

UNIVERSITE ASSANE SECK DE ZIUNCHOR



UFR SCIENCES ET TECHNOLOGIES



Département de physique

Mention : Physique et Applications

Mémoire de MASTER

Spécialité : Énergies Renouvelables et Efficacité Énergétique

Option : Energie Solaire et Bioénergie

**ANALYSE ENERGETIQUE D'UN SYSTEME SOLAIRE
THERMODYNAMIQUE COMBINE ORC/ACS POUR LA
PRODUCTION D'ELECTRICITE ET DE FROID**

Présenté et soutenu publiquement par :

Sokhna Khady FALL

Le 02/08/2024 devant la commission d'examen composé de :

Nom Prénom	Grade	Qualité	Etablissement
NDIAYE Lat Grand	Professeur Titulaire	Président	UASZ
TINE Modou	Maitre-Assistant	Rapporteur	UASZ
SY Mouhamadou	Maitre-Assistant	Examineur	UASZ
THIAO Serigne	Maitre-Assistant	Encadrant	UASZ
KOBOR Diouma	Professeur Titulaire	Directeur de Mémoire	UASZ

DEDICACES

Par la grâce d'ALLAH, je dédie ce modeste travail à Ma Badiène, Homonyme et Tante paternelle, Sokhna Khady FALL Yaarame ; celle qui m'a éduquée, élevée et instruite.

REMERCIEMENTS

Je rends grâce à ALLAH, le Tout Puissant, pour tous les bienfaits qu'il m'a accordé, ALHAMDOULILLAH.

Je remercie chaleureusement mon encadrant M. Serigne THIAO et mon Directeur de Mémoire M. Diouma KOBOR pour leur patience, pour le temps qu'ils m'ont consacré, pour leur aide inestimable, pour avoir supervisé mes recherches et pour tout ce que j'ai appris à leur côté.

J'exprime ma profonde gratitude au Président du jury M. Lat Grand NDIAYE et aux membres du jury M. Modou TINE et M. Mouhamadou SY pour avoir accepté de juger mon travail de manière approfondie et rigoureuse.

J'adresse mes sincères remerciements à M. Serigne Salihou MBACKE, M. Joseph Sambasene DIATTA, M. Lat Grand NDIAYE, M. Mouhamadou Lamine MBAYE, M. Samo DIATTA et M. Alioune Badara DIENG pour leur assistance, leurs indications et leurs conseils inestimables.

Je tiens à remercier M. Moustapha THIAME, M. Boubacar BASSE, M. Habib B. DIENG, M. Gorgui GUEUYE, Dr Amadou Papa K. KOITA, M. Mouhamadou L. SAMB (UIDT), M. Ababacar THIAM (UAD) ainsi que l'ensemble du personnel académique et administratif du département de Physique de l'Université Assane Seck de Ziguinchor (UASZ) pour m'avoir soutenue, faciliter mes recherches, et pour m'avoir offert une formation supérieure de qualité.

Mes remerciements s'adressent aussi à Mamadou SOW, Birame THIAW, Souleymane THIAM et à Mahamat Batran MOUTA, pour leur aide extrêmement précieux.

Un grand merci à mes camarades de promotion pour leur gentillesse, convivialité et enthousiasme.

Un merci spécial à mes frères Moustapha FALL et Mouhamed FALL, à mes sœurs Mame Maty FALL, Ami FALL et Mame Diarra FALL ainsi qu'à toute ma famille pour leur soutien inestimable.

Je remercie particulièrement, du fond du cœur, ma tante et homonyme Sokhna Khady FALL.

Je remercie très sincèrement mes professeurs M. Demba THIARE, M. Moustapha THIAM, et mes amies Mame Faty MBACKE, Baly SECK ainsi qu'à tous ceux qui m'ont, de près ou de loin, soutenue et assistée.

Et enfin, je rends vivement hommage à mes défunts parents qui n'ont jamais cessé de prier pour ma réussite et mon bien-être, je prie ALLAH, de les accueillir dans son Paradis céleste.

RESUME

Dans le contexte économique, énergétique et environnemental actuel, la mise en œuvre de technologies utilisant les énergies renouvelables comme source de production d'électricité et de froid ; offre un double avantage (la réduction de la pollution et du coût des combustibles fossiles). Le potentiel d'ensoleillement au Sénégal est l'un des meilleurs potentiels solaires du monde avec une irradiation variant du Sud au Nord entre 1850 et 2250 kWh/m²/an. Cependant l'énergie solaire est encore trop peu utilisée au Sénégal. A cet effet, le pays s'est déjà lancé dans un ambitieux programme, destiné à augmenter la part des énergies renouvelables dans la diversification du mix énergétique. Ainsi les systèmes fonctionnant au cycle organique de Rankine (ORC) et au système de refroidissement par absorption (ACS), constituent des technologies innovantes et durables pour l'exploitation de l'énergie solaire ; et pourraient jouer un rôle clé dans la politique de diversification du mix énergétique au Sénégal.

Dans ce présent travail, l'analyse thermodynamique d'un système solaire combiné ORC et ACS pour la production d'énergie électrique et de froid est exécutée numériquement à l'aide du logiciel dénommé Solveur d'équation en Ingénierie (EES : Engineering Equation Solver). Le HFC-R245fa et le mélange eau-bromure de lithium sont utilisés comme fluide de travail respectivement pour l'ORC et l'ACS. D'après les résultats de la simulation les paramètres tels que la température et la pression de fonctionnement des différents composants du système ont une grande influence sur les performances du système. Ces résultats seront présentés et discutés dans ce manuscrit.

Mots clés : Analyse énergétique, Electricité, Fluide de travail, Froid, Simulation, Système solaire combiné ORC/ACS.

ABSTRACT

In the current economic, energy and environmental context, the implementation of technologies using renewable energies as a source of electricity and cold production; offers a double advantage (reducing pollution and the cost of fossil fuels). The sunshine potential in Senegal is one of the best solar potentials in the world with irradiation varying from South to North between 1850 and 2250 kWh/m²/year. However, solar energy is still too little used in Senegal. To this end, the country has already embarked on an ambitious program, intended to increase the share of renewable energies in the diversification of the energy mix. Thus, systems operating on the organic Rankine cycle (ORC) and the absorption cooling system (ACS), constitute innovative and sustainable technologies for the exploitation of solar energy; and could play a key role in the policy of diversification of the energy mix in Senegal.

In this present work, the thermodynamic analysis of a combined ORC and ACS solar system for the production of electrical energy and cooling is performed numerically using the software called Engineering Equation Solver (EES). HFC-R245fa and water-lithium bromide mixture are used as working fluids for ORC and ACS respectively. According to the simulation results, the parameters such as operating temperature and pressure of the different components of the system have a great influence on the system performance. These results will be presented and discussed in this manuscript.

Keywords: Cooling, Electricity, Energy analysis, ORC/ACS combined solar system, Simulation, Working fluid.

TABLE DES MATIERES

DEDICACES	i
REMERCIEMENTS	ii
RESUME.....	iii
ABSTRACT	iv
LISTE DES FIGURES	vii
NOMENCLATURE.....	viii
INTRODUCTION GENERALE.....	1
CHAPITRE I : REVUE BIBLIOGRAPHIQUE DE LA MACHINE ORC ET DE LA MACHINE FRIGORIFIQUE A ABSORPTION	3
Introduction	4
I. Revue bibliographique de la machine ORC.....	4
I.1 Définition	4
I.2 Le cycle de Rankine à vapeur	4
I.2.1 Définition	4
I.2.2 Principe de fonctionnement du cycle de Rankine à vapeur	4
I.3 Historique de la machine ORC	6
I.4 Principe de fonctionnement du cycle organique de Rankine (ORC)	6
I.5 Les applications de la machine ORC	7
I.6 Sélection du fluide de travail dans l'ORC.....	13
I.7 Quelques travaux réalisés sur les ORC	15
II. Revue bibliographique de la machine frigorifique a absorption.....	16
II.1 Définition.....	16
II.2 Historique de la machine frigorifique à absorption	17
II.3 Le système de refroidissement classique	17
II.3.1 Définition.....	17
II.3.2 Fonctionnement de la machine frigorifique à compression	18
II.4 La production de froid solaire par sorption.....	19
II.4.1 Le froid solaire par adsorption.....	19
II.4.2 Principe de fonctionnement de la machine frigorifique à absorption	20
II.5 Fluides de travail utilisés dans les ACS.....	21
II.5.1 Critère de sélection des fluides de travail	21
II.5.2 Les différents fluides de travail utilisés dans les ACS.....	23

II.6 Etat de l'art des machines frigorifiques à absorption.....	25
II.7 Quelques travaux réalisés sur les machines frigorifiques à absorption.....	26
II.9 Evolution et prévisions du marché des refroidisseurs à absorption.....	28
Conclusion.....	29
.....	30
CHAPITRE II : ANALYSE ENERGETIQUE DU SYSTEME THERMODYNAMIQUE COMBINE ORC/ ACS	30
Introduction.....	31
I. Présentation du logiciel EES.....	31
II. Sélection des fluides de travail pour le système combiné ORC-ACS	32
III. Description du système	32
IV. Analyse énergétique.....	33
Conclusion.....	36
CHAPITRE III : RESULTATS ET DISCUSSIONS	37
Introduction.....	38
I Analyse thermodynamique du système ORC	38
I.1 Influence de la pression du condenseur sur la puissance de la turbine et celle du condenseur	38
II Analyse therm.....	40
II.1 Evolution des échanges thermiques des principaux composants de l'ACS en fonction de la température d'absorption.....	40
II.2 Variation du COP en fonction de la température du condenseur.....	41
II.3 Variation du COP en fonction de la température d'évaporation.....	42
II.4 Impact du facteur de circulation sur la température de l'absorbeur.....	43
III. Effet de la température de la source de chaleur sur le rendement de l'ORC et le COP de l'ACS	43
Conclusion.....	44
CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES	45
BIBLIOGRAPHIE	Erreur ! Signet non défini.

LISTE DES FIGURES

Figure I.1 : Fonctionnement du cycle de Rankine	5
Figure I.2 : Diagramme T-S du cycle de RANKINE à vapeur	6
Figure I.3 : Schéma et Diagramme T-S d'un cycle organique de Rankine (typique).....	7
Figure I.4 : Principe de fonctionnement d'un système ORC géothermique	8
Figure I.5 : Schéma d'un système ORC de production combinée de chaleur et d'électricité à partir de la biomasse.....	9
Figure I.6 : Schéma de principe d'un système solaire ORC.....	10
Figure I.7 : L' ORC ; de la chaleur industrielle fatale à l'électricité	11
Figure I.8 : Schéma du système OTEC appliqué à l'ORC pour la production d'électricité	12
Figure I.9 : Les trois types de fluides de travail existante : "sec", isentropique et "humide" .	14
Figure I.10 : Liste de fluides de travail utilisables selon la température de la source chaude	15
Figure I.11 : Cycle de la réfrigération par compression.....	19
Figure I.13 : Principe de fonctionnement d'une machine frigorifique à adsorption.....	20
Figure I.14 : Schéma de principe d'une machine à absorption fonctionnant au H ₂ O/LiBr....	21
Figure II.1 : Schéma simplifié du système combiné ORC et ACS.....	31
Figure II.2 : Schéma simplifié du système combiné ORC et ACS	33
Figure III.1 : Variation de la puissance de la turbine et du condenseur en fonction de la pression du condenseur.....	38
Figure III.2 : Evolution de la puissance de la turbine, de la pompe, de l'évaporateur et du rendement ORC en fonction de la température de condensation de l'ORC.....	39
Figure III.3 : Effet de l'augmentation du débit massique du fluide de travail ORC sur le rendement de l'ORC.....	40
Figure III.4 : Variations des échanges thermiques des principaux composants de l'ACS en fonction de l'évolution température d'absorption	41
Figure III.5 : Variation du COP en fonction de la température du condenseur.....	42
Figure III.6 : Variation du COP en fonction de la température de l'évaporateur	42
Figure III.7 : Impact du facteur de circulation sur la température de l'absorbeur.....	43
Figure III.7 : Influence de la température de la source de chaleur sur le rendement de l'ORC et le COP de l'ACS	44

NOMENCLATURE

Symbole	Description	Unité
α_1, α_2	Coefficients de déperdition thermique	$W.m^{-2}.K^{-1}$
ACS	Absorption cooling system (Système de refroidissement par absorption)	---
COP	Coefficient de performance	---
EES	Solveur d'équations d'ingénierie	---
f	Taux de circulation	---
G	Intensité du rayonnement solaire	$W.m^{-2}$
h	Enthalpie	$J.kg^{-1}$
H₂O	Formule chimique de l'eau	---
IHE	Echangeur de chaleur interne	---
LiBr	Formule chimique du Bromure de lithium	---
ṁ	Débit massique	$kg.s^{-1}$
NH₃	Formule chimique de l'ammoniac	---
ORC	Organic Rankine cycle (Cycle organique de Rankine)	---
Q̇	Puissance thermique	W
SHE	Echangeur de chaleur à solution	---
T	Température	K
T_m	Température moyenne du fluide caloporteur	K
Ẇ	Puissance mécanique	W

Caractères Grecs

η	Rendement
η_o	Rendement optique

Indices

a	Ambiant
Ab	Absorbeur
c	Capteur solaire thermique
cd	Condenseur
ec	Echangeur de chaleur
ev	Evaporateur
e,s	Entré, sortie du fluide de travail
fc	fluide caloporteur
G	Générateur
m	Moyenne
o	Optique
P	Pompe
p	Solution pauvre en réfrigérant
r	Solution riche en réfrigérant
ref	Réfrigérant
T	Turbine

INTRODUCTION GENERALE

La consommation mondiale d'énergie a atteint un niveau jamais égalé au paravent. Cela est dû principalement à l'industrialisation, à la croissance démographique et au développement de la climatisation. Ceci a entraîné une forte dépendance aux sources d'énergies conventionnelles (charbon, pétrole, gaz naturel...) qui sont à l'origine de sérieux problèmes environnementaux tels que le réchauffement global de la planète, les émissions de gaz nocifs à effet de serre et la destruction de la couche d'ozone, qui menacent la sécurité des êtres vivants et l'avenir du monde entier. Aujourd'hui, le concept de transition énergétique, la politique de promotion du recours aux énergies vertes (solaire, éolienne, hydraulique, géothermique, biomasse) jugées moins polluantes, encourage fortement l'utilisation de systèmes durables pour la production d'énergie propre.

L'énergie solaire représente la source d'énergie renouvelable la plus répandue et la plus largement acceptée, en raison de sa propreté, de sa facilité d'accès, de sa durabilité et de son énorme potentiel. En effet, le Sénégal dispose d'un potentiel d'ensoleillement pratiquement répartie sur toute son étendue avec en moyenne 5,5 kWh/m²/jour au sol, d'énergie solaire brute (l'insolation annuelle représente environ 15 millions de fois la consommation d'énergie totale du pays). Selon l'atlas solaire mondial, il est considéré comme l'un des pays les plus ensoleillés du monde [1].

Paradoxalement, au Sénégal, l'énergie solaire est trop peu utilisée en comparaison des services qu'elle pourrait rendre : l'électricité y est produite à 80 % à partir de ressources d'origine fossiles importées (fuel lourd, charbon, gasoil); ce qui rend le pays particulièrement vulnérable aux chocs pétroliers [2]. Le taux d'électrification rurale et urbaine sont respectivement de 60% et de 85% ; de plus la chaîne du froid y est presque inexistante, il en résulte d'importantes pertes de produits agricoles et halieutiques par faute d'entrepôts frigorifiques adéquats [3]. A cet effet, les autorités sénégalaises ont adopté une stratégie de diversification du mixte énergétique, fixant à 40% la part des énergies renouvelables d'ici 2035, de plus le Sénégal a l'intention de réduire conditionnellement ses émissions de gaz à effet de serre (GES) d'au moins 23 % d'ici 2030 [4].

Dans ce contexte, les technologies durables fonctionnant au cycle organique de Rankine (ORC: organic Rankine cycle) et au refroidissement par absorption (ACS : absorption cooling system) pourraient jouer un rôle clé dans la politique de transition énergétique, et de l'augmentation de la part des énergies renouvelables dans le mixte énergétique au Sénégal, car elles sont bien adaptées à l'application de l'énergie solaire pour la production d'électricité et la production de

froid décentralisées. Notre travail concerne l'analyse énergétique d'un système solaire thermodynamique combinée ORC et ACS pour la production d'énergie électrique et de froid :

- le premier chapitre présente l'état de l'art des systèmes ORC et ACS ;
- le second chapitre aborde l'analyse énergétique d'un système combiné ORC et ACS ;
- le troisième chapitre est consacré à l'interprétation des résultats et aux discussions.

**CHAPITRE I : REVUE BIBLIOGRAPHIQUE DE LA MACHINE ORC ET DE LA
MACHINE FRIGORIFIQUE A ABSORPTION**

Introduction

La transition énergétique, issue de la limitation des ressources fossiles et des émissions de gaz à effet de serre (GES), est à la base de nombreuses études sur les énergies renouvelables dans différentes applications. La combinaison d'un système ORC et ACS pour la production combinée d'électricité et de froid est très prometteuse dans la mesure où elle permet l'utilisation de ressources renouvelables (le solaire, la géothermie, la biomasse) et les gaz résiduels des processus industriels. Ce chapitre aborde une brève revue bibliographique des cycles organiques de Rankine (ORC) et du système de refroidissement par absorption (ACS) comportant des études sur leurs fonctionnements, leur domaines d'applications, les fluides de travail utilisés ainsi que quelques travaux de recherches réalisés dans ces deux domaines.

I. Revue bibliographique de la machine ORC

I.1 Définition

L'ORC (cycle de Rankine organique) est un type particulier de cycle de Rankine qui utilise un fluide organique comme fluide de travail au lieu de l'eau. Étant donné que le point d'ébullition du fluide organique est inférieur à celui de l'eau. Le cycle ORC peut être utilisé avec divers types de sources de chaleur à basses températures telles que l'énergie géothermique, l'énergie solaire, l'énergie de la biomasse et la chaleur fatale des procédés industriels [5].

I.2 Le cycle de Rankine à vapeur

I.2.1 Définition

Le cycle de Rankine ou cycle de Rankine à vapeur est un processus largement utilisé dans les centrales électriques classiques. Dans ce mécanisme, un combustible est utilisé pour produire de la chaleur à l'intérieur d'une chaudière, transformant l'eau en vapeur qui se détend ensuite à travers une turbine, produisant un travail utile. Ce procédé a été mis au point en 1859 par l'ingénieur écossais William J.M. Rankine. Il s'agit d'un cycle thermodynamique qui convertit la chaleur en énergie mécanique qui est généralement transformée en électricité [6].

I.2.2 Principe de fonctionnement du cycle de Rankine à vapeur

Le cycle de Rankine fonctionne avec quatre processus thermodynamiques :

- Etape 1-2 : compression isentropique dans la pompe. Le fluide de travail (liquide) est pompé de basse à haute pression.
- Etape 2-3 : Le liquide à haute pression pénètre dans une chaudière où il est chauffé à pression constante par une source de chaleur externe pour devenir ensuite une vapeur sèche saturée.

- Etape 3-4 : détente isentropique dans la turbine. La vapeur sèche saturée passe à travers une turbine à vapeur, générant de l'énergie. D'un point de vue thermodynamique, cela abaisse la température et la pression de la vapeur.
- Etape 4-1 : rejet de chaleur dans le condenseur, procédé isobare. La vapeur humide pénètre dans un condenseur, où elle transformée en liquide saturé [7].

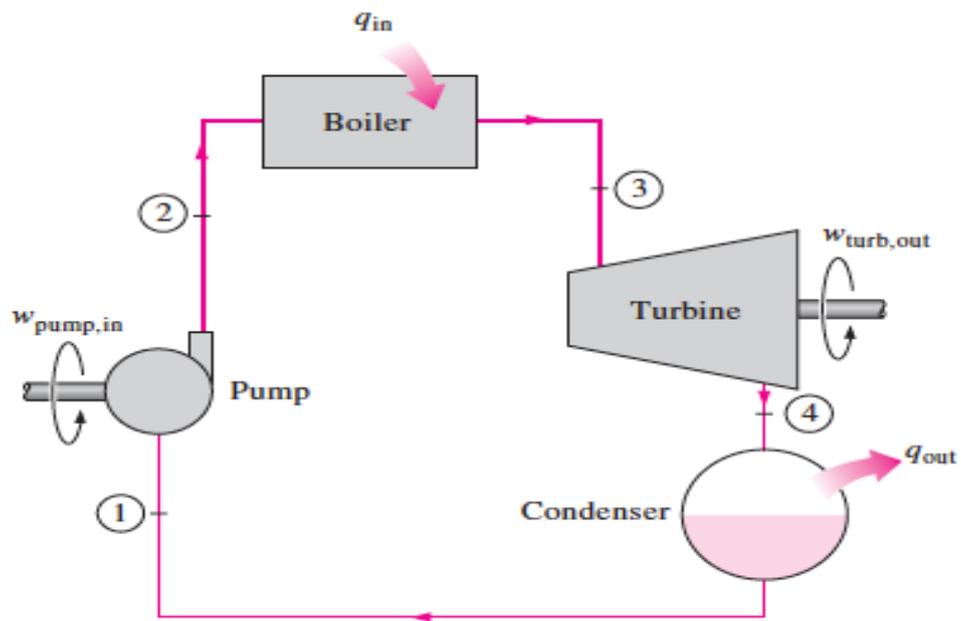


Figure I.1 : Fonctionnement du cycle de Rankine [8]

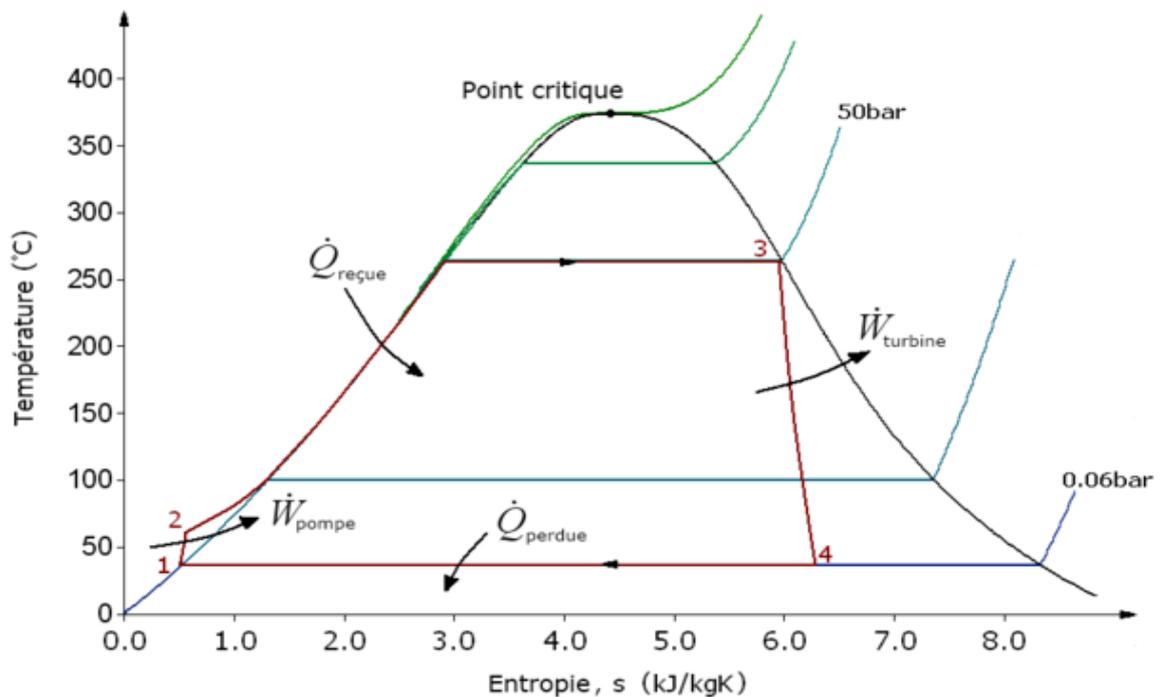


Figure I.2 : Diagramme T-S du cycle de Rankine à vapeur [5]

I.3 Historique de la machine ORC

Bien que l'idée de remplacer l'eau par un autre fluide dans les procédés thermodynamiques soit apparue avec T. Howard vers 1826, il aura fallu attendre plus d'une centaine d'années pour voir l'une des premières applications d'un ORC fonctionner avec le travail du professeur d'Amelio, sur l'utilisation d'un ORC à monochloroéthane sur une centrale solaire, en 1936. Entre 1961 et 1962, les études d'Harry Zvi Tabor et de Lucien Bronicki ont permis de développer la technologie ORC. En 1967, la première application géothermale d'un ORC fut installée dans la péninsule du Kamtchatka pour une production de 680 kW à partir d'une source basse température (80°C). Contrairement aux cycles de Rankine, utilisés dans de grosses centrales (>50 MW) avec à disposition une source chaude de haute température, les ORC permettent la récupération de chaleur basse température (<300°C). De nos jours, plus de 450 sites à cycle organique de Rankine, appelés sites ORC, sont présents dans le monde. Après une forte hausse d'installations entre les années 2000 et 2008, le nombre de sites se stabilise autour de 70 installations par année [8].

I.4 Principe de fonctionnement du cycle organique de Rankine (ORC)

Le principe est le même que le cycle de Rankine à vapeur. Un fluide de travail est pressurisé par la pompe et envoyé à l'évaporateur où il absorbe la chaleur en s'évaporant. Cette vapeur à

haute pression est détendue dans une turbine, en produisant un travail mécanique qui est ensuite converti en électricité grâce à un générateur électrique. Une fois détendue, la vapeur est ensuite refroidie et liquéfiée au condenseur avant d'être à nouveau pompée. La seule différence consiste dans le fluide utilisé, tandis que la TAV utilise de l'eau, la machine ORC quant à elle, utilise un fluide organique [9].

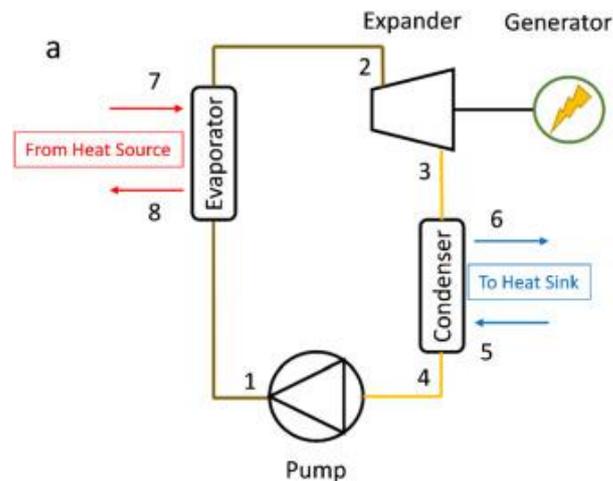


Figure I.3 : Schéma (a) et Diagramme T-S (typique) [10]

I.5 Les applications de la machine ORC

La technologie ORC trouve ses applications dans différents domaines tels que la géothermie, la biomasse, le solaire thermique et la récupération de la chaleur fatale [11]:

I.5.1 L'ORC appliqué à la géothermie

La géothermie est l'exploitation de chaleur contenue dans l'écorce terrestre, pour produire de la chaleur ou de l'électricité. Pour cela une circulation d'eau, qui sert de fluide caloporteur, est un préalable. Cette circulation peut être naturelle, elle est dite alors hydrothermale, ou bien forcée dans des aquifères ou des réseaux de fractures [12]. Les sources de chaleur géothermiques sont disponibles sur une large gamme de températures, de quelques dizaines de degrés jusqu'à 300°C. L'énergie géothermique est généralement classée comme renouvelable et la validité de cette définition est soumise au taux d'extraction : seulement si le taux d'extraction du réservoir ne dépasse pas le taux de remplissage du réservoir [13]. Parmi les avantages de l'énergie géothermique par rapport aux autres sources d'énergies renouvelables, telles que le solaire, l'éolien ou la biomasse dénotent son énorme potentiel, sans émissions nocives, sa neutralité par rapport au climat, mais aussi son indépendance aux conditions météorologiques et saisonnières. La limite inférieure technologique pour la production d'électricité est d'environ 80°C; en dessous de cette température le rendement de conversion

devient trop faible et les centrales géothermiques ne seront pas économiques [14], [15].

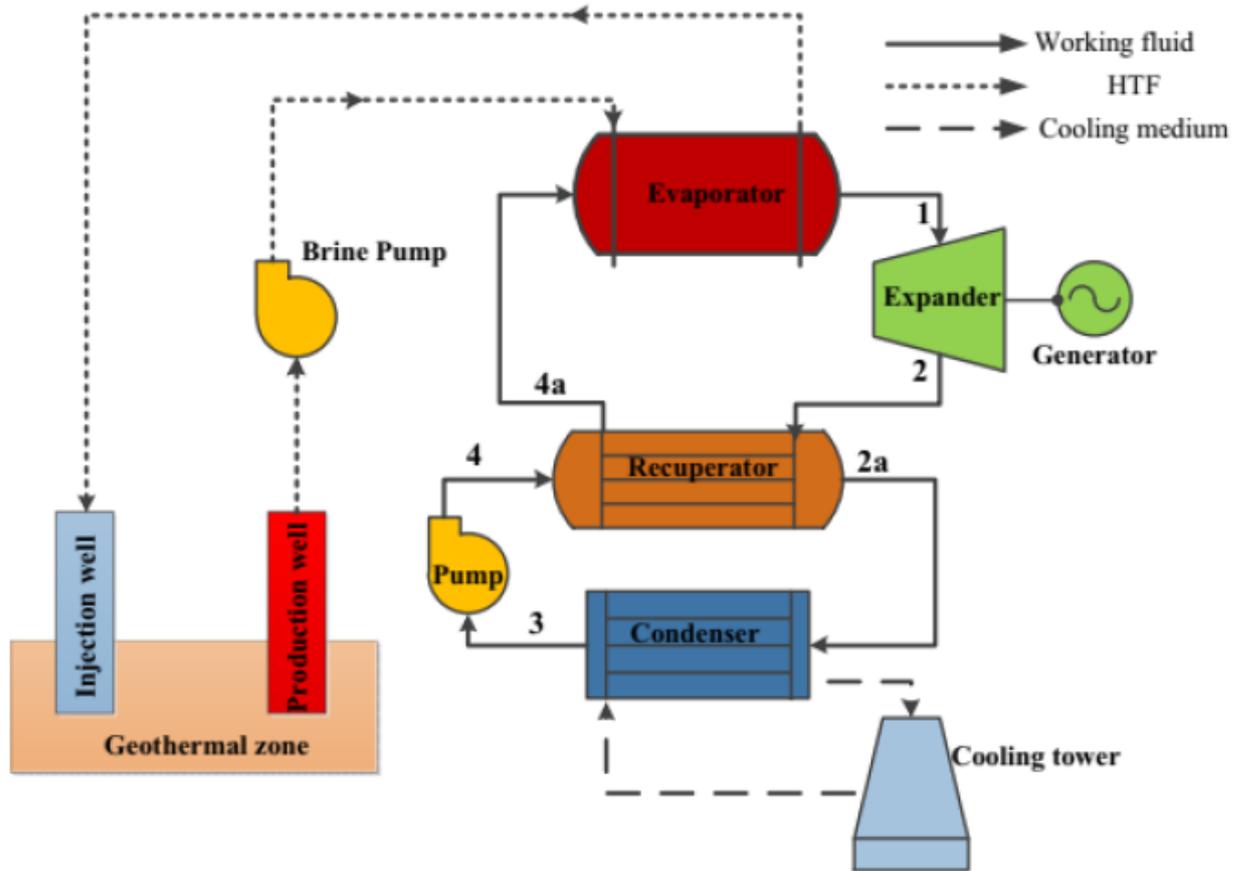


Figure I.4 : Principe de fonctionnement d'un système ORC géothermique [13]

I.5.2 Application de l'ORC à la biomasse

La biomasse est largement disponible dans beaucoup d'activités agricoles ou industrielles tels que l'industrie du bois et les déchets agricoles. Entre autres moyens, elle peut être convertie en chaleur et en électricité par combustion, à travers un cycle thermodynamique. Pour de petites unités décentralisées d'ORC appliqué à la biomasse, le coût de production de l'électricité n'est pas compétitif et la production combinée de chaleur et d'électricité est nécessaire pour assurer la rentabilité de l'investissement. Par conséquent, afin d'atteindre une efficacité de conversion énergétique élevée, les centrales de cogénération à la biomasse sont généralement pilotées par la demande en chaleur plutôt que par la demande en électricité [16].

La plupart des systèmes ORC pour la biomasse sont des cycles binaires, comme le montre la **figure I.5** : la chaleur du brûleur de biomasse est transférée via les gaz de combustion au fluide de transfert de chaleur (huile thermique), à une température variant entre 150 et 320 °C. L'huile thermique chaude est ensuite dirigée vers l'évaporateur ORC pour évaporer le fluide de travail. Ensuite, le fluide évaporé, détendu, passe à travers une IHE et est finalement condensé. Le

condenseur est utilisé pour la production d'eau chaude [17]. Ainsi l'eau provenant de la condensation du fluide peut-être valorisée dans un réseau de chauffage urbain. La plupart du temps, la récupération d'énergie pour ce type de centrale est limitée de 6 à 10 MWth, soit une production électrique de 1 à 2 MWe [18].

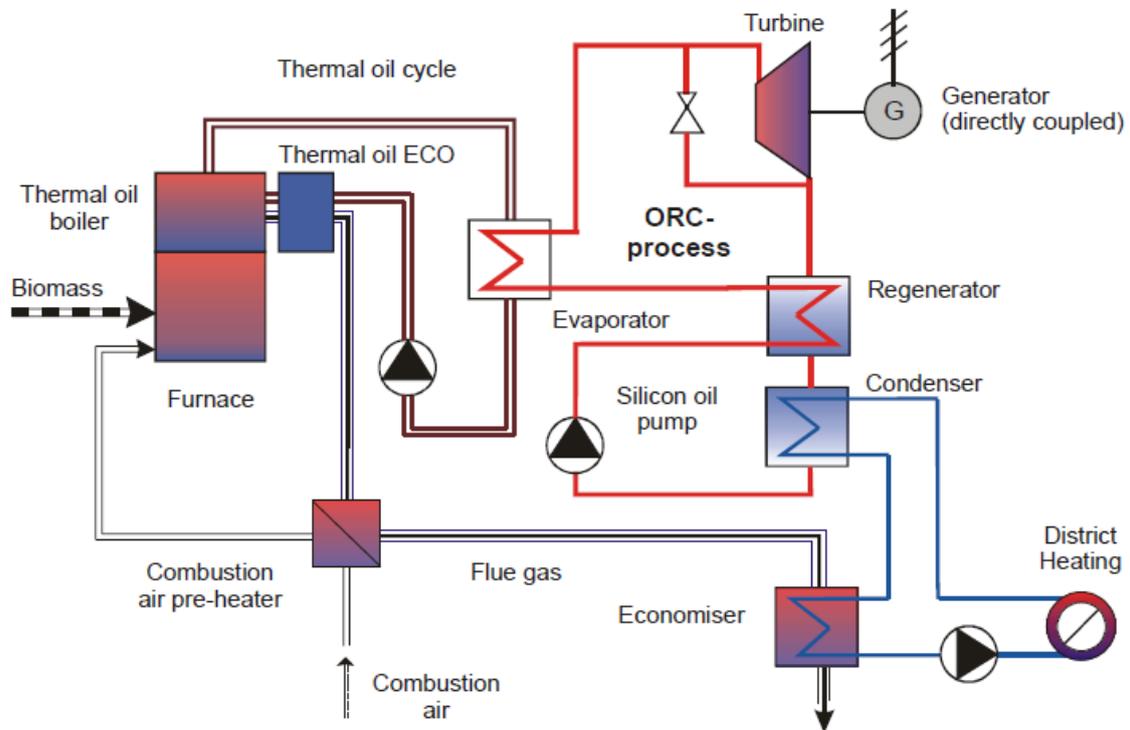


Figure I.5 : Schéma d'un système ORC de production combinée de chaleur et d'électricité à partir de la biomasse [19]

I.5.3 Application de l'ORC à l'énergie solaire

Avec environ 3,4 yottajoules ($3,4 \cdot 10^{24}$ J) d'énergie atteignant la surface de la Terre chaque année, l'énergie solaire est la source d'énergie la plus abondante [20]. Dans les centrales solaires à concentration, les rayons du soleil sont dirigés vers un collecteur par l'intermédiaire d'héliostats, ce qui permet de chauffer le fluide caloporteur. La chaleur transférée est ensuite récupérée dans un cycle thermodynamique pour générer de l'électricité. Un fluide caloporteur approprié, généralement une huile synthétique ou un sel fondu, est utilisé dans les capteurs solaires. La nature du cycle (ORC ou cycle de Rankine) dépend de la technologie utilisée. Les principales technologies de concentration solaire sont :

- les tours solaires et les collecteurs paraboliques qui sont les technologies à concentration ponctuelle ;
- les collecteurs cylindro-paraboliques et les collecteurs de Fresnel qui sont des technologies à concentration linéaire [21].

Dans les concentrations ponctuelles, la température du fluide caloporteur peut atteindre 1000°C, ce qui induit que la technologie ORC n'est pas applicable. En revanche, dans les centrales à concentration linéaire, les températures n'excèdent pas les 400°C. Il est donc tout à fait envisageable d'utiliser un ORC comme système de génération électrique, notamment dans des champs solaires de petite dimension ou à faible ensoleillement. De plus, ces centrales sont moins onéreuses que les centrales à collection ponctuelle [22]. Une application intéressante des ORC combinés à l'énergie solaire est la configuration autonome dans les régions éloignées, pour les utilisateurs finaux non connectés au réseau électrique. La mise en œuvre de ce système a été récemment proposée par STG International pour une clinique rurale au Lesotho, en utilisant des capteurs cylindro-paraboliques intégrés, du mono éthylène glycol comme fluide de transfert de chaleur et un ORC à base de R245fa d'une puissance de 3kWe [23]. La figure suivante présente le schéma du cycle de production d'énergie électrique d'un ORC solaire.

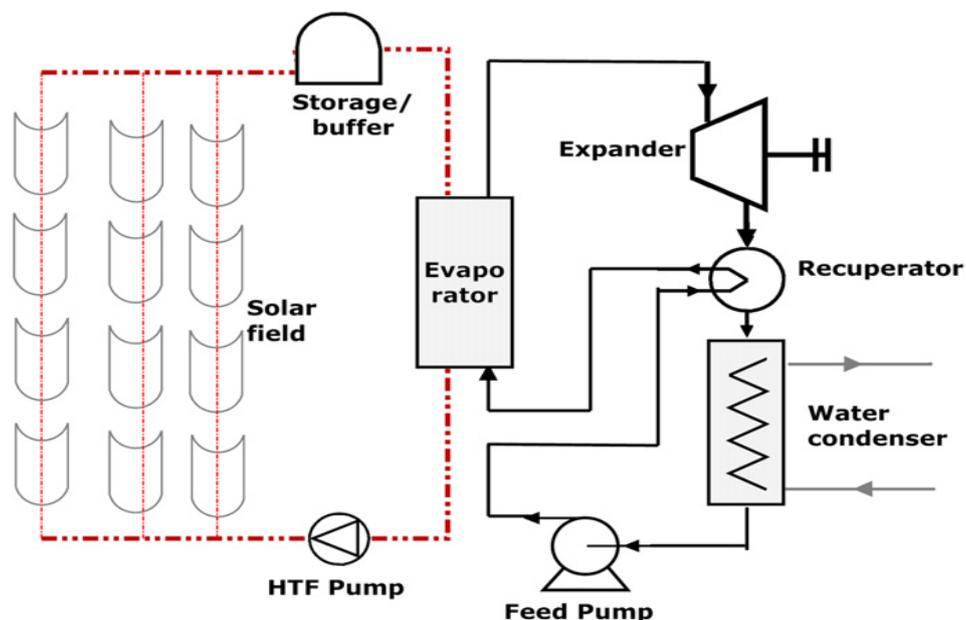


Figure I.6 : Schéma de principe d'un système solaire ORC [18]

I.5.4 L'ORC pour la récupération de la chaleur fatale industrielle et dans les moteurs à combustion interne

I.5.4.1 L'ORC pour la récupération de la chaleur fatale industrielle

Dans de nombreux processus industriels, une quantité importante de chaleur est perdue à une température inférieure à 350°C. En plus d'être perdue, cela entraîne plusieurs types de pollution. Les polluants (CO_2 , NO_x , SO_x et HC) présents dans les gaz de combustion génèrent des problèmes sanitaires et environnementaux ; ces rejets perturbent les équilibres aquatiques et a un effet négatif sur la biodiversité. La valorisation de la chaleur fatale industrielle a donc un

double enjeu: un enjeu économique et un enjeu environnemental. Elle peut en outre produire de l'électricité qui sera consommée sur place ou réinjectée dans le réseau électrique [24]. Moreira et Arrieta. [25] ont fait des études de comparaison entre l'ORC et d'autres technologies de récupération de la chaleur perdue telles que le moteur Stirling, la thermoélectricité et le cycle inversé de Brighton. Leurs résultats ont révélé que l'ORC est la technologie la plus performante pour la récupération de chaleur et la production d'électricité à partir de sources de chaleur à des températures comprises entre 200°C et 400°C. L'ORC pour la récupération de la chaleur perdue est illustré à la **figure I.7**. Le fluide de travail reçoit la chaleur des gaz d'échappement dans l'unité d'évaporation à pression constante. Ensuite, il subit une détente isentropique dans la turbine. La chaleur est ensuite transférée du fluide de travail à l'eau de refroidissement dans le condenseur à pression constante et la compression isentropique du fluide de travail se produit dans la pompe. Enfin, le fluide de travail retourne à l'unité d'évaporation et un nouveau cycle commence. L'eau chaude dans le condenseur est une autre source appropriée de récupération de chaleur. Elle peut être utilisée pour chauffer des bureaux et des bâtiments ou pour préchauffer tout autre processus si nécessaire [26].

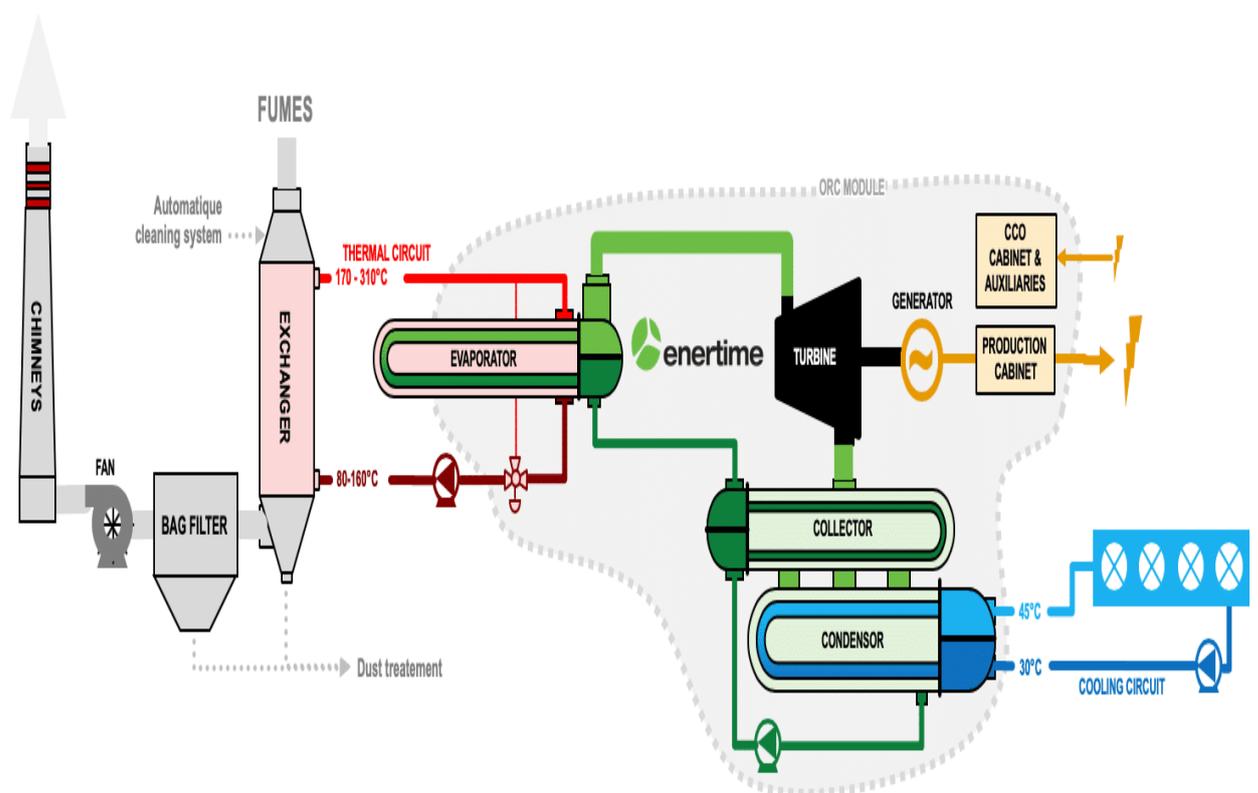


Figure I.7 : L' ORC ; de la chaleur industrielle fatale à l'électricité [27]

I.5.4.2 L'ORC appliqué au moteur à combustion interne

En moyenne, environ un tiers de l'énergie générée par le carburant est perdue dans les gaz d'échappement d'un moteur à combustion interne typique [28]. L'intégration de l'ORC au moteur à combustion interne pour améliorer l'efficacité globale du système est une pratique commerciale courante, et presque tous les producteurs d'ORC proposent cette solution dans leurs catalogues. L'utilisation de cette solution permet d'augmenter la puissance de sortie jusqu'à 10 % si la chaleur des gaz de combustion à haute température est utilisée [29].

Un autre domaine qui suscite de plus en plus d'intérêt ces dernières années est l'utilisation de l'ORC couplé à des moteurs diesel de grosse cylindrée. Le secteur du transport routier, principalement alimenté par des moteurs diesel lourds, a été estimé à 14% des émissions mondiales de gaz à effet de serre en 2014 [30].

I.5.5 Conversion de l'énergie thermique des océans à partir d'un ORC

La conversion de l'énergie thermique des océans (OTEC : ocean thermal energy conversion) est l'une des technologies énergétiques propres et durables les plus typiques, qui peut utiliser la différence de température entre l'eau de mer chaude de surface et l'eau de mer froide des profondeurs pour produire de l'énergie par l'intermédiaire de l'ORC. Le concept OTEC est étudié depuis longtemps, mais aucune application commerciale n'existe. Il souffre des problèmes de faible efficacité thermique et de coût d'investissement élevé, ainsi que des défaillances et de l'endommagement du tube profond [31], [32].

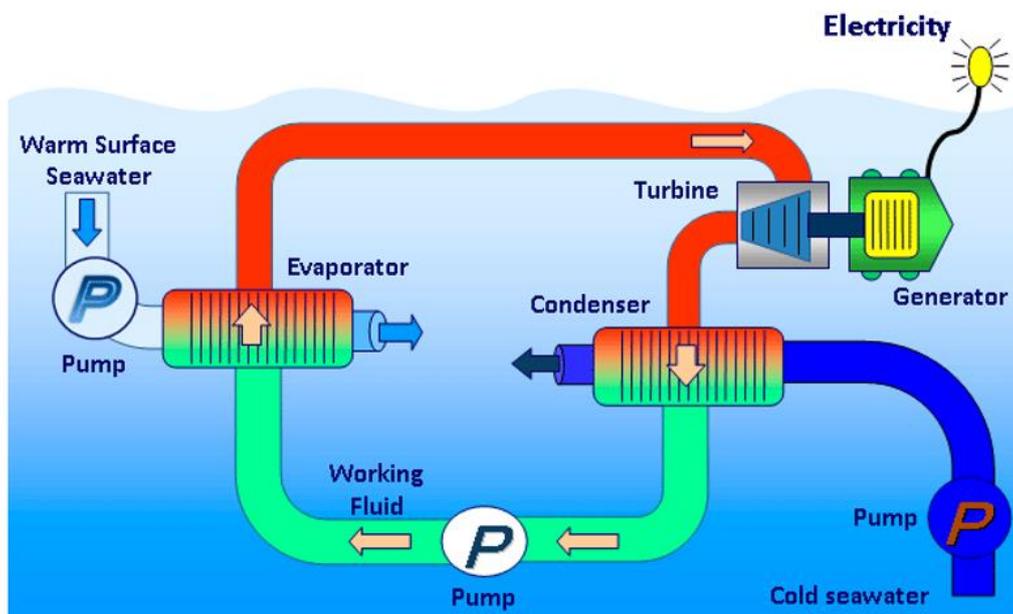


Figure I.8 : Schéma du système OTEC appliqué à l'ORC pour la production d'électricité [33]

I.6 Sélection du fluide de travail dans l'ORC

- La réglementation environnementale devenant de plus en plus stricte, lors de la sélection des fluides de travail les effets sur l'environnement doivent être pris en compte [34]. Les fluides de travail organiques pour l'ORC sont généralement des réfrigérants courants ayant des points d'ébullition à basse température, tels que les chlorofluorocarbones (CFC), les hydrochlorofluorocarbones (HCFC), les hydrofluorocarbones (HFC) et les hydrofluoroéthers (HFE). Suite au protocole de Montréal (1987) les fluides frigorigènes CFC (principaux responsables de la destruction de la couche d'ozone) ont été définitivement abandonnés [35]. Les remplaçants provisoires des CFC sont les HCFC, les HFC et les HFE. Les HCFC appauvrissent l'ozone stratosphérique, mais dans une bien moindre mesure que les CFC. Plus de 150 éthers fluorés ont été examinés comme alternatives aux CFC, HCFC et PFC [36]. Le HFE7000 est annoncé comme remplaçant du R123 en raison de son potentiel d'appauvrissement de la couche d'ozone (ODP) non nul. Le R123 sera éliminé progressivement au plus tard en 2030, en fonction des législations nationales [37].

Les cycles organiques de Rankine se réfèrent généralement à des cycles de puissance à température modérée ou basse (<200 °C) qui fonctionnent avec des fluides frigorigènes courants dans les cycles de Rankine. La pente (dT/ds) de la courbe de vapeur saturée des fluides organiques dans un diagramme T-S peut être négative (par exemple, l'ammoniac), nulle (par exemple, le R123) ou positive (par exemple, le HFE7000), et les fluides sont par conséquent classés en ces trois catégories :

- Les fluides "humides" qui ont une pente négative de la courbe de vapeur saturée et qui sont généralement de faible masse moléculaire tels que l'eau, l'ammoniac.
- Les fluides "isentropiques" qui ont des courbes de vapeur saturée presque verticales et sont généralement de masse moléculaire moyenne, tels que le R134a, le R245fa et le R123.
- Les fluides "secs" qui ont une pente positive de la courbe de vapeur saturée et sont généralement de masse moléculaire élevée, par exemple HFE7000 et HFE7100.

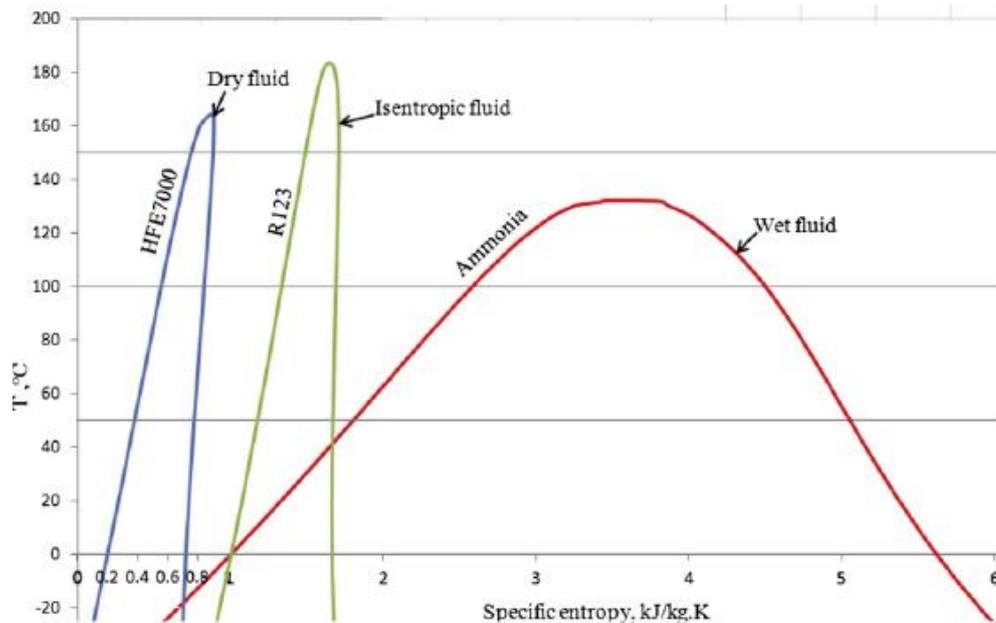


Figure I.9 : Les trois types de fluides de travail existante : "sec", isentropique et "humide"[38]

❖ Critères de sélection des fluides de travail organiques

La sélection du fluide de travail pour l'ORC est cruciale car le fluide doit non seulement avoir des propriétés thermophysiques adaptées à l'application, mais aussi répondre aux exigences de sécurité et aux coûts économiques. Pour s'orienter dans la recherche du fluide de travail le plus approprié possible, Quoilin et al. [39] proposent quelques pistes de réflexion :

- Évaluer, pour les fluides envisagés, les performances du cycle dans les conditions opératoires.
- Savoir dans quelle catégorie sont classés les fluides (sec, humide et isentrope). Les catégories sèches ou isentropes sont préférables.
- Privilégier les fluides avec une conductivité thermique élevée et à faible viscosité.
- Il faut que la pression d'évaporation du fluide ne soit pas trop élevée.
- Le fluide doit être facilement disponible à l'achat.

De nombreuses études sur les fluides utilisables pour les ORC ont été réalisées. Il faut tout de même noter que, de par la multitude des fluides existants et de la variété des conditions opératoires possibles, un seul fluide ne peut être identifié comme optimal pour une application ORC. Ainsi, Wang et al. [40] proposent quelques fluides de travail utilisables sur des plages de température de source chaude bien définies (**Figure I.10**).

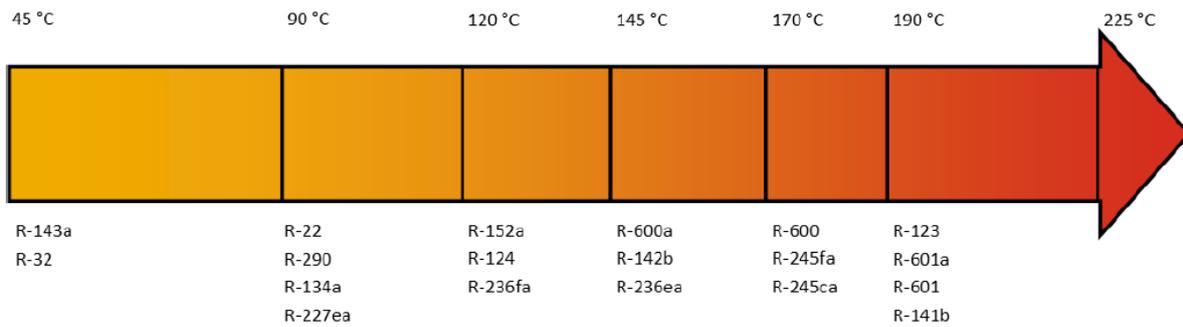


Figure I.10 : Liste des fluides de travail utilisables en fonction de la température de la source chaude [40]

I.7 Quelques travaux réalisés sur les ORC

Molés et al. [41] ont réalisé une évaluation théorique du potentiel de réchauffement global (GWP) R1234yf et R1234ze comme alternatives au R134a pour l'utilisation de sources de chaleur à basse température dans les systèmes ORC. Les résultats ont révélé que l'efficacité nette du cycle du R1234ze était supérieure de 13,8 % à celle du R134a, tandis que l'efficacité du cycle du R1234yf était inférieure de 13,9 % à celle du R134a.

Le et al. [42] ont optimisé les rendements des systèmes ORC supercritiques de base et régénératifs utilisant des fluides de travail à faible PRG et alimentés par une source de chaleur de faible qualité. Ils ont étudié deux cas : les systèmes ORC de base et les systèmes ORC régénératifs. Les résultats ont révélé que le R32 et le R152a étaient les meilleurs fluides de travail pour optimiser l'efficacité du système des cycles de base et de régénération, respectivement, tandis que le R1234ze était le meilleur fluide de travail pour optimiser la puissance électrique nette du cycle de base.

Rayegan et Tao. [13] ont étudié une méthode de sélection des fluides de travail dans les ORC solaires et ont découvert que 11 fluides de travail convenaient aux installations solaires ORC utilisées dans des capteurs solaires à basse ou moyenne température.

Quoilin et al. [43] ont présenté une vue d'ensemble de plusieurs applications de l'ORC, ainsi que des questions relatives à la sélection du fluide de travail et à la machine d'expansion. Ils ont abordé les contraintes technologiques et les méthodes d'optimisation.

Wang et al. [44] ont effectué une analyse détaillée de la conception des ORC solaires.

Song et al. [45] ont réalisé une étude d'optimisation thermo-économique sur plusieurs types de configurations ORC en utilisant six fluides de travail, à savoir le R134a, le R1234yf, le R600a,

le R1233zd, le R245fa et l'iso-pentane, sur la base d'une température de source de chaleur géothermique de 180 °C et d'un débit massique de 40 kg/s.

Bertrand et al. [46] ont étudié 20 fluides de travail pour un système ORC solaire à basse température et ont découvert que le R134a était le réfrigérant le plus approprié pour les applications ORC solaire à petite échelle. Les fluides de travail à base d'hydrofluorocarbures et d'hydrocarbures, tels que le R152a, le R600, R600, R600a et R290, présentent d'excellentes performances mais nécessitent des précautions de sécurité car ce sont des réfrigérants inflammables.

Dragomir-Stanciu et al. [47] ont étudié l'effet de températures de condensation de l'ordre de 10 à 25°C sur un système de production d'énergie solaire ORC alimenté par l'énergie solaire utilisant deux fluides de travail : R134a et R600a. Les résultats ont révélé que l'efficacité du système et la quantité d'électricité produite par le système solaire ORC augmentaient lorsque la température de condensation était réduite.

Freeman et al. [48] ont effectué une analyse systématique pour évaluer une gamme d'options de stockage de l'énergie thermique dans un système de cogénération solaire basé sur un moteur ORC.

I.8 Prévision de l'évolution du marché du Cycle Organique de Rankine de 2023 à 2030

La taille du marché mondial du cycle de Rankine organique était évaluée à 830,19 millions USD en 2022 et devrait croître à un taux de croissance annuel composé (TCAC) de 3,3 % de 2023 à 2030. L'augmentation de l'adoption des énergies renouvelables et du cycle de vie plus long des cycles organiques de Rankine (ORC) associé à de faibles coûts d'exploitation et de maintenance sont quelques-uns des principaux facteurs à l'origine de la croissance du marché ORC à l'échelle mondiale. Les principaux acteurs du marché se font concurrence en fonction de leurs capacités de développement de produits et des nouvelles technologies utilisées dans la formulation des produits. Les entreprises clés opérant sur le marché mondial du cycle organique de Rankine (ORC) sont: Turboden SpA Exergy, International Srl, Zhejiang Kaishan Compressor, Enogia SAS, Triogen ,Calnetix Technologies [49].

II. Revue bibliographique de la machine frigorifique a absorption

II.1 Définition

Le système de refroidissement par absorption est alimenté par la chaleur. Il peut utiliser de la chaleur de faible qualité, y compris l'énergie solaire et la chaleur fatale des industries. Comme

pour le système de refroidissement par compression, l'effet de refroidissement du système de refroidissement par absorption provient également de l'évaporation d'un réfrigérant liquide. Dans le système de refroidissement par compression, la vapeur de réfrigérant est pressurisée par compression mécanique ; alors que dans le système de refroidissement par absorption, la vapeur du réfrigérant est pressurisée par la circulation de la solution entre deux niveaux de pression. Contrairement au système de refroidissement par compression, le système de refroidissement par absorption fonctionne avec un fluide de travail binaire. Le fluide de travail contient le réfrigérant et l'absorbant, et il est généralement appelé la paire de travail. Le réfrigérant a une température d'ébullition inférieure à celle de l'absorbant. Dans ce cas, la concentration d'équilibre du fluide de travail binaire varie en fonction de la température et de la pression [50].

II.2 Historique de la machine frigorifique à absorption

- La première machine frigorifique a été conçue en 1877 par Narine et a utilisé le mélange eau-acide sulfurique dans une installation de laboratoire fonctionnant en continu. Ceci a marqué le début des recherches dans le domaine de la production du froid [51].
- A partir de 1880, Linde « Linde's Ice Machine Company » a mis au point en Europe la première installation de machine à compression de vapeur au détriment de la machine à absorption qui commença alors à perdre de son importance. Une véritable renaissance a été enregistrée au début des années 20, avec le mélange eau-ammoniac grâce aux améliorations proposées par Altenklich, Merkele, Bosniakovic et Niebergall sur l'aspect pratique et théorique [52].
- Les années 40 ont vu apparaître, aux Etats-Unis, la machine à absorption eau-bromure de lithium [53].
- L'année 1970 marque le début de la production et de la commercialisation des groupes à absorption KAWAZAKI (machine à eau/bromure de lithium, cycle double effet avec brûleur à gaz). Un grand nombre de chercheurs ont effectué des recherches dans le domaine de la réfrigération par absorption de vapeur en utilisant les paires de travail les plus courantes : $H_2O/LiBr$ et NH_3/H_2O [54].

II.3 Le système de refroidissement classique

II.3.1 Définition

Le système de refroidissement mécanique le plus répandu est le cycle de réfrigération à compression de vapeur. Il est couramment utilisé dans les systèmes de climatisation résidentiels, commerciaux et automobiles, dans les réfrigérateurs et les congélateurs, dans la

fabrication de glace et dans le refroidissement des processus industriels et de nombreuses autres applications [55]. Le processus de réfrigération par compression consiste à faire circuler un réfrigérant liquide à travers les quatre étages d'un système fermé. Lorsque le réfrigérant circule dans le système, il est alternativement comprimé et détendu, passant ainsi de l'état liquide à l'état de vapeur. Lorsque le réfrigérant change d'état, la chaleur est absorbée et expulsée par le système, ce qui abaisse la température de l'espace climatisé [56].

II.3.2 Fonctionnement de la machine frigorifique à compression

Dans le cycle de réfrigération à compression de vapeur, le réfrigérant pénètre dans l'évaporateur sous la forme d'un mélange froid et à basse pression de liquide et de vapeur (4). La chaleur est transférée de l'air ou de l'eau relativement chaude au réfrigérant, ce qui fait bouillir le réfrigérant liquide. La vapeur qui en résulte (1) est alors pompée de l'évaporateur par le compresseur, ce qui augmente la pression et la température de la vapeur du réfrigérant. La vapeur de réfrigérant chaude et à haute pression (2) quittant le compresseur pénètre dans le condenseur où la chaleur est transférée à l'air ambiant ou à l'eau à une température plus basse. À l'intérieur du condenseur, la vapeur de réfrigérant se condense en un liquide. Ce réfrigérant liquide (3) s'écoule ensuite vers le dispositif d'expansion, qui crée une chute de pression réduisant la pression du réfrigérant à celle de l'évaporateur. Une petite partie du réfrigérant se met à bouillir à cette basse pression, ce qui refroidit le réfrigérant liquide restant à la température souhaitée de l'évaporateur. Le mélange froid de liquide et de vapeur de réfrigérant (4) se déplace vers l'évaporateur pour répéter le cycle. Le système de réfrigération à compression de vapeur standard se compose d'un condenseur, d'un évaporateur, d'une vanne d'étranglement et d'un compresseur. La figure ci-dessous est un schéma des composants et de l'agencement des flux pour le cycle de compression de vapeur [57].

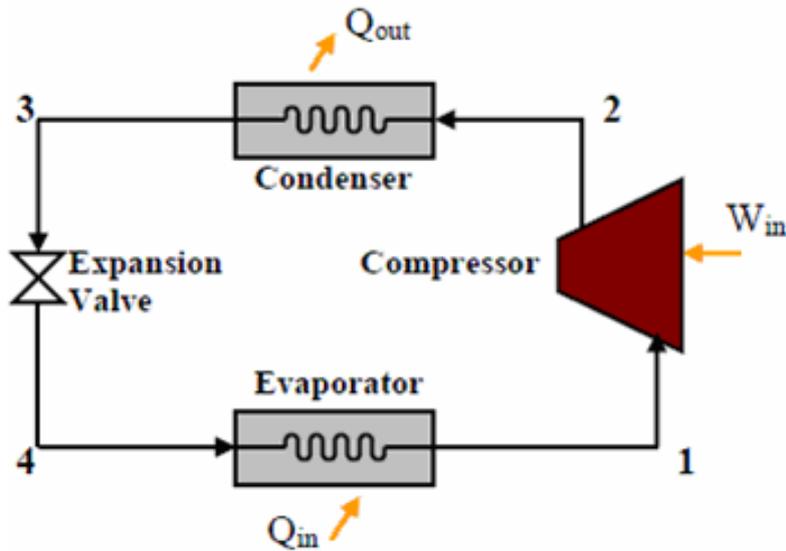


Figure I.11 : Cycle de la réfrigération par compression [57]

II.4 La production de froid solaire par sorption

En climatisation solaire, l'énergie thermique du rayonnement solaire est utilisée comme énergie de base pour la production de froid. A partir du flux de l'énergie solaire il y a deux voies à suivre : la production de froid par adsorption ou par absorption [58].

II.4.1 Le froid solaire par adsorption

II.4.1.1 Définition

Les systèmes solaires thermiques fonctionnant sur le principe d'adsorption d'eau permettent de s'affranchir des réfrigérants polluants actuellement utilisés dans les systèmes frigorifiques à compression. Ces réfrigérateurs solaires opèrent selon un cycle thermique d'adsorption et de désorption d'eau par un matériau adsorbant capable de fixer l'eau dans ses pores et la libérer sous l'effet de la température [59].

II.4.1.2 Principe de fonctionnement de la machine frigorifique à adsorption

Une machine frigorifique solaire à adsorption comprend les mêmes composants qu'un système à compression de vapeur classique, sauf qu'il utilise, un générateur adsorbant/désorbant (thermo compresseur) au lieu d'un compresseur mécanique [60].

La technologie de l'adsorption est nouvelle et respectueuse de l'environnement. Ce système peut utiliser la chaleur résiduelle de faible qualité pour la production de froid dans différents bâtiments résidentiels et commerciaux. Ils peuvent également être utilisés en conjonction avec des refroidisseurs à absorption s'il existe des sources de chaleur de qualités différentes. Les refroidisseurs à adsorption, comme les refroidisseurs à absorption, utilisent des matériaux en

paire, qui dans ce cas sont appelés adsorbant/adsorbat. L'adsorbant est un lit solide qui absorbe et libère la vapeur de l'adsorbat en différentes étapes. Le couple de matériaux le plus courant dans les refroidisseurs à adsorption est le gel de silice et l'eau. Le gel de silice est l'adsorbant et l'eau est l'adsorbat. L'adsorption et la désorption sont deux phénomènes importants qui se produisent respectivement au refroidissement et au réchauffement du lit d'adsorbant. Lors de l'adsorption, l'adsorbant adsorbe la vapeur de l'adsorbat, et lors de la désorption, l'adsorbant désorbe (libère) la vapeur de l'adsorbat sous l'effet de la chaleur. À ce stade, l'adsorbant est régénéré pour un nouveau cycle d'adsorption. Les principaux composants et le diagramme de flux d'un refroidisseur à adsorption sont illustrés dans la figure suivante [61].

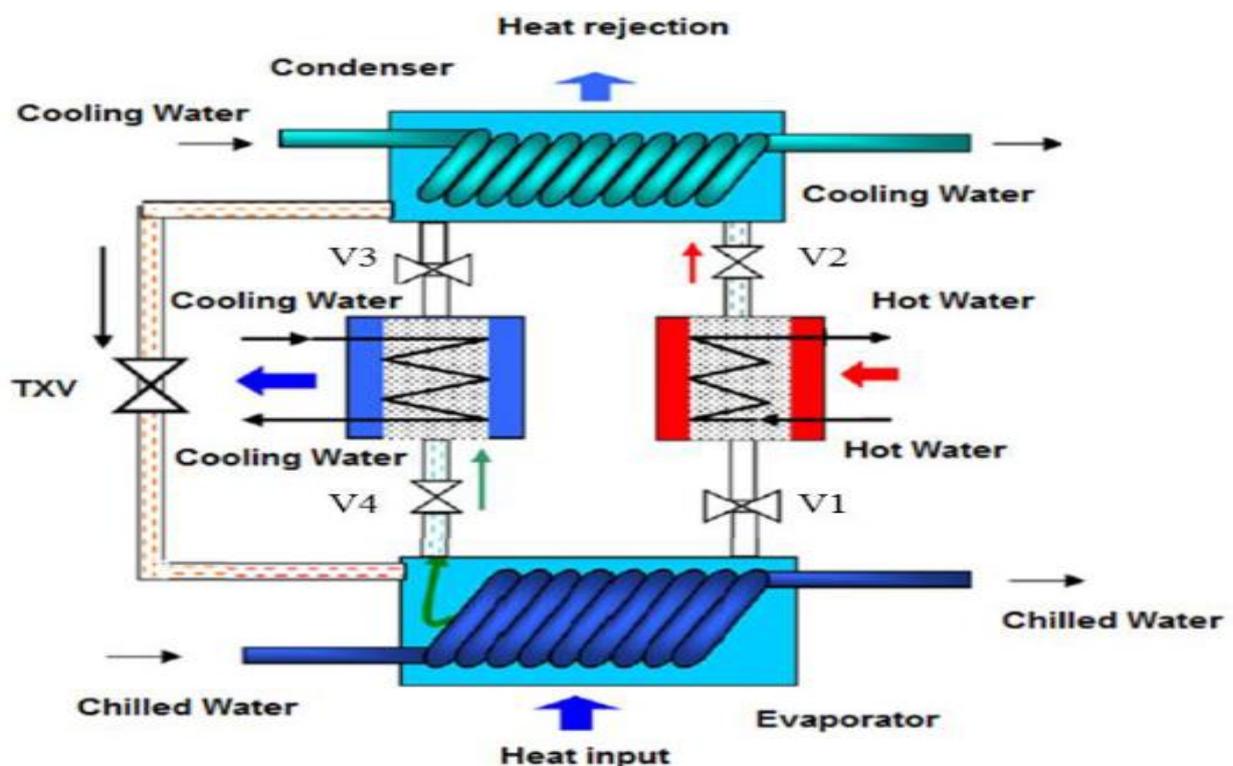


Figure I.13 : Principe de fonctionnement d'une machine frigorifique à adsorption [62]

II.4.2 Principe de fonctionnement de la machine frigorifique à absorption

Dans la machine à absorption, la compression du réfrigérant est effectuée en utilisant une solution liquide réfrigérant/absorbant et une source de chaleur [63].

Le cycle d'absorption alimenté par l'énergie solaire est illustré à la **figure I.14**. La vapeur de réfrigérant à basse pression de l'évaporateur est absorbée par la solution liquide forte dans l'absorbeur. La pompe reçoit la solution faible liquide à basse pression de l'absorbeur, élève la pression de la solution faible et la délivre au générateur [64]. Dans le générateur, la chaleur provenant d'une source à haute température par l'énergie solaire chasse la vapeur de réfrigérant

dans la solution faible. La solution forte liquide retourne à l'absorbeur par l'intermédiaire d'une vanne d'étranglement. La vapeur du réfrigérant à haute pression se condense en liquide dans le condenseur et pénètre dans l'évaporateur par une vanne d'étranglement, maintenant la différence de pression entre le condenseur et l'évaporateur. Afin d'améliorer les performances du cycle, c'est un composant d'économie d'énergie (un échangeur de chaleur à solution) est normalement ajouté au cycle. Ce composant n'est pas indispensable au bon fonctionnement du cycle mais sans récupération de chaleur, les valeurs de COP seraient bien inférieures.

La description ci-dessus est typique d'un cycle fonctionnant au couple $H_2O/LiBr$ comme fluide de travail. Cependant, pour le cycle d'absorption à NH_3/H_2O , il se compose non seulement de tous les composants décrits précédemment, mais également d'un analyseur et d'un déflegmateur (redresseur). Le besoin de ces deux derniers est occasionné par le fait que l'eau est volatile, lorsque l'ammoniac s'évapore du générateur, il contient également de la vapeur d'eau. L'analyseur et le redresseur servent à séparer la vapeur d'eau et l'ammoniac [65].

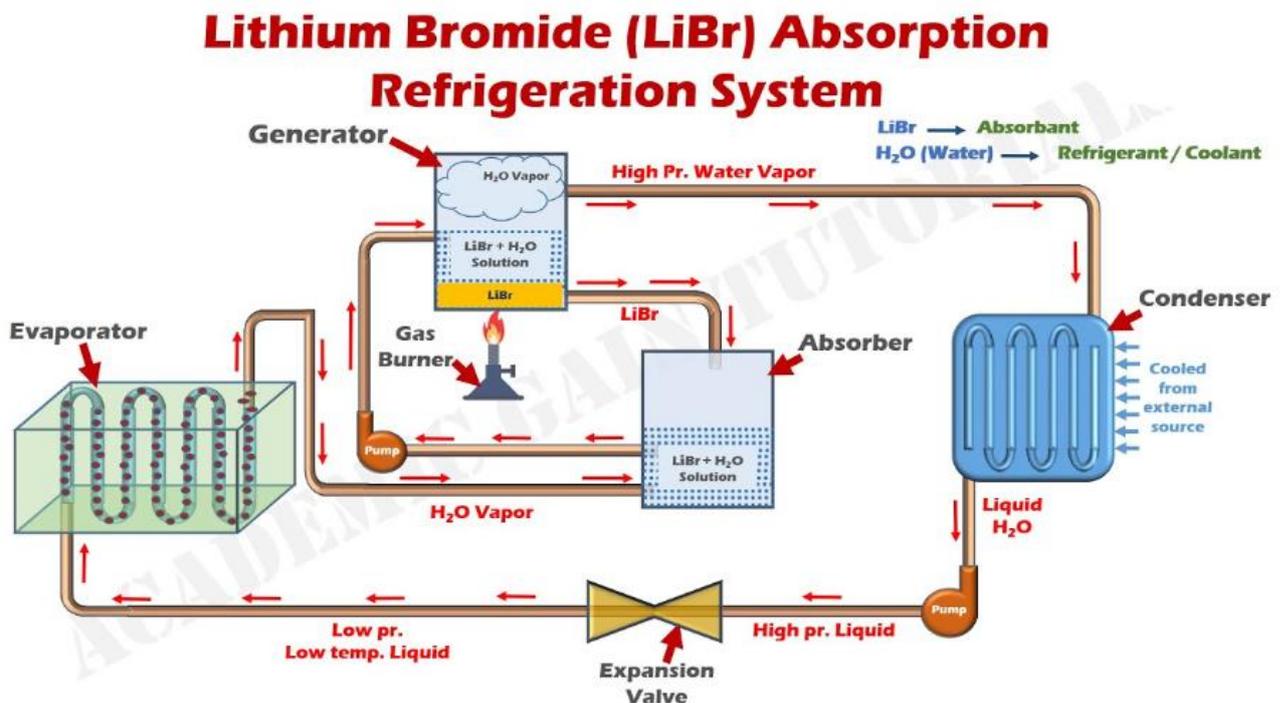


Figure I.14 : Schéma de principe d'une machine à absorption fonctionnant au $H_2O/LiBr$ [66]

II.5 Fluides de travail utilisés dans les ACS

II.5.1 Critère de sélection des fluides de travail

Les performances et l'efficacité des systèmes de réfrigération à absorption sont également déterminées dans une large mesure par les propriétés des fluides de travail [67]. Les coûts

initiaux et les coûts d'exploitation d'une machine à absorption dépendent fortement des propriétés du fluide de travail. Il est donc essentiel de sélectionner le meilleur candidat parmi plusieurs candidats de fluides de travail afin d'obtenir les meilleures performances et la meilleure efficacité dans les systèmes d'absorption [68]. En règle générale, un bon système de réfrigération par absorption doit répondre à plusieurs exigences importantes, qui sont énumérées ci-dessous [69], [70] :

II.5.1.1 Absence de phase solide

Un bon couple réfrigérant-absorbant ne doit pas former de phase solide dans la gamme de composition et de température à laquelle il sera utilisé, car la présence d'une phase solide peut bloquer les composants, réduire la durée de vie et donc détériorer les performances globales du système.

II.5.1.2 Grande différence de température d'ébullition

Un bon absorbant doit être moins volatil que le réfrigérant afin de pouvoir être séparé facilement par chauffage. L'élévation du point d'ébullition doit être aussi grande que possible.

II.5.1.3 Bonne affinité et solubilité

L'absorbant doit avoir une forte affinité avec le réfrigérant dans les conditions où l'absorption a lieu. Cette affinité permet de faire circuler moins d'absorbant pour le même effet frigorifique, et donc de réduire les pertes de chaleur sensible. En outre, un échangeur de chaleur liquide plus petit est nécessaire pour transférer la chaleur de l'absorbant à la solution réfrigérante-absorbante sous pression. Idéalement, l'absorbant devrait donc avoir une forte affinité avec le réfrigérant à basse température (c'est-à-dire la température de l'absorbeur) tout en ayant une faible affinité avec le réfrigérant à haute température (c'est-à-dire la température du générateur).

II.5.1.4 Propriétés de transport favorables

Les propriétés de transport (la viscosité, la conductivité thermique et le coefficient de diffusion) doivent être favorables. En outre, la viscosité joue un rôle important dans les systèmes de réfrigération à absorption. Kim et al. [71] ont rapporté qu'une viscosité plus élevée de l'absorbant peut entraîner une chute de pression plus importante dans la boucle de compression, ce qui se traduirait par une puissance de pompage plus importante ou des tuyaux et un volume de système plus grands.

II.5.1.5 Pression de fonctionnement modérée

Il convient d'utiliser des pressions de fonctionnement modérées afin d'éviter l'utilisation d'équipements à parois lourdes et de réduire la puissance électrique nécessaire pour pomper les

fluides. De même, une pression très basse (vide) nécessitera l'utilisation d'équipements de grand volume et de moyens spéciaux pour réduire la chute de pression dans le flux de vapeur du réfrigérant. Une pression de fonctionnement modérée permet également d'étendre les systèmes à une configuration à effets multiples sans problème de pression, ce qui améliore considérablement le rapport thermique.

II.5.1.6 La chaleur de vaporisation élevée

La chaleur nécessaire pour vaporiser le réfrigérant doit être élevée afin d'obtenir un faible facteur de circulation et, par conséquent, de faibles pertes irréversibles. Cependant, cela donne lieu à un rapport de pression élevé, ce qui, à une pression de travail élevée, entraîne une forte demande d'énergie pour la pompe.

II.5.1.7 Le rapport des enthalpies de dilution et d'évaporation

Le rapport des enthalpies de dilution et d'évaporation doit être faible, de préférence négatif, pour un système à effet unique. Toutefois, pour un système à effets multiples, cette valeur ne doit pas être trop faible pour éviter une température trop élevée du générateur.

II.5.1.8 Bonne stabilité thermique et chimique

Une bonne stabilité chimique est nécessaire pour éviter la formation indésirable de gaz, de solides ou de substances corrosives. En outre, une stabilité thermique élevée est nécessaire pour empêcher la décomposition des ions.

II.5.1.9 Non-corrosif

Les fluides doivent être non corrosifs afin de réduire les coûts d'entretien du système. Si les fluides sont corrosifs, il convient d'utiliser des inhibiteurs de corrosion (ils peuvent influencer les performances thermodynamiques de l'équipement et augmenter les coûts d'entretien).

II.5.1.10 Sureté et économiquement réalisable

Idéalement, les fluides doivent être non toxiques et non inflammables. Un bon fluide de travail doit être peu coûteux et économiquement réalisable.

II.5.2 Les différents fluides de travail utilisés dans les ACS

Une grande variété de combinaisons réfrigérant/absorbant (organiques et inorganiques) a été proposée pour les systèmes de refroidissement à absorption. La plupart d'entre elles sont des systèmes à deux composants. Les deux fluides de travail les plus courants dans le cycle de réfrigération par absorption sont $H_2O/LiBr$ et NH_3/H_2O . D'autres combinaisons importantes sont les réfrigérants CFC, HCFC et HFC, à savoir R21, R22 et R134a, avec des absorbants

organiques tels que le DMF, le DMETEG et le DMAC. Bien que les systèmes à base de HCFC et de HFC se révèlent thermodynamiquement supérieurs, leur PRP élevé et les problèmes d'instabilité chimique constituent des obstacles majeurs à leur utilisation pour des applications à grande échelle. Il est donc inévitable de trouver un duo de travail adéquat [67].

II.5.2.1 Ammoniac/eau ($\text{NH}_3/\text{H}_2\text{O}$)

Le mélange ammoniac/eau comme fluide de travail pour les systèmes de réfrigération est utilisé depuis le milieu du 19^{ème} siècle. Depuis lors, l'utilisation du fluide de travail ammoniac/eau a été étendue à des fins de refroidissement et de chauffage résidentiels et commerciaux. L'ammoniac et l'eau ont une grande affinité, ce qui est bénéfique en tant que paires de fluides de travail [72].

Le fluide de travail ammoniac/eau ne présente pas de phase solide dans une large gamme de température et de pression pour les conditions de fonctionnement de l'absorption, ce qui permet de s'affranchir des problèmes de cristallisation. En outre, ce fluide de travail est également thermiquement et chimiquement stable dans une large gamme de conditions de température et de pression pour les systèmes de réfrigération à absorption. L'enthalpie de vaporisation élevée (1262 kJ/kg à 0°C) de qui est nécessaire pour une performance efficace et une taille compacte du système, et le point de congélation bas de l'ammoniac (-77°C) qui lui permet d'être utilisé pour des applications à des températures inférieures à zéro, ont rendu ce composé plus souhaitable en tant que réfrigérant. En tant que fluides naturels, les deux sont exempts d'émissions nocives et respectueux de la couche d'ozone, ce qui se traduit par un potentiel de réchauffement global (PRG) et un potentiel d'appauvrissement de la couche d'ozone (PACO) nuls. Cependant, les systèmes d'absorption utilisant le fluide de travail ammoniac/eau nécessitent des températures d'activation élevées (> 110°C) pour maintenir la capacité de refroidissement du réfrigérant aux basses températures d'évaporation souhaitées et nécessitent une pression élevée car la pression de vapeur de l'ammoniac est relativement élevée. De plus, les caractéristiques de l'eau étant volatiles, donc absorbantes, il est nécessaire d'ajouter un redresseur, pour minimiser la quantité d'eau entrant dans le condenseur. Sans redresseur, l'eau s'accumulerait dans l'évaporateur et réduirait les performances du système [73]. En outre, les caractéristiques de l'ammoniac étant toxiques, il est donc nécessaire de le manipuler avec précaution et il existe d'autres inconvénients tels que son action corrosive élevée sur le cuivre et l'alliage de cuivre [69]. L'apport de chaleur typique pour un cycle de réfrigération à absorption ammoniac/eau à simple effet se situe entre 120°C et 132°C avec un coefficient de performance approximatif de 0,9 [74]. Afin d'améliorer les performances des systèmes d'absorption à base

d'ammoniac et d'éliminer leur inconvénient tels que la colonne de rectification nécessaire. Autres fluides de travail à base de réfrigérant ammoniacal tels que le mélange $\text{NH}_3/(\text{H}_2\text{O}+\text{LiBr})$, $\text{NH}_3/\text{LiNO}_3$, $\text{NH}_3/(\text{LiNO}_3+\text{H}_2\text{O})$, et NH_3/NaSCN ont été étudiés ; bien qu'ils ne soient pas très courants par rapport au couple ammoniac/eau [75].

II.5.2.2 Eau/bromure de lithium ($\text{H}_2\text{O}/\text{LiBr}$)

Le mélange eau/bromure de lithium est utilisé comme fluide de travail dans les systèmes de réfrigération depuis 1930 environ. Depuis lors, l'utilisation du fluide de travail eau/bromure de lithium a été étendue aux systèmes de refroidissement et de chauffage de résidentiels et commerciaux [76], [77]. La solution eau/bromure de lithium présente d'excellentes caractéristiques tels que sa non-toxicité et la forte affinité entre l'absorbant et le réfrigérant, la non-volatilité de l'absorbant (LiBr) et la forte enthalpie de vaporisation du réfrigérant (eau). La non-volatilité du LiBr fait que les systèmes d'absorption ne nécessitent pas de colonne de rectification car la vapeur de réfrigérant provenant du générateur n'a pas de contenu absorbant. L'enthalpie de vaporisation très élevée de l'eau ($2489 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ à 5°C) est également l'un des avantages du fluide de travail $\text{H}_2\text{O}/\text{LiBr}$ pour l'efficacité du système. Cependant, des cristallisations se forment lorsque la fraction massique du sel LiBr dépasse la limite de solubilité. Cette cristallisation du LiBr peut bloquer les composants du système et donc réduire la durée de vie de l'équipement. Le point de congélation de l'eau est de 0°C et limite donc l'utilisation des systèmes d'absorption à des températures supérieures à 0°C . Toutefois, il convient d'être prudent dans la conception des systèmes en raison de la limite de cristallisation de la solution. En outre, la solution eau/LiBr elle-même est très agressive pour de nombreux métaux, y compris l'acier au carbone et le cuivre. L'efficacité approximative du système est comprise entre 0,9 et 1,3 [74].

II.6 Etat de l'art des machines frigorifiques à absorption

Dans le but d'améliorer la performance des cycles à absorption, de nombreuses pistes de recherches ont été étudiées. La température de la source chaude est un paramètre important pour l'exploitation des cycles thermodynamiques en rafraîchissement solaire. Il est évident que l'augmentation de la température de la source chaude entraîne une augmentation du COP. Il existe ainsi des cycles dérivés (tels que les cycles à double effet, à triple effet, le système GAX etc..) ; plus complexes, permettant d'obtenir de meilleurs COP en augmentant la différence de pression entre l'évaporateur et le condenseur par des « étages » de compression supplémentaires. Ainsi, le cycle à double effet, comportant deux absorbeurs et deux générateurs permet d'obtenir des COP, en théorie, proches de 1,4. En pratique, du fait des pompes

supplémentaires et des irréversibilités des transferts thermiques, la valeur du COP est de l'ordre de 1. Avec une machine à triple effet, le COP peut atteindre 1,3. L'inconvénient de ces cycles à double ou triple effet est qu'ils nécessitent des sources chaudes à des températures plus élevées (leur régime de température est entre 165°C-180°C alors que pour un cycle à simple effet une température de 80°C est suffisante). Ils sont donc difficilement utilisables pour le rafraîchissement solaire de bâtiments avec des capteurs solaires à eau. C'est pourquoi, les cycles à double et triple effet ne sont envisagés qu'avec des combustibles fossiles ou avec des technologies de capteurs à concentration à eau [96].

II.7 Quelques travaux réalisés sur les machines frigorifiques à absorption

Dong-Seon Kim et al. [78] ont souligné que la croissance rapide de la demande de climatisation a imposé une augmentation significative de la demande d'énergie primaire. Les services publics d'électricité connaissent des pics de charge pendant les chaudes journées d'été et, ces dernières années, ils sont à peine capables de répondre à la demande. Avec une technologie appropriée, le refroidissement solaire peut résoudre une partie du problème. Le fait que le pic de la demande de refroidissement en été soit associé à un rayonnement solaire élevé offre une excellente occasion d'exploiter les technologies solaires thermiques et de réduire les émissions de gaz à effet de serre.

K. Karthik. [79] a conçu le modèle d'un système d'absorption de vapeur ayant une capacité de 0,0168TR et l'ont testé pour différentes conditions et paramètres de fonctionnement. D'après son étude et ses calculs, il a prouvé que le système d'absorption de vapeur alimenté par l'énergie solaire était réalisable.

Garimella et al. [80] ont testé le système GAX (generator/absorber/heat exchanger) pour des applications de rafraîchissement solaire. Ce système est une évolution du cycle à simple effet mais l'absorbeur et le générateur sont reliés en partie par un échangeur de chaleur, son rendement est de l'ordre de l'unité.

V.K. Bajpai. [81] a conçu et étudié un système de réfrigération à absorption de vapeur. Ce système est respectueux de l'environnement ; le réfrigérant utilisé est le R-717 et l'eau sert d'absorbant. Il a utilisé des collecteurs plats pour chauffer la solution concentrée afin de la vaporiser et de séparer la vapeur d'ammoniac de l'eau. Il a également décrit les performances des composants du système et du système global pour différentes conditions de travail.

Tarik A. Shaikh, Yogesh J. Morabiya et al. [82] ont réalisé la modélisation mathématique et l'étude du système d'absorption de vapeur fonctionnant à l'énergie solaire et, à l'aide de leur

étude et de leur analyse, ils ont également confirmé que le système le système est réalisable et est également un moyen de mettre fin à l'utilisation des CFC et des HFC ; ils ont également développé le modèle LiBr du système d'absorption de vapeur et ont déterminé le coût du système.

Satish Raghuwanshi, Govind Maheshwari et al. [83] ont développé et étudié les caractéristiques de relation et les performances du système d'absorption de vapeur d'eau d'ammoniac à un étage et confirment que la réfrigération par absorption de vapeur en utilisant l'énergie solaire est une alternative réalisable pour le système de réfrigération conventionnel qui utilise la source d'alimentation conventionnelle.

M AMehrabian et A E Shahbeik et al. [84] ont développé un programme informatique pour la conception et l'analyse thermodynamique d'un refroidisseur à absorption à effet unique utilisant la solution H_2O -LiBr comme fluide de travail. Les résultats du programme informatique sont utilisés pour étudier et analyser l'effet des paramètres de conception sur les performances du cycle. Les résultats de ce programme peuvent être utilisés pour dimensionner un nouveau cycle de réfrigération ou pour évaluer un système existant. Ils peuvent également être utilisés à des fins d'optimisation. Les prévisions du présent programme sont comparées à celles d'autres programmes de simulation et un accord qualitatif est obtenu.

K.R. Ullah et al. [85] ont souligné qu'en raison de l'ensoleillement disponible tout au long de l'année, l'énergie solaire peut être facilement captée dans le monde entier. Bien que le système solaire photovoltaïque puisse fournir de l'électricité et de la réfrigération, la réfrigération solaire thermique est beaucoup plus efficace. Les technologies de refroidissement solaire thermique sont utilisées dans le monde entier à des fins industrielles et domestiques. Ces systèmes de refroidissement sont plus adaptés aux régions isolées ou aux îles où le refroidissement conventionnel est difficile et où l'énergie solaire est toujours disponible. Ces systèmes sont également plus adaptés que les systèmes de réfrigération conventionnels car des fluides de travail non polluants (au lieu des chlorofluorocarbones) sont utilisés comme réfrigérants. Leur étude résume également les différents fluides de travail des systèmes de refroidissement par absorption solaire et des systèmes de refroidissement par adsorption, en fournissant divers résultats avec leurs avantages et leurs limites. Bien que le coefficient de performance des systèmes de refroidissement par absorption soit meilleur que celui des systèmes par adsorption, les problèmes liés aux températures élevées peuvent être facilement résolus par les systèmes solaires à adsorption. En outre, les systèmes de refroidissement solaires hybrides peuvent

fournir une plus grande capacité et de meilleurs coefficients de performance en éliminant certains des problèmes rencontrés avec les paires de fonctionnement individuelles.

Lyes et al. [86] ont fait la simulation numérique d'un cycle à absorption solaire ($H_2O/LiBr$). Les résultats ont montré l'existence d'un seuil de température de bon fonctionnement de la machine à absorption. Ainsi, la température du générateur et de l'évaporateur ont une influence sur le fonctionnement du cycle.

Touaibi et al. [87] ont réalisé une analyse énergétique et exergetique d'un système à absorption simple effet de 10kW utilisant le couple eau-bromure de lithium. Cette étude a montré que l'augmentation de l'efficacité de l'échangeur thermique fait augmenter le coefficient de performance et le rendement exergetique.

SachinKaushik, Dr. S. Singh et al. [88] ont étudié un cycle de réfrigération à absorption utilisant un mélange ammoniac-eau. Le système est intégré à un moteur diesel marin qui fournit de la chaleur résiduelle. Le système a fait l'objet d'une étude théorique en calculant les performances à l'aide d'un modèle thermodynamique. Le modèle a été couplé à un ensemble d'équations d'état permettant le calcul fiable des propriétés thermodynamiques du mélange binaire utilisé. L'étude thermodynamique du cycle a été réalisée pour différentes conditions de fonctionnement. Il a été constaté que les performances élevées du cycle sont obtenues à des températures élevées du générateur et de l'évaporateur, ainsi qu'à des températures basses du condenseur et de l'absorbeur. En outre, l'augmentation de l'efficacité de l'échangeur de chaleur de la solution améliore le coefficient de performance sans effet sur le facteur (rapport) de circulation.

II.9 Evolution et prévisions du marché des refroidisseurs à absorption

Le marché des refroidisseurs à absorption a connu une croissance rapide au cours des dernières décennies, en grande partie en raison du nombre croissant d'industries, en particulier dans les pays en développement. De plus, l'augmentation de l'urbanisation qui alimente la croissance des bâtiments commerciaux et résidentiels crée des opportunités de mise en œuvre pour les équipements de refroidisseurs à absorption [89]. La demande mondiale du refroidisseur à absorption devrait augmenter à un TCAC de 4,5% entre 2022 et 2032 (période de prévision), pour atteindre un total de 2376,8 millions de dollars américains en 2032, selon un rapport de Future Market Insights (FMI) [90].

Conclusion

Dans ce chapitre, la revue bibliographique des systèmes à cycle organique de Rankine et de refroidissement par absorption est effectuée. Les deux technologies présentées sont matures et déjà bien connues. Ces cycles sont plus adaptés aux plages de puissance modérées et/ou aux applications à basse température telle que l'énergie solaire... Aujourd'hui, avec la hausse des prix des combustibles fossiles et les aspects environnementaux de la combustion des combustibles fossiles ; l'ORC et l'ACS représentent des technologies très prometteuses, en raison de leur durabilité technologique.

**CHAPITRE II : ANALYSE ENERGETIQUE DU SYSTEME THERMODYNAMIQUE
COMBINE ORC/ ACS**

Introduction

Le Sénégal bénéficie de plus de 3000 heures d'ensoleillement tout au long de l'année. C'est l'un des meilleurs potentiels solaires au monde. Ce qui en fait un excellent site pour l'exploitation de l'énergie solaire. Dans ce chapitre, nous présentons l'analyse énergétique d'un système solaire thermodynamique ORC pour la production combinée d'énergie électrique et de froid solaire par absorption. L'analyse énergétique concerne l'application de la première loi de la thermodynamique qui décrit la conservation de l'énergie au sein des différents éléments du système. La première loi de la thermodynamique reste la méthode la plus couramment utilisée dans l'analyse énergétique des systèmes thermiques. Le système étudié est semblable à celui de Marin et al. [91] et de Lavinia et al. [92] qui ont effectué des études similaires.

I. Présentation du logiciel EES

EES (prononcé 'ise') est l'abréviation de 'Engineering Equation Solver' (solveur d'équations pour l'ingénierie). Il permet de résoudre des systèmes d'équations algébriques, différentielles et à variables complexes. EES permet également d'optimiser les paramètres de modélisation d'un système, de calculer des régressions linéaires et non linéaires, de générer des courbes de grande qualité [93]. Une des forces du logiciel EES est sa banque de propriétés pour les gaz liquides et solides. Ces propriétés diffèrent selon le type de matériau [94].

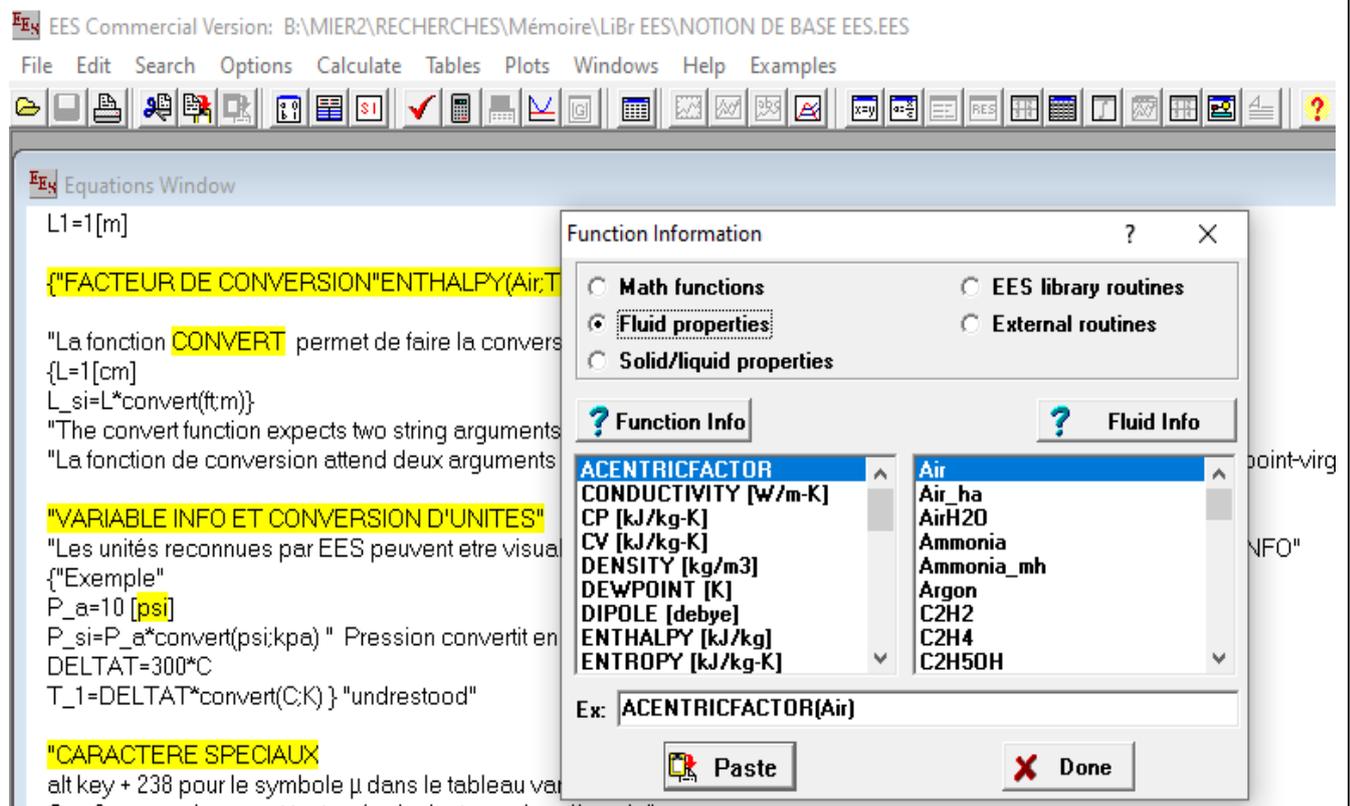


Figure II.1: Schéma simplifié du système combiné ORC et ACS

II. Sélection des fluides de travail pour le système combiné ORC-ACS

Tout en consommant une source de chaleur de faible qualité, l'efficacité et le coût en capital de ce système combiné dépendent en outre des fluides de travail utilisés [95]. Plusieurs fluides de travail ont été comparés dans des travaux antérieurs et il a été constaté que le R245fa présentait des performances intéressantes pour un système solaire ORC [91], [96], [97]. Le mélange eau/bromure de lithium présente d'excellentes caractéristiques telles que sa non-toxicité, la non-volatilité de l'absorbant (bromure de lithium), la forte enthalpie de vaporisation du réfrigérant (eau) et la forte affinité entre ces deux substances. C'est le fluide de travail le plus utilisé dans les technologies ACS [98], [99]. Ces raisons font que, dans cette étude, le choix des fluides de travail est porté sur le R245fa et le mélange H₂O/LiBr respectivement pour l'ORC et l'ACS.

III. Description du système

Le système combiné est divisé en trois sous-systèmes : le champ solaire (composé principalement de capteurs à tube sous vide), l'ORC et l'ACS.

- Le fluide organique est pressurisé par la pompe et chauffé sur l'échangeur de chaleur ORC en contact avec le débit d'eau (flux principal du champ solaire).
- La vapeur issue de l'échangeur de chaleur ORC entraîne la turbine ORC, et la puissance mécanique est alors convertie en puissance électrique grâce à un générateur électrique en contact direct avec la turbine. La vapeur à la sortie de la turbine passe à travers le condenseur où elle est condensée par un débit d'eau de refroidissement.
- Le flux solaire est ensuite utilisé pour chauffer la solution H₂O/LiBr au niveau du générateur de l'ACS. L'eau de cette solution est ainsi évaporée, il constitue le fluide frigorigène dans l'évaporateur de l'ACS. L'effet de refroidissement se produit dans l'évaporateur, où la température est fixée pour rafraîchir l'atmosphère du milieu à refroidir.

températures dans l'intervalle de 77 à 170 °C. Ils sont bien adaptés pour des applications de climatisation solaire par absorption.

Le rendement des capteurs solaire thermique η_c dépend du rendement optique η_0 et des coefficients des pertes thermiques a_1 et a_2 qui sont fournis par le constructeur, ils s'expriment comme suit :

$$\eta_c = \eta_0 - \frac{\alpha_1(T_m - T_a)}{G} - \frac{\alpha_2(T_m - T_a)^2}{G} \quad (3)$$

IV.2 Le sous-système thermodynamique ORC

Les débits massiques d'entrée et de sortie sont égaux en régime stationnaire, nous avons :

$$\dot{m}_{1\text{ORC}} = \dot{m}_{2\text{ORC}} = \dot{m}_{3\text{ORC}} = \dot{m}_{4\text{ORC}} = \dot{m}_{\text{ORC}} \quad (4)$$

Les équations utilisées pour effectuer l'analyse énergétique sont les suivantes :

❖ Au niveau de l'échangeur de chaleur ORC:

$$\dot{Q}_{\text{EC_ORC}} = \dot{m}_{\text{ORC}}(h_{1\text{ORC}} - h_{4\text{ORC}}) > 0 \quad (5)$$

❖ Au niveau de la turbine :

$$\dot{W}_{\text{T_ORC}} = \dot{m}_{\text{ORC}}(h_{2\text{ORC}} - h_{1\text{ORC}}) < 0 \quad (6)$$

❖ Au niveau du condenseur

$$\dot{Q}_{\text{Cd_ORC}} = \dot{m}_{\text{ORC}}(h_{3\text{ORC}} - h_{2\text{ORC}}) < 0 \quad (7)$$

❖ Au niveau de la pompe

$$\dot{W}_{\text{P_ORC}} = \dot{m}_{\text{ORC}}(h_{4\text{ORC}} - h_{3\text{ORC}}) > 0 \quad (8)$$

❖ Ainsi le rendement thermique de l'ORC est donné par :

$$\eta_{\text{ORC}} = \frac{|\dot{W}_{\text{T_ORC}}| - \dot{W}_{\text{P_ORC}}}{\dot{Q}_{\text{EC_ORC}}} \quad (9)$$

IV.3 Le sous-système thermodynamique d'absorption

Le bilan massique de la solution ($\text{H}_2\text{O} + \text{LiBr}$) s'écrit :

$$\dot{m}_{\text{r_ACS}} = \dot{m}_{\text{p_ACS}} + \dot{m}_{\text{ref_ACS}} \quad (10)$$

Les équations qui décrivent les bilans massiques et énergétiques pour les différents composants du système de refroidissement par absorption sont présentées ci-dessous:

❖ Evaporateur ACS :

$$q_{Ev_ACS} = h_{10ACS} - h_{9ACS} \quad (11)$$

$$\dot{Q}_{Ev_ACS} = \dot{m}_{ref_ACS} \times q_{Ev_ACS} \quad (12)$$

❖ Condenseur ACS :

$$q_{cd_ACS} = h_{7ACS} - h_{8ACS} \quad (13)$$

$$\dot{Q}_{Cd_ACS} = \dot{m}_{ref_ACS} \times q_{Cd_ACS} \quad (14)$$

❖ Générateur ACS :

$$\dot{Q}_{G_ACS} = \dot{m}_{ref_ACS}(h_{7ACS} - h_{4ACS}) + \dot{m}_{p_ACS}(h_{4ACS} - h_{3ACS}) \quad (15)$$

$$\dot{m}_{r_ACS} = \dot{m}_{p_ACS} + \dot{m}_{ref_ACS} \quad (16)$$

❖ Absorbeur ACS :

$$q_{Ab_ACS} = (h_{10ACS} - h_{1ACS}) + f(h_{6ACS} - h_{1ACS}) \quad (17)$$

$$\dot{Q}_{Ab_ACS} = \dot{m}_{p_ACS} \times q_{Ab_ACS} \quad (18)$$

❖ Echangeur de chaleur ACS :

$$\dot{Q}_{EC_ACS} = f(h_{4ACS} - h_{5ACS}) \quad (20)$$

➤ Le taux de circulation (f) est défini par le ratio du débit massique de la solution pauvre en réfrigérant au débit massique du réfrigérant. Le taux de circulation donne une indication de la taille de la machine à absorption par unité de production de chaleur, l'objectif général est de minimiser sa valeur.

$$f = \frac{\dot{m}_{p_ACS}}{\dot{m}_{ref_ACS}} \quad (21)$$

➤ Le coefficient de performance (COP) représente la mesure de la performance d'une machine de refroidissement et est défini comme suit :

$$COP_{ACS} = \frac{\dot{Q}_{Ev_ACS}}{\dot{Q}_{G_ACS} + \dot{W}_{P_ACS}} \quad (22)$$

Conclusion

Dans ce chapitre, le bilan énergétique de chaque composant du système combiné ORC-ACS est établi selon la première loi de la thermodynamique ; et le choix des fluides de travail du système est effectué. A partir de ce bilan, un modèle mathématique est élaboré avec le logiciel EES pour la simulation du système.

CHAPITRE III : RESULTATS ET DISCUSSIONS

Introduction

Un modèle informatique est développé avec le logiciel EES afin de modéliser le système solaire combiné ORC/ACS. Les résultats obtenus vont nous permettre d'étudier les performances du système avec différents paramètres de fonctionnement.

I Analyse thermodynamique du système ORC

Les résultats obtenus pour le système ORC sont en parfait accord avec ceux trouvés dans la littérature [100], [101].

I.1 Influence de la pression du condenseur sur la puissance de la turbine et celle du condenseur

On fixe : $T_{EC_ORC}=140\text{ }^{\circ}\text{C}$; $\dot{m}_{ORC}=1,25\text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$

L'augmentation de la pression du condenseur entraîne une diminution de la puissance générée par la turbine et celle délivrée par le condenseur, en effet une pression trop élevée dans le condenseur diminue la quantité de chaleur évacuée au niveau du condenseur par conséquent la puissance de la turbine et du condenseur chutent. Ces résultats indiquent que l'ORC serait plus efficace avec de basses pressions de condensation.

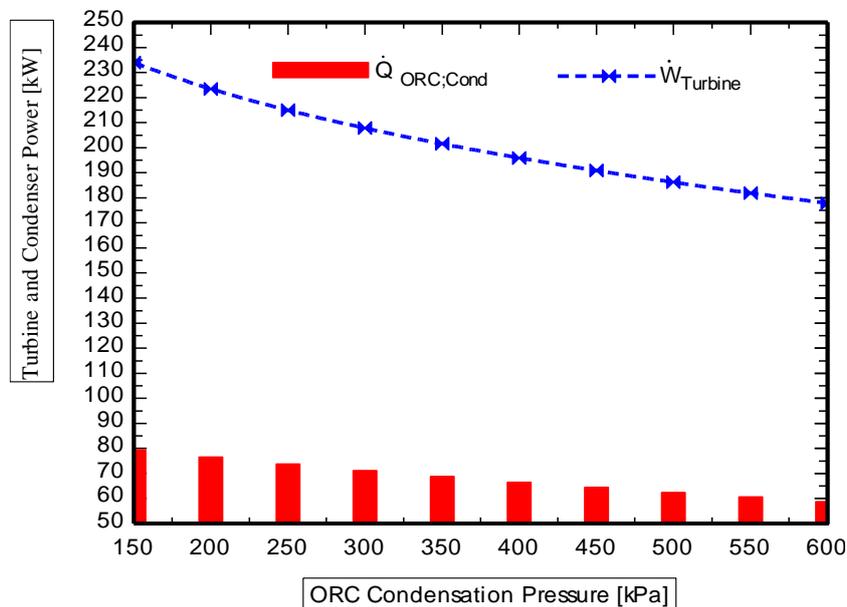


Figure III.1 : Variation de la puissance de la turbine et du condenseur en fonction de la pression du condenseur

I.2 Evolution de la puissance de la pompe, de la turbine, de l'évaporateur et du rendement ORC en fonction de la température de condensation de l'ORC

On fixe : $T_{EC_ORC} = 147 \text{ }^\circ\text{C}$; $\dot{m}_{ORC} = 1,25 \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$

La **figure III.2** montre que le rendement, la puissance mécanique de la turbine et la quantité de chaleur récupérée au niveau de l'évaporateur de l'ORC diminuent fortement avec l'augmentation de la température de condensation du système ORC. La puissance de la pompe est presque constante avec l'augmentation de la température de condensation de l'ORC jusqu'à une valeur de $60 \text{ }^\circ\text{C}$ avant de commencer à diminuer. Cela prouve que l'ORC serait plus performant à de basses températures de condensation.

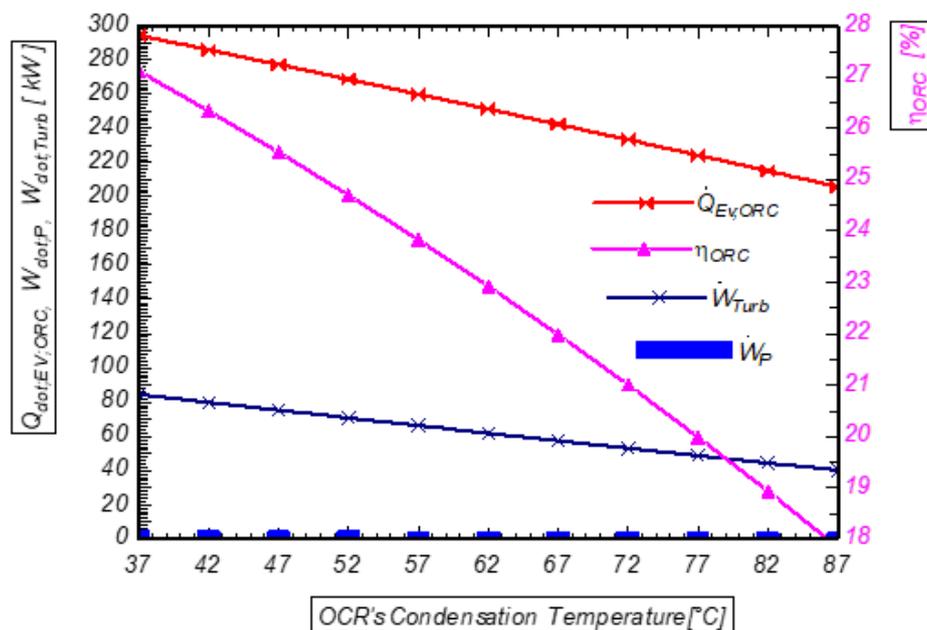


Figure III.2 : Evolution de la puissance de la pompe, de la turbine, de l'évaporateur et du rendement ORC en fonction de la température de condensation de l'ORC

I.3 Effet de l'augmentation du débit massique du fluide de travail ORC sur son rendement

On fixe : $T_{EC_ORC} = 147 \text{ }^\circ\text{C}$; $T_{Cd_ORC} = 32 \text{ }^\circ\text{C}$

D'après la **figure III.3** l'augmentation du débit massique du fluide de travail l'augmentation du rendement de l'ORC, ceci montre l'ORC serait beaucoup plus performant avec un débit massique élevé.

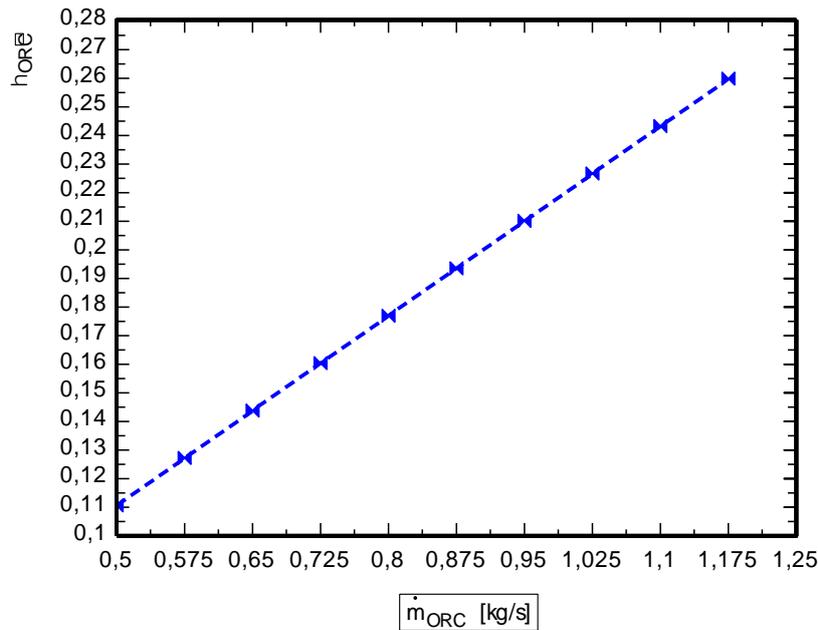


Figure III.3 : Effet de l'augmentation du débit massique du fluide de travail ORC sur le rendement de l'ORC

II Analyse thermodynamique de l'ACS

Les résultats obtenus pour le système ORC sont en parfait accord avec ceux trouvés dans la littérature [79], [80].

II.1 Evolution des échanges thermiques des principaux composants de l'ACS en fonction de la température d'absorption

On fixe : $T_{G_ACS} = 85\text{ }^{\circ}\text{C}$; $T_{EV_ACS} = 7\text{ }^{\circ}\text{C}$; $T_{Cd_ACS} = 38\text{ }^{\circ}\text{C}$

Dans la figure ci-après, on note que lorsque la température dans l'absorbeur augmente :

- ✚ la puissance thermique de l'évaporateur et du condenseur diminue progressivement ;
- ✚ la quantité de chaleur au niveau du générateur augmente progressivement ce qui est évident car l'absorbeur est relié directement au générateur ;
- ✚ la puissance thermique de l'absorbeur augmente légèrement entre $T_{ab} = 27\text{ }^{\circ}\text{C}$ et $T_{ab} = 33\text{ }^{\circ}\text{C}$ puis diminue. Elle atteint un maximum à $T_{ab} = 33\text{ }^{\circ}\text{C}$; ceci nous prouve que la température de fonctionnement optimale de l'absorbeur serait égale à $33\text{ }^{\circ}\text{C}$ et que la température dans l'absorbeur ne doit pas être ni trop faible ni trop élevée.

Généralement, pour obtenir des performances optimales dans les systèmes ACS, on fixe, pour l'absorbeur une température égale à celle de l'eau de refroidissement du condenseur.

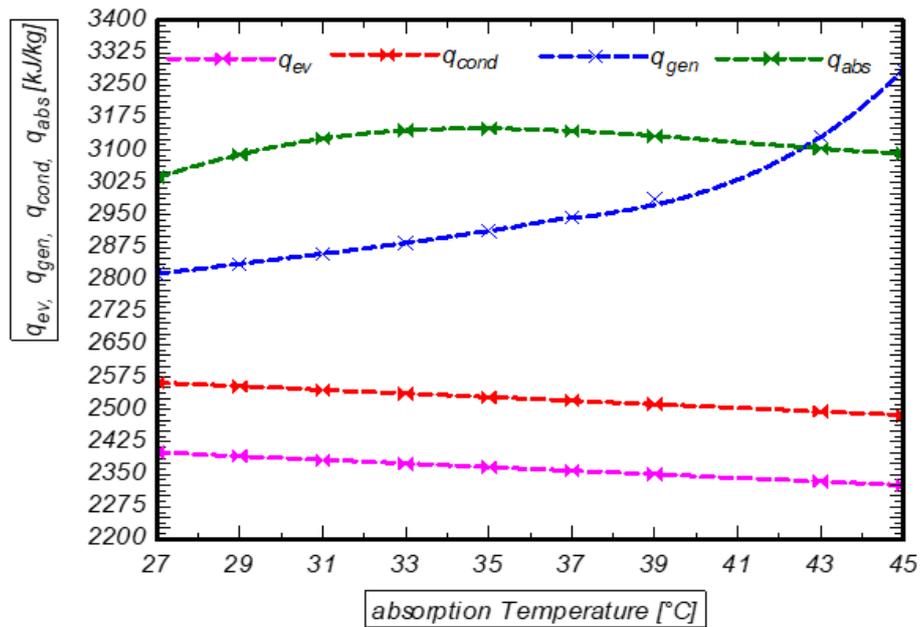


Figure III.4 : Variations des échanges thermiques des principaux composants de l’ACS en fonction de l’évolution température d’absorption

II.2 Variation du COP en fonction de la température du condenseur

On fixe : $T_{G_ACS} = 90\text{ }^{\circ}\text{C}$; $T_{Ab_ACS} = 42\text{ }^{\circ}\text{C}$; $T_{Ev_ACS} = 7\text{ }^{\circ}\text{C}$

La figure suivante indique une diminution du COP en fonction de la température du condenseur; en effet à la sortie du générateur la vapeur d’eau doit passer par le condenseur où elle se condense à la température ambiante. Lorsque la température du condenseur devient trop élevée, le pouvoir d’absorption de la solution LiBr se dégrade. En effet, le pouvoir d’absorption de la solution LiBr est plus fort à des températures plus basses de l’eau de refroidissement. Lorsque la température de l’eau de refroidissement dans le condenseur est basse, la température de condensation du réfrigérant diminue et la pression du condenseur devient donc faible.

Bien que la réduction de la température de l’eau du condenseur améliore les performances, elle pourrait entraîner une température suffisamment basse dans l’absorbeur et causer une cristallisation du sorbant et détériorer le système. Pour éviter cela il faut utiliser des températures modérées au niveau du condenseur.

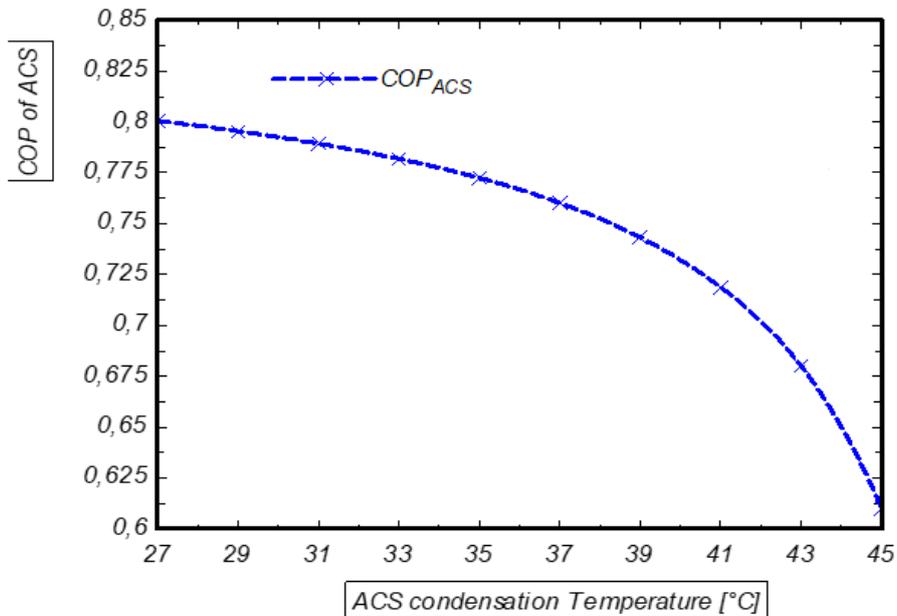


Figure III.5 : Variation du COP en fonction de la température du condenseur

II.3 Variation du COP en fonction de la température d'évaporation

On fixe : $T_{G_ACS} = 90\text{ }^{\circ}\text{C}$; $T_{Ab_ACS} = T_{Cd_ACS} = 42\text{ }^{\circ}\text{C}$

D'après la **figure III .6** le COP évolue de manière croissante avec l'augmentation température d'évaporation. En considérant un débit de réfrigérant fixe, l'augmentation de la température d'évaporation entraîne une augmentation de la puissance thermique de l'évaporateur, ceci étant dû au fait que l'augmentation de la température d'évaporation conduit à l'augmentation de la chaleur latente d'évaporation du réfrigérant; et par conséquent le COP augmente.

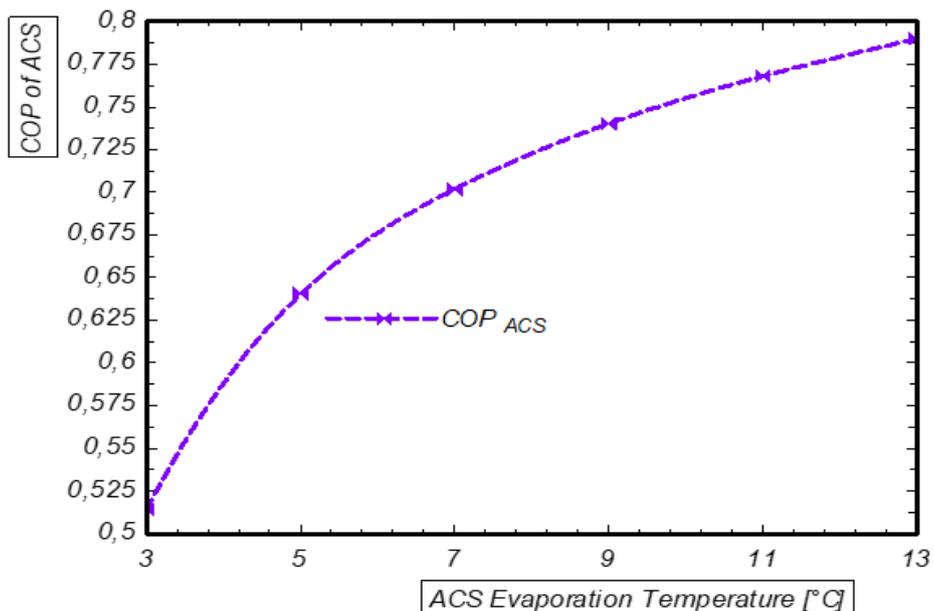


Figure III.6 : Variation du COP en fonction de la température d'évaporation

II.4 Impact du facteur de circulation sur la température de l'absorbeur

On fixe : $T_{G_ACS} = 89\text{ }^{\circ}\text{C}$; $T_{Ev_ACS} = 7\text{ }^{\circ}\text{C}$; $T_{Cd_ACS} = 43\text{ }^{\circ}\text{C}$

La **figure III.7** montre que la croissance de la température d'absorption conduit à une augmentation du taux de circulation ; en effet l'augmentation de la température de l'absorbeur entraîne l'augmentation de la concentration en absorbant de la solution dans l'absorbeur, et par conséquent, le taux de circulation augmente. Globalement, pour obtenir de meilleures performances pour l'ACS, le taux de circulation doit être minimisé, en conséquence, la température d'absorption doit être basse.

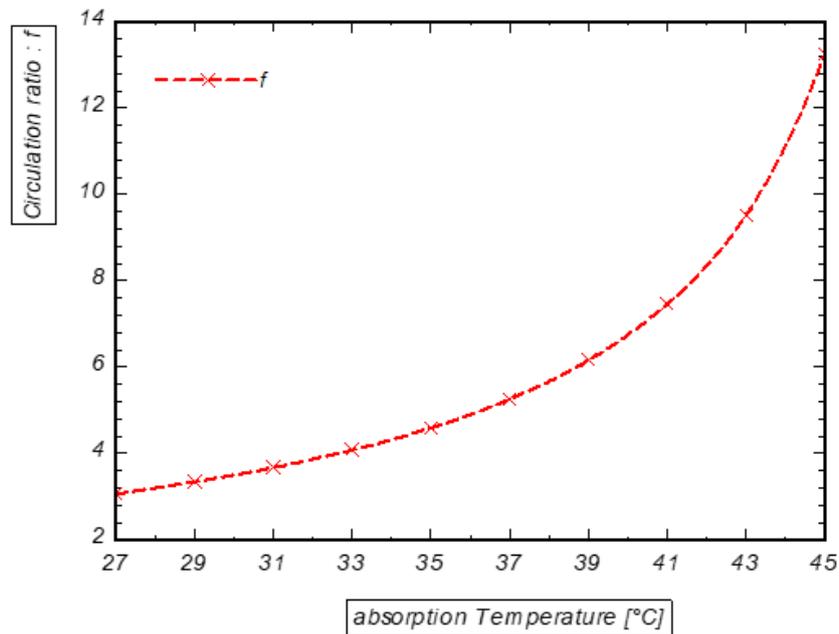


Figure III.7 : Impact de la température d'absorption sur le facteur de circulation

III. Effet de la température de la source de chaleur sur le rendement de l'ORC et le COP de l'ACS

On fixe pour l'ORC : $T_{G_ACS} = 90\text{ }^{\circ}\text{C}$; $T_{Ab_ACS} = 42\text{ }^{\circ}\text{C}$; $T_{Ev_ACS} = 7\text{ }^{\circ}\text{C}$

On fixe pour l'ACS : $T_{EC_ORC}=130\text{ }^{\circ}\text{C}$; $T_{Cd_ORC} = 32\text{ }^{\circ}\text{C}$; $\dot{m}_{ORC} = 2,25\text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$

D'après la **figure III.8** on note que :

- ✚ L'augmentation de la température du fluide de transfert (source de chaleur) entraîne une légère augmentation du rendement énergétique du cycle organique de Rankine ce qui est évident car la température optimale de la source de chaleur pour un ORC R245fa est de $170\text{ }^{\circ}\text{C}$ [40].
- ✚ et une diminution du COP, ceci s'explique dû au fait que pour un système de refroidissement à absorption solaire à simple effet la dans les régions chaudes, les

performances du système prennent leur valeur optimale à des températures de source de chaleur comprises entre 75 et 80 °C [102].

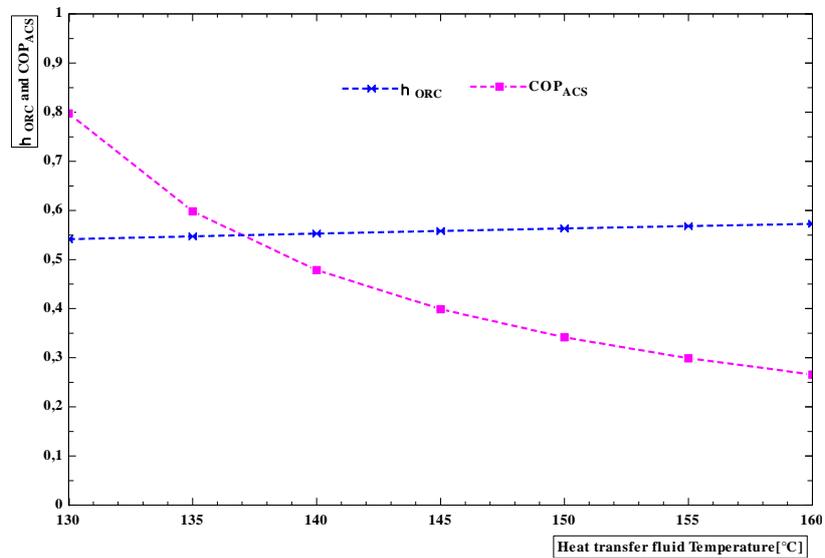


Figure III.8 : Effet de la température de la source de chaleur sur le rendement de l'ORC et le COP de l'ACS

Conclusion

Les résultats obtenus montrent que les performances et l'efficacité du système solaire combiné ORC/ACS dépendent fortement des paramètres tels que : la température et la pression de fonctionnement des différents éléments qui composent le système.

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

La préoccupation croissante concernant l'épuisement futur des réserves de combustibles fossiles et la destruction dramatique de notre environnement ont fait naître un sentiment d'impuissance. Ainsi, il apparaît urgent de développer des alternatives durables à l'utilisation des sources d'énergies fossiles. Le but de ce présent travail est de faire une analyse thermodynamique d'un système solaire combiné ORC et ACS pour la production d'énergie électrique et de froid.

A cet effet, un modèle de simulation a été résolu à l'aide du logiciel EES, afin d'étudier les performances du système. D'après les résultats de la simulation, on peut conclure que :

- la puissance délivrée par la turbine et celle générée par le condenseur diminue lorsque la pression de condensation augmente,
- l'augmentation du débit massique du fluide de travail a un effet positif sur le rendement de l'ORC,
- la température d'absorption a une grande influence sur les échanges thermique des différents composants du système ACS,
- des températures de condensation trop élevées font chuter le COP,
- des valeurs de COP plus élevées sont obtenues pour des températures d'évaporation élevées,
- la température de la source de chaleur a une très grande influence sur les performances du système combiné ORC-ACS.

Le système combiné ORC-ACS assisté par le soleil fait partie des technologies durables les plus prometteuses. Il présente un grand avantage dans les régions chaudes comme le SENEGAL du fait de la disponibilité d'un important gisement solaire et en raison de la quasi-synchronisation du pic de la demande de refroidissement avec un rayonnement solaire élevé pendant les périodes estivales. L'inconvénient de l'énergie solaire est sa nature intermittente, qui provoque un déséquilibre entre la demande des consommateurs et la disponibilité de la source de chaleur. De ce fait pour déplacer l'énergie excédentaire des périodes de forte insolation vers les périodes nocturnes ou les périodes de conditions défavorables; l'ajout d'un système de stockage d'énergie thermique fera l'objet d'études ultérieures. Cette solution augmentera l'efficacité, la fiabilité et la flexibilité du système.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] 'Aner – Agence Nationale pour les Energies Renouvelables'. Accessed: Oct. 22, 2023. [Online]. Available: <https://www.aner.sn/>
- [2] 'Renforcer et moderniser le réseau électrique de la SENELEC'. Accessed: Oct. 22, 2023. [Online]. Available: <https://www.afd.fr/fr/carte-des-projets/renforcer-et-moderniser-le-reseau-electrique-de-la-senelec>
- [3] 'SENEGAL-ELECTRIFICATION-ACCES / Le taux d'électrification s'établit à 85% en milieu urbain et 60% en milieu rural (ministre des Energies) - Agence de presse sénégalaise - APS'. Accessed: May 10, 2024. [Online]. Available: <https://aps.sn/le-taux-delectrification-setablit-a-85-en-milieu-urbain-et-60-en-milieu-rural-ministre-des-energies/>
- [4] 'Sénégal : Voies vers la transition énergétique', EITI. Accessed: Oct. 22, 2023. [Online]. Available: <https://eiti.org/fr/documents/senegal-voies-vers-la-transition-energetique>
- [5] 'Thermodynamic analysis of a combined gas turbine, ORC cycle and absorption refrigeration for a CCHP system - ScienceDirect'. Accessed: May 12, 2023. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1359431116317689?via%3Dihub>
- [6] 'Cycle de Rankine — Encyclopedie Energie'. Accessed: May 15, 2023. [Online]. Available: https://energyeducation.ca/fr/Cycle_de_Rankine
- [7] 'Cycle de Rankine : la conversion de la chaleur en travail et ses usages'. Accessed: May 15, 2023. [Online]. Available: <https://lenergie-solaire.net/thermodynamique/cycles-thermodynamiques/cycle-rankine>
- [8] 'Organic rankine cycle history | Kaymacor'. Accessed: May 17, 2023. [Online]. Available: <https://www.kaymacor.com/rankine-cycle>
- [9] Y. TALEB, 'Recherche bibliographique sur Machine à cycle organique de Rankine ORC et l'outil de simulation DYMOLA'.
- [10] G. Bamorovat Abadi and K. C. Kim, 'Investigation of organic Rankine cycles with zeotropic mixtures as a working fluid: Advantages and issues', *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 73, pp. 1000–1013, Jun. 2017, doi: 10.1016/j.rser.2017.02.020.
- [11] 'Applications des cycles ORC', Techniques de l'Ingénieur. Accessed: May 23, 2023. [Online]. Available: <https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/energies-th4/thermodynamique-et-energetique-42216210/cycles-organiques-de-rankine-cor-be8048/applications-des-cycles-orc-be8048niv10002.html>
- [12] Bertani, R, Geothermal power generation in the world 2005-2010 update report. Geothermics(2011) doi:10.1016:j.geothermics.2011.10.001
- [13] S. Quoilin, M. Van den Broeck, S. Declaye, P. Dewallef, and V. Lemort, 'Techno-economic survey of Organic Rankine Cycle (ORC) systems', *RENEWABLE & SUSTAINABLE ENERGY REVIEWS*, vol. 22, pp. 168–186, Jun. 2013, doi: 10.1016/j.rser.2013.01.028.
- [14] W. Eugster, 'Road and Bridge Heating Using Geothermal Energy. Overview and Examples.', 2007. Accessed: May 22, 2023. [Online]. Available: <https://www.semanticscholar.org/paper/Road-and-Bridge-Heating-Using-Geothermal-Energy.-Eugster/435d3d5a3915067d6c2a95f9120ad2db6019523a>
- [15] E. Barbier, 'Geothermal energy technology and current status: an overview', *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 6, no. 1, pp. 3–65, Jan. 2002, doi: 10.1016/S1364-0321(02)00002-3.
- [16] R. Moro, P. Pinamonti, and M. Reini, 'ORC technology for waste-wood to energy conversion in the furniture manufacturing industry', *Thermal Science - THERM SCI*, vol. 12, pp. 61–73, Jan. 2008, doi: 10.2298/TSCI0804061M.
- [17] Y. Laouid, 'Thermo-economic optimization of organic Rankine cycle for waste heat recovery', 2022.
- [18] S. Quoilin, M. van den Broeck, S. Declaye, P. Dewallef, and V. Lemort, 'Techno-economic survey of Organic Rankine Cycle (ORC) systems', *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 22, Jun. 2013, doi: 10.1016/j.rser.2013.01.028.

- [19] 'Figure 3: Working principle of the biomass-fired ORC process in Lienz', ResearchGate. Accessed: May 26, 2023. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/figure/Working-principle-of-the-biomass-fired-ORC-process-in-Lienz_fig4_228910304
- [20] S. Quoilin, M. Orosz, H. Hemond, and V. Lemort, 'Performance and design optimization of a low-cost solar organic Rankine cycle for remote power generation', *Solar Energy*, vol. 85, no. 5, pp. 955–966, May 2011, doi: 10.1016/j.solener.2011.02.010.
- [21] D. A. Baharoon, H. A. Rahman, W. Z. W. Omar, and S. O. Fadhl, 'Historical development of concentrating solar power technologies to generate clean electricity efficiently – A review', *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 41, pp. 996–1027, Jan. 2015, doi: 10.1016/j.rser.2014.09.008.
- [22] F. Marty, 'Optimisation de la structure globale des activités de surface d'une centrale géothermique à cogénération électricité/chaleur', These de doctorat, Pau, 2017. Accessed: May 25, 2023. [Online]. Available: <https://www.theses.fr/2017PAUU3021>
- [23] K. Elsaid, E. Taha Sayed, B. A. A. Yousef, M. Kamal Hussien Rabaia, M. Ali Abdelkareem, and A. G. Olabi, 'Recent progress on the utilization of waste heat for desalination: A review', *Energy Conversion and Management*, vol. 221, p. 113105, Oct. 2020, doi: 10.1016/j.enconman.2020.113105.
- [24] S. Lecompte, H. Huisseune, M. Van den Broek, B. Vanslambrouck, and M. De Paepe, 'Review of organic Rankine cycle (ORC) architectures for waste heat recovery', *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 47, pp. 448–461, Jul. 2015, doi: 10.1016/j.rser.2015.03.089.
- [25] L. F. Moreira and F. R. P. Arrieta, 'Thermal and economic assessment of organic Rankine cycles for waste heat recovery in cement plants', *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 114, p. 109315, Oct. 2019, doi: 10.1016/j.rser.2019.109315.
- [26] L. Zhang, L. Wu, X. Zhang, and G. Ju, 'Comparison and Optimization of Mid-low Temperature Cogeneration Systems for Flue Gas in Iron and Steel Plants', *Journal of Iron and Steel Research, International*, vol. 20, no. 11, pp. 33–40, Nov. 2013, doi: 10.1016/S1006-706X(13)60193-4.
- [27] 'ORC Heat Recovery system for Industrial Processes', Exergy. Accessed: Jul. 25, 2023. [Online]. Available: <https://www.exergy-orc.com/application/heat-recovery-from-industrial-process/>
- [28] R. Pili, L. García Martínez, C. Wieland, and H. Spliethoff, 'Techno-economic potential of waste heat recovery from German energy-intensive industry with Organic Rankine Cycle technology', *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 134, p. 110324, Dec. 2020, doi: 10.1016/j.rser.2020.110324.
- [29] P. Bombarda, C. Invernizzi, and M. Gaia, 'Performance Analysis of OTEC Plants With Multilevel Organic Rankine Cycle and Solar Hybridization', *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, vol. 135, no. 4, p. 042302, Apr. 2013, doi: 10.1115/1.4007729.
- [30] '(PDF) Manuel de transfert de chaleur'. Accessed: Jul. 25, 2023. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/206201081_Handbook_of_Heat_Transfer
- [31] P. Bombarda, C. Invernizzi, and M. Gaia, 'Performance Analysis of OTEC Plants With Multilevel Organic Rankine Cycle and Solar Hybridization', *J. Eng. Gas Turbines Power*, vol. 135, no. 4, Apr. 2013, doi: 10.1115/1.4007729.
- [32] Youthdestination, 'Ocean Thermal Energy Conversion Plant coming up in Lakshadweep', Youth Destination IAS. Accessed: Jul. 25, 2023. [Online]. Available: <https://youthdestination.in/ocean-thermal-energy-conversion-plant-coming-up-in-lakshadweep/>
- [33] 'Ocean Thermal Energy Conversion (OTEC)'. Accessed: Jul. 25, 2023. [Online]. Available: <https://mechanicalxx.blogspot.com/2016/09/ocean-thermal-energy-conversion-otec.html>
- [34] H. Yu, X. Feng, and Y. Wang, 'Working Fluid Selection for Organic Rankine Cycle (ORC) Considering the Characteristics of Waste Heat Sources', *Ind. Eng. Chem. Res.*, vol. 55, no. 5, pp. 1309–1321, Feb. 2016, doi: 10.1021/acs.iecr.5b02277.
- [35] 'Fluides frigorigènes [Climatisation]', Energie Plus Le Site. Accessed: Oct. 07, 2023. [Online]. Available: <https://energieplus-lesite.be/techniques/climatisation8/composants-installation-frigorifique/fluides-frigorigenes/>

- [36] A. Sekiya and S. Misaki, 'The potential of hydrofluoroethers to replace CFCs, HCFCs and PFCs', *Journal of Fluorine Chemistry*, vol. 101, no. 2, pp. 215–221, Feb. 2000, doi: 10.1016/S0022-1139(99)00162-1.
- [37] S. Quoilin, S. Declaye, B. F. Tchanche, and V. Lemort, 'Thermo-economic optimization of waste heat recovery Organic Rankine Cycles', *Applied Thermal Engineering*, vol. 31, no. 14–15, pp. 2885–2893, Oct. 2011, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2011.05.014.
- [38] G. Qiu, 'Selection of working fluids for micro-CHP systems with ORC', *Renewable Energy*, vol. 48, pp. 565–570, Dec. 2012, doi: 10.1016/j.renene.2012.06.006.
- [39] S. Quoilin, M. V. D. Broek, S. Declaye, P. Dewallef, and V. Lemort, 'Techno-economic survey of Organic Rankine Cycle (ORC) systems', *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 22, pp. 168–186, Jun. 2013, doi: 10.1016/j.rser.2013.01.028.
- [40] D. Wang, X. Ling, H. Peng, L. Liu, and L. Tao, 'Efficiency and optimal performance evaluation of organic Rankine cycle for low grade waste heat power generation', *Energy*, vol. 50, pp. 343–352, Feb. 2013, doi: 10.1016/j.energy.2012.11.010.
- [41] F. Molés, J. Navarro-Esbrí, B. Peris, A. Mota-Babiloni, and C. Mateu-Royo, 'R1234yf and R1234ze as alternatives to R134a in Organic Rankine Cycles for low temperature heat sources', *Energy Procedia*, vol. 142, pp. 1192–1198, Dec. 2017, doi: 10.1016/j.egypro.2017.12.380.
- [42] V. L. Le, M. Feidt, A. Kheiri, and S. Pelloux-Prayer, 'Performance optimization of low-temperature power generation by supercritical ORCs (organic Rankine cycles) using low GWP (global warming potential) working fluids', *Energy*, vol. 67, pp. 513–526, Apr. 2014, doi: 10.1016/j.energy.2013.12.027.
- [43] S. Quoilin, M. V. D. Broek, S. Declaye, P. Dewallef, and V. Lemort, 'Techno-economic survey of Organic Rankine Cycle (ORC) systems', *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 22, pp. 168–186, Jun. 2013, doi: 10.1016/j.rser.2013.01.028.
- [44] X. Wang *et al.*, 'Working fluid selection for organic Rankine cycle power generation using hot produced supercritical CO₂ from a geothermal reservoir', *Applied Thermal Engineering*, vol. 149, pp. 1287–1304, Feb. 2019, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2018.12.112.
- [45] J. Song, P. Loo, J. Teo, and C. N. Markides, 'Thermo-Economic Optimization of Organic Rankine Cycle (ORC) Systems for Geothermal Power Generation: A Comparative Study of System Configurations', *Frontiers in Energy Research*, vol. 8, 2020, Accessed: Aug. 03, 2023. [Online]. Available: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fenrg.2020.00006>
- [46] B. F. Tchanche, G. Papadakis, G. Lambrinos, and A. Frangoudakis, 'Fluid selection for a low-temperature solar organic Rankine cycle', *Applied Thermal Engineering*, vol. 29, no. 11, pp. 2468–2476, Aug. 2009, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2008.12.025.
- [47] D. Dragomir-Stanciu, S. M. Saghebian, and A. Kurchania, 'The Influence of Condensing Temperature on the Efficiency of Solar Power Systems with ORC', *Procedia Manufacturing*, vol. 46, pp. 359–363, Jan. 2020, doi: 10.1016/j.promfg.2020.03.052.
- [48] J. Freeman, I. Guarracino, S. A. Kalogirou, and C. N. Markides, 'A small-scale solar organic Rankine cycle combined heat and power system with integrated thermal energy storage', *Applied Thermal Engineering*, vol. 127, pp. 1543–1554, Dec. 2017, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2017.07.163.
- [49] 'Organic Rankine Cycle Market Size & Share [2023 Report]'. Accessed: May 18, 2023. [Online]. Available: <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/organic-rankine-cycle-market>
- [51] 'ZER6254.pdf'. Accessed: Jul. 03, 2023. [Online]. Available: <https://bu.umc.edu.dz/theses/ch-ind/ZER6254.pdf>
- [52] 'Thésés-Algérie: Doctorat, Magister, Master...'. Accessed: Jul. 03, 2023. [Online]. Available: <https://www.theses-algerie.com>
- [50] A. Eggers-lura, Ed., 'INDEX', in *Solar Energy in Developing Countries*, Pergamon, 1979, pp. 199–205. doi: 10.1016/B978-0-08-023253-9.50011-2.
- [53] C. A. Hamichi Meriem, Université Akli Mohand Oulhadji, Mémoire de Master, 2018.

- [54] M. Korieb, Y. Lamri, and Z. Triki, 'Analyse thermodynamique et exergetique d'une machine frigorifique à absorption', 2019, Accessed: Jul. 05, 2023. [Online]. Available: <http://dspace.univ-medea.dz/handle/123456789/1738>
- [55] L. M. Amoo, '13 - On a selection of the applications of thermodynamics', in *Applications of Heat, Mass and Fluid Boundary Layers*, R. O. Fagbenle, O. M. Amoo, S. Aliu, and A. Falana, Eds., in Woodhead Publishing Series in Energy. , Woodhead Publishing, 2020, pp. 383–412. doi: 10.1016/B978-0-12-817949-9.00021-9.
- [56] 'How Does a Compression Refrigeration System Work?', Process Solutions, Inc. Accessed: Jul. 15, 2023. [Online]. Available: <https://processsolutions.com/how-does-a-compression-refrigeration-system-work/>
- [57] A. BHATIA, 'Overview of Vapor Absorption Cooling System'. [Online]. Available: <https://www.cedengineering.com/userfiles/M04-025%20-%20Overview%20of%20Vapor%20Absorption%20Cooling%20System%20-%20US.pdf>
- [58] 'Comment faire du froid avec le soleil ?' Accessed: Jul. 16, 2023. [Online]. Available: <https://www.synonyme-du-mot.com/les-articles/comment-faire-du-froid-avec-le-soleil>
- [59] 'Utiliser le soleil pour générer du froid | INC'. Accessed: Jul. 16, 2023. [Online]. Available: <https://www.inc.cnrs.fr/fr/cnrsinfo/utiliser-le-soleil-pour-generer-du-froid>
- [60] 'ResearchGate'. Accessed: Jul. 19, 2023. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/308916368_Machine_frigorifique_solaire_a_adsorption/link/57f7515008ae280dd0bca57c/download
- [61] M. Ebrahimi and A. Keshavarz, '2 - CCHP Technology', in *Combined Cooling, Heating and Power*, M. Ebrahimi and A. Keshavarz, Eds., Boston: Elsevier, 2015, pp. 35–91. doi: 10.1016/B978-0-08-099985-2.00002-0.
- [62] M. G. Gado, E. Elgendy, K. Elsayed, and M. Fatouh, 'Parametric Study of an Adsorption Refrigeration System Using Different Working Pairs'.
- [63] '02_Machines_frigorifiques_sorption.pdf'. Accessed: Jul. 17, 2023. [Online]. Available: https://www.solairecollectif.fr/photo/img/Froid%20solaire/Fiches%20techniques%20composants/02_Machines_frigorifiques_sorption.pdf
- [64] '1994 Ashrae Handbook Refrigeration - AbeBooks'. Accessed: Aug. 09, 2023. [Online]. Available: <https://www.abebooks.com/book-search/title/1994-ashrae-handbook-refrigeration/>
- [65] J. M. Abdulateef, K. Sopian, and M. A. Alghoul, 'OPTIMUM DESIGN FOR SOLAR ABSORPTION REFRIGERATION SYSTEMS AND COMPARISON OF THE PERFORMANCES USING AMMONIA-WATER, AMMONIA- LITHIUM NITRATE AND AMMONIA-SODIUM THIOCYANATE SOLUTIONS'.
- [66] Academic Gain Tutorials, *How Lithium Bromide Absorption Refrigeration System Works - Parts & Function Explained.*, (Jun. 15, 2020). Accessed: Jul. 25, 2023. [Online Video]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=0YwM1OTMO9o>
- [67] H. Perez-Blanco, 'Absorption heat pump performance for different types of solutions', *International Journal of Refrigeration*, vol. 7, no. 2, pp. 115–122, Mar. 1984, doi: 10.1016/0140-7007(84)90024-0.
- [68] J. Killion and S. Garimella, 'A critical review of models of coupled heat and mass transfer in falling-film absorption', *International Journal of Refrigeration*, vol. 24, pp. 755–797, Dec. 2001, doi: 10.1016/S0140-7007(00)00086-4.
- [69] P. Sriksirin, S. Aphornratana, and S. Chungpaibulpatana, 'A review of absorption refrigeration technologies', *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 5, no. 4, pp. 343–372, Dec. 2001, doi: 10.1016/S1364-0321(01)00003-X.
- [70] P. D. Iedema, 'Mixtures for the absorption heat pump', *International Journal of Refrigeration*, vol. 5, no. 5, pp. 262–273, Sep. 1982, doi: 10.1016/0140-7007(82)90065-2.
- [71] Y. J. Kim, S. Kim, Y. K. Joshi, A. G. Fedorov, and P. A. Kohl, 'Thermodynamic analysis of an absorption refrigeration system with ionic-liquid/refrigerant mixture as a working fluid', *Energy*, vol. 44, no. 1, pp. 1005–1016, 2012.

- [72] S. Kim, 'An absorption refrigeration system using ionic liquid and hydrofluorocarbon working fluids', Dec. 2013. Accessed: Aug. 10, 2023. [Online]. Available: <https://www.semanticscholar.org/paper/An-absorption-refrigeration-system-using-ionic-and-Kim/23d37a4747982e763a59ecb759b501cc0021e7a8>
- [73] C. Amaris, M. Bourouis, and M. Vallès, 'Passive intensification of the ammonia absorption process with NH₃/LiNO₃ using carbon nanotubes and advanced surfaces in a tubular bubble absorber', *Energy*, vol. 68, p. 519, 2014.
- [74] K. E. Herold, *Refrigerateurs à absorption et pompes à chaleur*.
- [75] H. M. Ariyadi, 'Thermodynamic study on absorption refrigeration systems using ammonia/ionic liquid working pairs', Ph.D. Thesis, Universitat Rovira i Virgili, 2016. Accessed: Aug. 12, 2023. [Online]. Available: <https://www.tdx.cat/handle/10803/396178>
- [76] A. A. Berestneff, 'Absorption refrigeration system', US2565943A, Aug. 28, 1951 Accessed: Aug. 10, 2023. [Online]. Available: <https://patents.google.com/patent/US2565943A/en>
- [77] R. A. Zogg, M. Y. Feng, and D. Westphalen, 'Guide to Developing Air-Cooled LiBr Absorption for Combined Heat and Power Applications', 2005.
- [78] D. Kim, C. Infante Ferreira, G. Tanda, and P. Pronk, 'Optimization of a solar ammonia-water absorption chiller', *Thermophysical properties and transfer processes of refrigerants*, pp. 741–748, 2005.
- [79] 'IJETAE_0914_64.pdf'. Accessed: Sep. 02, 2023. [Online]. Available: https://ijetae.com/files/Volume4Issue9/IJETAE_0914_64.pdf
- [80] S. Garimella, R. N. Christensen, and D. Lacy, 'Performance evaluation of a generator-absorber heat-exchange heat pump', *Applied Thermal Engineering*, vol. 16, no. 7, pp. 591–604, Jul. 1996, doi: 10.1016/1359-4311(95)00041-0.
- [81] V. K. Bajpai, 'Design of Solar Powered Vapour Absorption System', 2012.
- [82] T. Shaikh and Y. J. Morabiya, 'REVIEW OF SOLAR ABSORPTION REFRIGERATION SYSTEM USING LiBr-WATER AND SIMULATE THE PERFORMANCE OF THE SYSTEM'.
- [83] S. Raghuvanshi and G. Maheshwari, 'Analysis of Ammonia -Water (NH₃-H₂O) Vapor Absorption Refrigeration System based on First Law of Thermodynamics'. Accessed: Sep. 02, 2023. [Online]. Available: <https://www.semanticscholar.org/author/S.-Raghuvanshi/80777376>
- [84] M. A. Mehrabian and A. E. Shahbeik, 'Thermodynamic modelling of a single-effect LiBr-H₂O absorption refrigeration cycle', *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*, vol. 219, no. 3, pp. 261–273, Aug. 2005, doi: 10.1243/095440805X8656.
- [85] K. R. Ullah, R. Saidur, H. W. Ping, R. K. Akikur, and N. H. Shuvo, 'A review of solar thermal refrigeration and cooling methods', *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 24, pp. 499–513, Aug. 2013, doi: 10.1016/j.rser.2013.03.024.
- [86] 'Article Boutina A12 | PDF | Réfrigérateur | Chaleur', Scribd. Accessed: Oct. 05, 2023. [Online]. Available: <https://fr.scribd.com/document/579412165/Article-Boutina-A12>
- [87] R. Touaibi, E. E. Vasilescu, M. Feidt, A. Kheiri, M. T. Abbas, and B. Khelidj, 'Etude paramétrique d'un système de réfrigération par absorption'.
- [88] S. Kaushik and D. S. Singh, 'Thermodynamic Analysis of Vapor Absorption Refrigeration System and Calculation of COP', *ENGINEERING TECHNOLOGY*.
- [89] 'Absorption Chillers Market Size, Share, Analysis, Forecast 2031', Allied Market Research. Accessed: Jul. 05, 2023. [Online]. Available: <https://www.alliedmarketresearch.com/absorption-chillers-market>
- [90] 'Global Chillers Market Size & Forecast, [Latest]', MarketsandMarkets. Accessed: Jul. 12, 2023. [Online]. Available: <https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/chiller-market-149638848.html>
- [91] A. Marin, A. Untea, L. Grosu, A. Dobrovicescu, and D. Queiros-Conde, 'PERFORMANCE EVALUATION OF A COMBINED ORGANIC RANKINE CYCLE AND AN ABSORPTION REFRIGERATION SYSTEM'.

- [92] G. Lavinia, A. Marin, A. Dobrovicescu, and D. Queiros-Conde, 'Exergy analysis of a solar combined cycle: organic Rankine cycle and absorption cooling system', *International Journal of Energy and Environmental Engineering*, vol. 7, Mar. 2015, doi: 10.1007/s40095-015-0168-y.
- [93] 'ees_french_man.pdf'. Accessed: Aug. 10, 2024. [Online]. Available: https://fchartsoftware.com/assets/downloads/ees_french_man.pdf
- [94] 'EES - Introduction - MEC1210_H2023.pdf'. Accessed: Aug. 10, 2024. [Online]. Available: https://moodle.polymtl.ca/pluginfile.php/1055250/mod_resource/content/36/EES%20-%20Introduction%20-%20MEC1210_H2023.pdf
- [95] S. Khatoon, N. M. A. Almefreji, and M.-H. Kim, 'Thermodynamic Study of a Combined Power and Refrigeration System for Low-Grade Heat Energy Source', *Energies*, vol. 14, no. 2, Art. no. 2, Jan. 2021, doi: 10.3390/en14020410.
- [96] G. Lavinia, A. Dobrovicescu, A. Untea, and P. Rochelle, 'Etude d'un système de rafraîchissement solaire à absorption: dimensionnement et simulations numériques', Jan. 2012.
- [97] R. Rayegan and Y. X. Tao, 'A procedure to select working fluids for Solar Organic Rankine Cycles (ORCs)', *Renewable Energy*, vol. 36, no. 2, pp. 659–670, Feb. 2011, doi: 10.1016/j.renene.2010.07.010.
- [98] 'Absorption Chillers Market Size, Share, Analysis, Forecast 2031', Allied Market Research. Accessed: Jul. 08, 2023. [Online]. Available: <https://www.alliedmarketresearch.com/absorption-chillers-market>
- [99] 'Absorption Chillers Market Size, Industry Share & Growth Rate 2030'. Accessed: Jul. 12, 2023. [Online]. Available: <https://www.fortunebusinessinsights.com/industry-reports/absorption-chillers-market-100906>
- [100] F. Aziz, M. S. Salim, and M.-H. Kim, 'Performance analysis of high temperature cascade organic Rankine cycle coupled with water heating system', *Energy*, vol. 170, pp. 954–966, Mar. 2019, doi: 10.1016/j.energy.2018.12.210.
- [101] P. Garg, M. S. Orosz, and P. Kumar, 'Thermo-economic evaluation of ORCs for various working fluids', *Applied Thermal Engineering*, vol. 109, pp. 841–853, Oct. 2016, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2016.06.083.
- [102] A. Saleh and M. Mosa, 'Optimization study of a single-effect water–lithium bromide absorption refrigeration system powered by flat-plate collector in hot regions', *Energy Conversion and Management*, vol. 87, pp. 29–36, Nov. 2014, doi: 10.1016/j.enconman.2014.06.098.

