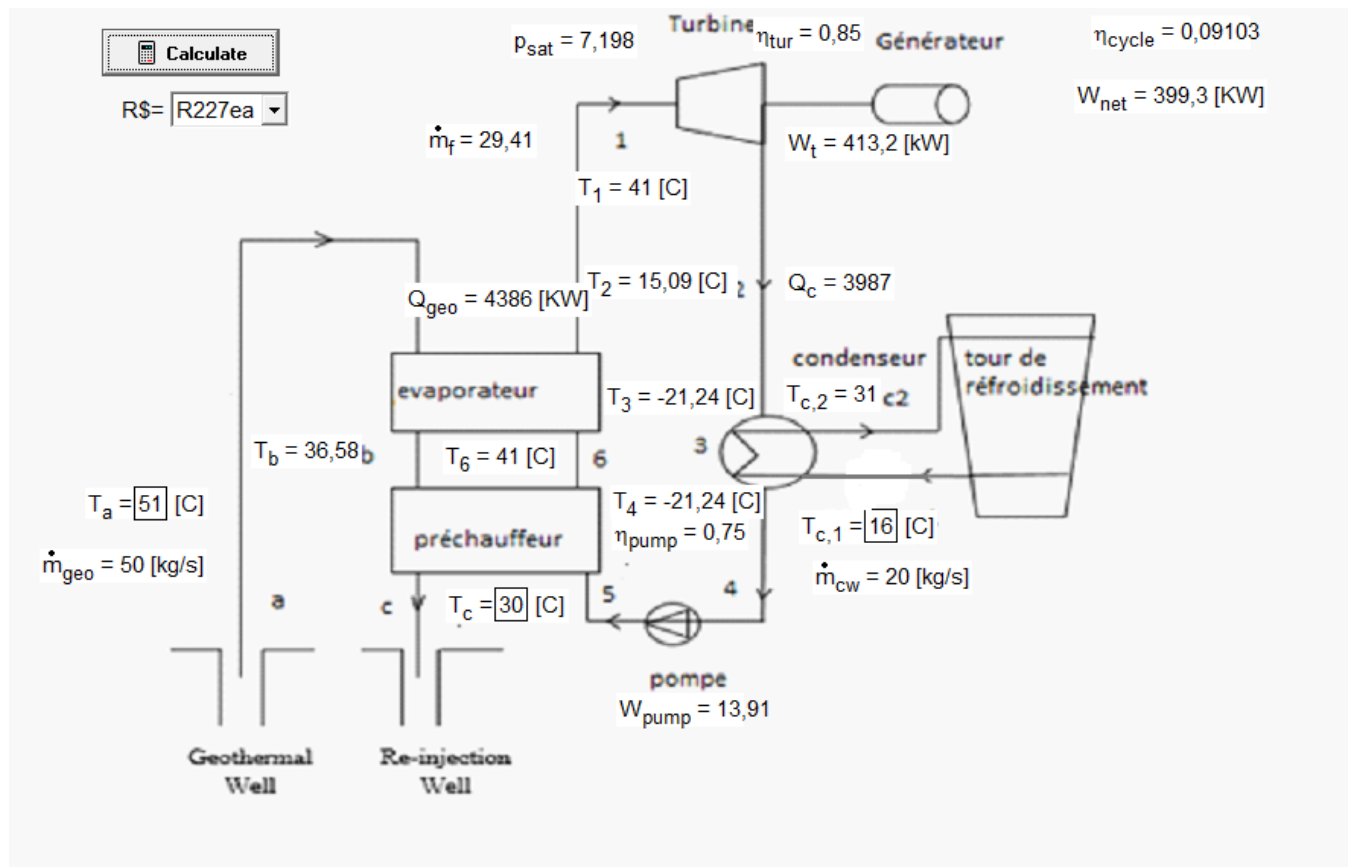


Figure 4.1 : Cycle de Rankine organique avec paramètres d'entrée et de sortie avec une puissance de sortie exemple de fluide R227ea et $T_a=51^\circ\text{C}$ (source: EES)

Chapitre 4 : RESULTAT ET DISCUSSION

4 .1.1 : production de travail dans 1 er cas H.Sidi Bou Abdellah (Relizane)

T° : 51 C° :

Tableau 4.1: Les résultats pour les 5 fluides de travail à la température de source chaude de 51[C°] « H.Sidi Bou Abdellah (Relizane)» Source EES.

1..10	1	2	3	4	5
	R\$	η_{cycle}	W_{net} [KW]	Q_{eva} [KW]	P_{max} [bar]
Run 1	R134a	0,1178	516,9	3056	10,45
Run 2	R236fa	0,06064	266	3575	4,5
Run 3	R227ea	0,09103	399,3	3012	7,198
Run 4	R32	0,1763	773,1	2765	25,39
Run 5	R143a	0,1565	686,3	2417	18,77

Le tableau 4.1 : tableau paramétrique montre les résultats pour une source chaude à 51°C avec 5 fluides de travail différents. Les résultats montrent que le travail net et le rendement du cycle sont généralement moyens à cette température de source chaude de 266 à 773 KW et de 6 à 17% respectivement.

Le Hexafluoropropane (R236fa) donne un travail et un rendement très faible de 266 KW et 6% respectivement à cette température, car la température critique est 126 C°. Suivi par R227ea il donne un travail et rendement de 400 KW ET 09 % respectivement. Le R134a donne une résultats pas mal par rapport les autre doux fluides de travail et rendement de 3056 KW et 11,78% respectivement .passé a R143a et R32 comme les meilleur fluides a cette température fournissant un travail net et rendement de cycle plus élevée de 2765 -2417 [KW]et 15,65 – 17,63% respectivement

Chapitre 4 : RESULTAT ET DISCUSSION

4.1.2 : Production de travail à 2eme cas H. Essalihine (Khenchela) T° :70C° :

Tableau 4.2 : Les résultats pour les 5 fluides de travail à la température de source chaude de 70[C°] « H.Essalihine (Khenchela)» (Source EES).

▶ 1..10	1 R\$	2 η_{cycle}	3 W_{net} [KW]	4 Q_{eva} [KW]	5 P_{max} [bar]
Run 1	R134a	0,144	1205	4878	16,83
Run 2	R236fa	0,0941	787,2	5766	7,633
Run 3	R227ea	0,1174	982,1	4670	11,75
Run 4	R32	0,1944	1626	4129	39,33
Run 5	R143a	0,1727	1445	3258	28,77

A cette température le tableau 4.2 montre une amélioration des résultats par rapport aux résultats précédents donne un travail net et rendement de cycle de 787 à 1626 [KW] et 09,41 à 19,44 % respectivement.

Comme les résultats donnent dans le tableau précédent le R236fa donne un mal travail et rendement de 787 KW et 09%. Suivi par R227ea et R134a est relativement pas mal a cette température. Le R143a reste avec R32 comme les meilleurs fluides à cette température fournissant un rendement de cycle plus élevée et un travail net de 17,27 à 19,44% et 1445 à 1626 [KW] respectivement.

4.1.3 : Production de travail à 3eme cas H. Chellala (Guelma) T° :98C° :

Tableau 4.3: Les résultats pour les 5 fluides de travail à la température de source chaude de 98[C°] « H.Chellala (Guelma)» (Source EES).

▶ 1..10	1 R\$	2 η_{cycle}	3 W_{net} [KW]	4 Q_{eva} [KW]	5 P_{max} [bar]
Run 1	R134a	0,1682	2407	5312	31,16
Run 2	R236fa	0,1291	1847	7310	14,95
Run 3	R227ea	0,1426	2042	4825	22,11
Run 4	R32				
Run 5	R143a				

A cette température, seuls 3 fluides de travail peuvent être comparés car R143a et R32, subiront une surchauffe excessive, c'est parce qu'ils ont des températures critiques très

Chapitre 4 : RESULTAT ET DISCUSSION

basses par rapport à la température de la source chaude. Comme le montre le tableau 4.3, des valeurs travail net de cycle relativement plus élevées 1847 à 2047 [KW], et des rendements de cycle est stable par rapport des valeurs de tableau précédents avec des valeurs 12,91 à 16,82 %.

Le R134a comporte trée bien par rapport les autre doux fluides de travail et de rendement de 2407 [KW] et 16,82 % respectivement. Les fluides restants ont également un rendement de cycle relativement élevée et un travail net. Il est donc clair que pour le même fluide de travail reste, il y a une augmentation de travail net et rendement pour une augmentation de la température de la source chaude.

4.2 : Les effets des températures dans ORC :

Pour deuxième partie de ce travail on a choisirai une source géothermie et seulement trois fluides de travaux. Ce cas est le dernier cas **H.Chellala (Guelma)** de température de 98C°, et trois fluide que nous travailler dans ce cas R134a, R236fa et R227ea.

Nous avons choisi cette source par ce que le travail net donne dans cette cas est plus élevée par rapport les autre cas.

4.2.1 : Les effets de la température à l'entrée de détendeur sur le rendement du cycle :

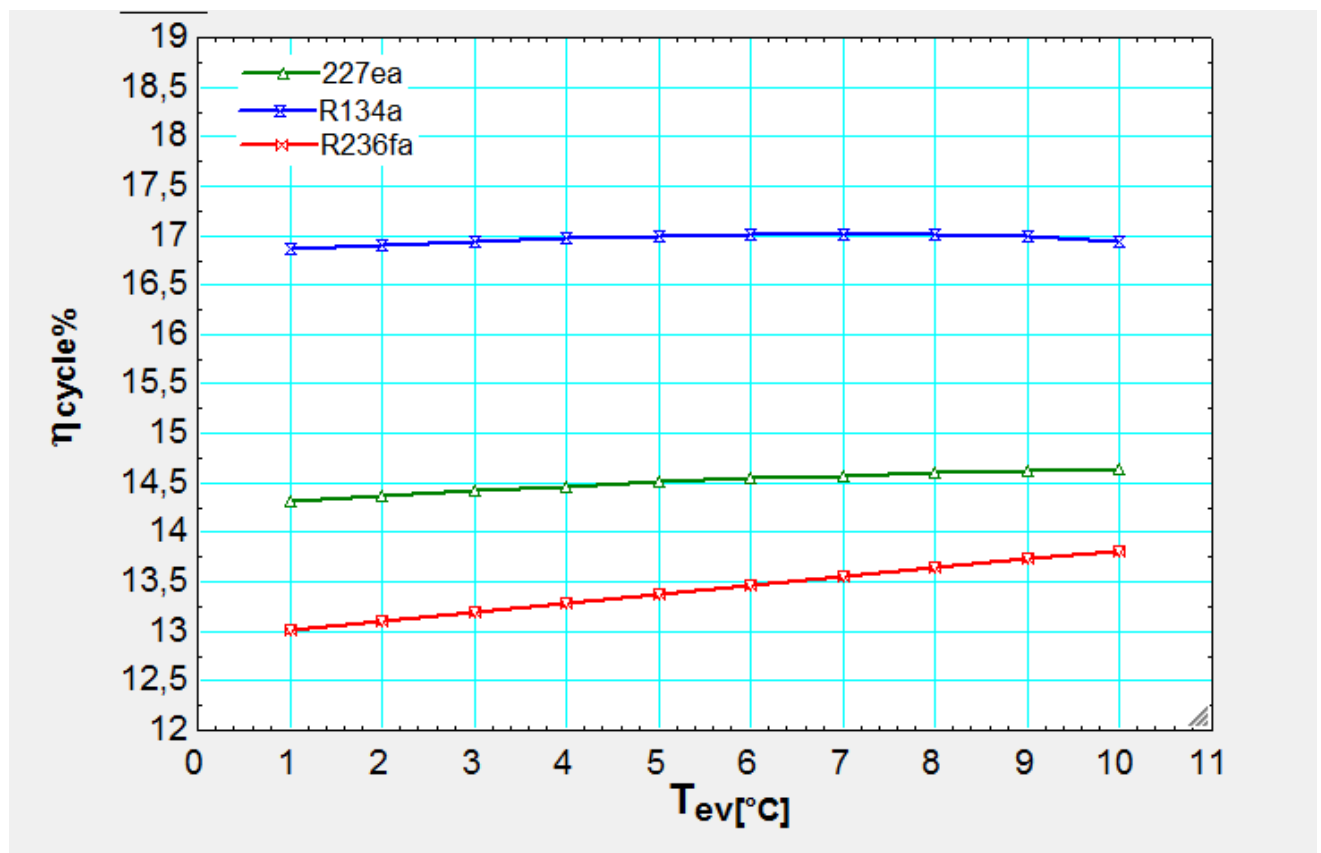


Figure 4 .2 : Courbe du rendement du cycle avec la température à l'entrée du détendeur. « Source EES»

Chapitre 4 : RESULTAT ET DISCUSSION

La figure 4.2 montre qu'une légère augmentation de la température d'entrée du détendeur augmente légèrement le rendement du cycle pour tous les fluides de travail. Pour le R227ea et R235fa, une augmentation de 10°C entraîne une augmentation de 0,36% et 0,87% de l'efficacité du cycle, respectivement. Ces valeurs montrent que chaque travail réagit d'une manière différente de l'autre. D'autre part, R134a réagit différemment avec une augmentation de 0,18% pour une augmentation de 5,5 °C Puis il a diminué Pour les 3,5°C prochains degrés Montant décroissant 0,1%. ayant un gradient plus élevé que les deux autres fluides de travail. Il a la température la moins critique entre les trois et il tend à être plus sensible à ces légères variations de température.

4.2.2 : Les effets de la température à l'entrée de détendeur de la surchauffe sur le travail net du cycle :

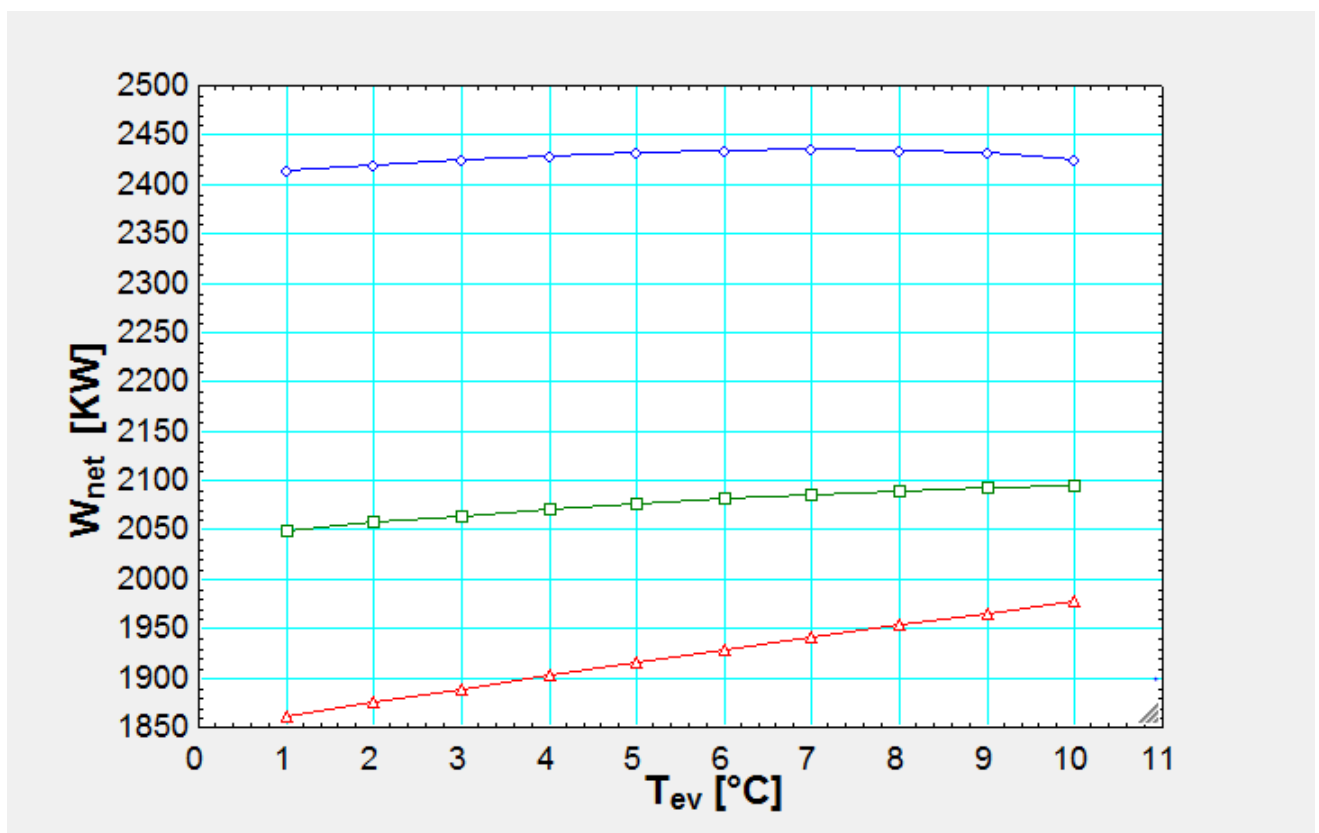


Figure 4.3 : Courbe du travail net du cycle avec la température à l'entrée du détendeur

Dans la figure 4.3, on peut voir que le travail net augmente légèrement lorsque les fluides de travail sont légèrement surchauffés de 10°C plus haut que la température d'évaporation. Le travail net pour R134a jusqu'à le résultat précédent augmenté de 21 [KW], et diminué de 9 [KW], donc pour augmentation de 10°C il augmente 12 [KW] ce qui est légèrement inférieur à celui du R227ea à 368 [KW]. R236fa ayant un gradient légèrement plus élevé que les deux autres fluides de travail et son travail net augmenté de 447 [KW].

Chapitre 4 : RESULTAT ET DISCUSSION

Globalement, les résultats montrent que le travail net dépend bien de l'augmentation de l'enthalpie spécifique à différentes températures pour chaque fluide de travail.

4.2.3 Les effets de la température de fluide de refroidissement sur le Rendement net du cycle :

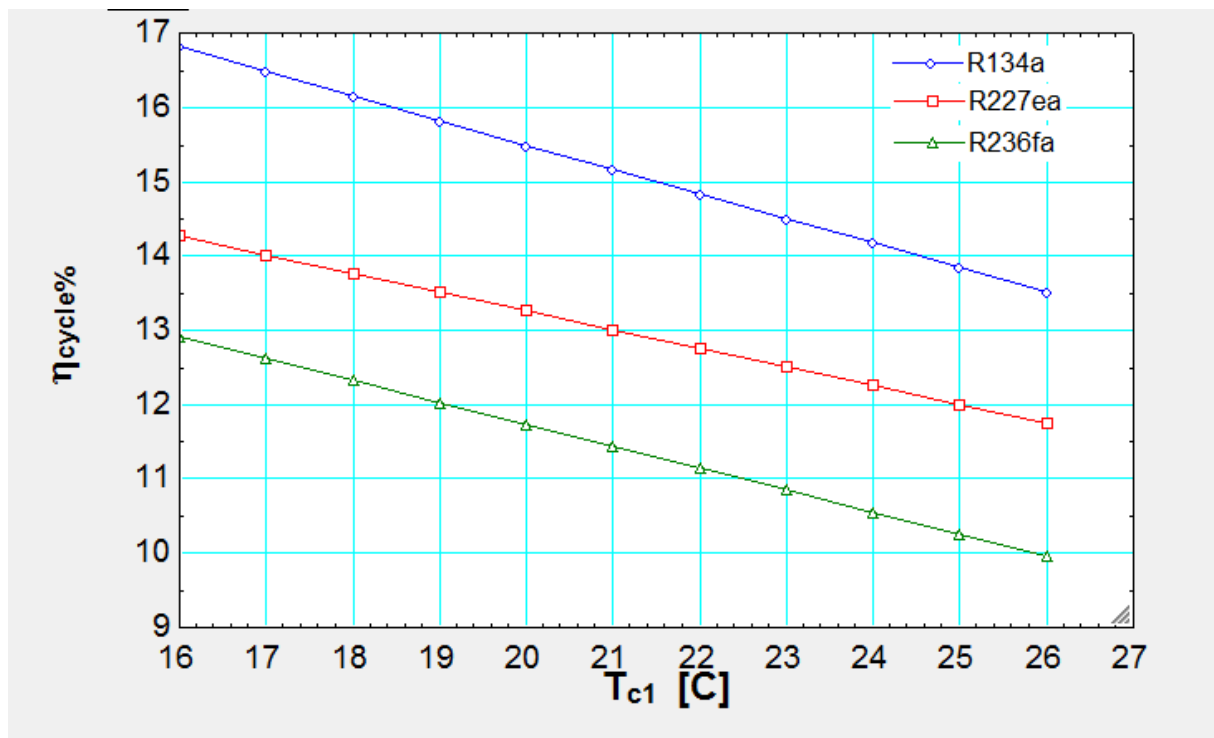


Figure 4.4 : Courbe du rendement du cycle avec la température de fluide de refroidissement

La figure 4.4 montre que l'augmentation de la température de fluide de refroidissement a un impact négatif énorme sur le rendement du cycle. Pour tous les fluides de travail, il y a une baisse linéaire du rendement du cycle lorsque la température augmente de 10°C. L'efficacité du cycle pour R134a diminue de 3,21%, pour R227ea et R236fa il baisse de 2,5% et 2,96% respectivement. Généralement estimer que les graphiques pour les trois ont le même gradient. Ces résultats indiquent que les systèmes ORC seront plus efficaces dans des températures de condensation plus basses.

Chapitre 4 : RESULTAT ET DISCUSSION

4.2.4 : Les effets de la température de fluide de refroidissement sur le travail net du cycle :

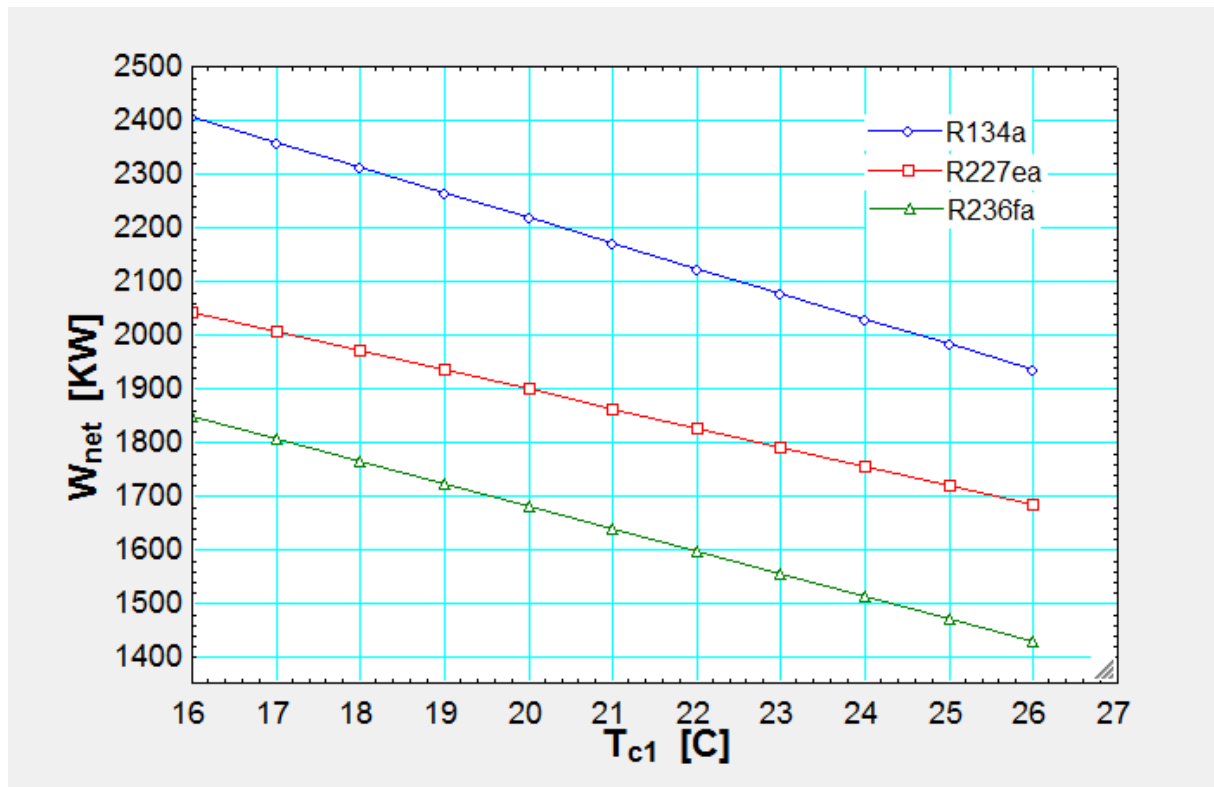


Figure 4.5 : Courbe du travail net du cycle avec la température de fluide de refroidissement

Comme le montre la figure 4.5, l'augmentation de la température de fluide de refroidissement par 10°C a un impact négatif sur le travail net du cycle. Comme dans le cas précédent, R227ea donne de bons résultats en produisant moins de travail. Cependant, le graphique montre également qu'ils perdent moins de travail lorsque la température de fluide de refroidissement est augmentée par rapport à deux autres fluides ont des pertes dans le travail net de 360 [KW]. Tandis que le R134a ET R236fa subit une perte de 478 et 431 [KW] respectivement.

Donc l'augmentation de la température diminue le travail net de cycle et même le rendement de cycle, Sachant que le débit de fluide de refroidissement interfère dans les variations des résultats. Il est confirmé une fois de plus que les systèmes ORC fonctionnent efficacement avec un travail net élevé dans les cas où une température de condensation plus faible peut être réalisée.

Chapitre 4 : RESULTAT ET DISCUSSION

4.2.5 : Les effets de la température de panneaux de réinjection sur le travail net du cycle :

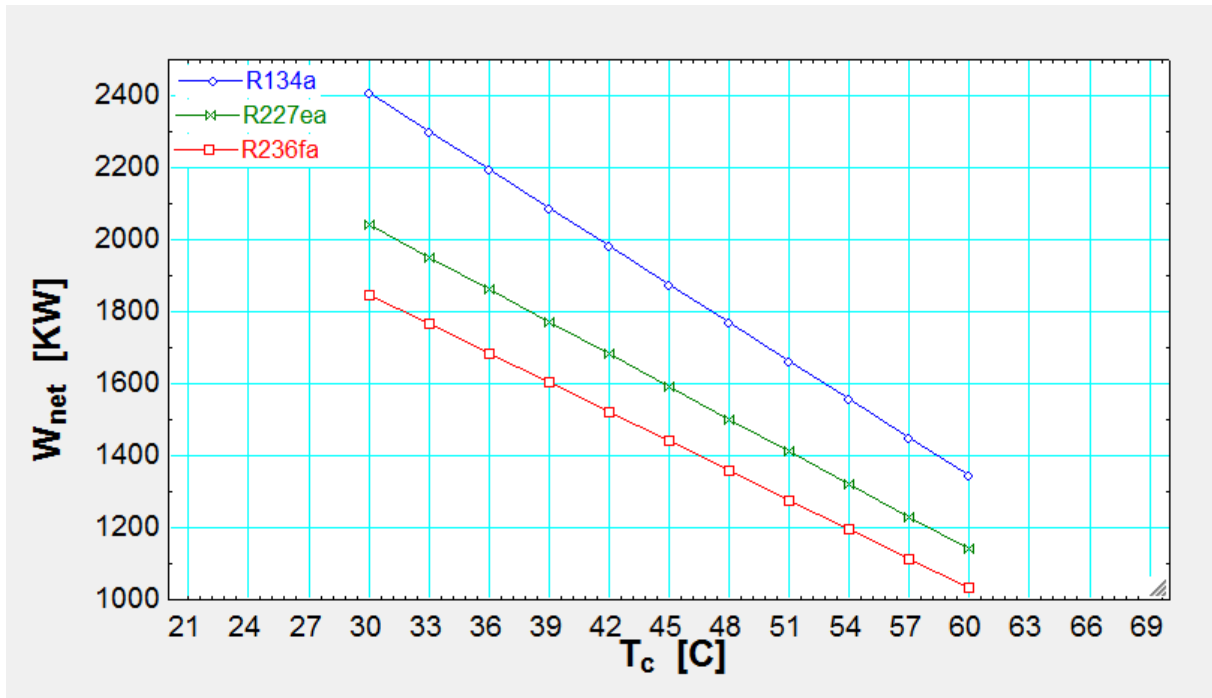


Figure 4 .6 : courbe de travail net de cycle avec la température de panneaux de réinjection

Figure 4.6 montre la variation de travail net de sortie sur une plage de températures de réinjection de 30 ° C à 60 ° C pour différents fluides de travail. L'analyse est réalisée en utilisant une température géothermique de 98 ° C et. La température de réinjection varie de 30 ° C à 60 ° C pour maintenir constante l'autre condition de l'installation. le graphique montre également qu'ils perdent plus de travail lorsque la température de réinjection est augmentée le travail net est Décroissant. R236fa donné Moins des pertes par apport les deux autre fluide 820[KW], conclure que R236fa donne des bon résultat. Tandis R134a et R227ea subit une perte de 1050[KW] et 900[KW] respectivement. Donc plus la température de panneaux de réinjection est diminué, le cycle donné un bon travail.

CONCLUSION GÉNÉRAL

CONCLUSION GENERALE

Les machines à cycle organique de Rankine (ORC) sont utilisées pour transformer les sources de chaleur à basse et moyenne température en électricité. Ce type des machines a pour rôle d'améliorer l'efficacité énergétique des procédés industriels, par la valorisation de chaleur, et pour la production d'électricité à partir de différentes sources de chaleur (géothermie, solaire à concentration, biomasse).

Dans cette étude, on a vu comment utilisée un cycle ORC pour on récupère la chaleur à partir des sources géothermie a base température, on a choisir trois différentes sources des différentes températures dans l'Algérie, des températures de 51-70 et 98[°C]. Cinq fluides organique des travaille utilisée c'est Les Hydrofluorocarbures (HFCs) R134a, R32, R143a, R227ea et R236fa.

Pour évaluer la performance de la centrale binaire ORC, une analyse de sensibilité a été réalisée en fonction de la variation de la température géothermique, de la température de réinjection et de la température de condensation.

Dans la première partie, l'analyse énergétique nous a permet de déterminer les différentes puissances de chaque composant du système et la performance du cycle pour chaque cas géothermie. Cette étude nous a permis aussi de choisir le meilleur fluide organique adapté à cette installation, qui est le fluide R32 c'est le meilleur fluide dans les doux premier cas de température 51 et 70 °C qui donne un rendement de cycle plus élevée et un travail net de 17,63 à 19,44% et 773,1 à 1626 [KW] respectivement. Et pour le dernier cas de température de 98°C le meilleur fluide c'est R134a qui fournir un rendement et un travail net 16,82 % et 2407 [KW] respectivement, car les fluides R143a et R32 n'est pas définir a cette température.

Dans la deuxième partie, on a choisir un seul cas géothermie le dernier cas de température de 98°C car il donne le meilleur travail net de cycle par apport les autre cas avec trois fluides R134a, R227ea et R236fa. On a étudié les différents de travail net et rendement de cycle par varier la température de l'évaporateur ou bien la température à l'entrée de détendeur, et variation de la température de fluide de refroidissement et température de réinjection.

On a présenté les résultats obtenu par des graphes, chaque graphe représente le travail net et le rendement de cycle. Chaque courbe représente la variation de travail net et le rendement en fonction de la température de l'évaporateur et température de fluide de refroidissement et réinjection, on remarque que chaque paramètre influe sur notre travail et rendement.

Une légère augmentation de la température d'entrée du détendeur a de légers effets sur le rendement du cycle et sur le travail net, on remarqué que le travail net et rendement de chaque courbe augmente avec l'augmentation de de la température d'entrée du détendeur sauf R134a est augment jusqu'à une valeur maximal, ensuite il commence à diminuer.

Une légère augmentation de la température de fluide de refroidissement a des effets

CONCLUSION GENERALE

significatifs sur le rendement du cycle et sur le travail net, il convient donc d'être prudent.

En revanche, une augmentation de température de réinjection à une diminution du taux global de transfert de chaleur, la puissance de sortie produite et le rendement de cycle.

Les résultats montrent que pour tous les 5 fluides de travail, le travail peut être bien produit à basse température, Chaque fluide de travail fonctionne bien dans une plage de température spécifique, R227ea s'est avéré être plus sensible à ces changements de température de fluide de refroidissement que le R134a et R236fa. Lorsque la température de fluide de refroidissement augmentait, les fluides des travaux perdaient plus de travail net. R32 et R143a n'est pas définir a haut température car il a une température critique faible, et travailler bien dans base température.

BIBLIOGRAPHE

BIBLIOGRAPHE :

[1]-<http://www.kcorc.org/en/science-technology/history/>

[2]- Costante M. Invernizzi, Closed Power Cycles, Springer-Verlag London, June 2013 (Chapter Three).

[3]- Récupération de chaleur fatale pour la production d'électricité dans l'industrie et applications en energie Renouvelable.

[4]-<https://orc-world-map.org/analysis> By Thomas Tartière. Last update : [Octobre, 2017.](#)

[5]- Bayer, B., Rybach, L., Blum, P., Brauchler, R. 2013. Review on life cycle environmental effects of geothermal power generation. Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 26, p. 446-463.

[6]-Un extrait de ce chapitre est librement téléchargeable avec l'accord des Presses de l'Ecole des Mines de Paris . Chapitre 9 tome 3.

[7]- M. Feidt, Energétique : Concepts et applications Cours et exercices corrigés: Dunod, 2006.

[8]-R. DiPippo: Geothermal Power Plants – Principles, Applications. Case Studies and Environmental Impact, Elsevier, Great Britain, 2010.

[9]-Geothermal Power Plants: Principles, Applications, Case Studies and Environmental Impact. January 2008 Publisher: Elsevier Science & Technology.

[10]- K.S. Rawat, H. khulve, A.K. Pratihar , Thermodynamic Analysis of Combined ORC VCR System Using Low Grade Thermal Energy , International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology 3(2015) ,515-522.

[11]- http://docnum.univ-lorraine.fr/public/DDOC_T_2014_0117_LE.pdf

[12]- master s thesis by kevin j .digenova 2011 design of organic rankine cycle for convection of waste heat in a polygeneration plan massachusetts of technology p(20).

[13]- <https://dspace.mit.edu/handle/1721.1/68937>

BIBLIOGRAPHE

- [14]- <http://docnum.univ-lorraine.fr/public/DDOC T 2014 0117 LE.pdf>
PAGE(26-27)
- [15]- 100 YEARS OF GEOTHERMAL POWER PRODUCTION John W. Lund Geo-Heat Center .
- [16]- Master's thesis by Jaiyejeje Sunday Obafunmi (2014), Thermodynamic Analysis of Organic Rankine Cycles: Eastern Mediterranean University.
- [17]- 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.
- [18]- <http://www.globalsources.com/si/AS/Cosutin-Industrial/6008849396877/pdtl/R143a/1156535917.htm> : 23/04/2018
- [19]- NATIONAL REFRIGERANTS, INC. R143a Safety data sheet pris de la site: <http://www.refrigerants.com/pdf/SDS%20R143a.pdf>
- [20]- www.lespompeschaleur.fr/les-fluides-frigorigenes/ :20/04/2018;
- [21]- THE LINDE GROUP: PanGas: FICHE DE DONNÉES DE SÉCURITÉ, Isobutane, version 1.2, FDS n°: 000010021773.
- [22]- www.gas-servei.com/fr/fluidos/refrigerantes-hc/r-600a-isobutaneo- : 20/0/2018
- [23]- Stéphanie Jumel, Michel Feidt, Van Long Le (corresponding author) and Abdelhamid Kheiri (2012), Working fluid selection and performance comparison of subcritical and supercritical organic Rankine cycle (ORC) for low temperature waste heat recovery, ECEEE SUMMER STUDY on Energy efficiency in industry.
- [24]- SIA (Société suisse des ingénieurs et des architectes) : Norme SN 546384/6 :2010, «Sondes géothermiques ». Janvier 2010.
- [25]- Contribution à l'étude et dimensionnement d'une installation a base d'énergie géothermique pour la production d'énergie électrique. Présenter par :KHERBACHE FATIMA ZOHRASoutenu publiquement le 22/06/2015.
- [26]- G. Angelino, C. Invernizzi, Int. J. Refrig. 26 (2003) 51–58.

BIBLIOGRAPHE

[27]- 2009 ASHRAE Handbook.

[28]- NIST datapage for heptafluoropropane.

[29]- https://ec.europa.eu/clima/policies/f-gas/legislation_en