

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
ENERGETIQUE

Thème

Production de puissance par récupération de chaleur par l'intermédiaire
De cycle de Goswami

Proposé et encadré par :
Pr.BOUSSAD BOUMEDANE

Réalisé par :
ZAROOUR FARIS
BOUADJAB MOHAMED AMINE

Année universitaire 2018/2019

Remerciements

Nous tenons par cette occasion à présenter nos vifs remerciements à tous ceux qui ont collaboré de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

C'est d'abord grâce à dieu qui nous a donné la force et le courage durant toutes nos années d'études pour arriver à ce jour.

Nous remercions, en premier lieu, notre encadreur professeur respecté BOUSSAD BOUMEDDANE pour leurs soins exceptionnels et conseils judicieux.

A nos mères et nos pères, on leurs dis merci pour tout, car sans vous on ne serait pas ici aujourd'hui.

Ainsi qu'à tous nos professeurs qui nous ont enseignés durant nos années d'études à la faculté de technologie de BLIDA1.

À la fin, on tient à remercier tous nos camarades d'étude, en particulier ceux de notre promotion.

ملخص:

يتمحور هذا المشروع حول استرجاع الحرارة الضائعة ودورات الديناميكية الحرارية وبالتحديد دورة **goswami** التي تعمل بسائل عملي ألا و هو **H2ONH3** وقمنا بدراسة الدورة باستعمال البرنامج **EES** الذي اظهر هذا الأخير أن المردود الذي يقدمه مغزي بالنسبة لدورات اخرى .
كلمات المفتاح : "**H2ONH3**" غاز الامونيا , **EES** " حل المعادلة الهندسية"

Résumé :

Le projet porte sur la récupération de la chaleur perdue et des cycles thermodynamiques ainsi que sur la détermination du cycle de goswami dont le fluide de travail est H2ONH3, suivi du programme EES, qui nous a montré que le rendement est très bon pour d'autres cycles.

Mots clés : " ammoniac "**H2ONH3**" Solveur d'équations d'ingénierie " **EES** "

Abstract:

The project focuses on the recovery of lost heat and thermodynamic cycles as well as the Determination of the goswami cycle whose working fluid is H2ONH3, followed by the EES Program, which showed us that the yield is very good for others cycles.

Keywords: "Ammonia", '**H2ONH3**', " Engineering Equation Solver ", '**EES**'.

Nomenclature

Paramètres	Unité
m_i : Débit massique de fluide (mélange ammoniac-eau)	Kg/s
x_i : fraction de l'ammoniac dans le mélange	/
P_i : la pression de fluide ou vapeur	bars
h_1 : Enthalpie du fluide organique à l'entrée de la pompe	KJ / kg
h_2 : Enthalpie du fluide organique à la sortie de la pompe	KJ / kg
h_{2s} : Enthalpie du fluide de travail en supposant un processus isentropique	KJ / kg
W_{pompe} : Travail de la pompe d'alimentation	KW
η_p : Efficacité de la pompe isentropique.	/
h_3 : Enthalpie du fluide géothermique entrant dans la chaudière	KJ / kg
h_4 : Enthalpie du fluide géothermique sortant de la chaudière	KJ / kg
$Q_{choudier}$: la quantité de chaleur échangée	KW
h_5 : Enthalpie du vapeur géothermique sortant dans le séparateur	KJ / kg
h_9 : Enthalpie du fluide géothermique sortant dans le séparateur	KJ / kg
$Q_{redesseuse}$: la quantité de chaleur redresseuse	KW
h_6 : Enthalpie du vapeur organique à l'entrée de la turbine	KJ / kg
h_7 : Enthalpie du vapeur organique à la sortie de la turbine	KJ / kg
h_{7s} : Enthalpie du vapeur organique à la sortie de la turbine en supposant une expansion isentropique	KJ / kg
η_{th} : Rendement de turbine	/
$W_{turbine}$: Puissance produite par la turbine	KW
h_8 : Enthalpie du vapeur organique à la sortie échangeur de chaleur de réfrigération	KJ / kg
$Q_{réfrigération}$: la quantité de chaleur réfrigérée	KW
h_9 : Enthalpie du fluide organique à l'entrée de l'échangeur de chaleur de récupération	KJ / kg
h_{10} : Enthalpie du fluide organique à la sortie de l'échangeur de chaleur de récupération	KJ / kg
h_{11} : Enthalpie du fluide organique à l'entrée de absorbeur	KJ / kg
$Q_{absorbeur}$: la quantité de chaleur absorbée	KW
W_{utile} : le travaille utile de cycle	KW

V- Liste des Figures

Chapitre 1

Figure 1.1. Les normes d'utilisation ou de commercialisation de la chaleur fatale	4
Figure 1.2. La récupération et la valorisation de chaleur	5
Figure 1.3. Consommation énergétique mondiale de diverses sources d'EnR de 1965 à 2020	7
Figure 1.4. La technique de cogénération.....	9
Figure 1.5. Les Schéma synoptique d'un système de cogénération	10

Chapitre 2

Figure 2.1. Processus schématique du cycle de Kalin.....	17
Figure 2.2. Les différents cycles de kalina	19
Figure 2.3. C Le Schéma de principe de l'ORC	20
Figure 2.4. Le Schéma T-s de l'ORC	21
Figure 2.5. La session du système ORC	22
Figure 2.6. Le Système ORC	23
Figure 2.7. Configuration de base du cycle combiné d'alimentation et de refroidissement.....	25
Figure 2.8. Répartition des références ORC par pays en 2009	27
Figure 2.9. Nombre de références dans le monde en fonction de la source de chaleur en 2009	28

Chapitre 3

Figure 3.1. Description schématique du cycle de Goswami avec refroidissement interne	32
Figure 3.2. Diagramme d'équilibre phase ammoniac-eau	34
Figure 3.3. Représente la pump	37
Figure 3.4. Représente échangeur de chaleur de récupération	37
Figure 3.5. Représente la chaudière	38
Figure 3.6. La Représente le redresseur et séparateur	39
Figure 3.7. La Représente la surchauffeur	40
Figure 3.8. La Représente la turbine	40
Figure 3.9. Le Réfrigération Échangeur de chaleur	41
Figure 3.10. Représente la Absorbeur	42
Figure 3.11. Représente le Vanne d'étranglement	43
Figure 3.12. L'influence de la fraction et la température sur le travail total	48
Figure 3.13. L'influence de la fraction et la température sur le rendement de cycle	49
Figure 3.14. Le travail total en fonction de la pression et la température	51

VI- Liste des tableaux

Chapitre 2

Tableau 2.1. Processus de fonctionnement du système ORC.....	23
--	----

Chapitre 3

Tableau 3.1. LES Caractéristiques de l'ammoniac.....	36
Tableau 3.2. Les paramètres du cycle de Goswami.....	46
Tableau 3.3. Les performances du cycle de Goswami.....	46
Tableau 3.4. La comparaison du travail totale maximum avec la température	47
Tableau 3.5. La comparaison du rendement de cycle maximal de chaque température	49
Tableau 3.6. La comparaison du travaille de cycle maximal de chaque température chaque température	50

Table des matières

Remerciements.....	I
Résumés	II
NOMENCLATURE	III
Liste des figures.....	V
Liste des tableaux	VI
Introduction Générale.....	1

Chapitre 1: L'état de l'art du cycle thermodynamique

1.1 Introduction	2
1.2 Les Sources énergétiques	2
1.2.1 Les différentes sources d'énergie	2
1.3 La récupération de la chaleur	3
1.3.1 Récupération et valorisation de la chaleur fatale.....	3
1.3.2 Récupération de la chaleur	5
1.3.3 Les sources de chaleur récupérable	5
1.4 La consommation d'énergie.....	6
1.5 Système de récupération de chaleur à l'échappement.....	7
1.5.1 Les déperditions thermiques d'un moteur à combustion interne.....	7
1.5.2 Les déperditions dans un pot d'échappement	8

1.6	Cycle combiné	8
1.7	La cogénération	8
1.7.1	Principe de la cogénération	9
1.7.2	Technologies	10
1.8	Conclusion.....	14

Chapitre 2: Les Cycles Kalina, Organic Rankine et Goswami

2.1	Introduction	15
2.1.1	Cycle thermodynamique	16
2.1.2	Cycles d'alimentations.....	16
2.2	Cycle kalina.....	16
2.2.1	Différents cycles kalina.....	18
2.2.2	Principe de fonctionnement d'un cycle de kalina.....	19
2.3	Cycle de organic rankine.....	20
2.3.1	Le principe de fonctionnement.....	21
2.3.2	La conception du système ORC	22
2.3.3	Sélection de fluide de travail du système ORC.....	24
2.3.4	Applications des cycles ORC	24
2.4	Cycle de goswami.....	24
2.4.1	Consommation d'eau.....	26

2.4.2	Comparaison entre le cycle de kalina et le cycle de rankine organique	26
2.5	Développement des ORC.....	26
2.6	Conclusion.....	28

Chapitre 3 : Réalisation Pratique

3.1	Introduction	30
3.2	Cycle de goswami.....	30
3.3	Description du cycle	31
3.3.1	Fluid de travail	33
3.3.2	NH ₃ H ₂ O (Ammonia-Water).....	34
3.4	L'Études paramétriques du cycle de goswami	36
3.4.1	La pompe d'alimentation	36
3.4.2	Échangeur de chaleur de récupération	37
3.4.3	La chaudière.....	38
3.4.4	Rectifier et séparateur.....	38
3.4.5	Surchauffeur	39
3.4.6	La turbine.....	40
3.4.7	Réfrigération Échangeur de chaleur.....	41
3.4.8	Absorbeur	42
3.4.9	Vanne d'étranglement.....	42

3.4.10	Conservation de masse	43
3.5	Les études numériques faite par logiciel EES	45
3.5.1	Discuter les résultats obtenus.....	51
3.6	Conclusion.....	52
Conclusion Générale.....		53
Références Bibliographiques		54

Introduction Générale

Dans le monde industriel et spécialement dans le secteur de l'énergie. On doit souvent trouver une solution ou une méthode pour récupérer la chaleur perdue ou dégagée. D'après une source de chaleur à température variable comme les gaz de combustion, les machines thermiques et les turbines. Dans ces moments on effectue quelques procédures pour récupérer cette chaleur et la transformer pour la réutiliser dans la production de la puissance.

Aujourd'hui, plus de 85% d'énergie utilisée dans le monde provient de gisement de combustible fossile (charbon, pétrole, gaz) ou d'uranium, constitués au fil des âges et de l'évolution géologique.

Dans ce même contexte et dans le cadre de notre projet de fin d'études, nous proposons une solution efficace pour la production de l'énergie électrique, ainsi nous expliquons la majeure partie du cycle thermodynamique actuellement utilisé dans les centrales électriques.

Le travail présenté dans ce mémoire est consacré à étudier et à appliquer le cycle Goswami, ce qui sera développé à partir du logiciel Engineering Equation Solver **EES** dans le but d'améliorer le rendement du cycle thermodynamique (Goswami).

Notre mémoire est divisé en trois chapitres essentiels qui sont présentés successivement comme suit :

- ✓ Le premier chapitre est consacré à l'état de l'art du cycle thermodynamique
- ✓ Le deuxième chapitre est pour Cycle Kalina, Organic Rankine, et Goswami
- ✓ Le troisième chapitre étalera alors la partie pratique de notre projet.
- ✓ Une conclusion générale viendra alors clôturer ce mémoire.

Chapitre 1

L'état de l'art du cycle thermodynamique

1.1 Introduction

La chaleur de récupération, ou chaleur fatale, est la chaleur générée par un procédé qui n'en constitue pas la finalité première, et qui n'est pas récupérée. [Réf. 1].

La chaleur fatale peut être réutilisée directement, ou après concentration (et/ou) stockage, pour améliorer un processus (préchauffage de gaz), chauffer un lieu ou des objets, refroidir (via un évaporateur ou un autre système) ou produire de l'électricité (via une machine à cycle organique de Rankine). Il s'agit généralement d'améliorer à la fois l'efficacité énergétique et l'efficacité environnementale d'un système impliquant une production de chaleur [Réf. 2].

1.2 Les Sources énergétiques

L'énergie est omniprésente et même s'il est possible de réduire sa consommation, elle est nécessaire pour toute activité en lien avec, la mobilité, le logement, l'industrie, ou l'agriculture. L'énergie est fournie à partir **de sources énergétiques primaires** telles que le soleil, l'éolien, l'hydro-énergie, la biomasse, le charbon, le pétrole, le gaz ou encore l'uranium. Pour faciliter son utilisation, l'énergie primaire est transformée en énergie secondaire. Elle s'accompagne généralement de déperditions sous forme de chaleur et d'une pollution atmosphérique.

Dans le monde, 80% des sources d'énergie utilisées proviennent de ressources fossiles. Aujourd'hui, les énergies fossiles sont facilement utilisables et leurs usages sont relativement flexibles.

1.2.1 Les différentes sources d'énergie

- **Les sources primaires**
 - Hydrocarbures
 - Uranium
 - charbon
 - Rayonnement solaire
 - Force hydraulique
 - Énergie géothermique
 - Vent
 - Biomasse et déchets

- Pétrole
- Gaz naturel
- **Les sources secondaires**
 - Centrale nucléaire
 - Centrale thermique à flamme
 - Centrale solaire thermique à concentration
 - Centrale géothermique
 - Énergie éolienne
 - Énergie solaire photovoltaïque
 - Énergie hydroélectrique
 - Cogénération

1.3 La récupération de la chaleur

1.3.1 Récupération et valorisation de la chaleur fatale

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. Récemment, un décret portant sur la valorisation **d'énergie fatale** montre l'engagement des pouvoirs publics sur la démarche de l'efficacité énergétique et de la valorisation de **l'énergie fatale**.

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. Selon le décret n°1014-1363 du 16 novembre 2014. En 2015, l'ADEME estime dans l'industrie française, un gisement à 51 TWh de **chaleur fatale**, soit environ 16% de l'énergie fossile consommée par l'industrie (ADEME) Ce gisement se concentre dans quatre grands secteurs d'activité, la chimie, les matériaux, l'agroalimentaire et les métaux. Toutefois, il faut savoir que la chaleur fatale ne se retrouve pas seulement dans l'industrie.

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 centres de données. . [Réf. 3].

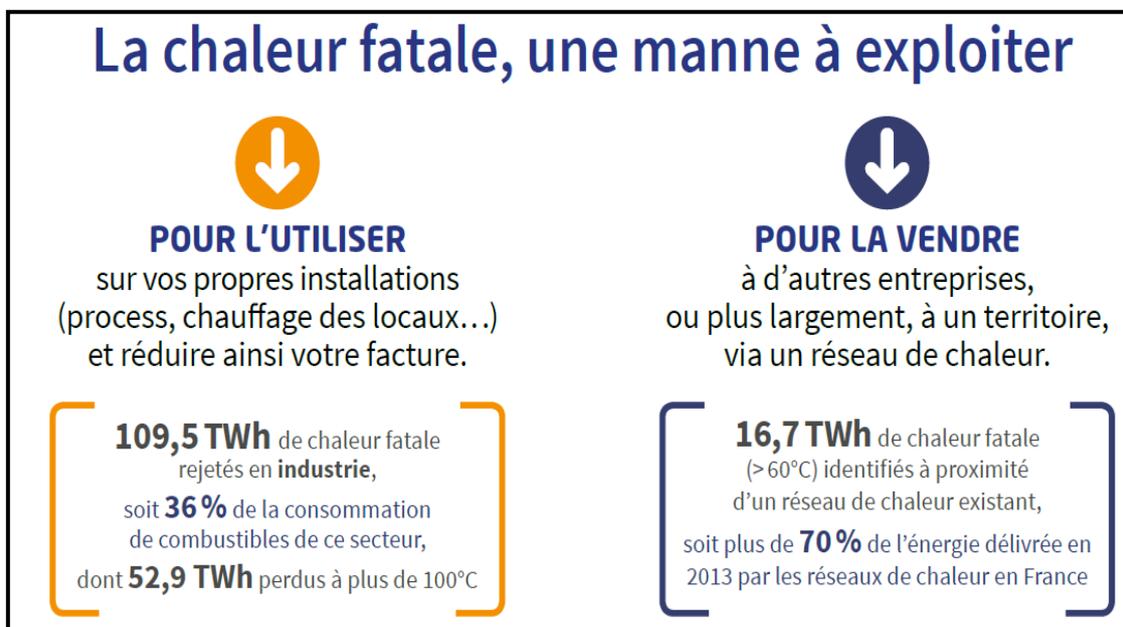


Figure 1.1. Les normes d'utilisation ou de commercialisation de la chaleur fatale

L'industrie est ainsi le troisième secteur le plus consommateur d'énergie, derrière le secteur résidentiel et les transports, avec une consommation de 32,7 Mtep (hors usage en matière première) sur un total national de 149 Mtep en 2015.

La chaleur perdue (ou chaleur fatale) à plus de 100 °C représente un gisement de 52,9 TWh dans le secteur industriel en France.

La valorisation de cette chaleur fatale, une énergie disponible et déjà payée, constitue un enjeu stratégique pour l'industrie. Elle permet d'augmenter les performances énergétiques des procédés et des sites, et de réduire les impacts environnementaux qui leurs sont associés.

De plus, cela répond au contexte réglementaire et aux mesures politiques prises ces dernières années en matière d'efficacité énergétique (audit réglementaire, étude de valorisation de la chaleur fatale imposée aux installations classées ICPE de plus de 20 MW, etc.).

Des études préalables permettent de définir au mieux un projet : de l'état des lieux à l'étude de faisabilité. Par ailleurs, des technologies performantes ont vu le jour, portées par

une innovation permanente, et donnent la possibilité d'adapter les solutions de valorisation de la chaleur aux différentes configurations d'un industriel.

Afin d'accompagner les entreprises face à cet enjeu, de nombreux dispositifs d'aides ont également été mis en place au niveau national ou régional. Hors secteur de l'énergie (raffineries...), mais comprenant les cokeries intégrées à la sidérurgie. [Réf. 4].

1.3.2 Récupération de la chaleur

L'industrie représente 22 % de l'énergie finale consommée en France en 2015, et constitue l'un des domaines d'activité les plus émetteurs de gaz à effet de serre avec 18 % des émissions en 2013.

1.3.3 Les sources de chaleur récupérable

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. Le schéma ci-dessous présente les différents équipements sur lesquels la chaleur peut être récupérée.

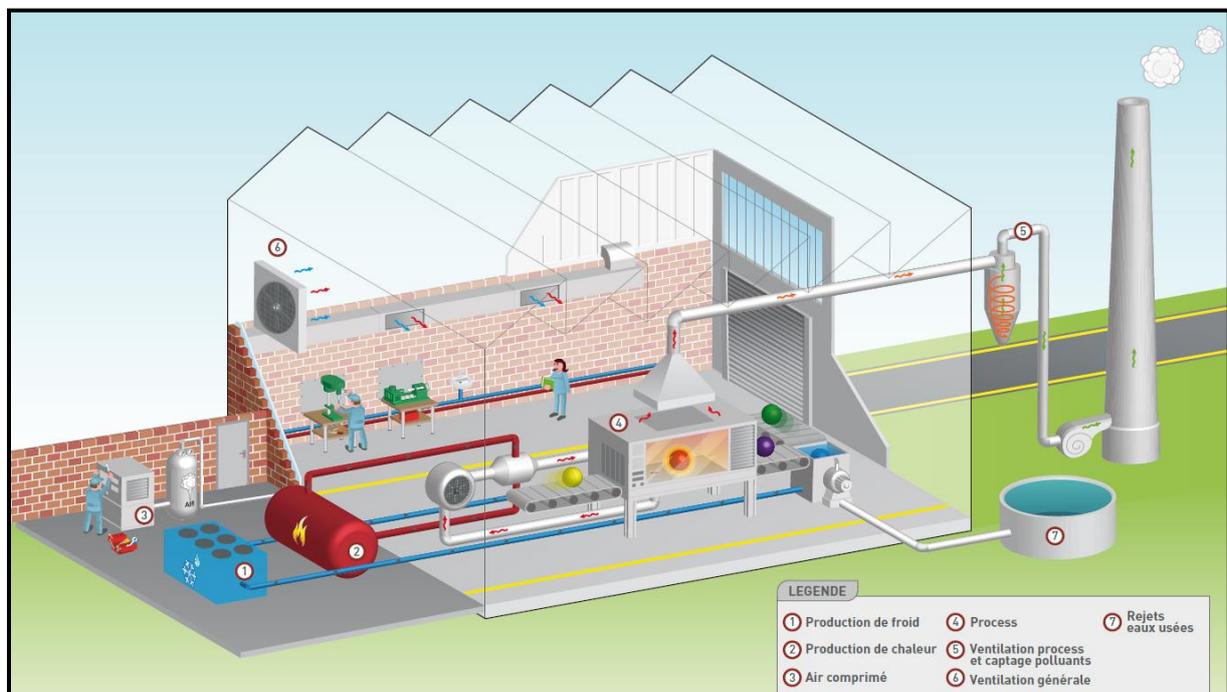


Figure 1.2. La récupération et la valorisation de chaleur.

- **Le premier critère de qualification d'un rejet thermique est sa nature**
 - liquide (eaux usées, purges de chaudières, etc.).
 - gazeux (fumées, air chaud, etc.).
 - diffus (pertes par les parois, fuites sur les réseaux, etc.).

Le captage de ces rejets est plus ou moins facile : par exemple, les rejets liquides dans les purges de chaudières sont les plus facilement récupérables, suivis des rejets gazeux dans les fumées des fours et chaudières. Les rejets diffus sont logiquement plus difficiles à capter.

1.4 La consommation d'énergie

Depuis la révolution industrielle, la consommation d'énergie n'a cessé d'augmenter. Elle a progressé de 105 % en 43 ans, de 1973 à 2016 (consommation finale). La consommation finale énergétique mondiale s'élevait en 2016, selon l'Agence internationale de l'énergie, à 9 555 Mtep, dont 19 % sous forme d'électricité ; depuis 1990, elle a progressé un peu plus vite que la population, mais sa répartition par source d'énergie n'a guère évolué : la part des énergies fossiles a reculé de 0,5 points, mais leur domination reste massive : 81,7 % ; la part des énergies renouvelables (EnR) n'a progressé que de 0,9 points, passant de 15,5 % en 1990 à 16,4 % en 2016, car le recul de la part de la biomasse compense en partie la progression des autres EnR. Sa répartition par Secteur était : industrie 29 %, transports 29 %, résidentiel 22 %, tertiaire 8 %, agriculture et pêche 2 %, usages non énergétiques (chimie, etc.) 9 %.[Réf.5].

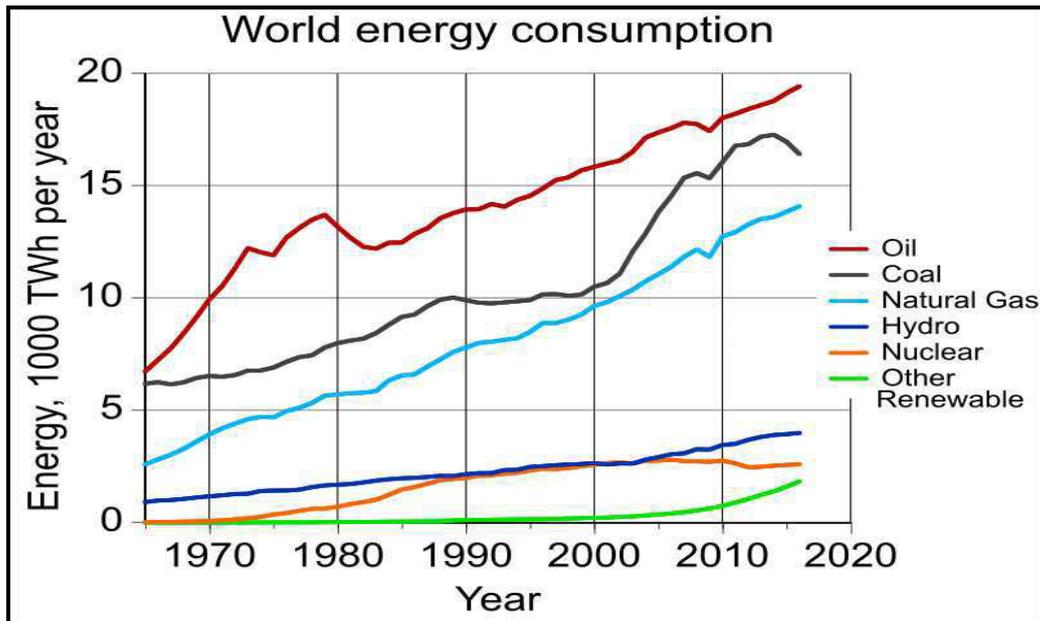


Figure 1.3. Consommation énergétique mondiale de diverses sources d'EnR de 1965 à 2020.

1.5 Système de récupération de chaleur à l'échappement

Un système de récupération de chaleur à l'échappement est un dispositif qui récupère une partie des pertes thermiques du pot d'échappement pour les transformer en énergie. Cette technologie semble susciter un intérêt grandissant chez les constructeurs automobiles et de poids lourds, qui sont de plus en plus contraints légalement et économiquement de réduire la consommation des véhicules et leurs rejets en CO₂. [Réf. 6].

Ce dispositif peut être utilisé sur un véhicule hybride ou conventionnel ; il permet de produire de l'énergie électrique à destination des batteries d'un véhicule, ou de l'énergie mécanique qui est réinjectée sur le vilebrequin. [Réf. 7].

1.5.1 Les déperditions thermiques d'un moteur à combustion interne

Si les moteurs actuels consomment toujours moins que leurs aînés, le rendement thermique de ceux-ci n'a guère changé depuis la création du moteur à combustion interne. En effet, le rendement optimal d'un moteur est d'environ 35 %, ce qui signifie que 65 % de l'énergie issue du carburant est perdue sous forme de chaleur : 35 % au niveau des gaz d'échappement et 30 % via le système de refroidissement.

1.5.2 Les déperditions dans un pot d'échappement

À l'intérieur d'un pot d'échappement d'un moteur à combustion interne, les pertes d'énergie sont de différentes natures : thermiques, cinétiques, chimiques et de chaleur latente. Les quantités d'énergie les plus importantes se situent dans les pertes thermiques et cinétiques, les deux autres étant négligeables. Les pertes d'énergies cinétiques peuvent être récupérées par l'intermédiaire de turbo compresseur ou encore de turbo-compound.

1.6 Cycle combiné

On peut aussi combiner turbine à vapeur et turbine à gaz. Comme indiqué précédemment, la turbine à gaz peut produire de la vapeur à travers une chaudière de récupération, avec ou sans combustion. Cette vapeur peut aussi entraîner une turbine à vapeur au lieu d'être employée directement avec un alternateur placé sur l'axe de la turbine à vapeur, on peut ainsi produire un complément d'électricité. La production de chaleur peut être issue de la vapeur générée à la sortie de la turbine. De telles configurations permettent un haut rendement électrique, ce qui se traduit par un rendement thermique plus faible.

1.7 La cogénération

La cogénération est la production simultanée de deux formes d'énergie différentes dans la même centrale. Le cas le plus fréquent est la production d'électricité et de chaleur utile, la chaleur étant issue de la production électrique¹. Plus généralement, un cogénérateur valorise une forme d'énergie habituellement considérée comme un déchet et inexploitée.

La cogénération est une technique efficace d'utilisation des énergies fossiles et renouvelables, qui valorise une énergie généralement rejetée dans l'environnement, comme la chaleur. [Réf. 8].

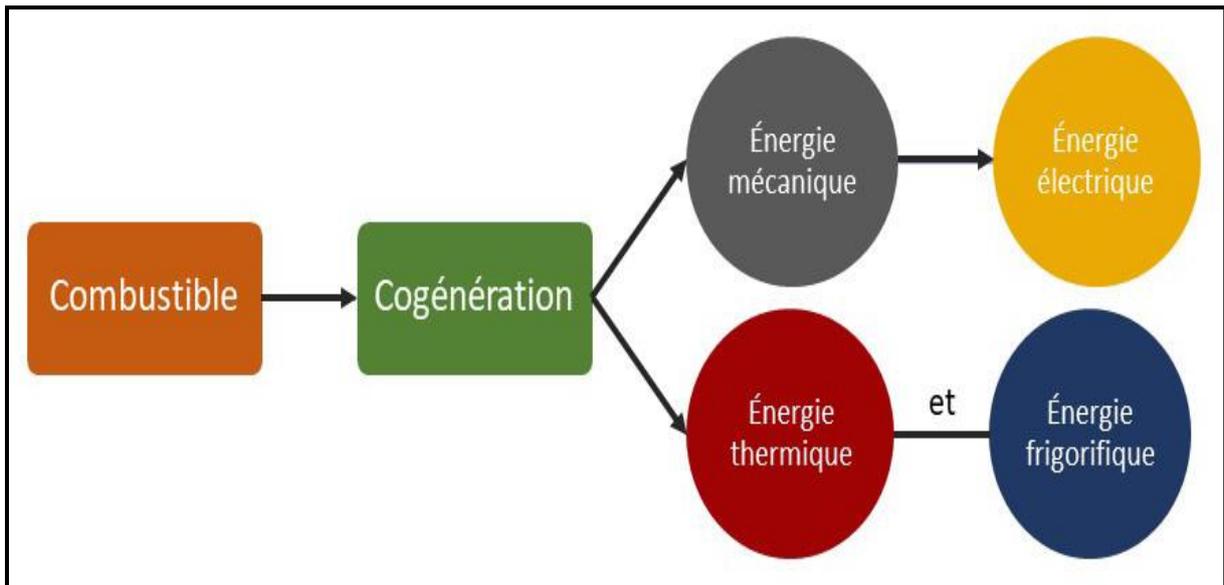


Figure 1.4.La technique de cogénération.

1.7.1 Principe de la cogénération

L'idée de cogénération repose sur le fait que la production électrique dégage une grande énergie thermique à température moyenne, habituellement dissipée dans l'environnement. En réponse à une demande thermique (chauffage, eau chaude sanitaire, processus industriel, etc.), elle propose de valoriser la chaleur du cycle de génération électrique comme source thermique.

Pour l'illustrer dans la pratique, dans un cas de besoin simultané d'électricité et de chaleur, une configuration classique pourrait être une turbine à gaz (productions d'électricité) et une chaudière à gaz naturel (production de chaleur) séparées, une configuration de cogénération serait une turbine à gaz couplée à un récupérateur de chaleur alimenté par les gaz d'échappement (productions d'électricité et de chaleur cogénérées). Alors que dans une centrale électrique, c'est le rendement électrique maximum qui est recherché (rendement électrique de l'ordre de 40 % avec un cycle simple et atteignant 58 % avec un cycle combiné), dans la cogénération, on vise un rendement global accru par l'utilisation prioritaire de l'énergie thermique, soit dans un processus industriel, soit dans une chaufferie, la cogénération d'électricité (ou de force) n'est plus dans ce cas le but mais une conséquence, améliorant le bilan économique de l'équipement dont le rendement global peut alors atteindre en moyenne 85-90 %, voire plus de 95 % (du pouvoir calorifique inférieur du gaz), avec une micro-

cogénération gaz utilisant un moteur Stirling couplé à un récupérateur de chaleur à condensation

Dans un équipement de cogénération, l'énergie électrique est soit auto-consommée, soit réinjectée sur le réseau électrique public de transport (haute tension) ou de distribution (moyenne ou basse tensions) (en France, RTE, ENEDIS ou les entreprises locales de distribution d'électricité), suivant des conditions économiques fixées par les pouvoirs publics (dans le cadre des tarifs d'achat) ou suivant les conditions de marché de l'électricité (prix spots).

L'énergie thermique sert le plus souvent au chauffage de bâtiments, à la production d'eau chaude sanitaire et/ou à des procédés industriels (vapeur moyenne ou haute pressions, mettant en œuvre dans ce cas des turbines à vapeur).

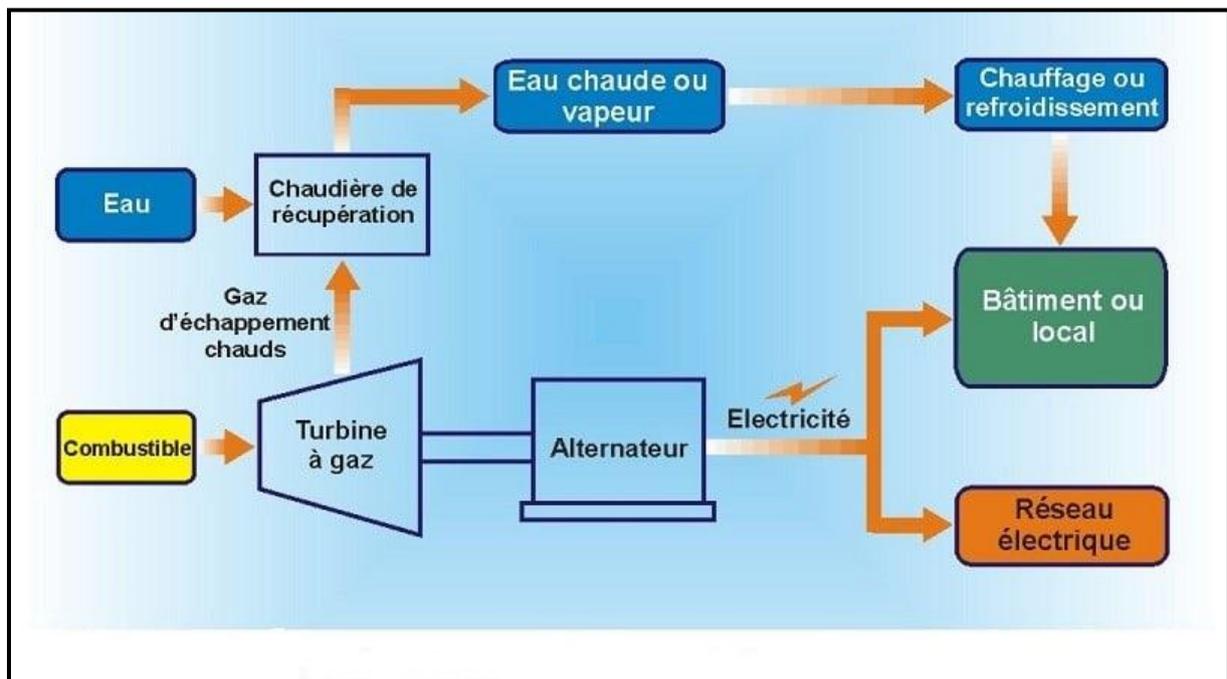


Figure 1.5. Schéma synoptique d'un système de cogénération.

1.7.2 Technologies

- **L'Énergie primaire**

L'énergie primaire est l'énergie contenue dans un combustible utilisable dans les moteurs et les turbines : essence, fioul, bois, gaz, biogaz, gaz **fatal** produit par certaines industries (souvent détruit, par exemple gaz des torchères industrielles chimiques et pétrolières), hydrogène, etc.

- **Production d'électricité**

L'électricité est produite par la conversion de l'énergie mécanique d'un moteur ou d'une turbine, au travers d'un alternateur, comme un groupe électrogène. Elle peut également être directement produite par une pile à combustible. Selon la puissance concernée, l'électricité est produite à une tension allant de 220-230 V (application domestique en Europe), à 400 V (réseau basse tension triphasé) voire 15 kV ou plus sur certaines très grosses unités à cycle combiné, suivant les besoins, la tension électrique sera éventuellement élevée au travers d'un transformateur.

- **Production d'énergie thermique**

Un moteur possède un rendement thermique d'environ 40 à 45 % ; une turbine, un rendement thermique d'environ 35 à 40 %, et celui d'une pile à combustible se situe aux alentours de 40 à 60 % (sans compter le rendement de la production d'hydrogène ; le rendement global, dans le cas de la production d'hydrogène par électrolyse, est de l'ordre de 20 %). La quasi-totalité du solde de l'énergie consommée est transformée en chaleur.

La cogénération consiste à récupérer au mieux l'énergie perdue, afin de l'exploiter pour atteindre un rendement global pouvant aller jusqu'à 80-90 %. Ceci implique une production locale par de petites unités. En effet une production électrique de par exemple 1 GW implique la dissipation d'environ 2 GW de chaleur. C'est la puissance permettant théoriquement de chauffer, soit 57 000 logements de 100 m² construits avant 1975, soit 100 000 logements plus récents de même surface. En pratique, comme la chaleur se transporte beaucoup moins bien que l'électricité, elle est souvent considérée comme un déchet industriel. Lorsque, grâce à la cogénération, cette option peut être évitée, les principaux moyens d'utilisation de cette énergie sont la production d'air chaud, d'eau chaude et/ou de vapeur.

Dans le cas de turbine à gaz comme de moteurs à combustion, il est possible de récupérer une partie de la chaleur en sortie sous forme de vapeur haute pression et température. L'utilisation de cette vapeur au travers d'une turbine à vapeur permet d'accroître fortement la production électrique de l'ensemble et atteindre un rendement électrique de l'ordre de 55 %. Cette technique de production électrique s'appelle le cycle combiné. Elle sert en France de référence pour le calcul des tarifs de revente à EDF de la production électrique des cogénérations. Ces tarifs de revente dépendent aussi de nombreux autres critères et sont définis en France par un arrêté régulièrement mis à jour. Ces techniques de récupération sont

valables s'il y a localement un besoin important de chaleur et d'électricité (à proximité de ville ou de grosse industrie).

- **Cogénération d'électricité par moteur**

Les moteurs de cogénération sont disponibles dans une gamme de puissance allant de quelques dizaines de kW à environ 3 MW. Ce sont donc surtout les petites installations et les applications domestiques qui sont concernées par ce type de technologie. Leurs rendements électriques se situent généralement entre 30 et 40 %. Un moteur produit à peu près une part égale à 2 moteurs à production d'énergie thermique.

- une énergie "basse température" (environ 95 °C), récupérée sur les huiles et les eaux de refroidissement
- une énergie "haute température" (environ 450 °C), sur les gaz d'échappement

L'utilisation pratique de cette chaleur n'est pas simple, du fait notamment des différents niveaux de température. En plus, la chaleur est disponible à des températures assez basses, avec comme conséquence que la chaleur est généralement produite sous forme d'eau chaude. La production de vapeur n'est cependant pas exclue pour des moteurs, mais limite la transmission de chaleur, car le pouvoir calorifique de la vapeur d'eau est inférieur à celui de l'eau liquide (moins de molécules d'eau).

La forte proportion d'énergie basse température implique, pour obtenir un bon rendement, d'avoir à proximité une utilisation sous forme d'air ou d'eau chaude, tels que par exemple des réseaux de chauffage urbain ou industriel. En cas de surplus de chaleur, celle-ci peut être évacuée par des tours de réfrigération, qui dissipent la chaleur directement dans l'atmosphère. Mais cette solution n'est pas très respectueuse de l'environnement. Une alternative consiste à stocker le surplus de chaleur pour pouvoir le redistribuer plus tard selon les besoins, par exemple par hydro-accumulation.

Les moteurs de petite puissance sont jusqu'à présent peu rentables (notamment pour un usage domestique ou dans les petites ou moyennes entreprises (PME), leur coût d'achat et d'entretien ne permettant pas souvent de rentabiliser de tels investissements. La hausse continue du coût des énergies primaires pourrait changer les choses à moyen terme.

- **Cogénération par turbine à combustion**

Les turbines à combustion sont disponibles dans une gamme de puissance allant de quelques dizaines de kW à plusieurs dizaines de MW. Leur rendement électrique varie entre 25 et 40 % en fonction de la puissance. Traditionnellement, le terme turbine à gaz n'indique pas uniquement la turbine d'expansion, mais l'ensemble compresseur - chambre de combustion - turbine.

Le processus thermodynamique d'une turbine à gaz est caractérisé par le cycle de Brayton. De l'air atmosphérique est aspiré et comprimé par un compresseur. Dans la chambre de combustion, un combustible est injecté dans de l'air comprimé et est brûlé. Les gaz de combustion chauds et à haute pression sont détendus dans une turbine qui fournit un travail mécanique. Ce travail est transformé en énergie électrique à l'aide d'un alternateur. À l'échappement, les gaz contiennent toujours beaucoup de chaleur. Ils sont donc dirigés vers une chaudière de récupération, où leur énergie thermique sera transmise à un fluide caloporteur (généralement de l'eau).

Les turbines produisent la plus grosse part de l'énergie thermique (hors pertes par rayonnement) sous forme d'un gaz d'échappement à environ 500 °C. Le gaz d'échappement peut être injecté directement dans une chaudière ou dans un four industriel, comme s'il s'agissait de gaz produit par un brûleur classique. Lorsque ce gaz vient en appoint d'un brûleur, le complément d'énergie apporté est entièrement consommé par le système utilisateur, le rendement de récupération sur l'échappement de la turbine est alors quasiment de 100 %.

Ce gaz contenant encore une forte proportion d'oxygène, il est possible selon les besoins de réaliser une "post-combustion" de ce gaz, en y injectant un supplément de combustible en aval de la turbine, afin d'élever sa température jusqu'à parfois 900 °C.

Les turbines permettent ainsi de produire de la vapeur à très haute température, qui peut être utilisée industriellement, ou dans l'optique d'un cycle combiné. L'utilisation de la "post-combustion" étant indépendante du fonctionnement de la turbine, cela permet d'assurer le plein régime à la turbine du point de vue électrique, et de moduler la post-combustion selon les besoins thermiques de l'utilisateur.

Les micro-turbines de quelques dizaines de kW, de même que pour les petits moteurs, ne trouveront leur plein essor qu'avec l'augmentation du coût des énergies primaires.

- **Cogénération par turbine à vapeur**

La cogénération par turbine à vapeur permet la production simultanée d'énergie électrique et d'énergie thermique, et permet d'atteindre des rendements globaux qui peuvent dépasser 90 %. La production électrique est assurée par une turbine à vapeur alimentée par de la vapeur haute pression (jusqu'à 130 bar) et haute température (plus de 500 °C), ladite vapeur étant détendue et refroidie dans la turbine jusqu'à des températures compatibles avec le besoin thermique d'un utilisateur de chaleur. Il peut s'agir d'une industrie, d'un réseau de chaleur, mais aussi de serres agricoles ou de toute autre application (ex : séchoir). Les puissances de ce type d'installation vont de 5 MW thermiques jusqu'à plus de 1 000 MW, avec des rendements électriques moyens de 25 %, mais qui peuvent dépasser 30 % si la chaleur peut être livrée avec des températures inférieures à 50 °C. La cogénération par turbine à vapeur est la solution la plus courante lorsque la biomasse est utilisée comme énergie primaire, permettant d'atteindre les rendements globaux les plus élevés.

La cogénération par turbine à vapeur permet d'utiliser des sources d'énergie primaires variées, dont entre autres les sources d'énergie diverses issues de la valorisation des déchets de l'industrie, tels que les déchets de bois dans les scieries, où les déchets végétaux de l'agriculture.

Le cycle thermodynamique des turbines à vapeur est basé sur le cycle de Rankine. À l'aide de la chaleur dégagée par la combustion d'un combustible, on produit de la vapeur à haute pression dans une chaudière. Cette vapeur est ensuite dirigée vers une turbine, où, en se détendant, la fait tourner très rapidement. A la sortie de la turbine, la vapeur est condensée avant d'être ramenée à la chaudière, où ce cycle recommence. Dans ce cycle, la combustion est externe : c'est-à-dire qu'il n'y a pas de contact direct entre le fluide caloporteur (vapeur) et le foyer. Ainsi le combustible ne requiert pas de qualités spécifiques précises et donc tout combustible peut être employé.

1.8 Conclusion

La récupération de chaleur ne doit pas se faire au détriment des performances des compresseurs. Il est souvent plus profitable d'optimiser la pression de condensation

Chapitre 2

Les Cycles Kalina, Organic Rankine et Goswami

2.1 Introduction

Dans le monde d'aujourd'hui, avec la croissance de la population, la demande en énergie augmente, mais les ressources (combustibles fossiles) sont limitées et s'épuisent considérablement.

Ce n'est qu'une question de temps, nous manquons des principaux combustibles que sont le pétrole, le gaz et le charbon. Par conséquent, nous devons passer à une autre source d'énergie. Les autres formes d'énergie dont nous disposons sont l'énergie solaire, géothermique, éolienne, etc ...

Les sources d'énergie solaire et géothermique constituent une source de chaleur, mais elles présentent le problème qu'elles sont des sources de chaleur de qualité inférieure et possèdent une qualité médiocre.

La chaleur est en soi une forme d'énergie de faible qualité. Mais une chaleur de basse qualité implique que la chaleur soit extraite de sources à basse et moyenne température ayant une densité d'énergie moindre et ne pouvant pas être converties efficacement en travail.

Bien qu'il n'existe pas de spécification unifiée sur la plage de température de la chaleur de qualité inférieure, il est entendu qu'une source de chaleur dont la température est inférieure à $370\text{ }^{\circ}\text{C}$ est considérée comme une source de chaleur de qualité inférieure, car la chaleur n'est pas convertie efficacement en dessous de cette température en utilisant cycle de Rankine à la vapeur.

Les principales sources de chaleur à faible teneur proviennent des sources suivantes: solaire thermique, géothermique et thermique des déchets industriels.

Ces jours-ci, l'accent est mis principalement sur les avantages de la capture et de l'utilisation d'énergie thermique de qualité inférieure, qui dépendent fortement des qualités et des propriétés de la chaleur dans les flux de déchets.

Le paramètre le plus important est la température du flux de chaleur de qualité inférieure, car l'utilisation efficace de la chaleur résiduelle ou l'efficacité de la récupération d'énergie à partir des sources de chaleur de qualité inférieure dépendra principalement de la différence de température entre la source et un puits approprié.

Le processus de conversion de l'énergie d'un carburant en énergie électrique implique la création de travaux mécaniques.

Pour réussir la conversion de la chaleur en travail mécanique, des cycles thermodynamiques sont utilisés.

2.1.1 Cycle thermodynamique

Un cycle thermodynamique est un cycle qui comprend une série de processus thermodynamiques connectés entre eux de sorte que la chaleur et le travail puissent être effectués dans le système tout en faisant varier les paramètres d'état tels que la température et la pression. En tant que cycle, le processus revient finalement à son état initial.

Le travail s'effectue par la conversion d'énergie d'une forme à une autre, tout en maintenant le principe de la conservation de l'énergie conformément au premier principe de la thermodynamique. Le cycle thermodynamique est classé en cycles d'alimentation et cycles de chauffage / réfrigération.

Cette recherche est centrée sur la production d'électricité; par conséquent, seuls les cycles électriques sont discutés.

2.1.2 Cycles d'alimentations

Ces cycles convertissent l'apport d'énergie sous forme de chaleur dans un système en travaux mécaniques et ou en sorties de puissance électrique. En vue de la production d'électricité cycle kalina, organic rankine et goswami.

2.2 Cycle kalina

Ce cycle de puissance a été développé en 1970 par Aleksander Kalina et est couramment utilisé dans récupération et conversion de l'énergie thermique de sources de chaleur de faible qualité pour produire de Puissance. Le cycle de Kalina a une configuration de conception différente de celle du Rankine classique cycle et nécessite des équipements supplémentaires tels qu'un séparateur et un chauffage intermédiaire échangeurs [Réf. 9].

Le cycle Kalina est un nouveau concept de récupération de chaleur et de production d'énergie qui utilise un mélange de 70% d'ammoniac et 30% d'eau comme fluide de travail pouvant générer des gains d'efficacité significatifs par rapport au cycle conventionnel de Rankine. Ce concept convient systèmes de récupération de chaleur à basse température de

gaz avec des températures d'entrée de gaz comprises entre 400 et 1000 F, offrant davantage de gains (sur le cycle de Rankine) à mesure que la température du gaz diminue [Réf. 10].

La marque de commerce Kalina Cycle et tous les brevets mondiaux de première génération encore en vigueur sont la propriété de Wasabi Energy plc. Propriétaire de Global Géothermal Ltd., société mère de Récurrente Engineering Inc [Réf. 11].

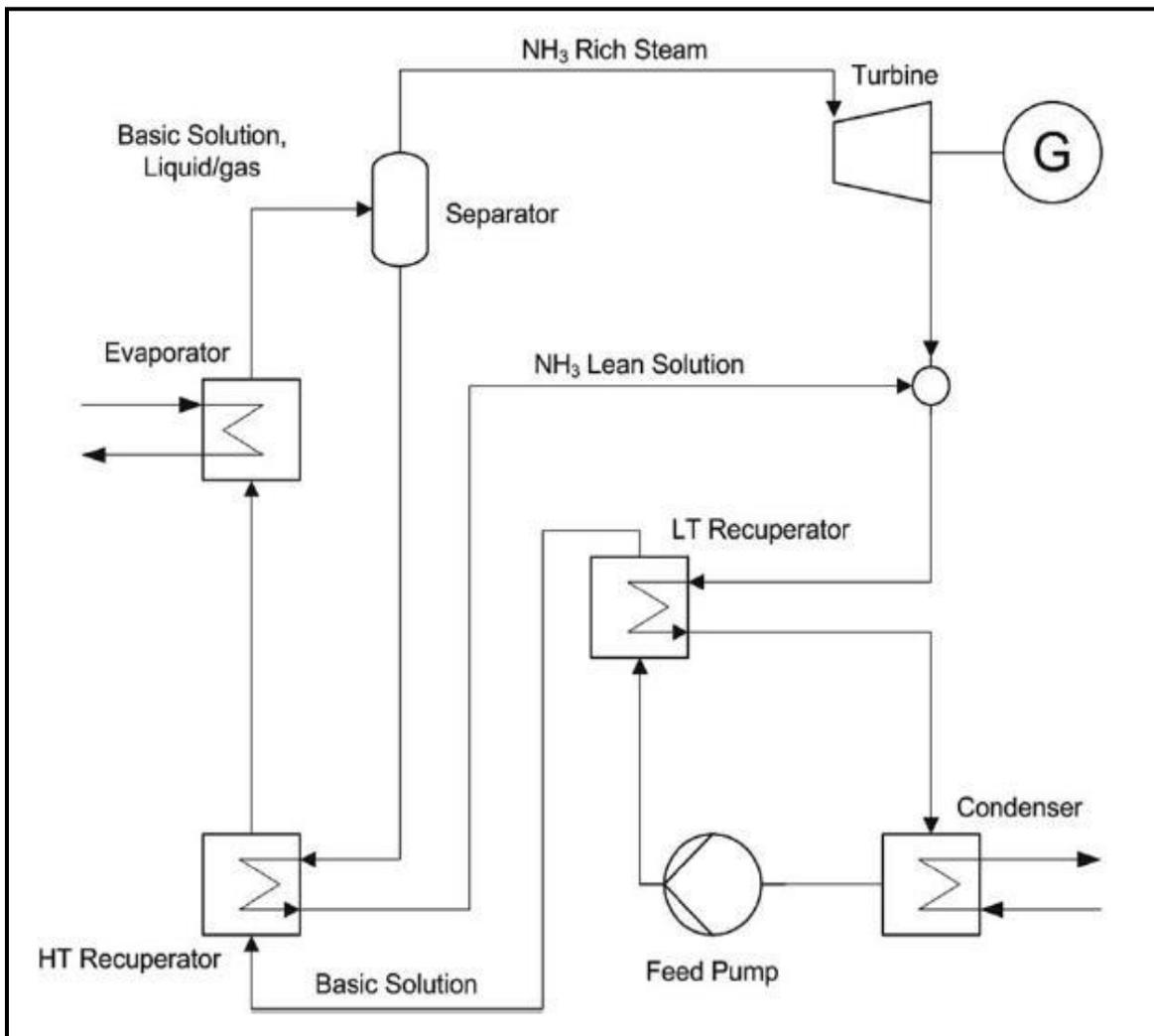


Figure 2.1. Processus schématique du cycle de Kalina [Réf.11].

Illustre le processus du cycle de Kalina au cours duquel une chaleur constante est transférée dans le mélange de fluide de travail NH₃-H₂O à partir d'une source renouvelable à basse température.

2.2.1 Différents cycles 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.

KCS6 est préférable pour les unités plus grandes (plus de 20 MW de sortie totale).

Le KCS6 a été conçu comme un cycle combiné pour un cycle combiné offrant un rendement optimal et une efficacité maximale de tous les Kalina cycles.

KCS5 est particulièrement applicable aux installations à combustible (combustibles).

KCS11 n'est pas applicable pour les températures thermiques entre environ 120 ° C 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 [Réf.12].

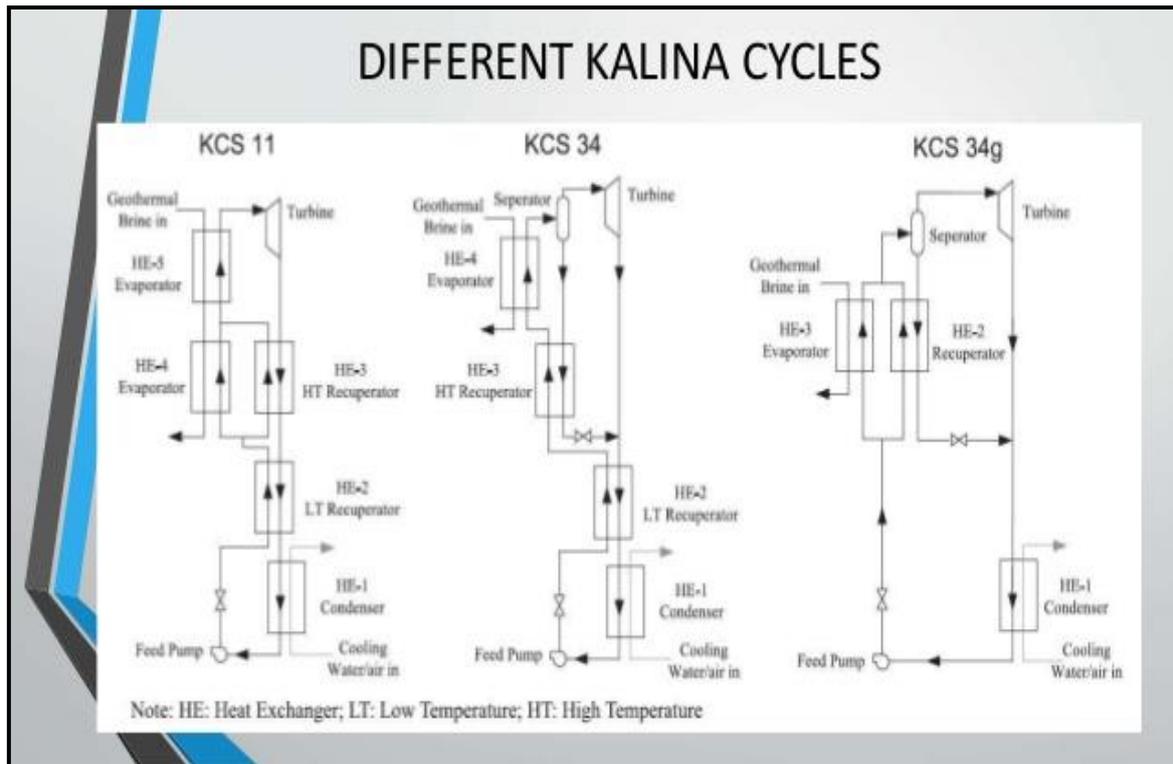


Figure 2.2. Les différents cycles de kalina [Réf.12].

2.2.2 Principe de fonctionnement d'un cycle de kalina

La pompe a mis le liquide saturé (5) sous pression sortant du condenseur et l'a envoyé au récupérateur à haute température (6). Le liquide retire la chaleur de la vapeur morte à deux phases (3). Le liquide chaud sous pression (état sous-refroidi) entre (1) dans le vaporiseur où le liquide est converti en vapeur (2) en utilisant la chaleur latente ou sensible de la source chaude (1s -2s). La vapeur saturée (2) du vaporiseur est détendue dans la turbine jusqu'à la pression du condenseur. Le mélange en deux phases après avoir donné une partie de sa chaleur latente au liquide entrant (4) entre dans le condenseur, où l'eau de refroidissement pénètre (1w), évacue toute la chaleur disponible dans le système à deux phases mélangé et laisse à température plus élevée (2w), Le liquide saturé est mis sous pression dans la pompe et le cycle se répète [Réf.13].

2.3 Cycle de organic rankine

L'histoire du développement du cycle organique de Rankine (ORC) s'étend depuis le début de 19^{ème} siècle jusqu'à ce que les systèmes d'alimentation ORC deviennent un marché de niche important dans le Industrie de l'électricité du 21^{ème} siècle. L'histoire de la CIO est intimement liée au développement empirique des moteurs à vapeur. La tentative de Carnot de comprendre le développement empirique conduit au fondement de la thermodynamique ; cependant, le décalage entre la théorie et la pratique a continué pendant plusieurs décennies. Ce chapitre se concentrera sur les développements ORC originaux qui ont conduit à une commercialisation durable, ou au moins à des démonstrations significatives. Comme pour les autres exemples de systèmes ou de cycles ORC. On peut trouver ces variations dans des études très complètes de Colonna et al. (2015), Angelino et al. (1984), J.R. Owen (1975), et les références détaillées qui y sont incluses.

Les cycles organiques de Rankine (Organic Rankine Cycle, ORC, en anglais) sont des variantes des cycles à vapeur à eau, qui sont utilisés lorsque la source chaude à partir de laquelle on souhaite produire de la puissance mécanique est à basse ou moyenne température. Le schéma de principe d'un cycle organique de Rankine simple est affiché, figure ci-dessous [Réf.14].

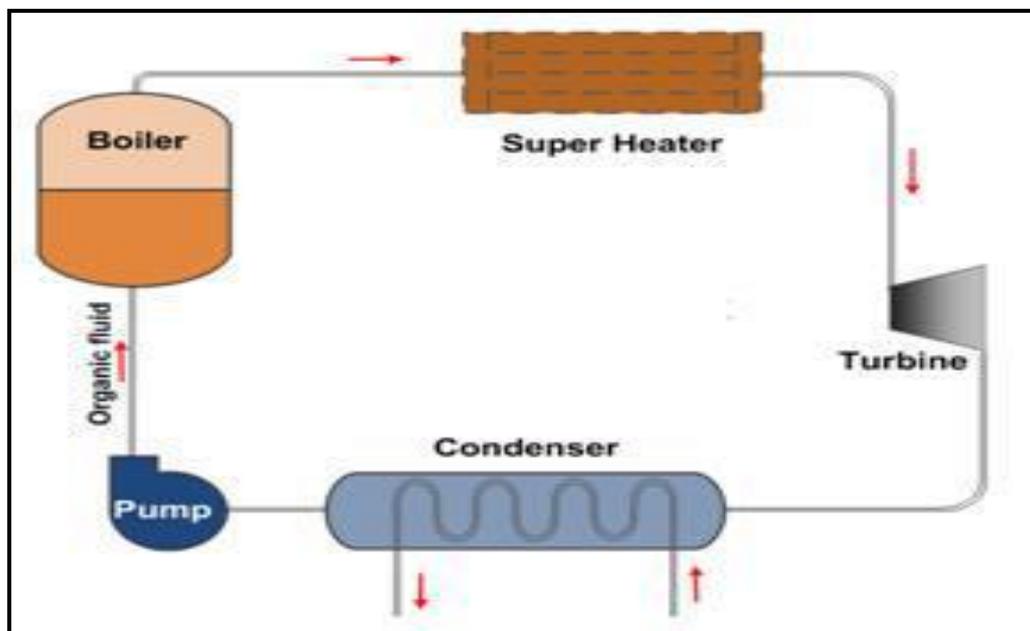


Figure 2.3. Le Schéma de principe de l'ORC [Réf.14].

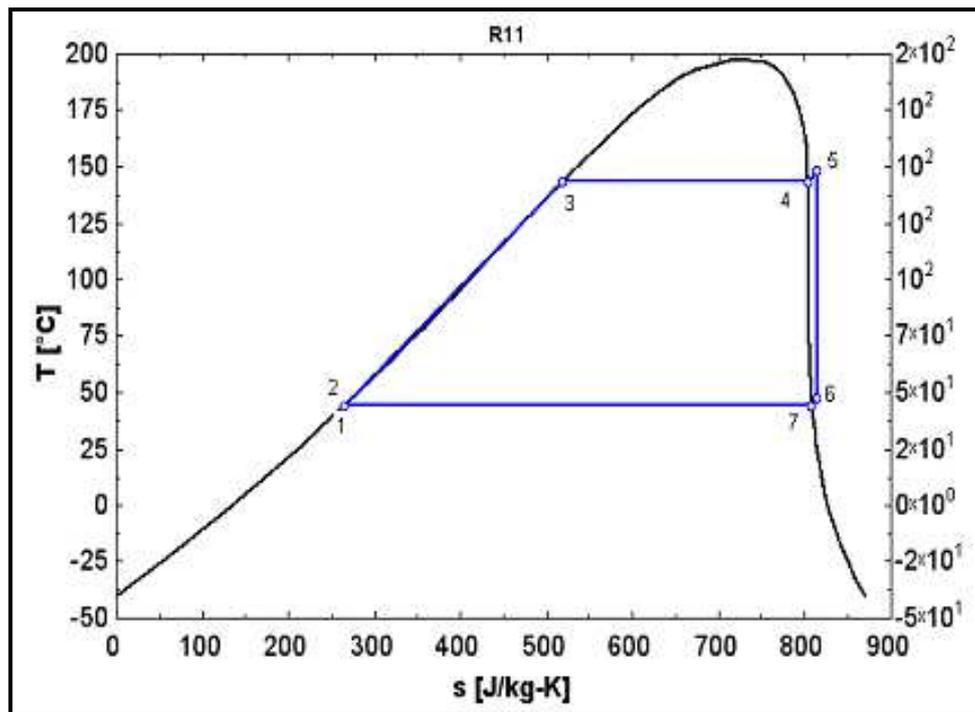


Figure 2.4. Le Schéma T-s de l'ORC [Réf.14].

2.3.1 Le principe de fonctionnement

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).

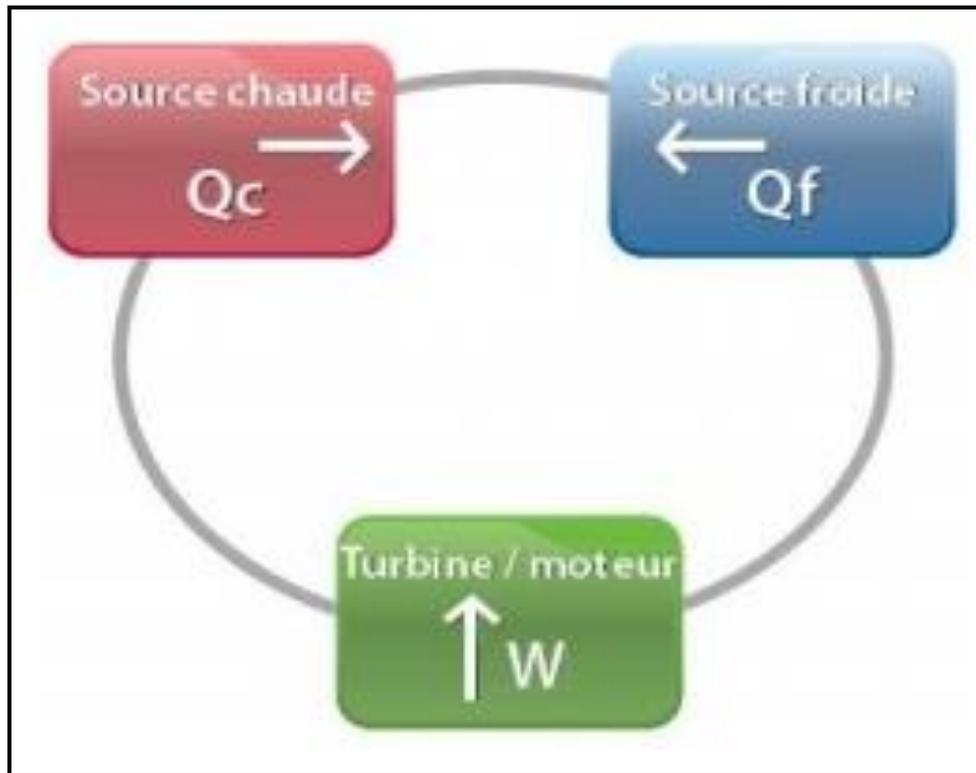


Figure 2.5. La session du système ORC.

2.3.2 La conception du système ORC

La conception du système ORC est illustrée à la figure 2.

La source de chaleur utilisée pour le piloter (Q_{ro}) provient des gaz d'échappement et du liquide de refroidissement du moteur.

L'énergie disponible récupérée de la chaleur résiduelle est transférée par le système ORC à l'électricité.

Le système ORC comprend un évaporateur, une turbine, un condenseur et une pompe.

L'énergie thermique provenant des gaz d'échappement et de l'eau de refroidissement du moteur est transportée dans l'évaporateur.

Le fluide utilisé est un composant organique R245fa présent dans l'ORC. Il a une température d'ébullition plus basse que la température d'évaporation de l'eau. Les processus de travail sont indiqués dans le **Tableau.1.1**.

Processus de fonctionnement du système ORC :

Processus de pompage	1-2
Processus de chauffage	2-3
Processus d'expansion	3-4
Processus de rejet de chaleur	4-1

Tableau.2.1.Processus de fonctionnement du système ORC.

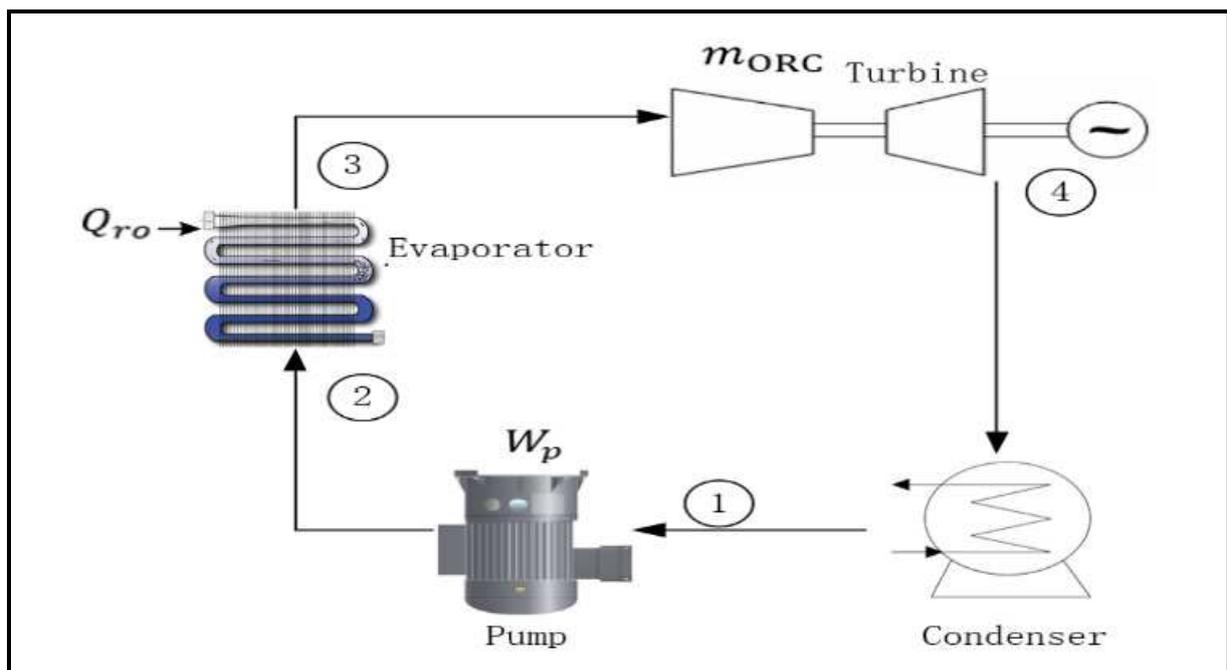


Figure 2.6.Le Système ORC.

2.3.3 Sélection de fluide de travail du système ORC

La sélection du fluide de travail du système ORC est importante pour les opérations du système. Celle-ci doit concerner le physique et les propriétés chimiques du fluide de travail pour assurer une opération de sécurité. En cas de problème de fuite causé par un fonctionnement inapproprié ou d'accidents, un fluide de travail avec une faible toxicité et propriété physique stable est conseillé. Il y a un certain nombre de fluides de travail qui sont appliqués dans les systèmes ORC tels que : Le R600, R245fa, R236fa, R601, RC318, R123 et le R134a

Bien que de nombreuses études aient traité la performance du système ORC avec différents fluides de travail sous divers conditions de fonctionnement. Elles ont montré beaucoup de succès par exemple le système de cogénération intégré au système ORC. Il n'y a toujours pas assez de recherches sur ça, en se concentrant sur la petite génération de tri génération système intégré au système ORC. Dans cette recherche du système de tri génération, le générateur est un moteur diesel. La chaleur perdue du système de récupération est intégrée dans le système ainsi que le système ORC. Le système récupère les déchets de la chaleur du moteur pour la production d'énergie disponible. Le R245fa est sélectionné comme fluide de travail dans le système ORC [Réf.15].

2.3.4 Applications des cycles ORC

Les cycles ORC suscitent un intérêt croissant dans le monde depuis la fin des années 1980, pour trois principales classes d'applications, qui représentent l'essentiel des réalisations, en termes de puissance installée et de nombre d'installations :

- les centrales géothermiques
- les installations de combustion de biomasse
- la récupération de chaleur sur des effluents

2.4 Cycle de goswami

Le cycle de Goswami, proposé par le Dr. Yogi Goswami (1998), est un nouveau cycle thermodynamique qui utilise un mélange binaire pour produire simultanément de l'énergie et de la réfrigération dans une boucle.

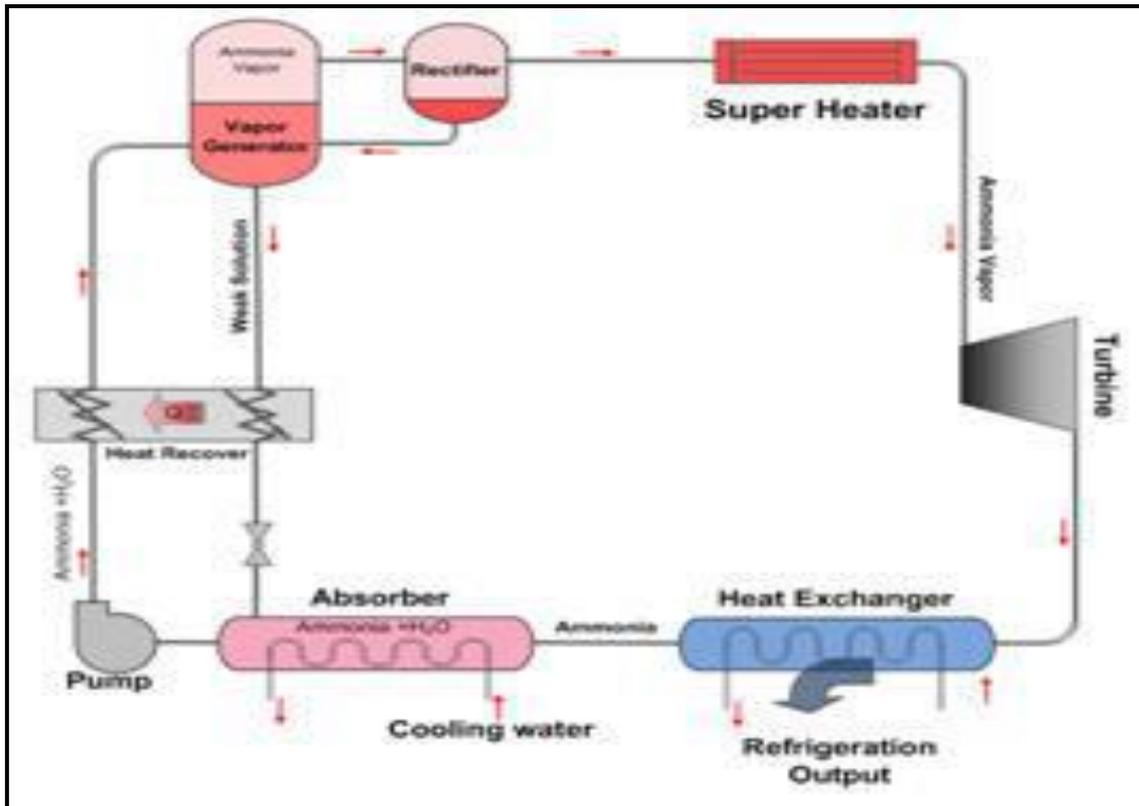


Figure 2.7 Configuration de base du cycle combiné d'alimentation et de refroidissement [Réf. 16].

Ce cycle est une combinaison d'un cycle d'alimentation Rankine et d'un cycle de refroidissement par absorption. Ses avantages incluent la production d'énergie et de refroidissement dans le même cycle, la flexibilité de conception permettant de produire toute combinaison d'énergie et de réfrigération, la conversion efficace de sources de chaleur à température modérée et la possibilité d'une utilisation améliorée des ressources par rapport à des systèmes séparés d'alimentation et de refroidissement. Le mélange binaire utilisé en premier lieu était de l'ammoniac et de l'eau, puis de nouveaux fluides binaires ont été proposés et étudiés. Une configuration du cycle est illustrée à la **Figure 2.7** [Réf.16].

2.4.1 Consommation d'eau

Chaque cycle de Rankine fonctionne entre deux températures. Une température est la source de chaleur où la chaleur est absorbée et l'autre est une température inférieure où la chaleur est rejetée. Si la température la plus basse baisse et que le système est conçu à cet effet, le cycle fonctionnera plus efficacement. Le refroidissement par évaporation est utilisé dans de nombreux cas pour réduire et maintenir la température du dissipateur thermique dans des endroits à faible humidité et à température ambiante élevée tels que le désert des États-Unis au sud-ouest. La consommation d'eau pour le refroidissement par évaporation suscite de plus en plus d'inquiétudes, ce qui met la production d'énergie en concurrence directe avec l'eau pour les besoins de la consommation agricole et humaine [Réf.17].

2.4.2 Comparaison entre le cycle de kalina et le cycle de rankine organique

Le cycle de Kalina est essentiellement un développement ultérieur du cycle de Rankine. Une différence essentielle entre eux est qu'un cycle de Kalina utilise un mélange plutôt qu'un fluide de travail pur, de sorte que les processus d'évaporation et de condensation isobares se produisent sous des températures variables et que la composition du mélange varie au cours du cycle. Par rapport à un cycle de Rankine, l'efficacité d'un cycle de Kalina peut être augmentée grâce à une correspondance étroite de la température avec les fluides caloporteurs de l'évaporateur et du condenseur. Par exemple, un système à cycle Kalina utilisant un mélange d'ammoniac et d'eau comme fluide de travail pour générer de l'énergie à partir de la chaleur perdue d'une turbine à gaz a atteint un rendement thermique de 32,8%. Une centrale électrique de Kalina utilise normalement des composants (turbine, pompes, vannes, etc.) similaires à ceux utilisés pour la construction d'une centrale à vapeur conventionnelle. Certaines enquêtes ont montré qu'un cycle de Kalina peut atteindre un meilleur rendement thermique que les systèmes ORC [Réf.18][Réf.19][Réf. 20][Réf.21].

2.5 Développement des ORC

Après les premiers développements vers 1960, le marché des ORC croît de façon exponentielle depuis les années 1980. De nombreux nouveaux fabricants d'ORC sont apparus sur le marché depuis les années 2005, avec de nouveaux produits et de nouvelles solutions.

De nombreuses installations ORC ont ainsi été mises en œuvre ces dernières années dans certains pays européens (Italie, Allemagne, France etc?). La puissance nette installée au niveau mondial est estimée à 1.8 GWe (en mars 2014).

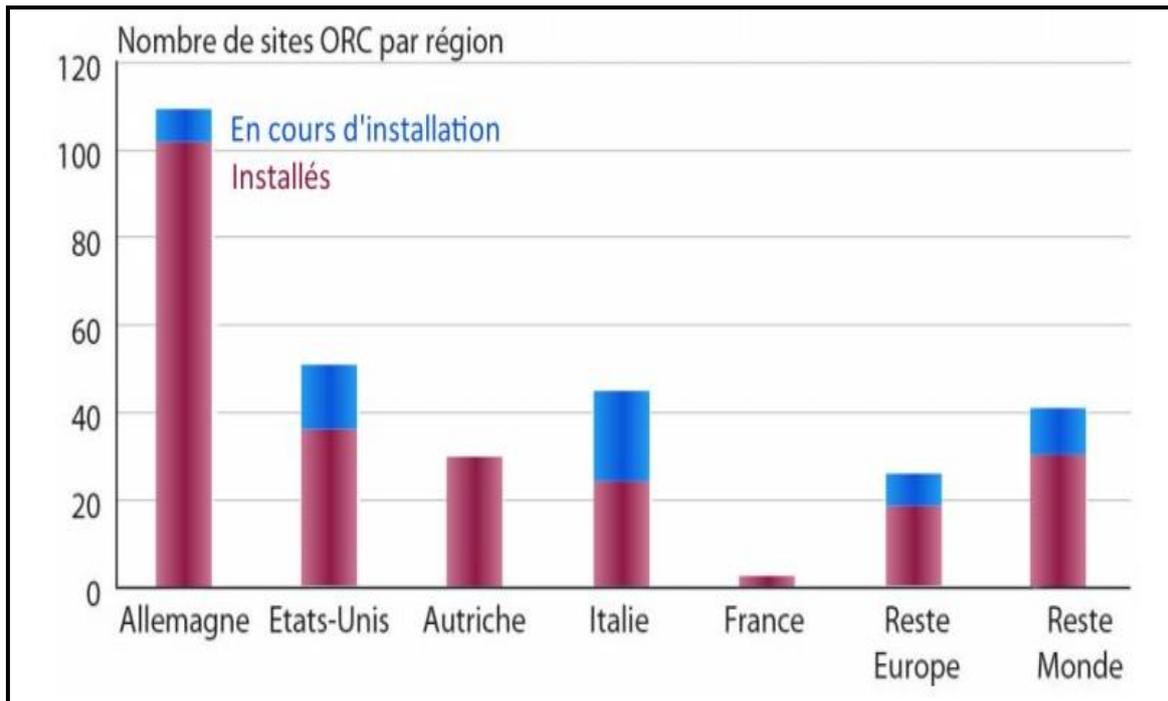


Figure 2.8. Répartition des références ORC par pays en 2009 [Réf.22].

En termes de nombre d'installations, on distingue 3 marchés principaux : la géothermie, la cogénération biomasse et la récupération de chaleur. En 2009, près de 70% des systèmes ORC installés ou en cours de construction se trouvaient en Europe alors que 42% de la puissance installée était localisée aux USA (principalement des centrales géothermiques) (Enertime, 2013).

Actuellement, le marché de la géothermie affiche la plus grande puissance installée cumulée (les centrales géothermiques sont caractérisées par des puissances allant de 10 MWe à près de 100 MWe).

Toutefois, les ORC équipant des centrales de cogénération biomasse représentent les installations les plus nombreuses. Cela est surtout lié à une volonté politique promouvant les installations biomasse (via l'octroi de tarifs de rachat de l'électricité attractifs) en Allemagne, Italie et Autriche.

Les différents fournisseurs sur le marché voient également le potentiel important existant dans l'industrie en termes de récupération de chaleur fatale. Le fournisseur en certifie ainsi « Rien qu'en France plus de 50MWe pourraient être installés dans les aciéries et plus de 15MWe dans les cimenteries (Source Société Française de Chimie, 2005) » [Réf.22].

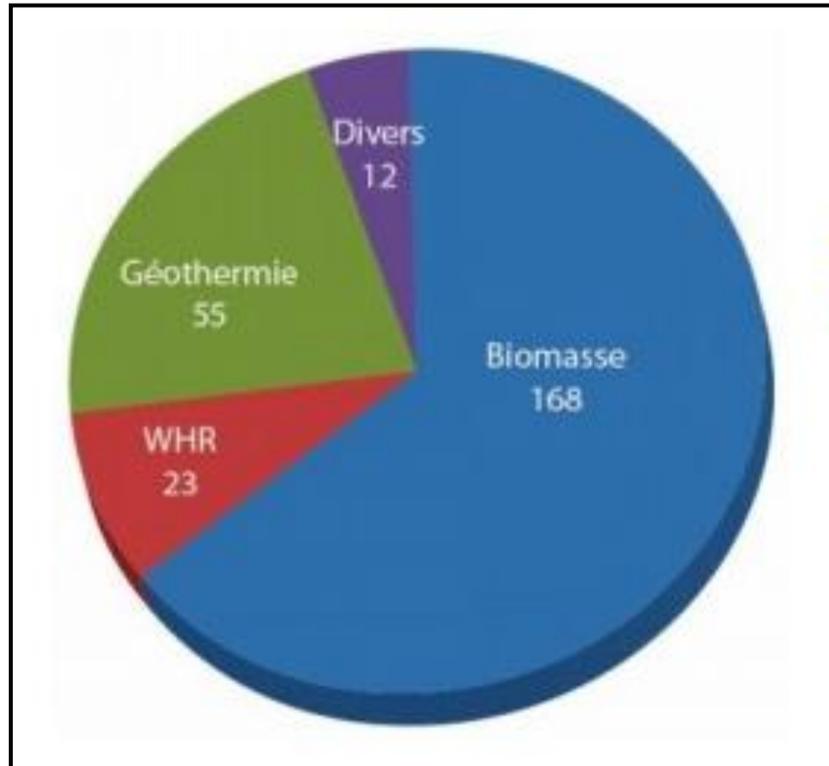


Figure 2.9. Nombre de références dans le monde en fonction des sources de chaleur en 2009 [Réf.22].

2.6 Conclusion

Différents cycles ont été comparés afin de trouver le meilleur cycle pour convertir diverses sources de chaleur à basse température dans le courant électrique dans diverses conditions en utilisant différentes méthodologies utilisées en recherche. Avec l'optimisation de différents cycles par changer divers paramètres et trouver le meilleur ensemble possible de paramètres en vertu desquels il faut fonctionner, de nouveaux cycles ont également été introduits, ce qui a entraîné une puissance plus efficace. Dans la zone de sélection des fluides, les variétés de fluides sont utilisées pour optimiser les trois cycles (cycle de Kalina, cycle de Goswami et ORC) en variant nombre de paramètres.

Dans le thème de la chaleur à basse température, Différents cycles thermodynamiques ont été mis en œuvre pour produire du travail (électricité) à partir de la chaleur de qualité inférieure à la source.

Chapitre 3

ETUDE PARAMETRIQUE

3.1 Introduction

Dans ce chapitre nous allons voir en détail le cycle goswami et les différents éléments qui se composent et la nature de leur fonctionnement. Nous présenterons aussi les outils qu'on va utiliser pour développer notre application.

3.2 Cycle de goswami

Le cycle de Goswami a été proposé pour la première fois dans les années 90 et se caractérise par une conversion énergétique améliorée et une réduction considérable du coût de l'énergie [23].

Le cycle de Goswami est un cycle de chaleur et d'énergie combiné. Comme le cycle de Kalina, le cycle de Goswami utilise un fluide de travail composé d'ammoniac et d'eau et présente un meilleur rendement global de conversion de l'énergie. L'ammoniac et l'eau sont solubles l'un dans l'autre et peuvent également être facilement séparés [24].

Divers travaux de recherche ont été menés, voire sont en cours, pour étudier les caractéristiques et les avantages d'un mélange de fluides à plusieurs composants, comme dans le Kalina. Et les cycles de Goswami, comparés au fluide mono composant comme dans le cycle idéal de Rankine.

Une étude comparative montre une amélioration significative de 10 à 20% de l'efficacité thermique du fluide de travail à composants mélangés [25]

La concentration élevée d'ammoniac dans la turbine en cours de fonctionnement permet l'expansion des vapeurs d'ammoniac sans condensation.

De la puissance est donc générée lorsque la vapeur entraîne la turbine et la réfrigération est simultanée lorsque la température de l'ammoniac devient très basse.

Les sources de chaleur résiduelle peuvent être de faible qualité ($<100\text{ }^{\circ}\text{C}$), moyenne ($100\text{ }^{\circ}\text{C}$ à $400\text{ }^{\circ}\text{C}$) ou élevée. Grande ($> 400\text{ }^{\circ}\text{C}$)[26]

3.3 Description du cycle

Le cycle combiné présenté dans (**Figure 3.1**) produit de l'énergie et de la réfrigération simultanément dans la même boucle et nécessite moins de matériel, à savoir un absorbeur, un séparateur, une chaudière, des échangeurs de chaleur à récupération de chaleur et de réfrigération et une turbine.

Bien que le cycle proposé ne soit pas restreint aux mélanges binaires ammoniac-eau, il est décrit ici pour ce fluide de travail. À l'état 1, le fluide de travail quitte

L'absorbeur sous forme de liquide saturé à la basse pression du cycle, puis il entre la pompe où sa pression est augmentée à la haute pression du système (état 2).

Après avoir quitté la pompe, le fluide est transporté vers l'échangeur de récupération où il récupère la chaleur du retour faible ammoniac liquide, puis il entre dans la chaudière (état 3).

Dans la chaudière, la solution de base est partiellement évaporé pour produire un mélange à deux phases (état 4): un liquide ammoniacal faible, avec une concentration d'eau et une vapeur riche avec une très forte concentration d'ammoniac.

Dans le séparateur, le mélange en deux phases est séparé et le liquide faible (état 9) entre dans l'échangeur de récupération où il transfère la chaleur au courant à haute concentration qui provient de la pompe.

Après avoir quitté le l'échangeur de chaleur de récupération, le courant de liquide faible (état 10) est étranglé à la basse pression du système et pulvérisé dans l'absorbeur (état 11).

Dans le redresseur, un courant froid refroidit l'ammoniac riche saturé vapeur (état 5) pour condenser toute eau restante. Le flux d'ammoniac de l'état 5 peut être surchauffé (état 6) avant d'entrer dans l'extenseur.

L'extenseur produit de la puissance en même temps qu'il étrangle fluide à la basse pression du système (état 7).

Dans certaines conditions de fonctionnement, la température du fluide qui quitte l'extenseur dans l'état 7 peut être nettement inférieure à la température ambiante et il peut fournir une sortie de refroidissement dans l'échangeur thermique de réfrigération (état 8).

Ensuite, ce flux (état 8) rejoint le liquide faible dans l'absorber où, avec rejet de chaleur, la solution de base est régénérée

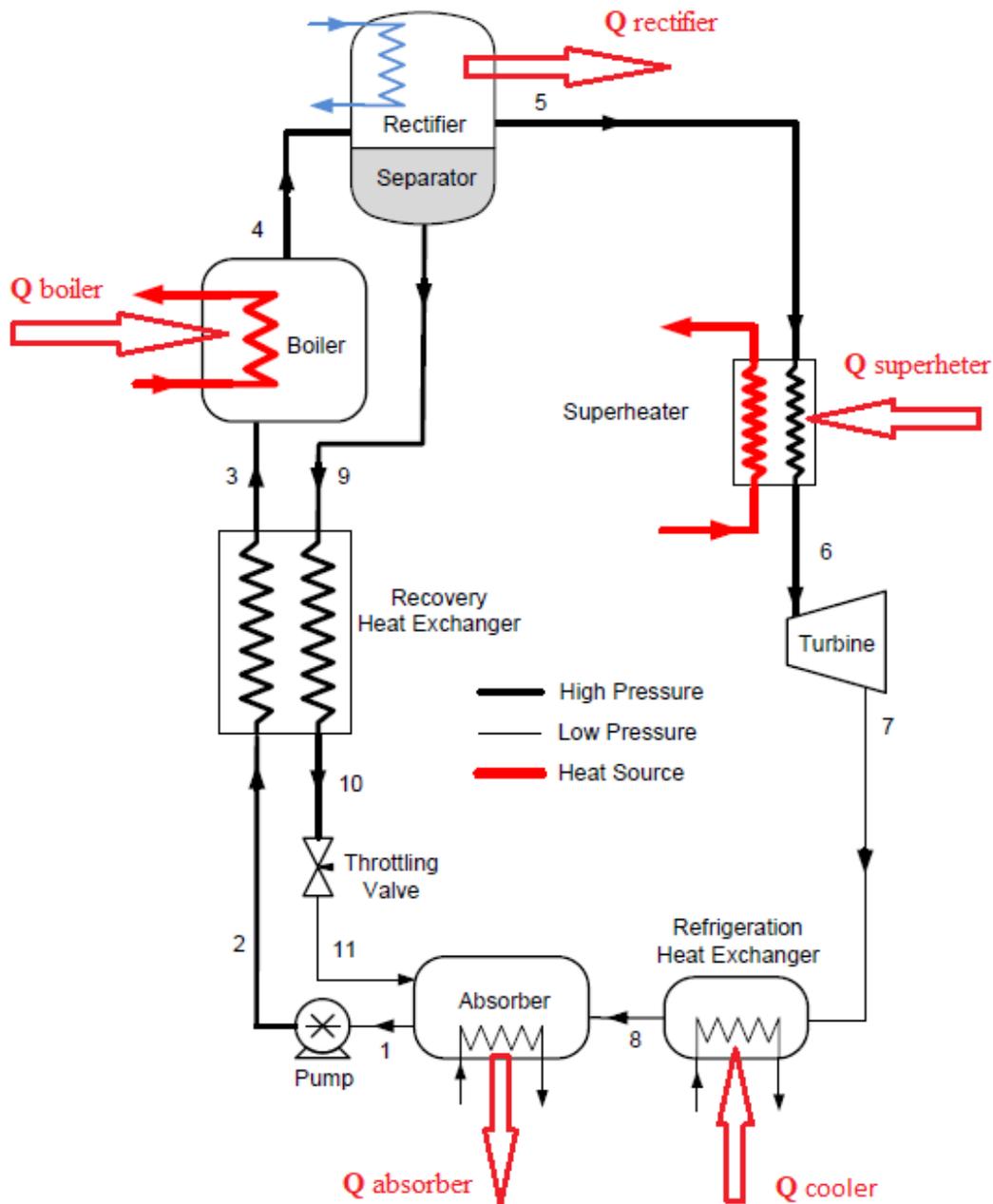


Figure 3.1. Description schématique du cycle de Goswami avec refroidissement interne

**Le cycle de Goswami est une combinaison d'un cycle de puissance de Rankine et d'un cycle de refroidissement par absorption. Ses avantages incluent la production d'énergie et de refroidissement dans le même cycle, la flexibilité de conception permettant de produire toute combinaison d'énergie et de réfrigération, la conversion efficace de sources de chaleur à température modérée et la possibilité d'une utilisation améliorée des ressources par rapport à des systèmes séparés d'alimentation et de refroidissement. Le mélange binaire utilisé en premier lieu était de l'ammoniac et de l'eau, puis de nouveaux fluides binaires ont été proposés et étudiés.

3.3.1 Fluid de travail

Plusieurs études sur l'évaluation des propriétés du mélange ammoniac-eau ont été menées. On utilise ici un schéma semi-empirique commode combinant méthode de Gibbs à énergie libre pour les mélanges et les corrélations de température de bulle et de point de rosée pour l'équilibre de phase.

Une comparaison entre les résultats calculés et expérimentaux Les propriétés du mélange par Xu et Goswami [18] montre un bon accord entre deux ensembles de données. En employant absorption-condensation, la vapeur peut être étendue à des températures nettement inférieures à la température à laquelle l'absorption a lieu.

On peut ainsi obtenir un refroidissement en chauffant de manière raisonnable l'échappement.

Ce comportement est dû au fait que le fluide de travail est un mélange binaire. Pression constante la température de condensation d'une vapeur riche en ammoniac peut être inférieure à la température de saturation pour un liquide à plus faible concentration. Ceci est mieux illustré par un binaire mélange, diagramme d'équilibre de phase **Figure 3.2**.

Le liquide saturé à faible concentration avec 40% en poids d'ammoniac, se rapproche de la solution de base sortant de l'absorbeur, tandis que la vapeur à haute concentration se situe généralement dans les conditions d'échappement de l'extenseur. [27]

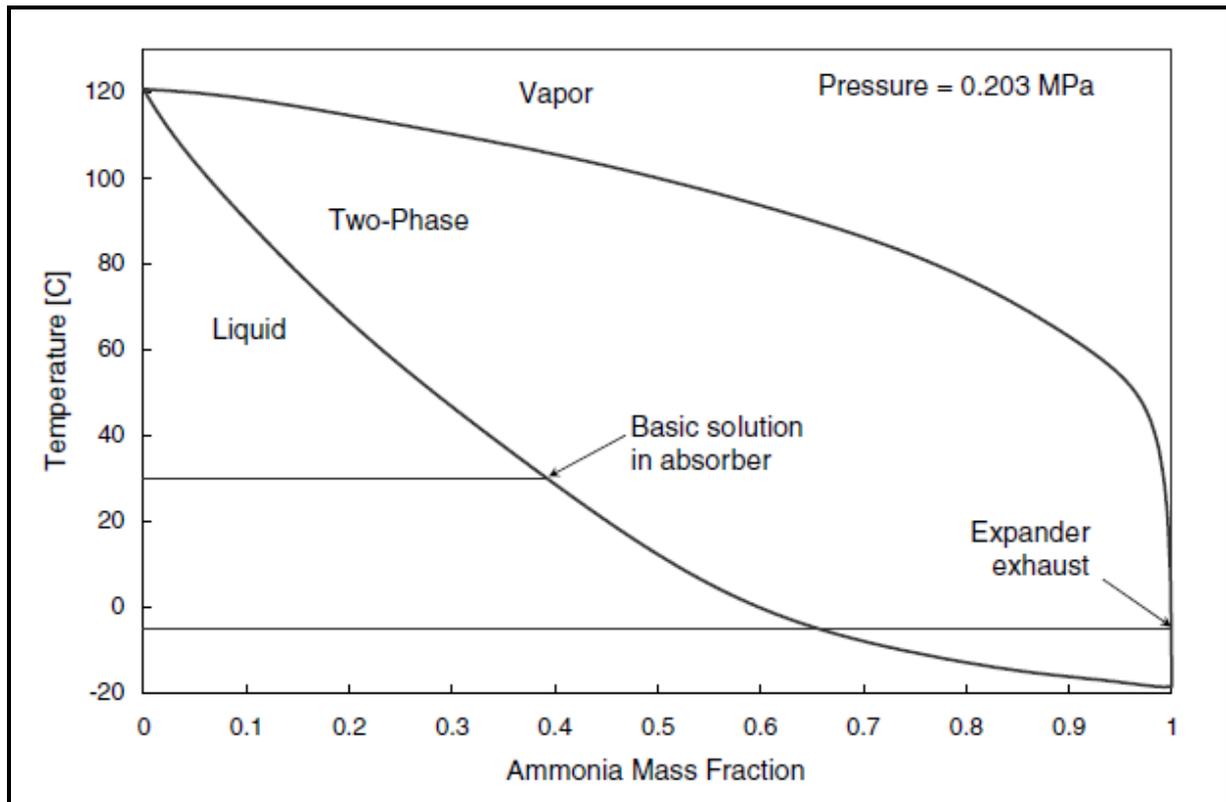


Figure 3.2. Diagramme d'équilibre phase ammoniac-eau

3.3.2 NH₃H₂O (Ammonia-Water)

NH₃H₂O fournit les propriétés thermodynamiques des mélanges ammoniac-eau dans des conditions de sous-refroidissement, saturé et surchauffé. Le NH₃H₂O étant un mélange, sa mise en œuvre diffère quelque peu de celle des substances pures. Tout d'abord, il faut 3 propriétés indépendantes pour corriger l'état. Deuxièmement, il existe une nouvelle fonction de propriété appelée Mass Fraction qui renvoie la fraction massique d'ammoniac. Troisièmement, les désignateurs de propriété X et Q sont utilisés pour NH₃H₂O, ce qui diffère de leur utilisation pour les fluides réels. Ces propriétés sont identifiées par une seule lettre insensible à la casse suivie d'un signe égal. Les désignations de propriété applicables à NH₃H₂O et leur signification sont les suivantes :

- H = enthalpie spécifique
- P = pression
- Q = qualité (états saturés, $0 \leq Q \leq 1$; sous-refroidi. Q = -0,001; surchauffé Q = 1,001).
- S = entropie spécifique
- T = température
- U = énergie interne spécifique
- V = volume spécifique (= 1 / densité)
- X = fraction massique (Notez que X correspond à la qualité pour les fluides réels)

* Les fonctions de propriété disponibles pour le fluide NH₃H₂O sont :

- Conductivité
- Densité
- Enthalpie
- Entropie
- En énergie
- Fraction de masse
- Pression
- Qualité
- Tension superficielle
- Temperature
- Viscosity
- Le volume

Caractéristiques de l'ammoniac:

- Le gaz ammoniac est facilement soluble dans l'eau. Un litre d'eau peut piéger 1148 litres de gaz à 0 °C. Mais la pression de vapeur est élevée et il est facile d'extirper le gaz en chauffant la solution ammoniacque concentrée.

- Les solutions commerciales d'ammoniaque sont concentrées et très dangereuses [28]

Nature	Composé chimique inorganique
Formule	NH ₃
Composition	1 atome d'azote (N) et 3 atomes d'hydrogène (H)
Couleur	Incolore
Odeur	Très âcre et facilement reconnaissable
Température critique	+ 132,4 °C
Température ébullition	- 33,5 °C (pression atmosphérique)
Pression critique	113 Bar

Tableau 3.1 : Caractéristiques de l'ammoniac [29]

3.4 L'Études paramétriques du cycle de goswami

L'équation du bilan énergétique pour chaque composant du système en une liaisons avec les hypothèses suivantes :

- Les variations de l'énergie cinétique et de l'énergie potentielle sont négligeables.
- Le système est adiabatique (sans pertes thermiques)
- Le système fonctionne en régime stationnaire.
- Le fluide caloporteur à l'état liquide est incompressible.

3.4.1 La pompe d'alimentation

La pompe d'alimentation utilisée augmente la pression du fluide de travail 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 :

$$W_{pompe} = m_1(h_2 - h_1) = \frac{m_1(h_{2s} - h_1)}{\eta_p} \dots \dots \dots (1)$$

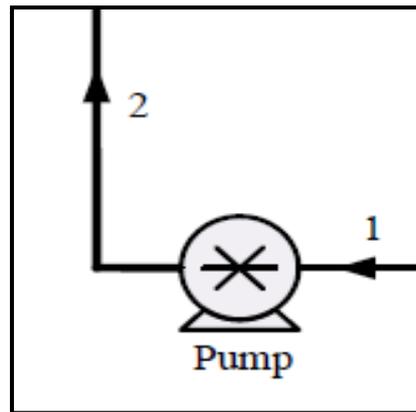


Figure 3.3. Représente la pump

3.4.2 Échangeur de chaleur de récupération

Un échangeur de chaleur est un dispositif utilisé pour transférer de la chaleur entre deux fluides ou plus. Les échangeurs de chaleur sont utilisés dans les processus de refroidissement et de chauffage. Les fluides peuvent être séparés par une paroi solide pour empêcher le mélange ou ils peuvent être en contact direct.

$$m_3 h_3 = m_2 h_2$$

$$m_9 h_9 = m_{10} h_{10}$$

$$P_3 = P_2$$

OU

$$P_9 = P_{10}$$

$$T_3 > T_2$$

$$T_9 > T_{10}$$

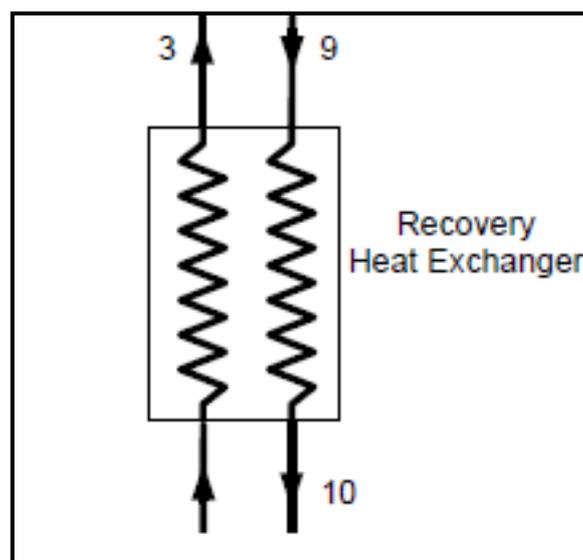


Figure 3.4. Représente échangeur de chaleur de récupération

3.4.3 La chaudière

Système permettant d'augmenter la température d'un fluide caloporteur afin de déplacer de l'énergie thermique

Le transfert de chaleur de la chaudière :

$$Q_{\text{chaudière}} = m_m h_a - m_m h_c$$

$$Q_{\text{chaudière}} = m_4 h_4 - m_3 h_3 \dots \dots \dots (2)$$

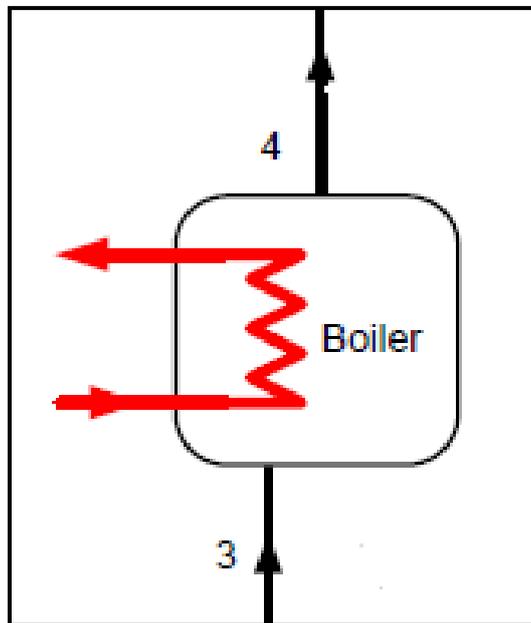


Figure 3.5. Représente la chaudière

3.4.4 Rectifier et séparateur

La distillation n'aboutit pas à séparation du mélange liquide, mais plutôt sa division en deux mélanges avec différents contenus de volatiles et composants moins volatiles. Le principe de séparation est basé sur le fait que la teneur en composants volatils est supérieure en phase vapeur que dans la phase liquide

$$m_4 = m_5 + m_9$$

$$m_9 = m_5 * ((x_5 - x_4) / (x_4 - x_9))$$

$$Q_{\text{rectifier}} = m_5 h_5 + m_9 h_9 - m_4 h_4 \dots \dots \dots (3)$$

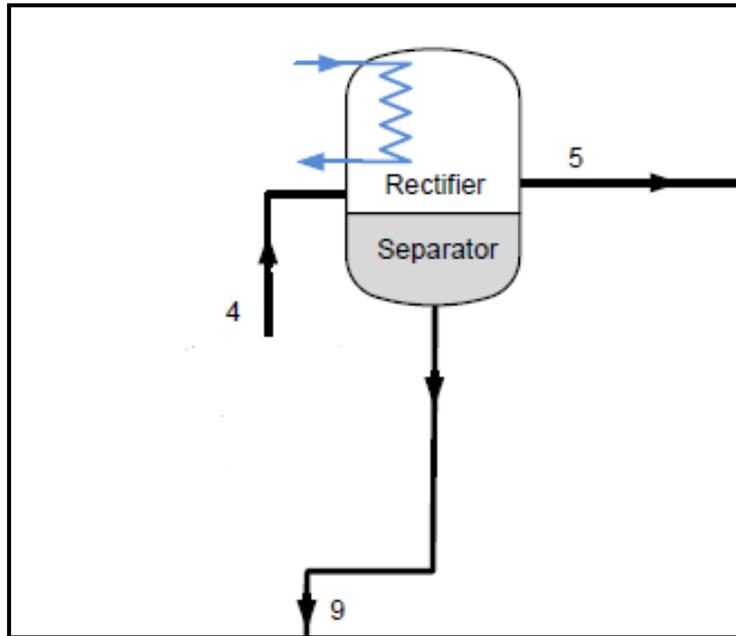


Figure 3.6. Représente le redresseur et séparateur

3.4.5 Surchauffeur

Le surchauffeur améliore le rendement du turbine car le vapeur d'ammoniac obtenu est à plus haute température et, étant plus sec

$$Q_{\text{surchauffeurs}} = m_5 (h_6 - h_5) \dots \dots \dots (4)$$

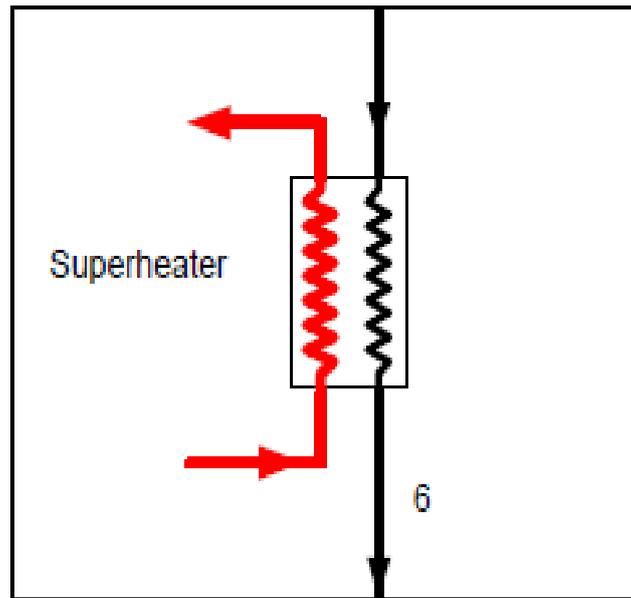


Figure 3.7. Représente le surchauffeur

3.4.6 La turbine

Une turbine est un dispositif rotatif destiné à utiliser l'énergie cinétique de vapeur pour faire tourner un arbre supportant les aubes de la turbine.

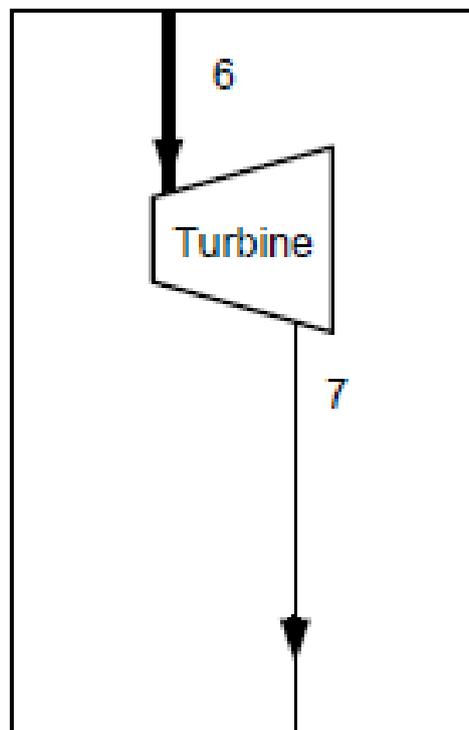


Figure 3.8. Représente la turbine

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

$$W_{turbine} = m_6(h_6 - h_7) \dots \dots \dots (5)$$

$$\eta_{th} = \frac{h_6 - h_7}{h_6 - h_{7s}} \dots \dots \dots (6)$$

3.4.7 Réfrigération Échangeur de chaleur

La réfrigération est le processus de refroidissement d'un espace, d'une substance ou d'un système pour abaisser et / ou maintenir sa température au-dessous de la température ambiante. En d'autres termes, la réfrigération signifie le refroidissement artificiel. La chaleur est retirée d'un réservoir à basse température et transférée dans un réservoir à haute température.

$$Q_{réfrigérations} = m_7(h_8 - h_7) \dots \dots \dots (7)$$

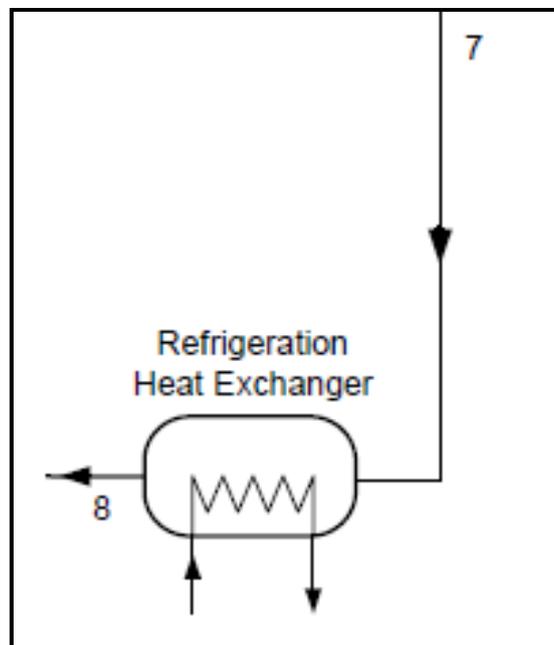


Figure 3.9. Le Réfrigération Échangeur de chaleur

3.4.8 Absorbeur

Le principe de l'absorption est un procédé chimique basé sur la faculté qu'ont certains liquides à absorber et à émettre * une vapeur. *Processus inverse de l'adsorption

On utilisera deux composants l'un sera plus volatil étant porté à ébullition ce sera le fluide frigorigène, et l'autre sera appelé l'absorbant. Les couples (mélange binaire) les plus utilisés sont :

- Eau+ bromure de lithium : l'eau étant le fluide frigorigène
- Ammoniac+eau : l'ammoniac étant le fluide frigorigène

L'avantage de ce type de machine frigorifique est qu'il n'y que peu de pièces en mouvement, ce qui limite les causes de pannes, et son inconvénient Principal est que son rendement est très inférieur aux machines à compression.

$$Q_{\text{absorber}} = m_{11}h_{11} + m_8h_8 - m_1h_1 \dots \dots \dots (8)$$

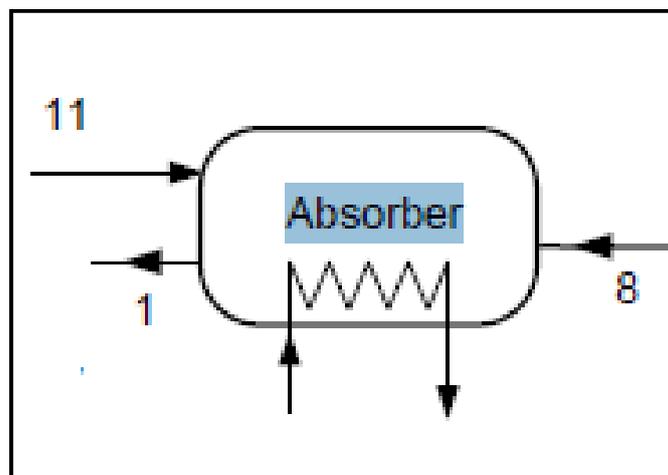


Figure 3.10. Représente la Absorbeur

3.4.9 Vanne d'étranglement

Une vanne d'étranglement permet de régler les débits avec exactitude. Cela fait des vannes d'étranglement un composant indispensable pour de nombreuses applications hydrauliques. Chaque vanne d'étranglement a des caractéristiques configurables. Elle est donc parfaitement adaptable à chaque scénario individuel d'utilisation. Chaque vanne d'étranglement possède un réglage de précision pour faibles débits qui peut être justifié par 3 tours de départ du bouton avec soupape à pointe.

P10>P11

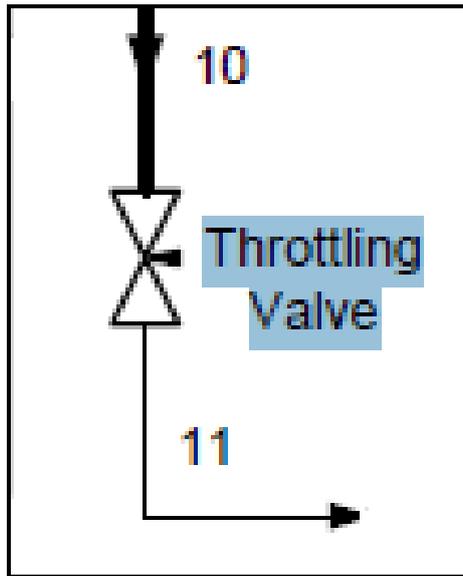


Figure 3.11. Représente le Vanne d'étranglement

3.4.10 Conservation de masse

Les équations de conservation pour la masse de mélange et concentration d'ammoniac dans Le mélange pour absorbeur peut être écrit comme :

Conservation de masse

$$m_8 = m_1 - m_{11}$$

Et

$$m_1 x_1 = m_{11} x_{11} + m_8 x_8$$

Qui mènent à

$$m_{11} = m_1 * ((x_1 - x_8) / (x_{11} - x_8)) \dots\dots\dots(9)$$

Le même pour condensateur / redresseur

$$m_9 = m_5 * ((x_5 - x_4) / (x_4 - x_9)) \dots\dots\dots(10)$$

Tandis que les débits massiques constants sont obtenus à stations (1, 2 et 3)

Et (5, 6, 7 et 8),

$$m_1 = m_2 = m_3$$

Et

$$m_9 = m_8 = m_7 = m_6$$

Où m est le débit massique du mélange avec un suffixe indiquant le numéro de la station.

- **Conservation d'énergie :**

Où La production nette de travail,

$$W_u = W_t - W_p$$

$$W_t = m_6(h_6 - h_7) \quad , \quad W_p = m_1(h_2 - h_1)$$

$$W_u = m_6(h_6 - h_7) - m_1(h_2 - h_1) \dots \dots \dots (11)$$

La puissance frigorifique

$$Q_c = m_7(h_8 - h_7)$$

L'entrée de surchauffe

$$Q_s = m_5(h_6 - h_5)$$

Le transfert de chaleur de la chaudière

$$Q_b = m_4 h_4 - m_3 h_3$$

Le rendement thermique global est calculé comme suit :

$$\eta_{th} = \frac{w_u + Q_c}{Q_s + Q_b} \dots \dots \dots (12)$$

3.5 Les études numériques faite par logiciel EES

Dans cette étude on va étudier le modèle dans la **figure 3-1**, le cycle de goswami qui est composé d'une pompe , et un échangeur de chaleur plus une chaudière et un séparateur qui sépare le fluide qui est riche on ammoniac sous la forme de vapeur et le fluide pauvre sous la forme liquide , la vapeur riche tracé vers un surchauffeur qui augmente la température de la vapeur riche vers la turbine pour faire tourné le générateur et produire l'électricité (par exemple) , par contre le fluide pauvre travers la valve ensuite vers l'absorbeur qui absorbe aussi la vapeur ce qui sort de la turbine et passe par l'échangeur de refroidissement ensuite vers l'absorbeur qui rassemble la vapeur et le fluide pauvre.

Avant de commencé les études thermodynamiques qui nous avons fait par logiciel EES on va donner les paramètres de cycle et les valeurs constante de chaque composante.

Dans notre étude on va varier la température de la source d'ou on va récupérer la chaleur, et d'autre part on va varie la fraction de l'ammoniac dans le fluide.

Et dans la troisième partie on va varie la pression d' entrée de la turbine avec la fraction de l'ammoniac dans l'ea

Paramètres	Les valeurs	Unité
P_{haut}	30	Bars

P_{base}	2	Bars
P_{atm}	1	Bars
x_m	0.53 à 0.9	/
$\eta_{turbine}$	0.8	/
$\eta_{is\ pompe}$	0.8	/

Tableau 3.2. Les paramètres de cycle Goswami

Les performances	Les valeurs	Unité
η_{cycle}	0.1708	/
$Q_{absorber}$	-414.6	KJ
Q_{BOILER}	352	KJ
$Q_{RECTIFIER}$	-18.2	KJ
$Q_{refrigerant}$	2.713	KJ
$Q_{superheater}$	50.24	KJ
w_{pompe}	4.645	KW
$w_{turbine}$	70.64	KW
w_{utile}	65.99	KW

Tableau 3.3. Les performances de cycle Goswami

Dans la première partie on a varié la température du surchauffeur (source chaude), la fraction de l'ammoniac et gardée la pression constante pour comparé le travail utile produit par le cycle de goswami, ainsi que le rendement du cycle qui exprime la qualité de l'énergie obtenus et voici les résultats tirés par logiciel EES :

- **Partie 1**

On prend la valeur max du travail utile et sa valeur de x

T(K)	W_{utile}	X_{melange}
430	378.7	0.8
440	397	0.8
450	415.5	0.8
460	434	0.8
470	452.6	0.8
480	471.2	0.8

Tableau 3.4. La comparaison du travail totale maximum avec la température

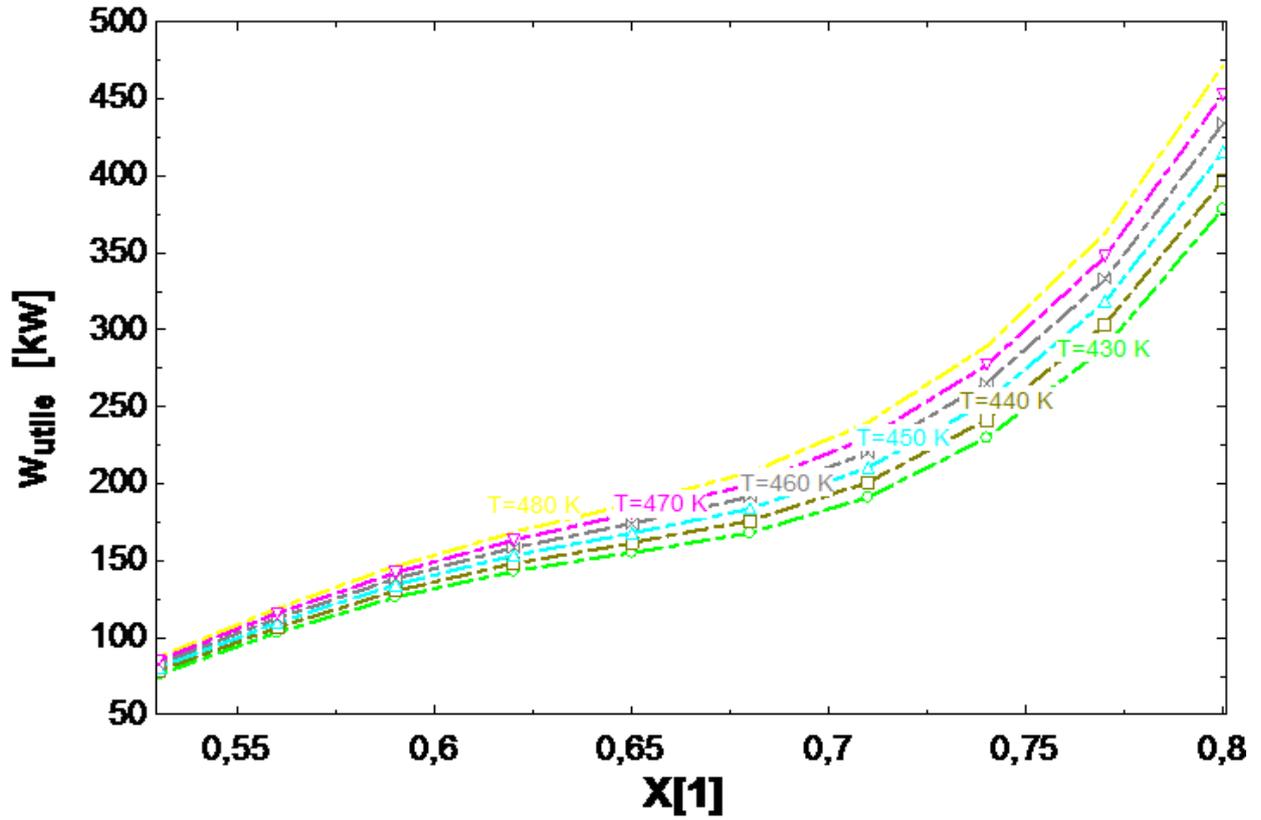


Figure 3.12. L'influence de la fraction et la température sur le travail total

• Partie 2

On a prie la valeur max du rendement utile et sa valeur de x

T(K)	η_{cyc}	$X_{mélange}$
430	0.7404	0.8
440	0.6381	0.8
450	0.555	0.8

460	0.4863	0.8
470	0.4281	0.8
480	0.3782	0.8

Tableau 3.5. La comparaison du rendement de cycle maximal de chaque température

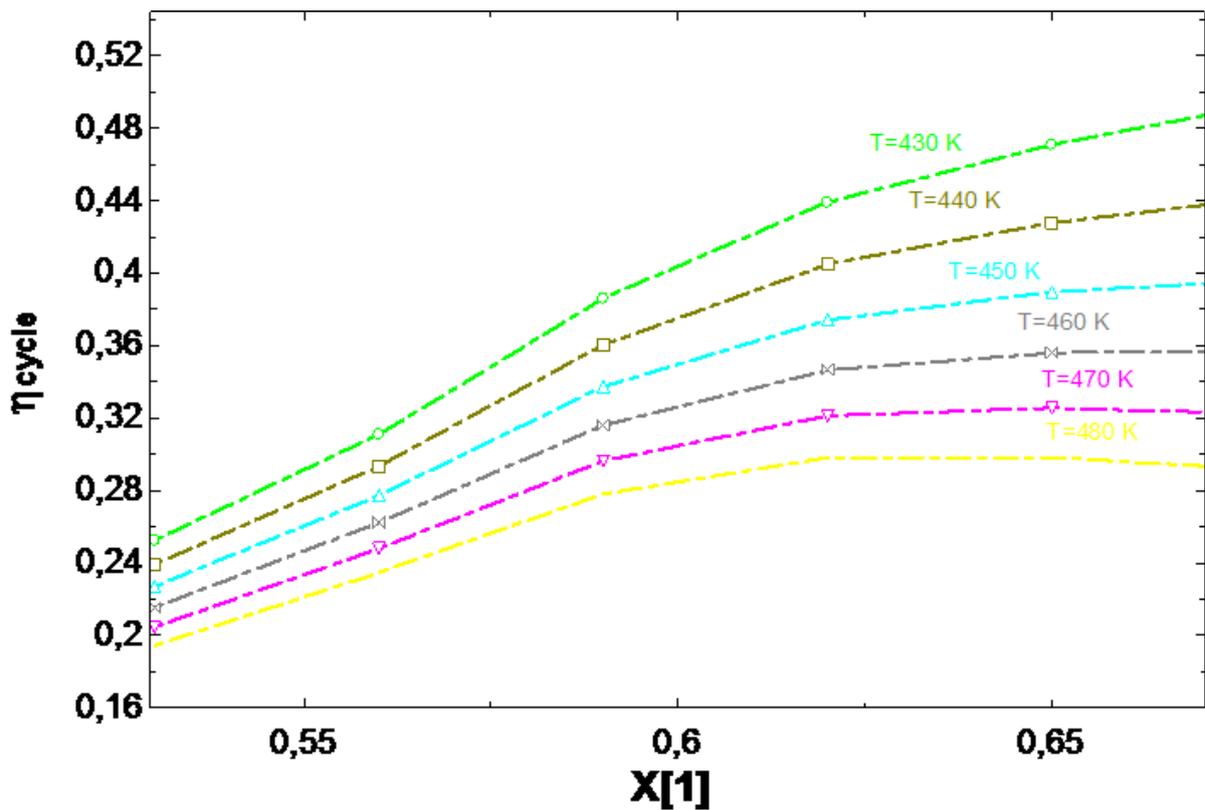


Figure 3.13. L'influence de la fraction et la température sur le rendement de cycle

- Partie 3

On a prie la valeur max du travaille utile et sa valeur de **P** (bar)

T(K)	P(bar)	W_utile
430	40	68.2
440	40	70.44
450	40	72.65
460	40	74.87
470	40	77.11
480	40	79.37

Tableau 3.6. La comparaison du travaille de cycle maximal de chaque température

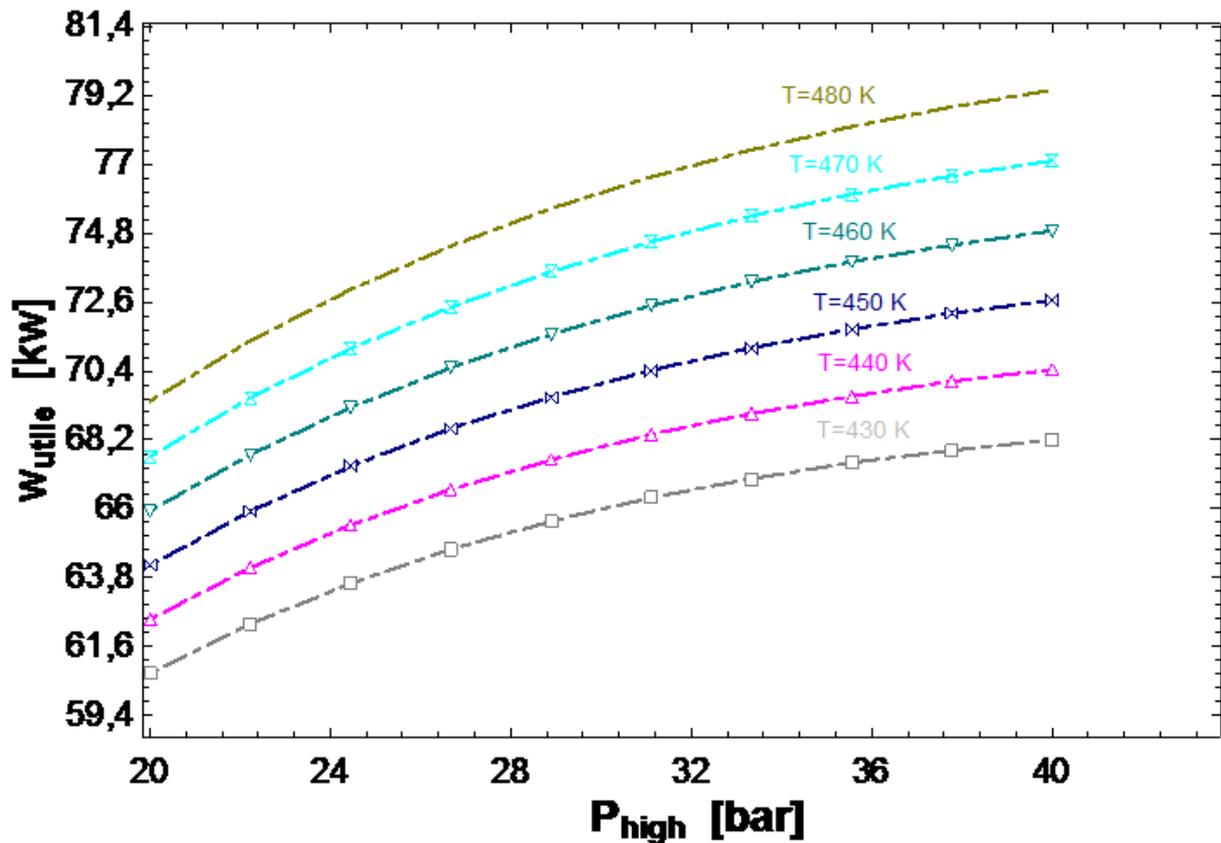


Figure 3.14. Le travail total en fonction de la pression et la température

3.5.1 Discuter les résultats obtenus

D'après les résultats obtenus on remarquée que le travail augmente lorsque on augmente la pression, aussi que chaque température a un certain intervalle pour varié la pression et chaque fois on augmente la température la pression doit être élevé.

On conclure que le travail total produit par le cycle de goswami dépend de la pression d'entrée de la turbine

- **Partie 1 :** Le travail total en fonction de fraction d'ammoniac et la température

Nous remarquons que le travail utile augmente par apport a la fraction d'ammoniac et pour un certaine température

- **Partie 2 :** Le rendement de cycle en fonction de la fraction d'ammoniac et la température.

. On remarque que lorsque on fixe la température et la pression, on remarque que rendement augmente en fonction de la l'accroissement de la fraction d'ammoniac. Pour des

températures importantes du surchauffeur, le rendement est plus bas par aux températures de surchauffe faibles, car le rendement est inversement proportionnel (Équation 12) à la quantité de chaleur absorbée par le surchauffeur.

- **partie 3** : Le travail en fonction de la température et la pression.

Dans cette partie on va varier la pression entre **20bar et 40bar** Ce qui nous montre que le travail utile augmente en fonction de la pression.

3.6 Conclusion

Après l'étude que nous avons menée en utilisant le Logiciel EES, les résultats obtenus montrent que le rendement et le travail utile varient en fonction de la fraction d'ammoniac, la température et la pression.

Et le cycle de goswami donne de meilleurs rendements à base et moyennes températures.

Conclusion Générale

Dans le cadre de la préparation du mémoire de fin d'études, notre projet de master a porté sur les cycles thermodynamiques , en se basant sur le cycle goswami , dans le but d'avoir un meilleur rendement globale

Ce travail qui a été très intéressant pour nous, il nous a permis de découvrir le monde professionnel et de développer nos connaissances .

Nous avons tout d'abord commencé par faire une étude théorique sur les cycles thermodynamique et précisément sur le cycle goswami

Ensuite on a entré dans les détails de ce cycle et faire ces calculs avec le logiciel qui nous a donné les diagrammes avec ces tableaux.

Durant toute la période, nous avons eu la possibilité de découvrir le cycle goswami paramétrant la production de puissance et de froid. Mais le plus important pour nous, c'était de voir comment manipuler le logiciel EES.

La réalisation de ce projet nous a donc poussée à faire appel à toutes nos connaissances, ce qui nous a permis d'appréhender les difficultés que les ingénieurs rencontrent tous les jours dans la vie professionnelle tout en prenant des initiatives personnelles.

Références Bibliographiques

[1]- Ministère de l'environnement (2016), Volet 1 : [Synthèse de la PPE](#) ; volet 2 : [Volet relatif à l'offre d'énergie](#) , (PDF, 83 pages) ; et volet 3 : [Stratégie de développement de la mobilité propre](#) . (consulté le 25 février 2019).

[2]- [PDF]S. Marchandise et V. Lemort, Institut de Conseil et d'Études en Développement Durable (ICEDD), pour le Service public de Wallonie, « Organic Rankine Cycle : Récupération de chaleur fatale pour la production d'électricité dans l'industrie et applications en Énergie Renouvelable » 2014. (consulté le 25 février 2019).

[3]- Décret n°1014-1363 du 16 novembre 2014. (consulté le 25 février 2019).

[4]- [Chiffres clés Climat, air et énergie de l'ADEME, édition 2016](#). (consulté le 25 février 2019).

[5]- Ressources et consommation énergétiques mondiales

https://fr.wikipedia.org/wiki/Ressources_et_consommations%C3%A9nerg%C3%A9tiques_mondiales(consulté le 25 février 2019).

[6]- [U.S. Sets Higher Fuel Efficiency Standards](#) [archive], Bill Vlasic, [The New York Times](#), 28 août 2012 (consulté le 25 février 2019).

[7]- [Récupérer la chaleur des moteurs](#) [archive], Jean-Philippe Braly , Journal du CNRS, mars 2010 (archive seulement, consultée le 25 février 2019).

[8]- [Cogénération : production combinée de chaleur et d'électricité](#) , sur le site [clarke-energy.com](#). (consulté le 27 février 2019).

[9] R. A. Victor, J.-K. Kim, and R. Smith, "Composition optimisation of working fluids for Organic Rankine Cycles and Kalina cycles," *Energy*, vol. 55, pp. 114-126, 2013. (Consultate le 17/05/2019).

[10]<http://vganapathy.tripod.com/kalina.html> Overview of the Kalina cycle (Consultate le 17/05/2019).

[11] <http://www.wasabienergy.com/portfolio/globalgeothermal.aspx> (consulté le 17/05/2019).

[12] Xinxin Zhang, A review of research on the Kalina cycle, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 16 (2012) 5309-5311 (consulté le 17/05/2019).

[13] kalina cycle. Dipak K. Sarkar, in [Thermal Power Plant](#), 2015

<https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/kalina-cycle>(consulté le 31/05/2019).

E. Wang, Z. Yu / *Applied Energy* 180 (2016) 834–848 (disane) (consulté le 17/05/2019).

[14] Renaud GICQUEL , "la thermodynamique appliqué aux systèmes énergétiques", Cours Ecole des Mines de Paris (Mines ParisTech)

Nice Area, France <https://direns.mines-paristech.fr/Sites/Thopt/fr/co/cycles->

[orc.html?fbclid=IwAR0ryvq4d4Z3MXLDCrs4Rh1R6bbHa37oxaRqnGAwHITFEZs2fuFuggSOXXI](https://direns.mines-paristech.fr/Sites/Thopt/fr/co/cycles-orc.html?fbclid=IwAR0ryvq4d4Z3MXLDCrs4Rh1R6bbHa37oxaRqnGAwHITFEZs2fuFuggSOXXI) (consulté le 30/05/2019).

[15] Liu, H., Y. Shao, and J. Li, A biomass-fired micro-scale CHP system with organic Rankine cycle (ORC) –

Thermodynamic modelling studies. *Biomass and Bioenergy*, 2011. 35(9): p. 3985-3994.

(consulté le 20/05/2019)

[16] Munawar Karimi "A Review of Organic Rankine, Kalina and Goswami Cycle"

https://www.researchgate.net/publication/283302991_A_Review_of_Organic_Rankine_Kalina_and_Goswami_Cycle(consulté le 2/06/2019).

[17] Johnson K. M., Testimony on the U.S. Department of Energy's (DOE's) Programs for Developing Water-efficient Environmentally-sustainable Energy-Related Technologies.

(consulté le 2/06/2019).

[18] R. DiPippo Second Law assessment of binary plants generating power from low-temperature geothermal fluids

Geothermics, 33 (2004), pp. 565-586 (consulté le 30/05/2019).

[19] L. Gerber, F. Marechal Environomic optimal configurations of geothermal energy conversion systems: application to the future construction of Enhanced Geothermal Systems in Switzerland

Energy, 45 (2012), pp. 908-923(consulté le 30/05/2019).

[20] C.E. Campos Rodriguez, J.C. Escobar Palacio, O.J. Venturini, E.E. Silva

Lora, V.M. Cobas, D.M. Santos, *et al.* Exergetic and economic comparison of ORC and Kalina cycle for low temperature enhanced geothermal system in Brazil

Appl Therm Eng, 52 (2013), pp. 109-119(consulté le 30/05/2019).

[21] A. Coskun, A. Bolatturk, M. Kanoglu Thermodynamic and economic analysis and optimization of power cycles for a medium temperature geothermal resource

Energy Convers Manage, 78 (2014), pp. 39-(consulté le 31/05/2019).

[22] Société Française de Chimie . Développement des ORC .

<https://journals.openedition.org/histoire-cnrs/1358> (consulté le 11/06/2019).

[23] R. V. Padilla, G. Demirkaya, D. Y. Goswami, E. Stefanakos, and M. M. Rahman, "Analysis of Power and Cooling Cogeneration using Ammonia-Water Mixture," *Energy*, vol. 35, pp. 4649-4657, 2010. (consulté le 06/06/2019).

[24] M. Jonsson, "Advanced Power Cycles with Mixtures as the Working Fluid," Doctoral Thesis, Department of Chemical Engineering and Technology, Royal Institute of Technology (KTH), Stockholm, Sweden, 2003. (consulté le 06/06/2019).

[25] F. Xu, D. Yogi Goswami, and S. S. Bhagwat, "A Combined Power/Cooling Cycle," *Energy*, vol. 25, pp. 233-246, 2000. (consulté le 06/06/2019).

[26] Somayaji, C., 2008. "First and second law analysis of Organic Rankine Cycle". PhD thesis, Mississippi State University. . (consulté le 06/06/2019).

[27] Goswami D.Y. (1995). Solar thermal power: status of technologies and opportunities for research. *Proc. 2nd ASME-ISHMT Heat and Mass Transfer Conf.* Tata- McGraw Hill, New Delhi India, 57-60. (consulté le 06/06/2019).

[28] HYDROXYDE D'AMMONIUM (solution 10% - 35%) [\[archive\]](#), fiche(s) de sécurité du Programme International sur la Sécurité des Substances Chimiques [\[archive\]](#) (consulté le 06/06/2019).

[29] ABC clim E-formation, froid, climatisation www.abcclim.net/caracteristiques-r-717-ou-ammoniac.ht(consulté le 06/06/2019).