

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCH SCIENTIFIQUE



UNIVERSITE SAAD DAHLEB DE BLIDA 1

FACULTE DE TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT DE MECANIQUE

Projet de Fin d'Etudes

Pour l'obtention du Diplôme de Master en

Energétique

**Etude comparative des performances d'une machine a
récupération de chaleur par cycle orc et kalina**

Proposé et encadré par :

Le professeur Boussad Boumeddane

Réalisé par :

Zerouala Mohamed

Zarouri Rafik

kheyar djahid Naoufel

Année universitaire 2021/2022

Remerciements

Tous d'abord nous remercions dieu pour le courage, la patience, la réussite, la volonté et nos parentes pour le support et le soutien continu.

*On adresse notre remerciement à monsieur **Boussad 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.*

Nous remercions tous les membres de jury qui ont jugé modeste travail.

Nous remercions aussi tous les enseignants du département de mécanique généralement et l'option énergétique spécialement, sans oublier tous les étudiants d'énergétique

Dédicaces

Je dédie ce travail :

Mes chère parents Zarouri younes (ﷲ ﺑﺮﺣﻮﻟﺌﺎ) et zerouali nacira mon frère a Boston et mes sœur qui on été toujours a mes cotés tout au long de mes études et pour prend soin de moi tout ma vie merci beaucoup.

Rafik

A Ma maman karima Nimour et as mon père kheyar Faycel (ﷲ ﺑﺮﺣﻮﻟﺌﺎ) a toute ma famille, mes frères et sœurs sans oublier les nouveaux membres. A toute mes amis sans exception merci pour le soutien que vous m'avis apporter.

Djahid

A Ma maman Hirech Hafida et as mon père Zerouala ABDELHAKIM a toute ma famille, mon frere et ma sœurs .merci pour le soutien que vous m'avis apporter

Mohamed

Sans oublier TonTon Temmar Mustapha et notre prompteur monsieur Boumeddane

Sommaire

Chapitre I : La récupération d'énergie ----- 1

I.1	Introduction	1
I.2	Fonctionnement.....	1
I.3	Récupération d'énergie et utilisation	1
I.4	Récupération d'énergie et l'industrie	2
I.5	Les différentes sources d'énergie	2
I.5.1	Les sources primaires :	2
I.5.2	Les sources secondaires :	3
I.6	Energie fatal	3
I.7	La récupération de chaleur	3
I.7.1	La récupération de la chaleur dans l'industrie-----	3
I.7.2	Les sources de chaleur récupérée -----	4
I.7.3	Le premier critère de qualification d'un rejet thermique est sa nature-----	4
I.8	Les technologies de récupération	6
I.8.1	Collecte de la chaleur :	7
I.8.2	Production d'électricité :	7
I.8.3	Stockage :	8

Chapitre II CYCLE ORC----- 9

II.1	Cycle de Rankine/Hirn	9
II.2	Cycle organique de Rankine.....	9
II.3	Diagramme T-S.....	10
II.4	Brève histoire	12
II.5	Les éléments constitutifs	15
II.5.1	Les échangeurs de chaleur :	15
II.5.2	La machine de détente :	16
II.5.3	La pompe :	16
II.6	Principe de fonctionnement	17

II.7	Les fluides collaborateurs	17
II.8	Modélisation	18
II.9	Les applications du cycle organique de Rankine	20
II.9.1	La chaleur Géothermique :	21
II.9.2	Récupération de chaleur :	21
II.9.3	Production d'énergie solaire :	23
II.9.4	La chaleur de la Biomasse :	24
Chapitre III CYCLE KALINA-----		26
III.1	Le cycle de Kalina	26
III.2	Histoire et développement du cycle de Kalina.....	26
III.3	Différents cycles de Kalina	27
III.4	Application d'un cycle de Kalina.....	28
III.4.1	Application industrielle :	28
III.4.2	Énergie renouvelable :	29
III.5	Quelques expériences opérationnelles	29
III.6	Le fonctionnement du cycle de kalina	31
III.7	Les paramètres de cycle de kalina.....	34
III.7.1	Le préchauffeur et l'évaporateur -----	34
III.7.2	Pour l'évaporateur.....	35
III.7.3	Pour le préchauffeur.....	35
III.7.4	Le séparateur :	35
III.7.5	Point de vapeur saturée :	36
III.7.6	Point liquide saturé :	36
III.7.7	La turbine et le générateur :	36
III.7.8	Le condenseur :	37
III.7.9	La pompe d'alimentation :	38
Chapitre IV Etude comparativement -----		39
IV.1	Programme utilisée	39

IV.2 Etude thermodynamique des deux cycles (Kalina ORC).....	40
IV.2.1 Propriété du R134a :.....	41
IV.2.2 Propriété De l'ammoniac	42
IV.3 Diagramme T-S pour les deux cycles	43
IV.3.1 Cycle ORC (simple) :.....	43
IV.3.2 Cycle Kalina (ammoniac eau) :.....	44
IV.4 Cycle ORC.....	45
IV.4.1 R134a.....	45
IV.4.2 R113 :.....	47
IV.4.3 R114 :.....	49
IV.4.4 Isobutane :.....	50
IV.5 Cycle kalina	52
IV.5.1 NH3*.....	52
IV.6 Discussion à propos du rendement et du travail	55
IV.6.1 R134a.....	57
IV.6.2 R114 :.....	58
IV.6.3 R113.....	58
IV.6.4 Isobutane :.....	58
IV.7 Discussion à propos du rendement et du travail.....	59
IV.8 Aspects environnementaux de l'ammoniac et du cycle de Kalina	60
IV.9 L'impact environnemental	60
IV.10 Le Coût	61
Chapitre V : Conclusion -----	62

Liste des figures :

Figure 1: critère de qualification d'un rejet thermique est sa nature[7]	5
Figure 2: Les technologies de récupération [8]	6
Figure 3: schéma du cycle ORC	10
Figure 4: diagramme de Rankine simple.....	11
Figure 5 : Le rapport scientifique américain de l'explosion de La France (1856) [16].....	13
Figure 6:500 bateaux à naphta en opération en 1890.....	14
Figure 7 : les applications du cycle organique de Rankine	20
Figure 8 : cycle organique de Rankine géothermique.....	21
Figure 9: Principe de fonctionnement d'un système ORC à récupération de chaleur	22
Figure 10 : Principe de fonctionnement d'une centrale ORC de solaire thermique	23
Figure 11 : Principe de fonctionnement d'un système ORC de biomasse	25
Figure 12 : différent cycle kalina.....	28
Figure 13 : Application du cycle de Kalina. [27].....	29
Figure 14: Schéma du cycle de Kalina d'une centrale géothermique.....	33
Figure 15 : préchauffeur	34
Figure 16 : évaporateur	34
Figure 17 : Turbine –Générateur	37
Figure 18 : Condenseur	37
Figure 19: Pompe d'alimentation	38
Figure 20 : Barre d'outils pour ees.....	40
Figure 21 :Model de tableau paramétrique.....	40
Figure 22 : Molécule R134a.....	41
Figure 23 : Molécule de l'ammoniac	42
Figure 24 : Diagramme T-S pour le cycle KALINA	44
Figure 25 : Diagramme du rendement de R134a par rapport à la pression.....	46
Figure 26 : Diagramme du Travail net de R134a par rapport à la pression.....	46
Figure 27 : Diagramme du rendement de R113 par rapport à la pression	47
Figure 28 : Diagramme du Travail net de R113 par rapport à la pression.....	48
Figure 29 : Diagramme du rendement par rapport à la pression R114	49
Figure 30 : Diagramme du Travail net de R114 par rapport à la pression.....	49
Figure 31 :Diagramme du rendement de Isobutane par rapport à la pression.....	50
Figure 32 : Diagramme du Travail net de Isobutane par rapport à la pression	51
Figure 33 : Diagramme du rendement par rapport à la pression	52
Figure 34 : Diagramme du Travail net par rapport à la pression	53
Figure 35 : Diagramme du rendement par rapport à la pression low	54
Figure 36: Diagramme du Travail net par rapport à la pression low	54
Figure 37 : Diagramme du rendement par rapport à la pression haute.....	56
Figure 38 : Diagramme du Travail net par rapport à la pression high.....	57

Liste des tableaux :

Tableau 1:	Propriété du gaz R134a	41
Tableau 2 :	Propriété du gaz NH₃	42
Tableau 3:	Tableau paramétrique	45
Tableau 4 :	Résultat Thermodynamique pour les fluides utilisé sur l'ORC et Kalina.....	55
Tableau 5:	Résultat Thermodynamique pour les fluides utilisé sur l'ORC et Kalina.....	59

Résumé :

Dans cette période il ya quelques procédudures pour récupérer cette chaleur et réutiliser dans la production de puissance , comme les cycles binaires. Dans le système de la récupération de chaleur, il y a des cycles qu'ont utilisé pour récupérer la chaleur et la production de la puissance, Tel que le cycle ORC et la cycle Kalina, on a étudié ces performances par varié les parametre qui influent sur le travail utile et le rendement du cycle mémoire de fin d'étude.

Dans le premier chapitre on a parlé du système de recuperation general, et comment récupérer la chaleur, on récupérer, et quel sont les sources d'énergétiques qu'on utilise.

Dans le deuxième chapitre on a étudié le cycle de Rankine Organique c'est paramètre son diagramme T-S l'application numérique c'est différent domaine d'utilisation.

Dans le troisième chapitre on a étudié le cycle de Kalina c'est parametre son diagramme T-S l'application numérique c'est different domaine d'utilisation.

Dans le deniere chapitre on as fait une étude comparative entre ses deux dernier pour voir le qqelle des deux est plus efficace

chapitre I : La récupération d'énergie

I.1 Introduction :

“Rien ne se perd, rien ne se crée, tout se transforme.” Voilà un adage attribué au célèbre chimiste Antoine deLavoisier, et qui pourrait bien nous guider encore un moment.

L'énergie que nous utilisons au quotidien ainsi que l'énergie utilisée par l'industrie peuvent être récupérées et réutilisées. Les avantages de la récupération d'énergie sont faciles à envisager : l'énergie utilisée, et donc déjà payée, est récupérée et réutilisée au lieu d'être gaspillée. Bien sûr, cela engendre de grandes économies financières, mais à l'heure de la COP21 et de la transition énergétique, les avantages environnementaux sont aussi à noter : moins de consommation, moins d'émissions, plus de performance et d'efficacité énergétiques. [1]

I.2 Fonctionnement :

La récupération d'énergie est simple. Lors d'une réaction, quelle qu'elle soit, de l'énergie se disperse, sous forme de chaleur par exemple. On récupère alors cette chaleur pour la réutiliser ailleurs.

I.3 Récupération d'énergie et utilisation :

Un exemple concret, et domestique : nos ordinateurs sont de vraies sources de chaleur, et vous savez parfois que si vous laissez votre ordinateur allumé toute la journée, la pièce dans laquelle il se trouve a beaucoup moins besoin d'être chauffée. Sans le savoir, vous récupérez donc la chaleur produite par votre ordinateur pour chauffer votre pièce. [2]

Lorsqu'il s'agit, comme ici, d'un dégagement de chaleur non valorisée, on utilise le terme “chaleur fatale”. Lors du cas plus large ou c'est n'importe quelle sorte d'énergie qui est en jeu, on l'appelle “énergie fatale”.

I.4 Récupération d'énergie et l'industrie :

S'il est un secteur en particulier qui pourrait bénéficier de la récupération d'énergie, c'est l'industrie. En effet, de nombreux procédés sont aujourd'hui sous-optimisés, et la quantité d'énergie perdue dans l'industrie est très importante. C'est le plus souvent la chaleur fatale qui peut être valorisée, à travers les procédés d'échange thermique industriel. Le principe de l'échange thermique est simple : faire passer de la chaleur d'un milieu/fluide à un autre milieu/fluide. Pour ce faire, on utilise des échangeurs de chaleur, qui sont chargés d'effectuer ce transfert d'énergie.

Par exemple, prenons une chaîne de fabrication qui comporte 5 étapes. Si l'étape 1 dégage de la chaleur, et que l'étape 5 en nécessite, on peut sans problème optimiser la chaîne pour que la chaleur dégagée à la première étape soit réutilisée à la dernière.

Ces procédés sont déjà utilisés, mais pas partout, et pourraient amener des économies d'énergie colossales, parce que les quantités d'énergie utilisées dans l'industrie sont bien plus importantes que dans le domaine domestique. [3]

I.5 Les différentes sources d'énergie :

I.5.1 Les sources primaires :

- Hydrocarbures
- Uranium
- Charbon
- Rayonnement solaire
- Force hydraulique
- Énergie géothermique
- Vent
- Biomasse et déchets
- Pétrole
- Gaz naturel

I.5.2 Les sources secondaires :

- Centrale nucléaire
- Centrale thermique à flamme
- Centrale solaire thermique à concentration
- Centrale géothermique
- Énergie éolienne
- Énergie solaire photovoltaïque
- Énergie hydroélectrique
- Cogénération.

I.6 Energie fatale :

La chaleur fatale est produite dans des industries où la production de chaleur n'est pas l'objectif mais plutôt une conséquence. Elle n'est donc pas utilisée. Les principaux secteurs concernés par la production de chaleur fatale sont les suivants : [4]

- La chimie ;
- La sidérurgie ;
- L'agro-alimentaire ;
- Le ciment ;
- Les fermes de serveurs-informatiques, etc.

I.7 La récupération de chaleur :

I.7.1 La récupération de la chaleur dans l'industrie :

Dans l'industrie, l'amélioration de l'efficacité énergétique passe par une étude de la « chaleur fatale », ou chaleur perdue par les procédés. La « chaleur fatale » est un gisement d'économies possibles et encore peu exploitée par les industriels. L'énergie fatale désigne la quantité d'énergie inéluctablement présente ou piégée dans un procédé ou produit, qui en partie, peut

être récupérée. La « chaleur fatale » est générée lors du fonctionnement d'un procédé par l'énergie thermique qui n'est pas utilisée en totalité lors du processus

De fabrication. Une partie de cette énergie est inévitablement rejetée dans l'environnement sous forme de chaleur à des températures plus ou moins importantes. Le niveau de température est une caractéristique importante dans la stratégie de valorisation de la chaleur fatale. Dans l'industrie, la chaleur fatale se trouve principalement sous trois formes de rejets : gazeux, liquides, ou diffus avec des niveaux de température s'échelonnant entre 30°C et 500°C, De façon générale, la chaleur fatale peut être issue de l'industrie, de la pétrochimie, des sites de production d'électricité, mais aussi de sites tertiaires tels que les hôpitaux ou les data center. [5]

I.7.2 Les sources de chaleur récupérée :

Sur un site industriel, les sources de chaleur récupérable sont variées en termes de localisation et de caractéristiques (type de rejet, niveaux de température).

Elles concernent tous les postes de consommation d'énergie de l'usine, qu'ils soient directement liés aux procédés de fabrication ou annexes à la production. [6]

I.7.3 Le premier critère de qualification d'un rejet thermique est sa nature :

Le second critère d'importance pour qualifier un rejet thermique est son niveau de température, déterminant directement le potentiel récupérable et les possibilités de valorisation de cette chaleur. Ci-dessous, quelques exemples :

Fumée de combustion	Potentiel de récupération de chaleur plus élevé à température élevée
Effluent sous forme vapeur	Récupération élevée à température élevée avec potentiel de récupération de chaleur latente sur les effluents
Convection et rayonnement de l'extérieur des équipements	Potentiel de récupération faible : peut être utilisé pour le préchauffage de l'air ou le chauffage des locaux
Chaleur d'un fluide de refroidissement (huile, eau)	Potentiel de récupération faible : utile dans le cas du préchauffage de l'eau réseau
Chaleur des unités de condensation des groupes froids	Haute qualité si la demande en froid peut être réduite et basse qualité si le groupe froid est utilisé en tant que pompe à chaleur
Chaleur des produits de procédés	Potentiel de récupération variable selon la température des produits et la présentation du produit (compact, divisé, etc.)
Chaleur des effluents gazeux et liquides	Qualité variable selon le niveau de température et la manière dont les effluents sont collectés et canalisés

Figure 1: critère de qualification d'un rejet thermique est sa nature[7]

I.8 Les technologies de récupération :

➔ Valorisation

USAGES

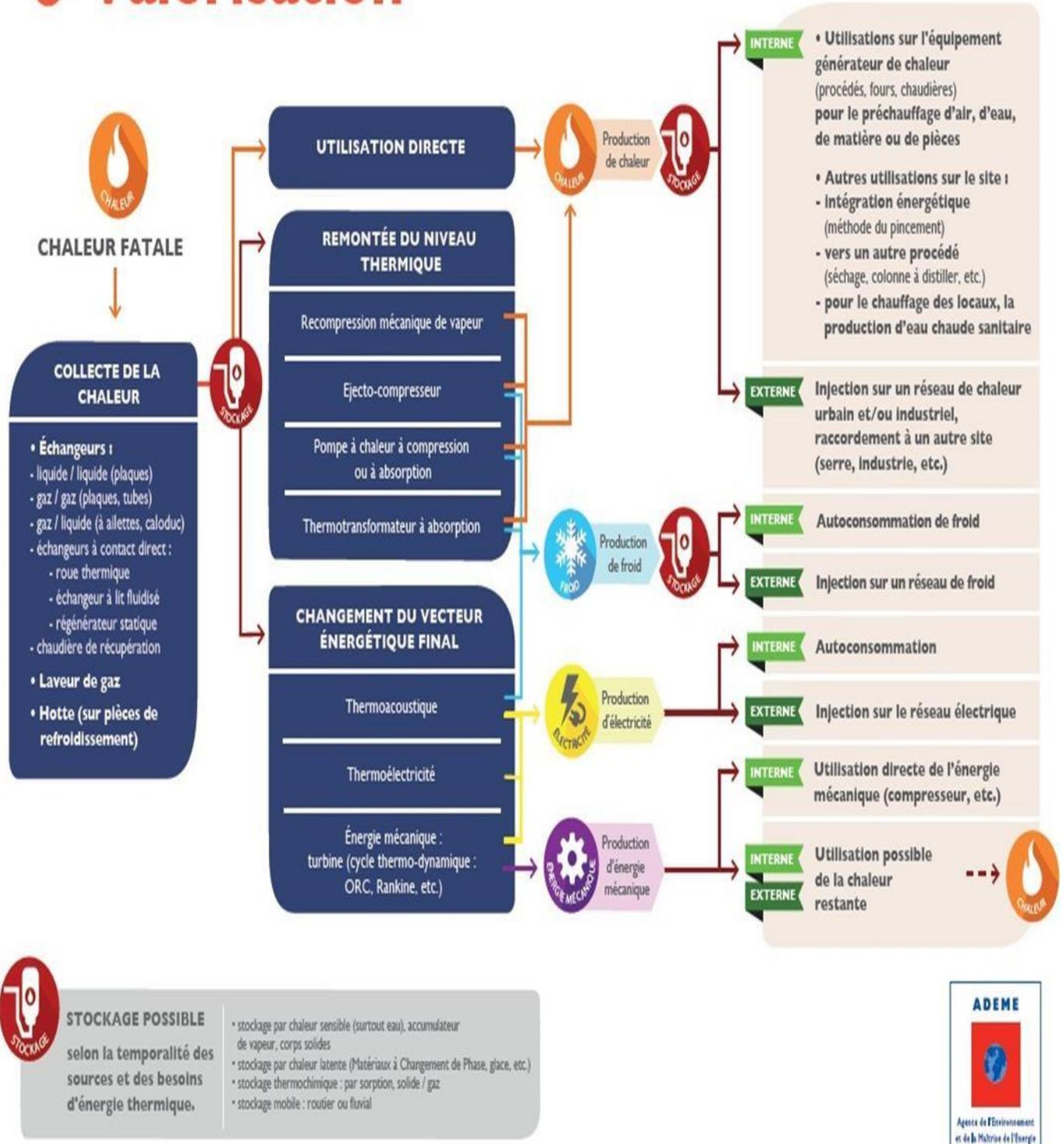


Figure 2: Les technologies de récupération [8]

I.8.1 Collecte de la chaleur :

Par l'intermédiaire d'un échangeur de chaleur, la chaleur peut être transférée à d'autres fluides/procédés/stockages avec un changement possible du support énergétique :

- Échangeur liquide / liquide (plaques) ;
- Échangeur gaz / gaz (plaques, tubes) ;
- Échangeur gaz / liquide (à ailettes, caloduc).

La chaleur collectée peut alors être utilisée pour le chauffage d'autres flux sur site, le chauffage des locaux industriels, etc.

Technologie associée :

- Machine à absorption

I.8.2 Production d'électricité :

La chaleur fatale peut également être valorisée pour produire de l'électricité (changement de vecteur énergétique) via des turbines ou des machines ORC (Organique Rankine Cycle).

Les machines ORC constituent la technologie la plus prometteuse pour valoriser les flux thermiques industriels dont la température est supérieure à 150 °C.

L'utilisation de fluides actifs (vapeur, par exemple) transforme cette chaleur stockée sous forme moléculaire en travail mécanique. Cela conduit également à un rejet de chaleur, mais à une température plus basse que celle initialement disponible. Le travail mécanique produit peut ensuite être utilisé ou converti en énergie électrique.

La production d'électricité à partir de chaleur perdue peut être aussi associée à une valorisation complémentaire de la chaleur résiduelle (chauffage des locaux à l'intérieur du site, etc.), et ainsi maximiser le rendement global. [9]

Technologie associée :

- Machine ORC

I.8.3 Stockage :

Selon la temporalité des sources et des besoins de chaleur, la chaleur fatale récupérée peut être stockée pour une utilisation ultérieure sur site. Le stockage peut être thermique (par chaleur sensible ou chaleur latente) ou thermochimique (énergie par sorption).

Technologie associée :

- Stockage par chaleur sensible
- Stockage par chaleur latente (matériaux à changement de phase)
- Stockage thermochimique (sorption)

Le niveau de température à laquelle la chaleur est disponible dans un procédé considéré conditionne donc la méthode de valorisation à mettre en œuvre. Dans tous les cas, l'énergie peut être récupérée sous forme de chaleur ou de travail mécanique (qui peut éventuellement être transformé en électricité ou être utilisé pour rehausser le niveau de température d'une autre source de chaleur).

Les technologies :

- Cycle Organique de Rankine.
- Cycle Kalin

chapitre II CYCLE ORC :

II.1 Cycle de Rankine/Hirn :

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. Selon Wiser [10], les moteurs à vapeur d'eau génèrent environ 90 % d'électricité consommée dans le monde. Le cycle porte le nom de William John Macquorn Rankine (1820-1872) [11], un ingénieur civil, physicien, mathématicien Ecossais.

II.2 Cycle organique de Rankine :

Le cycle organique de Rankine est un cycle de Rankine utilisant un composé organique Au lieu de l'eau comme fluide de travail. En effet, l'eau est un fluide de travail excellent pour le cycle de Rankine si la température de source thermique est suffisamment élevée. Ce fluide traditionnel est thermiquement, et chimiquement stable, non-toxique, ininflammable, peu coûteux, qui possède des propriétés excellentes de transfert de chaleur, et qui possède un ODP (potentiel d'appauvrissement de la couche d'ozone), et un GWP (potentiel de réchauffement global) nuls [12]. C'est pourquoi, il est souvent utilisé dans des centrales thermiques et dans des applications à haute température et de puissance importante.

Cependant, pour les applications où la source de chaleur est de basse qualité énergétique et plus particulièrement dans des applications de relative faible puissance, l'eau, comme fluide de travail, n'est technologiquement ou économiquement pas la meilleure sélection [13]. Pour la génération d'électricité à partir des sources de chaleur de basse et de moyenne température, le cycle ORC présente des intérêts par rapport au cycle traditionnel.

Le schéma de principe d'un cycle organique de Rankine simple est donné figure ci-dessous. Il montre qu'une telle installation comprend quatre composants, traversés par le même débit de fluide :

- une pompe.
- un générateur de vapeur.
- une machine de détente.
- un condenseur.

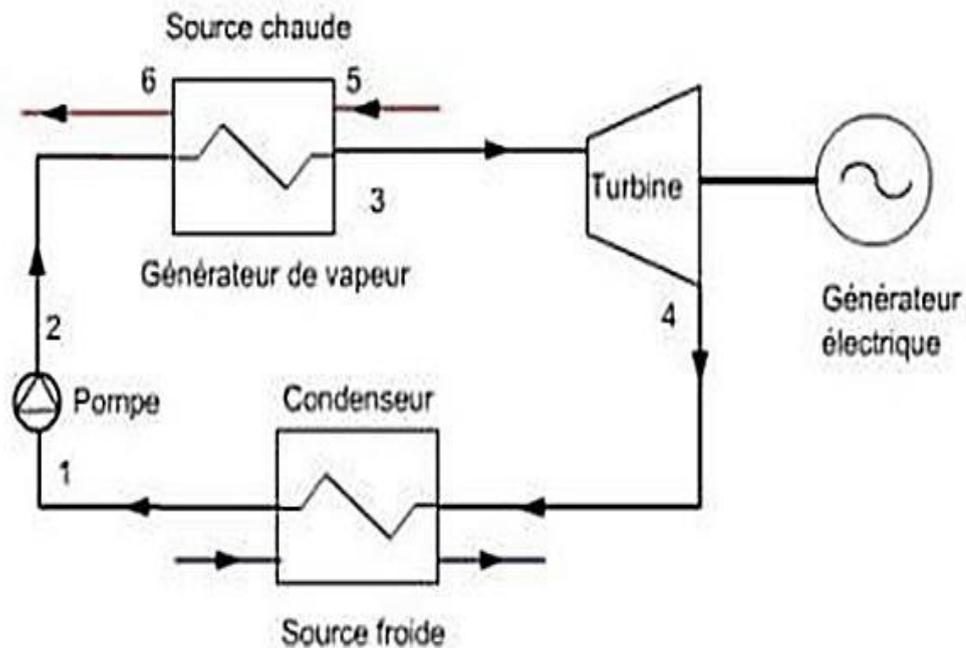


Figure 3: schéma du cycle ORC

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

II.3 Diagramme T-S :

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

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

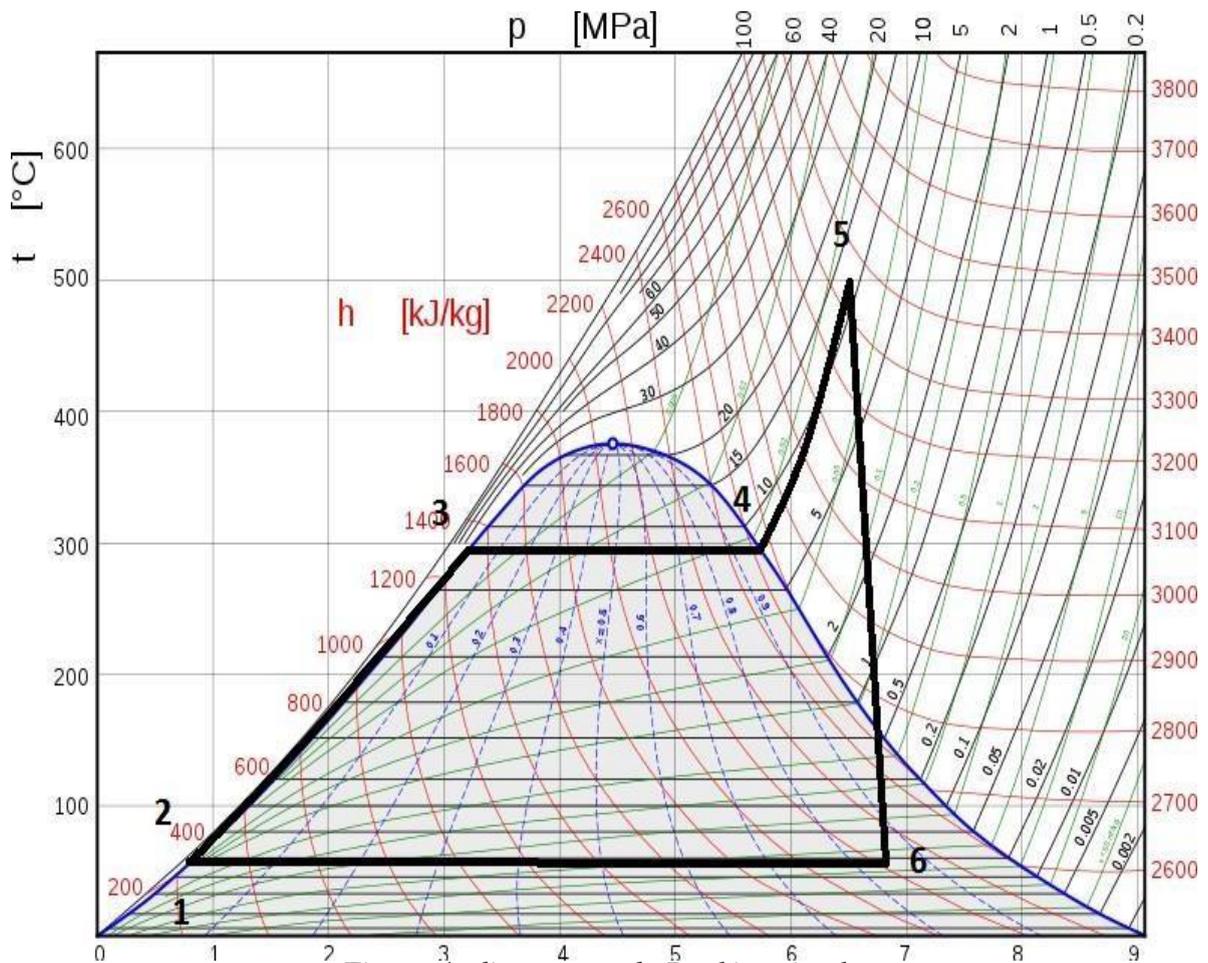


Figure 4: diagramme de Rankine simple.

II.4 Brève histoire :

Bien que, le résumé de l'histoire des cycles ORC ci-dessus n'est que succinct, il peut nous donner une vision globale sur l'histoire du développement du cycle ORC.

- 1823 : Monsieur Humphrey Davy (1778-1829) suggère le cycle ORC comme une alternative à la machine à vapeur. Il a suggéré qu'un liquide volatile peut être vaporisé par la vapeur d'eau échappée et peut donc générer plus l'énergie.
- 1824 : Les travaux de Carnot.
- 1825 – 1826 : Thomas Howard a fait un moteur utilisant l'alcool comme fluide de travail.

- 1853 : Du Trembley, un ingénieur français, applique le cycle ORC à la propulsion de bateau (avec un éther comme fluide actif). Le moteur a été installé dans quelques bateaux de voyageurs. Cependant, la construction des moteurs binaires à vapeur d'eau – éther a été interrompue après une explosion causée par l'éther au port de Bahia, en Amérique du sud en 1856 (Figure1. 9) [15].

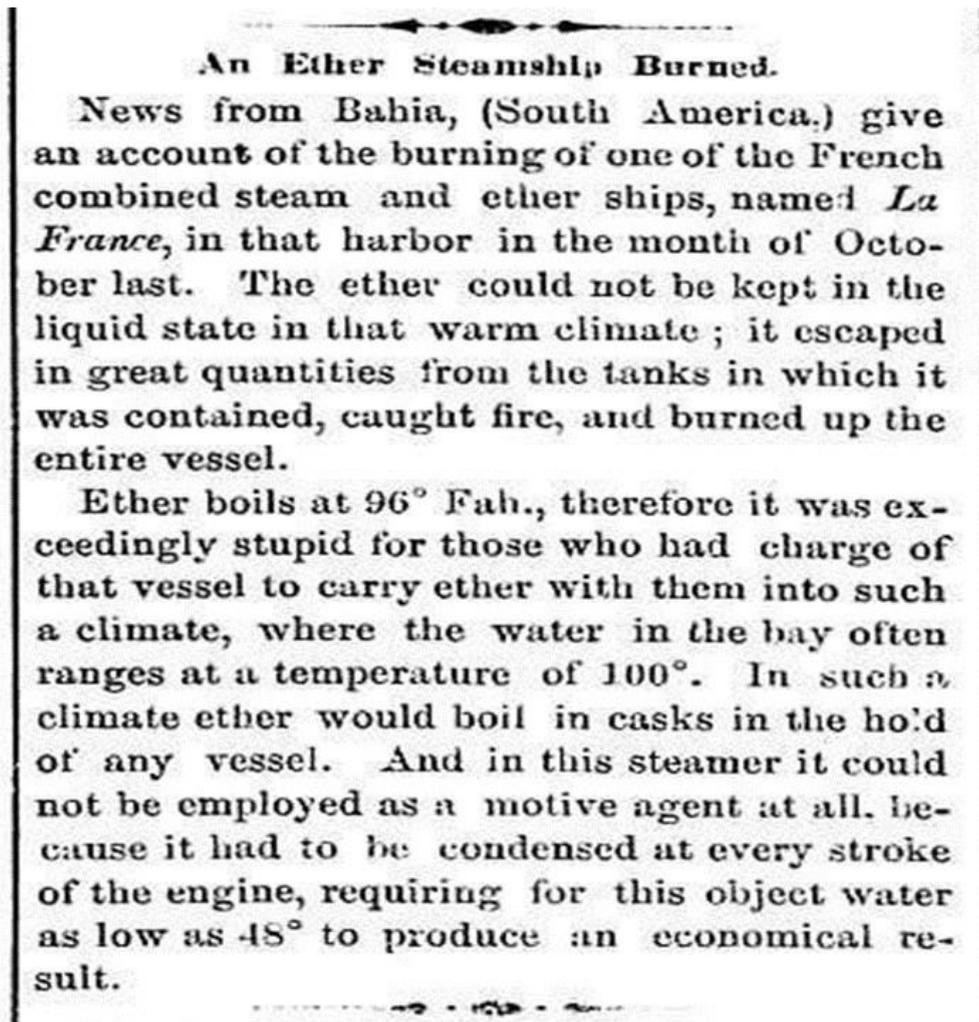


Figure 5 : Le rapport scientifique américain de l'explosion de *La France* (1856) [16].

- 1859 : William J.M. Rankine a développé la théorie complète du moteur à vapeur d'eau.
- 1883 : Frank W. Ofeldt a déposé un brevet sur un moteur à naphta. En 1883, Frank W. Ofeldt a déposé un brevet sur un moteur à naphta qui a été essentiellement un moteur à cycle fermé à vapeur utilisant le naphta au lieu de l'eau comme fluide de travail. Le moteur est developper par Gas Engine and Power Company of Morris Heights, New York. En 1890, il y avait 500 bateaux à moteur à naphta en opération.

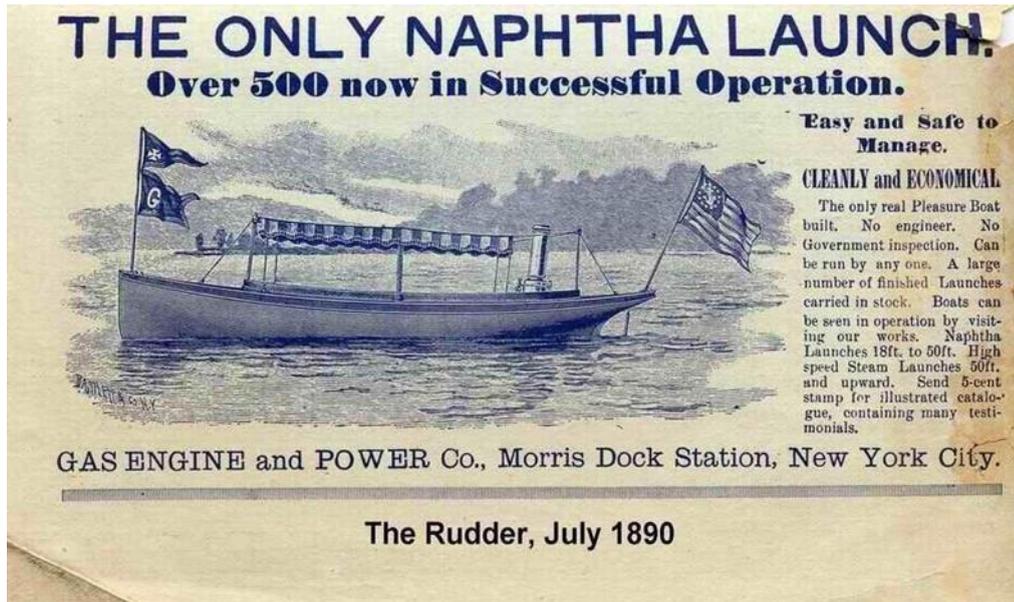


Figure 6:500 bateaux à naphtha en opération en 1890

- 1923 – 1930 : Tito Romagnoli a développé quelques moteurs de Rankine dont un avec chlorure de méthyle comme fluide de travail.
- 1930 : Luigi D'Amelio a expérimenté avec le chlorure d'éthyle à l'Université de Naples.
- 1935 : La pompe solaire basée sur le travail de D'Amelio.
- De 1958 à 1961 : Tabor et Bronicki établissent les critères pour la sélection des fluides organiques appropriés pour optimiser le rendement du cycle au laboratoire national israélien de physique.
- 1961 : un cycle ORC nouveau a été développé avec un prototype de 3 kW et présenté à la conférence de l'Organisation des Nations Unies à Rome. Ce travail amène à l'établissement de l'entreprise Ormat en 1965.
- 1965 : Ormat commercialise ses cycles ORC de 0.5 à 4 kW pour l'opération à distance sans surveillance
- 1967 : le premier cycle binaire géothermique a été installé. Son fluide de travail était le réfrigérant R12 avec une puissance brute de 680 kW.

- 1970's : Gianfranco Agelino, Ennico Macchi et Mario Gaia ont développé un cycle ORC de 3 kW, amenant à l'établissement de l'entreprise Turboden en 1980.
- 1980's : Turboden fabrique des unités à partir de 300 kW, surtout pour la cogénération utilisant la biomasse.
- 1990's : Ormat a des croissances substantielles dans l'utilisation du cycle ORC pour la géothermie. Alors que, Turboden fournit plusieurs systèmes de cogénération en Europe.
- 2000 : plusieurs des fabricants des systèmes ORC et des fournisseurs de composants sont disponibles. Les recherches se poursuivent dans le domaine et de nouvelles technologies apparaissent.

II.5 Les éléments constitutifs :

II.5.1 Les échangeurs de chaleur :

Un ORC comprend au moins deux échangeurs de chaleur (un évaporateur et un condenseur). Toutefois des échangeurs additionnels peuvent être utilisés au sein même de l'ORC, tels que le récupérateur ou le sous-refroidisseur. D'autres échangeurs peuvent également être utilisés également utilisés au niveau de la source et du puits de chaleur et parcourus par les fluides secondaires.

Il existe différents types d'échangeurs variant selon la forme, la compacité, les matériaux, la configuration des écoulements (contre-courant, co-courant, courants croisés, etc...), On peut citer les échangeurs à plaques, les échangeurs tubulaires, les échangeurs à tubes en U,

Selon le type d'application, l'un ou l'autre sera privilégié.

Les échangeurs de chaleur doivent présenter les caractéristiques suivantes :

- Important coefficient de transfert de chaleur global, ce qui permet de minimiser toutes les différences de température entre la source chaude et le fluide travail et entre la source froide et le fluide de travail.

- Faibles pertes de charges, afin de limiter les consommations des auxiliaires (pompes et ventilateurs).

Dans le cas de récupération de chaleur sur des fumées, il est évident d'opter pour des échangeurs conçus pour supporter poussières et éléments oxydants. Les échangeurs à plaques et joints semblent connaître une limitation quant à leur utilisation dans des milieux « chargés » en particules. Une solution, pour ce cas des fumées encrassées, pourra être des échangeurs à tubes lisses, avec système de nettoyage. Notons qu'on trouve généralement des filtres sur les cheminées et qu'il peut alors être plus intéressant de placer le récupérateur en aval du filtre puisqu'on se retrouve alors avec des fumées « propres ». Dans le cas de fumées contenant du soufre, on veillera à ne pas descendre sous le point de rosée acide (100 180 °C selon les cas) afin d'éviter tout risque de corrosion.

II.5.2 La machine de détente :

La machine de détente est un élément important de l'ORC étant donné que son efficacité influence fortement la performance du système global. On distingue les machines volumétriques des turbomachines. Les premières sont mieux adaptées que les dernières à la gestion des plus faibles débits. Elles seront donc utilisées dans des systèmes ORC caractérisés par de plus faibles puissances installées. Parmi les machines volumétriques, on retrouve principalement des expandeurs à vis et dans une moindre mesure des expandeurs à spirales ou à piston. Quant aux turbomachines, elles peuvent être axiales ou radiales.

II.5.3 La pompe :

La pompe est un autre élément important de l'ORC. Contrairement aux systèmes fonctionnant avec l'eau comme fluide de travail, la consommation de la pompe d'un ORC peut représenter une fraction non négligeable de la puissance produite par la turbine. On veillera donc à utiliser une pompe présentant un rendement acceptable. D'autre part, la pompe joue un rôle essentiel dans le contrôle de l'ORC en dehors de son point de fonctionnement nominal en permettant d'ajuster le débit de fluide au travers du système. Finalement, on devra veiller à maintenir un NPSH suffisant en entrée de pompe afin d'éviter tout risque de cavitation.

II.6 Principe de fonctionnement :

Le principe de base d'un ORC est celui d'une machine ditherme 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 par un alternateur). 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, égale au rapport de la différence de température entre la source chaude et l'environnement [17].

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 [17].

L'évaporation se déroule à une pression et à basse température inférieure d'autre part, la détente de la vapeur du fluide organique se termine dans la région de la vapeur saturée, ce qui permet d'éviter le risque d'érosion des aubages de la turbine [18].

II.7 Les fluides collaborateurs :

Le choix du fluide de travail est très important pour la performance et l'économie du système ORC car il affecte l'efficacité du système, la taille des composants du système, la conception de la machine de la détente, la stabilité du système, la sécurité et les préoccupations environnementales. Le processus de sélection du fluide dépend essentiellement des propriétés physiques, thermodynamiques, de sécurité et environnementales du fluide de travail.

Différente des caractéristiques des autres cycles thermodynamiques, la sélection du fluide de travail du système ORC est une tâche plus compliquée pour les deux raisons suivantes :

Les conditions de travail et les types de sources de chaleur de l'ORC varient largement : de la source de chaleur à basse température de 80°C (par exemple géothermique, collecteur solaire) à la chaleur à haute température de 500°C (par exemple la biomasse) ;

À l'exception de certaines substances dont les températures critiques sont trop basses ou trop élevées, des centaines de substances peuvent être utilisées comme ORC, notamment les hydrocarbures, les hydrocarbures aromatiques, les éthers, les perfluorocarbones, les CFC, les alcools, les siloxanes et les composés inorganiques (qui ne devraient pas être intrinsèquement un ORC) etc...

Il existe aussi quelques méthodes de sélection d'un fluide de travail pour un system ORC bien spécifié.

Dans ce travail nous allons décrire les trois méthodes suivantes :

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

II.8 Modélisation :

La modélisation consiste à présenter les différentes équations utilisées dans la programmation. Les équations utilisées sont les suivantes :

- **Pour la puissance spécifique :**

$$W_{net,écifique} = \frac{\dot{W}_{turbine} - \dot{W}_{pompe}}{\dot{M}_f}$$

- **Pour le rendement du cycle :**

$$\eta_{cycle} = \frac{\dot{W}_{turbine} - \dot{W}_{pompe}}{Q_{in}}$$

- Pour la pompe :

$$\eta_{pompe} = \frac{h1_{isentropique} - h6}{h1 - h6}$$

$$\dot{W}_{pompe} = \dot{m}_f (h1 - h6)$$

- Pour la turbine :

$$\eta_{turbine} = \frac{h3 - h4}{h3 - h4_{entropique}}$$

$$\dot{W}_{turbine} = \dot{m}_f (h3 - h4)$$

- Pour le générateur de vapeur :

$$Q_{in} = \dot{m}(h3 - h4)$$

- Pour le condenseur :

$$Q_{out} = \dot{m}(h5 - h6)$$

- Pour le flux chaud :

$$c = \frac{\dot{m}(h4 - h5)}{Q_{max}}$$

- Pour le flux froid :

$$c = \frac{\dot{m}f (h2 - h1)}{Q_{max}}$$

II.9 Les applications du cycle organique de Rankine :



Figure 7 : les applications du cycle organique de Rankine

Le cycle ORC est considéré comme générant de l'énergie mécanique à basse température puissance (plusieurs kilowatts) et des températures relativement basses pendant des décennies. Mais il est rarement mis en œuvre dans ces conditions particulières. Beaucoup d'efforts viennent de Plus de recherche et de développement ont été effectués ces dernières années pour des applications spécifiques. Il existe maintenant plusieurs constructeurs ORC, Le tableau 1.1 énumère certains d'entre eux avec certaines caractéristiques leurs produits. On peut y voir que la gamme de puissance. De puissance disponible pour la machine. Les marchés vont de quelques kilowatts à plusieurs mégawatts. Ces cycles thermodynamiques sont considérés pour une variété d'applications telles que :

II.9.1 La chaleur Géothermique :

Les sources de chaleur géothermiques sont disponibles dans une large gamme de températures, allant de quelques dizaines de degrés jusqu'à 300°C. La limite technologique actuelle pour la production d'électricité est d'environ 80°C : en dessous de cette température, l'efficacité de la conversion devient trop faible et les centrales géothermiques ne sont pas économiques. Pour récupérer la chaleur à une température acceptable, les trous de forage doivent généralement être forés dans le sol, pour le puits de production et pour le puits d'injection.

La saumure chaude est pompée du premier et injectée dans le second à une température plus basse. Selon la configuration géologique, les forages peuvent atteindre plusieurs milliers de mètres de profondeur, nécessitant plusieurs mois de travail continu. Cela conduit à une part élevée du forage dans le coût d'investissement (jusqu'à 70%) d'une usine ORC géothermique.

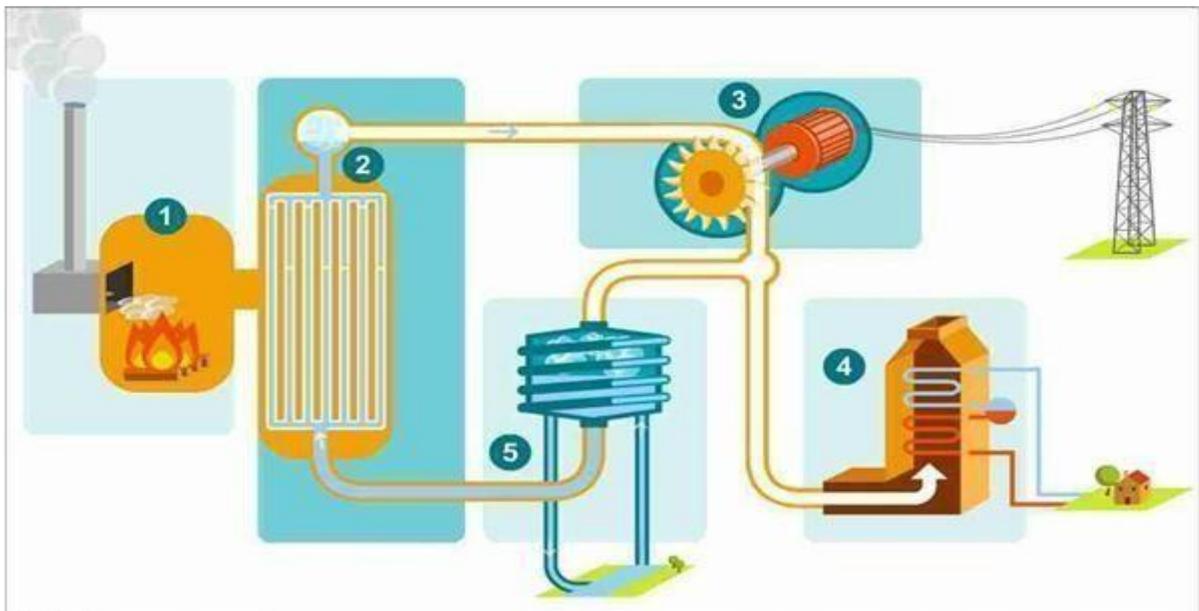


Figure 8 : cycle organique de Rankine géothermique.

II.9.2 Récupération de chaleur :

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

températures sont :

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

Une grande partie de la quantité de chaleur est perdue sous forme d'effluents thermiques. Une première piste serait une cascade thermique, pour utiliser cette chaleur directement pour réchauffer un autre procédé par exemple ou encore produire de l'eau chaude sanitaire. Mais les demandes en industrie ne sont souvent pas en adéquation avec l'énorme production de chaleur. De plus, les industries sont rarement connectées à un réseau thermique qui demande un investissement financier conséquent. Or l'électricité est omniprésente et chaque industrie est directement reliée au réseau pour une revente avantageuse.

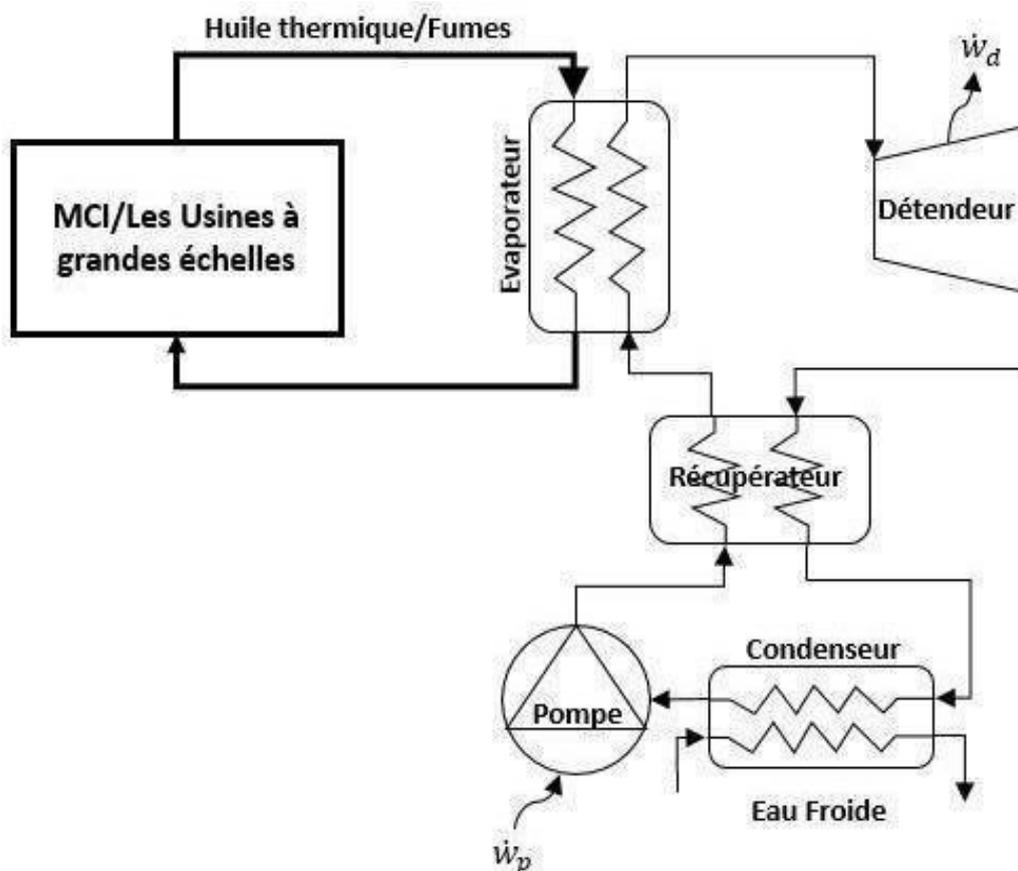


Figure 9: Principe de fonctionnement d'un système ORC à récupération de chaleur.

II.9.3 Production d'énergie solaire :

La production d'énergie solaire thermique est une technologie bien établie. L'extraction de l'énergie solaire thermique peut être réalisée en utilisant différents composants tels que les collecteurs paraboliques et la tour solaire. La température de fonctionnement de la parabole varie de 300°C à 400°C. Il y a plusieurs années, la production d'énergie électrique à partir de la vapeur était liée à cette technologie. Cependant, pour que le cycle de Rankine conventionnel soit économiquement intéressant, il nécessite une température de source élevée et une capacité de puissance d'installation élevée. L'ORC fonctionne à des températures beaucoup plus basses et nécessite moins de capital. L'ORC nécessite et accepte une plus petite taille de composant par rapport au cycle conventionnel de Rankine. La figure 1.10 montre une centrale thermique solaire typique.

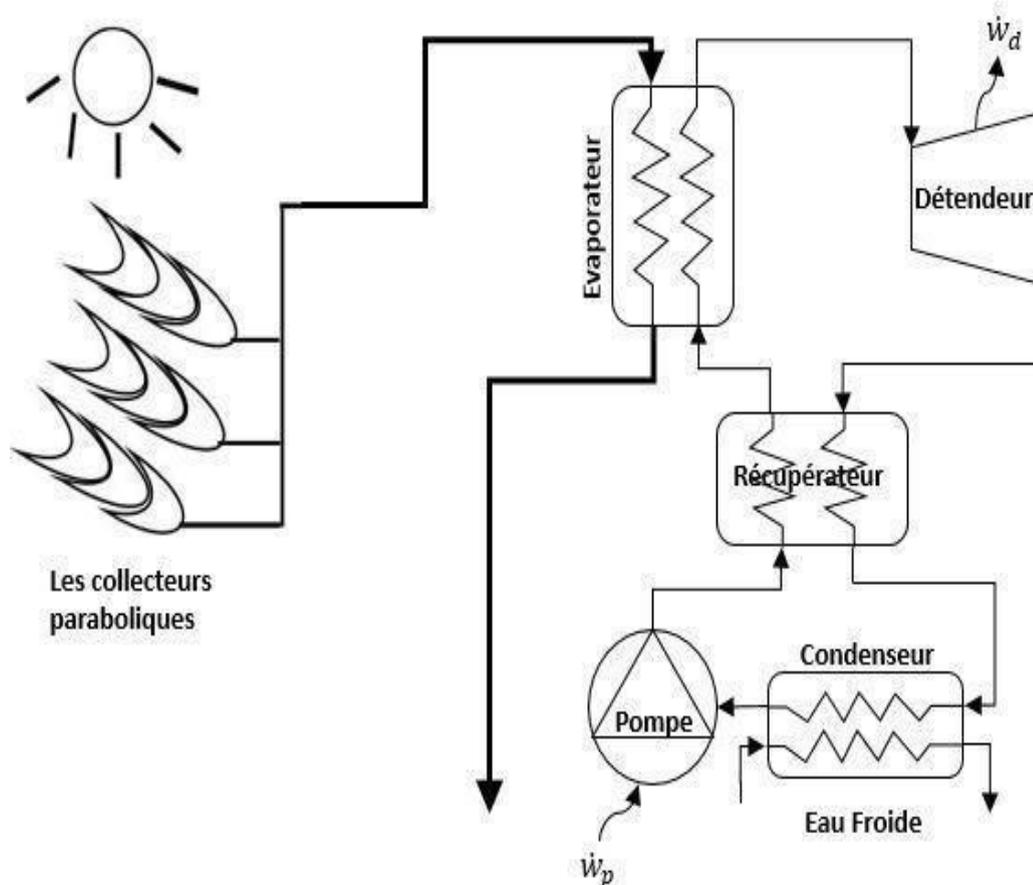


Figure 10 : Principe de fonctionnement d'une centrale ORC de solaire thermique.

II.9.4 La chaleur de la Biomasse :

Le prix et l'utilisation des combustibles fossiles classiques augmentent continuellement. La consommation de combustibles fossiles affecte largement l'environnement ; provoquant un changement dans les conditions climatiques et la pollution due aux gaz d'échappement. À l'heure actuelle, les ressources énergétiques de la biomasse connaissent une augmentation de la croissance du marché en raison du fait qu'elle est moins chère et plus respectueuse de l'environnement que les combustibles fossiles. Les combustibles à base de biomasse existent sous de nombreuses formes, par exemple le biogaz provenant des déchets de bois et les déchets agricoles combustibles. L'utilisation de biocombustibles a beaucoup d'avantages quand il s'agit de la réduction des prix du carburant et du potentiel de réchauffement de la planète.

Il est préférable de l'utiliser localement pour deux raisons principales : (1) la densité énergétique de la biomasse est faible par rapport à celle des combustibles fossiles, ce qui augmente les coûts de transport ; (2) la demande de chaleur et d'électricité est généralement disponible sur site, ce qui rend une installation de biomasse particulièrement adaptée en cas de raccordement hors réseau ou non fiable. La production locale conduit à des centrales électriques de plus petite taille (<1-2 MWe), ce qui exclut les cycles de vapeur traditionnels qui ne sont pas rentables dans cette plage de puissance. La chaleur provenant de la combustion est transférée des gaz de combustion au fluide caloporteur dans les échangeurs de chaleur, à une température variante entre 150 et 320°C. Le fluide caloporteur (huile thermique) est ensuite dirigé vers la boucle ORC pour évaporer le fluide de travail, à une température légèrement inférieure à 300°C. La figure 1.11 montre l'application de l'ORC en utilisant la biomasse.

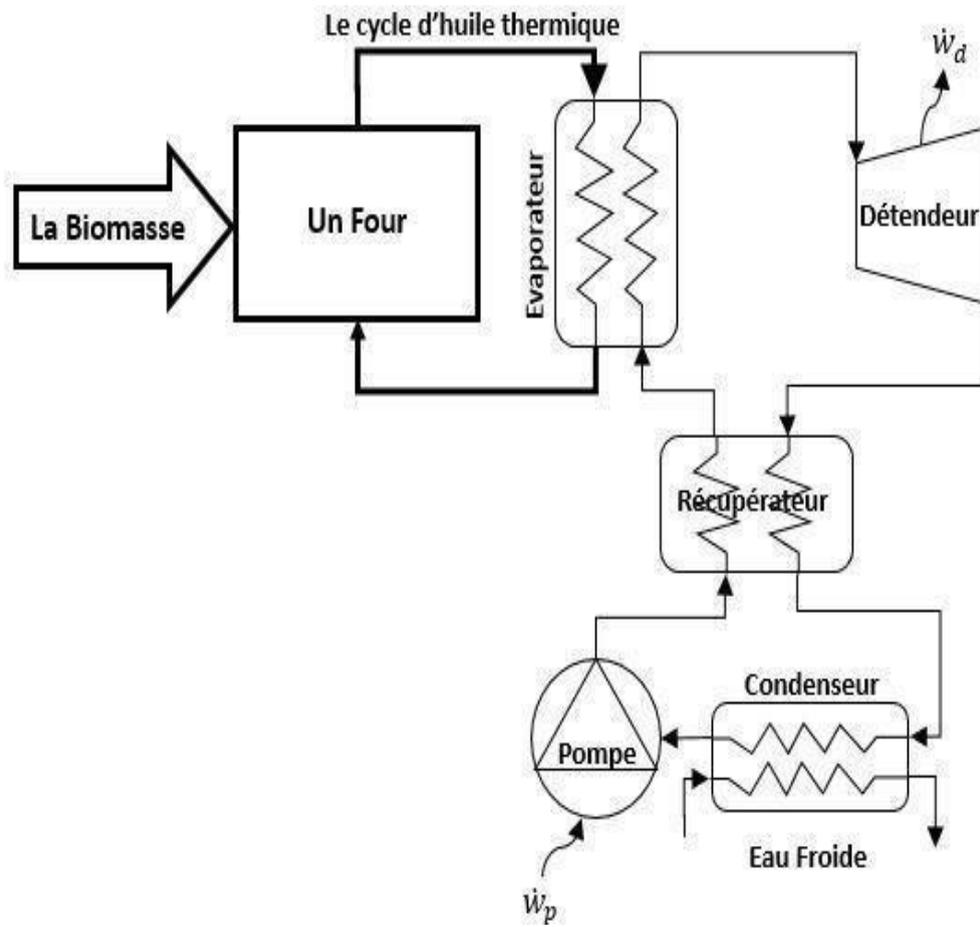


Figure 11 : Principe de fonctionnement d'un système ORC de biomasse.

chapitre III CYCLE KALINA :

III.1 Le cycle de Kalina :

Le cycle de Kalina Est en principe un cycle de Rankine modifié., Il utilise un fluide de travail composé d'au moins deux composants différents, généralement de l'eau et de l'ammoniac , Le rapport entre ces composants varie dans les différentes parties des systèmes pour réduire l'irréversibilité thermodynamique , Le mélange ammoniac-eau améliore l'efficacité thermodynamique du système et offre plus de flexibilité dans diverses conditions de fonctionnement , À mesure que les températures de fonctionnement de l'usine diminuent, le gain relatif du cycle de Kalina augmente par rapport au cycle de Rankine[20]..

III.2 Histoire et développement du cycle de Kalina :

Le cycle de Kalina a été développé par le Dr Alexander Kalina; il a été publié pour la première fois en 1984 et a été breveté en 1987 par la société qu'il a créée, Exergy Inc. L'usine de démonstration du parc de Canoga en Californie a été la première usine à utiliser le cycle de Kalina. Il a fonctionné entre 1991 et 1997 pour un montant total de 9.000 h de fonctionnement. Cela à utiliser vapeur d'entrée de la turbine à 515 ° C, ce qui est beaucoup plus élevé que la chaleur résiduelle habituelle disponible. Il prouvé cependant la viabilité du cycle. Une autre démonstration a eu lieu à Fukuoka (Japon), où le cycle de Kalina a été utilisé dans une usine d'incinération. 200 tonnes de déchets solides municipaux sont brûlés chaque jour et fournis 4,5 MW d'énergie électrique entre 1998 et 1999 [21].. La première usine commerciale a également été construite au Japon en 1999 par Sumitomo Metals Kashima Aciéries. Il produit 3,1 MW en utilisant la chaleur perdue de l'aciérie. La source chaude est eau à 98°C [22]... La première centrale géothermique a été construite en 2000 à Húsavík, en Islande. Il utilise eau chaud homéo thermique à 124 ° C et eau froide à 4 ° C et la puissance électrique nette est de 2,0 MW. C'est une centrale de production combinée de chaleur et d'électricité, de sorte que la chaleur restante provenant de la source chaude (à 80 °C) est utilisée pour le chauffage urbain de la ville [23]...

En 2002, une autre usine de récupération de chaleur perdue a été construite dans la raffinerie Fuji Oil de la baie de Tokyo. Et il produit jusqu'à 3,9 MW d'énergie électrique. [24].

En 2009, Siemens a construit une centrale géothermique en Allemagne, dans la ville d'Unterhaching et la puissance électrique de sortie est de 3 MW. Comme dans l'affaire Húsavík, l'eau chaude rejetée a été utilisée pour Chauffage urbain. [25].

En décembre 2009, une autre centrale géothermique a été construite en Allemagne, à Bruchsal. L'opérateur est EnBW et le contractant était Siemens. La puissance électrique est de 500 kW, la source chaude est à 120 ° C et le débit massique est de 24 litres par seconde d'eau. [26].

En 2010, une autre usine pilote de Kalina a été construite à Taiwan, dans le champ géothermique de Qingshui. Il est propriété de Shanghai Shenghe New Energy and Resources et produit 60 kW à partir d'une source chaude 110°C.

III.3 Différents cycles de Kalina :

- KCS1 est préférable pour les petites unités (puissance totale inférieure à 20 MW, cycle de remplissage d'environ 8 MW}).
- KCS6 a ensuite été développé avec une amélioration de l'efficacité de 10% par rapport à KCS1. Le KCS6 est préférable pour les unités plus grandes (plus de 20 MW de sortie totale), et a été conçu comme un cycle combiné pour un cycle combiné offrant un rendement optimal et une efficacité maximale de tous les cycles Kalina.
- KCS5 est particulièrement applicable aux installations à combustible (combustibles).
- KCS11 n'est pas applicable pour les températures thermiques entre environ 120 et 200 ° C. KCS34 et KCS34g sont adaptés aux températures inférieures à 120 ° C.

Pour les systèmes à basse température, KCS34 convient mieux à la production combinée d'énergie et aux applications de chauffage urbain en aval, tandis que KCS34g est adapté aux plantes de petite taille. [27]

DIFFERENT KALINA CYCLES

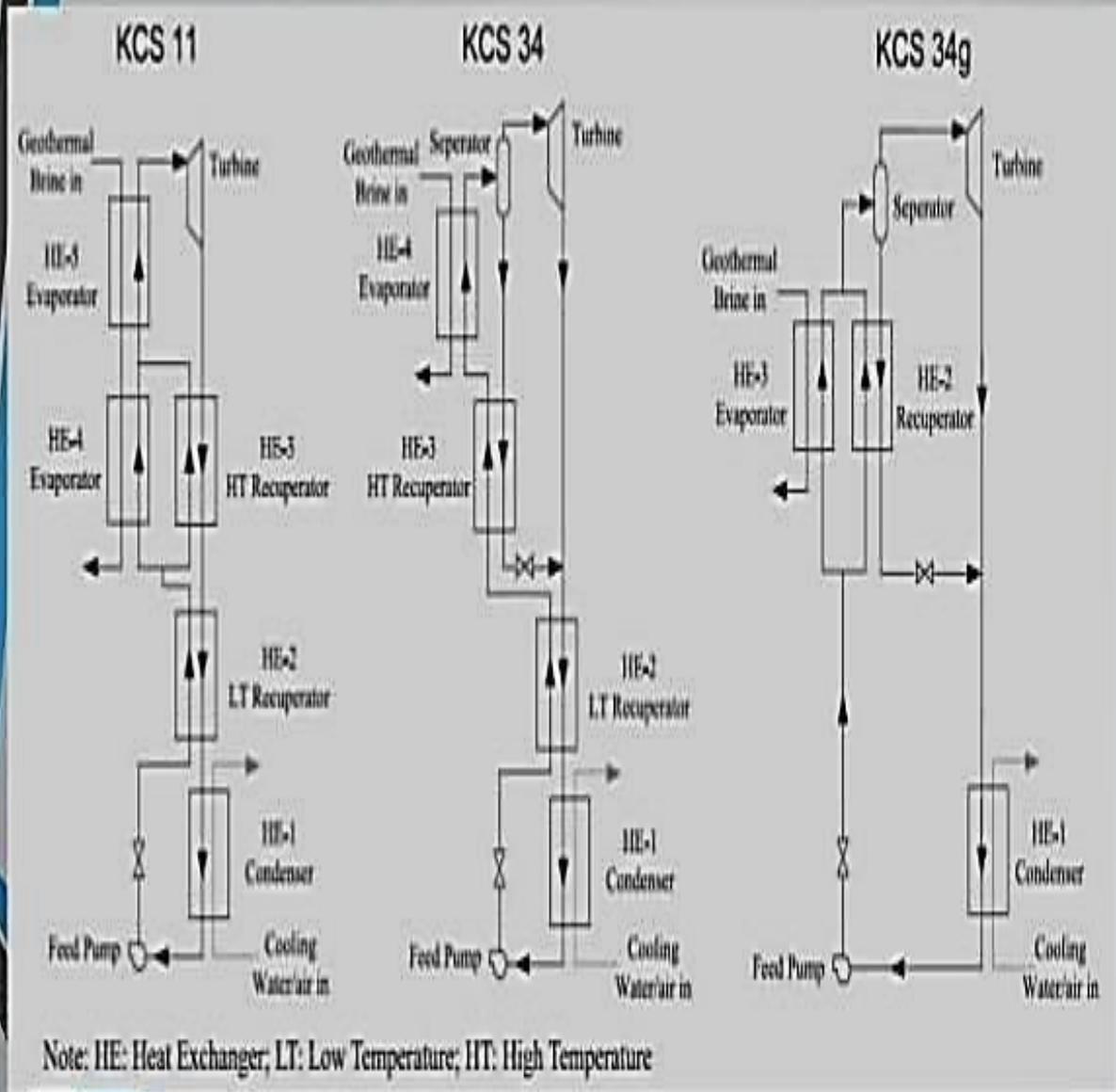


Figure 12 : différent cycle kalina .

III.4 Application d'un cycle de Kalina :

III.4.1 Application industrielle :

- Industrie du ciment
- Industrie du verre

- Industrie pétrochimique
- Industrie sidérurgique
- Centrales thermiques

III.4.2 Énergie renouvelable :

- L'énergie géothermique
- Énergie solaire thermique
- Énergie thermique océanique
- Biomasse

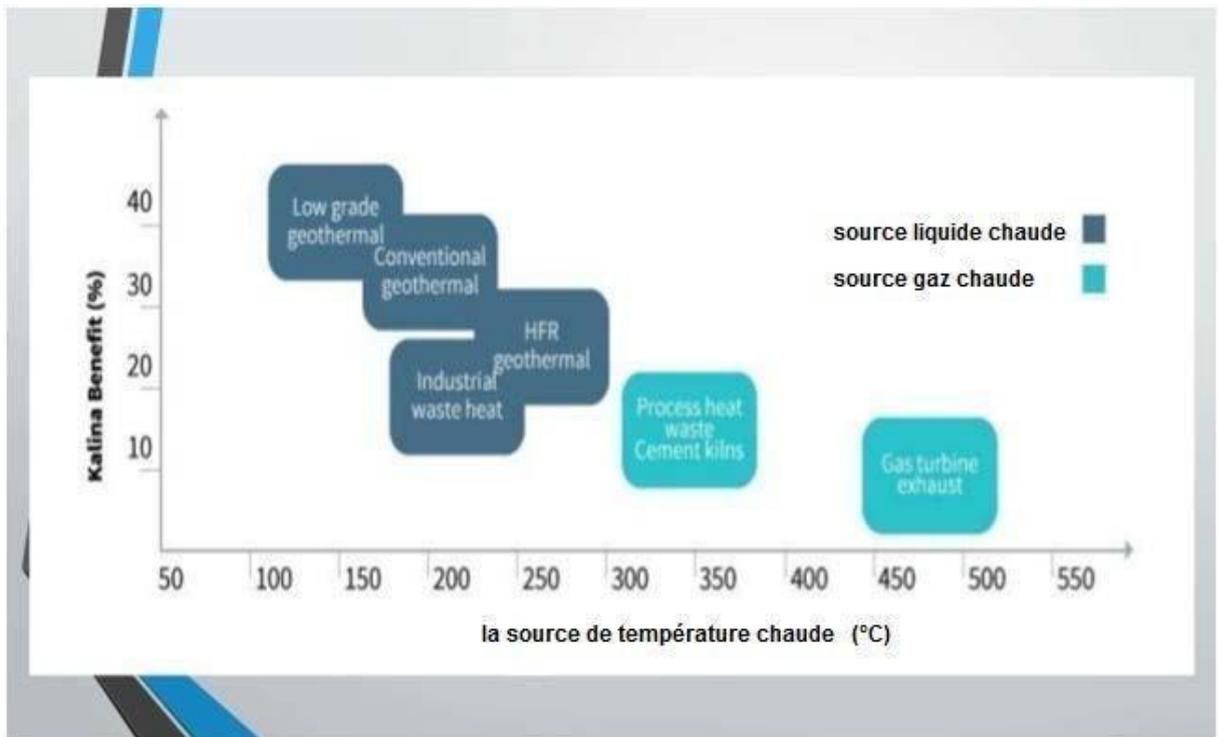


Figure 13 : Application du cycle de Kalina. [27]

III.5 Quelques expériences opérationnelles :

Canoga Park : Canoga Park a été la première centrale de grande envergure mise en service à l'aide du cycle de Kalina. Elle a été construite avec le soutien du département américain de l'Énergie (DoE) pour démontrer la technologie.

Dans la configuration initiale, la source d'énergie était la chaleur perdue provenant d'une

installation d'essai de générateurs de vapeur nucléaires. Lorsque cela est devenu indisponible, la chaleur d'échappement d'une turbine à gaz a été utilisée comme alternative. L'unité a fonctionné pendant plus de cinq ans (1992-1997) avec une bonne fiabilité et a accumulé environ 10 000 heures de fonctionnement. Les seuls joints de labyrinthe de la turbine à vapeur constituaient du nickel pur, sur l'avis du fabricant.

Les performances de la turbine à vapeur étaient satisfaisantes, même si les matériaux de construction étaient généralement des alliages à base de nickel en raison des données limitées disponibles à ce moment-là sur l'utilisation des matériaux dans des environnements contenant de l'ammoniac et de l'eau aux températures et pressions élevées de cette unité.

Les conditions de fluide d'étranglement de la turbine étaient de 515 ° C et une pression de 110 bar . La capacité de production du cycle de fond était d'environ 3 MW, le surplus d'électricité étant vendu au service public local. En tant que centrale à cycle combiné, la démonstration du parc Canoga était estimée à environ 6,5 MW.

La turbine à vapeur était une machine axiale classique à 15 étages basée sur la technologie de turbine couramment utilisée pour les applications à entraînement mécanique. Le débit volumétrique relativement faible avec une pression d'étranglement de 110 bar nécessitait une vitesse de rotation de la turbine d'environ 14 000 tr / min. Un réducteur a été utilisé pour coupler la turbine à un générateur à induction à 1800 tr / min.

Fukuoka : La construction de cette unité, qui était également considérée comme un démonstrateur, a été subventionnée par le Ministère japonais du commerce international et de l'industrie (MITI) et a été le premier incinérateur de déchets à utiliser le cycle de Kalina. Il en résulte une efficacité 20% supérieure à celle d'autres installations similaires de ce type.

L'unité a bénéficié de la technologie d'incinération intégrée mise au point par la société japonaise Ebara Corporation pendant de nombreuses années. La centrale de 4,5 MW a brûlé 200 t / jour de déchets municipaux, produisant un gaz de combustion à environ 900 ° C pour la récupération de chaleur.

Les conditions de l'étranglement de la turbine étaient 293 ° C et 43bara. Des essais approfondis ont été réalisés sur une période d'environ deux ans d'exploitation fructueuse et toutes les exigences cibles spécifiées par l'utilisateur ont été satisfaites. L'usine a été fermée à la fin de la période d'essai après avoir atteint tous ses objectifs.

Kashima Works (Sumitomo Metals) : La centrale électrique à cycle de Kalina installée dans

l'usine d'acier de Sumitomo de Kashima Works a été la première application commerciale du cycle de Kalina et a généré 3,5 MW d'énergie électrique au cours de plus d'une décennie de succès. Dans ce cas, la chaleur perdue lors de la fabrication de l'acier était la source d'énergie et les paramètres d'étranglement de la turbine étaient 236 ° C et 31bara.

L'unité a terminé avec succès les tests de performance de l'usine à l'automne de 1999 et a depuis lors fonctionné avec des disponibilités élevées. Les chiffres de disponibilité annuelle confirmés des usines sont compris entre 97% et 99%.

Husavik : La centrale géothermique Husavik en Islande a été mise en service en 2000 en utilisant un flux de saumure à 121 ° C pour fournir 80% de la demande en énergie de cette petite ville. Le fluide de travail était constitué de 82% d'ammoniac et d'eau à une pression de 34 bar. Dans l'évaporateur, l'eau ammoniacale était partiellement vaporisée à 75% de vapeur et 25% de liquide et le composant de vapeur était séparé du composant liquide dans le séparateur.

III.6 Le fonctionnement du cycle de kalina :

Le mélange « eau-ammoniac » quitte l'évaporateur ou la chaudière sous forme de mélange saturé. La qualité du mélange est en fonction de la concentration d'ammoniac dans le mélange, la température de la source chaude et la pression du mélange. Une fois le mélange quitte l'évaporateur, il entre dans le séparateur de phases.

Le séparateur de phases a pour tâche de séparer le mélange en deux flux distincts. La partie vapeur saturé du mélange qui est riche en ammoniac sort du séparateur pour subir ensuite une détente dans a turbine pour produire du travail. Le mélange « ammoniac-eau » après avoir subit la détente reste toujours dans l'état de fluide saturé. Le mélange saturé est à l'état2.

Dans le séparateur, la partie liquide du mélange « ammoniac-eau » qui ne s'est pas vaporisée dans l'évaporateur quitte le séparateur à l'état 3.

La partie liquide saturée du mélange (ligne bleu), est un mélange pauvre en ammoniac, tandis que la partie vapeur (ligne verte) est riche en ammoniac. Le liquide saturé chaud est envoyé au mélangeur (ou à l'absorbeur) à basse pression à travers une vanne d'étranglement. Le mélange des deux flux dans le mélangeur se fait à la même pression (basse pression).

Le mélange obtenu (état 5) se dirige vers le condenseur où la chaleur est transférée au système de refroidissement. Le liquide saturé quitte le condenseur à l'état 6.

Le mélange est ensuite comprimé de manière adiabatique dans une pompe et sort à une pression maximale (état 7).

Le mélange « ammoniac-eau » passe ensuite dans le préchauffeur et absorbe de la chaleur (état 8).

Le mélange « Ammoniac -eau » préchauffé entre ensuite dans l'évaporateur (état 9).

Le fluide de travail « Mélange ammoniac-eau » subit un cycle fermé et continu et produit du travail utile. (**Voir la Figure 14**).

Dans l'évaporateur à haute température l'eau libère l'ammoniac qui se sépare ensuite de l'eau dans le séparateur. Dans le mélangeur à basse température l'eau absorbe l'ammoniac.

Contrairement au mélange LiBr/H₂O, où l'eau est considérée comme fluide frigorigène et le bromure de lithium comme absorbant, l'ammoniac est considéré comme fluide frigorigène et l'eau comme absorbant.

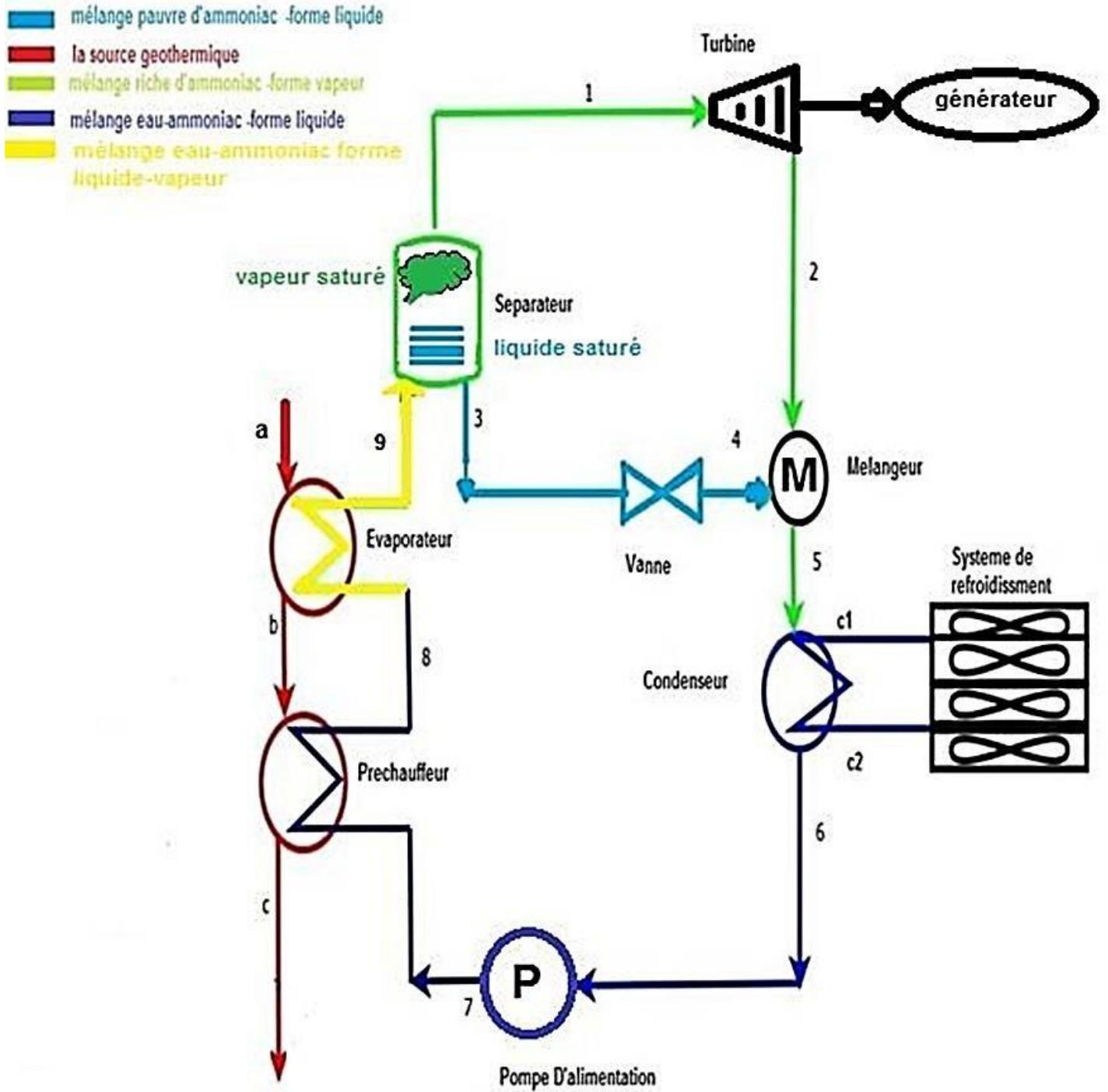


Figure 14: Schéma du cycle de Kalina d'une centrale géothermique.

III.7 Les paramètres de cycle de kalina :

III.7.1 Le préchauffeur et l'évaporateur :

Le préchauffeur et l'évaporateur du point 7 au point 8 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.

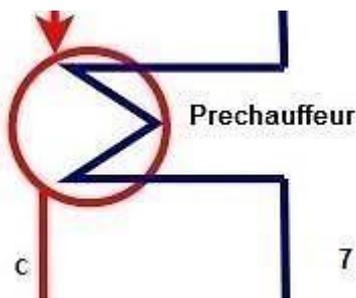


Figure 15 : préchauffeur

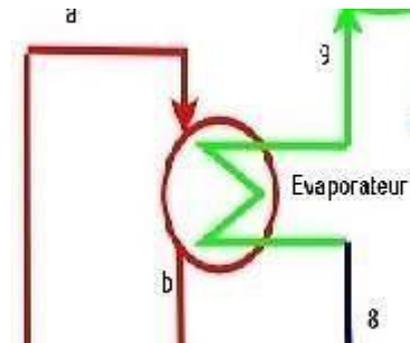


Figure 16 : évaporateur

$$Q_{geo} = \dot{m}(h_a - h_c)$$

$$Q_{chaude} = \dot{m}(h_9 - h_7)$$

$$T_9 = T_a - \Delta T_1$$

$$T_b = T_m + \Delta T_1$$

Le bilan thermique thermodynamique est donc :

$$\dot{m}(h_9 - h_7) = \dot{m}_{geo}(h_a - h_c)$$

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

Devient :

$$(h_9 - h_7) = \dot{m}_{geo} (- T_c)$$

III.7.2 Pour l'évaporateur

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

$$\dot{m}_m (h_9 - h_m) = \dot{m}_{geo} c_p (T_a - T_b)$$

III.7.3 Pour le préchauffeur

$$Q_{prh} = \dot{m}_g (T_b - T_c)$$

$$\dot{m} (h_m - h) = \dot{m}_{geo} c_p (T_b - T_c)$$

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

$$\dot{m} (h_9 - h) = \dot{m}_{geo} c_p (T_a - T_c)$$

III.7.4 Le séparateur :

Sépare le mélange ammoniac – eau en deux formes , le premier à l'état gazeux vers la turbine et le deuxième à l'état liquide vers le mixeur ou il unit avec la vapeur .

III.7.5 Point de vapeur saturée :

$$T_9 = T_1$$

$$P_9 = P_1$$

III.7.6 Point liquide saturé :

$$P_9 = P_3$$

$$\text{Vap_ratio} \times m_1 + \text{liq_ratio} \times m_3 = xm_9$$

$$\text{Vap_ratio} + \text{liq_ratio} = 1$$

III.7.7 La turbine et le générateur :

La turbine est un dispositif qui convertit l'énergie thermique du fluide organique en énergie électrique via le générateur. La vapeur de fluide organique sous pression de fluide organique se dilate dans la turbine et entraîne la rotation du rotor. Le rotor est connecté à un générateur qui convertit l'énergie cinétique de rotation en électricité. Le processus de dilatation dans la turbine est considéré comme étant adiabatique et stable l'opération est supposée. Le rendement de la turbine () est isentropique et est donné par constructeur.

La puissance générée par la turbine peut être calculée à l'aide de l'équation suivante conformément

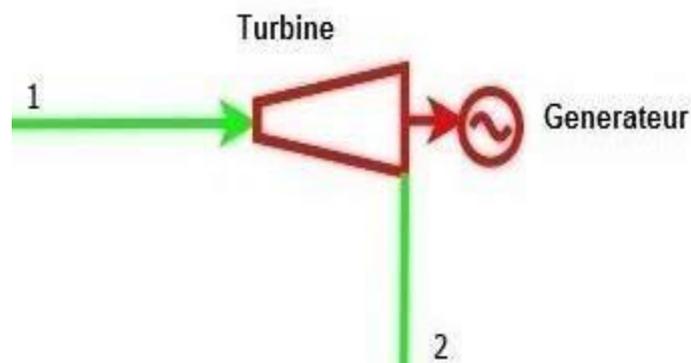


Figure 17 : Turbine –Générateur

$$W_T = v_{\text{ratio}} \times x_{m_1} \times \dot{m} (h_1 - h_2)$$

$$W_T = v_{\text{ratio}} \times x_{m_1} \times \dot{m}_m \times \eta_{th} (h_1 - h_2)$$

$$\eta_t = \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_{2s}}$$

$$x_{m_1} = x_{m_2}$$

III.7.8 Le condenseur :

Le condenseur est un échangeur de chaleur entre la vapeur chaude de la turbine et le fluide de refroidissement (eau ou air) du cycle. Le calcul du condenseur est à peu près le même dans les deux cas. Le fluide de travail passe de la turbine à l'entrée du condenseur par le **point 5 (Figure 18)** et de la sortie du condenseur au **point 6**. Le fluide de refroidissement provient du système de refroidissement pour entrer dans le condenseur au point C1 et du condenseur de sortie au point C2, comme illustré à la figure 9 et peut refroidir le fluide de travail à une pression et à une température optimale. Il contrôle également la température de réinjection du fluide géothermique. Il existe deux types de systèmes de refroidissement.

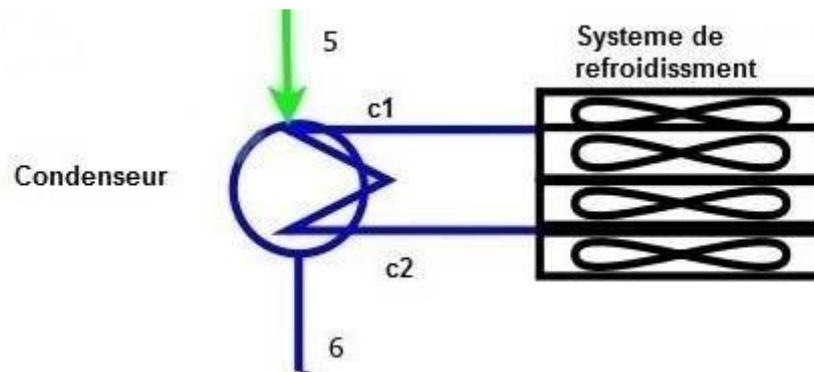


Figure 18 : Condenseur

$$h_4 = \text{vap_ratio} \times h_3 + \text{liq_ratio} \times h_2$$

$$P_5 = P_6$$

$$h_4 = h_3$$

$$P_1 = P_2$$

$$x_{m_1} = x_{m_2}$$

$$Q_{cond} = \dot{m}_m (h_5 - h_6)$$

$$\dot{m}_m (h_5 - h_6) = \dot{m}_{attr} c_{p_{attr}} (T_{c2} - T_{c1})$$

$$T_{c22} = T_{attr} + \Delta\Delta T_{22}$$

III.7.9 La pompe d'alimentation :

La pompe d'alimentation utilisée augmente la pression du fluide de travail (le mélange) et le pousse du condenseur vers le préchauffeur. Le processus de pompage est supposé être isentropique. La puissance utilisée par la pompe d'alimentation est exprimée avec l'équation suivante:

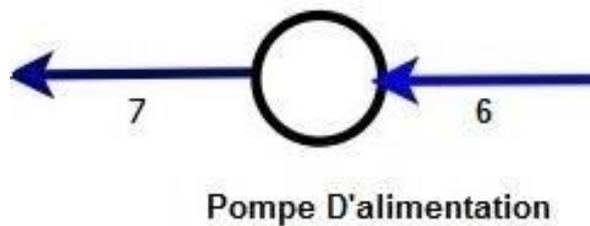


Figure 19: Pompe d'alimentation

$$W_{pompe,a} = \dot{m}(h_7 - h_6) = \frac{\dot{m}(h_7 - h_6)}{m_p}$$

chapitre IV Etude comparativement :

IV.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 peut 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.

Chapitre IV : Etude comparativement :



Figure 20 : Barre d'outils pour ees

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	B_i	h_i	P_i	Qa_i	s_i	Tk_i	T_i	u_i	v_i	$x_{m,i}$
[1]										
[2]										
[3]										
[4]										
[5]										
[6]										
[7]										
[8]										
[9]										

Figure 21 : Model de tableau paramétrique

IV.2 Etude thermodynamique des deux cycles (Kalina ORC) :

Pour cette étude nous avons utilisé le gaz R134A comme fluide de travail secondaire pour le Cycle ORC et l'eau et de l'ammoniac pour le Cycle Kalina

IV.2.1 Propriété du R134a :

tétrafluoroéthane (CF₃CH₂F) est un gaz ininflammable utilisé principalement comme réfrigérant «haute température» pour la climatisation domestique et les climatiseurs d'automobile. Il est sans danger pour la manipulation normale car il est non toxique, ininflammable et non corrosif. Il est maintenant utilisé pour remplacer le réfrigérant R-12, plus nocif pour l'environnement, dans le domaine des compresseurs centrifuges, à vis tournantes, à spirales et alternatifs.

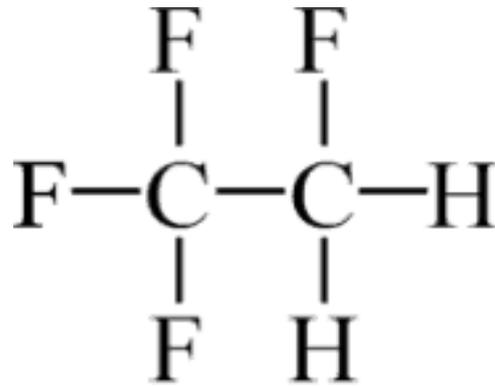


Figure 22 : Molécule R134a

Propriété	R134a
densité	4.25kg/m ³
Point d'ébullition	-26.1°C
Solubilité dans l'eau	0.15%
Temperature critique	101,34°C

Tableau 1: Propriété du gaz R134a

- **Densité** 4.25kg/m³
- **Point d'ébullition** -26.1°C
- **Solubilité dans l'eau** 0.15%
- **Température critique** 101,34°C

IV.2.2 Propriété De l'ammoniac

L'ammoniac est un composé chimique, de formule NH₃ (groupe générique des nitrures d'hydrogène). C'est une molécule pyramidale à base trigonale : l'atome d'azote (N) est au sommet et les trois atomes d'hydrogène (H) occupent les trois coins (sommets) de la base triangulaire équilatérale. Plus exactement, l'atome d'azote « monte » et « descend » entre ce « sommet » de la pyramide et celui de la pyramide opposée, traversant ainsi la base triangulaire des atomes d'hydrogène. Cette « oscillation » s'effectue à une fréquence principale de 24 GHz et a été mise à contribution dans les premières horloges atomiques.

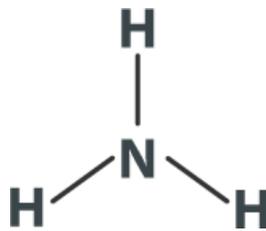


Figure 23 : Molécule de l'ammoniac

Propriété	NH ₃
densité	696 kg/m ³
Point d'ébullition	-33.33°C
Solubilité dans l'eau	0. 54%
Température critique	132.41°C

Tableau 2 : Propriété du gaz NH₃

- Densité 696kg/m^3
- Point d'ébullition -33.33°C
- Solubilité dans l'eau 0.54%
- Température critique 132.41°C

IV.3 Diagramme T-S pour les deux cycles :

IV.3.1 Cycle ORC (simple) :

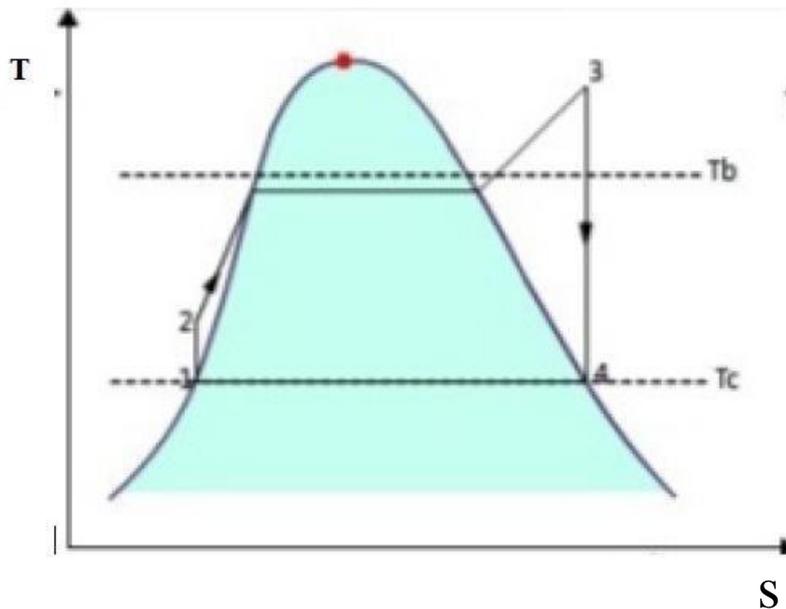


Figure 23 : Diagramme t-s pour le cycle ORC

IV.3.2 Cycle Kalina (ammoniac eau) :

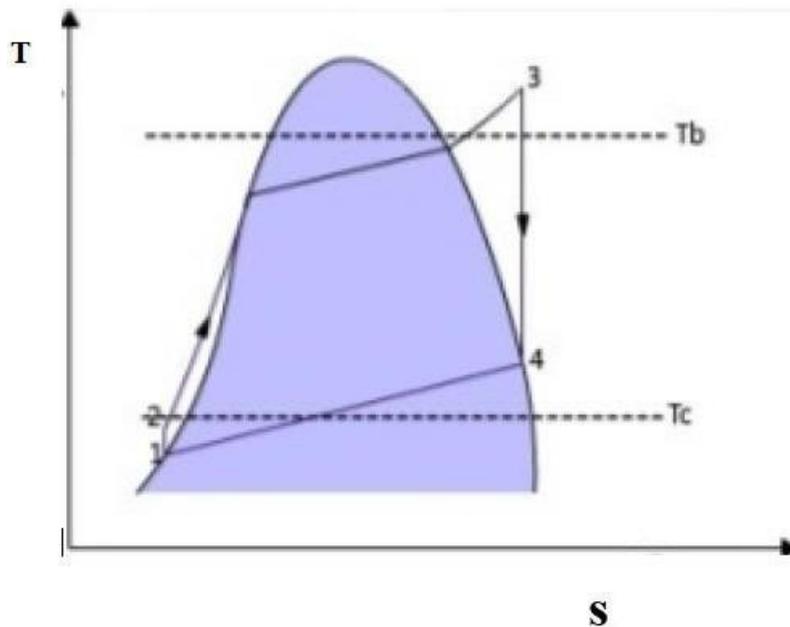


Figure 24 : Diagramme T-S pour le cycle KALINA

- L'efficacité du cycle Kalina est supérieure à celle du cycle Orc pour 3 majeure raison :
- La température moyenne d'addition de chaleur du cycle de Kalina est supérieure à celle du cycle de Rankine
 - La température moyenne de rejet de chaleur du cycle de Kalina est inférieure à celle du cycle de Rankine.
 - La surface sous le diagramme T-S du cycle de Kalina est supérieure à celle du cycle de Rankine.

IV.4 Cycle ORC :

En variant la pression basse de notre étude nous avons réussi à avoir deux diagrammes pour le rendement et le travail : (cycle de Rankine)

1..10	$\eta_{\text{cycle;orc}}$	$P_{\text{low;orc}}$	$W_{\text{net;orc}}$
Run 1	0,2528	2	64,74
Run 2	0,2502	2,111	63,5
Run 3	0,2476	2,222	62,32
Run 4	0,2451	2,333	61,19
Run 5	0,2427	2,444	60,11
Run 6	0,2404	2,556	59,07
Run 7	0,2382	2,667	58,07
Run 8	0,236	2,778	57,12
Run 9	0,2339	2,889	56,2
Run 10	0,2318	3	55,31

Tableau 3: Tableau paramétrique

IV.4.1 R134a

Une variation de pressions entre 1 et 3 Bar. Pour les gaz suivant le (R134a, R113, R114, Isobutane).

Ce qui nous as permit de tracer les deux diagrammes suivants :

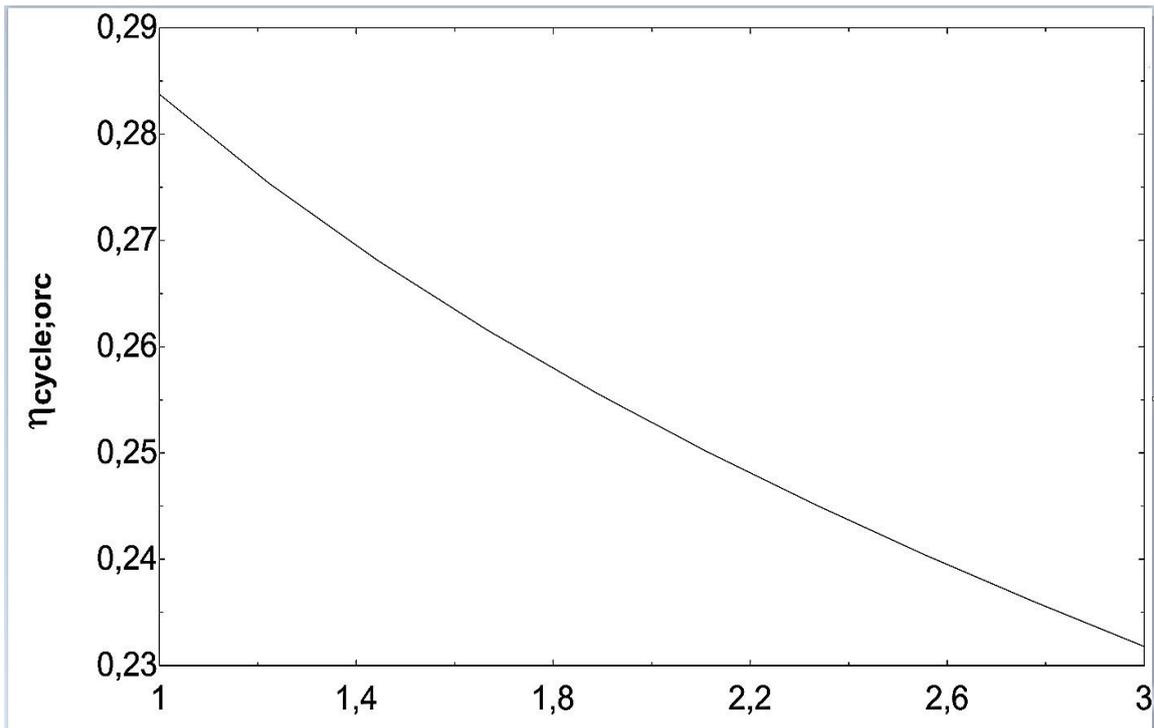


Figure 25 : Diagramme du rendement de R134a par rapport à la pression

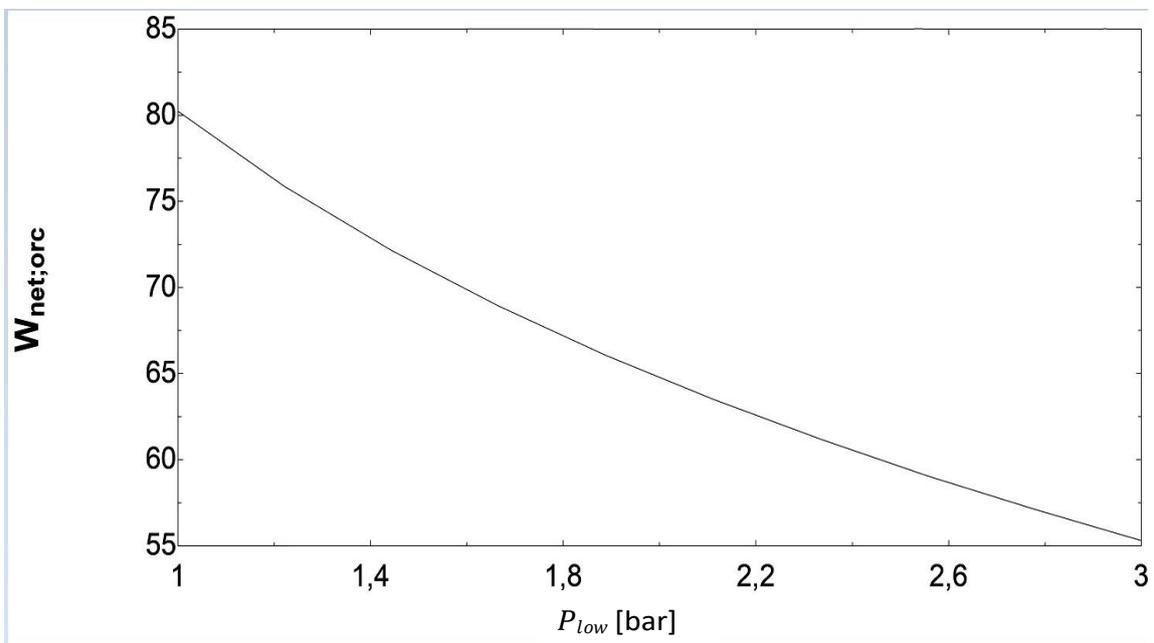


Figure 26 : Diagramme du Travail net de R134a par rapport à la pression

Dans les deux cas on a remarqué que les deux diagrammes subissent une chute conséquente dès que la pression est à un niveau élevé

- **Pour le rendement :**

A 1 bar le rendement est à son maximum avec 28%

A 3 bar le rendement est égale a 23%

Soit une chute de 5%

- **Pour le travail :**

A 1 bar le travail est à son maximum soit à 80

A 3 bar le travail est égale a 55

Soit une chute de 25

IV.4.2 R113 :

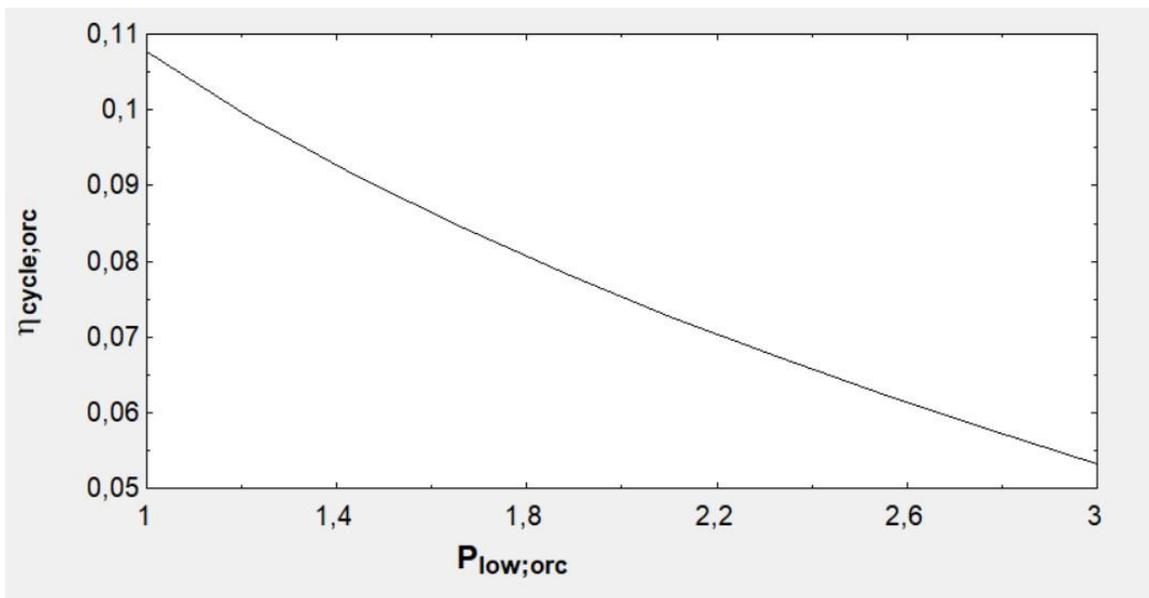


Figure 27 : Diagramme du rendement de R113 par rapport à la pression

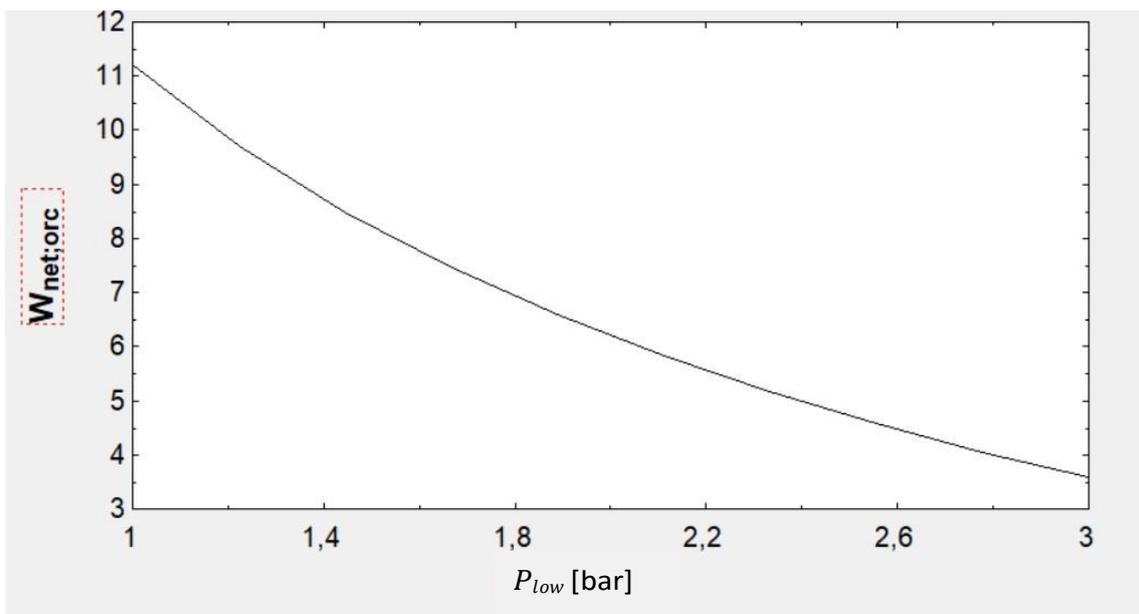


Figure 28 : Diagramme du Travail net de R113 par rapport à la pression

Dans les deux cas on a remarqué que les deux diagrammes subissent une chute conséquente dès que la pression est à un niveau élevé

➤ **Pour le rendement :**

A 1 bar le rendement est à son maximum avec 11%

A 3 bar le rendement est égale à 5.5%

Soit une chute de 4.5%

➤ **Pour le travail :**

A 1 bar le travail est à son maximum soit à 11 KW

A 3 bar le travail est égale à 4.3 KW

Soit une chute de 6.7 KW

IV.4.3 R114 :

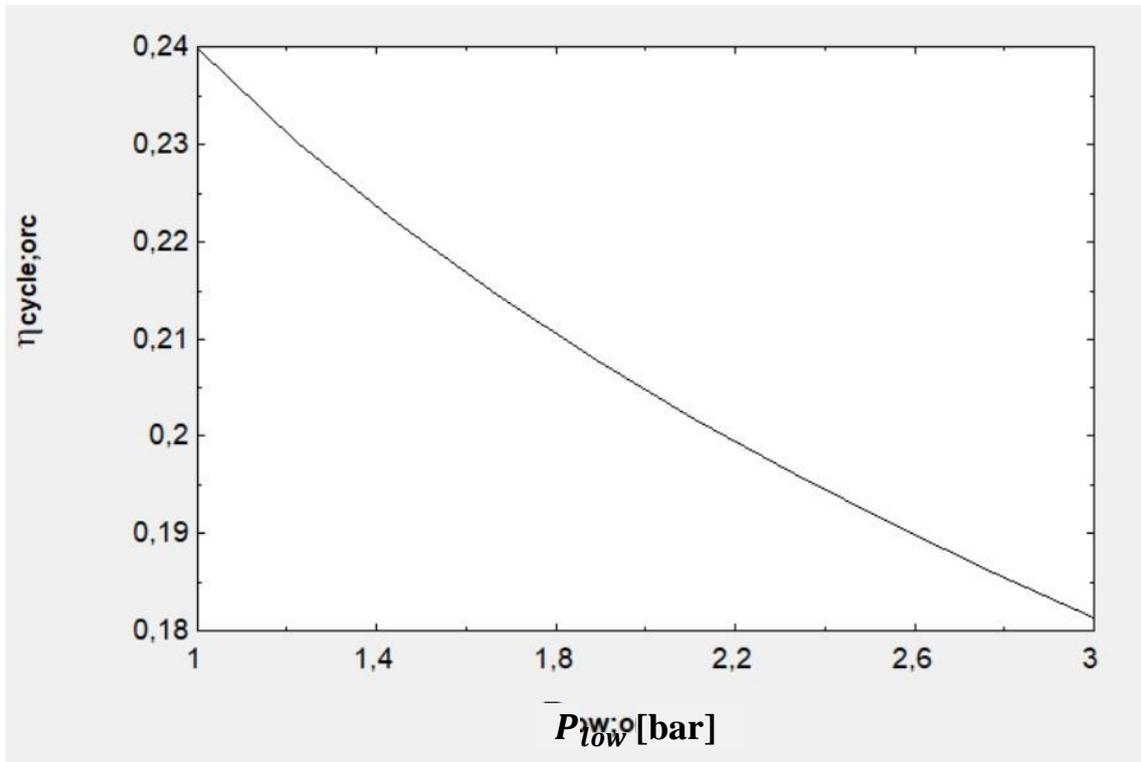


Figure 29 : Diagramme du rendement par rapport à la pression R114

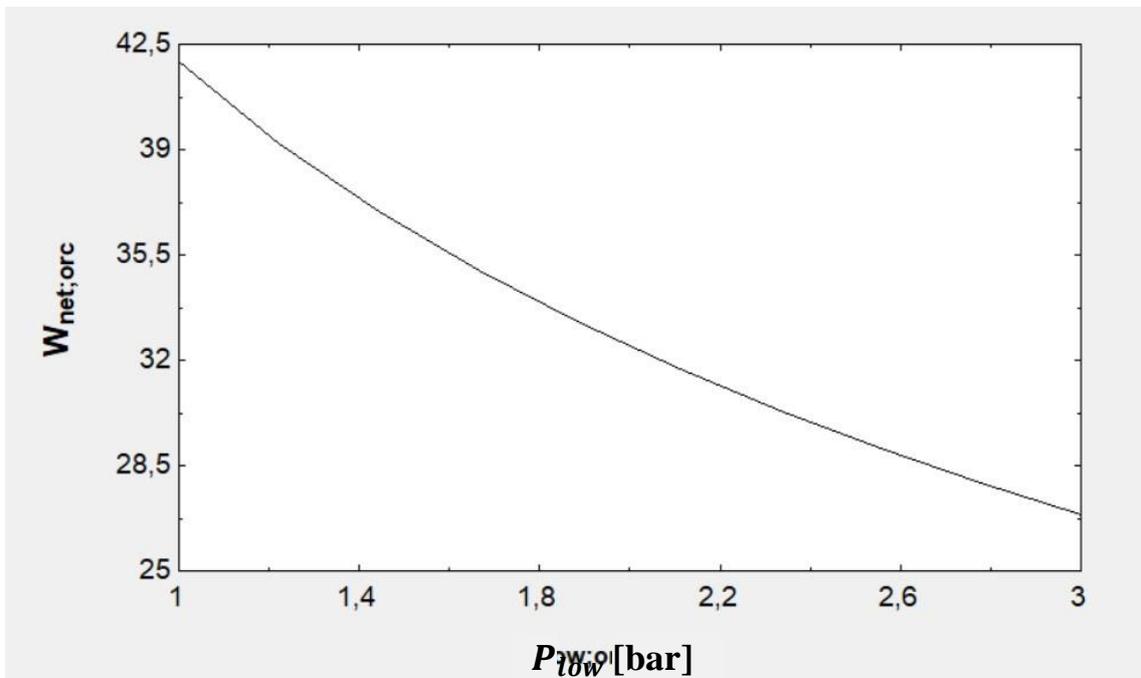


Figure 30 : Diagramme du Travail net de R114 par rapport à la pression

Chapitre IV : Etude comparativement :

Dans les deux cas on a remarqué que les deux diagrammes subissent une chute conséquente dès que la pression est à un niveau élevé

➤ **Pour le rendement :**

A 1 bar le rendement est à son maximum avec 24%

A 3 bar le rendement est égale à 18.5%

Soit une chute de 5.5%

➤ **Pour le travail :**

A 1 bar le travail est à son maximum soit à 42.5 KW

A 3 bar le travail est égale à 26.75 KW

Soit une chute de 15.75 KW

IV.4.4 Isobutane :

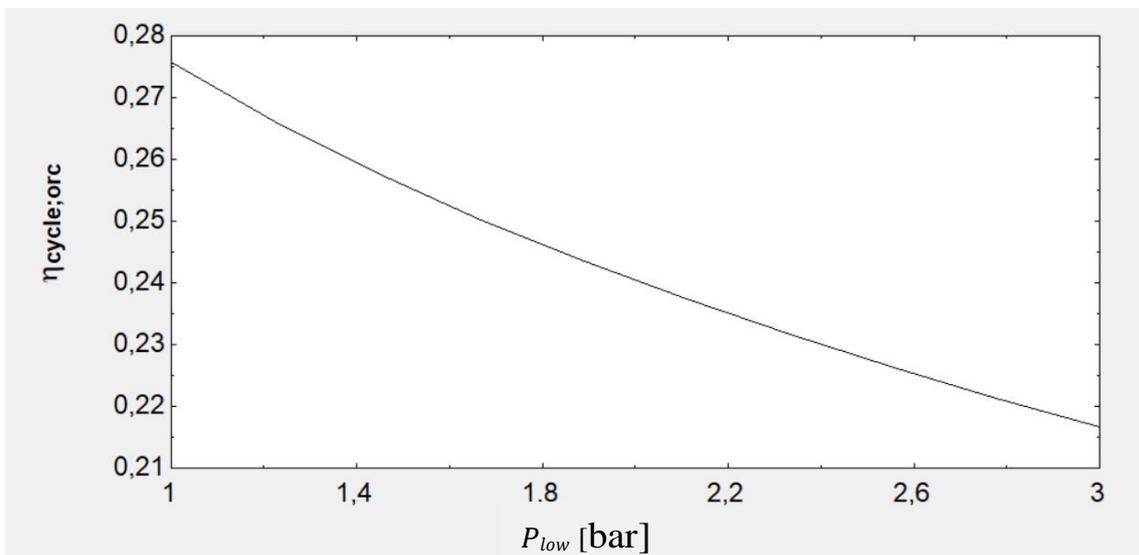


Figure 31 : Diagramme du rendement de Isobutane par rapport à la pression

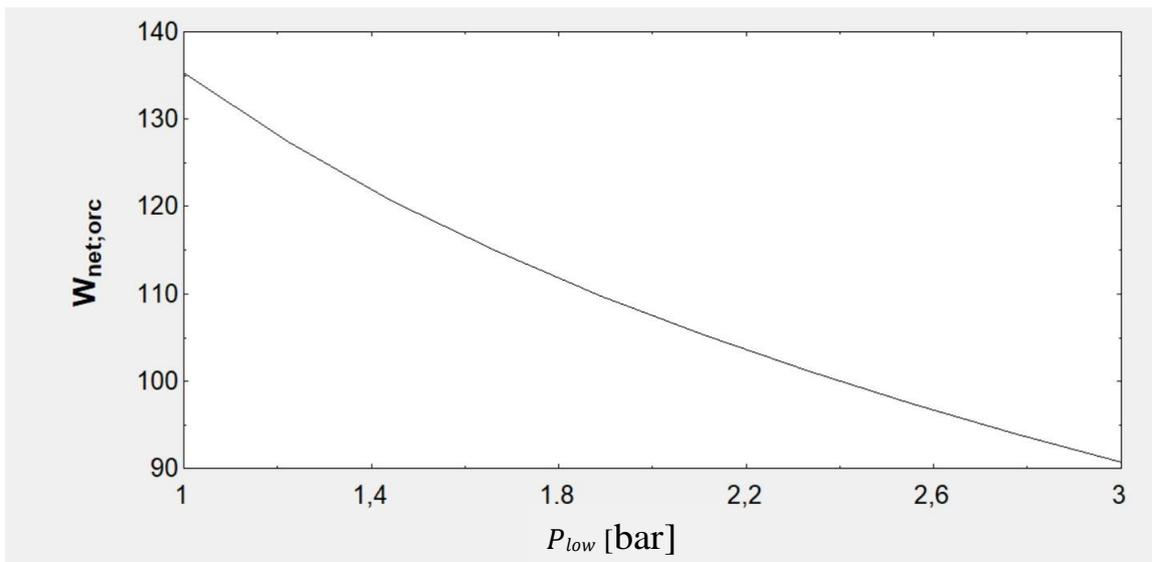


Figure 32 : Diagramme du Travail net de Isobutane par rapport à la pression

Dans les deux cas on a remarqué que les deux diagrammes subissent une chute conséquente dès que la pression est à un niveau élevé.

➤ **Pour le rendement :**

A 1 bar le rendement est à son maximum avec 27.5%

A 3 bar le rendement est égale à 21.8%

Soit une chute de 5%

➤ **Pour le travail :**

A 1 bar le travail est à son maximum soit à 135 kw

A 3 bar le travail est égale à 90 kw

Soit une chute de 45 kw

IV.5 Cycle kalina :

En variant la pression basse de notre étude nous avons réussi à avoir deux diagramme pour le rendement et le travail : (cycle de kalina)

Une variation de pressions entre 1 bar et 3 bar.

IV.5.1 NH₃*

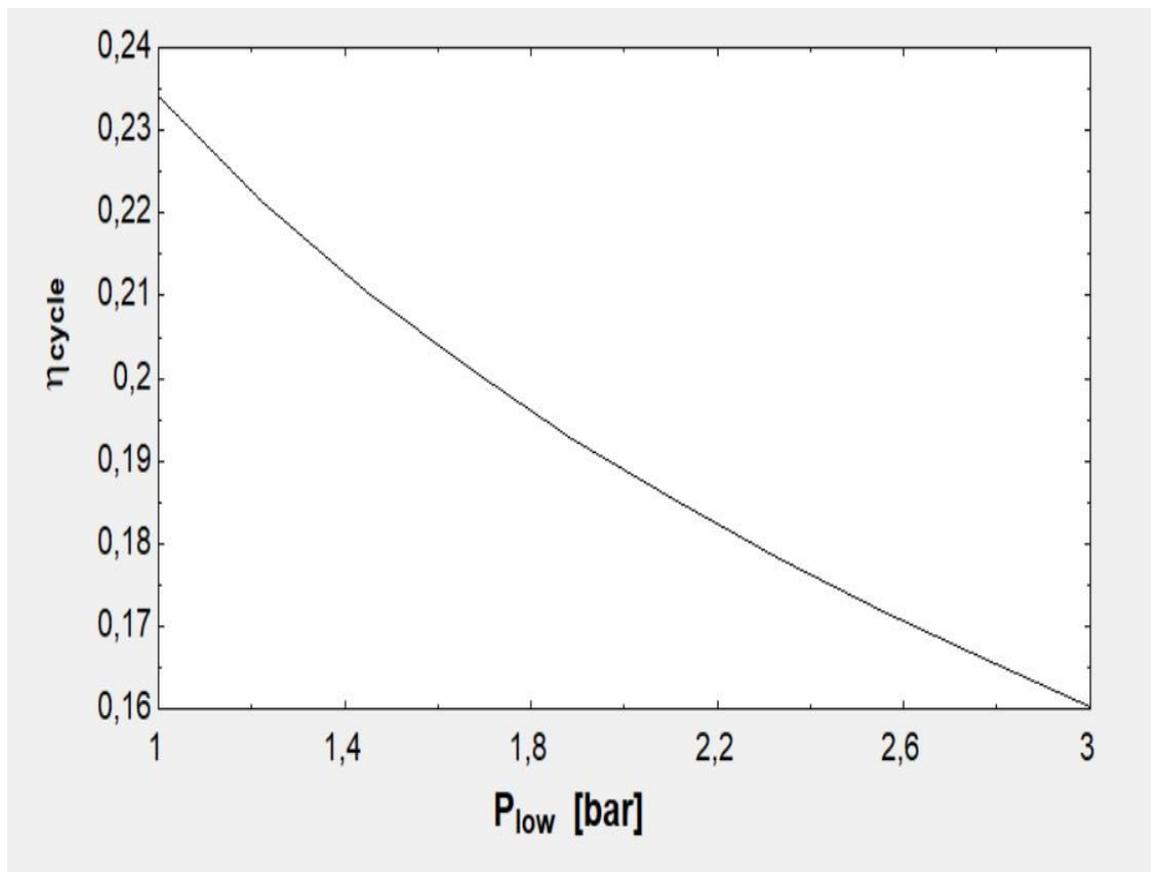


Figure 33 : Diagramme du rendement par rapport à la pression

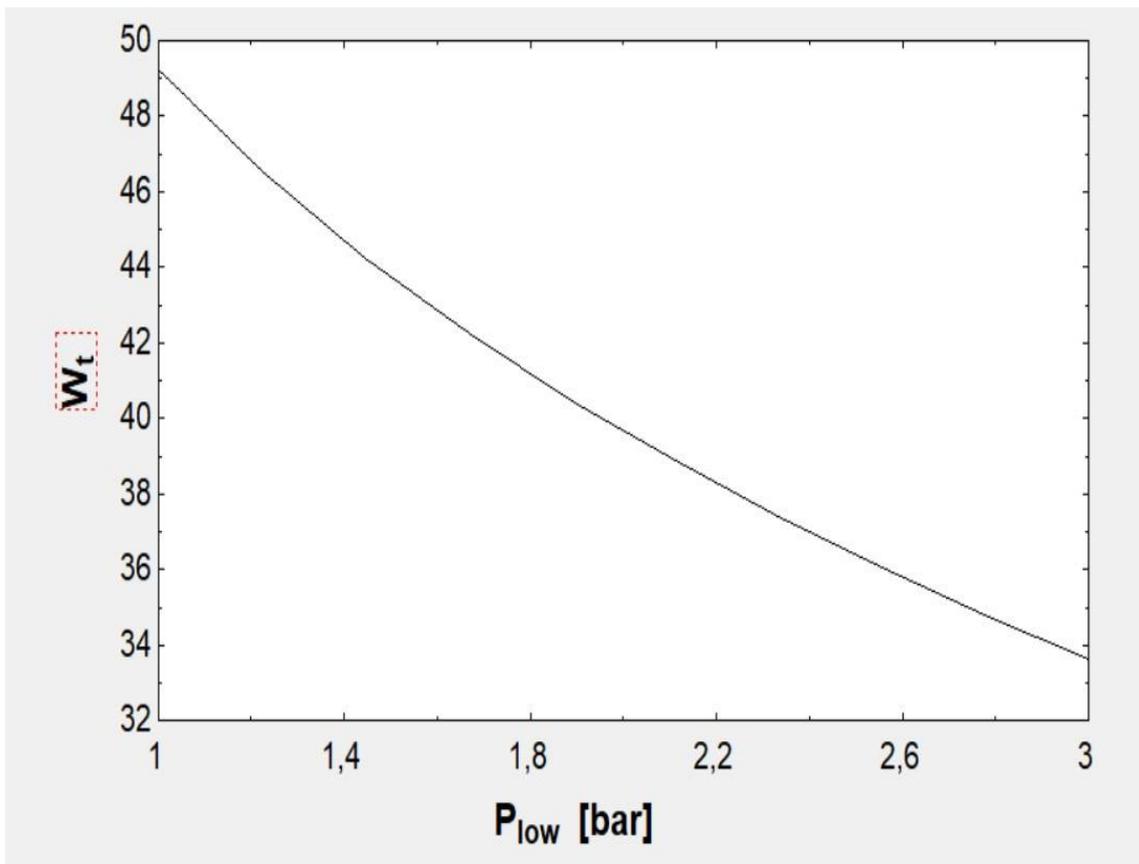


Figure 34 : Diagramme du Travail net par rapport à la pression

- **Pour le rendement :**

A 1 bar le rendement est à son maximum 23.5%

A 3 bar le rendement est à environs 16 %

Soit une chute de 8.5 %

- **Pour le travail :**

A 1 bar le travail est à son max de 49 kw

A 3 bar le travail est à environs 33 kw

Soit une chute de 16 kw

On a regroupé les résultats des 4 diagrammes en un seul pour le rendement et le travail.

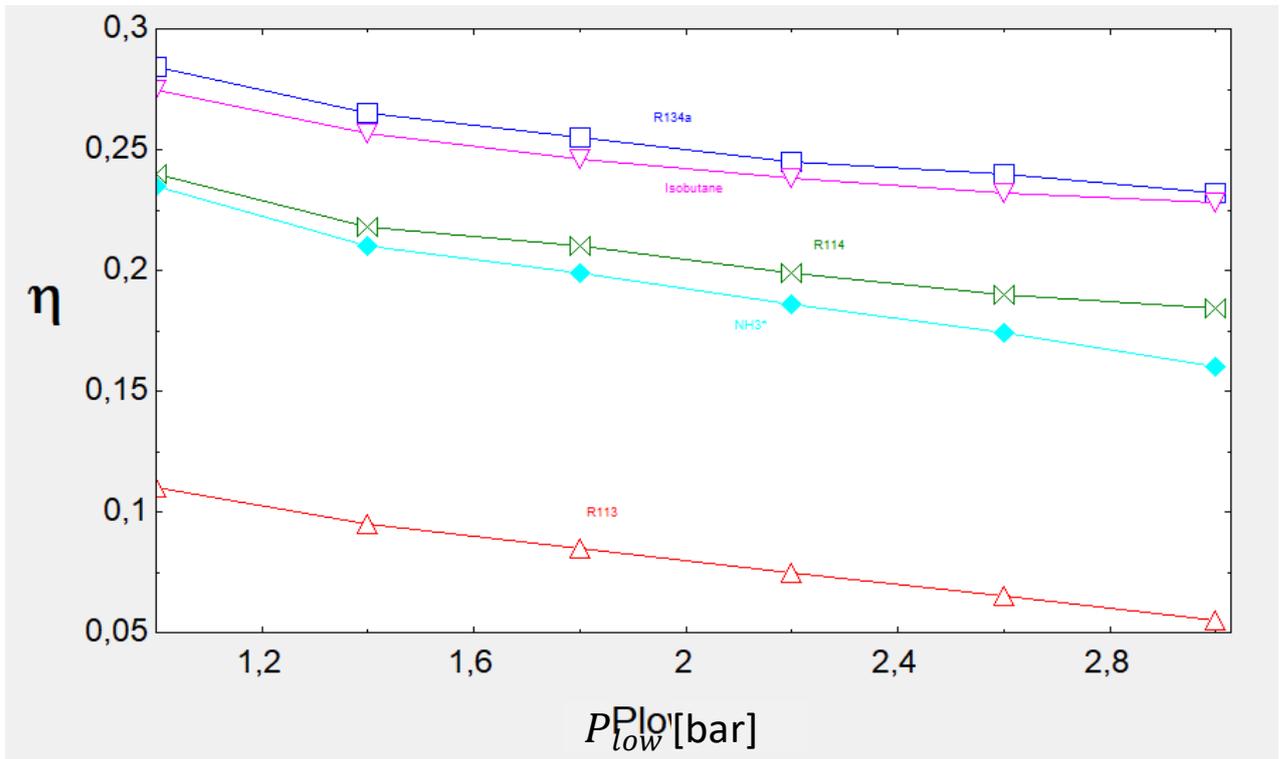


Figure 35 : Diagramme du rendement par rapport à la pression low

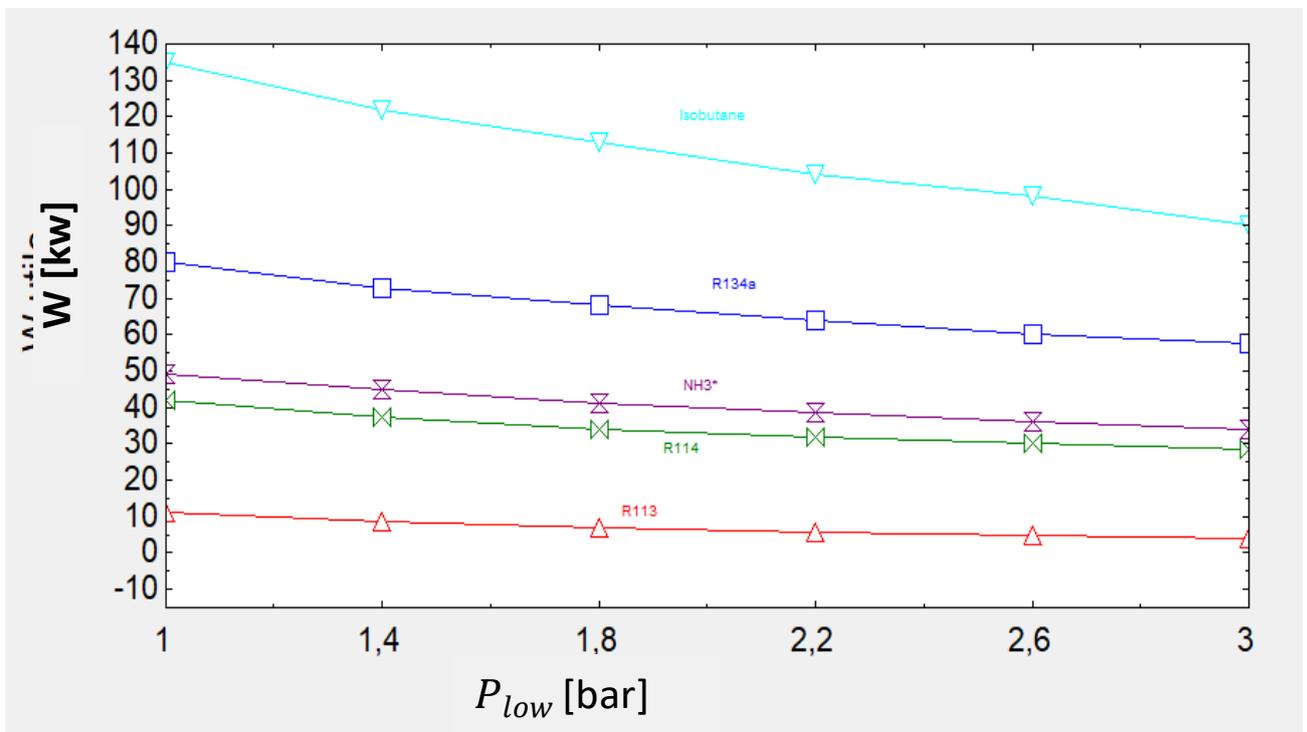


Figure 36: Diagramme du Travail net par rapport à la pression low

IV.6 Discussion à propos du rendement et du travail :

On remarque 3 point essentiel :

- Pour les deux cycle niveau du rendement le R 134a mieux de potentiel pour les basses pressions.
- Pour les deux cycle niveau travail net l'isobutane a mieux de potentiel pour les basses pressions.
- Pour nos deux cas le cycle ORC et efficace que ce soit niveau rendement ou travail.

	P high(bar)	P low (bar)	T(°C)	W(kW)	η(%)
R134a	30	1	150	0.9	28
	30	2	150	0.8	25
	30	3	150	0.55	23.5
R113	30	1	150	11.21	11
	30	2	150	6.5	7.5
	30	3	150	3.7	5.5
R114	30	1	150	41	24
	30	2	150	33	20.5
	30	3	150	27	18.2
Isobutane	30	1	150	135.5	27.5
	30	2	150	109	24.5
	30	3	150	92	21.8
Ammoniac	30	1	150	49	23.5
	30	2	150	40	19
	30	3	150	34	16

Tableau 4 : Résultat Thermodynamique pour les fluides utilisé sur l'ORC et Kalina.

On a varié la pression haute ente 10 et 30 bar on as réussi à avoir ces deux diagramme qui regroupe le travail et le rendement par rapport à la pression haute.

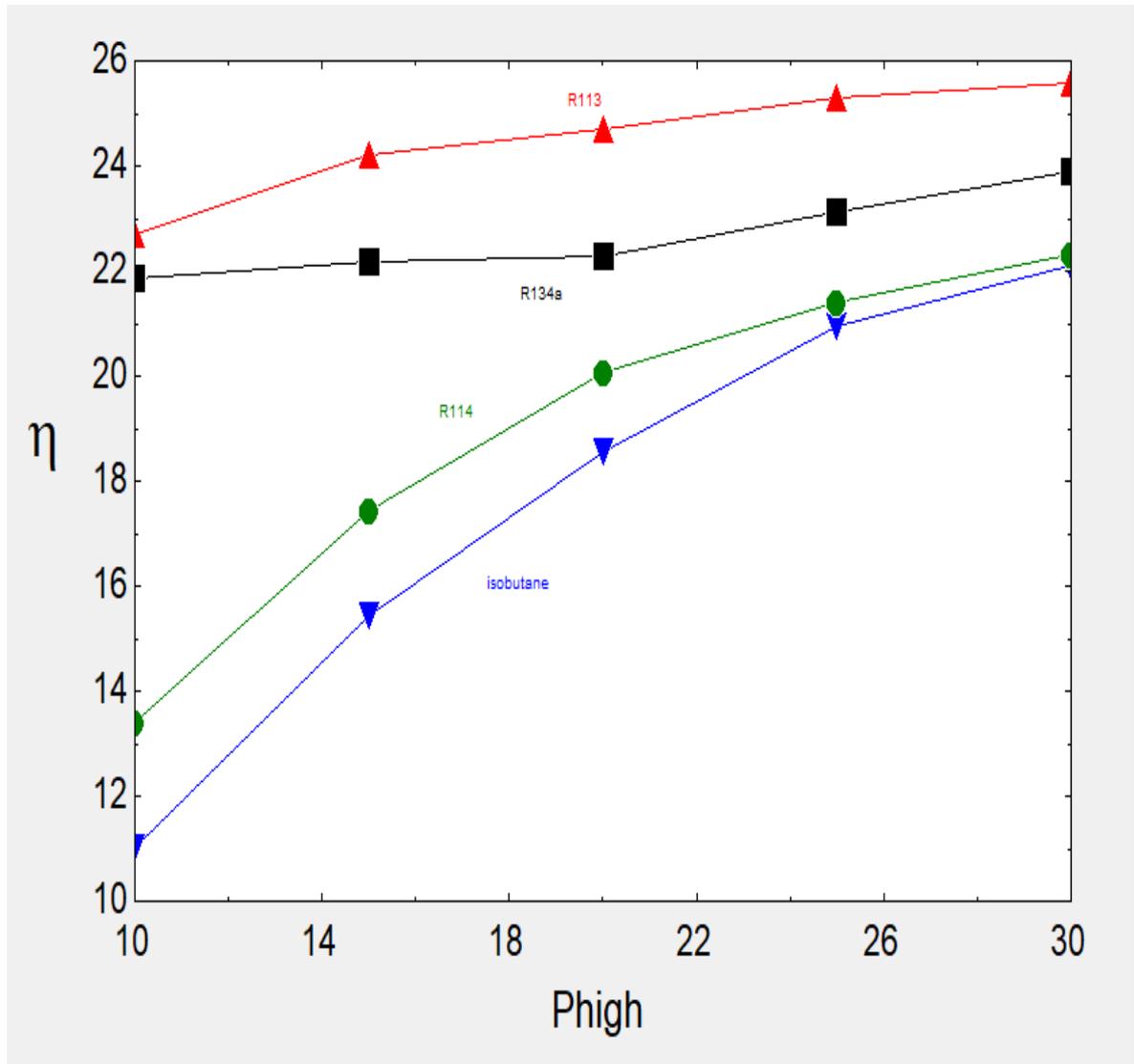


Figure 37 : Diagramme du rendement par rapport à la pression haute

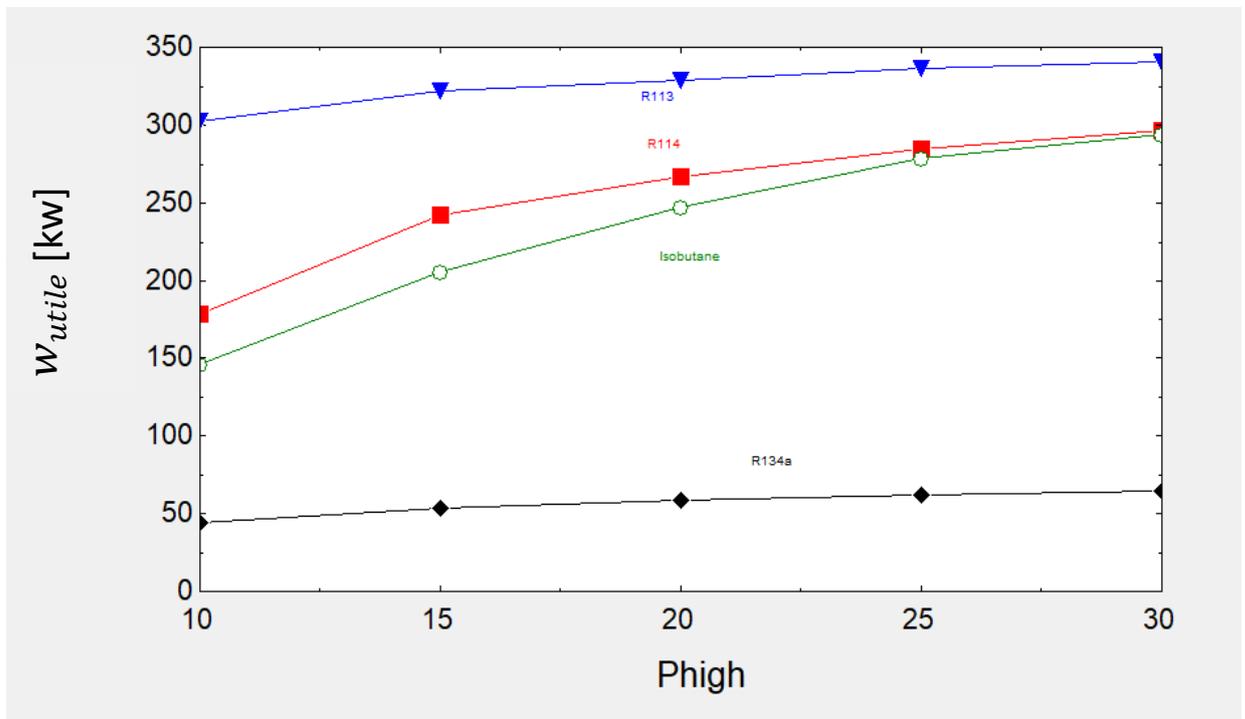


Figure 38 : Diagramme du Travail net par rapport à la pression high

IV.6.1 R134a

➤ **Pour le rendement :**

A 10 bar le rendement était a 21.9 %

A 30 bar le rendement est a 23%

Soit une augmentation de 1.1%

➤ **Pour le travail :**

A 10 bar le travail était à 49 kw

A 30 bar le travail est à 50 kw

Soit une augmentation de 1 kw

IV.6.2 R114 :

➤ **Pour le rendement :**

A 10 bar le rendement était a 13.5 %

A 30 bar le rendement est a 22.5%

Soit une augmentation de 9%

➤ **Pour le travail :**

A 10 bar le travail était a 178.5 kw

A 30 bar le travail est a 269.86 kw

Soit une augmentation de 91.36 kw

IV.6.3 R113

➤ **Pour le rendement :**

A 10 bar le rendement était a 22.9%

A 30 bar le rendement est a 25.5%

Soit une augmentation de 3%

➤ **Pour le travail :**

A 10 bar le travail était a 302.16 kw

A 30 bar le travail est a 343.39 kw

Soit une augmentation de 41.23 kw

IV.6.4 Isobutane :

➤ **Pour le rendement :**

A 10 bar le rendement était a 11.01%

A 30 bar le rendement est a 22.12%

Soit une augmentation de 11.11%

➤ **Pour le travail :**

A 10 bar le travail était a 146.50 kw

A 30 bar le travail est a 294.32 kw

Soit une augmentation de 147.82 kw

IV.7 Discussion à propos du rendement et du travail :

On remarque 3 point essentiel :

- Niveau rendement l'Isobutane mieux de potentiel pour les hautes pressions avec une augmentation de 11% pour chaque 20 bar.
- Niveau travail l'Isobutane a mieux de potentiel pour les hautes pressions.
- Pour les deux cas que ce soit rendement ou travail l'isobutane et le mieux placer pour être pris en fluide de travail.

	P high(bar)	P low (bar)	T(°C)	W(kW)	η(%)
R134a	10	2	150	49	21.9
	20	2	150	49.2	22
	30	2	150	50	23
R113	10	2	150	302.16	22.9
	20	2	150	330.8	25
	30	2	150	343.39	25.9
R114	10	2	150	178.5	13.5
	20	2	150	260	20.1
	30	2	150	269.86	22.5
Isobutane	10	2	150	146.50	11.01
	20	2	150	230.6	18.5
	30	2	150	294.32	22.12

Tableau 5: Résultat Thermodynamique pour les fluides utilisé sur l'ORC et Kalina.

IV.8 Aspects environnementaux de l'ammoniac et du cycle de

Kalina :

Même au niveau de l'environnement le cycle kalina l'emporte pour les raisons suivantes :

- ammoniac (produit naturelle)
- biodégradable
- Utilisation intensive comme engrais
- Neutraliser les polluants acides dans l'air.
- Les risques d'incendie et d'explosion sont très faibles.
- Réchauffement de la planète (GWP proche de zéro)
- le smog
- L'épuisement de la couche d'ozone (zéro ODP)
- Une efficacité : conserve
- Combustibles fossiles

IV.9 L'impact environnemental

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

IV.10 Le Coût

Toute conception de système pratique nécessite une prise en compte des coûts de mise en œuvre. Les fluides déjà utilisés dans la réfrigération ou dans l'industrie chimique sont plus faciles à obtenir et plus rentables. Les fluides à faible débit permettent des tailles d'équipement plus petites. Les fluides à faible débit peuvent être identifiés par leur température critique élevée, leur pression critique élevée et leur faible température d'ébullition. Pour des fluides similaires, une température critique plus élevée correspond à une chaleur latente plus importante. Ainsi, un fluide ayant des températures critiques élevées nécessitera typiquement un débit massique plus faible qu'un fluide ayant une température critique inférieure pour atteindre un débit de transfert de chaleur donné dans le fluide. De plus, une pression critique élevée P_{crit}

Pour un fluide correspond à une pression de saturation élevée à la température maximale. Les vapeurs à haute pression sont plus denses que les vapeurs à basse pression, de sorte que le même débit massique nécessite un débit volumique inférieur à celui d'un fluide à haute pression. Si la pression est trop élevée, les épaisseurs de paroi requises pour les tubes et l'équipement commenceront à faire augmenter les coûts. De plus, une température de bas point d'ébullition correspond à une pression élevée dans le condenseur, ce qui augmente la densité du fluide dans le condenseur et diminue le débit volumique. [17]

chapitre V : Conclusion

Dans cette étude, on a vu comment on récupère la chaleur et les systèmes utiliser, on a vu aussi la différence entre le cycle de kalina et le cycle de Rankine organique et les avantages et les inconvénients de chaque de ce cycle.

On a présenté les résultats obtenus par des graphes, chaque graphe représente le travail utile et le rendement de cycle. Chaque courbe représente la variation de travail utile et le rendement en fonction de la pression basse (P_{low}) et de la pression haute (P_{high}) on remarque que chaque paramètre influe sur le travail et rendement.

Dans la première partie on a vu que l'évolution de travail utile de chaque courbe et ont a remarqué que le travail utile de chaque courbe diminue avec l'augmentation de la pression d'une valeur maximal en début de pression a une valeur minimale en fin de cycle.

Quand on compare le travail utile chaque courbe on remarque que lorsque la pression basse augmente la valeur de ce dernier diminue.

Pour le rendement c'est exactement pareil il diminue avec l'augmentation de la pression basse jusqu'à une valeur minimal, sans oublier que la température de source chaude joue un grand rôle sur la valeur optimum de chaque courbe, plus la température est élevée, plus la valeur est grande.

C'est le cas contraire pour la pression haute des que cette dernière augmente le rendement et le travail augmente en parallèle avec celle-ci .

Dans la fin ont conclu que le travail utile ou la puissance produit par le cycle de kalina et le cycle ORC dépend de la pression totale du cycle,

En fin pour le cout on a vu que le fluide a haute pression sont la cause de la hausse des prix des équipement donc pour rentabiliser il faut utiliser des fluides a basse pression

Bibliographie :

- [1]. Ministère de l'environnement (2016), Volet 1 : Synthèse de la PPE (PDF, 25 pages) ; volet 2 : Volet relatif à l'offre d'énergie , (PDF, 83 pages) ; et volet 3 : Stratégie de développement de la mobilité propre
- [2] - www.wikipédia.org/wiki/source_d%27énergie
- [3]. Récupérer la chaleur des moteurs [archive], Jean-Philippe Bradly , Journal du CNRS, mars 2010 (archive seulement, consultée le 25 février 2019).
- [4]. Plus de 60 % de rendement pour une centrale électrique ! sur ddmagazine.com du 20 mai 2011, consulté le 5 juillet 2016.
- [5]. [PDF] L'énergie durable - pas que du vent ! par David JC MacKay lire p. 176 à 180 sur le site inference.phy.cam.ac.uk.
- [6]. HERZBERGER, W. MÜNCH, T. KÖLBEI and others, The Geothermal Power Plant Bruchsal in World Geothermal Congress. 2010. Bali, Indonesia.
- [7].]- Khaireh A., 2012: Cooling system design for a binary power plant in North-Goubhet field, Djibouti. Report 18 in: Geothermal training in Iceland 2012. UNU-GTP, Iceland, 371- 395
- [8]. ASHRAE, ASHRAE Handbook, Fundamentals, Chapter 17, p. 17.45 & p. 17.81.
ASHRAE, 1791 Tullie Circle, N.E.,Atlanta, GA 30329, 1993.
- [10]. W. H. Wisler, Energy Resources: Occurrence, Production, Conversion, Use: Springer, 1999.
- [11]. W. J. M. Rankine, A Manual of the Steam Engine and Other Prime Movers: RichardGriffin & Company, 1859.
- [12]. R. Beith, Small and Micro Combined Heat and Power (CHP) Systems: AdvancedDesign, Performance, Materials And Applications: Elsevier, 2011.
- [13]. O. Badr, S. D. Probert, and P. W. O'Callaghan, "Selecting a working fluid for a Rankinecycle engine," Applied Energy, vol. 21, pp. 1-42, 1985.
- [14]. A. Schuster, S. Karellas, and R. Aumann, "Efficiency optimization potential in supercritical organic Rankine cycles," Energy, vol. 35, pp. 1033-1039, 2010.
- [15].]. X.-R. Zhang and H. Yamaguchi, "An experimental investigation on characteristics of supercritical CO2-based solar Rankine system," International Journal of Energy Research, vol. 35, pp. 1168-1178, 2011

- [16]. L. Y. Bronicki, "Short Review of the Long History of ORC Power Systems," presented at the 2nd International Seminar on ORC Power Systems, Rotterdam, Netherland, 2013.
- [17]. S. Jumel, V. L. Le, M. Feidt, and A. Kheiri, "Working fluid selection and performance comparison of subcritical and supercritical Organic Rankine Cycle (ORC) for lowtemperature waste heat recovery," presented at the ECEEE Industrial Summer Study, Arnhem, Netherlands, 2012.
- [18]. Y. Chen, P. Lundqvist, A. Johansson, and P. Platell, "A comparative study of the carbon dioxide transcritical power cycle compared with an organic rankine cycle with R123 as working fluid in waste heat recovery," Applied Thermal Engineering, vol. 26, pp. 2142-2147, 2006.
- [19]. C. Vetter, H.-J. Wiemer, and D. Kuhn, "Comparison of sub- and supercritical Organic Rankine Cycles for power generation from low-temperature/low-enthalpy geothermal wells, considering specific net power output and efficiency," Applied Thermal Engineering, vol. 51, pp. 871-879, March 2013.
- [20]. Sustainable Energy Reviews 16 (2012)5309-531
- [21]. EXERGY Inc., Ebara and Exergy team to build first Kalina Cycle Power Plant, in Business Wire.4th February 1997: Hayward, California
- [22]. SUMITOMO METAL INDUSTRIES, Ltd. Kalina Cycle Generating System.
- [23]. H. A. MLCAK, M. MIRALLI, H. HJARTARSON, M. RALPH, Notes from the North:
a Report on the Debut Year of the 2 MW Kalina Cycle® Geothermal Power Plant in Húsavík, Iceland. 2002.
- [24]. GLOBAL GEOTHERMAL Ltd., The Kalina Cycle®: The New Advantage in Thermal Conversion.May 2009.
- [25]. BINE informationdienst, Geothermal electricity generation combined with a heating network.October 2009.
- [26]. HERZBERGER, W. MÜNCH, T. KÖLBEI and others, The Geothermal Power Plant Bruchsal in World Geothermal Congress. 2010. Bali, Indonesia.
- [27].]- <https://www.slideshare.net/SaiKiran597/kalina-cycle-74444094>.