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

UNIVERSITE YAHIA FARES DE MEDEA
FACULTE DE TECHNOLOGIE

2021-UYFM-LBMPT

T H ÈS E DE DOCTORAT

Pour obtenir le grade de docteur

L'Université Yahia Farès de Médéa
Spécialité : Génie Mécanique
Option : Energétique nucléaire

Présentée et soutenue publiquement par

MENASRI Rabah

2021 / 2022

OPTIMISATION DU COUPLAGE DES RÉACTEURS NUCLEAIRES ET DES SYSTEMES DE DESSALEMENT

Directeur de Thèse : Dr. Zakaria TRIKI

Co-Directeur de Thèse : Pr. Mohamed Nadjib BOUAZIZ

Soutenue le 15/12/2021 devant le jury composé de :

Mr. Salah HANINI	**Professeur, Université de Médéa**	**Président de jury**
Mr. Zakaria TRIKI	**MCA, Université de Médéa**	**Directeur de Thèse**
Mr. Mohamed Nadjib BOUAZIZ	**Professeur, Université de Médéa**	**Co-Directeur de Thèse**
Mr. Mohamed ABBAS	**Professeur, UDES**	**Examinateur**
Mr. Younes CHIBA	**MCA, Université de Médéa**	**Examinateur**

Laboratoire de Biomatériaux
et Phénomènes de Transport

THÈSE

Dédicace

Au nom de Dieu tout-puissant, qui nous a éclairé les chemins de savoir

Je dédie ce travail À **mes chers parents** symbole de douceur, detendresse et d'amour, pour leurs **soutiens**, leurs **patiences**, et pour leurs **sacrifices**, pour tout ce qu'ils ont fait pour que je puisse arriver à ce stade.

Àtous les membres de ma **famille paternelle** et **maternelle** sans exception.

À mes chères **sœurs** et chers **frères** ; pour leurs encouragements, et l'amour qui m'entourait. Que Dieu leur apporte bonheur, santé et grande réussite.

À tous **mes amis proches** Mohamed, Zakaria, Ahmed … sur tout pour leur **soutien moral** et pour tous les bons moments que nous avons passés ensemble tout au long des années d'études.

Àtous **mes amies** et **collègues de laboratoire** et **doctorants** de **l'Université Yahia Farès de Médéa** et aussi À tous ceux qui me connaissent de près ou de loin.

Àma promotion **(2014-2015)** de **Génie Mécanique** sans exception.

À toutes les personnes que je n'ai pas citées mais que je porte dans mon cœur et À tous ceux qui m'ont soutenu de près ou de loin.

MENASRI Rabah

Remerciements et gratitude

À la lumière de ce travail, je tiens d'abord à remercier ***ALLAH Tout-Puissant*** *de m'avoir donné le courage, la santé et la patience pour mener à bien ce travail.*

Tout d'abord, parce qu'elle le mérite vraiment, je tiens à remercier mon directeur de thèse, Monsieur ***TRIKI Zakaria****, Maître de Conférence (A) à l'UYFM, qui m'a guidé avec grande patience tout au long de l'élaboration de ce travail, pour sa compréhension, pour ses précieuses aides, pour sa disponibilité et ces qualités humaines et scientifiques.*

Je tiens aussi à exprimer ma gratitude et mes sincères remerciements à mon co-directeur de thèse, Monsieur ***BOUAZIZ Mohamed Nadjib****, Professeur à l'UYFM et directeur de laboratoire de* ***Biomatériaux et Phénomènes de Transport (LBMPT)****, qui m'a guidé avec grande patience tout au long l'élaboration de ce travail, pour ses précieux conseils,pour son aide permanente services qu'il m'a offerts,et pour ses orientations qui ont éclairé mon chemin vers la réussite.*

Je suis profondément reconnaissant à mon co-directeur externe de la thèse Monsieur ***HAMROUNI Bachir****,Professeur à Université de Tunis El Manar et directeur de laboratoire de* ***Dessalement et traitement des eaux****, pour l'accueil respectueux, pour ses encouragements, pour son esprit de coopération, et pour tous les moyens disposés.*

Je tiens aussi à exprimer mes remerciements à Monsieur ***HANINI Salah*** *Professeur à l'UYFM ; pour avoir accepté de présider le jury de soutenance.*

Je tiens également à présenter ma profonde gratitude aux ***membres du jury*** *: Monsieur* ***BOUAZIZ Mohamed Nadjib****, Professeur à l'UYFM, Monsieur* ***CHIBA Younes*** *; Maître de Conférences (A) à l'UYFM, Monsieur* ***ABBAS Mohamed****, Professeur à l'UDES, d'avoir accepté de juger ce modeste travail.*

Je ne peux pas conclure sans un mot de remerciement à ***tous mes enseignants*** *et à* ***tous mes collègues****.*

Enfin, je terminerai par remercier tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin durant ces années de recherche et d'études.

Résumé :

L'objectif de ce travail de recherche est d'évaluer le potentiel du procédé de dessalement par effet multiple couplé aux technologies d'énergie nucléaire, et évalue sa faisabilité énergétique, exergétique et environnementale. Dans ce cadre, un système de dessalement par distillation multi-effets est proposé en liaison avec une centrale nucléaire d'une puissance nominale de 1300 MW afin de réduire le niveau des déperditions thermiques. Les rejets en cause sont ceux d'une centrale nucléaire utilisée pour produire de l'électricité.

Cette étude est basé principalement sur la modélisation, l'analyse thermique, exergétique et l'optimisation. Dans un premier temps, une étude de cas est menée à l'échelle pilote sur une unité à quatre effets en utilisant la modélisation et l'analyse thermique en se basant sur les lois de conservation de l'énergie et de la matière, des corrélations et des équations de transfert thermique. Enfin, une analyse énergétique et exergétique a été réalisée pour évaluer les pertes des sous-systèmes et le système global.

Mots clés : Couplage, Energie nucléaire, Réacteur à Eau Sous-Pression (PWR), Analyse, Exergie, Dessalement, Distillation multiples effet.

Abstract :

The objective of this research work is to evaluate the potential of the multi-impact desalination process associated with nuclear power technologies, and to assess its capacity, production capacity, and environmental feasibility. In this context, a multi-effect desalination system was proposed in conjunction with a nuclear power plant with a nominal capacity of 1300 MW in order to reduce the level of heat losses. The releases in question are those from a nuclear power plant used to produce electricity.

This study is based mainly on modeling, thermal analysis, exergy and optimization. First, a case study is carried out on a pilot scale on a unit with four effects using modeling and thermal analysis based on the laws of conservation of energy and matter, correlations and heat transfer equations. Finally, an energy and exergy analysis was carried out to assess the losses of the subsystems and the overall system.

Keywords: Coupling, Nuclear energy, Pressurized Water Reactor (PWR), Analysis, Exergy, Desalination, Multi-effect distillation.

الملخص :

الهدف من هذا العمل البحثي هو تقييم إمكانات عملية تحلية المياه ذات التأثير المتعدد المقترنة بتقنيات الطاقة النووية، وتقييم طاقتها وطاقتها الإنتاجية والجدوى البيئية. في هذا السياق، تم اقتراح نظام تحلية عن طريق التقطير متعدد التأثيرات بالتزامن مع محطة للطاقة النووية بطاقة اسمية تبلغ 1300 ميجاوات بهدف خفض مستوى فقدان الحرارة.الإطلاقات المعنية هي تلك الصادرة من محطة طاقة نووية مستخدمة في توليد الكهرباء.

تعتمد هذه الدراسة بشكل أساسي على النمذجة ، والتحليل الحراري ، والطاقة ، والتحسين. أولاً ، يتم إجراء دراسة حالة على مقياس تجريبي على وحدة ذات أربعة تأثيرات باستخدام النمذجة والتحليل الحراري بناءً على قوانين حفظ الطاقة والمادة والارتباطات ومعادلات نقل الحرارة. أخيرًا ، تم إجراء تحليل للطاقة و الطاقة الفاعلة لخسائر الأنظمة الفرعية والنظام العام.

الكلمات المفتاحية: اقتران،طاقة نووية، مفاعل ماء مضغوط (PWR)، تحليل، الطاقة الفاعلة، تحلية، تقطير متعدد التأثيرات.

Sommaire

Dédicace vi
Remerciements vi
Résumé vi
Sommaire vi
Liste des Figures vi
Liste des tableaux vi
Nomenclatures vi
Introduction générale 1

Chapitre.I. Revue bibliographique et état de l'art

I.1. L'eau et ses techniques des dessalements 6
I.1.1. Contexte général 6
I.1.2. Origine du dessalement 7
I.1.3. Situation du dessalement dans le monde 8
I.1.4. Qualité de source d'eau 9
I.1.4.1. L'eau de mer 9
I.1.4.2. Les eaux saumâtres 9
I.1.5. Dessalement d'eau de mer 9
I.1.5.1. Définition et les étapes d'une usine de dessalement 9
I.1.5.2. Les critères de classification des procédés 10
I.1.6. Les procédés de dessalement 11
I.1.6.1. Les procédés membranaires 12
I.1.6.1.1. L'osmose inverse (OI) 12
I.1.6.1.2. Electrodialyse (ED) 13
I.1.6.2. Les procédés thermiques 13
I.1.6.2.1. Distillation multi-flash (Multi-Stage Flash distillation, MSF) 14
I.1.6.2.2. Distillation à multiple effet (Multiple Effect Distillation, MED) 14
I.1.6.2.3. Distillation par compression de vapeur 14
I.1.6.3. La distillation membranaire (DM) 15
I.2. L'énergie nucléaire et ses techniques de conversion 16
I.2.1. Énergie nucléaire 16
I.2.2. Quelque statique 17

I.2.3. Centrales nucléaires 19
I.2.4. Principaux types de réacteurs 20
I.2.4.1.Réacteurs à eau pressurisée 21
I.2.4.2.Réacteurs à eau bouillante BWR 21
I.2.4.3. Réacteur à eau lourde pressurisée PHWR 22
I.2.4.4. Réacteur bouillant de grande puissance RBMK 23
I.2.4.5. Réacteur à neutrons rapides RNR 24
I.3.Cogénération d'eau et d'énergie 25
I.4. Etat de l'art 26
I.4.1. Etat de l'art sur les installations multiples effets MED-TVC 26
I.4.2. Etat de l'art sur les centrales nucléaires PWR 32
I.4.3. Etat de l'art sur les centrales nucléaires couplé avec les unités de dessalement 33
I.4.4. Conclusion 38

Chapitre II. Technique de dessalement par multiple effet MED-TVC

II.1. Introduction 40
II.2. Principe de fonctionnement de MED 40
II.3. Différentes configurations du système de dessalement MED 41
II.3.1. L'alimentation type suiveur 42
II.3.2. L'alimentation en arrière 42
II.3.3. L'alimentation parallèle 43
II.3.1.4. L'alimentation parallèle croisée 43
II.4. Combinaison de MED avec différentes pompes à chaleur 44
II.4.1. MED combiné avec pompe à chaleur à adsorption (MED-ADS) 44
II.4.2. MED combiné avec pompe à chaleur à absorption (MED-ABS) 45
II.4.3. MED combiné avec un compresseur de vapeur mécanique (MED - MVC) 45
II.4.4. MED combiné avec un compresseur à vapeur thermique (MED - TVC) 46
II.5. MED-TVC Processus de dessalement 47
II.5.2. Description du procédé de dessalement MED – TVC 48
II.5.3. Composants des procédés de dessalement MED-TVC 49
II.6. Avantages et inconvénients du multiple effet 51

Chapitre III. Procédé nucléaire par réacteur à eau sous pression(PWR)

III.1. Introduction 53
III.2. Principe de fonctionnement 53
III.3. Présentation générale des circuits d'eau primaire 55
III.3.1. Le circuit primaire (RCP) 55
III.3.1.1. Le cœur 56
III.3.1.2. La cuve 58
III.3.1.3. Le pressuriseur 59
III.3.1.4. Les générateurs de vapeur 59
III.3.1.5. Les pompes primaires 60
III.3.1.6. L'enceinte de confinement 61
III.3.2. Le circuit de contrôle chimique et volumétrique (RCV) 61
III.4. Le circuit secondaire et la production d'électricité 62
III.5. Le circuit tertiaire 63

Chapitre IV. Etude et modélisation du système de dessalement MED-TVC

IV.1. Introduction 64
IV.2. Description du systèmeétudié 64
IV.3. Modélisation et analyse de système 65
IV.3.1. Modèle de bilan massique et énergétique 66
IV.3.2. Modèle exergétique 71
IV.3.3. Performance du système 73
IV.3.3.1. Gain Output Ratio (GOR) 73
IV.3.3.2. Performance ratio (PR) 74
IV.3.3.3. Consommation de chaleur spécifique, Q_{th} 74
IV.3.3.5. Efficacité exergétique, η_{ex} 74
IV.3.3.6. Universal performance ratio (UPR) 74
IV.3.3.7. Limite thermodynamique (TL) 75
IV.3.4. Organigramme de calcul MED-TVC 76
IV.4. Résultats et discussion 77
IV.4.1. Validation du modèle 77
IV.4.2. Analyse énergétique et exergétique 78
IV.4.3. Etude paramétrique 83

IV.4.3.1. Température maximale de la saumure (TBT) 83
IV.4.3.2. Nombre d'effets 89
IV.4.3.3. Débit de vapeur motrice 95

Chapitre.V. Modélisation et analyse exergétique du système de cogénération PWR-ME-TVC-MED

V.1. Introduction 102
V.2. Description du système proposé 102
V.2.1. Centrale nucléaire 103
V.2.2. Usine de dessalement ME-TVC-MED 104
V.2.3. Description du système 105
V.3. Modélisation et analyse du système 107
V.3.1. Modèle de bilan massique et énergétique 108
V.3.2. Aspect d'analyse exergétique 110
V.3.3. La performance du système 113
V.3.3.1. Distillat total (D_t) 113
V.3.3.2. Rapport de sortie de gain (GOR) 113
V.3.3.3. Consommation de chaleur spécifique, Q 113
V.3.3.4. Zone de transfert de chaleur spécifique, A_d 114
VII.3.3.5. Efficacité exergétique ME-TVC-MED 114
V.3.3.6. Efficacité exergétique de la centrale de cogénération 114
V.4. Résultats et discussion 114
V.4.1. Validation du modèle 114
V.4.2. Analyse exergétique 118
CONCLUSIONS ET RECOMMENDATIONS 125
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES 128
ANNEXES

LISTE DES FIGURES

Figure (I.1)	Pénuries d'eau dans le monde en 2040	6
Figure (I.2)	Production d'eau douce sur les navires	7
Figure (I.3)	Répartition de la capacité de dessalement par régions en 2017	8
Figure (I.4)	Cycle de l'eau de mer dans une installation de dessalement	10
Figure (I.5)	Les différents procédés de dessalement.	12
Figure (I.6)	Principe de fonctionnement de l'osmose inverse	12
Figure (I.7)	Principe de fonctionnement de l'électrodialyse	13
Figure (I.8)	Principe du procédé multi-flash	14
Figure (I.9)	Principe de la compression mécanique de vapeur	15
Figure (I.10)	Principe du processus de distillation membranaire (MD)	15
Figure (I.11)	Schéma de la fission d'un noyau d'uranium et de la réaction enchaîne	17
Figure (I.12)	Réacteurs nucléaires de puissance par type.	18
Figure (I.13)	Nombre de réacteurs en construction par région.	19
Figure (I.14)	Diagramme de fonctionnement des centrales	19
Figure (I.15)	Schéma de principe d'un BWR	21
Figure (I.16)	Schéma de principe d'un CANDU	23
Figure (I.17)	Schéma de réacteur RBMK	24
Figure (I.18)	Schéma de principe d'un RNR	24
Figure (II.1)	Schéma de principe de fonctionnement multiple effets (MED)	42
Figure (II.2)	Schéma de principe de fonctionnement de type suiveur	43
Figure (II.3)	Schéma de principe de fonctionnement de type arrière	44
Figure (II.4)	Schéma de principe de fonctionnement de type parallèle	44
Figure (II.5)	Schéma de principe de fonctionnement de type parallèle croisée	45
Figure (II.6)	Schéma de principe de fonctionnement MED-ADS	45
Figure (II.7)	Schéma de principe de fonctionnement MED-ABS	46
Figure (II.8)	Schéma de principe de fonctionnement MED-MVC	47
Figure (II.9)	Schéma de principe de fonctionnement MED-TVC	48
Figure (II.10)	Schéma d'un thermo-compresseur de vapeur	52
Figure (III.1)	Schéma de principe de fonctionnement d'un PWR	55
Figure (III.2)	Variation de température dans les circuits PWR	56

Figure(III.3)	Le circuit primaire d'un réacteur PWR	57
Figure (III.4)	Représentation d'un assemblage combustible et d'un crayon.	58
Figure (III.5)	La cuve de réacteur à eau sous pression.	59
Figure (III.6)	Générateur de vapeur de réacteur à eau sous pression PWR	61
Figure (III.7)	Schéma de principe du RCV.	63
Figure (IV.1)	Schéma de principe du système étudié	64
Figure (IV.2)	Diagramme de perte et de flux d'exergie (Grassmann) en pourcentage de l'exergie totale d'entrée	82
Figure(IV.3)	Comparaison des pertes d'énergie et d'exergie au sein du système MED-TVC	82
Figure (IV.4)	Variation de la production d'eau distillée en fonction de la température maximale de la saumure.	83
Figure (IV.5)	Variation de la surface de transfert de chaleur spécifique en fonction de la température maximale de la saumure.	84
Figure (IV.6)	Variation de la consommation d'énergie thermique en fonction de la température maximale de la saumure	85
Figure (IV.7)	Variation du GOR en fonction de la température maximale de la saumure	85
Figure (IV.8)	Influence de la température maximale de la saumure sur l'efficacité exergétique et le travail minimum de séparation	86
Figure (IV.9)	Influence de la température maximale de la saumure sur les pertes énergétiques des composants	87
Figure (IV.10)	Influence de la température maximale de la saumure sur les pertes exergétiques des composants	88
Figure (IV.11)	Influence de la température maximale de la saumure sur les pertes énergétiques et exergétiques totales	89
Figure (IV.12)	Variation de débit d'eau distillé en fonction de nombre d'effets	90
Figure (IV.13)	Variation de la surface de transfert de chaleur spécifique en fonction de nombre d'effets	90
Figure (IV.14)	Variation de la consommation de chaleur spécifique en fonction de nombre d'effets	91
Figure (IV.15)	Variation du GOR en fonction du nombre d'effets	92
Figure (IV.16)	Influence du nombre d'effets sur l'efficacité exergétique et le travail	93

	minimum de séparation	
Figure (IV.17)	Influence du nombre d'effets sur les pertes énergétiques des composants	93
Figure (IV.18)	Influence du nombre d'effets sur les pertes exergétiques des composants.	94
Figure (IV.19)	Influence du nombre d'effets sur les pertes énergétiques et exergétiques totales	95
Figure (IV.20)	Variation du débit d'eau distillé en fonction du débit de vapeur motrice	96
Figure (IV.21)	Variation de zone de transfert de chaleur en fonction du débit vapeur motrice	96
Figure (IV.22)	Variation de consommation de chaleur spécifique en fonction du débit vapeur motrice.	97
Figure (IV.23)	Variation du GOR en fonction du débit vapeur motrice	98
Figure (IV.24)	Influence du débit de vapeur motrice sur le rendement exergétique et le travail minimum de séparation	98
Figure (IV.25)	Influence du débit de vapeur motrice sur les pertes énergétiques des composants	99
Figure (IV.26)	Influence du débit de vapeur motrice sur les pertes exergétiques des composants	100
Figure (IV.27)	Influence du débit de vapeur motrice sur les pertes exergétiques et énergétiques totales	101
Figure (V.1)	schématique du système hybride PWR-ME-TVC-MED	102
Figure (V.2)	Diagramme de flux de processus schématique du système ME-TVC-MED	104
Figure (V.3)	Bilan énergétique simplifié du PWR-ME-TVC-MED (en unités de MWth).	121
Figure (V.4)	Bilan exergétique simplifié du PWR-ME-TVC-MED (en unités de MWth).	121
Figure (V.5)	Rendements thermodynamiques et taux d'irréversibilité en pourcentage pour la centrale de cogénération	122
Figure (V.6)	Destruction exergétique pour le composant de l'unité de dessalement	123

LISTE DES TABLEAUX

Tableau (I.1)	Taux de salinité dans les différentes mers	9
Tableau (IV.1)	Paramètres d'entrée et résultats de la modélisation MED-TVC	78
Tableau (IV.2)	Comparaison du modèle mathématique avec trois usines commerciales de tailles différentes	79
Tableau (IV.3)	Propriétés et débits exergétiques à chaque point dans l'unité MED-TVC	81
Tableau (V.1)	Données techniques de la centrale nucléaire.	103
Tableau (V.2)	Caractéristiques techniques de l'unité de dessalement. ME-TVC-MED	105
Tableau (V.3)	Équations du bilan massique et énergétique	109
Tableau (V.4)	Données de performance de l'unité de dessalement.	115
Tableau (V.5)	Comparaison du modèle mathématique avec trois usines casd'un nombre différent d'effets.	116
Tableau (V.6)	Débits totaux d'énergie et d'exergie pour la centrale de cogénération illustrée aux figures (V.1) et (V.2).	117
Tableau (V.7)	Résultats d'analyse de la deuxième loi pour la centrale de cogénération	119
Tableau (V.8)	Résultats d'analyse des 1er et 2eme lois thermodynamique de la centrale de cogénération	120

NOMENCLATURES

Symboles :

A : Zone de transfert de chaleur	(m^2)
B : Débit d'eau de saumure	(kg/s)
BPE : Évaluation du point d'ébullition	(°C)
Cp : Chaleur spécifique	(kJ/kgK)
CR : Taux de compression	(-)
D: Débit de distillat	(kg/s)
$\dot{E}$: Exergie spécifique total	(kJ/Kg)
$\dot{Ex}$: Exergie total	(kW)
e : Exergie	(kJ/kg)
ER : Taux d'expansion	(-)
EV : Vapeur entraînée	(-)
F : Débit d'eau de mer d'alimentation	(kg/s)
GOR : Rapport de sortie de gain	(-)
h : Enthalpie spécifique	(kJ/kg)
$\dot{I}$: Taux d'irréversibilité	(kW)
$LMTD$: Différence de température moyenne logarithmique	(-)
Mc : Débit total d'entrée d'eau de mer	(kg/s)
$\dot{m}$: Débit massique	(kg/s)
NEA : Tolérance de non-équilibre	(-)
n: Nombre d'effets	(-)
P : Pression	(Pa,bar)
Q : Consommation de chaleur spécifique	(kJ/kg)
$\dot{Q}$: Taux net de chaleur transférée	(kW)
S : Entropie spécifique	(kJ/kg.k)
T : Température	(°C)
TBT : Température maximale de la saumure	(°C)
U : Coefficient de transfert de chaleur	(kW/m^2k)
V : Vitesse	(m/s)
w : Travail par unité de masse	(kJ/kg)

$\dot{w}$: Taux net de travail (kW)

X : Salinité (Ppm)

Z : Hauteur (m)

Lettres grecques :

Δ : Différence (-)

η : rendement (%)

μ : Potentiel chimique (-)

ε : Efficacité exergétique (%)

λ : Chaleur latente (kJ/kg)

Indices :

a : Propriété correspond à la fission

c : Liquide de refroidissement

ch : Chimique.

cv : Volume de Contrôle

e : Sortie

g : Génération

f : Eau d'alimentation

fis : Fission.

i : entrée, nombre d'effet

ke : Cinétique.

m : Vapeur motrice

max : Maximum.

N : Dernier effet

n: Dernier effet

0 : Etat de référence

p : Pompe

ph : Physique.

pe : Potentiels

R : Réacteur

Rev : Réversible.

RCP : Pompe de refroidissement du réacteur

s : Vapeur.

t : Turbine

Abréviations :

CANDU : Canadian deuterium uranium

Cond : Condenseur.

EX : Echangeur de chaleur

FWT**:** Réservoir d'eau d'alimentation

GA : Algorithme génétique

GT-MHR: Gas turbine-modular helium reactor

HPH **:** Réchauffeur haute pression

HPT : Turbine haute pression

LPH : Réchauffeur basse pression

LPT : turbine basse pression

ME : Multi effet

MED : Multiple effets

MS : Séparateur d'humidité

MSF: Multi-flash

NPP : Nuclear power plant

P : Pompe

Ppm : Parties par million

PWR : Pressurized water reactor

RH : Re-heater. Réchauffeur

RO : Osmose inverse

SFR : Sodium-cooled Fast Reactor

SG : Générateur de vapeur

TVC : Thermocompresseur

Introduction générale

Introduction générale

Contexte générale

La problématique de l'eau et de l'énergie demeure toujours constante malgré les efforts notables et les avancées techniques et technologiques énormes pour assurer leur disponibilité et durabilité et répondre aux besoins croissants et continus à travers le monde entier. En effet, à cause de la croissance exponentielle de la population mondiale et le développement industriel et agricultural, la capacité des nations à répondre aux besoins en eau et en énergie à coût abordable est à l'heure sérieusement contestée par un certain nombre de questions. Premièrement, la limitation et l'inexistence ou la mal-répartition des ressources naturelles en eau douce et en énergie. Deuxièmement, leur dépendance aux contraintes économiques et environnementales du fait que leur accessibilité et effet sur l'environnement peut limiter leur utilisation [1]. De plus, la problématique de l'énergie et de l'eau diffèrent d'un continent à un autre, d'un pays à un autre et également d'une activité à une autre. L'exemple de l'Afrique où plusieurs ressources en eau douce sont épuisées ou fortement contaminées alors que les ressources en énergie fossiles de la majorité des pays de ce continent sont très faibles. Par exemple le cas de l'Algérie, où les ressources en énergie fossiles existantes, ils s'y ajoutent également des problèmes liés à la disponibilité de l'eau du fait que les précipitations sont tellement rares et aléatoires surtout dans les déserts des zones sud. L'interdépendance entre les deux s'explique par le fait que la production d'énergie nécessite de grandes quantités d'eau alors que le traitement et la distribution de l'eau sont tous aussi dépendants de l'énergie à faible coût et facilement accessible [2].

La découverte ou le développement des nouvelles sources d'énergie telle que les énergies nucléaire est considérée comme une meilleure alternative pour répondre aux besoins énergétiques à coût acceptable et à faible effet sur l'environnement. Quant à l'eau douce, le fait d'assurer sa disponibilité connait quelques dénouements avec l'apparition des technologies et techniques de dessalement des eaux salée (eau de mer et eaux saumâtres). Une des techniques prometteuses pour faire face à la fois aux problèmes de l'énergie et l'eau est le couplage des procédés de dessalement et les technologies d'énergies nucléaires. A ce point-là, cette combinaison semble être salutaire pour répondre à la fois aux besoins énergétique et en eau tout en respectant des contraintes environnementales surtout que les procédés de dessalement sont généralement énergivores. Par contre, Toute production

d'énergie électrique avec l'énergie nucléaire s'accompagne du rejet d'une importante quantité de chaleur (plus de 50 à 70 % de la puissance de la chaudière) vers l'environnement. Par conséquent, il est nécessaire d'examiner comment faire bon usage de l'énergie gaspillée en l'utilisant dans d'autres domaines, tels que le dessalement de l'eau de mer. La cogénération consiste à récupérer cette chaleur pour alimenter en énergie une installation quelconque qui en consomme : serre, circuit de chauffage urbain, unités de dessalement, etc [3]. De ce fait, faire preuve de la faisabilité technique du couplage du procédé de dessalement avec les technologies nucléaires et de sa compétitivité au point de vue économique et environnementale revêt une importance primordiale.

Contexte, justification du projet

Face aux problématiques de l'eau et de l'énergie mentionnées plus haut, l'une des réponses prometteuses est le développement des systèmes combinant à la fois l'utilisation des procédés de dessalement et les technologies d'énergies nucléaires (les système de cogénérations) pour l'utilisation optimale d'énergie rejet et pour rendre l'eau douce disponible à un coût acceptable tout en respectant les contraintes environnementales. Ainsi la solution retenue est le couplage de réacteur nucléaire à eau sous pression PWR (Pressurized Water Reactor) et procédé de dessalement par multiple effet (MED) tout en considérant les réalités de fonctionnement, environnementales et également la disponibilité des ressources énergétiques nucléaires du pays. Dans le cas de l'osmose inverse, qui est considérée comme étant la technique la plus dominante dans le marché de dessalement, la nécessité d'un prétraitement avancé de l'eau de mer d'alimentation ainsi que des phases de recyclage et maintenance des membranes conduisent à l'augmentation du taux des rejets chimiques importants dans l'environnement et du coût opératoire. En plus de cela, les performances de l'osmose inverse sont hautement influencées par la qualité de l'eau d'alimentation ainsi que les exigences de la qualité de l'eau produite.

Le couplage du procédé d'évaporation à effet multiple et l'énergie nucléaire nécessite par ailleurs la connaissance profonde et la maitrise de design et de fonctionnement de tous les composants qui le constituent et la maîtrise des contraintes relatives aux limitations de chaque système. Deux aspects fondamentaux qui devront être prise en considération pour évaluer les performances globale de cette combinaison qui sont l'aspect économique (coût de production d'eau douce) et environnemental (émissions des polluants). Dans ce contexte, l'AIEA a étudié le dessalement de l'eau de mer à travers

différents procédés utilisant différentes sources d'énergie [3]. Cette étude a montré que l'énergie nucléaire reste compétitive pour des taux d'actualisation allant jusqu'à 11%, et, par ailleurs, que le coût de production de l'eau est systématiquement plus élevé pour les petits réacteurs uniquement calogènes que pour des réacteurs de grande taille fonctionnant en cogénération.

Le coût de l'énergie et le coût d'investissement de l'unité de dessalement constituent la plus importante part du coût de dessalement. Ces coûts peuvent être minimisés à travers des travaux de modélisation, analyses thermo-économiques, analyses d'efficacité exergétique et travaux d'optimisation ainsi que la recherche des améliorations et combinaisons adéquates et optimales. Les émissions générées dans les procédés de dessalement sont liées principalement à la production d'énergie requise et aussi aux rejets des concentras de forte salinité et produits chimiques utilisés dans les opérations de prétraitement. Maximiser le taux de contribution d'énergie nucléaire ou même adopter un procédé de dessalement utilisant 100% l'énergie nucléaire permet d'avoir une minimisation significative de son impact sur l'environnement [3]. En plus de cela, le procédé d'évaporation à effet multiple nécessite généralement un faible traitement chimique de l'eau salée d'alimentation. Aussi, la valorisation des rejets concentrés (production de sels, extraction des minéraux comme magnésium… etc.) peuvent ouvrir la possibilité de développer des procédés de dessalement à zéro rejet. Pourtant, l'interdépendance entre ces deux aspects est un point important qu'il ne faut pas ignorer du fait que l'un peut limiter les possibilités d'amélioration de l'autre.

Pour ce qui est de la consommation énergétique généralement présentée comme un des aspects fondamentaux dans le dessalement, les rejets thermiques comme source d'énergie sont de plus en plus adoptés et jugés jusqu'ici rentables. Car le coût de l'énergie constitue la plus importante part du coût de dessalement et en utilisant les rejets thermiques cela permet de le réduire considérablement [2].

Objectif général du projet et organisation de la thèse

Face aux problématiques posées plus haut, la réponse se trouve dès lors à travers un système de cogénération qui rend la production électrique et l'eau douce disponible à un coût abordable. Ainsi la solution retenue est la mise en place d'un combine un réacteur nucléaire PWR couplée avec unité de dessalement MED-TVC tout en considérant les réalités économiques et environnementales. Une telle ambition nécessite par ailleurs la

connaissance et la maîtrise du principe de fonctionnement des différentes composantes du système et également une mise en évidence des contraintes relatives à chaque type. Ainsi, l'objectif global de cette thèse est d'évaluer le potentiel de ce système. Les objectifs scientifiques de thèse peuvent être résumés comme suit :

Le premier objectif est de développer un modèle complet du système de dessalement par compression de vapeur multi-effets (MEDTVC) basé sur les lois de la thermodynamique. L'analyse énergétique et exergétique est effectuée sur tous les composants du système en utilisant les meilleurs ratios. Nous avons récemment développé des valeurs pour les propriétés de l'eau de mer, notamment l'exergie chimique. Sur la base des pertes de chaleur et d'exergie obtenues, une tentative est faite pour minimiser les pertes et augmenter l'efficacité globale du système.

Le deuxième objectif de cet article est de développer un modèle complet d'une centrale nucléaire PWR basé sur les lois de la thermodynamique, et des analyses énergétiques et exergétiques sont effectuées sur tous les composants du système.

Ainsi, l'objectif global de cette thèse est recherche le meilleur couplage du centrale nucléaire avec d'une unité de dessalement de l'eau de mer pour alimentée par les rejets thermiques de centrale nucléaire. Il s'agira de faire une optimisation de l'installation. En plus de cela, trouver la combinaison optimale de centrales nucléaires et de dessalement pouvant répondre à un certain nombre de critères de performance. Enfin, une analyse exergétique est effectuée sur tous les composants du système concerné. Il améliore l'efficacité globale du système en fonction des pertes de chaleur et d'exergie.

Plan de la thèse

Suite à l'introduction générale qui consacré à la présentation du contexte, la justification, les objectifs principaux et aussi le plan et le résumé des différentes parties de la thèse. Cette thèse s'articule autour de Cinq chapitres:

Premier chapitre

Le 1er chapitre est concerne une étude bibliographique sur l'eau et les techniques de dessalement(les principales technologies de dessalement et les déférents types des eaux de mer), l'énergie et ses techniques de conversion (énergie nucléaire et les principales

technologies), la cogénération eau et d'énergie, et l'état de l'art (dessalement MED, nucléaire, dessalement nucléaire).

Deuxième chapitre

Le second chapitre comprend une étude approfondie sur le procédé de dessalement par effet multiple MED, une description et le principe de fonctionnement, différentes configurations, le couplage avec thermo compresseur à vapeur (TVC) et le compresseur mécanique (MVC), ainsi que les avantages et les inconvénients ...etc.

Troisième chapitre

Ce chapitre présente une étude approfondie sur le réacteur nucléaire PWR. À savoir, la description de ses différents composants, son principe de fonctionnement, et ses différents circuits d'eau, ...etc.

Quatrième chapitre

Le contenu du sixième chapitre prend en compte le système de dessalement (MED-TVC) étudié, le développement du modèle numérique sous MATLAB à partir des lois, les approches mathématiques disponibles dans la littérature, les résultats obtenus et la discussion.

Cinquième chapitre

Enfin, le dernier chapitre présente la modélisation et la simulation d'un système de cogénération PWR-ME-TVC-MED, et l'ensemble des résultats numériques obtenus avec les interprétations nécessaires.

Cette thèse est achevée par une conclusion générale qui synthétise les principaux résultats obtenus ainsi que quelques perspectives de la continuité ce travail.

CHAPITRE

Revue bibliographique et état de l’art

I.1. L'eau et ses techniques des dessalements

I.1.1. Contexte général

L'eau est un élément vital, indispensable et irremplaçable à la survie de tous les êtres vivants qui ont tous besoin de leur ration quotidienne d'eau. Or l'accroissement de la population et l'augmentation du niveau de vie des pays émergents entrainent de véritables problèmes de quantité et qualité de l'eau disponible. D'après l'Organisation Mondiale de la Santé (Fonds des Nations Unies pour l'enfance, Organisation Mondiale de la Santé), environ une personne sur dix n'avait pas accès à l'eau potable en 2015 [2]. Au cours de la même année, l'Institut des Ressources mondiales a mené une étude basée sur des modèles de changement climatique et des scénarios socio-économiques pour évaluer les pays les plus vulnérables à la pénurie d'eau d'ici 2040 (Figure I.1). Cette étude a révélé que 33 pays auront d'extrêmes pénuries d'eau en 2040 et 14 de ces pays se situent au Moyen- Orient.

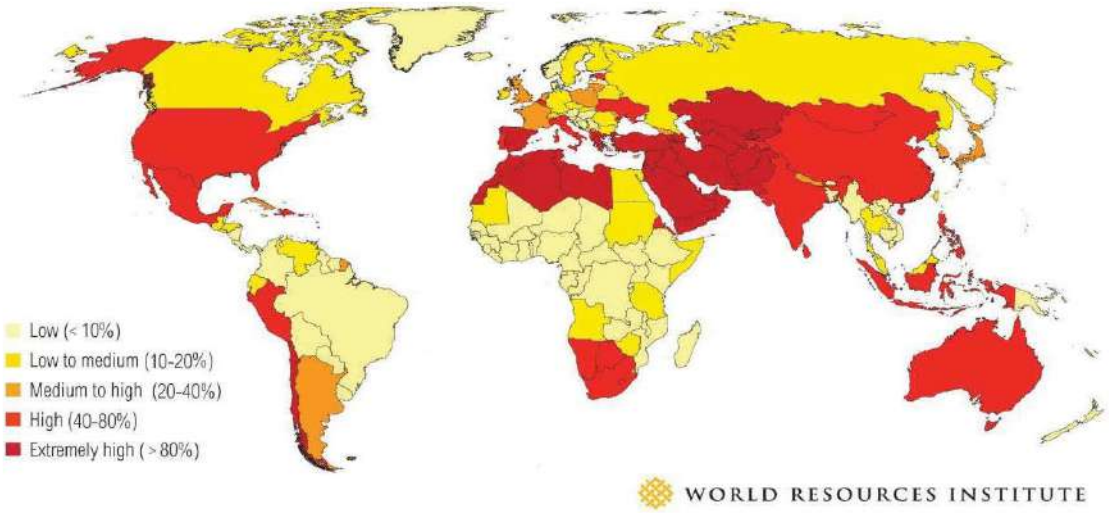


Figure (I.1) Pénuries d'eau dans le monde en 2040 [2].

Sur la Figure (I.1), les fractions représentent le risque potentiel lié au manque d'eau. Plus le pourcentage est élevé, plus le risque est grand. De ce fait, il est clair que de nombreux pays vont se retrouver en pénurie d'eau potable disponible dans les prochaines années. À l'égard de notre époque moderne, les problèmes liés à l'eau peuvent être résumés en chiffres comme suit : la propagation des maladies liée à l'eau représente 3,5 millions de décès chaque année, bien plus que les accidents de la route et le sida combinés, 75 % des conflits et guerres

mondiales sont dus au manque de ressources en eau. Près de 40 % de la population est déjà confrontée à une pénurie d'eau, affirme le Conseil mondial de l'eau [1].

I.1.2. Origine du dessalement

La formation d'eau douce à partir d'eau de mer se fait depuis toujours à travers le cycle naturel de l'eau. En effet, dans la nature, la vapeur d'eau se forme à partir de l'évaporation des océans, sous l'action du soleil, et forme ainsi des nuages qui provoquent de la pluie ou de la neige lorsqu'ils atteignent des régions plus froides. Le dessalement d'eau de mer fonctionne sur ce même principe, l'eau de mer chauffée produit de la vapeur d'eau qui une fois liquéfiée, permet d'obtenir de l'eau douce, le sel n'étant pas volatil.

Ce principe de dessalement est utilisé depuis l'antiquité pour l'approvisionnement d'eau potable à bord des navires. Les marins, en portant l'eau de mer à ébullition, liquéfiaient la vapeur produite sur de larges éponges froides. Ils pouvaient ainsi récupérer de l'eau douce à partir des éponges comme le montre la Figure (I.2) [2].



Figure (I.2) Production d'eau douce sur les navires [1]

Le processus de dessalement est pratiqué par distillation depuis plus de 2000 ans. À la fin du 18ème siècle apparaissent les processus membranaires, Pline les mentionne en 1877, mais ils débutent vers 1959 à l'Université de Californie. Les procédés membranaires extraient l'eau douce de l'eau salée en séparant les molécules de sel au moyen d'une membrane semi-perméable notamment sous l'action d'une pression.

Face aux besoins croissants en eau douce dans le monde, l'intérêt des chercheurs s'est accru au milieu du 20ème siècle afin de développer les procédés de dessalement d'eau de mer mentionnée ci-dessus. Ainsi de rendre ce moyen de production d'eau douce fiable, performant et à des coûts minimalisés.

I.1.3. Situation du dessalement dans le monde

Le dessalement de l'eau est en très forte croissance dans le monde. L'approvisionnement en eau potable sur le plan quantitatif et qualitatif s'impose de plus en plus, parallèlement aux risques de pollutions (vecteurs de maladies, toxines ou matières en suspension ou agents pathogènes) qui perdurent à chaque étape du parcours de l'eau. Aujourd'hui, le nombre d'usines de dessalement qui ont été installées dans le monde est de 19555 pour une capacité de près de 100 millions de m^3/jour d'eau douce en 2017 [2]. Sur ces 100 millions, 75% sont destinés à la consommation humaine, 25% à un usage industriel ou agricole. La Figure (I.3) représente la répartition mondiale des différentes usines de dessalement selon les pays en 2017. Comme l'indique la Figure (I.3), l'Asie, l'Europe de l'Est et le Moyen- Orient sont les plus gros producteurs d'eau douce en 2017.

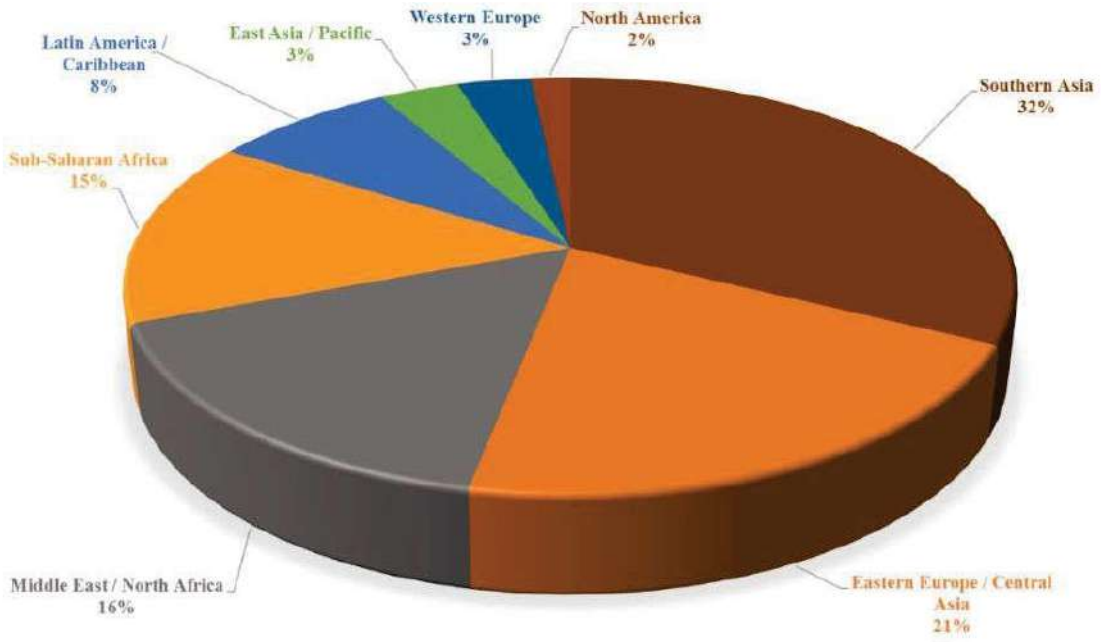


Figure (I.3) Répartition de la capacité de dessalement par région en 2017 [2].

I.1.4. Qualité de source d'eau

I.1.4.1. L'eau de mer

La caractéristique la plus importante des eaux de mer est leur salinité, c'est-à-dire leur teneur globale en sels (chlorures de sodium et de magnésium, sulfates et carbonates). Où environ 85 % du poids total des sels est du chlorure de sodium. Dans le tableau (I.1) est rapportée la salinité de différentes mers fermées [4]. Celle-ci est liée à la situation hydrique et géographique de la mer.

Tableau (I.1) Taux de salinité dans les différentes mers [4].

Mers	**Salinité (g/L)**
Mer standard	35
Mer more	270
Golfe arabo-persique	40 à 70
Mer rouge	40
Mer Méditerranée	36 à 39
Mer caspienne	13
Mer baltique	7

I.1.4.2. Les eaux saumâtres

Les eaux saumâtres se distinguent des eaux de mer par une concentration plus faible en sels, comprises entre 1 et 10 g/L et par une composition variée contrairement à celles de l'eau de mer qui est globalement constante.

Elles se présentent soit, sous forme d'eaux de surface, soit sous forme d'eaux souterraines. Leur composition chimique varie énormément d'une région à l'autre et pour une même région d'une saison à l'autre. Ces variations de composition chimique dépendent de plusieurs paramètres : des apports d'eau (pluie, superficielle, souterraine…), de la vitesse de circulation de l'eau et par conséquent le temps de contact, du taux d'évaporation.

I.1.5. Dessalement d'eau de mer

I.1.5.1. Définition et les étapes d'une usine de dessalement

Le dessalement est un processus qui élimine les sels et autres minéraux dissous de l'eau de mer, de l'eau saumâtre et des eaux usées traitées. En général, l'eau de mer est dessalée afin de produire de l'eau douce qui convient à la consommation humaine ou à l'irrigation, dans le processus de dessalement de l'eau de mer, la salinité de l'eau de mer de plus de 35000 parties par million (ppm) est réduite à un niveau satisfaisant de moins de 500 ppm, que l'on appelle eau douce. Les processus de dessalement éliminent également d'autres contaminants de l'eau, tels que les minéraux dissous (par exemple, le calcium, le magnésium), les métaux lourds (par exemple, le cuivre, le zinc) et la matière organique dissoute, les agents pathogènes (bactéries et virus).

Quel que soit le procédé de séparation du sel et de l'eau envisagée, toutes les usines de dessalement comportent 4 étapes (Figure I.4):

- Une prise d'eau de mer.
- Un poste de prétraitement.
- L'installation de dessalement.
- Le poste de traitement.

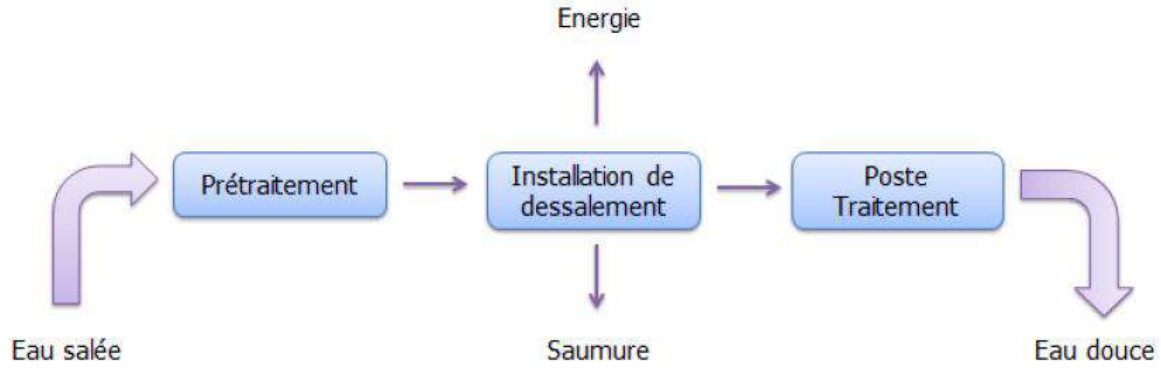


Figure (I.4) Cycle de l'eau de mer dans une installation de dessalement [5].

I.1.5.2. Les critères de classification des procédés

Quelle que soit la méthode utilisée, la fonction principale des techniques de dessalement de l'eau de mer et de l'eau saumâtre se résume à la production d'eau douce. Il existe plusieurs critères pouvant être pour classer les techniques du dessalement, selon la forme ou phase sous laquelle l'eau douce est extraite. D'une part selon le principe de

fonctionnement et d'autre part selon la consommation énergétique (principale source d'énergie).

a. Le principe de fonctionnement

Selon ce critère les procédés utilisés dans cette catégorie peuvent être classés en trois groupes :

- **Les procédés sans changement de phase :** composés d'électrolyse, et d'osmose inverse.
- **Les procédés par changement de phase :** comprennent la distillation à simple ou multiple effets, simple flash ou multi flash, la compression mécanique de vapeur, et la thermo compression.

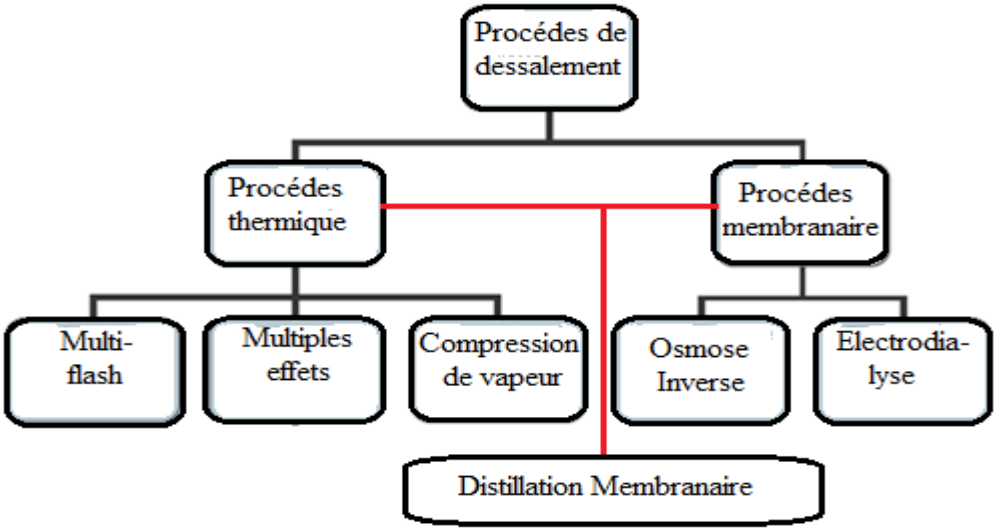
b. Critère énergétique

La consommation énergétique permet de distinguer deux principales sources :

- **Une source thermique nécessaire au fonctionnement des procédés :** simple ou multiple effets, simple ou multi flash, compression de vapeur et certaines techniques membranaires telles que la distillation membranaire.
- **Une source électrique ou mécanique pour les systèmes :** compression de vapeur, osmose inverse, électrodialyse.

I.1.6. Les procédés de dessalement

Comme mentionné précédemment, il existe principalement deux familles de procédés de dessalement : les procédés membranaires et les procédés thermiques. Quel que soit le procédé utilisé, le fonctionnement général est identique : il faut introduire de l'eau de mer dans l'unité de dessalement et lui fournir de l'énergie pour ensuite en extraire de l'eau douce et de la saumure (eau de mer plus concentrée). La Figure (I.5) répertorie les principales techniques de dessalement existantes.



Figure(I.5) Les différents procédés de dessalement.

I.1.6.1. Les procédés membranaires

I.1.6.1.1. L'osmose inverse (OI)

Lorsque deux solutions salines de concentrations différentes sont séparées par une membrane semi-perméable, l'eau passe spontanément de la solution la moins concentrée à la plus concentrée, ce phénomène est considéré comme naturel. Lorsque l'équilibre est établi entre les deux solutions salines, la différence de pression entre les deux compartiments est la pression osmotique.

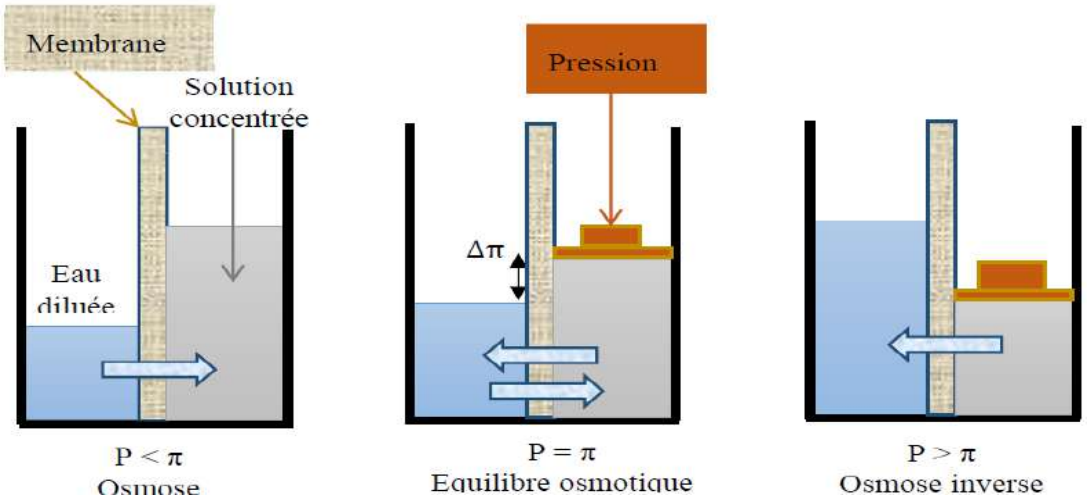


Figure (I.6) Principe de fonctionnement de l'osmose inverse [8].

Lorsqu'une pression importante (supérieure à la pression osmotique) est appliquée à l'eau salée, l'eau douce traverse la membrane, comme le montre la Figure (I.6), et c'est le principe de l'osmose inverse. La membrane est constituée d'une pellicule de polymère perméable et sélectif, elle permet seulement le passage des molécules d'eau, produisant ainsi de l'eau douce [6].

I.1.6.1.2. Electrodialyse (ED)

L'électrodialyse repose sur la séparation des sels et de l'eau à travers d'une membrane semi-perméable, sous l'action d'un champ électrique. Ce système est composé de plusieurs compartiments et de membranes alternativement anioniques et cationiques. Sous l'effet du champ électrique, les ions de la solution saline migrent à travers des membranes imperméables à l'eau. De ce fait, certains compartiments sont appauvris en sels dissous tandis que d'autres seront enrichis. Les compartiments de dilution et de concentration sont donc alternés. L'eau dessalée est ainsi obtenue en récupérant les solutions des compartiments de dilution. La figure (I.7) représente principe de fonctionnement de l'électrodialyse [8].

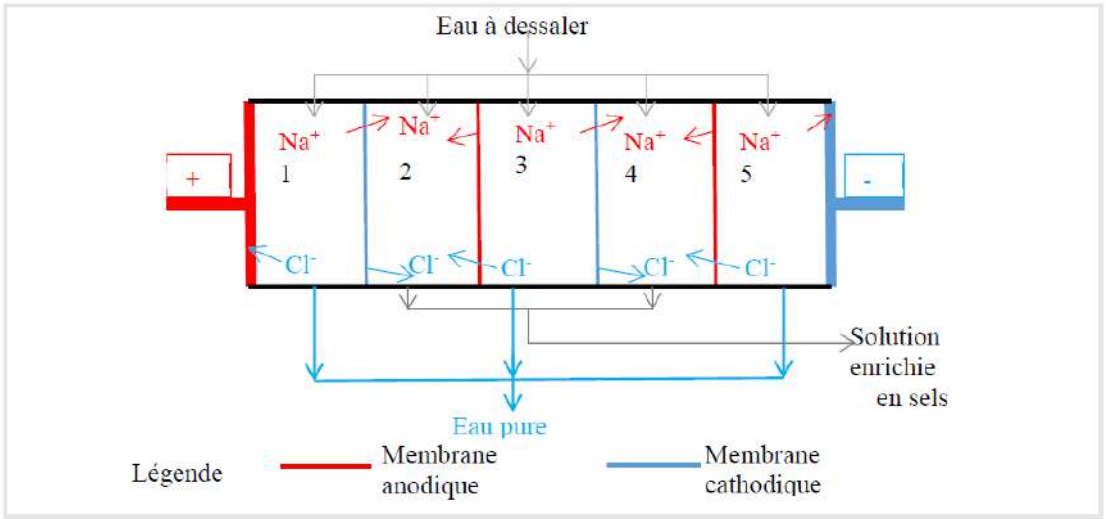


Figure (I.7) Principe de fonctionnement de l'électrodialyse [8].

I.1.6.2. Les procédés thermiques

Le principe des procédés de distillation repose sur l'évaporation d'une partie d'eau de mer ou d'eau saumâtre, puis la condensation de la vapeur résultante pour donner de l'eau douce.

I.1.6.2.1. Distillation multi-flash (Multi-Stage Flash distillation, MSF)

Dans la distillation multi-flash (Figure (I.8)), l'eau de mer est préchauffée à des températures variantes de 90 à 120 °C dans le bouilleur par la vapeur de chauffage produite par une source de chaleur externe. Cette eau pénètre dans une enceinte dans laquelle règne une pression inférieure à la pression de saturation de l'eau d'alimentation du système. Cette différence de pression provoque instantanément la vaporisation d'une partie du flux d'eau entrant par détente appelée « détente flash ». Elle comprend plusieurs étages dans lesquelles la saumure est vaporisée par réduction successive de la pression du 1er étage au dernier étage. Les vapeurs ainsi produites se condensent au sommet des étages en échangeant la chaleur avec l'eau de mer qui entre dans une conduite (condenseur). Les unités de dessalement par MSF varient généralement de 15 à 40 étages [6,8].

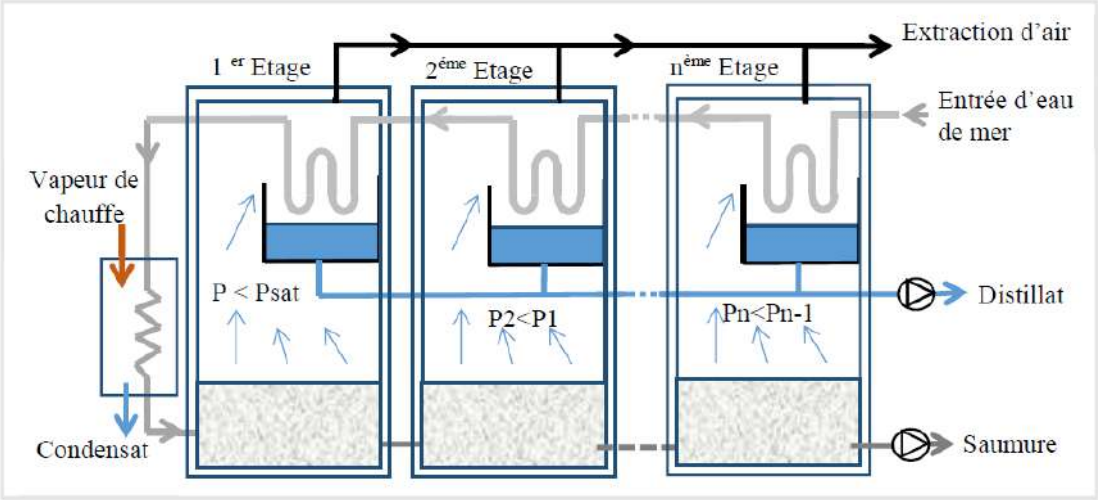


Figure (I.8) Principe du procédé multi-flash [8].

I.1.6.2.2. Distillation à multiple effet (Multiple Effect Distillation, MED)

Le détaille de la distillation à multiple effet est présenté dans le chapitre deux.

I.1.6.2.3. Distillation par compression de vapeur

La distillation par compression de vapeur (Figure (I.9)) est utilisée pour le dessalement par de petites unités. Elle est souvent combinée au procédé à effet simple ou multiple dans le but d'atténuer leur consommation en énergie thermique. La vapeur produite entre des températures variant de 60 à 70 °C dans une enceinte thermique isolée est aspirée par un compresseur. La compression est accompagnée d'une augmentation de la température

de saturation de la vapeur comprimée. Cette dernière est envoyée dans l'enceinte par l'intermédiaire d'un faisceau tubulaire pour se condenser en portant à ébullition l'eau de mer. Le condensat sort sous forme d'eau distillée. Ce procédé consomme plus d'énergie électrique que les autres systèmes de dessalement et sa production de perméat est très limitée [8].

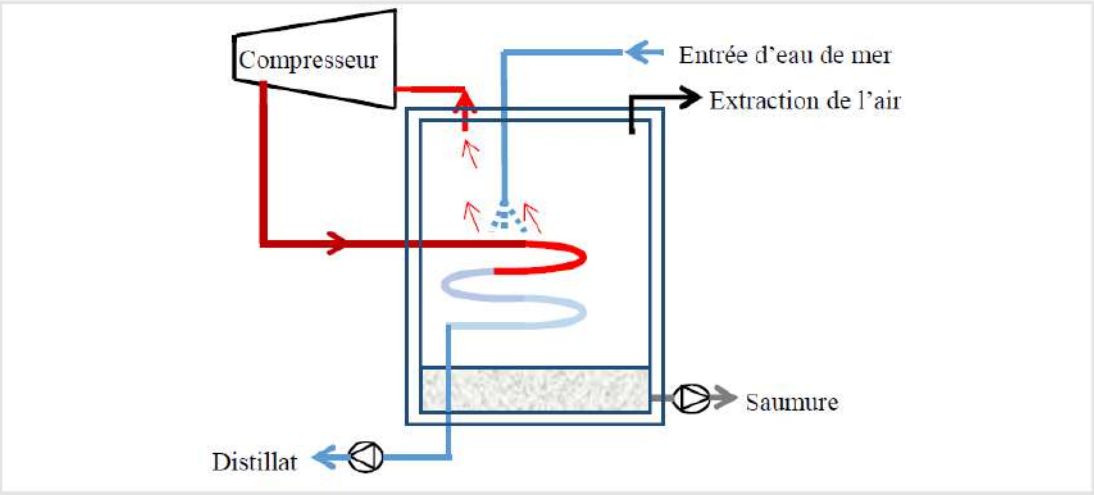


Figure (I.9) Principe de la compression mécanique de vapeur [8].

I.1.6.3. La distillation membranaire (DM)

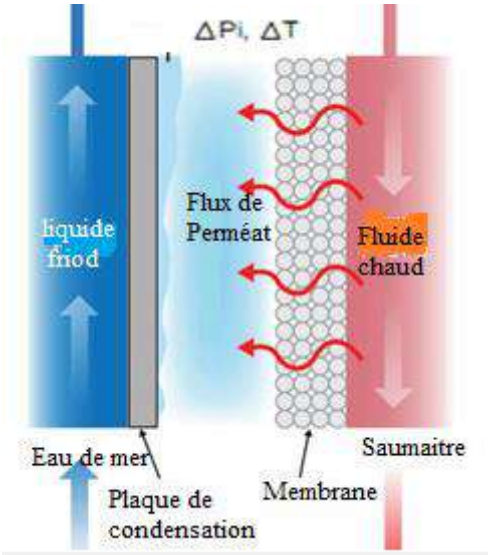


Figure (I.10) Principe du processus de distillation membranaire (MD).

La distillation membranaire (DM) (Figure (I.10)) est un procédé hybride combinant à la fois un procédé thermique et un procédé membranaire. Il est principalement basé sur une technique de séparation/distillation, où l'eau est transportée entre un flux « chaud » et « froid

» séparé par une membrane hydrophobe perméable à la vapeur d'eau uniquement, ce qui exclut la transition de la phase liquide et les particules dissoutes potentielles. La membrane met en contact direct un liquide côté alimentation et une phase liquide ou gazeuse côté perméat. L'échange de vapeur d'eau repose sur une faible différence de température entre les deux flux, ce qui entraîne une différence des pressions partielles entre les deux côtés de la membrane qui provoque une évaporation du côté alimentation. La membrane sert uniquement de support à l'interface liquide-gaz et n'intervient pas dans le procédé séparatif [8,9].

Plusieurs configurations possibles de distillation membranaire, les différences configurations concernent uniquement le côté du perméat et vont conditionner la force motrice de la séparation. Il existe quatre configurations suivantes :

- Distillation membranaire à contact direct (DCMD).
- Distillation membranaire à intervalle gazeux (AGMD).
- Distillation membranaire à entraînement gazeux (SGMD).
- Distillation membranaire sous vide (VMD).

I.2. L'énergie nucléaire et ses techniques de conversion

I.2.1. Énergie nucléaire

Contrairement aux centrales thermiques à énergie fossile qui exploitent les énergies de liaisons interatomiques de molécules combustibles, l'énergie nucléaire, quant à elle, provient de l'énergie de cohésion du noyau d'atomes lourds particuliers, dits fissiles. Les noyaux de ces atomes fissiles, tel que l'uranium 235(figure (I.11)), possèdent la propriété remarquable de se briser en plusieurs fragments (généralement deux) sous l'impact d'un neutron d'énergie suffisante. On dit qu'ils subissent une fission. L'énergie de liaison, qui assure la cohésion des protons et des neutrons au sein du noyau, se trouve ainsi libérée. Le processus de fission nucléaire libère de l'énergie sous forme de chaleur qui peut, en principe, être utilisée soit directement soit, par l'intermédiaire d'un système de conversion d'énergie, sous forme d'électricité [10].

En se brisant (figure (I.11)), le noyau d'un atome d'uranium 235 expulse deux ou trois neutrons. Ceux-ci pourront à leur tour aller briser d'autres noyaux qui expulseront d'autres neutrons et ainsi de suite, dans une réaction en chaîne capable de libérer de grandes quantités

d'énergie. C'est en récupérant et en transformant la chaleur ainsi produite que les centrales nucléaires fabriquent de l'électricité.

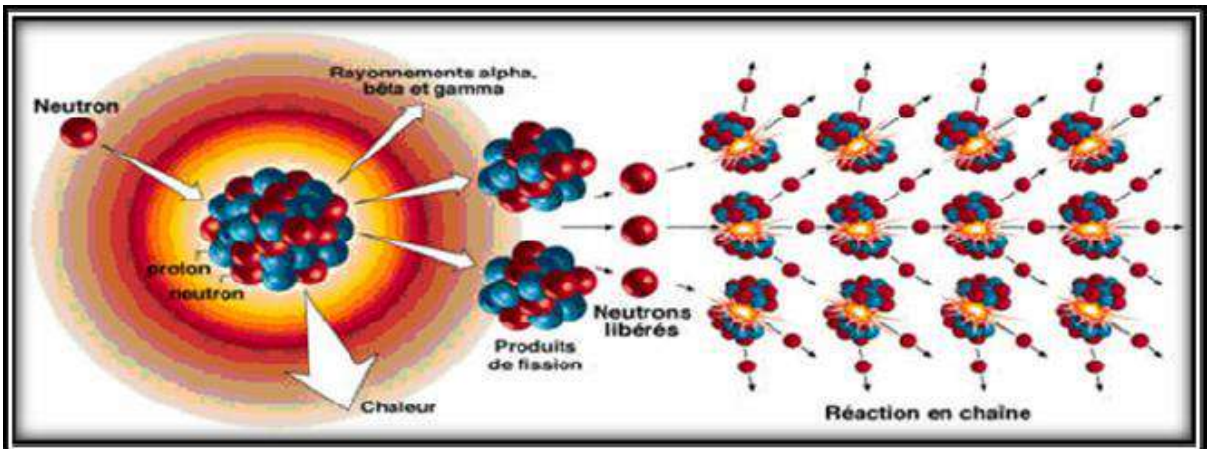


Figure (I.11) Schéma de la fission d'un noyau d'uranium et de la réaction en chaîne [11].

I.2.2. Quelque statique

La découverte, dans les toutes dernières années du XIX^{ème} siècle, de la radioactivité naturelle a valu le prix Nobel à Henri Becquerel et Pierre et Marie Curie. La radioactivité artificielle fut découverte au début des années trente par Frédéric et Irène Joliot-Curie et la fission juste avant la deuxième guerre mondiale : la scène était dressée.

Si l'on excepte les réacteurs naturels d'Oklo, l'histoire des réacteurs nucléaires commence le 2 décembre 1942 sous les tribunes d'un stade de Chicago, où s'établit, dans le réacteur CP1, construit sous la direction d'Enrico Fermi, la première réaction en chaîne entretenue. La première, bien modeste, production d'électricité nucléaire remonte à 1951 et il faudra attendre le milieu des années cinquante pour les premiers réacteurs électrogènes "commerciaux" en Union soviétique et Grande-Bretagne… et le premier sous-marin nucléaire américain [12].

Au 31 décembre 2019, il y avait 443 réacteurs nucléaires de puissance en service dans le monde, représentant une capacité totale de 392,1 GWe, 83 % d'entre eux étaient modérés et refroidis par eau ordinaire, 11 % étaient modérés et refroidis par eau lourde, 3 % étaient refroidis par eau ordinaire et modérés au graphite et 3 % étaient refroidis par gaz (figure (I. 12)). Trois étaient des réacteurs à neutrons rapides refroidis par métal liquide. Près de 89 % de l'électricité d'origine nucléaire a été produite par 376 réacteurs à eau ordinaire [13].

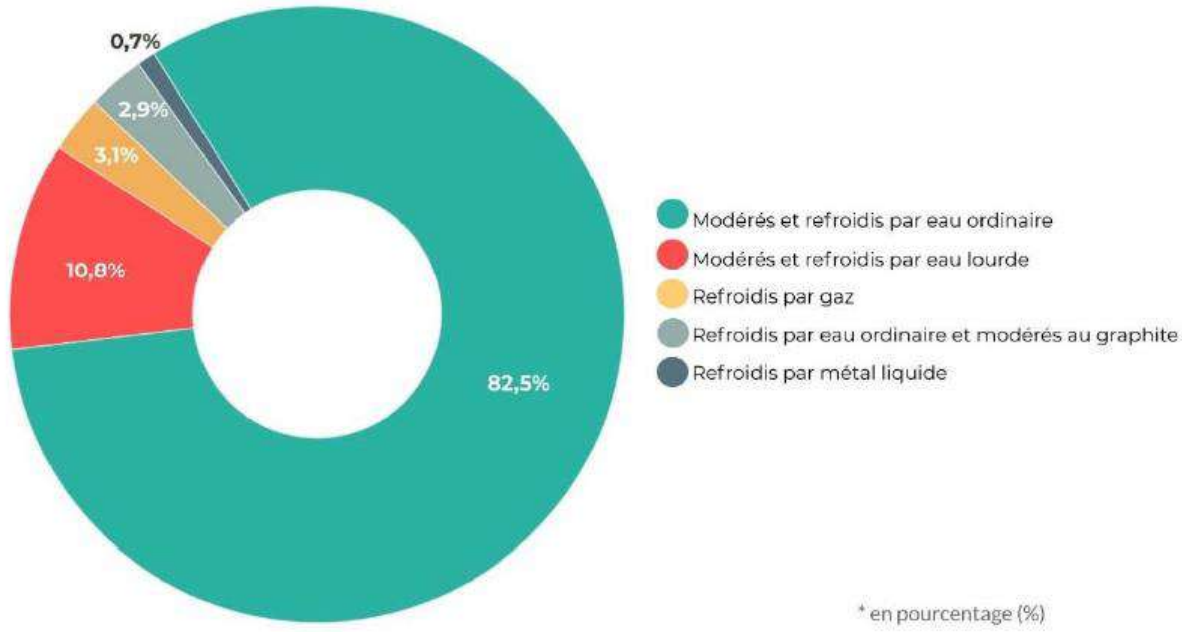
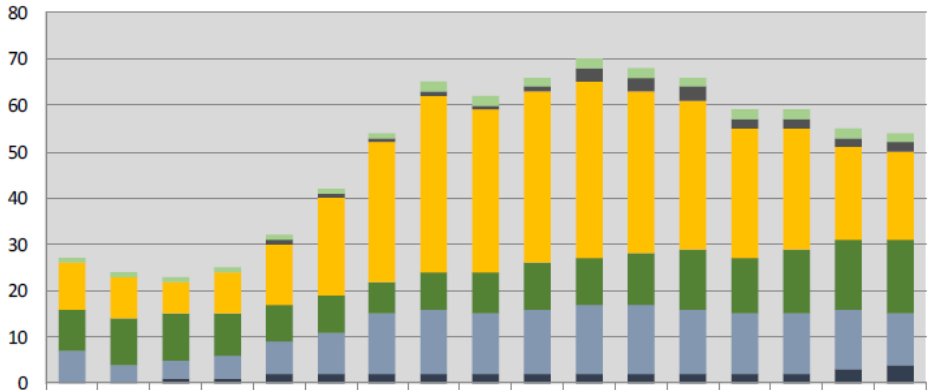


Figure (I.12) Réacteurs nucléaires de puissance par type [13].

En 2019, six nouveaux réacteurs à eau sous pression (PWR) ont été couplés au réseau, augmentant de 5174 MWe la capacité totale dans le monde pendant cette année : deux en Chine [Taishan (1660 MWe) et Yangjiang (1000 MWe)], un en République de Corée [Shin-Kori (1340 MWe)] et trois en Fédération de Russie [Novovoronezh(1114 MWe), Akademik Lomonosov (30 MWe) et Akademik Lomonosov (30 MWe)] [13].

Au 31 décembre 2019, 54 réacteurs étaient en construction. Zhangzhou et Taipingling (Chine), Bushehr (République islamique d'Iran), Kursk (Fédération de Russie) et Hinkley Point (Royaume-Uni) ont été mis en chantier. L'expansion et les perspectives de croissance à court et à long terme restent concentrées en Asie (Figure I.13), où 35 réacteurs sont en construction. C'est également en Asie que se trouvent 61 des 74 nouveaux réacteurs couplés au réseau depuis 2005 [13].



	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
Amérique latine	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
Amérique du Nord	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	3	3	3	2	2	2	2
Asie - Extrême-Orient	10	9	7	9	13	21	30	38	35	37	38	35	32	28	26	20	19
Asie - Moyen-Orient et Asie du Sud	9	10	10	9	8	8	7	8	9	10	10	11	13	12	14	15	16
Europe centrale et orientale	7	4	4	5	7	9	13	14	13	14	15	15	14	13	13	13	11
Europe occidentale	0	0	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	3	4

Figure (I.13) Nombre de réacteurs en construction par région. 13]

I.2.3. Centrales nucléaires

Une centrale électrogène s'organise autour d'une chaudière et un système de conversion d'énergie. La chaudière récupère la chaleur issue de la combustion. Le système de conversion d'énergie transforme une partie de cette chaleur en énergie mécanique directement récupérable sur l'arbre d'une turbine. Le taux de transformation d'énergie, appelé aussi rendement, est d'autant plus important que la différence de température entre les sources chaude et froide est grande. Une chaudière classique est le siège d'une réaction chimique exothermique, il s'agit de la combustion d'hydrocarbures (fioul, gaz naturel, charbon) par l'oxygène de l'air. Une chaudière nucléaire est une machine dans laquelle est entretenue une réaction en chaîne de fission de noyaux lourds par des neutrons. Un fluide caloporteur évacue la puissance issue de la réaction nucléaire vers le système de conversion d'énergie [10,12].Ce principe de fonctionnement pour les centrales nucléaires se résume au diagramme suivant, figure (I.14).



Figure (I.14) Diagramme de fonctionnement des centrales [12].

Le système de conversion de l'énergie thermique (fournie par le cœur) en énergie électrique fonctionne souvent selon :

• Un cycle thermodynamique à vapeur (ex : cycle de Rankine).
• Un cycle thermodynamique à gaz (ex : cycle de Brayton).
• Un cycle combiné des deux précédents (centrales utilisant une source d'énergie d'origine fossile.

Le cycle de Rankine utilise l'eau comme fluide caloporteur. La vapeur surchauffée quitte la chaudière pour subir une première détente dans corps haute pression de la turbine. Elle est alors séchée, resurchauffée et entame de nouveau une série de détentes dans les étages moyenne puis basse pression avant d'être rejetée dans le condenseur. Les condensats sont extraits, éventuellement purifiés, préchauffés et admis de nouveau dans la chaudière. Le cycle de Rankine est caractérisé par un rendement de l'ordre de 30-40 %. Il est utilisé, entre autres, dans les réacteurs à eau sous pression. Le cycle de Brayton est à la base des centrales utilisant un caloporteur gaz. Le gaz, inerte dans la plupart des cas, subit une série de compressions avant d'être admis dans la chaudière. Le niveau de température à l'entrée des turbines est beaucoup plus important que celui atteint dans le cycle de Rankine. Le cycle de Brayton possède, de ce fait, un rendement qui avoisine 40-50 % [10].

I.2.4. Principaux types de réacteurs

Depuis les débuts de l'industrie électronucléaire, plusieurs filières de réacteurs ont été développées à travers le monde. Ces filières se distinguent par des choix d'options technologiques. Parmi elles, trois caractéristiques majeures permettent de classer les réacteurs en différentes filières :

• la nature de la matière fissile utilisée comme combustible nucléaire (ex : uranium naturel, uranium enrichi, plutonium).
• le fluide caloporteur, qui permet de récupérer la chaleur produite au niveau du cœur et de l'acheminer (ex : eau ordinaire sous pression ou bouillante, eau lourde, gaz carbonique, sodium, hélium).
• le modérateur, qui détermine l'énergie moyenne des neutrons dans le cœur du réacteur (ex : eau ordinaire, eau lourde, graphite).

Une combinaison de ces trois éléments produit des réacteurs ayant des caractéristiques différentes, qui ne satisfont pas tous de la même façon les différents critères de sélection d'une filière de réacteurs nucléaires. Ces critères, d'ordre technique ou économique, évoluent avec le temps. Il existe généralement cinq types principaux des réacteurs nucléaires suivants:

I.2.4.1.Réacteurs à eau sous pression PWR

Le réacteur à eau sous pression ou REP (en anglais, PWR pour pressurized water reactor) est détaillé dans le chapitre trois.

I.2.4.2.Réacteurs à eau bouillante BWR

L'autre variante des réacteurs à eau est celle des réacteurs à eau bouillante, figure (I.15). Il constitue le second type de réacteur le plus utilisé pour la production d'électricité. Ce réacteur, tout comme le PWR, utilise un combustible à oxyde d'uranium enrichi ou un mélange oxyde d'uranium-oxyde de plutonium (MOX) [13].

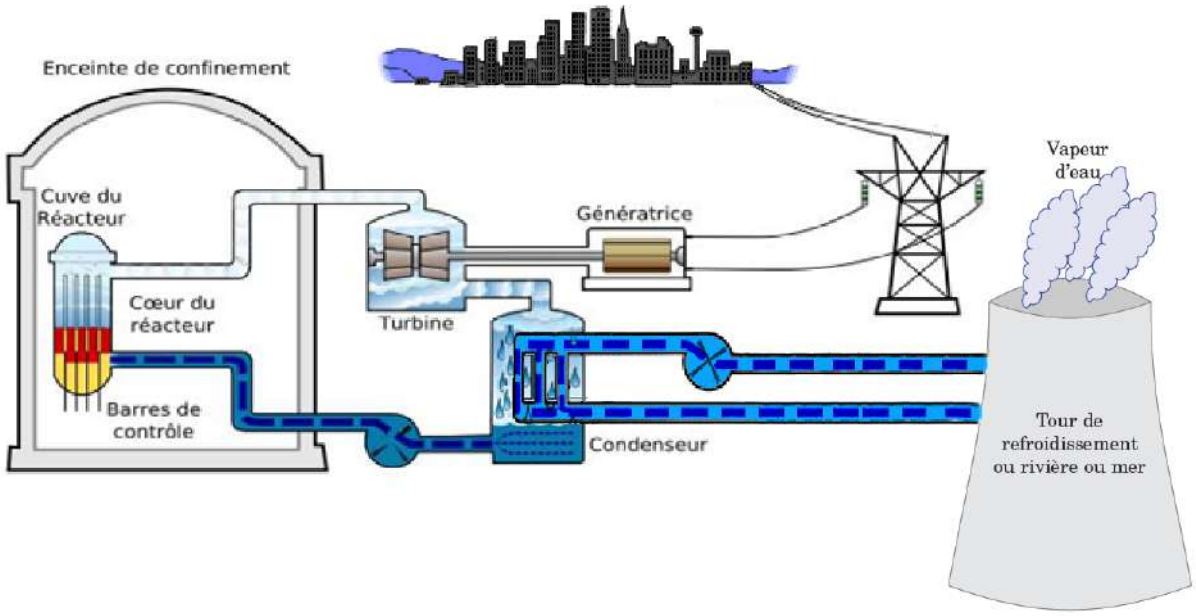


Figure (I.15) Schéma de principe d'un BWR [12]

L'eau circulant dans le cœur assure à la fois les fonctions de caloporteur et de modérateur. Le contrôle neutronique du cœur est uniquement assuré par des barres de contrôle. L'eau de refroidissement est partiellement vaporisée dans le cœur. Du fait de l'encombrement des parties supérieures de la cuve par les séparateurs et sécheurs, les barres

de contrôle sont insérées par le bas du cœur. La principale différence entre les types de réacteurs est la pression qui est environ deux fois plus faible pour l'eau du circuit primaire, de sorte que l'ébullition se produit dans le cœur. À la sortie du cœur, après séparation des gouttelettes résiduelles, la vapeur est directement envoyée aux turbines. Le schéma de principe du BWR est donc plus simple que celui du PWR, la contrepartie est la nécessité d'une radioprotection au niveau des circuits classiques, notamment des turbines, car l'eau s'active légèrement dans le cœur (dans les PWR, le circuit secondaire est totalement exempt de radioactivité, puisqu'il n'y a pas d'échange de matière au niveau des générateurs de vapeur) [12].

I.2.4.3. Réacteur à eau lourde pressurisée PHWR

Alors que la plupart des réacteurs refroidis à l'eau utilisent de l'eau légère (H_2O) comme liquide de refroidissement, un modèle, le réacteur canadien deutérium-uranium (CANDU) ou PHWR (en anglais, Pressurized Heavy Water Reactor), utilise de l'eau lourde. Le réacteur CANDU a été développé au Canada dans le but stratégique de permettre l'exploitation de l'énergie nucléaire sans avoir besoin d'importer de l'uranium enrichi. Le Canada abrite certains des minerais d'uranium les plus riches au monde, mais l'enrichissement de l'uranium est un processus coûteux et hautement technique [14].

Le réacteur CANDU utilise, comme modérateur et caloporteur, un type d'eau appelé eau lourde. L'eau lourde est une forme d'eau dans laquelle les deux atomes d'hydrogène normaux ont été remplacés par deux de la forme isotopique, le deutérium. Chaque atome de deutérium pèse deux fois plus qu'un atome d'hydrogène normal, d'où le nom d'eau lourde. L'eau lourde est présente en petites quantités dans l'eau naturelle.

Le caloporteur à eau lourde du réacteur CANDU est maintenu sous une pression d'environ 100 bar, inférieur à celle d'un PWR à eau légère, et l'eau atteint environ 290 °C sans bouillir. La chaleur est transférée via un échangeur de chaleur à un système d'eau légère avec un générateur de vapeur et le système secondaire entraîne une turbine à vapeur à peu près de la même manière qu'un PWR (Figure (I.16)). Le rendement est légèrement inférieur à celui des réacteurs à eau légère à environ 30 % [14].

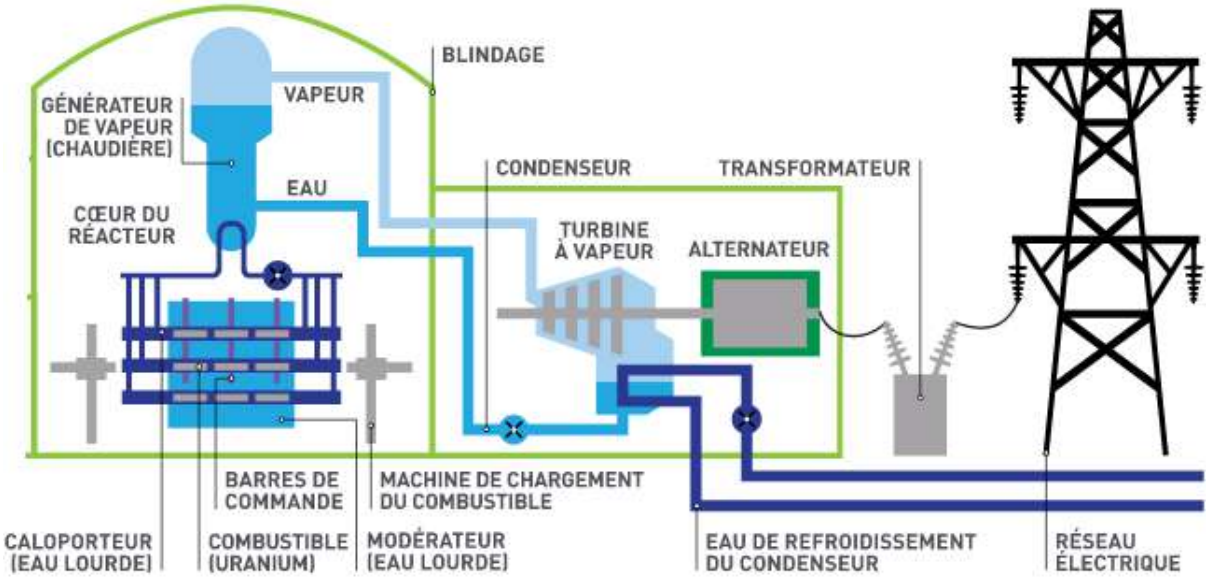


Figure (I.16) Schéma de principe d'un CANDU [15]

I.2.4.4. Réacteur bouillant de grande puissance RBMK

Le réacteur RBMK russe (en anglais, high-power channel reactor) est un autre BWR, mais de conception très différente de tout autre réacteur nucléaire utilisé aujourd'hui.

Comme le réacteur CANDU, le réacteur RBMK répondait au besoin de créer une réaction nucléaire durable sans uranium enrichi, ou dans ce cas avec un faible enrichissement en uranium. Dans de nombreux réacteurs nucléaires anciens et expérimentaux, le graphite était utilisé parce qu'il avait un faible coefficient d'absorption et aussi parce qu'il était bon marché. Le deutérium, s'il absorbe moins de neutrons, est beaucoup plus coûteux à produire.

Le réacteur RBMK était essentiellement de conception utilitaire. Le cœur est chargé de blocs de graphite dans lesquels des trous ont été percés pour permettre l'insertion des crayons combustibles et des barres de contrôle. Le cœur est également traversé par des tubes de force qui transportent de l'eau pompée à partir d'un réservoir situé sous le réacteur. Celle-ci est laissée bouillir en vapeur dans les tuyaux et est ensuite collectée par le haut et acheminée vers les cuves du générateur de vapeur. Le système eau/vapeur est pressurisé à 68 bar et l'eau atteint une température de 284 °C. En fonctionnement, le modérateur en graphite atteint une température de 730 °C. La cuve contenant le cœur est remplie d'un mélange gazeux hélium/azote qui est inerte, pour éviter l'oxydation du graphite et facilite également le

transfert de chaleur entre le graphite et les tubes de force à eau. La figure (I.17) représente le principe de fonctionnement d'un réacteur RBMK [14].

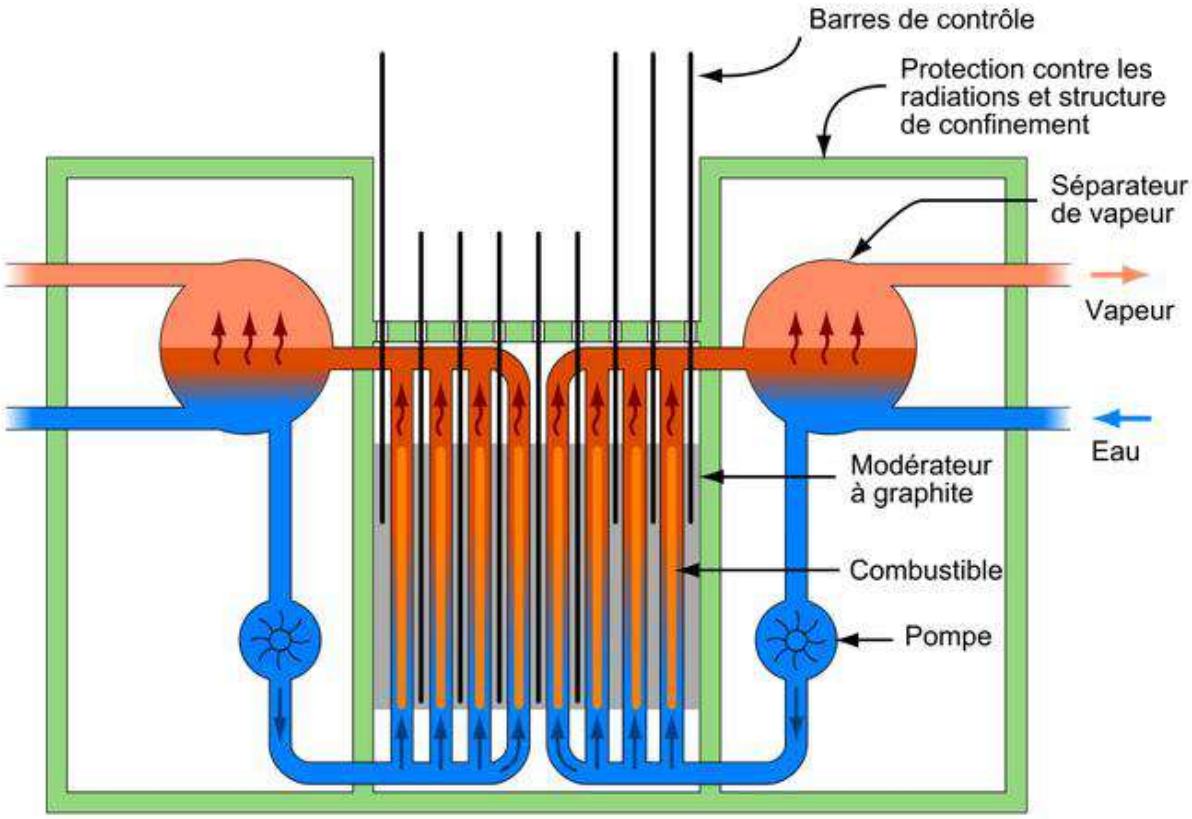


Figure (I.17) Schéma de réacteur RBMK [15]

I.2.4.5. Réacteur à neutrons rapides RNR

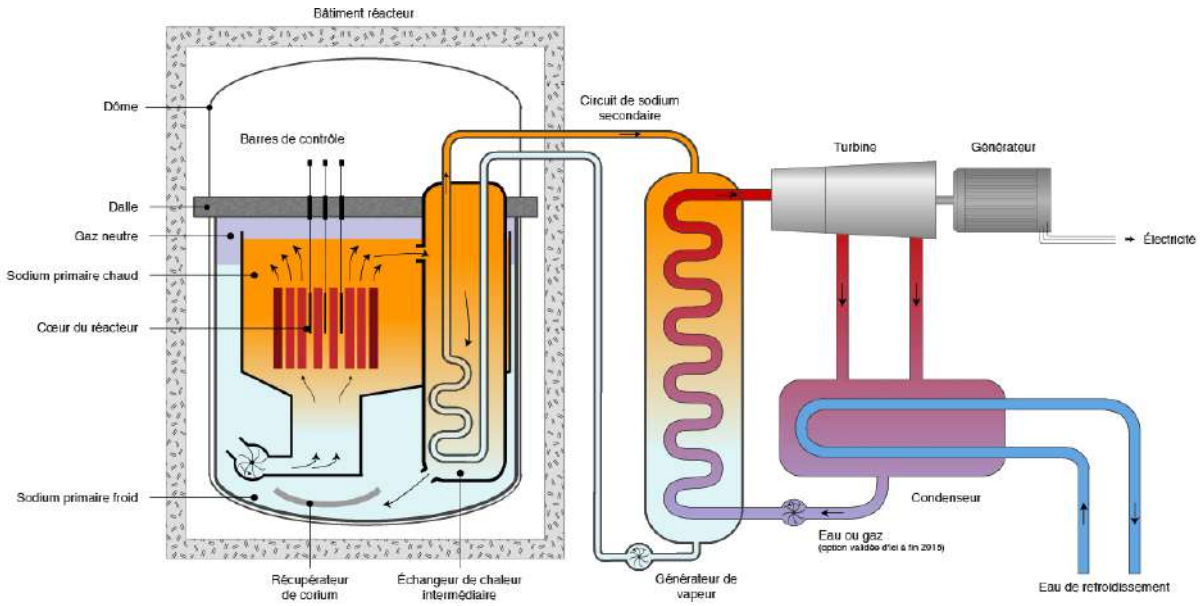


Figure (I.18) Schéma de principe d'un RNR [15]

Les réacteurs à neutrons rapides (figure I.18) (France) ont été conçus pour utiliser la matière fissile (l'uranium et le plutonium) comme combustible nucléaire, plus complètement que dans les réacteurs à neutrons thermiques. Contrairement aux réacteurs de 2ème et de 3èmegénération, ce réacteur, dit de « 4ème génération », consommerait de l'uranium 238 (constituant 99,3% de l'uranium naturel) plutôt que de l'uranium 235 (0,7% de l'uranium naturel), ce qui nécessiterait in fine moins d'uranium naturel extrait du sous-sol pour produire de l'électricité. Ce démonstrateur industriel pourrait également brûler du plutonium et transformer des actinides mineurs, déchets nucléaires à vie longue, en des déchets nucléaires à vie plus courte. Les réacteurs à neutrons rapides (RNR), au contraire, peuvent consommer intégralement l'uranium naturel.

Le fluide caloporteur peut être un métal liquide, tel le sodium (Phénix) ou un gaz (l'hélium). Ils présentent les avantages de pouvoir fabriquer de la matière fissile (surgénérateur) ou, au contraire, incinérer des déchets (actinides) à vie longue.

I.3.Cogénération d'eau et d'énergie

Toute production d'énergie électrique s'accompagne du rejet d'une importante quantité de chaleur (50 à 70 % de la puissance de la chaudière) vers une source froide. La cogénération consiste à utiliser cette chaleur pour alimenter en énergie une installation quelconque qui en consomme : serre, circuit de chauffage urbain, unités de dessalement, etc.

Un système intégré de dessalement (SID) est une installation issue du couplage d'une centrale électrogène ou calogène à un procédé de dessalement. Construire des installations de production simultanée d'eau et d'électricité n'est pas une idée récente. Déjà, dans les années 1960-1970, HAMMOND du centre nucléaire d'Oak-Ridge (États-Unis) étudiait la faisabilité d'implantation de complexes agro-industriels dans les déserts situés au bord de mer. Les études d'Oak-Ridge ont ensuite évolué vers la notion "d'énergy Center", c'est-à-dire vers l'étude des industries utilisatrices d'électricité et/ou de vapeur, susceptibles d'être implantées à côté de réacteurs géants. Plusieurs sites ont été étudiés, mais aucune réalisation n'a vu le jour. Le premier réacteur nucléaire couplé à une usine de dessalement a été le réacteur rapide BN 350 de Chevtchenko au Kazakhstan, ex-URSS. Mis en service en 1972, le SID dessalement devrait produire 1000 MW_{th}, 150 MW_e et 120 000 m^3/jour d'eau douce, mais n'a jamais fonctionné dans ces conditions. Actuellement, plusieurs réacteurs nucléaires sont

couplés à des procédés de type distillation. À ce jour, aucun problème de fonctionnement ni aucun accident n'ont été signalés [12].

I.4. Etat de l'art

Cette partie a pour objectif de présenter un état de l'art concernant les couplages des centrales nucléaires et les unités de dessalement, qui comprends trois parties. Premièrement, présenter un état de l'art concernant la modélisation et l'analyse exergétique des installations de dessalement multiple effet (MED) couplées à une thermo-compression de vapeur (TVC). Dans la deuxième partie, un état de l'art concernant les analyses énergétique et exergétique des centrales nucléaires sera présenté. Finalement, nous restreignons l'analyse aux modèles des systèmes de cogénération dont l'objectif est de représenter les couplages entre les réacteurs nucléaires et les procédés du dessalement dans leur globalité. Ce niveau d'analyse est bien sûr adapté à notre objectif de représentation des systèmes dans son ensemble.

I.4.1. Etat de l'art sur les installations multiples effets MED-TVC

Beaucoup de travaux sur la modélisation des installations MED-TVC ont été publiés, les plus cités sont détaillés dans cette partie. En effet, les techniques de dessalement par distillation se caractérisent surtout par l'utilisation d'énergie thermique pour la production d'eau potable. Elles peuvent ainsi revaloriser les pertes énergétiques de centrales thermiques et de plusieurs procédés industriels. Lors de l'étude du comportement d'une installation MED-TVC en régime permanent, les variables les plus importantes à considérer sont la quantité d'eau douce produite ainsi que le rendement de l'installation (GOR). C'est pourquoi la plupart des modèles mentionnés ici se focalisent sur l'optimisation énergétique de l'installation en réalisant des études paramétriques afin de déterminer quelles sont les configurations optimales. Cependant la distillation par compression de vapeur a suscité un grand intérêt à travers un certain nombre de travaux dont les plus pertinents pour ce présent projet sont :

Hamed [16] a étudié l'impact du changement de température maximale de la saumure (TBT) et du nombre d'effets sur le gain output ratio GOR d'un système MED avec et sans compression thermique de vapeur (TVC). Le TBT a varié entre 58°C et 70°C et le nombre d'effets a augmenté de 3 à 6. Ils ont signalé que l'augmentation du nombre d'effets de 3 à 6

entraîne une augmentation du GOR de près de deux fois. El-Allawy [17] a rapporté que le rapport de performance augmentait de manière insignifiante avec l'eau de mer d'entrée.

Darwish et al. [18] ont effectué une étude comparative entre deux systèmes MED-TVC et MSF. Les résultats montrés que le système MED-TVC est supérieur au système MSF en termes de meilleure sensibilité à la variation de vapeur d'entrée, de puissance de pompage moindre et de meilleure capacité à fonctionner à divers modes.

Hamed et al. [19] ont appliqué l'approche d'analyse exergétique à un système de dessalement MED-TVC à quatre étages situés aux Emirats Arabes Unis, sur la base de données d'exploitations réelles. Les pertes exergétiques ont été évaluées et comparées à celles d'autres systèmes de dessalement traditionnels. Les résultats ont révélé que le premier effet et l'éjecteur représentent la majorité des destructions exergétiques avec environ 39 % et 17 %, respectivement. Al Najem et al. [20] ont réalisé des analyses énergétiques et exergétiques pour deux systèmes de dessalement thermique disponibles dans le commerce (TVC simple et multi-effets) installés par la société SIDEM (France). Les résultats ont montré que le thermo-compresseur et les évaporateurs sont les principales sources de taux de destruction exergétique dans le système TVC.

Les travaux El-Dessouky et al. [21–26] ont été parmi les premiers à travailler sur le sujet de 1997 à 2002. Leurs travaux sont les plus reconnus et utilisés. Ils proposent des modèles mathématiques simplifiés pour le dimensionnement et l'analyse d'installations MED selon les différentes configurations d'alimentation des effets en eau de mer, pour un nombre variable d'effets. Ils ont également développé de nombreuses corrélations, très fréquemment reprises, pour les propriétés thermodynamiques de l'eau de mer ainsi que pour les coefficients d'échange de chaleur dans les évapo-condenseurs, les réchauffeurs d'appoint et le condenseur final. Dans ces modèles sont considérés des surfaces d'échange constantes, des pertes thermodynamiques évaluées par des corrélations expérimentales, développées par leurs soins et un écart de température constant entre deux effets consécutifs. Ils ont également supposé que l'eau de mer arrosant les tubes dans les effets était à la température de saturation. Leurs modèles ont permis de réaliser des études paramétriques approfondies des différentes variables d'une installation MED. Ils ont pu conclure principalement que les coefficients d'échange dans les évapo-condenseurs et les réchauffeurs d'appoint augmentent avec la température de saturation et que le GOR dépend étroitement du nombre d'effet. Une autre

partie des travaux de El-Dessouky, Un deuxième modèle, basé sur des principes physiques, a été établi à partir de bases de données fournies par de nombreux fabricants de thermo-compresseur et des études expérimentales disponibles dans la littérature. Ces travaux comportent également une analyse des modèles de thermo-compresseurs publiés. Le modèle ainsi développé permet de calculer les profils de pression et les nombres de Mach associés à chaque zone du thermo-compresseur. Ce modèle peut être utilisé pour le dimensionnement, sous réserve de connaître les débits et pressions entrants dans le système, ou bien comme modèle de performance si les données géométriques de chaque zone sont connues. Il sera plus amplement détaillé par la suite puisqu'il sera utilisé dans cette thèse.

Choi et al. [27] ont analysé les performances thermiques de quatre systèmes de dessalement MED-TVC de différentes capacités fournies par Hyundai Heavy Industries (HHI) Company (Corée). Les pertes exergétiques dans les sous-systèmes de chaque système MED-TVC ont été évaluées. Selon leurs découvertes, plus de 70 % de la destruction exergétique totale est attribuée au TVC et à ses effets.

Alasfour et al. [28] ont réalisé une analyse énergétique et exergétique de trois configurations TVC multi-effets distinctes. Dans toutes les configurations, les irréversibilités du thermo-compresseur et des évaporateurs se sont avérées être les causes les plus importantes de destruction exergétique. L'analyse thermique a également révélé que le premier effet représente jusqu'à 50 % de la destruction exergétique totale de l'effet.

Darwish et al. [29] Ont également publié des travaux sur la modélisation stationnaire des installations MED. Leur travail présente de nombreuses simplifications, comme par exemple le fait de considérer que la même quantité de vapeur est produite dans chaque effet et que l'écart de température entre deux effets consécutifs est constant. Ces travaux ont eu pour but de démontrer que les installations de dessalement MED sont plus performantes à haute température de tête que les MSF, la température de tête étant la température régnant dans la première enceinte.

Plusieurs chercheurs ont modélisé les performances du système MED [30,31]. Certains ont envisagé différentes dispositions, y compris l'alimentation avant FF, l'alimentation arrière BF et l'alimentation parallèle PF, ou via une analyse ciblée d'une certaine disposition (alimentation avant), et ont déclaré que le rapport de performance dépend

principalement du nombre d'effets plus que sa dépendance à la température de la saumure supérieure. Al Sahali et al. [32] ont développé un modèle de simulation simple pour MED-TVC basé sur une solution séquentielle plutôt que sur une procédure itérative et supposant une chute de température, une chaleur spécifique et un coefficient de transfert de chaleur constants.

Kamali et al. [33,34] Ont présenté des techniques d'optimisation des procédés MEDTVC et d'identification des paramètres influant le plus les performances de l'installation. Le modèle détermine la capacité de production, le GOR, la différence de température entre les effets et la pression dans chaque effet, tout ceci afin d'augmenter le GOR et par conséquent de diminuer la consommation d'énergie pour une production donnée. Ce travail s'appuie sur ceux de El-Dessouky et al. Précédemment évoqués.

Bin Amer et al. [35] ont examiné analytiquement le système MED-TVC (compression thermique de vapeur). Les résultats ont montré que le GOR variait de 8,5 pour un système composé de 4 effets à 18,5 pour un système à 12 effets à TBT qui variait de 55,8 °C à 67,5 °C. Le taux de compression optimal a été rapporté entre 1,81 et 3,68 alors que le taux d'entraînement optimal varie de 0,73 à 1,65. Benimar [36] a évalué et amélioré les performances de trois systèmes MED-TVC commerciaux avec différentes capacités sur la base d'analyses énergétiques et exergétiques. Les résultats ont indiqué que la majeure partie du taux de destruction exergétique résulte de l'éjecteur de vapeur et des effets. De plus, les résultats ont indiqué que le premier effet est responsable d'environ 46% de la destruction exergétique totale des effets, qui diminue avec un nombre croissant d'effets.

Kouhikamali et al. [37,38] Ont développé un modèle mathématique pour évaluer les différentes configurations possibles concernant l'association d'une installation MED avec un thermo-compresseur de vapeur dans le but de maximiser le GOR de l'installation. Ils ont ainsi conclu qu'il serait préférable de prélever la vapeur entrainée au thermo-compresseur dans les effets intermédiaires plutôt qu'au niveau du dernier effet, comme cela se fait communément. Leurs travaux ont également concerné l'étude du positionnement et du nombre de réchauffeurs d'appoint optimaux dans l'installation.

Janghorban et al. [39] Ont analysé les effets des variables d'entrée telles que l'écart de température entre les effets et le débit de vapeur motrice de l'éjecteur d'un MEETVC

alimenté par les gaz de détente d'une turbine. Leur travail a pour but d'augmenter la production d'eau potable tout en minimisant le cout de production. Ils ont trouvé que les meilleures performances dans un tel système sont obtenues lorsque le nombre d'effets du MEE est égal à six.

Ihm et al. [40] ont montré une amélioration de l'efficacité du système en faisant fonctionner le système à une température de saumure supérieure élevée de 85 °C. De plus, une nouvelle optimisation de la conception d'une unité à grande échelle avec une température de saumure supérieure > 70 °C du système MED-TVC est présentée.

Khoshgoftar et al. [41] Ont développé un modèle d'optimisation qui détermine les paramètres optimaux d'intégration d'un système hybride constitué d'un multiple effet avec thermocompression et d'une unité d'osmose inverse. Les fonctions objectives retenues correspondent à la diminution du cout de production et à la maximisation du rapport débit d'eau potable sur débit de vapeur primaire de l'éjecteur. Ils ont noté que le système est plus performant lorsque le débit d'eau potable du MEE-TVC est réduit au profit du système d'osmose inverse. En outre ils ont conclu qu'une meilleure production spécifique correspond à un cout de production élevé.

Récemment, Al Mutaz et al. [42] ont développé un modèle mathématique de système de dessalement multi-effets, arrangement croisé parallèle avec compression thermique de vapeur (MED-TVC-PC) et ont comparé les résultats avec les installations existantes disponibles. Ils ont signalé que le GOR de chaque usine simulée est proche du GOR de l'usine réelle. En 2016, Al-Mutaz et al. [43] ont rapporté que le changement de position de l'extraction dans MED-TVC-PC a un effet sur le rapport de performance en réduisant la consommation d'énergie. Ils ont rapporté que le GOR maximum peut être atteint lorsque le TVC est situé près de l'effet médian. Ils ont également étudié l'effet de la pression de vapeur motrice, de la pression d'aspiration et de la quantité de vapeur motrice, ils ont rapporté que l'augmentation de la pression de vapeur motrice de 1200 à 2000 kPa augmente le GOR de l'usine de 8,4 à 9,5, tandis que la zone de transfert de chaleur spécifique diminue d'augmenter la pression d'aspiration des éjecteurs.

Bandelier. [44] A établi un modèle technico-économique utilisé pour le dimensionnement d'une usine MED. Dans ce modèle, on considère comme entrée la nature

de la source chaude et la capacité de production souhaitée afin de déterminer la configuration idéale, aussi bien d'un point de vue du nombre d'effets que des coûts engendrés. Ce modèle comprend également l'analyse économique la plus aboutie dans la littérature puisqu'il permet d'étudier les coûts d'investissement, de fonctionnement et de l'eau douce produite sur la durée de vie de l'installation. Une analyse économique est possible (rentabilité, temps de retour sur l'investissement) ainsi qu'une évaluation de l'impact environnemental.

Sadri et al. [45] ont analysé et optimisé un système MED-TVC dans l'usine de Tripoli (Libye) en utilisant l'approche énergétique et exergétique. Les résultats ont montré que les évaporateurs sont les principales causes de destruction exergétique, alors que le premier effet représente environ 73% du taux de destruction exergétique de tous les effets.

Eshoul et al. [46] ont effectué des analyses exergétiques et économiques d'un système MED-TVC pour divers paramètres et configurations de fonctionnement. Selon les résultats, l'éjecteur et les effets sont les principales causes de destruction exergétique, représentant respectivement environ 40 % et 35 % de la destruction exergétique totale.

Sayyadi et al.[47] ont réalisé une optimisation thermodynamique et thermo-économique basée sur l'analyse exergétique et économique d'un système MED-TVC typique afin de minimiser le coût de production d'eau et de maximiser l'efficacité exergétique. Les résultats ont révélé que l'efficacité exergétique maximale et le coût minimal de production d'eau sont obtenus à une valeur beaucoup plus élevée du nombre d'effets. Ceci a été confirmé plus tard par Esfahani [48]. Elsayed et al. [49] ont développé un modèle exergo-économique pour simuler les performances d'un système MED-TVC ayant une variété d'options d'alimentation. Leurs résultats ont confirmé que 58% de la destruction exergétique a lieu dans la section TVC et pourrait être beaucoup plus faible en diminuant la pression fournie de la vapeur motrice.

Khorshidi et al. [50] ont présenté l'analyse exergétique et l'optimisation d'un système MED-TVC situé dans le sud de l'Iran, basée sur un algorithme génétique. L'analyse exergétique du système a indiqué que plus de 80% de la destruction exergétique a lieu dans l'éjecteur et les effets. Les résultats d'optimisation ont montré que la production d'eau distillée pouvait être améliorée de 16,62 %, tandis que le taux de destruction exergétique totale était réduit à 3,58 %.

Tontu et al. [51] ont analysé un système MED-TVC à quatre étages couplés à une centrale thermique située dans la partie orientale de la Turquie en appliquant des approches énergétiques, exergétiques et thermo-économiques et en considérant différentes conditions de fonctionnement. Leurs résultats ont révélé qu'environ 45 % du taux de destruction exergétique total appartenait au thermo-compresseur.

Récemment, Cao et al. [52] ont effectué des analyses énergétiques et exergétiques des systèmes de dessalement MED et MED-TVC en utilisant différentes techniques de division du groupe. Les résultats ont indiqué que les performances du système MED-TVC pourraient être améliorées si les effets étaient répartis plus uniformément entre les groupes d'effets. On constate également que l'efficacité exergétique pourrait être considérablement améliorée en augmentant le nombre d'effets d'aspiration.

I.4.2. Etat de l'art sur les centrales nucléaires PWR

Durmay et al. [53] ont réalisé une analyse exergétique dans un réacteur à eau pressurisée d'une capacité thermique de 4 250 MW afin d'évaluer l'irréversibilité liée à la centrale nucléaire et à ses composants. Les résultats de cette étude indiquent que le réacteur est le dispositif le moins efficace de la centrale nucléaire.

Sayyadi et al. [54] une analyse d'énergie et d'exergie a été réalisée pour une centrale nucléaire typique de 1000 MW-PWR avec réacteur à eau légère. Le bilan énergétique, l'irréversibilité et les pertes et destructions exergétiques ont été déterminés pour chaque composant et comparés aux pertes totales du système. Les résultats montrent que d'importantes destructions par exergie se produisent dans les réacteurs nucléaires et les turbines et les chauffe-eaux sont des deuxièmes et troisièmes sources de destruction par exergie. L'analyse implique cependant que le condenseur est un composant majeur des pertes d'énergie dans l'environnement dans l'usine.

Terzi et al. [55] des études d'énergie et d'exergie d'une centrale nucléaire (centrale nucléaire) de type réacteur à eau modérée à eau (VVER), qui fait partie des réacteurs à eau sous pression ont été réalisées. L'analyse exergétique a été réalisée sur la base de la deuxième loi de la thermodynamique. Les résultats montrent que beaucoup de pertes d'énergie ont été constatées dans les unités de cuve sous pression des réacteurs. De plus, le condenseur, les

turbines et les générateurs de vapeur contribuent également à la perte d'énergie. Alors que l'efficacité thermodynamique de la centrale nucléaire se trouve à 30%.

Marques et al. [56] une évaluation d'une centrale électrique Angra 2 Brésil en effectuant des analyses d'énergie et d'exergie pour quantifier les performances thermodynamiques de cette centrale PWR et de ses composants. La méthodologie consiste à développer un modèle mathématique basé sur les états thermodynamiques en plus des équilibres d'équilibre énergétique et exergétique. Les résultats montrent qu'Angra 2 a une efficacité énergétique de 36,18% et une efficacité exergétique de 49,24%. Le cœur du réacteur est le dispositif le plus inefficace de la centrale nucléaire ; elle a un rendement exergétique de 67,16% et est responsable de 63,88% de toute l'exergie détruite à Angra 2.

Eshun [57] Des analyses énergétiques et exergétiques de la performance de la centrale nucléaire Westinghouse Advanced Passive 1000 MWe (AP1000) ont été réalisées. Des résultats montrant que les pertes d'énergie se produisaient principalement dans le condenseur où 1849,8 MW, et le réacteur et le générateur de vapeur étaient la principale source d'irréversibilité de la centrale.

I.4.3. Etat de l'art sur les centrales nucléaires couplé avec les unités de dessalement

Il existe de nombreux travaux publiés sur le dessalement nucléaire, certains d'entre eux sont liés au couplage, une partie est liée à la modélisation, et la plupart d'entre eux sont liés au coût. De nombreuses techniques de dessalement ne nécessitent que de l'énergie thermique pour fonctionner, ce qui les rend distinctes en couplage avec les réacteurs nucléaires, et elles utilisent la chaleur libérée dans l'environnement dans le cycle de production d'électricité. Les plus pertinents pour ce présent projet sont :

D'après notre recherche bibliographique, la première étude effectuée sur la mesure où intégré les coûts environnementaux dans les coûts d'électricité et de dessalement est celle de Nisan et al. [58-60]. L'étude s'est concentrée sur l'évaluation des coûts de dessalement de l'eau de mer de différents systèmes à savoir les réacteurs à eau sous pression tels que le PWR-900 et l'AP-600, couplés au MED, et RO, et les réacteurs à haute température tels que le GT-MHR, le PBMR, couplés au MED, avec l'utilisation de la chaleur résiduelle pratiquement gratuite fournie par ces réacteurs. Une étude comparative avec d'autres systèmes tels que les systèmes à base de combustibles fossiles à savoir les centrales au charbon et au fioul et la

centrale à cycle combiné à turbine à gaz. L'étude a montré que parmi les systèmes alimentés aux combustibles fossiles, les coûts d'électricité et de dessalement par centrale au charbon à lit fluidisé circulant seraient les plus bas avec les prix actuels du charbon. Celles des centrales au mazout seraient les plus élevées. Dans tous les cas, les systèmes d'énergie nucléaire intégrés conduiraient à des coûts d'électricité et d'eau considérablement inférieurs à ceux des systèmes correspondants à base de charbon. Lorsque les coûts externes des différentes énergies sont internalisés dans les coûts de l'électricité et de l'eau, les écarts de coûts relatifs sont considérablement accrus en faveur des systèmes nucléaires.

Plusieurs chercheurs ont modélisé les performances de différents systèmes [61–66] via des études de différentes possibilités de couplage [67–69] ou via une analyse économique [70–79]. Khoshgoftar et al. [80,81] ont réalisé une optimisation multi-objectif d'une centrale nucléaire à eau sous pression (PWR) couplée à un système de dessalement multi-flash distillation (MSF). L'optimisation aux algorithmes génétiques (AG) traite de l'application d'un algorithme évolutif basé sur NSGA-II à effectuer dans l'environnement MATLAB. Les résultats ont confirmé que l'algorithme évolutif NSGA-II est très efficace pour s'appliquer à une centrale à double usage PWR-MSF et de manière systématique et élégante.

Kambiz Ansariet et al. [82,83] Ont présenté des analyses exergétiques et exergo-économiques complétées par une optimisation multi-objectif du couplage d'une usine de dessalement par distillation thermique multi-effets par compression de vapeur (MED-TVC) avec une centrale nucléaire à réacteur à eau sous pression (PWR). Un algorithme génétique (AG) est utilisé afin de minimiser le coût des produits du système (coût de l'électricité produite et de l'eau douce) et maximiser l'efficacité énergétique du système.Les résultats montrent que les coûts de l'inefficacité thermodynamique (le coût de la destruction exergétique) pour les composants du système optimisés ont été réduits par rapport au coût correspondant de destruction exergétique dans l'usine de scénario de base. De plus, il a été confirmé que leur optimisation améliorait les caractéristiques thermodynamiques et économiques du système.

Une analyse du cycle de la centrale nucléaire de cogénération pour déterminer son efficacité et ses besoins en vapeur de dessalementa été menée par Asiedu-Boateng. [84]. Un modèle analytique du procédé de dessalement par compression thermique de vapeur (TVC) a également été développé pour étudier l'effet des paramètres de conception et de

fonctionnement sur les paramètres contrôlant le coût de production d'eau douce à partir du procédé TVC. Ce modèle a été couplé à une centrale nucléaire de cogénération pour fournir la vapeur nécessaire au dessalement. Les résultats ont montré que les performances thermiques du procédé de dessalement TVC s'améliorent avec l'efficacité de la centrale nucléaire de cogénération mais diminuent avec l'augmentation des taux de consommation de vapeur.

Dardour et al. [85] ont sélectionné le schéma de couplage des systèmes HTGR+MED utilisés dans les projets EURODESAL et TUNDESAL. Ho Sik Kim et al. [86] ont proposé une conception optimale des systèmes HTGR+MED et ont effectué une analyse des performances et des coûts du système proposé. Dans un premier temps, le schéma de couplage KAIST a été proposé. Il utilise des échangeurs de chaleur à circuit imprimé (PCHE) au lieu d'échangeurs de chaleur conventionnels sans aucune boucle intermédiaire et à la structure indépendante entre les usines MED et le dissipateur thermique. Dans la deuxième étape, la version KAIST du code DEEP (K-DEEP) a été développée pour une analyse plus pratique des coûts et des performances du système KAIST HTGR+MED. Les résultats montrent que la capacité maximale de production d'eau dessalée augmente de 258% par rapport à la capacité de production utilisant le schéma de couplage précédent. Le coût de l'eau dessalée pourrait être réduit de 9,0 %. Enfin, à partir de la comparaison de divers systèmes de dessalement nucléaires MED, nous avons confirmé le potentiel du système KAIST HTGR+MED qui peut être l'une des meilleures options de dessalement dans la production de masse d'eau dessalée.

Une étude de la cogénération d'électricité et d'eau potable à partir du dessalement sur la base de grands ou petits/moyens réacteurs a été effectuée par Gustavo Alonsoa et al. [87]. L'étude a examiné l'économie du dessalement nucléaire à l'aide de deux conceptions PWR (réacteur à eau pressurisée), de grande taille, l'AP1000, par rapport à une taille intermédiaire, IRIS. L'étude a évalué les besoins en électricité et en eau potable de la région nord-ouest du Mexique. I existe trois alternatives utilisant les trois procédés de dessalement, l'osmose inverse (RO), la distillation flash multi-étages (MSF) et la distillation multi-effets (MED). L'étude montre que le procédé MED peut fournir de l'eau avec la même qualité que le procédé MSF, mais la différence de coût par m^3 peut aller jusqu'à 0,92 US$, le MSF étant la plus chère de toutes les méthodes considérées ici. Les méthodes hybrides utilisant l'osmose

inverse peuvent également rendre plus compétitifs les processus MED et MSF avec une pénalité gérable de la qualité de l'eau.

Des analyses thermodynamiques détaillées pour le cycle de cogénération combiné proposé (d'un réacteur à hélium modulaire à turbine à gaz (GT-MHR) et de procédés de distillation) sont présentées et les effets de paramètres importants sur les performances du cycle ont été étudiés par Zare et al. [88]. Les performances du cycle proposé sont ensuite optimisées sur la base de la première loi de la thermodynamique. Les résultats montrent que l'efficacité de la première loi du cycle GT-MHR, aux conditions optimales, est d'environ 7 % supérieure à celle du cycle. Il a également été conclu que pour chaque augmentation de 50 °C de la température d'entrée de la turbine à gaz, l'efficacité thermique est augmentée d'environ 2,5 à 4 % et le taux de production d'eau pure est diminué d'environ 6,5 %.

Xing Yan et al. [89] ont présenté un nouveau couplage d'une centrale nucléaire GTHTR300 qui est basée sur un réacteur à gaz à haute température de 600 MWt avec une usine flash à plusieurs étages (MSF) pour le dessalement de l'eau de mer. L'étude montre que le nouveau procédé produit 45 % d'eau en plus que le procédé traditionnel fonctionnant sur la même plage de températures. Ainsi, le GTHTR300 produit 56 000 m3/j d'eau et génère une puissance de 280 MWe à rendement constant avec et sans cogénération d'eau.

De leur côté, Medhat Elaskary. [90] ont présenté des analyses détaillées sur les coûts d'électricité et d'eau pour plusieurs réacteurs nucléaires fonctionnant en mode cogénération (par exemple les PWR, les PHWR, et BWR, les réacteurs à haute température, tels que le GT-MHR refroidi au gaz et le petit réacteur modulaire SMR). Les centrales nucléaires sont couplées à trois principaux procédés de dessalement, la distillation à effets multiples (MED), (MSF), l'osmose inverse (RO) et deux scénarios pour les usines hybrides (MED+RO, MSF+RO).

Par ailleurs, Min Young Park et al. [91] ont présenté une étude pour l'évaluation thermodynamique sur le système intégré de VHTR et le procédé de dessalement par osmose directe (FO). L'intégration implique essentiellement le couplage de la chaleur perdue du VHTR avec le système de récupération des solutés tirés du système de dessalement d'eau de mer FO qui est la seule partie consommatrice d'énergie de l'ensemble du processus FO. L'étude montre que le système proposé a été calculé pour avoir un taux d'utilisation de la

chaleur résiduelle significativement plus élevé que les autres systèmes. En conséquence, la production d'eau du système FO-VHTR s'est avérée au moins 5 fois supérieure à celle du système MSF-VHTR.

L'étude d'Adak et al. [92] a montré la faisabilité technique du couplage d'usines de dessalement d'eau de mer de 2500 m3/jour MSF et de 2400 m3/jour MED-TVC couplées à des AHWR, en utilisant respectivement la chaleur résiduelle et la vapeur rejet ver l'environnement. Il est conclu qu'en suivant les méthodologies de couplage appropriées et en fournissant des barrières métalliques et des logiques d'inversion de pression, la production d'eau douce est possible en utilisant la chaleur des réacteurs nucléaires pour le dessalement de l'eau de mer.

Gomaa Abdoelatef et al. [93] ont présenté une analyse thermodynamique pour un ensemble de configurations couplant l'APR1400 aux technologies de dessalement thermique (MED, MSF, MED-TVC). Les résultats montrent que le condenseur il est meilleur point d'extraction vapeur pour tous les procédés de dessalement étudié.

Des recherchesontété mené par Salah Ud-Din Khan et al. [94]sur la centrale nucléaire du type flottant nommée réacteur ABV qui est conçu pour le chauffage urbain, l'électricité et le dessalement d'eau de mer par l'installation OKBM en Russie. Les techniques de dessalement sélectionnées sont RO et RO+MED. Les résultats obtenus à partir des deux analyses montrent que l'efficacité du système de dessalement du réacteur nucléaire ABV augmente avec la diminution du rapport de coût de l'eau correspondant.

Par ailleurs, Farruk Khalid et al. [95] ont présenté une évaluation comparative de deux systèmes de dessalement nucléaire. Le système d'osmose inverse (OI) utilisé pour le dessalement est couplé à un réacteur nucléaire CANDU6 et à un réacteur rapide refroidi au sodium SFR. L'analyse exergétique est utilisée pour évaluer les performances des systèmes de cogénération. Les résultats montrent que les efficacités exergétiques des systèmes CANDU-6et SFR sont respectivement de 32,8 % et 36,8 %. De plus, les rendements exergétiques du procédé RO pour les systèmes CANDU 6 et SFR sont de 49,2 % et 36,3 %, respectivement. Farruk Khalid et al. [96] présentent une étude paramétrique du couplage d'unréacteur modulaire à turbine à gaz à hélium (GT-MHR) avec le procédé d'osmose inverse (OI) réalisé pour révéler l'effet de certains paramètres sur l'efficacité énergétique. L'analyse

montre que le rendement exergétique des processus de cogénération augmente de 10,3% si la chaleur résiduelle du réacteur est utilisée.

Une étude exploratoire a été menée Saied dardour et al. [97] afin d'évaluer le coût de la chaleur fournie par un réacteur à eau sous pression (PWR) aux procédés de dessalement thermique (MED). Il a été constaté que l'augmentation du montant des dépenses thermiques a un impact limité sur l'économie de la production d'électricité.

Dans une autre étude Emmanuel Priego et al. [98] ontréalisé une étude sur le dessalement nucléaire utilisant le réacteur SMART couplé à deux procédés de dessalement thermique, la distillation multi-effets (MED) et multi-flash (MSF). L'étude est réalisée à l'aide d'analyses exergétiques et thermo-économiques. Dans les deux cas, les analyses ont été effectuées pour gagner des ratios (GOR) de 5, 10 et 15. Les résultats indiquent que la compétitivité économique et la faisabilité du dessalement nucléaire utilisant la ligne de vapeur principale du réacteur. De plus, la plus grande quantité d'eau pour chaque position d'extraction dans les procédés MED et MSF est également produite par le rapport de gain de 15. Les résultats montrent une compétitivité économique et la faisabilité du dessalement nucléaire en utilisant la ligne de vapeur principale du réacteur. Et le dessalement par MSF est moins cher de cout de production d'eau que MED.

Selon Salah Ud-Din Khan [99], l'analyse technique de la centrale nucléaire de Karachi (KANUPP) en termes de diverses techniques de dessalement est étudiée et discutée. Au cours de la première phase de recherche, une contingence de recherche initiale sur les technologies de dessalement déjà en cours dans KANUPP est discutée et évaluée pour une évaluation économique. Dans la phase suivante, le modèle de simulation de l'AIEA (DEEP&DE-TOP) a été utilisé pour calculer différentes techniques de dessalement, notamment RO, MSF, MED et également une approche de couplage, c'est-à-dire RO+MED et R0+MSF. Le calcul montre que le coût de l'eau pour chaque technologie couplée à des tendances variables. L'objectif de la recherche est de trouver le modèle techniquement et économiquement viable pour le système de dessalement couplé à un réacteur nucléaire.

I.4.4. Conclusion

Comme montré dans ce chapitre, le nombre de travaux publiés dans les domaines étudiés est faible.

Premièrement, le dessalement par distillation à multiples effets. Presque tous les modèles discutés en régime permanent ont permis de réaliser des analyses paramétriques approfondies des installations MED, principalement afin d'étudier les configurations optimales, notamment concernant la position et l'importance du thermo-compresseur et des réchauffeurs d'appoint. En faisant varier les propriétés thermodynamiques et les débits des variables d'entrée, les travaux ont mis en évidence les conséquences sur les performances globales de l'installation.

Deuxièmement, en ce qui concerne le domaine du dessalement nucléaire, les travaux publiés dans ce domaine ont été divisés en trois, la plupart d'entre eux portant sur le coût. Quant au reste des travaux, il s'est concentré sur la modélisation et l'importance de la performance et l'analyse exergétique basées sur la deuxième loi de la thermodynamique, en tenant compte des améliorations économiques.

Après l'analyse de ces derniers travaux, nous avons ainsi pu constater l'importance de développer un modèle plus complet d'un système de cogénération (PWR-ME-TVC-MED), prenant en compte la majeure partie des phénomènes régissant le comportement des installations PWR et MED-TVC, ceci passant notamment par une approche plus rigoureuse pour décrire l'interconnexion entre eux. En effet, tout le processus dépend sur le transfert de la vapeur et de la saumure dans tous les composants, en constituant ainsi un élément primordial du procédé. De plus, la majeure partie des modèles (MED-TVC) comportent des hypothèses très simplificatrices ou ne concernent qu'une installation MED particulière. Plusieurs modèles ne sont pas transposables du fait de la présence de températures fixées ou bien de l'utilisation de données réelles ou encore applicables à une installation donnée. C'est pour résoudre ces différents problèmes que nous avons développé un nouveau modèle plus générique qui sera présenté dans les chapitres deux et trois.

CHAPITRE II

Technique de dessalement par multiple effet MED-TVC

II.1. Introduction

Parmi les technologies de dessalement actuellement disponibles, la distillation multiples effets(MED) représente l'une des technologies futures les plus prometteuses dans les systèmes de dessalement, par rapport aux autres systèmes de dessalement bien établis tels que l'osmose inverse (RO) et le flash multi-étages (MSF). C'est en raison de son efficacité, as facilité d'utilisation et d'entretien et sa faisabilité économique. D'après l'étude de l'état de l'art présentée dans le troisième chapitre de cette thèse, le procédé de dessalement par évaporation à effet multiple couplé à compression thermique de vapeur (MED-TVC) a suscité beaucoup d'intérêt à travers le monde entier. Cela en vue de son développement et pour le rendre compétitif par rapport aux autres procédés au point de vue technique, économique et environnemental. A cet égard, l'objectif est de développer cette application de dessalement thermique pour augmenter son efficacité et rendement, et aussi proposer d'avantages autres possibilités d'amélioration des performances de ce procédé.

Nous allons présenter dans ce chapitre le design, le principe de fonctionnement, les composants, les avantages et les inconvénients, les différentes configurations et combinaison de MED avec différentes pompes à chaleur en tenant par des évaporateurs et du réseau d'échangeur de chaleur.

II.2. Principe de fonctionnement de MED

Le principe de fonctionnement de la distillation à multiple effet (MED) est présenté sur la Figure (II..1). Un fluide caloporteur alimente un serpentin dans une enceinte fermée pour porter à ébullition une partie de l'eau de mer avec des températures variant généralement entre 65 et 90°C. Les vapeurs formées sont condensées en contact avec un serpentin parcouru par l'eau de mer et le distillat est recueilli dans un réceptacle. Une partie de l'eau de mer préchauffée sort sous forme de saumure. La vaporisation sur un espace d'échange est appelée « effet ». La vapeur formée dans le premier effet est transférée au deuxième effet en tant que source d'énergie. La chaleur libérée par condensation sert à évaporer l'eau de mer arrivant dans le second effet. De même, le troisième évaporateur joue le rôle de condenseur pour le second. Si l'on considère une distillation à n effet, le processus est répété n-1 fois. Les pressions et les températures diminuent progressivement du premier effet au dernier effet. Les faibles températures de fonctionnement du MED sont un avantage

car elles permettent une faible consommation d'énergie et minimisent le risque de corrosion. Le nombre total d'effets disponibles dans un système MED est conçu en fonction de la différence de température disponible entre la température supérieure de la saumure et la température de condensation finale [5,8].

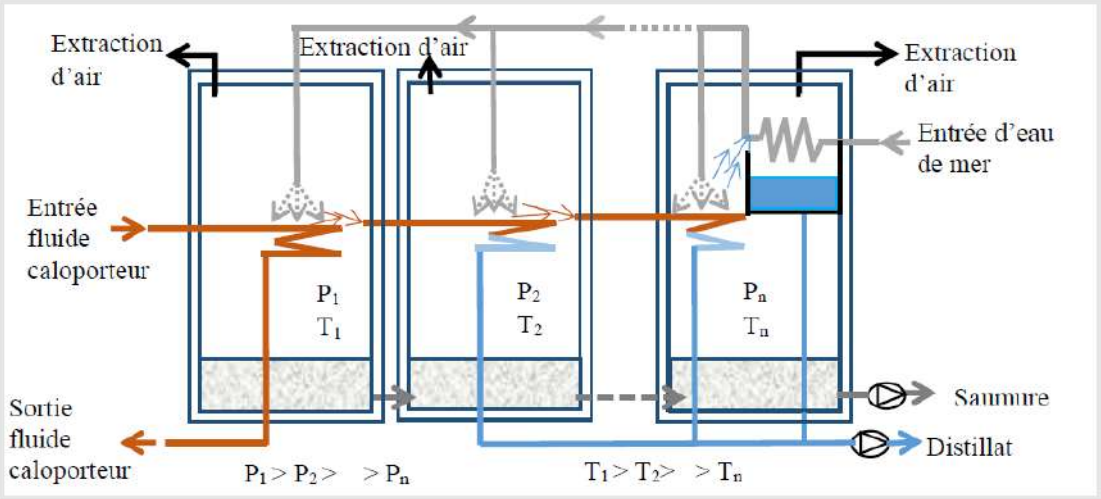


Figure (II.1) Schéma de principe de fonctionnement multiple effets (MED) [8]

II.3. Différentes configurations du système de dessalement MED

Dans la littérature, Il existe trois méthodes pour classer le processus MED. Le critère principal dépend du mode d'alimentation du système en eau de mer. À cela s'ajoutent des différences de qualification plutôt optionnelles, telles que la disposition des tubes de l'évaporateur, l'existence d'un système de préchauffage ou non entre les effets. On note également la présence d'une boite de flash à la sortie du condensat au niveau de chaque effet. Ces différentes de dispositions influencent principalement les critères de performance (production spécifique, surface d'échange spécifique) qui peuvent être retenus lors d'une analyse du système global.

Il existe généralement quatre configurations de distillation à effet multiple avec des objectifs spécifiques pour chaque type. Les différences entre les configurations résident particulièrement dans le mode d'alimentation du système en eau de mer. L'approvisionnement en énergie est aussi un aspect de différenciation [6]. Parmi les configurations possibles, on a :

- Une alimentation de type suiveur.

- Une alimentation en arrière.
- Une alimentation parallèle simple.
- Une alimentation parallèle croisée.

II.3.1. L'alimentation type suiveur

La figure (II.2) représente le type d'alimentation suiveur. La numérotation des effets d'un MED est basée sur la pression, le premier effet est celui avec la pression la plus élevée et le dernier est celui avec la pression la plus faible. Dans un tel système, le premier effet reçoit de l'eau de mer et de l'énergie externe pour permettre l'évaporation. La saumure et la vapeur obtenues aux sorties de cet effet alimentent en eau et en énergie l'effet qui suit. Cette procédure se poursuit tout au long des différents effets qui composent le système de dessalement. Il n'existe qu'une seule entrée pour l'eau de mer, à savoir celle au premier effet. La vapeur et l'eau salée circulent dans le même sens durant le processus de dessalement et le distillat est recueilli au niveau de chaque effet [6].

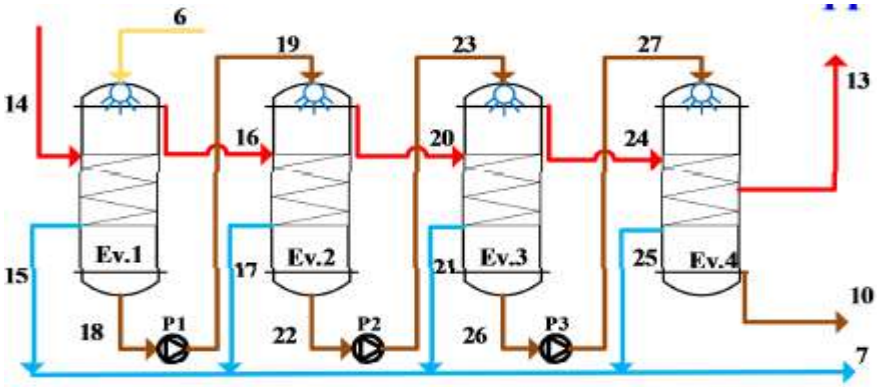


Figure (II.2) Schéma de principe de fonctionnement de type suiveur [100].

II.3.2. L'alimentation en arrière

Cette configuration est caractérisée par l'alimentation du dernier effet en eau de mer alors que, l'énergie (la vapeur) est fournie au premier effet. La figure (II.3) représente le principe de fonctionnement de l'alimentation en arrière, qui est le même que dans le suiveur. Par contre, l'eau de mer circule du dernier effet vers le premier tandis que, la vapeur circule en sens inverse (du premier effet vers le dernier) [6].

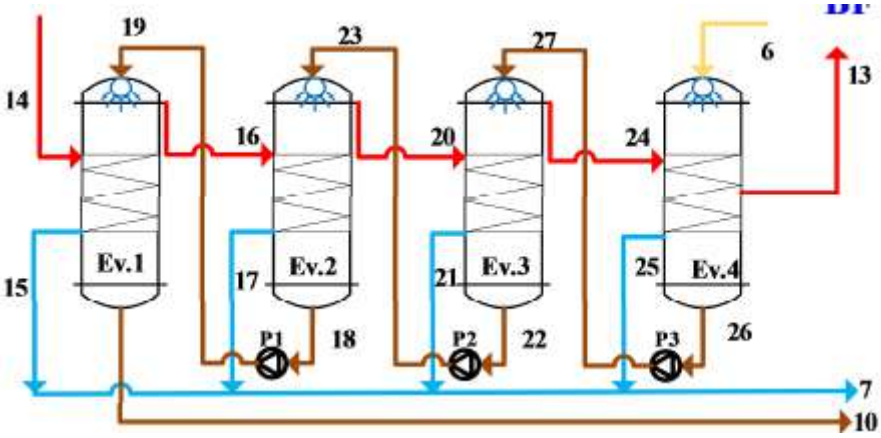


Figure (II.3) Schéma de principe de fonctionnement de type arrière [100].

II.3.3.L'alimentation parallèle

La figure (II.4) représente l'alimentation parallèle. Les effets sont alimentés simultanément en eau de mer alors que l'énergie est fournie au premier effet. La vapeur à la sortie de celui-ci sert de source d'énergie pour l'effet suivant. Le procédé est répété tout au long des effets du système entier. Dans cette configuration, le distillat et la saumure sont récupérés à la sortie de chaque effet. Les entrées de l'eau de mer sont égales aux nombres d'effets qui constituent le système [6].

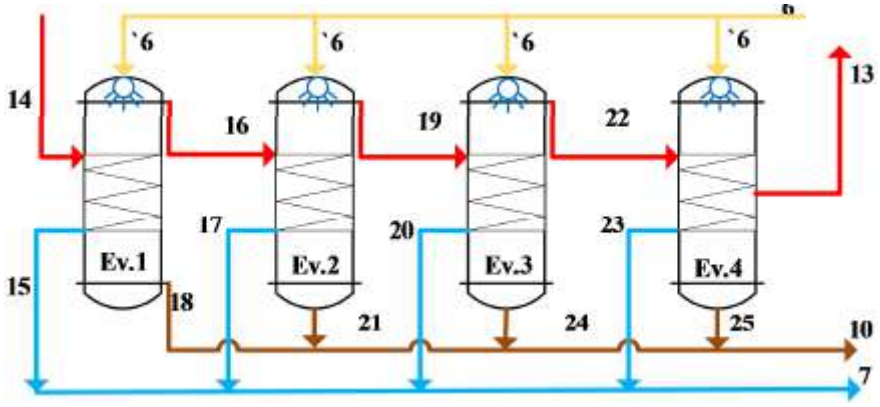


Figure (II.4) Schéma de principe de fonctionnement de type parallèle [100].

II.3.1.4.L'alimentation parallèle croisée

La figure (II.4) représente l'alimentation parallèle croisée. Son principe de fonctionnement est similaire à celui du système à alimentation parallèle simple. La différence réside dans le devenir de la saumure à la sortie de chaque effet. Dans cette configuration, au lieu de récupérer la saumure à la sortie, elle est plutôt utilisée par l'effet suivant. Hormis le

premier effet, chaque effet possède deux entrées d'eau salée : l'alimentation principale et la saumure de l'effet qui précède [6].

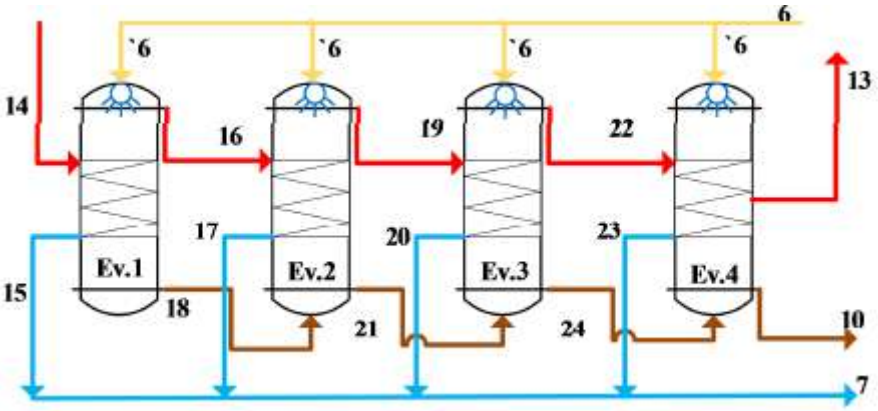


Figure (II.5) Schéma de principe de fonctionnement de type parallèle croisée [100].

II.4. Combinaison de MED avec différentes pompes à chaleur

II.4.1. MED combiné avec pompe à chaleur à adsorption (MED-ADS)

En général, l'application de la pompe à chaleur à adsorption se trouve dans la climatisation et la fabrication de glace. Le processus MED-ADS est schématisé sur la figure (II.6). Le système se compose d'un évaporateur, un condenseur, deux lits d'adsorption et deux échangeurs de chaleur. Un tel système n'a pas été réalisé à l'échelle commerciale.

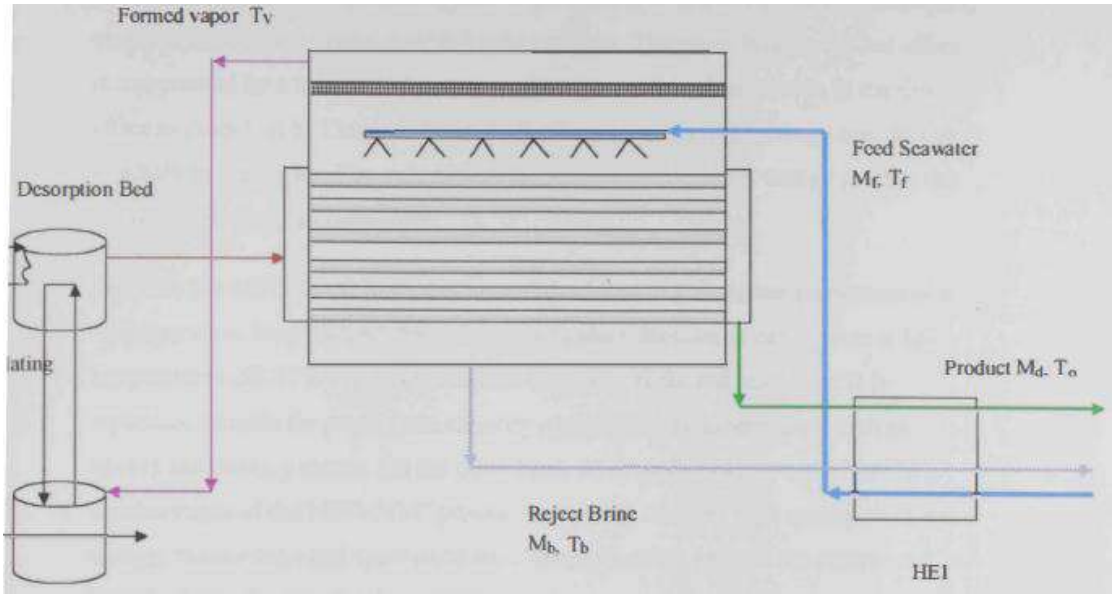


Figure (II.6) Schéma de principe de fonctionnement MED-ADS [101].

II.4.2. MED combiné avec pompe à chaleur à absorption (MED-ABS)

Les pompes à chaleur à absorption sont couramment utilisées pour la climatisation et comme système d'économie d'énergie dans l'industrie chimique. Le processus MED-ABS est schématisé sur la figure (II.7). Ce système comprend quatre composants principaux, à savoir le générateur, l'absorbeur, l'évaporateur et le condenseur. Il n'a pas été réalisé dans l'industrie du dessalement.

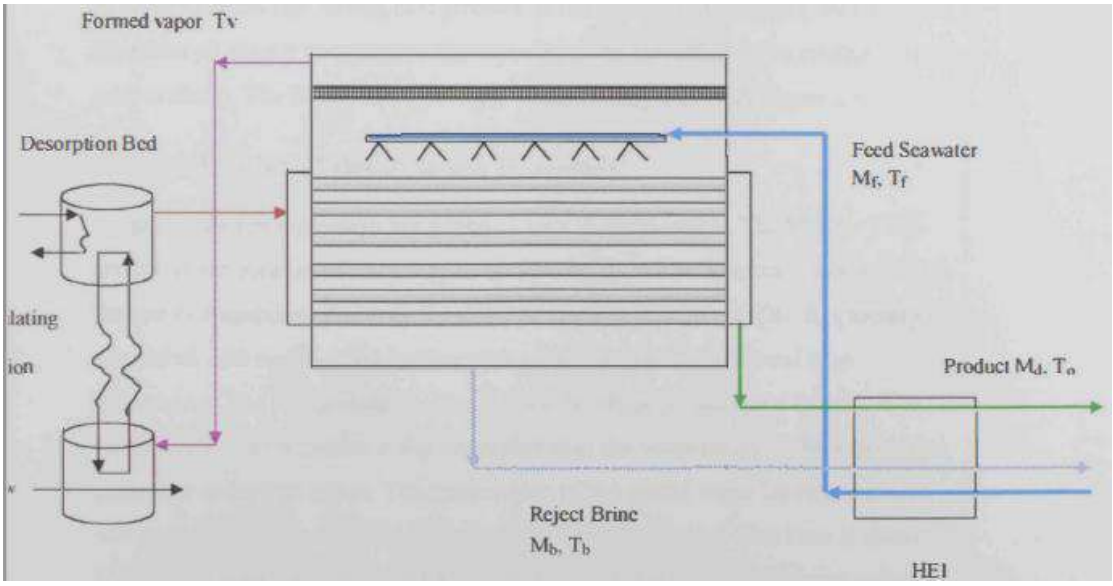


Figure (II.7) Schéma de principe de fonctionnement MED-ABS [101]

II.4.3. MED combiné avec un compresseur de vapeur mécanique (MED - MVC)

Le processus MED-MVC simple est illustré dans la figure (II.8). Le système MVC est compact, confiné et ne nécessite pas de système de chauffage supplémentaire. La vapeur sortant du dernier effet est comprimé par un compresseur mécanique et est utilisée comme source de chaleur dans le premier effet comme décrit par Darwish et al [29]. Ce processus n'a pas besoin d'une source de chaleur ou d'un condenseur de fond. La seule énergie requise est l'énergie électrique nécessaire au fonctionnement du moteur pour le compresseur.

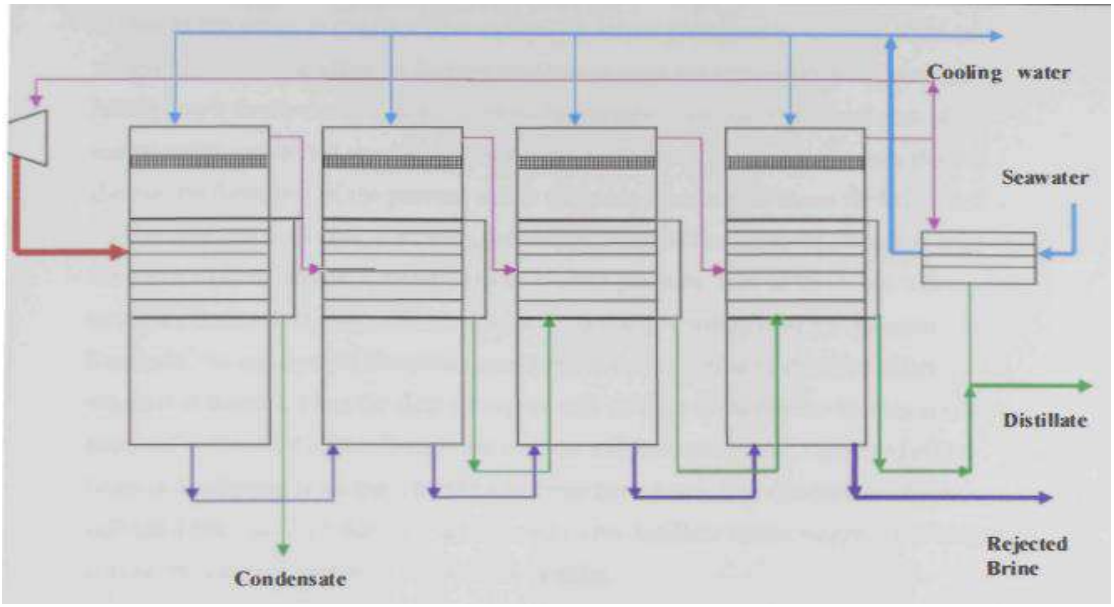


Figure (II.8) Schéma de principe de fonctionnement MED-MVC [101]

Le MED-MVC présente certainement de nombreux avantages, notamment un coût d'investissement modéré, une utilisation facile, une longue durée de vie et un produit de haute pureté. De plus, il peut fonctionner à basse température (50-70 ° C) sans problèmes causés par le tartre et la corrosion. Il est notamment adapté aux applications de petite capacité dans les zones reculées telles que les îles et les camps militaires. Sur l'autre bande, Al Juwayhel [14] a signalé que les inconvénients du procédé MED-MVC incluent la nécessité d'une énergie électrique de haute qualité, la maintenance et l'exigence de pièces de rechange, les pièces mobiles du compresseur et d'une grande zone de transfert de chaleur pour l'unité d'évaporateur.

II.4.4. MED combiné avec un compresseur à vapeur thermique (MED - TVC)

Afin d'éviter le problème de la partie mobile dans le procédé MED-MVC, nous introduisons un éjecteur à jet de vapeur pour (thermo-compresseur) comprimé la vapeur du dernier effet en utilisant de la vapeur motrice à moyenne pression. Le système MED-TVC est schématisé sur la figure (II. 9).

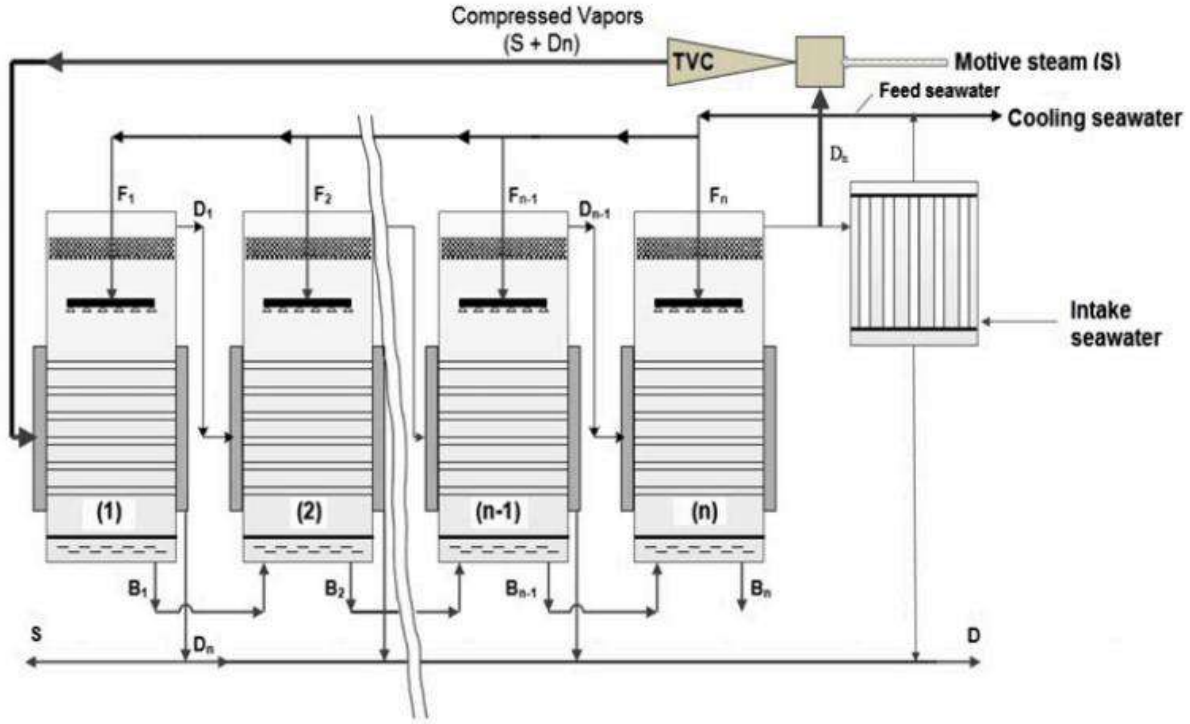


Figure (II.9) Schéma de principe de fonctionnement MED-TVC

II.5. MED-TVC Processus de dessalement

La compression thermique de vapeur a une longue histoire dans le dessalement. Les procédés MED-TVC sont considérés comme une bonne alternative pour le dessalement de l'eau en raison de la faible consommation d'énergie pour les usines de petite ou moyenne échelle. Elle est généralement associée à une ébullition multiple effet avec des évaporateurs à tubes verticaux ou horizontaux. Le processus de compression augmente la pression de vapeur et sa température de saturation à une température légèrement supérieure à la température de la vapeur à générer dans le premier effet. La composition de la vapeur mélangée sortant de l'éjecteur sera en partie de la vapeur motrice et de la vapeur entraînée à basse pression. Ce rapport est d'environ 0,5 si de la vapeur motrice à pression modérée est utilisée dans l'éjecteur de vapeur car une grande différence de pression entre la vapeur aspirée et le mélange comprimé est nécessaire. Par contre, environ 0,3 vapeur motrice haute pression sera nécessaire dans l'éjecteur dans le cas où la différence de pression est faible [101].

La combinaison de MED et de TVC donne une plus grande productivité de l'eau par unité de surface de transfert de chaleur tout en conservant un rapport de performance élevé. Cela se traduira par des économies sur les coûts d'investissement et d'exploitation de l'usine.

Par exemple, un procédé MED-TVC à quatre effets avec une capacité de 15 000 m3 / j a été rapporté donnant un rapport de performance d'environ 6 qui est 70% plus élevé que celui normalement obtenu à partir d'un système de dessalement par ébullition conventionnel à quatre effets [101].

De plus, une usine de dessalement multiple effets conventionnelle avec 7 ou 8 effets aura un rapport de performance inférieur à 7. L'utilisation de la thermocompression augmentera le rapport de performance à 11 voire plus. La capacité de l'installation peut être augmentée de 20% par rapport à la MED normal si la température maximale de la saumure est de 70 ° C. Al Juwayhel a déclaré que le rapport de performance élevé avec peu d'effets est l'avantage le plus important du processus MED-TVC [14]. Les autres avantages incluent une bonne flexibilité pour la variation de charge, une maintenance minimale et un stockage réduit de pièces de rechange en raison de l'absence de pièces mobiles, et une bonne économie de construction, et de prise d'eau de mer qui peut entraîner une réduction des coûts de 35% inférieure à celle des usines MSF [102].

II.5.1. Description du procédé de dessalement MED – TVC

Le système de compression thermique de vapeur à effets multiple (MED-TVC) est illustré à la figure (II.9). En général, le schéma de principe comprend 4 évaporateurs à film flottant horizontal (évaporateur). Dans le cas d'une installation à quadruple effet, l'alimentation en eau de mer est d'abord préchauffée dans le condenseur et dans un refroidisseur à distillat. Cependant, une partie de la charge est rejetée comme eau de refroidissement et la partie restante est divisée en quatre flux égaux, qui seront acheminés à la tête de chaque évaporateur. La vapeur de la chaudière est transmise à l'éjecteur de vapeur afin d'agir comme vapeur motrice pour aspirer des parties de la vapeur générée dans le quatrième effet. Le mélange de vapeur motrice et de vapeur aspirée est ensuite comprimé dans la section diffuseur de l'éjecteur à une pression correspondant à la température de saturation requise dans le caisson de vapeur du premier évaporateur. La vapeur mélangée sortant du thermo-compresseur peut ainsi être utilisée comme milieu de chauffage dans le premier évaporateur.

En raison du gradient de pression dans l'installation, la vapeur générée dans le premier effet est transmise au second effet en tant que milieu chauffant pour élever la température de l'eau tombant dans les tubes horizontaux jusqu'à sa température d'ébullition et en faire

bouillir une partie et générer une vapeur qui peut être utilisée dans le troisième effet et ainsi de suite. Pour augmenter les performances thermiques du processus et en même temps pour refroidir la saumure qui sera rejetée dans la mer, la saumure non évaporée dans le premier effet est transférée au second effet, qui est maintenu à une pression plus basse. Une partie de cette saumure va donc s'évaporer pour ramener sa pression à celle régnant dans l'évaporateur. De même, le condensat du deuxième effet est transféré au troisième effet où il est flashé. Ensuite, les vapeurs flashées seront utilisées dans le cadre du milieu de chauffage requis dans le troisième effet. Les deux flux de saumure seront transférés au troisième effet. La saumure est déchargée du dernier effet sous forme de purge de saumure. Le flux de condensat collecté sous les quatre effets est transféré vers le refroidisseur de distillat où il échange une partie de sa chaleur sensible avec la prise d'eau de mer.

II.5.2. Composants des procédés de dessalement MED-TVC

Le système MED-TVC se compose d'évaporateurs, d'échangeurs de chaleur, d'un condenseur et d'un éjecteur de vapeur (thermo-compresseur), comme illustré à la figure (II.9). Ces composants sont brièvement décrits ci-dessous :

- **Condenseur**

Le condenseur a trois fonctions comme indiqué par salem khalfan [101]. La première fonction est son utilisation comme dissipateur de chaleur pour éliminer la chaleur supplémentaire du système. Ceci est réalisé en préchauffant l'alimentation en eau de mer en utilisant la vapeur générée dans le dernier effet. La deuxième fonction est d'améliorer l'efficacité thermique du procédé. Un préchauffage partiel de l'alimentation en eau de mer en condensant une partie contrôlée de la vapeur formée par ébullition dans l'évaporateur, au lieu d'utiliser de la vapeur vive coûteuse, permettrait d'atteindre cet objectif. La troisième fonction est d'ajuster la température d'ébullition à l'intérieur des évaporateurs en créant un profil de pression dans toute l'installation. En fait, la conception du condenseur dépend de sa charge thermique, qui à son tour dépend de la quantité d'énergie thermique à évacuer du système.

- **Evaporateur**

Les évaporateurs utilisés dans le processus MED - TVC ne sont pas très différents des évaporateurs standards, qui se composent de la zone de transfert de chaleur, du tampon

antibuée et de l'espace vapeur. En principe, tout type d'évaporateur peut être utilisé dans le procédé MED-TVC. Cependant, le type d'évaporateur à tube horizontal à film tombant est fréquemment utilisé comme rapporté par Darwish et al [29]. Dans ce type d'évaporateurs, de la vapeur de chauffage ou de la vapeur circule à l'intérieur des tubes tandis que le flux d'alimentation est uniformément pulvérisé à l'extérieur de la rangée supérieure du faisceau de tubes où il tombe sous la forme d'un film mince le long des rangées tubes disposés. La chaleur latente de condensation de la vapeur ou de la vapeur de chauffage est utilisée pour élever la température de l'alimentation en eau de mer ou de la saumure à la température d'ébullition et évaporer une partie de l'eau liquide. De cette manière, la vapeur ainsi produite traverse le dévésiculeur pour éliminer les éventuelles gouttelettes salines entraînées avant d'être introduite dans l'évaporateur suivant. En effet, la conception de l'évaporateur dépend de la charge thermique requise et des débits d'eau et de vapeur de chauffage.

Généralement, il existe deux façons de lier les effets ensemble pour former une plante MED. L'agencement horizontal vient d'abord où les effets sont liés horizontalement et la seconde consiste à empiler tous les effets verticalement. Par conséquent, les plantes de pile à multiples effets peuvent être agencées de deux manières : une disposition simple MED dans laquelle les évaporateurs sont empilés sur le dessus de l'autre ou une configuration de pile double [101].

Il existe trois types de configurations de tubes d'évaporateur pour les processus MED, Elles reposent principalement sur la disposition des tubes d'échangeur de chaleur (évaporateurs) [101]:

- Arrangement de tubes horizontaux.
- Arrangement de tubes verticaux.
- Faisceaux de tubes empilés verticalement.

- **Éjecteurs à jet de vapeur :**

D'une manière générale, un éjecteur de jet est un dispositif de pompage de fluide dans lequel une fluide motrice haute pression réalise une fonction de pompage. Certes, de tels éjecteurs sont couramment utilisés, par exemple dans environ 90% de tous les processus chimiques et pétrochimiques où ils sont intégrés dans des processus de séparation tels que la

distillation sous vide, la filtration, les échangeurs de chaleur, les systèmes de vérification, les condenseurs et les réacteurs chimiques [6]. Du fait de la simplicité de conception et de l'absence de pièces mobiles, les éjecteurs à jet sont très fiables, ne nécessitent pratiquement aucun entretien et ont un coût d'isolation relativement faible. Ils sont également moins coûteux à exploiter que les compresseurs mécaniques [5,6].

Les éjecteurs à jet de vapeur sont également utilisés comme pompes à chaleur dans les usines de dessalement modernes MED-TVC. Ce type d'éjecteur est une buse convergente-divergente utilisée pour augmenter la pression de la vapeur aspirée de tout effet dans la cascade de l'installation et comme moyen de chauffage dans le premier effet. Un éjecteur à jet de vapeur typique se compose d'une chambre de mélange, d'une buse et d'une section de diffuseur, comme le montre la figure (II.16).Il peut être utilisé soit pour augmenter la pression de la vapeur entraînée, soit pour évacuer des gaz non condensables d'un récipient tel que des évaporateurs, des condenseurs et des échangeurs de chaleur [6].

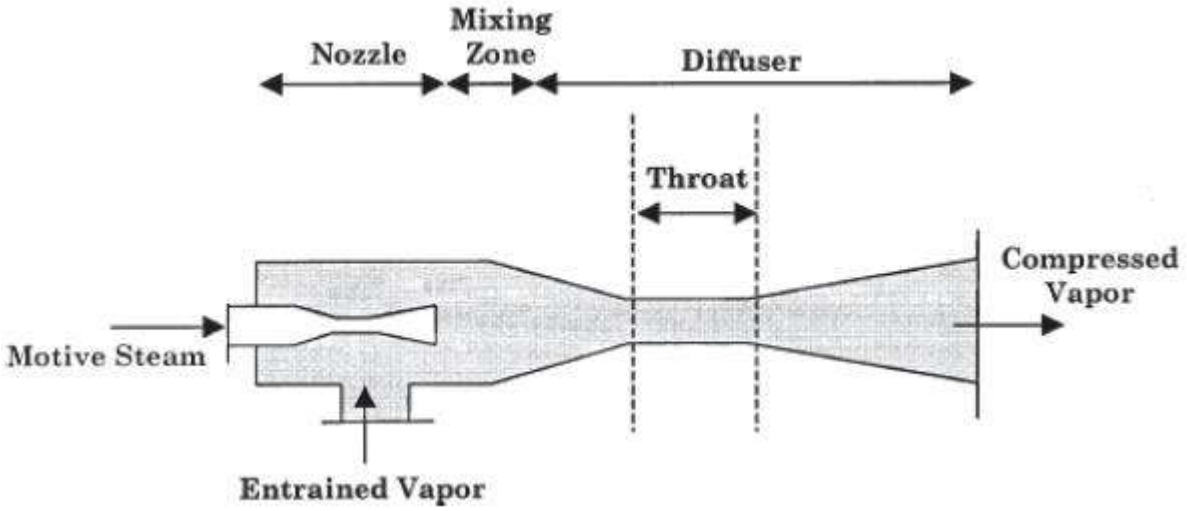


Figure (II.10) Schéma d'un thermo-compresseur de vapeur [6].

II.6.Avantages et inconvénients du multiple effet

Parmi les avantages de l'effet multiple, il y'a la souplesse de fonctionnement avec une production qui varie généralement de 15 à 100 % du régime nominal. La pureté de l'eau potable obtenue est inférieure à 30 ppm (parties par millions). Il faut également noter que la consommation énergétique d'un tel procédé est indépendante de la salinité et requiert

généralement un service minimum lors de son fonctionnement. Un court temps de démarrage pour le chauffage et les faibles températures de fonctionnement (60 à 70 °C) rendent ce système très intéressant sur le plan énergétique. En outre, il peut être construit à partir de matériaux économiques et durables tels que l'alliage d'aluminium pour les tubes de transfert de chaleur et une tuyauterie en plastique [6].

Parmi les inconvénients, le système a une durée de construction assez longue. Son implantation dépend de l'énergie thermique disponible et son rapport de production ou quantité d'eau obtenue par unité d'énergie consommée est faible. Il est généralement compris entre 30 et 40 %. Le système est encombrant et également exposé aux problèmes d'encrassement [6].

CHAPITRE III

Procédé de nucléaire par réacteur à eau sous pression (PWR)

Chapitre. III. Procédé nucléaire par réacteur à eau sous pression (PWR)

III.1. Introduction

Aujourd'hui, l'utilisation de l'énergie nucléaire pour des applications non énergétiques telles que le dessalement, la production d'hydrogène, le chauffage et le refroidissement urbains, de même que pour plusieurs applications industrielles grandes consommatrices d'énergie, suscitent un intérêt croissant. Ces applications peuvent compenser une grande partie des coûts de la production d'énergie d'origine nucléaire.

Parmi les réacteurs nucléaires les plus répandus et les plus utilisés le réacteur à eau sous pression (PWR), qui représente 82 % des réacteurs utilisés dans le monde. Les PWR sont particulièrement adaptés à ce type d'applications, regroupées sous le concept de « cogénération » [13].

La mise en œuvre d'un réacteur nucléaire à eau sous pression fait appel à de nombreux domaines scientifiques et technologiques tels que la physique nucléaire, la neutronique, la mécanique des fluides, la thermodynamique, la chimie, la mécanique, la radioprotection, l'électronique et bien d'autres. Nous avons essayé d'aborder dans ce chapitre, à travers une description générale des PWR, certains concepts tels que le principe de fonctionnement, le design, les composants, et les circuits de l'eau (primaire et secondaire...etc.) des technologies d'un réacteur à eau sous pression (PWR).

III.2. Principe de fonctionnement

Le Réacteur à eau sous pression (PWR) est une technologie de réacteur nucléaire, également appelé de deuxième génération. C'est le type de réacteur nucléaire le plus fréquent dans le monde. Le combustible nucléaire est constitué d'oxyde d'uranium enrichi. La proportion d'uranium 235 fissile est de l'ordre de 4 % par rapport à l'uranium 238. Il est également possible d'utiliser du combustible "MOX" (mélange d'oxydes d'uranium et de plutonium). Le combustible se présente sous la forme de pastilles empilées dans des gaines en alliage de Zirconium chargées de confiner les produits de fission et ainsi d'éviter leur dissémination dans l'eau du circuit primaire. Les crayons combustibles ainsi formés sont agencés sous forme d'assemblages dont la tenue mécanique est assurée par des grilles. Selon les modèles de PWR, on charge entre 120 et 250 assemblages dans la cuve du réacteur [10].

Son architecture est principalement caractérisée par la présence de deux circuits de refroidissement : le circuit primaire, dans lequel circule le fluide de refroidissement du cœur et le circuit secondaire, qui sert à la production de vapeur et à la production d'énergie mécanique pour la turbine. Le cycle thermodynamique d'un PWR est le cycle de Rankine. La figure (III.1) présente le principe de fonctionnement du réacteur PWR [12].

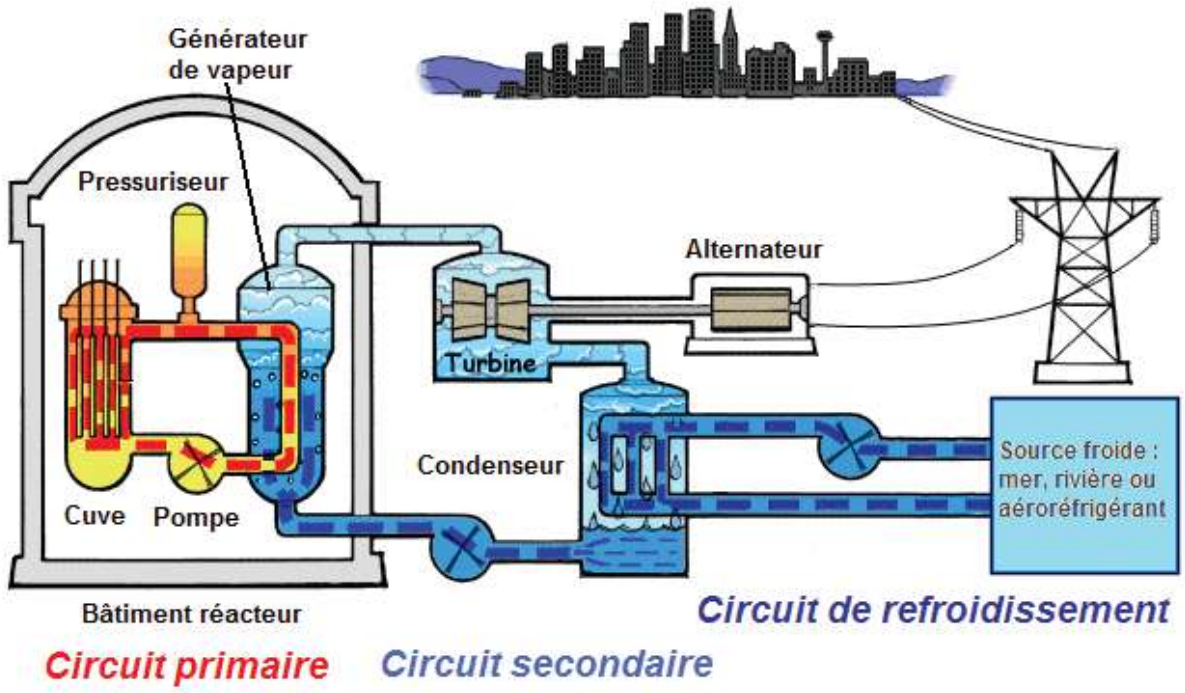


Figure (III.1) Schéma de principe de fonctionnement d'un PWR [12]

Le caloporteur est de l'eau ordinaire (légère) sous pression. L'eau agit également comme un modérateur car elle a la capacité de ralentir les neutrons rapides à une vitesse appropriée pour la fission [12]. Elle constitue en effet un bon réfrigérant universellement utilisé dans l'industrie. La chaleur centrale produite par les réactions de fission est extraite et transportée par le fluide primaire circulant en permanence. Maintenu dans un circuit fermé sous pression, le fluide primaire transmet son énergie à un circuit d'eau secondaire via plusieurs échangeurs de chaleur et les générateurs de vapeur. Pour que ce transfert de chaleur soit efficace, l'eau du circuit primaire doit absolument être maintenue liquide à l'interface eau/ échangeur. Or, comme pour toute machine thermique convertissant une quantité de chaleur en énergie utile (ici mécanique puis électrique) basée sur le modèle de la machine de Carnot, la recherche d'un rendement énergétique optimal impose une source chaude de température la plus élevée possible. Un compromis a donc été trouvé entre les hautes températures

recherchées et les hautes pressions nécessaires pour le maintien de l'eau à l'état liquide soit une pression de 150-155 bars et une température comprise entre 280-290 et 320-330°C (figure selon le niveau de puissance produit par le réacteur [11].

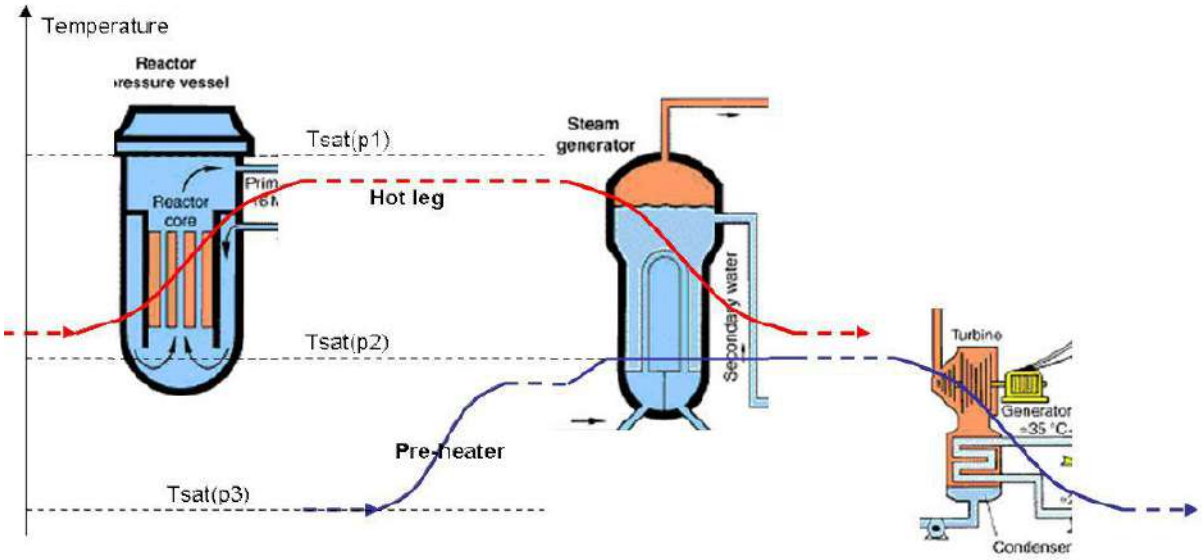


Figure (III.2) Variation de température dans les circuits PWR [12]

L'eau du circuit secondaire, n'étant pas sous pression, elle se vaporise et entraîne les turbines produisant l'électricité. Ensuite, cette eau passe par le condensateur, où, par refroidissement elle redevient liquide. Le circuit tertiaire ou circuit de refroidissement a pour objectif de condenser la vapeur. Ce peut être un circuit d'eau de rivière ou bien des tours de refroidissement. Cette eau sera en fin de chaîne énergétique, et se refroidie au contact de l'air circulant dans les aéroréfrigérants par le courant d'air qui monte dans la tour.

III.3. Présentation générale des circuits d'eau primaire

III.3.1. Le circuit primaire (RCP)

Le circuit primaire extrait la chaleur dégagée dans le cœur du réacteur par circulation d'eau sous pression dans les boucles de refroidissement (3 pour un réacteur de 900 MWe, 4 pour un réacteur de 1300 MWe ou 1450 MWe). Chaque boucle, raccordée à la cuve du réacteur, comprend un générateur de vapeur et une pompe de circulation dite pompe primaire. Sur l'une des boucles, un pressuriser contrôle la pression du circuit primaire et contribue au maintien de la masse d'eau du fluide primaire. L'eau pressurisée du circuit primaire véhicule

la chaleur produite dans le cœur du réacteur et la transfère (via les branches chaudes des boucles) à l'eau du circuit secondaire dans les générateurs de vapeur. Elle est ensuite reprise par les pompes primaires (via les branches en U à cause de leur forme) qui la renvoient par l'intermédiaire des branches froides des boucles dans le cœur du réacteur. La figure (III.3) représente le circuit primaire d'un réacteur PWR [11].

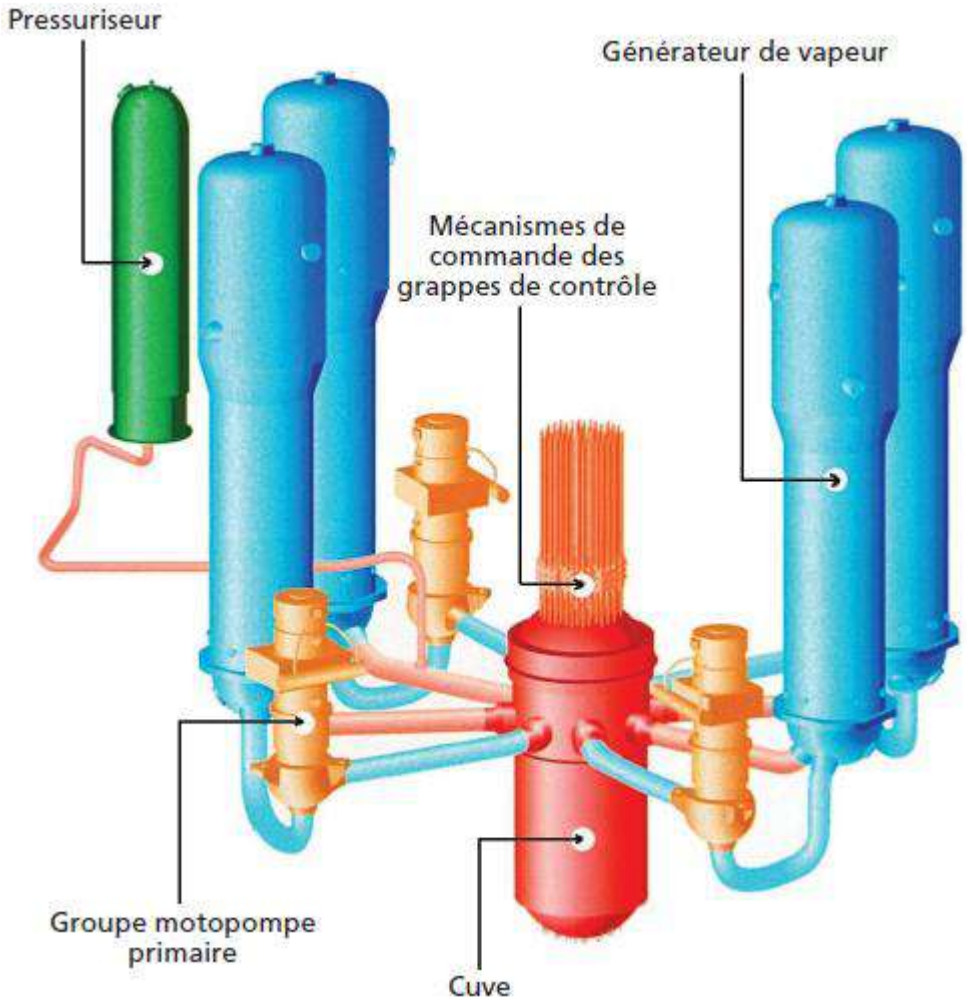


Figure (III.3) Le circuit primaire d'un réacteur PWR [15]

III.3.1.1. Le cœur

Le combustible nucléaire généralement adopté dans les PWR est l'oxyde d'uranium (UO2) enrichi en uranium 235. On utilise également sur une partie du parc français et jusqu'à 30% du cœur, un mélange d'oxyde d'uranium appauvri et de plutonium appelé MOX (Mixed Oxide). L'oxyde d'uranium (IV) présente les avantages, d'une température de fusion très élevée et d'une bonne résistance à l'irradiation et à l'action de l'eau mais possède

l'inconvénient d'une faible conductivité thermique. Il se présente sous forme de pastilles de 8 mm de diamètre, empilées dans une gaine ou crayon de Zircaloy 4 de diamètre extérieur 9,5 mm sur une longueur d'environ 4 mètres. Le zirconium qui constitue l'élément principal de cet alliage a été choisi pour sa faible section efficace de capture neutronique et sa bonne tenue à la corrosion en milieu primaire. Ces crayons combustibles, réputés étanches, constituent la 1ère barrière de confinement entre les produits de fission et l'environnement. Ils sont regroupés en assemblages combustibles carrés de 17x17 emplacements (264 crayons, 24 tubes guides et un tube d'instrumentation) de 21 cm de côté et de 4 m de longueur hors tout (figure (III.4)). On dénombre 157 assemblages dans un cœur d'un réacteur 900 MWe (soit 72,5 tonnes d'uranium) et 193 pour un réacteur 1300 MWe (soit 103,9 tonnes d'uranium). Les surfaces développées de Zircaloy en contact avec le fluide primaire sont respectivement d'environ 5000 m2 et 7200 m2 pour le palier 900 MWe et 1300 MWe. L'ensemble constitue une forme géométrique compacte ortho-cylindrique, dont le but principal est de minimiser les fuites en neutrons [11].

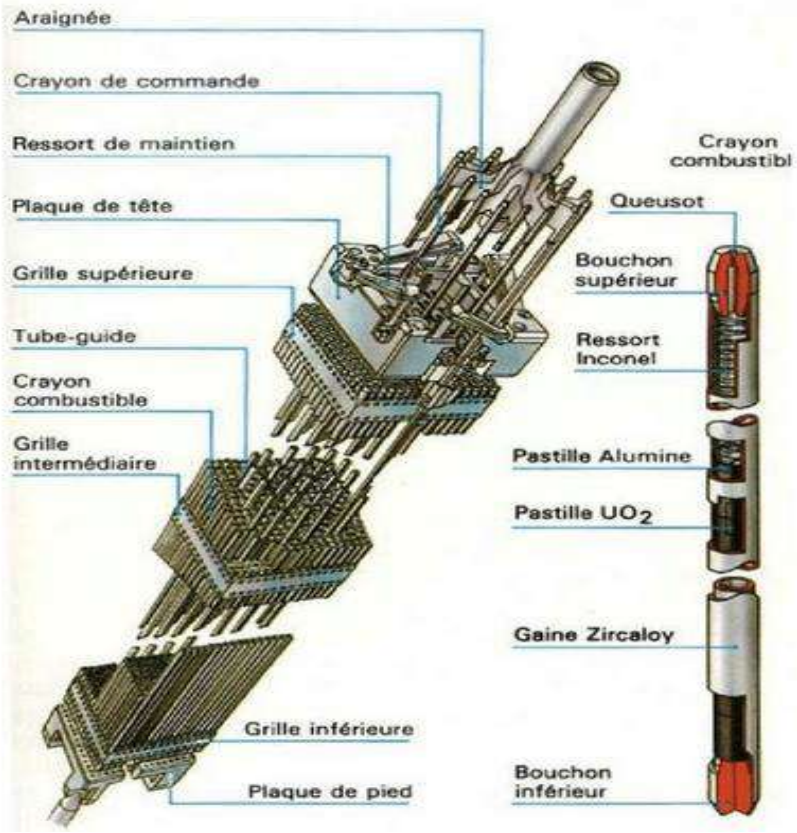
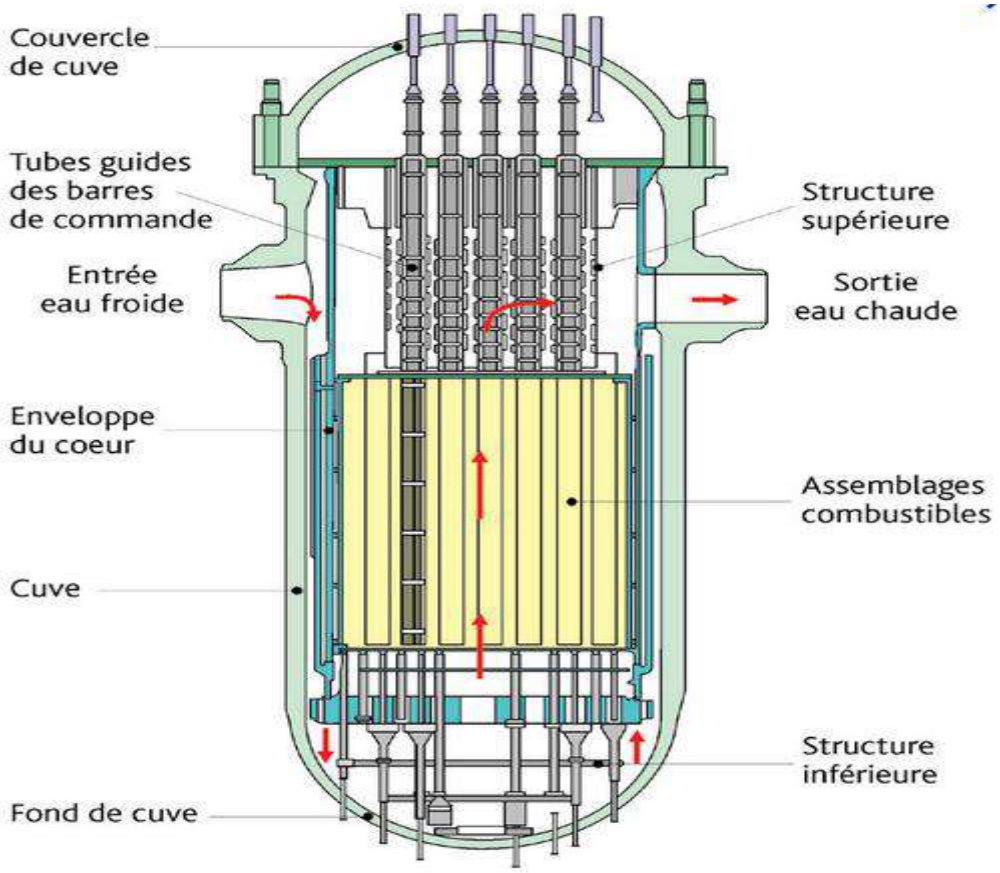


Figure (III.4) Représentation d'un assemblage combustible et d'un crayon [15]

III.3.1.2. La cuve

L'ensemble des assemblages combustibles, des internes de cuves et des barres de contrôle est installé dans une cuve cylindrique recouverte d'acier inoxydable d'une épaisseur de 22 cm, d'un diamètre intérieur de 4 m et d'une hauteur totale de 13 m. Il est fermé en sa partie inférieure par un fond hémisphérique et en sa partie supérieure par un couvercle amovible équipé de traversées étanches permettant le mouvement des grappes de commande. L'ensemble cuve et couvercle pèse environ 330 tonnes (Figure (III.5)) [11].



Figure(III.5) La cuve de réacteur à eau sous pression [15]

Lorsque le réacteur est en fonctionnement, l'eau issue des branches froides pénètre dans la cuve à 286°C, puis guidée par des équipements internes, descend le long de la paroi et remonte entre les crayons combustibles pour ressortir à 323°C au niveau des branches chaudes [11].

Au moment des arrêts pour rechargement du combustible (lorsque le réacteur est en état dit d'arrêt à froid), on procède au remplissage de la piscine qui se trouve au-dessus de la

cuve simultanément au retrait de son couvercle. Une épaisseur d'eau de plusieurs mètres permet la manutention des assemblages combustibles (l'eau assurant un écran biologique contre les rayonnements dont l'efficacité dépend entre autres de l'épaisseur du matelas d'eau).

III.3.1.3. Le pressuriseur

Ce dispositif unique placé en point haut sur la branche chaude d'une boucle est destiné à maintenir le fluide primaire à l'état liquide grâce à la production d'un matelas de vapeur d'eau en équilibre avec la phase liquide. Le déplacement de l'équilibre thermodynamique au moyen d'un système de chaufferettes électriques (chauffage) et d'une aspersion (refroidissement) permet de contrôler finement la pression autour de la valeur visée de 150-155 bars [11].

III.3.1.4. Les générateurs de vapeur

Ces échangeurs de chaleur ont pour fonction de transférer la chaleur du circuit primaire vers le circuit secondaire. Ainsi de la vapeur est produite non pas dans le cœur (ce qui est le cas dans les réacteurs à eau bouillante, BWR) mais dans les générateurs de vapeur coté secondaire, sans qu'il y ait contact entre les deux fluides. Cette conception permet d'empêcher la dissémination de contamination radioactive et de préserver l'intégrité du circuit primaire qui constitue la 2ème barrière de confinement. Ce dispositif d'une hauteur d'environ 20 mètres est constitué d'un faisceau tubulaire de plusieurs milliers de tubes en forme de U (3300 tubes pour le palier 900 MWe et 5342 tubes pour le palier 1300 MWe). Ces tubes en alliage de nickel ont un diamètre interne de 1,6 cm et une longueur de 21 m dans le cas du palier 1300 MWe et 24 m pour le palier 900 MWe, ce qui représente une surface développée d'échange de 26000 m^2, soit la plus importante du circuit primaire [11].

Le fluide primaire pénètre à l'intérieur des tubes à 320-330°C, cède ses calories au fluide du circuit secondaire externe et ressort vers 280-290°C. La Figure (III.6) représente un générateur de vapeur de réacteur à eau sous pression PWR.

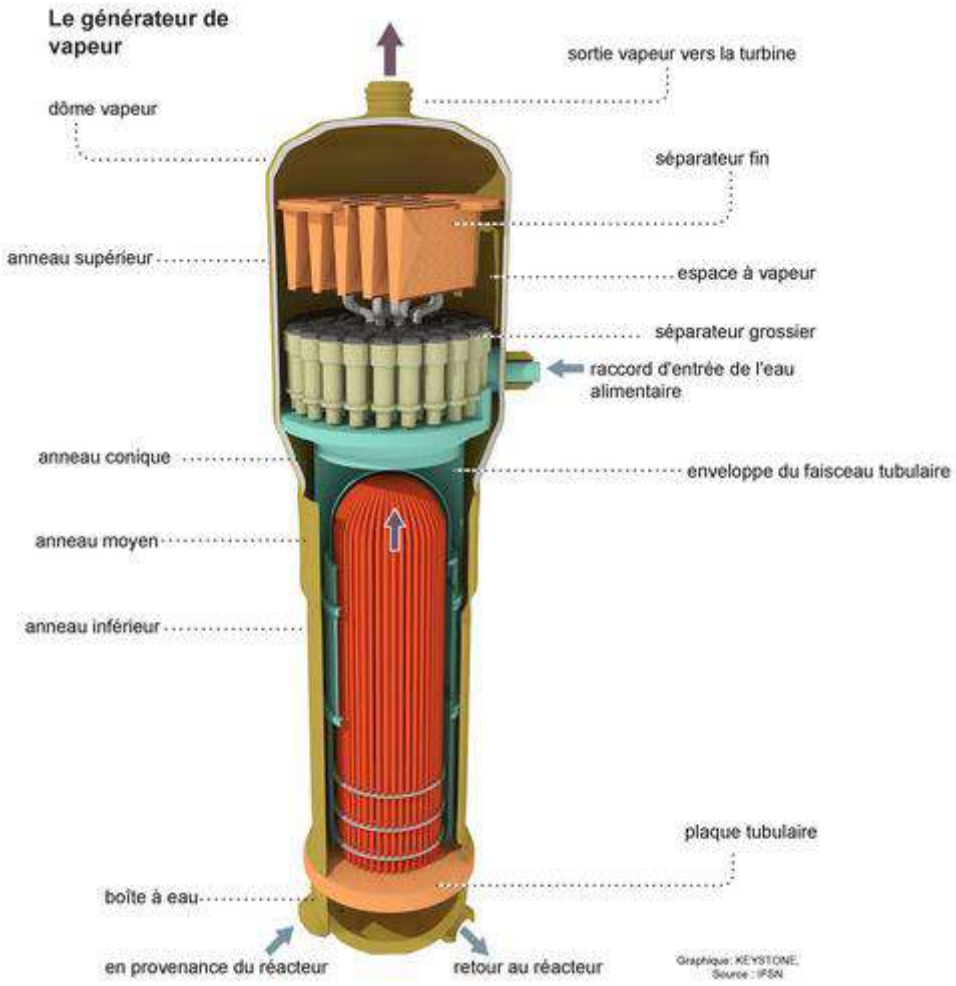


Figure (III.6) Générateur de vapeur de réacteur à eau sous pression PWR [15]

III.3.1.5. Les pompes primaires

Afin de limiter l'échauffement du fluide primaire à une quarantaine de degré entre l'entrée et la sortie du cœur et éviter d'atteindre la température critique d'ébullition (345°C à 155 bars) en sortie du cœur, le débit de circulation requis, dans le circuit primaire, doit être considérable de l'ordre de 20000 m^3 h^{-1} sur chaque boucle. De tels débits associés aux faisceaux tubulaires étroits des GV impliquent une perte de charge significative (environ 8bars) et justifient l'utilisation de pompes de forte puissance 6 MW aux dimensions considérables (8 mètres de haut et 90 tonnes), disposées sur les branches froides de chaque boucle [11].

III.3.1.6. L'enceinte de confinement

L'ensemble du circuit primaire et ses composants sont placés dans une enceinte étanche en béton (d'un diamètre de 50 m environ et d'une hauteur voisine de 60 m) dont l'objectif est d'assurer une 3ème barrière de confinement. Elle constitue l'enveloppe du bâtiment réacteur. Elle est conçue pour remplir deux fonctions principales : le confinement de produits radioactifs susceptibles d'être dispersés à l'intérieur de l'enceinte en situation accidentelle et la protection du réacteur vis à vis des agressions externes (chute d'un avion de tourisme par exemple). Elles sont de deux types, pour le palier 900 MWe l'enceinte est constituée d'une paroi externe de 90cm d'épaisseur en béton précontraint et d'une paroi interne en acier de faible épaisseur tandis que pour les paliers 1300 MWe et 1450 MWe, l'enceinte est constituée d'une paroi interne en béton précontraint et d'une paroi externe en béton armé de 120 et 55 cm d'épaisseur respectivement [11].

III.3.2. Le circuit de contrôle chimique et volumétrique (RCV)

Le circuit de contrôle chimique et volumétrique (RCV) est situé dans le bâtiment des auxiliaires nucléaires (BAN) attenant au bâtiment réacteur et raccordé au circuit primaire. Le RCV représenté à la Figure (III.7), assure en permanence trois fonctions essentielles au bon fonctionnement du réacteur [11]:

Le contrôle volumétrique : Le circuit RCV vient en complément du pressuriseur pour absorber les variations de volume d'eau du primaire inhérentes aux fluctuations de masse volumique de l'eau du fluide primaire en fonction de la température et à la compensation des fuites.

Le contrôle chimique : Le dispositif permet d'injecter dans le fluide primaire des additifs chimiques et également d'en extraire les impuretés aqueuses, solides et gazeuses (produits de corrosion, d'activation et éventuellement de fission en cas de rupture de gaine) par dégazage et par rétention sur un poste de purification, constitué de filtres et de résines échangeuses d'ions.

Le contrôle neutronique : La concentration requise de bore dans le fluide primaire est atteinte par injection d'une solution d'acide borique concentrée ou par dilution, dans certains cas des résines échangeuse d'anions sont utilisées pour retenir un excès d'acide

borique du fluide primaire. Cette fonction permet de répondre aux exigences d'exploitation et de sécurité de la centrale.

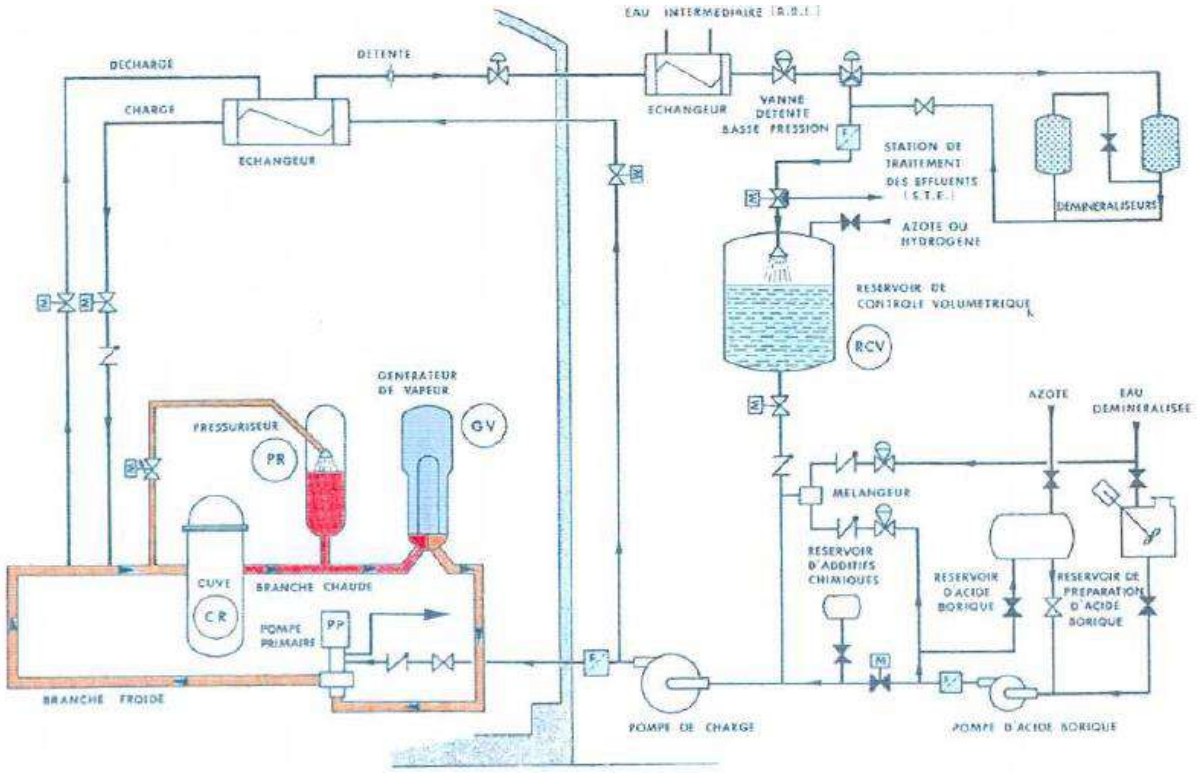


Figure (III.7) Schéma de principe du RCV [11].

III.4. Le circuit secondaire et la production d'électricité

La partie conventionnelle de l'installation transforme l'énergie thermique fournie par la partie nucléaire en énergie mécanique puis en énergie électrique. Pour cela, l'eau « caloporteur » entre dans les générateur sà vapeur à environ 220 °C, elle y prend la chaleur cédée par le fluide primaire au travers des tubes d'échange et en ressort sous forme de vapeur saturée à 320-330 °C sous une pression de 60 à 70 bars (humidité résiduelle 0,25 %, débit de vapeur. Cette vapeur est envoyée dans une turbine qui tourne à 1500 tours/minute et qui entraîne un alternateur. Elle repasse ensuite à l'état liquide dans le condenseur avant d'être renvoyée aux générateurs de vapeur. Le rendement du cycle est optimisé par le passage de la vapeur dans des sécheurs surchauffeurs, entre les étages hauts et basse pression de la turbine, et par le passage de l'eau condensée dans des réchauffeurs avant retour aux GV. Ces derniers sont protégés contre les surpressions par des soupapes montées sur les tuyauteries vapeur [103].

En toute rigueur, la dénomination « circuit secondaire » ne désigne que le circuit parcouru par le fluide secondaire, sous forme d'eau ou de vapeur. Il n'inclut donc pas les équipements électriques (alternateur, transformateurs, etc.). Sur le plan réglementaire, on appelle Circuit Secondaire Principal (CSP) l'ensemble formé par l'enveloppe sous pression de la partie secondaire des générateurs de vapeur, les tuyauteries d'arrivée d'eau et les tuyauteries de sortie vapeur jusqu'aux organes d'isolement de ces circuits qui sont à l'extérieur.

III.5. Le circuit tertiaire

Le condenseur est un échangeur dans lequel la vapeur venant de la turbine est refroidie et condensée par un troisième circuit, dit circuit de refroidissement ou circuit d'eau brute. Ce circuit tertiaire peut être [103]:

- **Soit ouvert :** le prélèvement d'eau à partir d'une source froide, mer ou rivière, et la rejette après passage dans le condenseur avec un écart de température d'une dizaine de degrés.
- **Soit fermé :** où l'eau est refroidie par l'air dans les aéroréfrigérants puis réutilisée, et une petite partie s'échappant sous forme de vapeur (panache).

Dans le cas d'un circuit ouvert, la totalité du débit est prélevée et rejetée dans la source froide alors que dans le cas d'un circuit fermé, on ne prélève que ce qu'il faut pour compenser la perte par le panache.

CHAPITRE IV

Etude et modélisation du système de dessalement MED-TVC

IV.1.Introduction

Dans ce chapitre, une description du système de dessalement proposé est présentée. Afin d'évaluer les performances du système étudié, un modèle numérique a été développé sous MATLAB à partir d'un ensemble d'équations mathématiques implicites générées par la combinaison des lois de thermodynamique et la loi Gouy-Stodola et la loi de conservation de la masse et de l'énergie dans l'évaporateur, l'éjecteur à vapeur est condenseur. L'effet des différents paramètres de fonctionnement sur la performance du système à savoir : nombre d'effets, la pression et le débit de vapeur motrice, et la température maximale de la saumure. Enfin, une analyse énergétique et exergétique du système de dessalement MED-TVC est effectuée.

IV.2. Description du système étudié

La figure (IV.1) montre une vue schématique d'un système MED-TVC à croisement parallèle. Les composants principaux du système sont le condenseur, l'éjecteur à jet de vapeur qui joue le rôle de compresseur thermique et les évaporateurs à film tombant, également appelés effets.

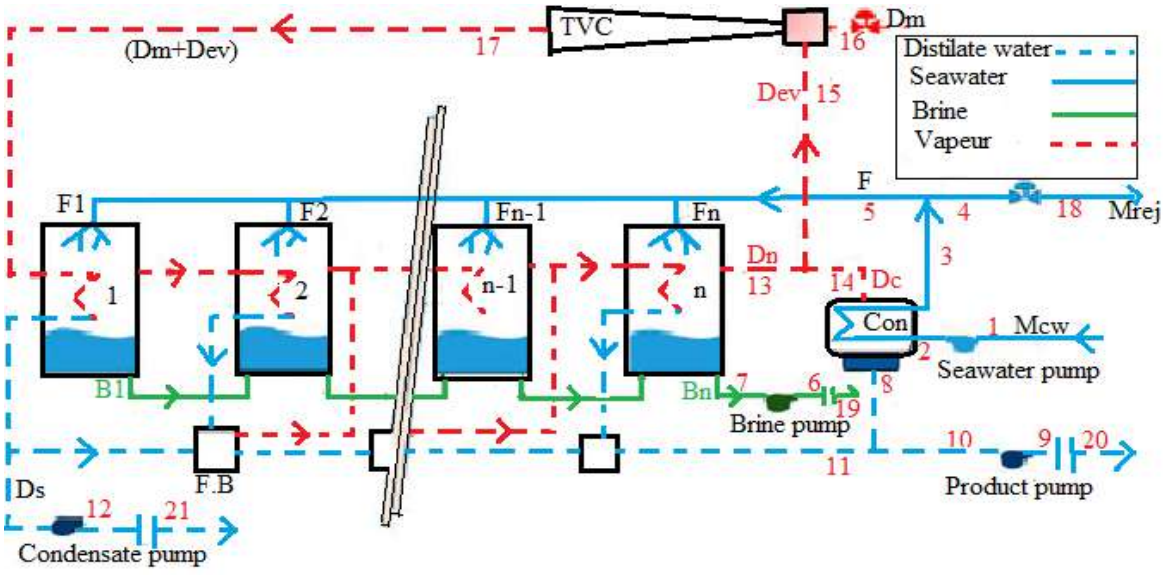


Figure (IV.1) Schéma de principe du système étudié

La vapeur motrice (Dm) de la source externe telle qu'une chaudière ou une centrale électrique ou nucléaire est introduite dans l'éjecteur à jet de vapeur à une pression relativement élevée. L'éjecteur à jet de vapeur est utilisé pour améliorer l'efficacité du

système. La vapeur motrice sert à comprimer une partie de la vapeur formée dans le dernier effet en utilisant le principe de la dynamique des gaz. La vapeur comprimée ainsi que la vapeur motrice dilatée (Dm + Dn) provenant de l'éjecteur sont entraînées dans le premier effet en tant qu'une source de chaleur où elles se condensent et libèrent leur chaleur latente à l'intérieur des tubes. De l'eau de mer pré- chauffée est pulvérisée dans chaque effet d'évaporation et s'écoule sous forme de film liquide. Le film se réchauffe à la température d'ébullition en raison de la condensation de la vapeur motrice à l'intérieur des tubes et d'une partie de celle-ci s'évapore. Une partie du condensat retourne à sa source et une autre partie rejoint le produit d'eau dessalée.

La vapeur générée (D1) dans le premier effet est dirigée vers le deuxième effet. Avant d'entrer dans les effets secondaires, la vapeur traverse le boit flash de treillis métallique pour séparer les gouttelettes de saumure entraînées. La vapeur générée (D1) agit comme source de chaleur dans l'effet suivant à une pression et une température plus basse. La saumure chaude quittant le premier effet, passe dans le second effet, fonctionne à une température et une pression plus basse. La vapeur (D2) est générée dans le deuxième effet par la saumure éclairante (B1) et l'évaporation de l'eau de mer (F2). Ce processus itératif est répété à travers tous les effets.

Pour améliorer les performances du système, une partie de la vapeur formée dans le dernier effet est entraînée par le thermo-compresseur de vapeur tandis que la partie restante est condensée dans le condenseur, ce qui réchauffe l'eau de mer de la température d'entrée à une température plus élevée. L'eau de refroidissement est utilisée pour éliminer l'excès de chaleur ajouté au système par le premier effet de la vapeur motrice chaude.

IV.3. Modélisation et analyse de système

Les premières et deuxièmes lois de la thermodynamique sont utilisées dans cette section pour développer un modèle mathématique du système de dessalement MED-TVC. Ce modèle a été présenté en appliquant des lois de conservation de masse et d'énergie pour le thermo-compresseur, les effets et le condenseur. Le modèle comprend également des équations pour les coefficients de transfert de chaleur et les propriétés physiques de l'eau de mer, à déterminer.

Pour simplifier la modélisation du système, les hypothèses et caractéristiques du modèle développé sont les suivantes :

- Le processus est en régime permanent.
- La différence de température entre les effets est égale.
- Le débit d'alimentation dans les effets est le même.
- La capacité thermique spécifique, l'élévation du point d'ébullition (BPE) et d'autres paramètres ont été calculés.
- Le distillat est sans sel.
- Les pertes thermodynamiques ont été étudiées.
- L'efficacité de la pompe est supposée être typiquement de 75 %.

IV.3.1. Modèle de bilan massique et énergétique

Pour l'évaluation de la masse et de la conservation de l'énergie, certains paramètres inconnus, tels que le coefficient de transfert de chaleur et les propriétés physiques de l'eau doivent être déterminés. Ces variables inconnues ont été définies dans la section suivante :

$$\Delta T = \frac{T_1 - T_n}{n-1} \quad \text{(IV.1)}$$

$$T_s = T_1 + \Delta T \quad \text{(IV.2)}$$

Où, T et n sont les températures en K et le nombre d'effets, respectivement.
La température de dernier effet de la vapeur peut être calculée comme suit :

$$T_{Vn} = T_n - BPE \quad \text{(IV.3)}$$

L'élévation du point d'ébullition (BPE) est liée à la valeur de sel dissous dans l'eau. Ce facteur peut être évalué comme suite:

$$BPE = X_b[B + CX_b] \times 10^{-3} \quad \text{(IV.4)}$$

$$B = [6.71 + (6.34 \times 10^{-2} \times T_n) + (9.74 \times 10^{-5} \times T_n^2)] \times 10^{-3}$$

$$C = [22.238 + ((9.59 \times 10^{-3} \times T_n) + (9.42 \times 10^{-5} \times T_n^2)] \times 10^{-8}$$

Où X est la salinité en Ppm.
La capacité thermique massique (Cp) de l'eau peut être calculée comme suit :

$$C_p = [a + b \times T_1 + c \times T_1^2 + d \times T_1^3] \times 10^{-3} \quad \text{(IV.5)}$$

$$a = 4206.8 - (6.6197 \times S) + (1.2288 \times 10^{-2} \times S^2)$$

$$b = -1.1262 + (5.4178 \times 10^{-2} \times S) - (2.2719 \times 10^{-4} \times S^2)$$

$$c = (1.2026 \times 10^{-2}) - (5.3566 \times 10^{-4} \times S) + (1.8906 \times 10^{-6} \times S^2)$$

$$d = (6.8777 \times 10^{-7}) + (1.517 \times 10^{-6} \times S) - (4.4268 \times 10^{-9} \times S^2)$$

$$S = \frac{X_f}{1000}$$

La partie la plus essentielle de la modélisation du système de dessalement MED-TVC consiste à déterminer le rapport d'entraînement (*Ra*) le rapport de la vapeur motrice à la vapeur entraînée (Dm/Dr) dans ces thermo-compresseurs. Ce rapport est une fonction directe de la pression de refoulement (Ps), de la pression de vapeur motrice (*Pm*) et de la pression de vapeur entraînée (*Pev*) en termes de taux de compression (*CR*) et de taux de détente (*ER*) comme suit [26] :

$$ER = \frac{P_m}{P_{ev}} \quad \text{(IV.6)}$$

$$CR = \frac{P_s}{P_{ev}} \quad \text{(IV.7)}$$

Ettouney et El-Dessouky ont présenté une nouvelle corrélation pour évaluer la pression de vapeur comprimée Ps et la pression de vapeur entraînée *Pev*, comme indiqué ci-dessous [26] :

$$P_s = 1000 \times \exp\left(\frac{-3892.7}{T_s + 273.15 - 42.6776} + 9.5\right) \quad \text{(IV.8)}$$

$$P_{ev} = 1000 \times \exp\left(\frac{-3892.7}{T_{vn} + 273.15 - 42.6776} + 9.5\right) \quad \text{(IV.9)}$$

Le taux d'entraînement (Ra) a été calculé à l'aide de la formule suivante :

$$Ra = 0.235 \frac{P_s^{1.19}}{P_{ev}^{1.04}} ER^{0.015} \quad \text{(IV.10)}$$

La quantité de vapeur entraînée peut être calculée comme suit :

$$D_{ev} = \frac{D_m}{Ra} \quad \text{(IV.11)}$$

La température de la saumure dans chaque effet est inférieure à celle du précédent de *T*. Ainsi, si la température de la saumure dans l'effet i est supposée être Ti, alors la température de la saumure dans l'effet suivant i + 1 et ainsi de suite jusqu'au dernier effet n peut être calculée comme suit :

$$T_{i+1} = T_i - \Delta T, \text{ i=}1, 2, \ldots\ldots, n \quad \text{(IV.12)}$$

La température de la vapeur générée dans l'effet i, T_{vi} est inférieure à la température de la saumure par l'élévation du point d'ébullition, où T_{vi} est une température de saturation correspondant à la pression dans l'effet *Pi*.

$$T_{vi} = T_i - BPE \quad \text{(IV.13)}$$

Les débits de distillat et de saumure rejetée sont obtenus par mise en solution des bilans massiques et salins globaux. Les deux équations d'équilibre supposent que l'eau distillée est sans sel. Les deux équations d'équilibre sont données par :

$$F = B + D \quad \text{(IV.14)}$$

$$\frac{D}{F} = \frac{X_b - X_f}{X_b} \quad \text{(IV.15)}$$

Où D et B sont de l'eau distillée et de l'eau salée en kg/s, respectivement.
Le débit d'eau de mer d'alimentation F est réparti également entre tous les effets à un débit égal à Fi qui peut être calculé comme suit :

$$F_i = \frac{F}{n}, \ i=1,2,\ldots\ldots,n \quad \text{(IV.16)}$$

La chaleur latente de la vapeur peut être estimée comme suit :

$$\lambda_m = 2501.897149 - 2.407064037 \times T_m + 1.192217 \times 10^{-3} \times T_m^2 - 1.5863 \times 10^{-5} \times T_m^3 \quad \text{(IV.17)}$$

$$\lambda_s = 2501.897149 - 2.407064037 \times T_s + 1.192217 \times 10^{-3} \times T_s^2 - 1.5863 \times 10^{-5} \times T_s^3 \quad \text{(VI.18)}$$

$$\lambda_i = 2501.897149 - 2.407064037 \times T_i + 1.192217 \times 10^{-3} \times T_i^2 - 1.5863 \times 10^{-5} \times T_i^3 \quad \text{(VI.19)}$$

La température de condensation de la vapeur a été affectée par les pertes de charge dans le dévésiculeur ΔT_p et le frottement dans la conduite de raccordement ΔT_t et le processus de condensation ΔT_c. Cette température peut être calculée comme :

$$T_{ci} = T_i - BPE - \Delta T_p + \Delta T_t - \Delta T_c \quad \text{(IV.20)}$$

La saumure sortant du premier effet entre dans le deuxième effet et ainsi de suite jusqu'au dernier effet *n*, et la saumure du dernier effet est rejeté. La saumure quittant le premier, le deuxième et le dernier effet peut être calculée en tenant compte de la loi du bilan massique comme suit :

$$B_1 = F_1 - D_1 \tag{IV.21}$$

$$B_i = F_i + B_{i-1} + D_i, \quad i=2,3\ldots\ldots,n \tag{IV.22}$$

La loi de conservation de la masse de sel est appliquée, en supposant que le distillat est exempt de sel, La salinité de la saumure à la sortie de chaque effet comme suit :

$$X_1 = \frac{F_i}{B_i} \times X_f \tag{IV.23}$$

$$X_i = \frac{F_i}{B_i} \times X_f + \frac{B_{i-1}}{B_i} \times X_{i-1}, \quad i=2,3,\ldots\ldots,n \tag{IV.24}$$

La vapeur générée dans chaque effet par ébullition uniquement peut être déterminée à partir du bilan énergétique du premier effet comme suit :

$$D_1 = \frac{1}{\lambda_1}\left[(D_m + D_{ev})\lambda_s - F_1 \times C_p\left(T_1 - T_f\right)\right] \tag{IV.25}$$

$$D_i = \frac{1}{\lambda_i}\left[(D_{i-1} + D'_{i-1})\lambda_{i-1} - F_i \times C_p\left(T_i - T_f\right) - B_{i-1} \times C_p(T_{i-1} - T_i)\right] \tag{IV.26}$$

Les paramètres inconnus dans les équations ci-dessus peuvent être calculés comme suit :

$$D'_i = D_{i-1} C_p \frac{T_{v,i-1} - T'_i}{\lambda_i} \tag{IV.27}$$

$$T'_i = T_{v,i-1} - NEA_i \tag{IV.28}$$

$$NEA_i = 33 \frac{(T_{i-1} - T_i)^{0.55}}{T_{v,i}} \tag{IV.29}$$

Où NEA est la tolérance de non-équilibre en k. La vapeur générée dans le dernier effet a été divisée en deux parties : la vapeur de condensation *Dc* (est dirigée vers le condenseur) et la vapeur entraînée par le thermo-compresseur *Dev*. Ceux-ci peuvent être calculés par :

$$D_c = D_n - D_{ev} \tag{IV.30}$$

Le débit de distillat total a été calculé avec l'équation suivante :

$$D_t = \sum_{i=1}^{n} D_i \tag{IV.31}$$

Le coefficient de transfert de chaleur global Ui a été estimé en utilisant :

$$U_i = \frac{1939.4 + 1.40562T_i - 0.020752T_i^2 + 0.0023186T_i^3}{1000} \tag{IV.32}$$

La surface de transfert de chaleur dans chaque effet (Ai) peut être calculée par :

$$A_1 = \frac{(D_m + D_{ev})\lambda_s}{U_1(T_s - T_1)} \tag{IV.33}$$

$$A_i = \frac{D_i\lambda_i}{U_i(T_{c,i} - T_i)}, i=2,3,\ldots\ldots,n \tag{IV.34}$$

La surface totale de transfert de chaleur a été calculée par la relation suivante :

$$A_e = A_1 + A_2 + \cdots + A_n = \sum_{i=1}^{n} A_i \tag{IV.35}$$

Le débit d'eau de mer de refroidissement peut être obtenu en appliquant la loi de conservation de l'énergie sur le condenseur comme indiqué ci-dessous :

$$M_{cw} = \frac{D_c\lambda_n}{C_p(T_f - T_{cw})} \tag{IV.36}$$

La surface de transfert de chaleur du condenseur est calculée comme suit :

$$A_c = \frac{D_c\lambda_n}{U_c(LMTD)_c} \tag{IV.37}$$

La différence de température moyenne logarithmique et le coefficient de transfert de chaleur global du condenseur peuvent être obtenus à partir des équations (38) et (39), respectivement [26].

$$(LMTD)_c = \frac{(T_f - T_{cw})}{\ln\left[\frac{T_{v,n} - T_{cw}}{T_{c,n} - T_f}\right]} \tag{IV.38}$$

$$U_c = 1.7194 + 3.2063 \times 10^{-2}T_{v,n} - 1.5971 \times 10^{-5}T_{v,n}^2 + 1.9918 \times 10^{-7}T_{v,n}^3 \tag{IV.39}$$

IV.3.2. Modèle exergétique

L'exergie est la quantité maximale de travail pouvant être obtenue lorsqu'un système est amené à l'équilibre de son état initial à l'état environnemental (mort). En négligeant les effets électriques, nucléaires, magnétiques et de tension superficielle, l'exergie totale se compose de quatre composantes : les exergies physiques, chimiques, cinétiques et potentielles [104]. Le bilan exergétique général d'un système peut s'écrire sous la forme :

$$\dot{E}x = \dot{E}_{ph} + \dot{E}_{ch} + \dot{E}_{ke} + \dot{E}_{pe} \tag{IV.40}$$

Où $\dot{E}_{ph}$, $\dot{E}_{ch}$, $\dot{E}_{ke}$ et $\dot{E}_{ph}$ sont les exergies physiques, chimiques, cinétiques et potentielles, respectivement. Par rapport à la référence choisie de cette étude, l'exergie cinétique et potentielle peut être négligée à partir du bilan exergétique. A l'équilibre, le bilan des taux d'exergie pour un système ouvert prend la forme [55] :

$$\sum_j \dot{Q}_j \left(1 - \frac{T_0}{T_j}\right) - \dot{W}_{cv} + \sum_i \dot{m}_i\, e_i - \sum_e \dot{m}_e\, e_e - \dot{E}_d = 0 \tag{IV.41}$$

Le taux de destruction de l'exergie (irréversibilité) est lié au taux de génération d'entropie par l'équation de Gouy-Stodola comme suit :

$$\dot{E}_d = T_0\, \dot{s}_g \tag{IV.42}$$

La deuxième loi peut être exprimée comme suite [55]

$$\dot{S}_g = \sum_e \dot{m}_e\, e_e - \sum_i \dot{m}_i\, e_i + \frac{\dot{Q}_J}{T_0} \tag{IV.43}$$

Où $\dot{S}_g$ représente le taux de génération d'entropie pour le processus dû aux irréversibilités. Deux termes, à savoir, $\sum_e \dot{m}_e\, e_e$et$\sum_i \dot{m}_i\, e_i$ sont considérés comme le transfert d'entropie. $\dot{Q}_J = -\dot{Q}$désigne le taux de transfert de chaleur pour la température instantanéeT_0. Le dernier terme, $\frac{\dot{Q}_J}{T_0}$représente le taux de transfert d'entropie. Le transfert de chaleur ci-dessus a été négligé ainsi que les énergies potentielles cinétiques du flux auquel on arrive [53].

$$\dot{W}_{cv} = \dot{W}_u = \sum_i \dot{m}_i e_i - \sum_e \dot{m}_e\, e_e - T_0 \dot{S}_g \tag{IV.44}$$

Cette équation donne le travail réel qui est fait pendant le processus. Cette déclaration définit également le travail utile, parce que les composants d'écoulement régulier ont des limites constantes et donc ils ne contribuent pas au travail effectué par ou contre l'environnement. Le travail réversible peut être obtenu en ajustant le terme de génération d'entropie$\dot{S}_g = 0$. Par conséquent, l'éq (IV.44) s'écrit :

$$\dot{W}_{rev} = \dot{W}_{u,max} = \dot{m}(e_i - e_e) \quad \text{(IV.45)}$$

L'exergie physique et chimique peut être exprimée, respectivement, comme :

$$\dot{E}_{ph} = \dot{m}\, e_{ph} = \dot{m}[(h_s - h_0) - T_0(s_s - s_0)] \quad \text{(IV.46)}$$

$$\dot{E}_{ch,w} = \dot{m} e_{ch} = \dot{m} \sum w_k(\mu_k^s - \mu_{o\,k}^o) \quad \text{(IV.47)}$$

Où l'indice s fait référence à l'état initial et 0 à l'état environnemental ou de référence correspondant, respectivement. Les termes μ et ωréférence au potentiel chimique et à la fraction massique. Les termes e_{ph} et e_{ch}font référence à l'exergie physique spécifique et à l'exergie chimique spécifique.

A l'aide de l'éq. (IV.46) et l'éq. (IV.47), la formulation exergétique l'éq. (IV.41) et est obtenu. Le travail réversible peut être obtenu comme :

$$\dot{W}_{u,max} = \sum_i \dot{E}x_i - \sum_e \dot{E}x_e \quad \text{(IV.48)}$$

L'article ne fait plus référence au débit d'exergie pour plus de simplicité à la place de l'exergie physique et de l'exergie chimique. Le taux d'irréversibilité ($\dot{I}$)est égal à la perte d'exergie comme [53, 55]:

$$\dot{I} = \dot{W}_{u,max} - \dot{W}_u = T_0 \dot{S}_g \quad \text{(IV.49)}$$

Bilan énergétique et exergétique des pompes

La puissance des pompes peut être donnée par [54]:

$$\dot{W}_p = \dot{m}_i h_i - \dot{m}_e h_e \quad \text{(IV.50)}$$

Le taux d'irréversibilité est :

$$\dot{I}_p = \sum_i \dot{E}x_i - \sum_e \dot{E}x_e - \dot{W}_p \quad \text{(IV.50)}$$

Le travail réversible pour le transfert de chaleur est égal au taux d'irréversibilités dans les effets, condenseur et thermo-compresseur. L'expression est [55]:

$$\dot{I} = \dot{W}_{rev} - \dot{W}_u = \dot{W}_{rev} = \sum_i \dot{E}x_i - \sum_e \dot{E}x_e \quad \text{(IV.50)}$$

L'unité de dessalement MED-TVC contient également trois flux : eau pure, eau salée et vapeur. Les propriétés thermodynamiques de l'eau pure et de la vapeur peuvent être obtenues en utilisant une équation empirique, comme expliqué dans l'annexe A [25]. Les propriétés de l'eau de mer ont été calculées en utilisant les corrélations empiriques qui sont fonctions de la température et de la concentration à pression atmosphérique constante [105], à et à différentes pressions [106]. Ou des équations développées par les mêmes auteurs. Le modèle proposé est présent à l'annexe B.

La destruction d'exergie des composants de système MED-TVC est représenté dans l'annexe C.

IV.3.3. Performance du système

Les performances du système du modèle MED-TVC peuvent être évaluées en fonction des paramètres suivants :

IV.3.3.1. Gain Output Ratio (GOR)

Le Gain Output Ratio (GOR) est l'un des paramètres utilisés pour évaluer les performances des processus de dessalement thermique. Il est défini comme le rapport entre l'eau distillée totale produite (D_t)et la vapeur motrice fournie (D_m).

$$GOR = \frac{D_t}{D_m} \quad \text{(VI.51)}$$

IV.3.3.2. Performance ratio (PR)

L'efficacité des usines de dessalement existantes, la performance ratio, est définie comme le rapport de l'énergie d'évaporation équivalente du distillat à l'apport énergétique, comme présenté dans l'équation suivante :

$$PR = GOR\frac{2{,}330}{\lambda_m} \tag{IV.52}$$

IV.3.3.3. Consommation de chaleur spécifique, Q_{th}

C'est l'une des caractéristiques les plus importantes des systèmes de dessalement thermique. Elle est définie comme l'énergie thermique consommée par le système pour produire 1 kg d'eau distillée, où λ_m est la chaleur latente de la vapeur motrice en kJ/kg.

$$Q_{th} = \frac{D_m \lambda_m}{D_t} \tag{IV.53}$$

IV.3.3.4. Zone de transfert de chaleur spécifique,A_d

La surface spécifique de transfert de chaleur totale est égale à la somme des surfaces de transfert de chaleur d'effet (A_e)et des surfaces de transfert de chaleur du condenseur (A_c)par le débit distillé total (m2/kg/s).

$$A_d = \frac{A_e + A_c}{D_t} \tag{IV.54}$$

IV.3.3.5. Efficacité exergétique, η_{ex}

L'efficacité exergétique représente le rapport entre le travail minimum $(\dot{W}_{min})$ de séparation et l'exergie de carburant $(\dot{E}_f)$fournie au système, et peut être exprimée comme suit :

$$\eta_{ex} = \frac{\dot{W}_{min}}{\dot{E}_f} \tag{IV.55}$$

IV.3.3.6. Universal performance ratio (UPR)

Universal performance ratio est une plate-forme commune d'évaluation des procédés de dessalement en fonction de la consommation d'énergie primaire [107,108] :

$$UPR = \frac{evaporative\ energy}{primary\ energy\ input} = \frac{\lambda_m}{3.6 \times Q_{PSE}} \quad \text{(IV.56)}$$

Où Q_{PSE}est l'énergie primaire standard calculée comme suit :

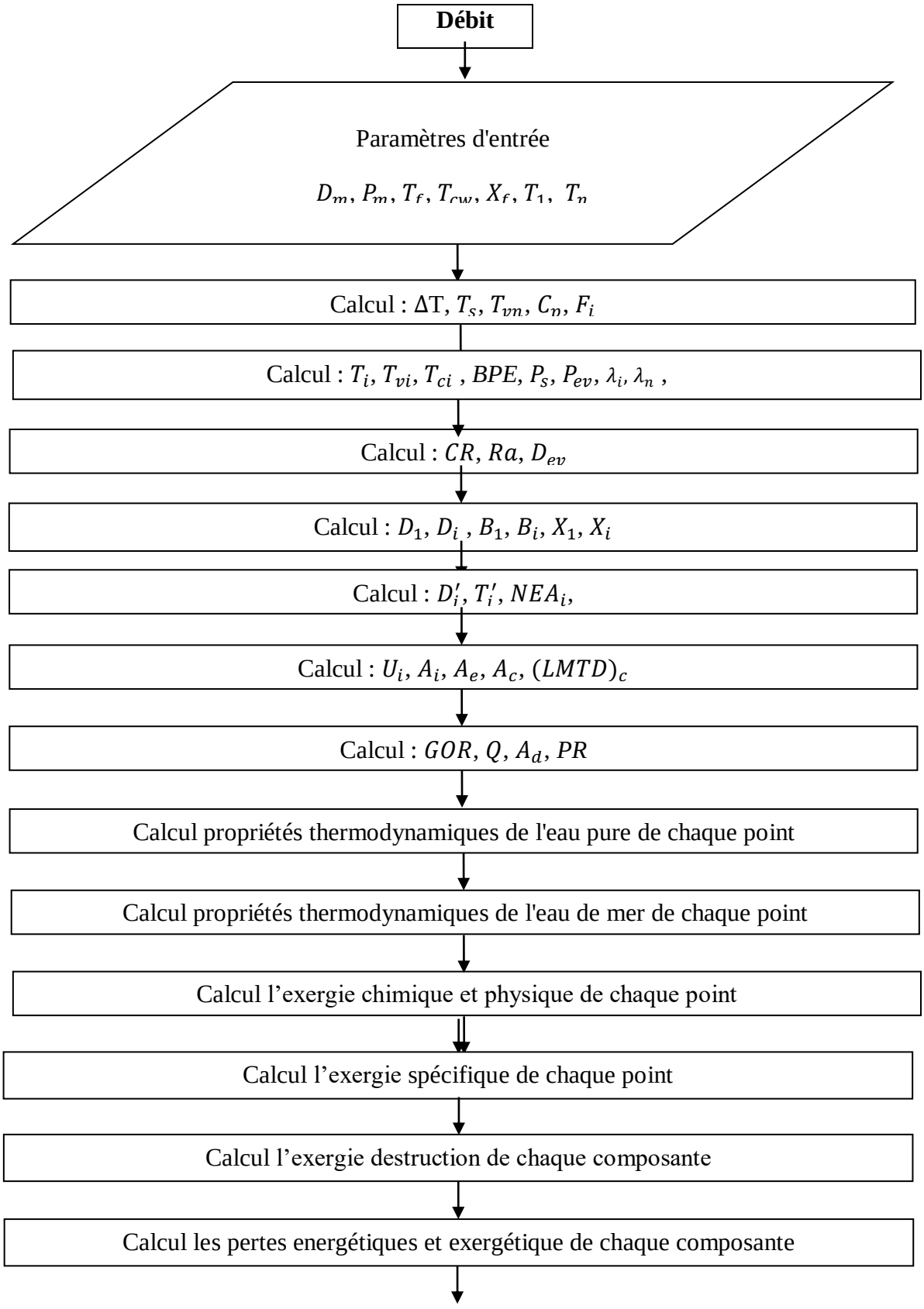
$$Q_{PSE} = \left[\left(\left(\frac{\mathrm{kWh}_{elec}}{\mathrm{m}^3}\right) \times (\mathrm{CF}_{elec})\right) + \left(\left(\frac{\mathrm{kWh}_{th}}{\mathrm{m}^3}\right) \times (\mathrm{CF}_{th})\right)\right] \quad \text{(IV.57)}$$

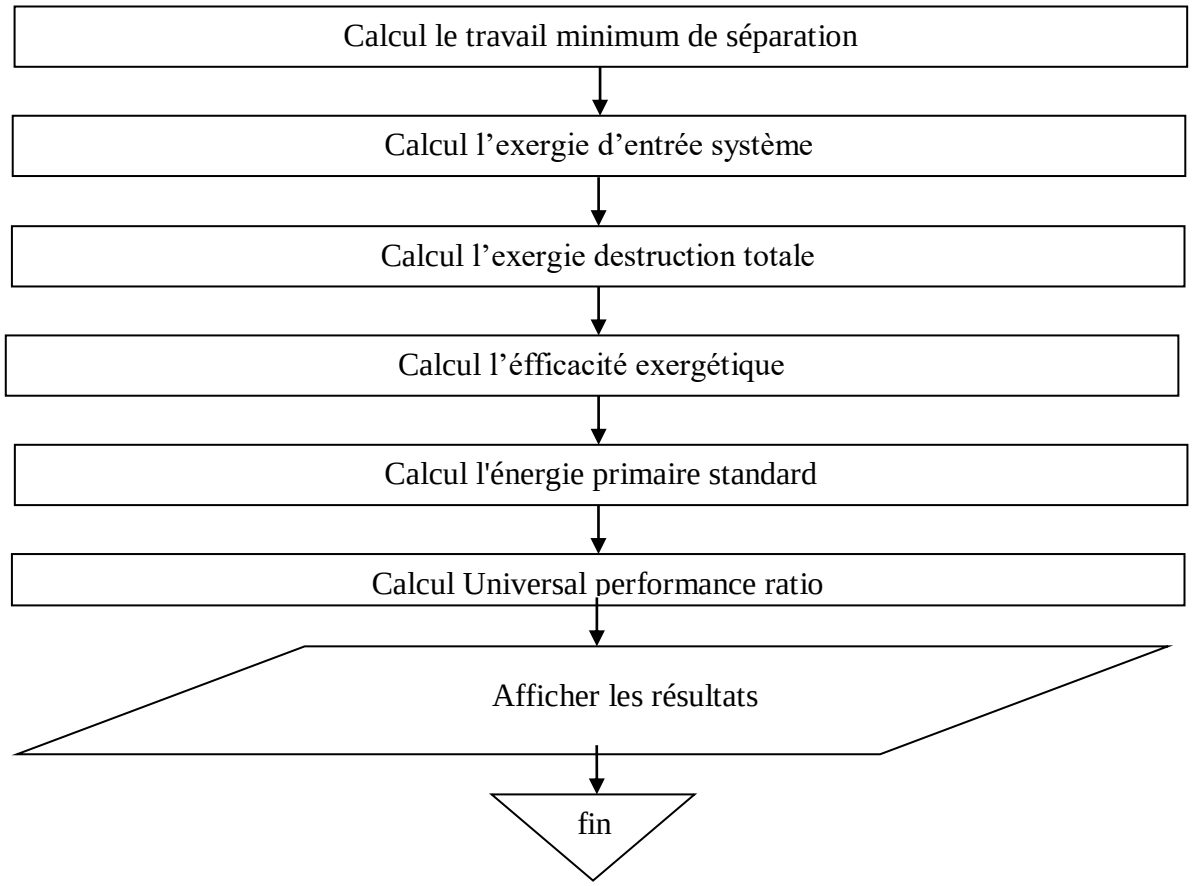
CF_{elec} et CF_{th}sont les facteurs de conversion pour l'électricité et l'énergie primaire d'entrée thermique, respectivement. Le kilowattheure par mètre cube (kWh/m^3) est la consommation d'énergie spécifique en termes d'électricité et de thermique.

IV.3.3.7. Limite thermodynamique (TL)

La limite thermodynamique (TL) est un concept idéal de dessalement sans génération d'entropie, et par conséquent, le système est indépendant car il n'y a aucune récupération. Selon la source d'eau de mer, où la salinité peut varier de 3% à 4,5 % en poids, la consommation d'énergie spécifique est calculée pour être comprise entre 0,7 et 0,85 kWh/m^3. Le TL qui a un travail minimum d'eau de mer typique à température ambiante et une concentration de 3,5% en poids de sels dissous est d'environ 0,78 kWh/m^3 ou 2,8 kJ/kg comme donné par les équations de Gibbs. En conséquence, la UPR basée sur le minimum de la théorie du travail de séparation est de 828 [109,110].

IV.3.4. Organigramme de calcul MED-TVC





IV.4. Résultats et discussion

IV.4.1. Validation du modèle

Le logiciel MATLAB a été utilisé pour évaluer les performances du système MED-TVC. En conséquence, une série de calculs mathématiques ont été effectués sur la base des paramètres de conception précédemment décrits afin d'analyser le comportement du système proposé dans différentes conditions de fonctionnement. Les propriétés thermodynamiques de l'eau saline ont été obtenues à partir les dernières données publiées dans la littérature [105,106]. En utilisant le modèle développé, l'effet de la température de la saumure supérieure, du débit de vapeur motrice et du nombre d'effets sur les performances du système MED-TVC a été étudié. Les paramètres d'entrée du modèle et les résultats de sortie sont donnés dans le tableau (IV.1). La validité du modèle mathématique a été testée par rapport à

certaines données disponibles de trois usines de dessalement commerciaux et les résultats de la modélisation ont montré de bons accords, comme indiqué dans le tableau (IV.2).

Tableau (IV.1) Paramètres d'entrée et résultats de la modélisation MED-TVC

Paramètre	Valeur
Débit de vapeur motrice, kg/s	8.8
Pression de vapeur motrice, kPa	230
Température de l'eau de mer d'alimentation, K	314.5
Température de l'eau de refroidissement, K	304.5
Salinité de l'eau d'aimantation, ppm	46000
Température maximale de la saumure, K	333.1
Température minimale de la saumure, K	318.4
Différence de température, K	5.23
Taux d'entrainement (Ra)	1.166
Taux d'expansion (ER)	23.69
Taux de compression (CR)	2.77
Débit d'eau distillé, kg/s	55.59
Gain output ratio (GOR)	6.31
Débit d'eau de refroidissement, kg/s	423.24
Consommation de chaleur spécifique, kJ/kg	308.75
Zone de transfert de chaleur spécifique, $m^2/kg/s$	224.36
Efficacité exergétique, %	3.46
Énergie primaire standard, kWh/m^3	5.3
Universal performance ratio (UPR)	102.2
% UPR de la limite thermodynamique (TL)	12.34%

Tableau (IV.2) Comparaison du modèle mathématique avec trois usines commerciales de tailles différentes.

Usine de dessalement	Tripoli [111]		Trapani [28]		Umm Al-NAR [112]	
	Réelle	Modèle	Réelle	Modèle	Réelle	Modèle
Conditions d'exploitation et de conception						
Nombre d'effets	4	4	12	12	6	6
Pression de vapeur motrice, kPa	2300	2300	4500	4500	2500	2500
Température maximale de la saumure, K	333.1	333.1	335.2	335.2	334.8	334.8
Température minimale de la saumure, K	318.4	318.4	310	310	315.8	315.8
Différence de température, K	4.9	4.9	2.3	2.3	3.74	3.74
Température de l'eau de mer, K	314.5	314.5	308	308	313	313
Température de l'eau de refroidissement, K	304.5	304.5	298	298	303	303
Débit de vapeur motrice, kg/s	8.8	8.8	6.25	6.25	10.6×2	10.6×2
Conception TVC						
Taux d'entrainement(Ra)	1.14	1.148	NA	1.86	1.36	1.29
Taux d'expansion (ER)	NA	240	730	703.83	NA	321.16
Taux de compression(CR)	NA	2.73	4	4.3	NA	3.06
La performance du système						
Débit d'eau distillé, kg/s	57.8	55.7	105.2	111.93	184.4	205.75
Gain output ratio (GOR)	6.51	6.31	16.7	17.91	8.6	9.07
Consommation de chaleur spécifique, kJ/kg	NA	299.54	NA	150.61	NA	294.9
Zone de transfert de chaleur spécifique, m^2/kg/s	NA	237.7	NA	272.85	NA	398.25

La valeur UPR du système de dessalement MED-TVC est de 102.2, ce qui est bien meilleur par rapport aux procédés de dessalement conventionnels tels que MED (UPR=88) et RO (UPR=86). Ceci est principalement dû à l'utilisation du procédé TVC qui améliore le

transfert de chaleur de l'évaporation du film sur les surfaces des tubes de MED et à l'utilisation de vapeur de faible qualité qui a une très faible proportion d'énergie primaire. Il est à noter que les performances des procédés MSF sont les plus faibles (UPR=60) car ils consomment de la vapeur à haute température et une électricité élevée qui fait plus de part en énergie primaire. De plus, les résultats obtenus montrent que le système MED-TVC ne fonctionne qu'à 12,34% de la limite idéale ou thermodynamique alors que le dessalement durable peut être atteint en approchant 25-30% de TL. Cela ne sera possible que soit par hybridation de différents procédés, soit par des matériaux membranaires innovants tels que les aquaporines, les graphènes, etc. [107,110].

IV.4.2. Analyse énergétique et exergétique

Les propriétés et les débits exergétiques pour tous les cours d'eau sont présentés dans le tableau (IV.3). Le pourcentage de destruction exergétique de chaque composant de la destruction exergétique totale à l'aide d'un diagramme de Grossman est illustré à la figure (IV.2). Comme prévu, la principale destruction exergique se produit à la fois dans les effets MED-TVC et le thermo-compresseur qui représente 81,58 % de la destruction totale de l'exergie. Une telle destruction exergétique élevée est principalement induite par la pression de vapeur motrice élevée et la différence de température à travers le système MED-TVC et le processus de transfert de chaleur dans les effets associés au changement de phase [48]. Le condenseur est considéré comme la troisième source d'irréversibilités. En raison de la perte de transfert de chaleur pendant le processus de condensation. Les flux de sortie et les pompes ont respectivement les taux de coût de destruction exergétique les plus bas.

Tableau (IV.3) Propriétés et débits exergétiques à chaque point dans l'unité MED-TVC

Flux No	Débit massique(kg/s)	Temp (K)	Salinité (ppm)	Enthalpie (kJ/kg)	Entropie (kJ/kg.K)	Taux d'exergie (MW)
1	425.50	334.50	46000	125.4	0.4343	0.000
2	425.50	304.60	46000	125.8	0.4356	0.002
3	425.50	314.50	46000	165.4	0.5633	0.290
4	205.50	314.50	46000	165.4	0.5633	0.140
5	220.00	314.50	46000	165.4	0.5633	0.150
6	161.81	318.44	46000	177.4	0.5947	0.283
7	161.81	318.43	70000	177.2	0.5945	0.253
8	06.66	318.40	0	190.1	0.6435	0.020
9	58.18	323.94	0	213.3	0.7158	0.242
10	58.18	323.74	0	212.4	0.7133	0.240
11	51.52	324.24	0	214.5	0.7197	0.218
12	08.80	338.00	0	272.1	0.8939	0.076
13	14.75	318.40	0	2583.7	8.1686	1.597
14	06.66	318.40	0	2583.7	8.1685	0.713
15	08.09	318.40	0	2583.7	8.1685	0.866
16	08.80	397.82	0	2713.3	7.1051	4.933
17	16.00	338.00	0	2618.2	7.8425	4.069
18	205.50	304.50	46000	125.4	0.4343	0.000
19	161.81	304.50	70000	122.6	0.4190	0.056
20	58.18	304.50	0	132.0	0.4565	0.112
21	08.80	304.50	0	132.0	0.4565	0.017

La destruction d'exergie et les pertes d'énergie dans les principaux composants du système MED-TVC sont illustrées à la figure (IV.3). Les résultats de l'analyse énergétique montrent que le taux de perte d'énergie est beaucoup plus élevé dans la section de condensation (878 kW). Ces pertes sont associées à des émissions à une température très proche de celle de l'environnement. Le thermo-compresseur est la deuxième source de pertes d'énergie la plus élevée dans le MED-TVC et la fiction. La section de production d'eau (effets) représente une perte d'énergie de 372 kW en raison de la plus grande différence de

température entre les effets et du transfert de chaleur entre la vapeur et l'eau d'alimentation. Les pompes ont une faible perte d'énergie, ce qui représente 230 kW de l'énergie totale du système.

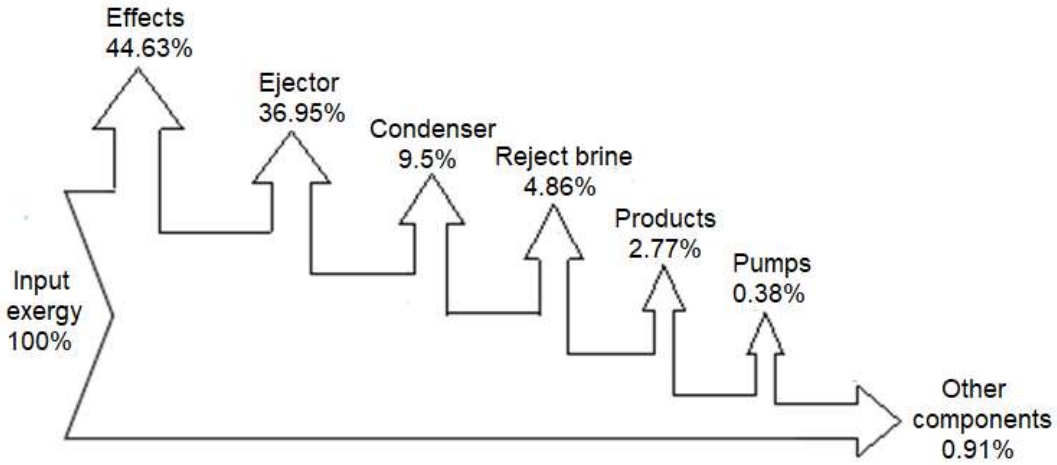


Figure (IV.2) Diagramme de perte et de flux d'exergie (Grassmann) en pourcentage de l'exergie totale d'entrée

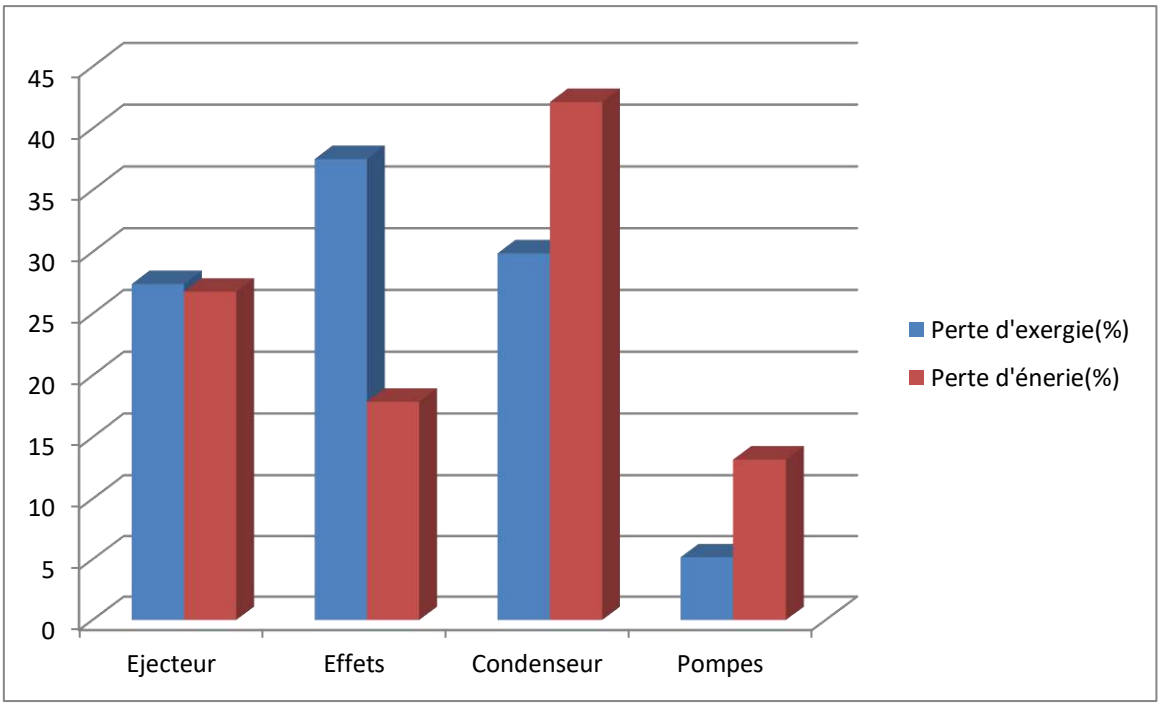


Figure (IV.3) Comparaison des pertes d'énergie et d'exergie au sein du système MED-TVC

Selon l'analyse exergétique, les pertes irréversibles les plus importantes se produisent dans la section de génération de vapeur qui subit la plus grande destruction exergétique du système (1600 kW). Ceci est le résultat d'un transfert de chaleur irréversible vers l'eau

d'alimentation pour la génération de vapeur, la condensation de la vapeur d'eau et la vaporisation de l'eau de mer. La section de condensation (condenseur) constitue une autre source importante d'irréversibilité avec la destruction exergétique de 1270 kW. La perte d'énergie élevée pendant le processus de condensation est liée au transfert de chaleur plus élevé vers l'eau de refroidissement. La troisième source de destruction d'exergie est le thermo-compresseur, à 1170 kW, qui est due à la perte d'énergie par transfert de chaleur et au processus de mélange et de détente. Le taux de destruction exergétique le plus faible (220 kW) a lieu dans les pompes.

IV.4.3. Etude paramétrique

IV.4.3.1. Température maximale de la saumure (TBT)

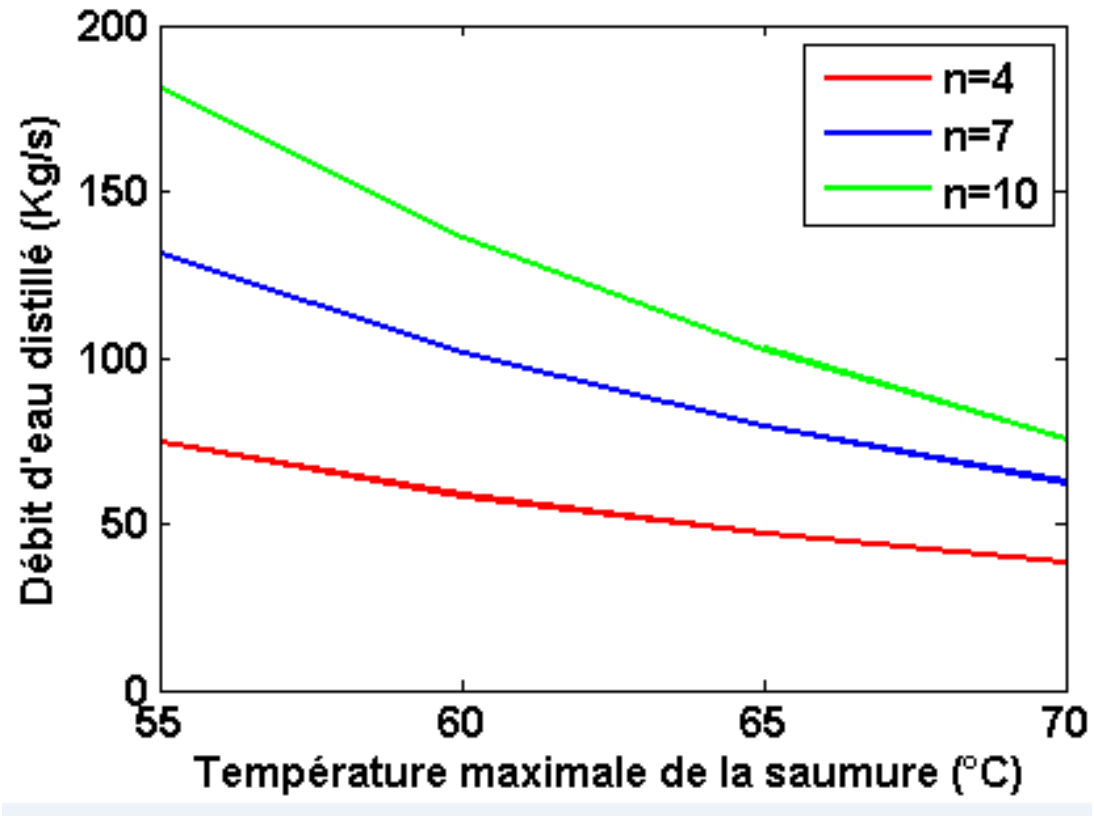


Figure (IV.4) Variation de la production d'eau distillée en fonction de la température maximale de la saumure.

La variation de la production de distillat en fonction de la température maximale de la saumure est illustrée à la figure (IV.4). Il est clair que lorsque la température de la saumure supérieure augmente, la production de distillat diminue. La raison en est que lorsque la

chaleur latente de la vapeur diminue, la quantité de chauffage sensible de l'alimentation augmente. Par conséquent, la zone de transfert de chaleur diminue (figure(IV.5)). De plus, pour une valeur donnée de TBT, une augmentation du nombre d'effets conduit à une augmentation de la valeur du débit l'eau distillat due à l'augmentation de l'échange de chaleur entre différents flux et donc à l'augmentation de la quantité d'eau douce.

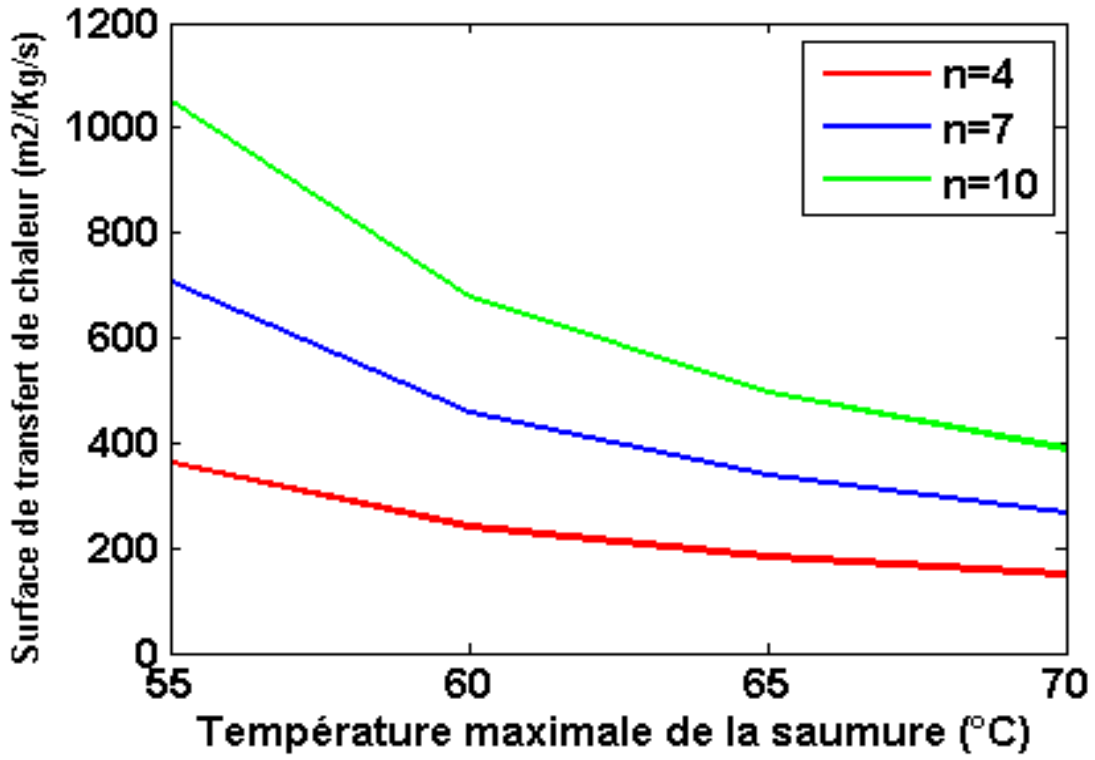


Figure (IV.5) Variation de la surface de transfert de chaleur spécifique en fonction de la température maximale de la saumure.

La figure (IV.6) montre l'effet de la température maximale de la saumure sur la consommation spécifique de l'énergie thermique. On constate qu'une augmentation du TBT entraîne une augmentation de la consommation d'énergie. En effet, une augmentation de la TBT entraîne une augmentation de la pression de vapeur et également de la vapeur motrice requise. Cette augmentation se traduit par une augmentation de la quantité d'énergie consommée. À une TBT spécifié, la consommation thermique spécifique diminuait avec l'augmentation du nombre d'effets.

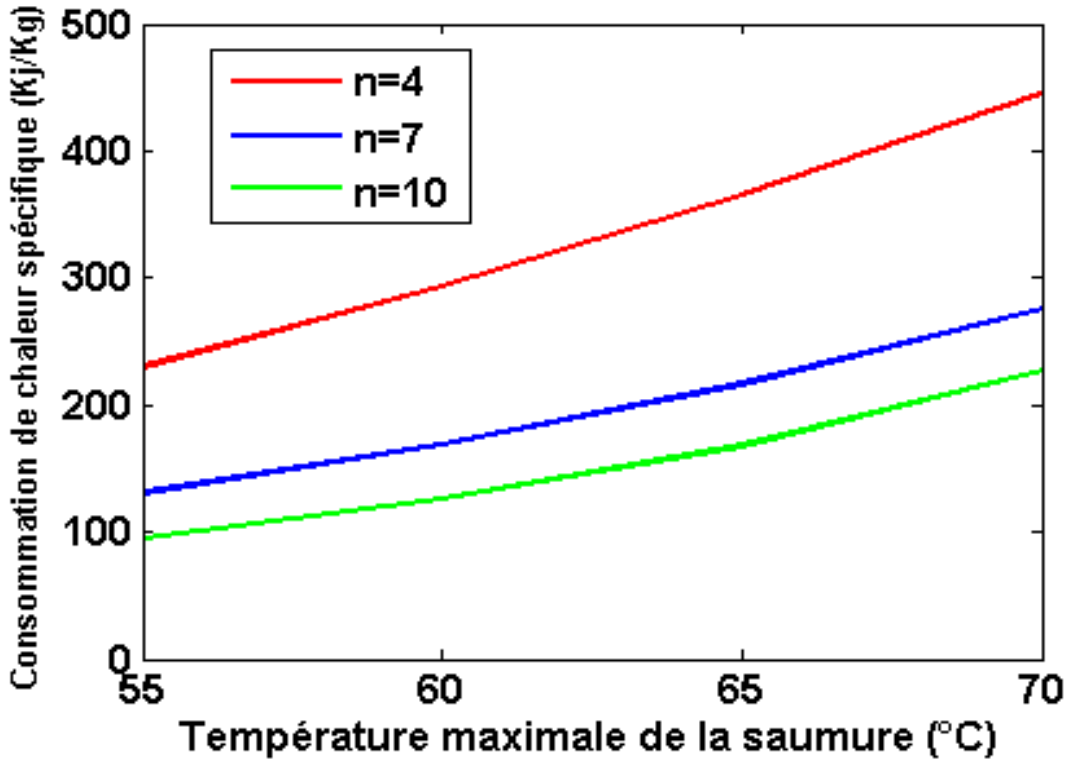


Figure (IV.6) Variation de la consommation d'énergie thermique en fonction de la température maximale de la saumure.

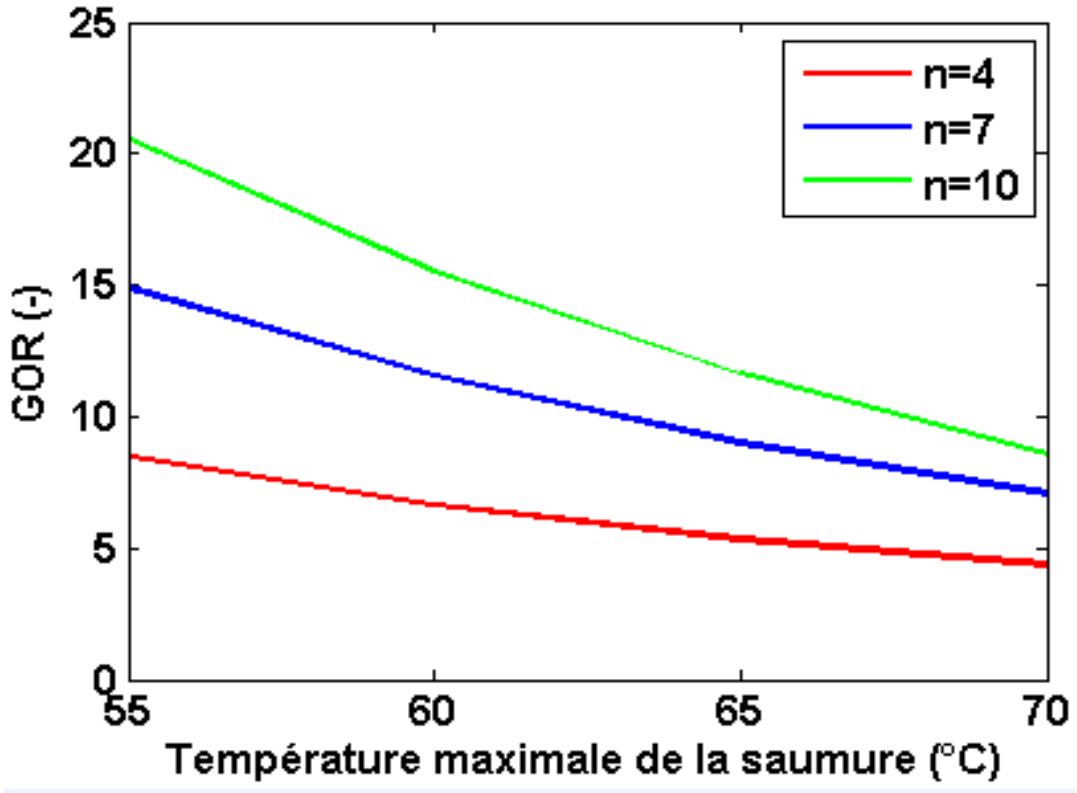


Figure (IV.7) Variation du GOR en fonction de la température maximale de la saumure

La variation du GOR en fonction TBT est illustrée sur la figure (IV.7). Les valeurs du GOR diminuent avec une augmentation du TBT. Cela est dû au fait qu'une augmentation de la TBT entraîne une diminution de la quantité d'eau distillée. Cette diminution se traduit par une diminution du GOR.

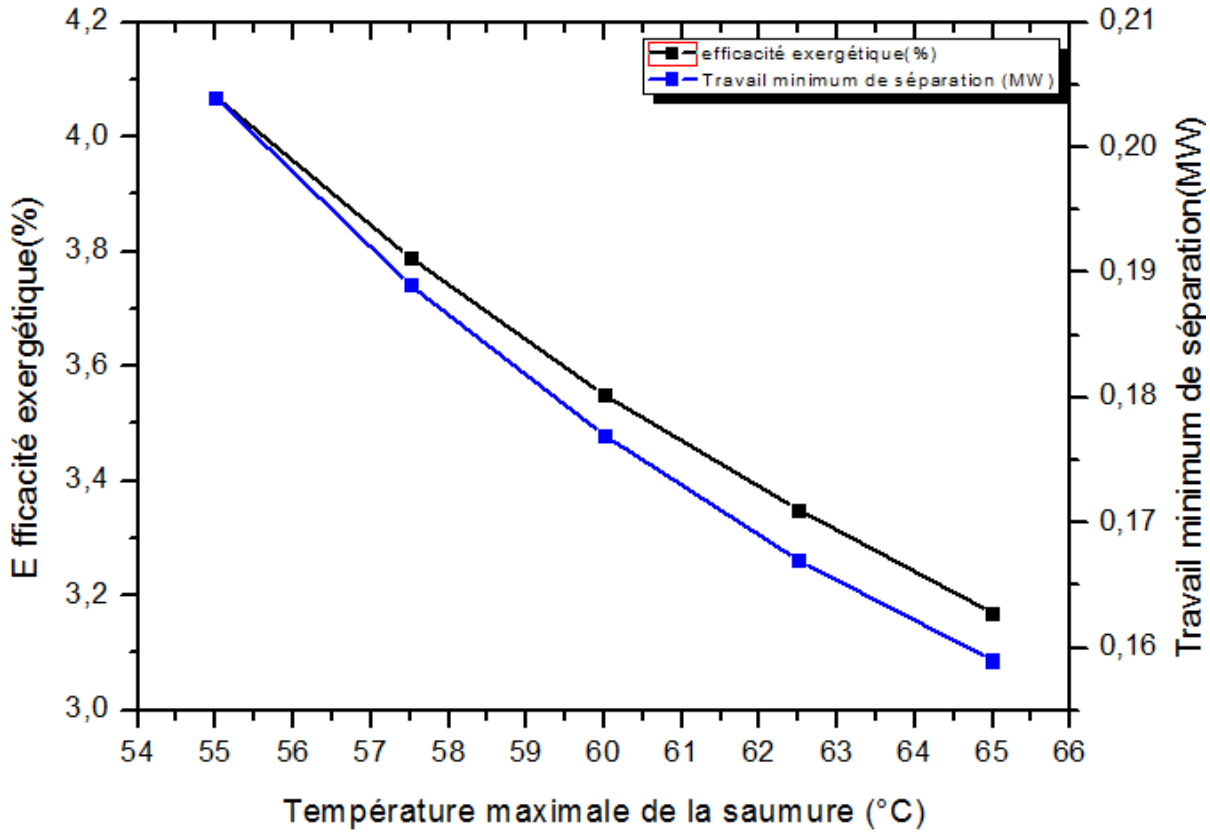


Figure (IV.8) Influence de la température maximale de la saumure sur l'efficacité exergétique et le travail minimum de séparation

La température maximale de la saumure (TBT) est un paramètre important pour la conception et le fonctionnement des systèmes de dessalement thermique car elle définit l'énergie thermique requise pour piloter le processus MEDTVC [35]. L'effet du TBT sur l'efficacité exergétique est illustré à la figure (IV.8). Comme on le voit sur cette figure, l'efficacité exergétique de l'usine de dessalement et le travail minimum de séparation diminuent avec des valeurs de TBT plus élevées en raison des valeurs croissantes du débit massique de vapeur de chauffage. Par conséquent, la vapeur à basse température pourrait être utilisée pour augmenter l'efficacité exergétique.

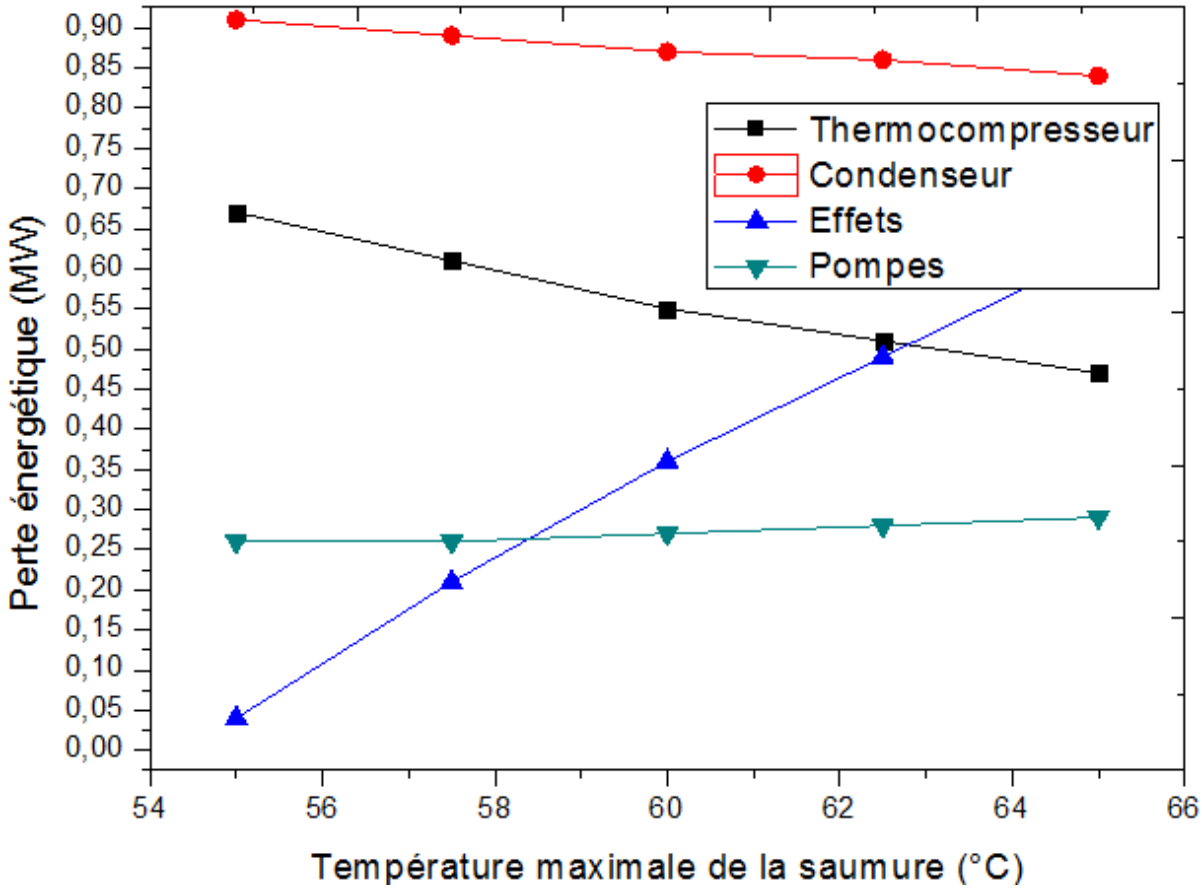


Figure (IV.9) Influence de la température maximale de la saumure sur les pertes énergétiques des composants

La figure (IV.9) montre les pertes énergétiques des composants du système MED-TVC en fonction du TBT. On peut voir sur cette figure que les pertes d'énergie dans les effets augmentent avec l'augmentation du TBT, en raison de l'augmentation de la différence de température qui entraîne une augmentation de la chaleur sensible du flux d'alimentation augmentant le transfert de chaleur. Cependant, les pertes d'énergie du condenseur et du thermo-compresseur diminuent avec l'augmentation du TBT. Ceci est principalement dû à la diminution de la quantité de vapeur produite dans le dernier effet et à l'augmentation du taux d'entraînement, qui réduit la vapeur entraînée et la quantité de vapeur générée vers le condenseur, entraînant une diminution du taux de transfert de chaleur.

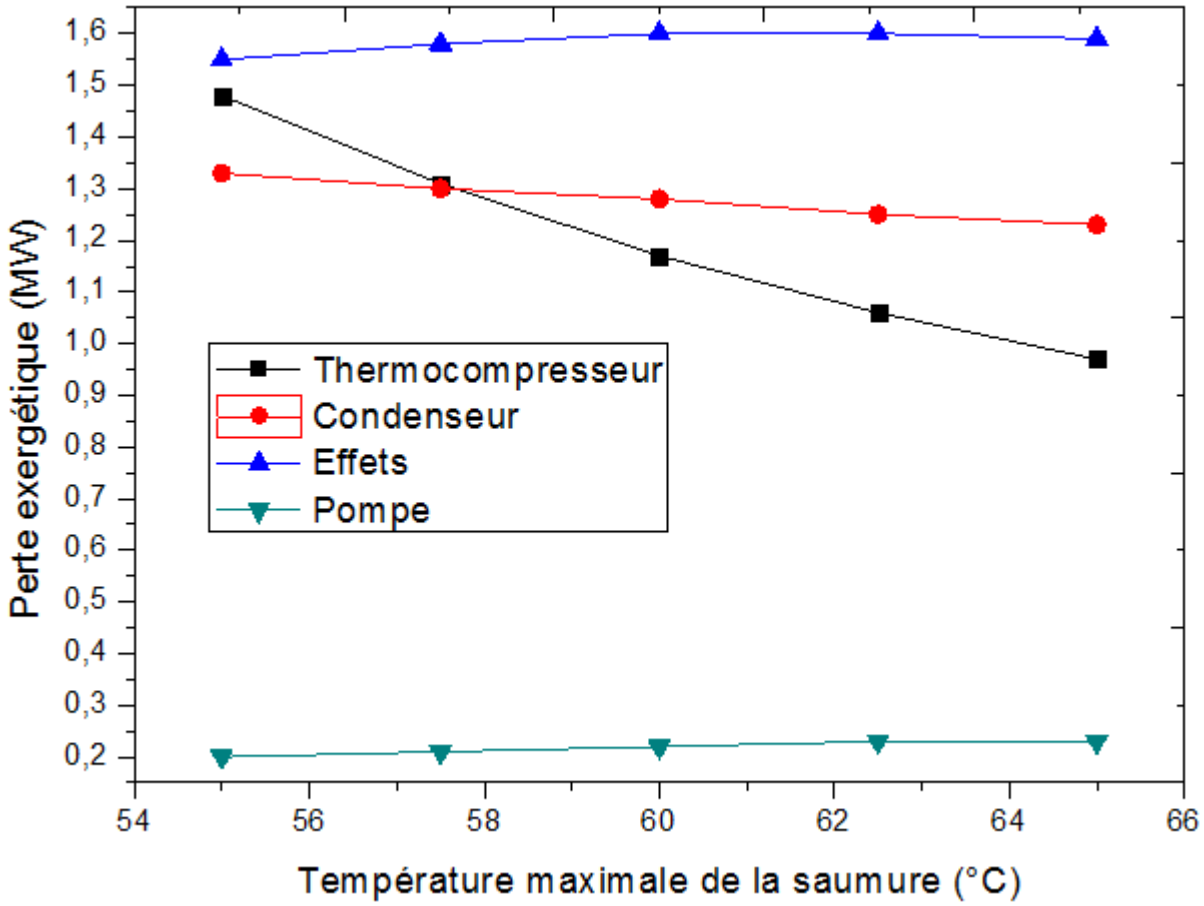


Figure (IV.10) Influence de la température maximale de la saumure sur les pertes exergétiques des composants

Les pertes exergétiques des composants en fonction de la température maximale de la saumure sont représentées sur la figure (IV.10). Les résultats obtenus ont montré qu'une augmentation du TBT entraîne une augmentation des pertes exergétiques dans les effets dus à l'utilisation d'une exergie à faible déchet. Les pertes d'exergie dans le condenseur et le thermo-compresseur diminuent avec l'augmentation du TBT en raison de la diminution de l'exergie produite dans le dernier effet, ce qui réduit la quantité d'exergie générée dans le thermo-compresseur et le condenseur.

La figure (IV.11) montre l'impact de la température maximale de la saumure sur l'énergie totale spécifique et les pertes exergétiques de l'unité de dessalement MED-TVC. Les résultats montrent que la perte totale d'énergie augmente de 12,27% tandis que la perte totale d'exergie diminue de 12,82% pour le TBT allant de 55 à 65°C. Ceci est principalement dû à

l'augmentation des pertes thermodynamiques dans les effets et à la diminution de la destruction exergétique du thermo-compresseur.

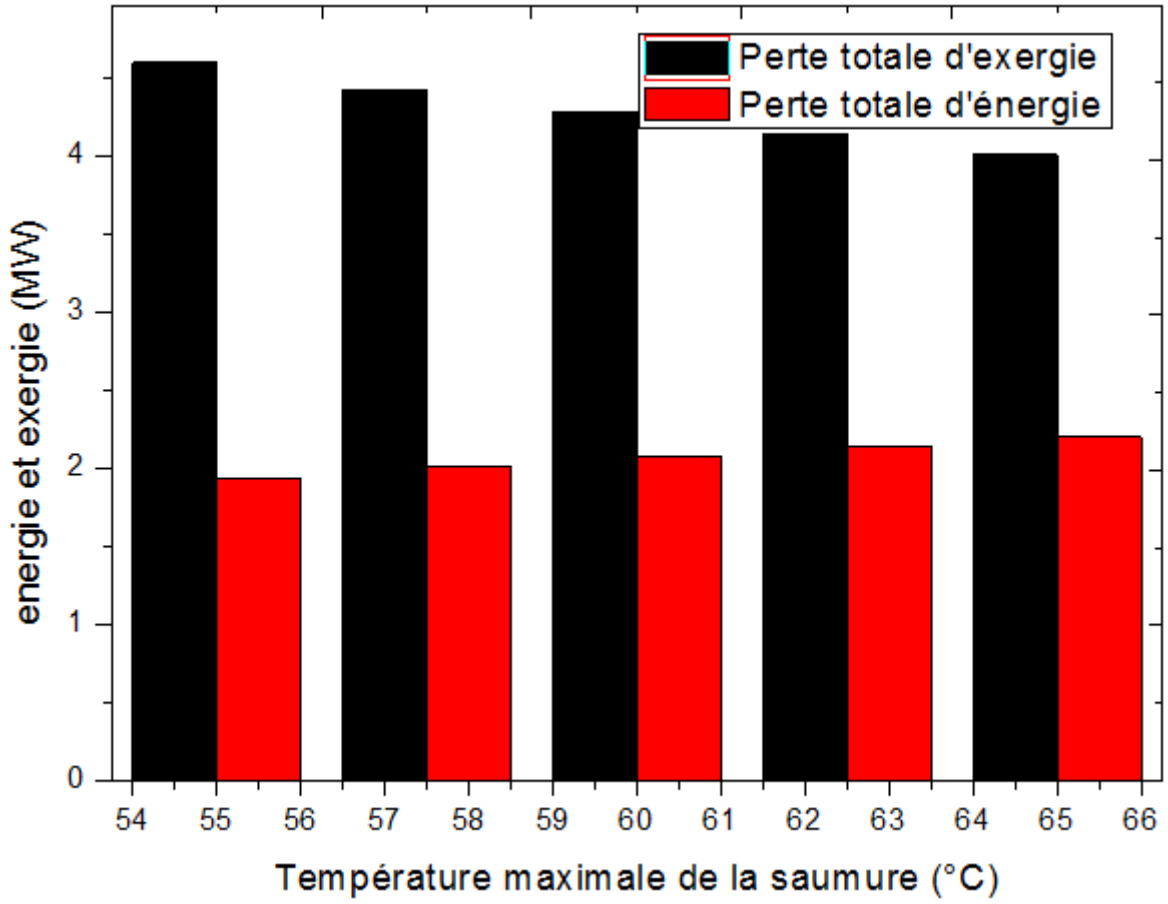


Figure (IV.11) Influence de la température maximale de la saumure sur les pertes énergétiques et exergétiques totales

IV.4.3.2. Nombre d'effets

L'influence du nombre d'effets sur le débit d'eau distillée est illustrée dans la figure (IV.12). Les résultats montrent que les valeurs du débit distillée augmentent avec le nombre croissant d'effets MED-TVC. En effet, une augmentation du nombre d'effets de dessalement entraîne une augmentation de l'évaporation de l'eau saline et une diminution du rejet des eaux usées salines dans l'environnement. Donc, l'augmentation du nombre d'effet se traduit par une augmentation de la zone de transfert de chaleur spécifique montrée à la figure (IV.13).

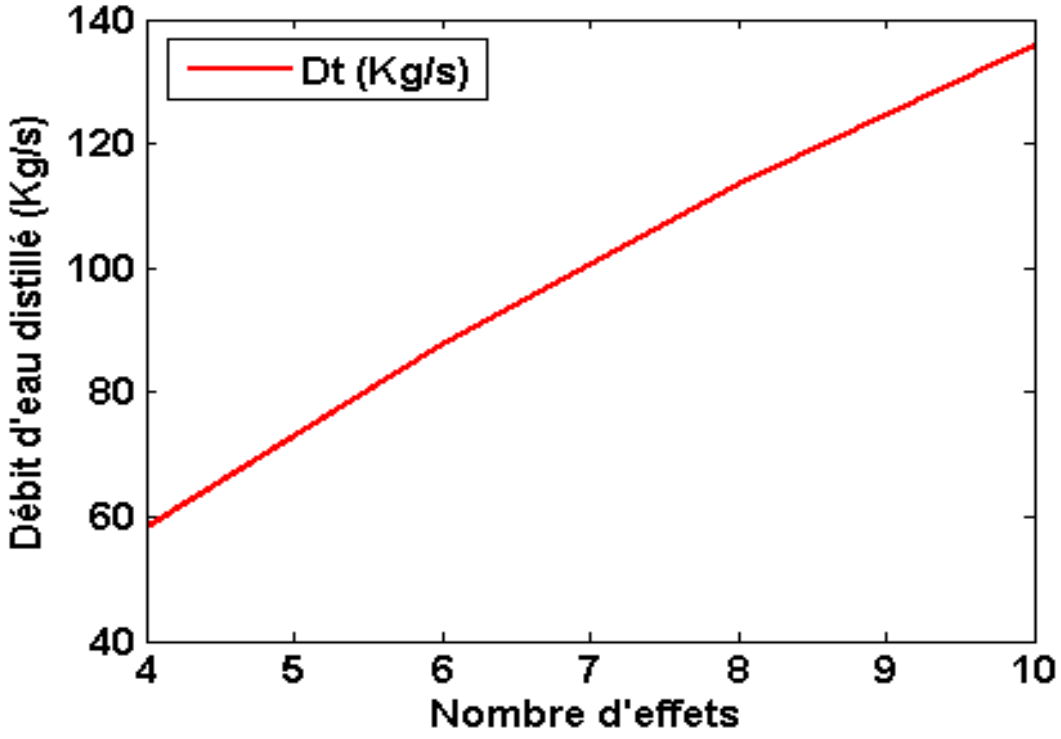


Figure (IV.12) Variation de débit d'eau distillé en fonction de nombre d'effets

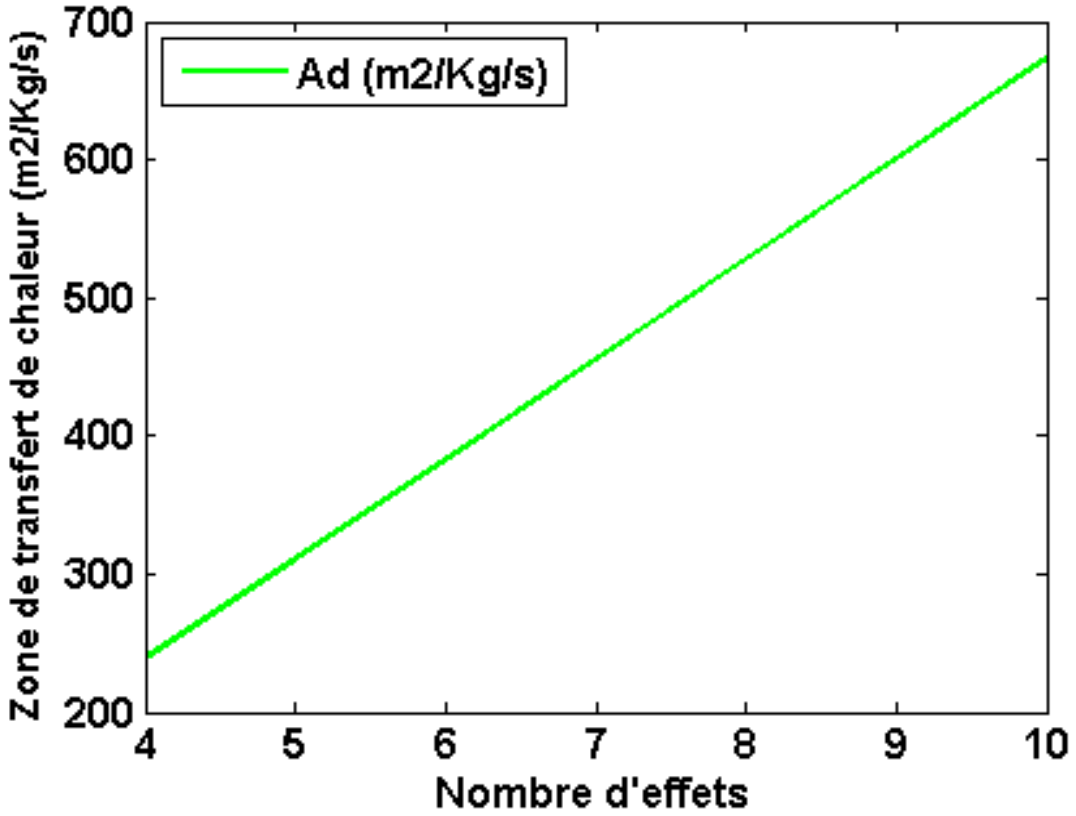


Figure (IV.13) Variation de la surface de transfert de chaleur spécifique en fonction de nombre d'effets

La figure (IV.14) illustre l'impact du nombre d'effet sur la consommation spécifique de l'énergie thermique. On constate qu'une augmentation du nombre d'effet entraine une diminution de la consommation d'énergie. Cette augmentation du nombre d'effet entraîne une augmentation de la zone de transfert de chaleur et l'élévation de la quantité de l'eau évaporé. Donc, une réduction de la quantité de chaleur consommée.

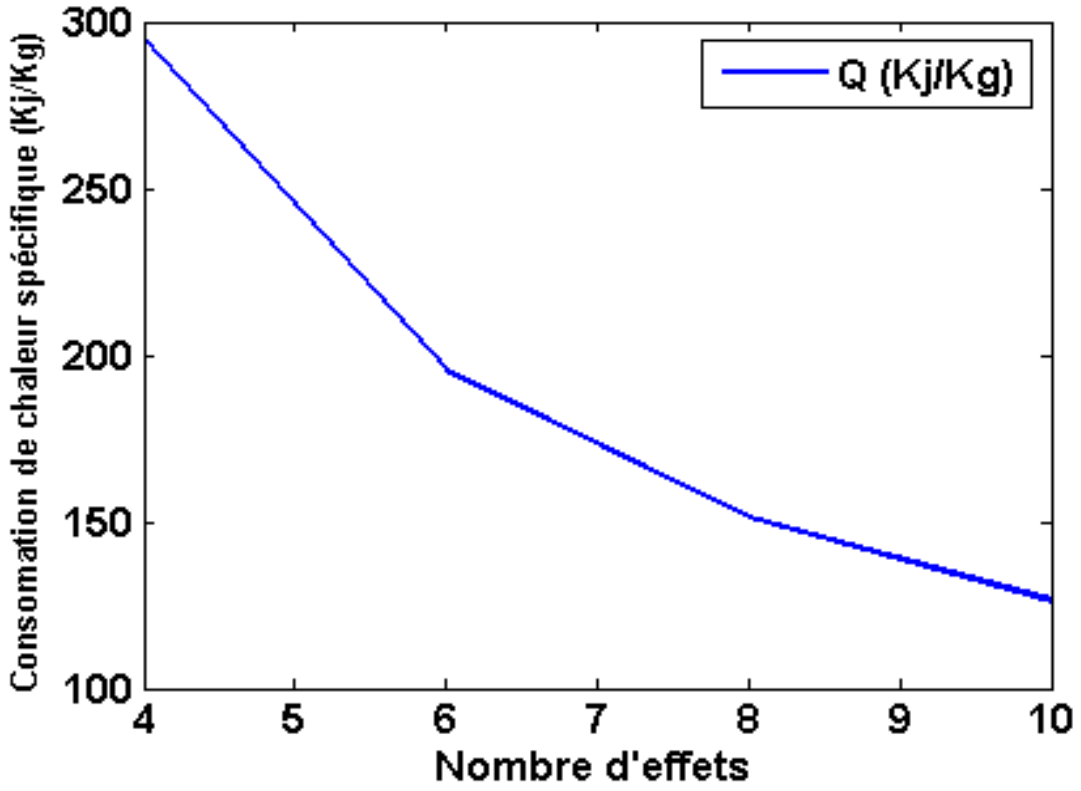


Figure (IV.14) Variation de la consommation de chaleur spécifique en fonction de nombre d'effets

L'influence du nombre d'effets sur le GOR est illustrée par la figure (IV.15). Les résultats montrent que les valeurs de GOR augmentent en fonction du nombre croissant d'effets MED-TVC. En effet, une augmentation du nombre d'effets de dessalement entraîne une augmentation de l'évaporation de l'eau saline et une diminution du rejet des eaux usées salines dans l'environnement avec un débit de vapeur motrice constante.

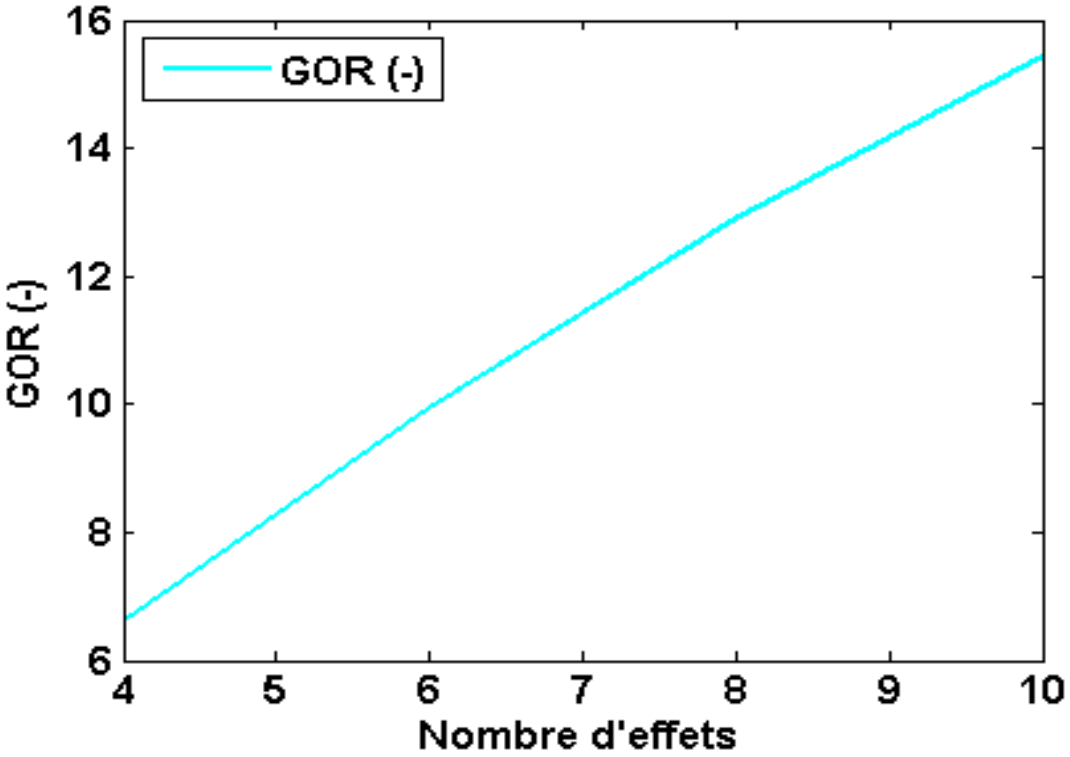


Figure (IV.15) Variation du GOR en fonction du nombre d'effets

Le nombre d'effets est généralement considéré comme l'un des déterminants les plus forts de la performance d'un système MED-TVC [36]. L'impact du nombre d'effets est montré dans la figure (IV.16). On peut voir que l'efficacité exergétique de l'unité de dessalement MED-TVC est plus élevée avec un plus grand nombre d'effets en raison d'une plus grande utilisation de l'exergie des déchets, comme le montre l'augmentation du travail minimum de séparation comme le montre la même figure. L'efficacité exergétique s'améliore d'une valeur moyenne d'environ 54,49 % lorsque le nombre d'étages passe de 4 à 10. Autrement dit, la destruction exergétique totale de l'unité de dessalement diminue lorsque le nombre d'effets augmente malgré la diminution de l'irréversibilité des effets.

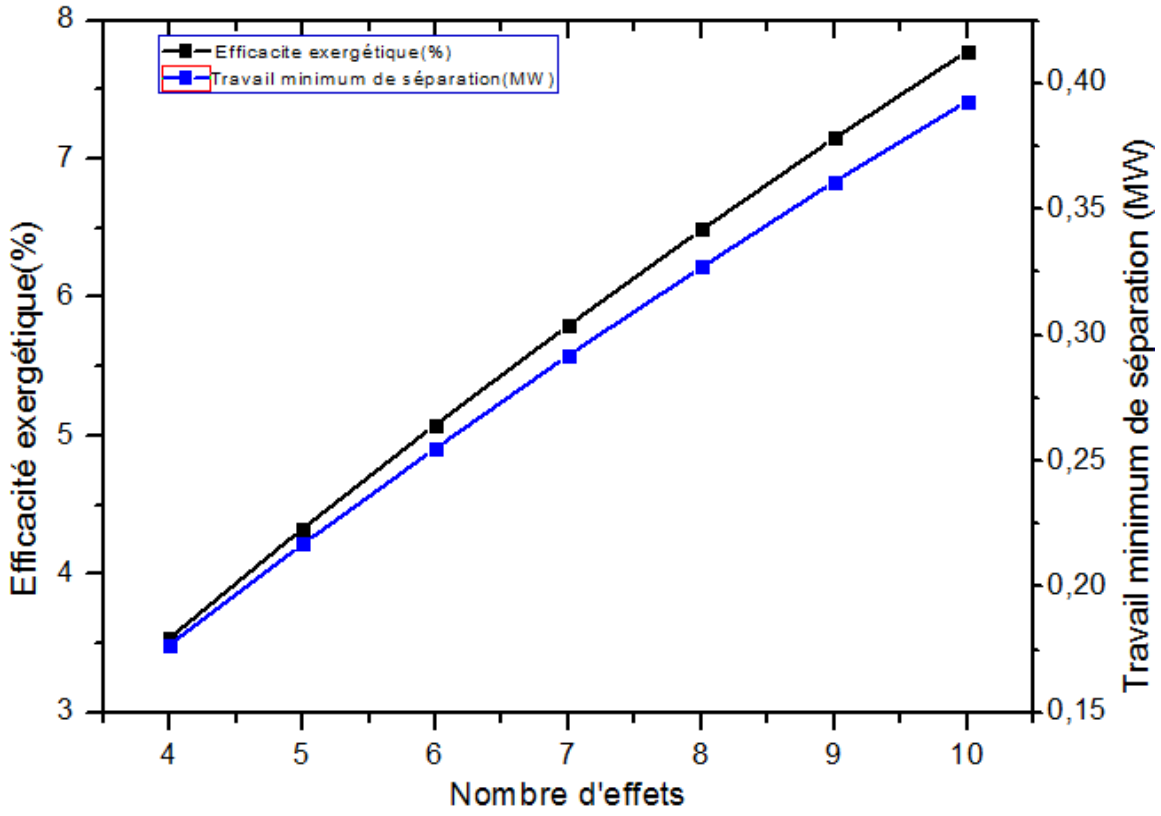


Figure (IV.16) Influence du nombre d'effets sur l'efficacité exergétique et le travail minimum de séparation

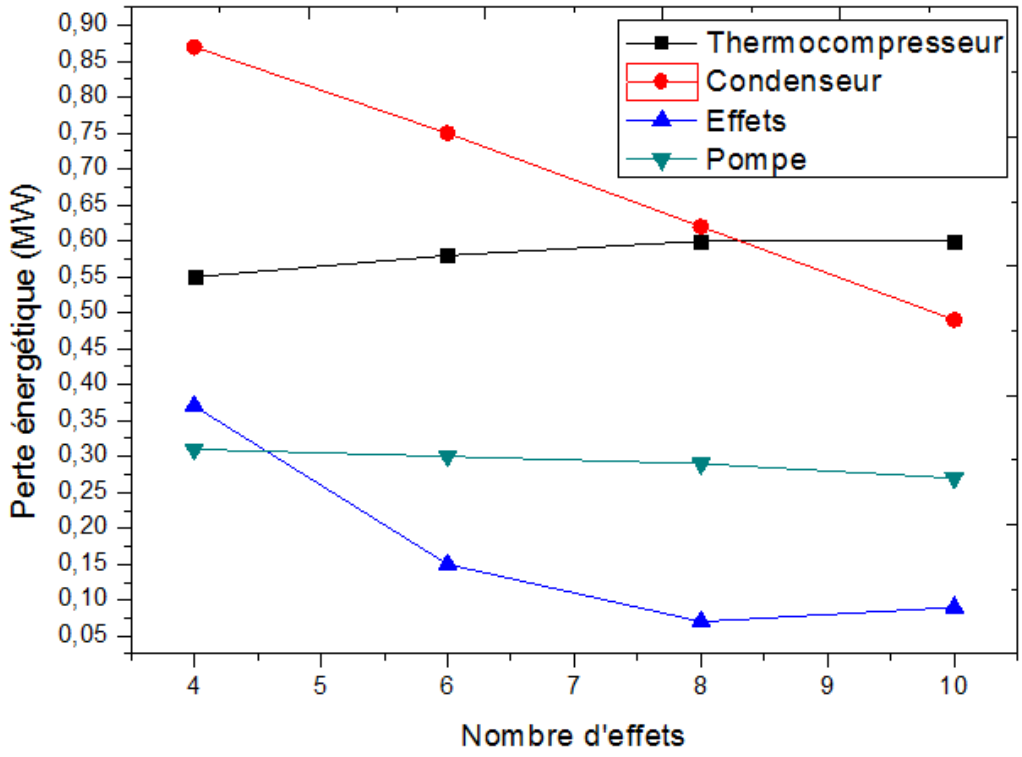


Figure (IV.17) Influence du nombre d'effets sur les pertes énergétiques des composants

La figure (IV.17) montre l'évolution des pertes énergétiques des composants en fonction du nombre d'effets. Évidemment, à mesure que le nombre d'effets augmente, les pertes d'énergie du thermo-compresseur augmentent. Ceci principalement dû à la diminution du taux d'entraînement qui augmente le débit d'entraînement généré vers le thermo-compresseur. Il y a également une diminution des pertes du condenseur à mesure que la charge thermique transférée au condenseur diminue. Les pertes d'énergie dans les effets diminuent avec l'augmentation du nombre d'effets par une augmentation de la différence de température qui diminue le taux de transfert de chaleur.

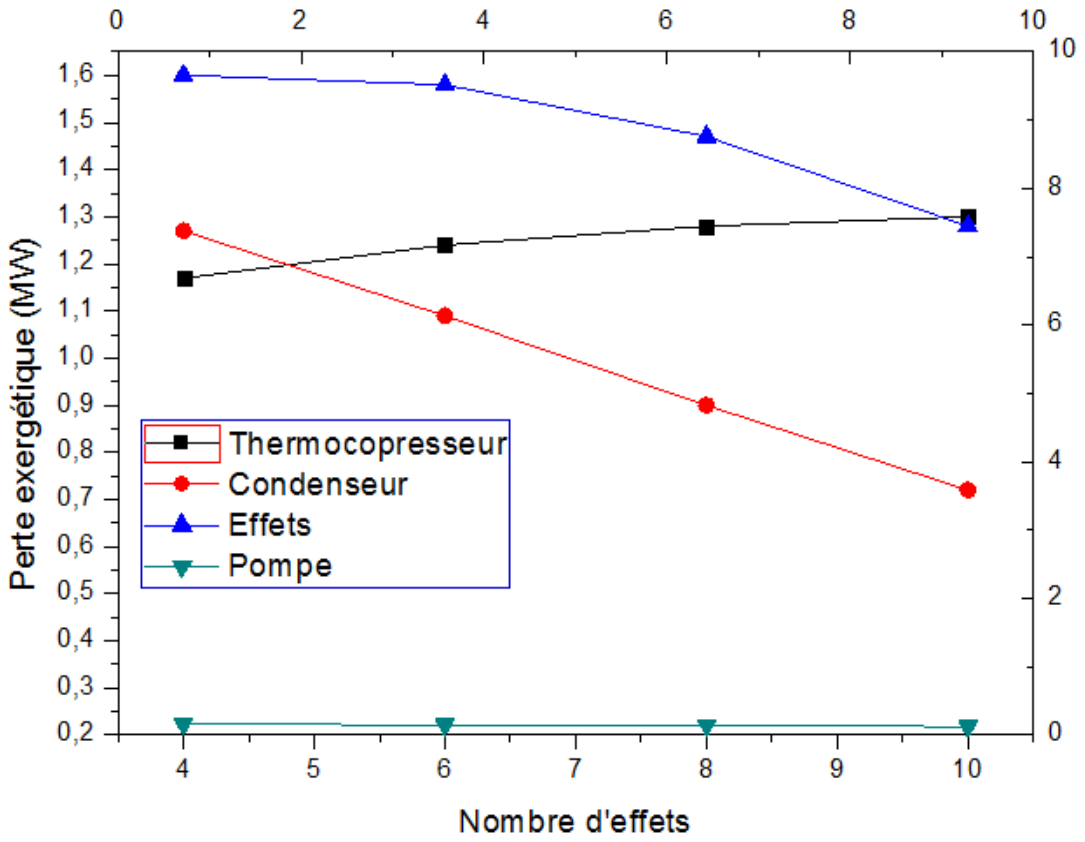


Figure (IV.18) Influence du nombre d'effets sur les pertes exergétiques des composants.

La dépendance des pertes exergétiques des composants MED-TVC sur le nombre d'effets est montrée dans la figure (IV.18). Les résultats montrent que, pour un grand nombre d'effets, les pertes exergétiques dans les effets diminuent en raison du niveau élevé d'exergie des déchets. De plus, les pertes d'exergie dans le condenseur diminuent à mesure que la quantité d'exergie transférée au condenseur diminue. Cependant, les pertes exergétiques du thermo-compresseur augmentent avec l'augmentation du nombre d'effets en raison de la plus grande destruction d'exergie générée dans le thermo-compresseur.

La figure (IV.19) illustre l'impact du nombre d'effets sur l'exergie totale et les pertes énergétiques de l'unité de dessalement MED-TVC. Comme décrit dans cette figure, à mesure que le nombre d'étages passait de 4 à 10, les taux d'exergie et de pertes d'énergie sont tombés à des valeurs d'environ 17,52 % et 27,4 % respectivement.

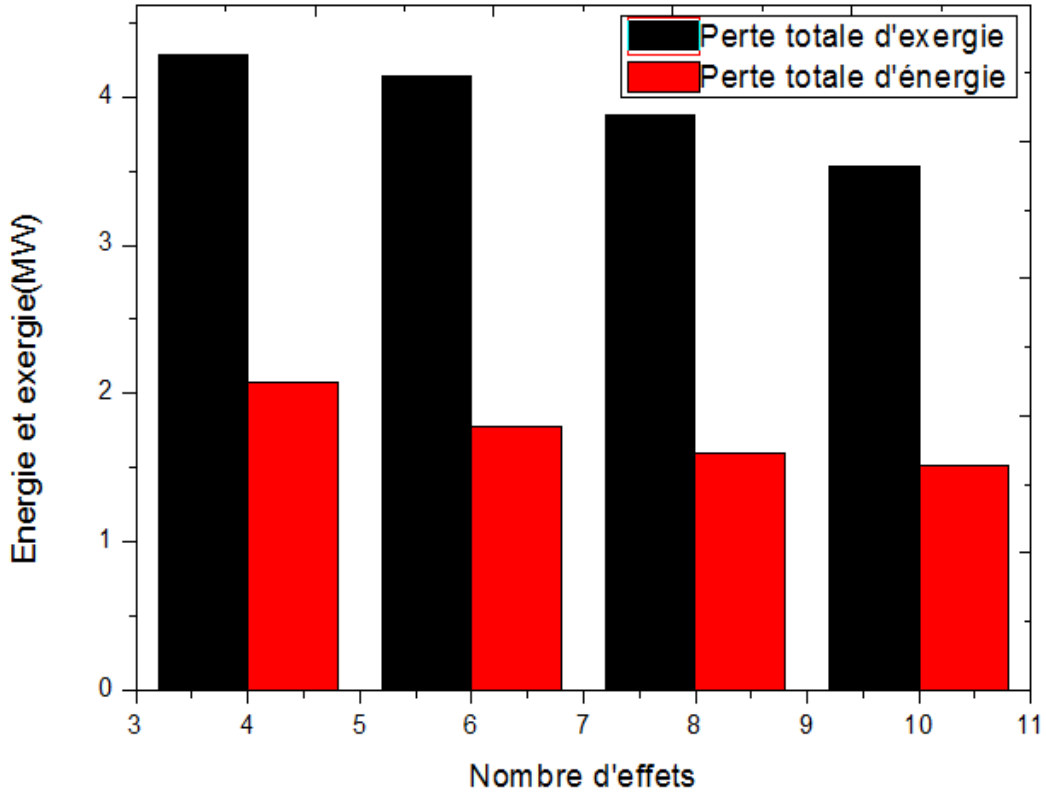


Figure (IV.19) Influence du nombre d'effets sur les pertes énergétiques et exergétiques totales

IV.4.3.3. Débit de vapeur motrice

L'influence du débit de vapeur motrice sur le débit d'eau distillée est représentée à la figure (IV.21). Les résultats montrent que le débit d'eau distillée augmente en fonction de l'augmentation de débit de vapeur motrice. Sachant qu'une augmentation du débit de vapeur motrice (Dm) entraine une augmentation de l'évaporation de l'eau saline et l'augmentation de la vapeur entrainée (Dev) vers l'éjecteur à un rapport d'entrainement constant (Ra). Ainsi, une augmentation de la quantité d'eau distillée. Par conséquent, une diminution de la zone de transfert de chaleur comme illustrée à la figure (IV.21).

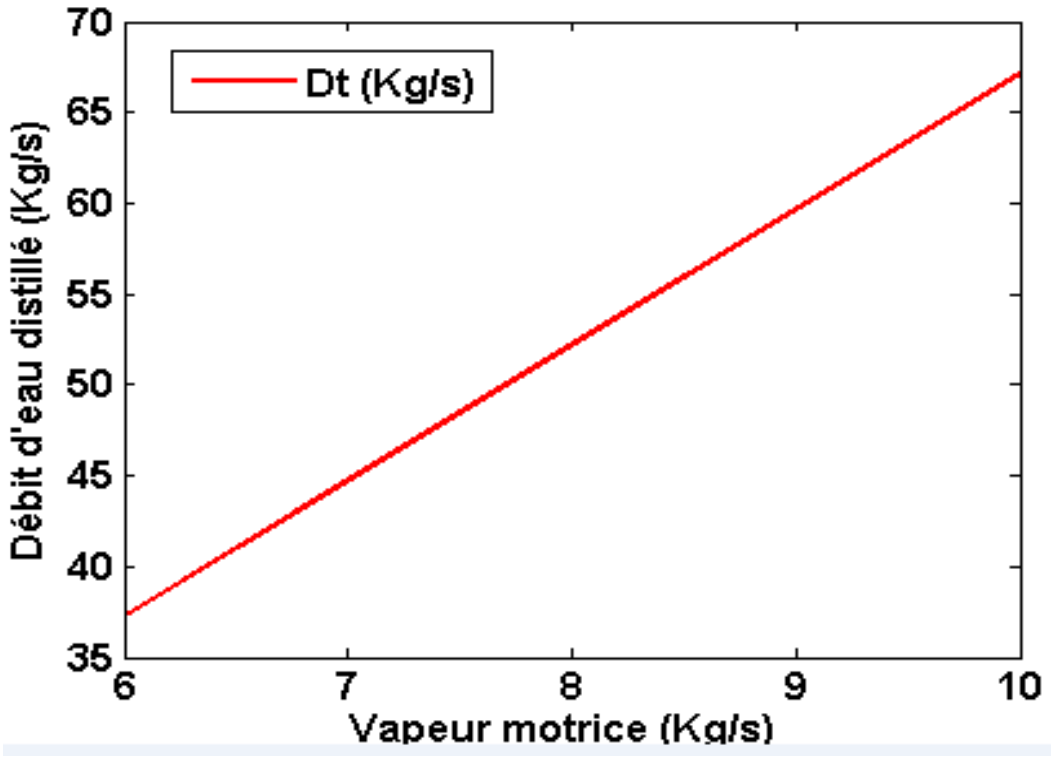


Figure (IV.20) Variation du débit d'eau distillé en fonction du débit de vapeur motrice

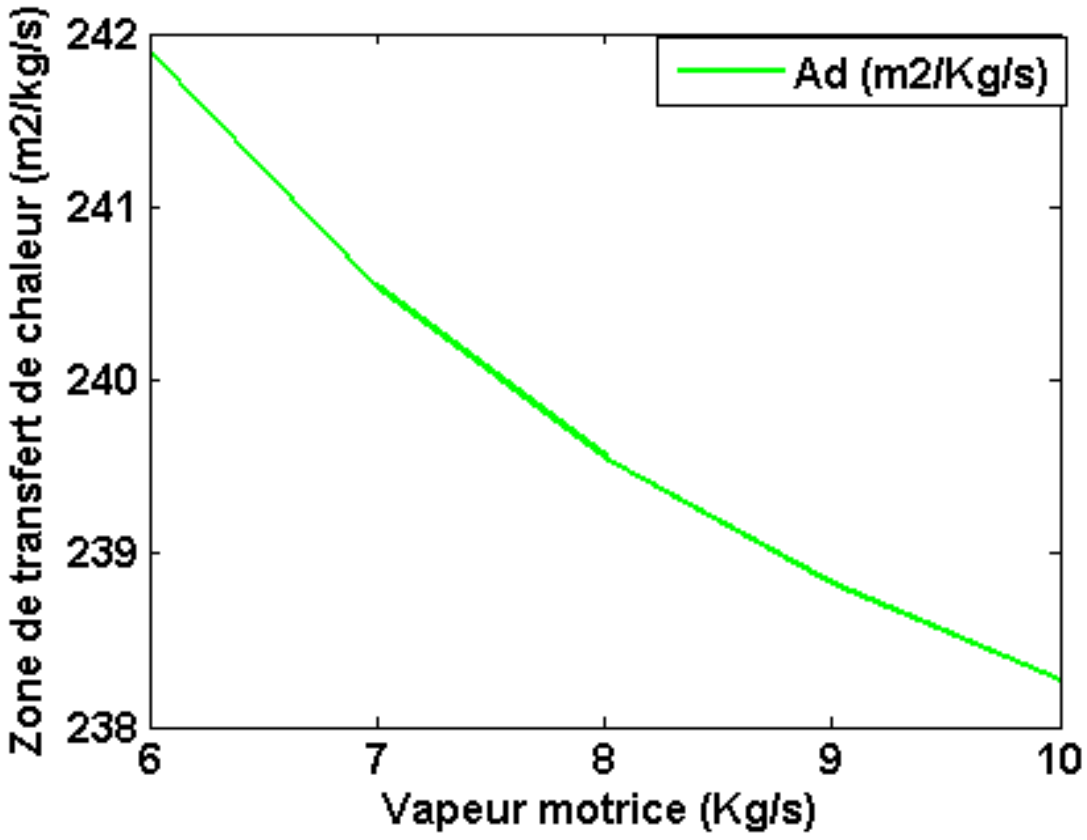


Figure (IV.21) Variation de zone de transfert de chaleur en fonction du débit vapeur motrice

La figure (IV.21) montre l'effet du débit de vapeur motrice sur la consommation spécifique de l'énergie thermique. On constate qu'une augmentation du débit entraîne une diminution de la consommation d'énergie. Cela est dû au fait qu'une augmentation du débit entraîne une augmentation de la température de l'alimentation et une diminution de la chaleur de vaporisation.

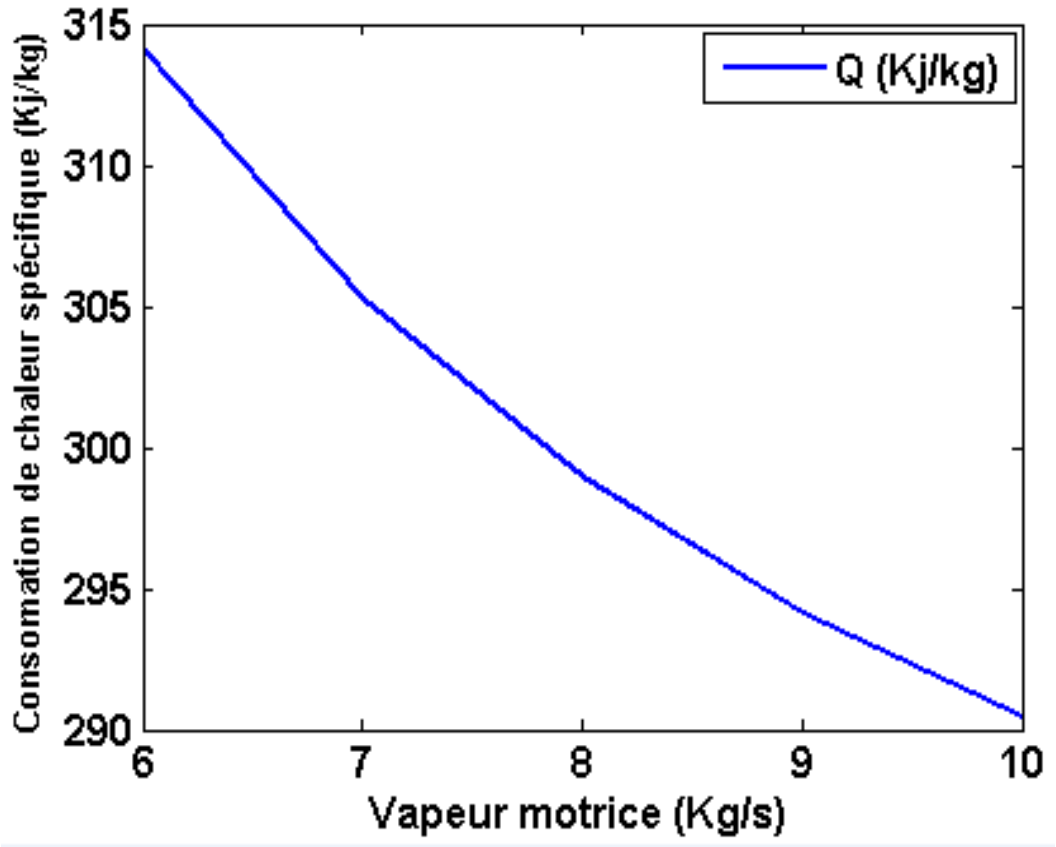


Figure (IV.22) Variation de consommation de chaleur spécifique en fonction du débit vapeur motrice

La variation du GOR en fonction du débit de vapeur motrice est illustrée sur la figure (IV.23). Les valeurs du GOR augmentent avec l'augmentation du débit car une augmentation du débit entraîne une augmentation de la quantité d'eau distillée et une diminution de la consommation thermique. Ainsi, les valeurs du GOR augmentent.

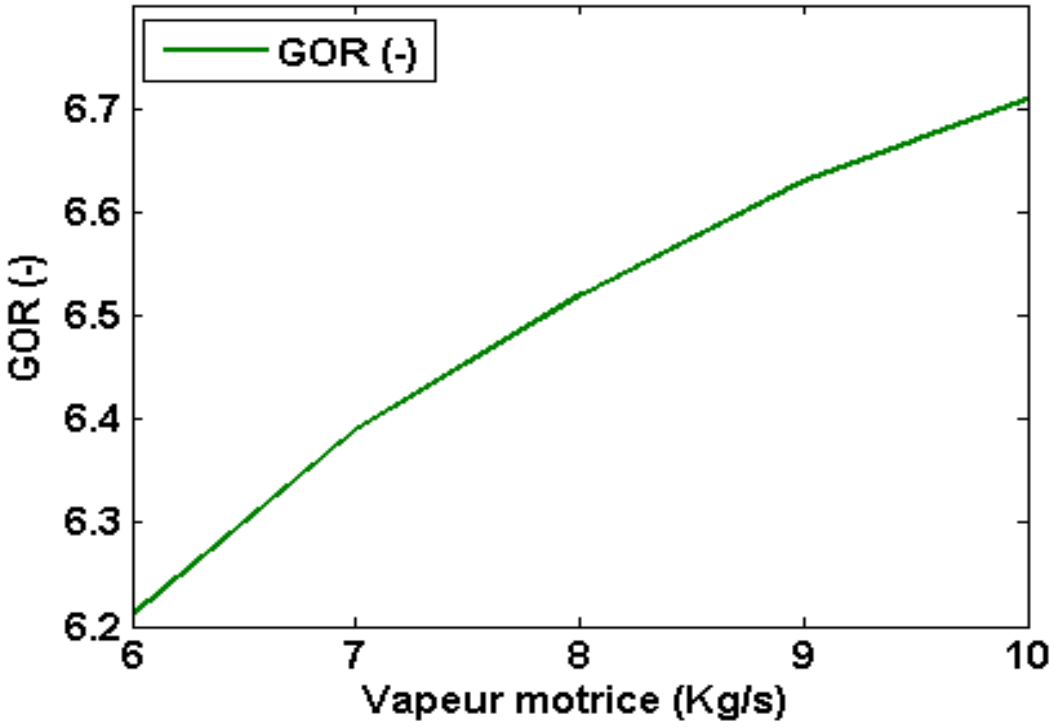


Figure (IV.23) Variation du GOR en fonction du débit vapeur motrice

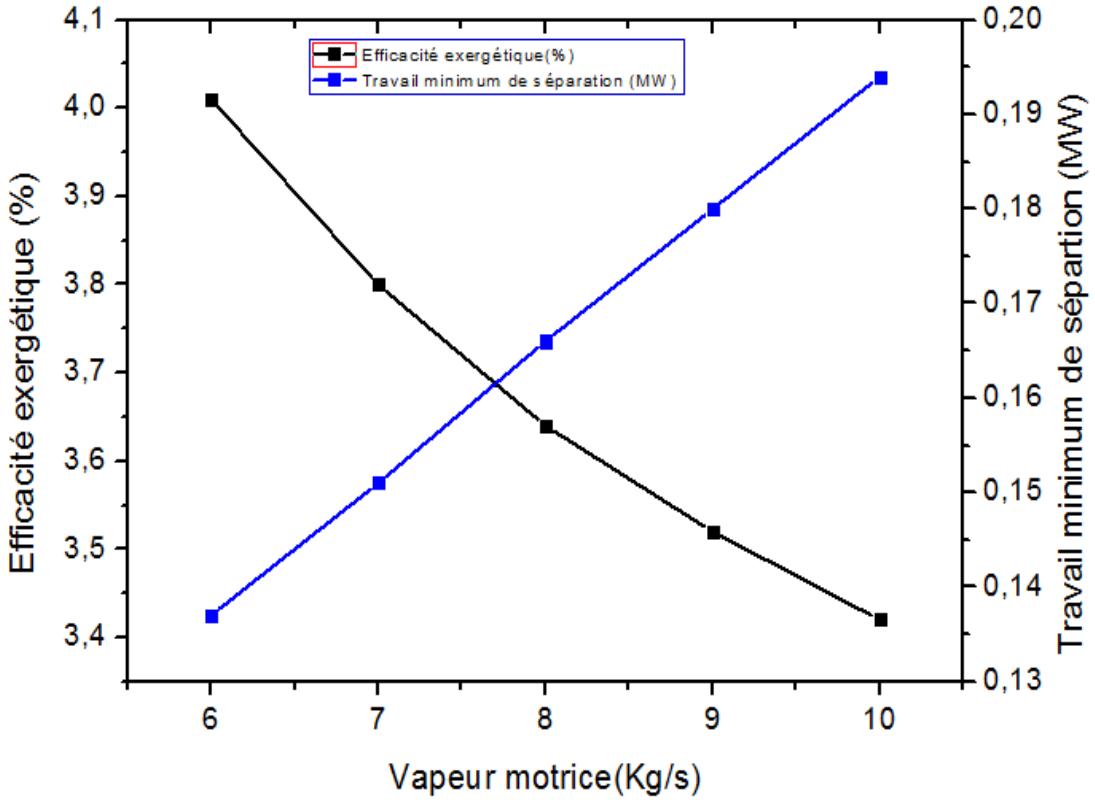


Figure (IV.24) Influence du débit de vapeur motrice sur le rendement exergétique et le travail minimum de séparation

Le débit de vapeur motrice a un effet significatif sur les performances et la capacité des unités de dessalement thermique. L'effet de la variation du débit de vapeur motrice sur les performances du système MED-TVC est illustré à la figure (IV.24). Un débit de vapeur motrice élevé entraîne une diminution de l'efficacité exergétique du fait de l'augmentation du débit exergique du flux de chauffage et de l'utilisation de déchets à faible exergie, conduisant à une légère augmentation du travail minimum de séparation.

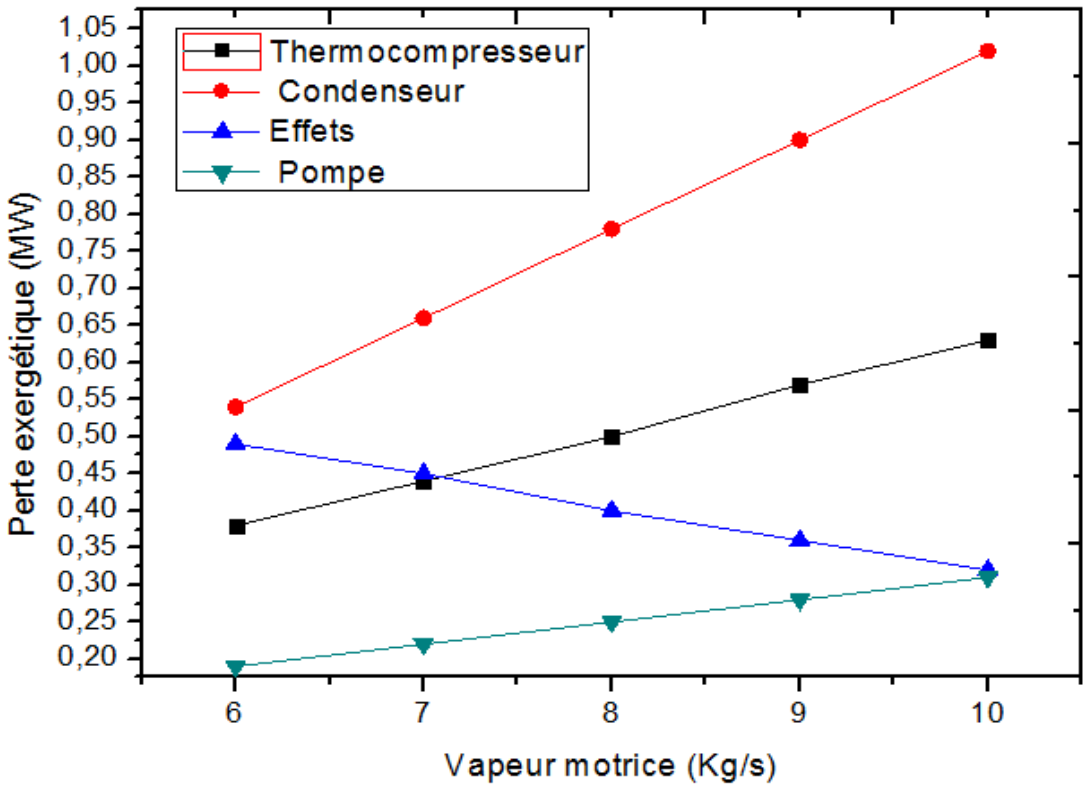


Figure (IV.25) Influence du débit de vapeur motrice sur les pertes énergétiques des composants

La figure (IV.25) montre les pertes d'énergie des composants du système en fonction du débit de vapeur motrice. Les résultats indiquent que les pertes d'énergie dans les effets diminuent avec l'augmentation du débit de vapeur motrice en raison de l'augmentation de la quantité d'eau évaporée de l'eau d'alimentation qui augmente la production d'eau dans les effets et diminue le débit de sortie. Les pertes d'énergie dans le thermo-compresseur et le condenseur augmentent avec l'augmentation du débit de vapeur motrice en raison de l'augmentation de la vapeur produite dans le dernier effet à un rapport d'entraînement constant. Ceci augmente par conséquent la quantité de vapeur générée vers le condenseur et le thermo-compresseur et conduit ainsi à une augmentation du taux de transfert de chaleur.

Les pertes d'énergie des composants en fonction du débit de vapeur motrice sont illustrées sur la figure (IV.26). Les résultats montrent que pour un débit élevé de vapeur motrice, les pertes exergétiques dans les effets augmentent en raison d'une faible utilisation des déchets exergétiques par rapport à l'augmentation de l'exergie de chauffage du système. Les pertes d'exergie dans le condenseur et le thermo-compresseur augmentent en raison d'une augmentation de la quantité d'exergie d'entraînement générée vers le condenseur et l'éjecteur.

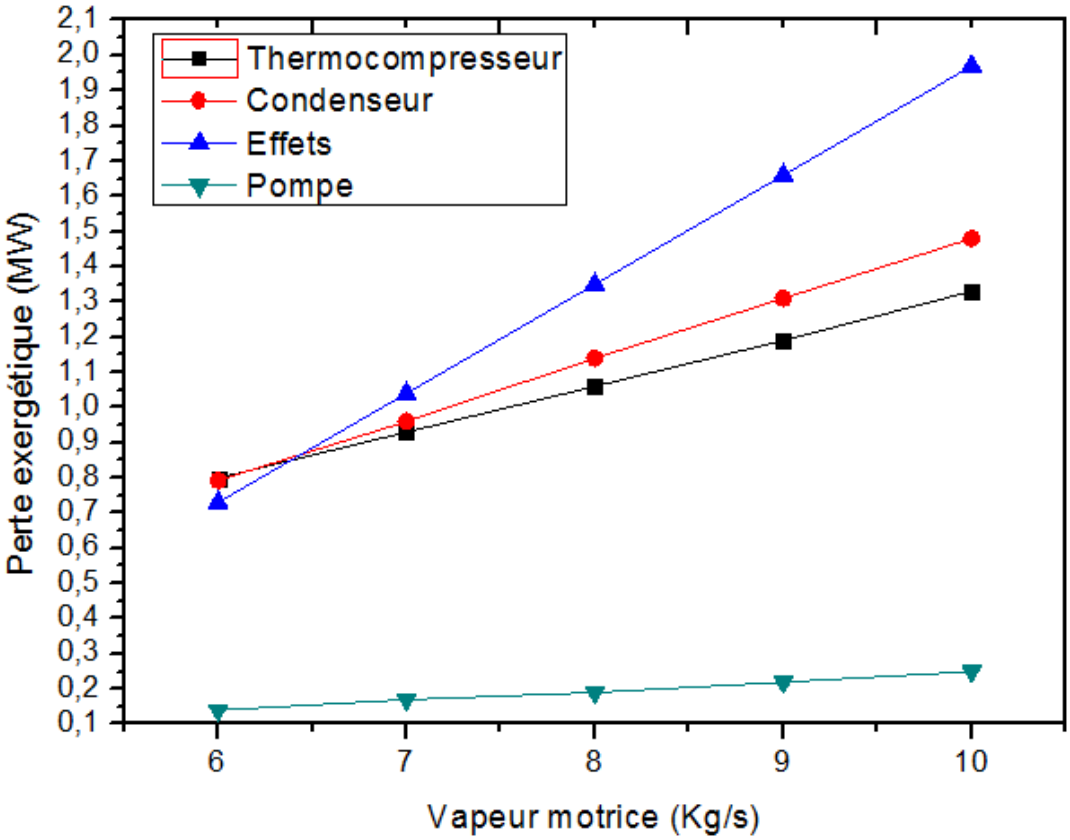


Figure (IV.26) Influence du débit de vapeur motrice sur les pertes exergétiques des composants

La figure (IV.27) montre l'effet du débit de vapeur motrice sur l'exergie totale et les pertes d'énergie de l'unité de dessalement MED-TVC. On peut voir sur cette figure que les valeurs des pertes d'énergie et d'exergie ont augmenté de 11,68 % et 12,47 %, respectivement, alors que le débit de vapeur motrice passait de 6 à 10 kg/s.

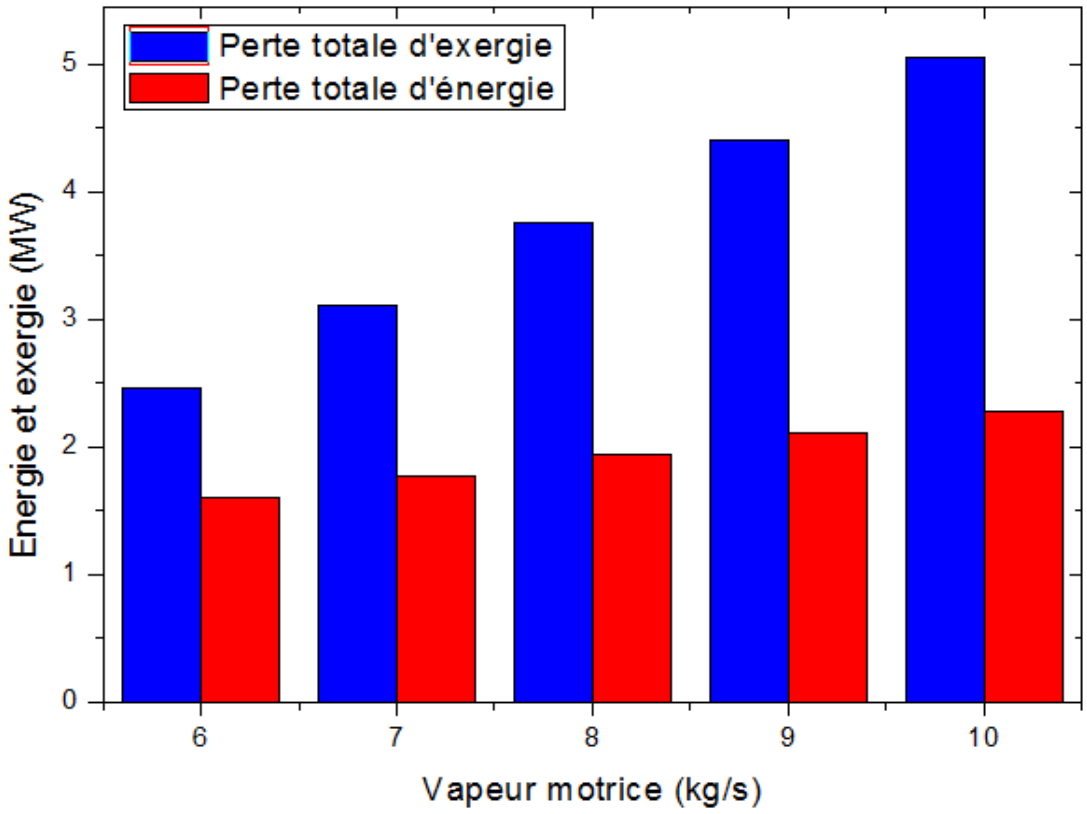


Figure (IV.27) Influence du débit de vapeur motrice sur les pertes exergétiques et énergétiques totales

CHAPITRE V

Modélisation et analyse exergétique du système de cogénération PWR-ME-TVC-MED

V.1.Introduction

Ce chapitre est consacré à la description du système de cogénération proposé. Afin d'évaluer les performances du système étudié, un modèle numérique a été développé sous MATLAB à partir d'un ensemble d'équations mathématiques linaires implicites générées par la combinaison de la loi du bilan massique, les lois de la thermodynamique (la 2ème loi a été utilisée pour définir l'exergie dans le but de révéler les contributions des composants). Les propriétés thermodynamiques de l'eau de mer ont été sélectionnées selon les dernières données publiées et validées dans la littérature. L'analyse énergétique et éxergétique ont été mises en œuvre sur la base de la première et la deuxième loi de la thermodynamique dans le but d'évaluer l'irréversibilité de la plante et du sous-système.

V.2. Description du système proposé

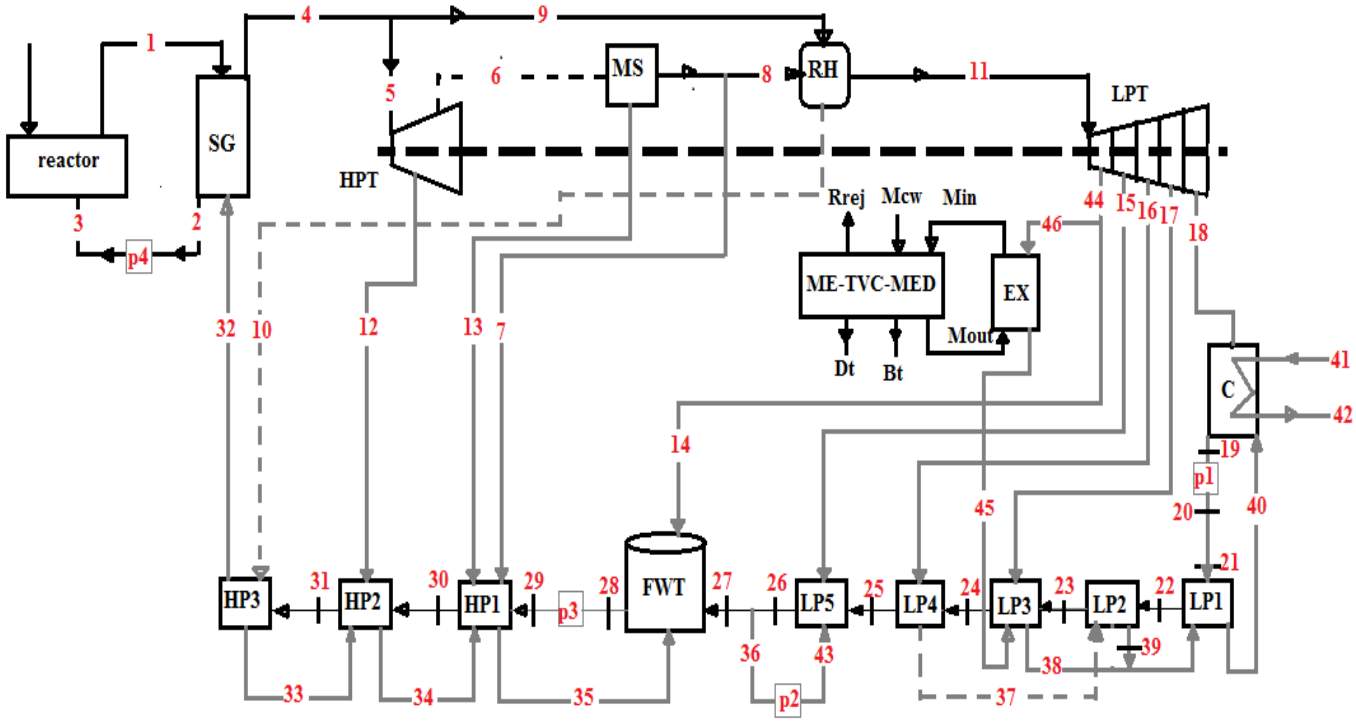


Figure (V.1) schématique du système hybride PWR-ME-TVC-MED [56].

Le système proposé de cogénération pour la production simultanée d'eau et d'électricité (Figure(V.1))comporte une centrale nucléaire (d'Angra (II)) située brizil de puissance nominale de 1300 kW couplée directement à une unité de dessalement par distillation à multiples effets (d'Al-Jubail) qui est située dans le royaume d'Arabie saoudite

(KSA) a une capacité d'environ 104 MIGD, à partir des données opérationnelles réelles. La Figure (V.1) illustre un organigramme schématique de système de cogénération PWR-ME-TVC-MED.

V.2.1. Centrale nucléaire

La centrale nucléaire proposée est une centrale nucléaire équipée d'un réacteur àeau sous pression (PWR). Un réacteur de puissance thermique de 3855 MWth est utilisé pour générer la puissance nominale de 1300 MWe, fonctionnant dans les conditions météorologiques locales du Brésil. Le tableau (V.1) représente les données techniques de cette centrale.

Tableau (V.1) Données techniques de la centrale nucléaire

Réacteur	
Température d'entrée de l'eau de refroidissement (modérateur)	291.7 C°
Température de sortie de l'eau de refroidissement (modérateur)	324.9 C°
Liquide de refroidissement	H_2 O
Débit de liquide de refroidissement	19643.8 Kg/s
Pression	157 bar
Nombre de cycle de refroidissement	4
Générateur de vapeur	
Température de l'eau d'entrée (caloporteur)	211.13 C°
Température de l'eau de sortie (caloporteur)	282.3 C°
Pression d'entrée	66.07 bar
Pression de sortie	66.41 bar
Débit d'eau	2069.35 Kg/s
Nombre	4
Condenseur	
Température de l'eau de refroidissement d'entrée (l'eau de mer)	25 C°
Température de l'eau de refroidissement de sortie (l'eau de mer)	35 C°
Débit d'eau de refroidissement	61728.34

V.2.2. Usine de dessalement ME-TVC-MED

L'usine de dessalement d'Al-Jubail ME-TVC-MED se compose de 16 blocs. La Figure (V.2) présente un diagramme schématique d'un seul bloc composé de deux unités ME-TVC intégrées à une unité MED conventionnelle. Chaque bloc a une capacité d'environ 6,5 MIGD, avec des données de performances telles que présentées dans le tableau (V.2). Chacune des deux unités ME-TVC identiques et parallèles a quatre effets, tandis que l'unité MED conventionnelle a également quatre effets, comme indiqué sur la Figure (V.2). En raison de leur comportement thermique identique, les deux unités ME-TVC sont considérées comme ayant globalement quatre effets, et lorsqu'elles sont intégrées aux quatre effets de l'unité MED, nous avons un total de huit effets pour un seul bloc complet comme indiqué dans le tableau (V.2).

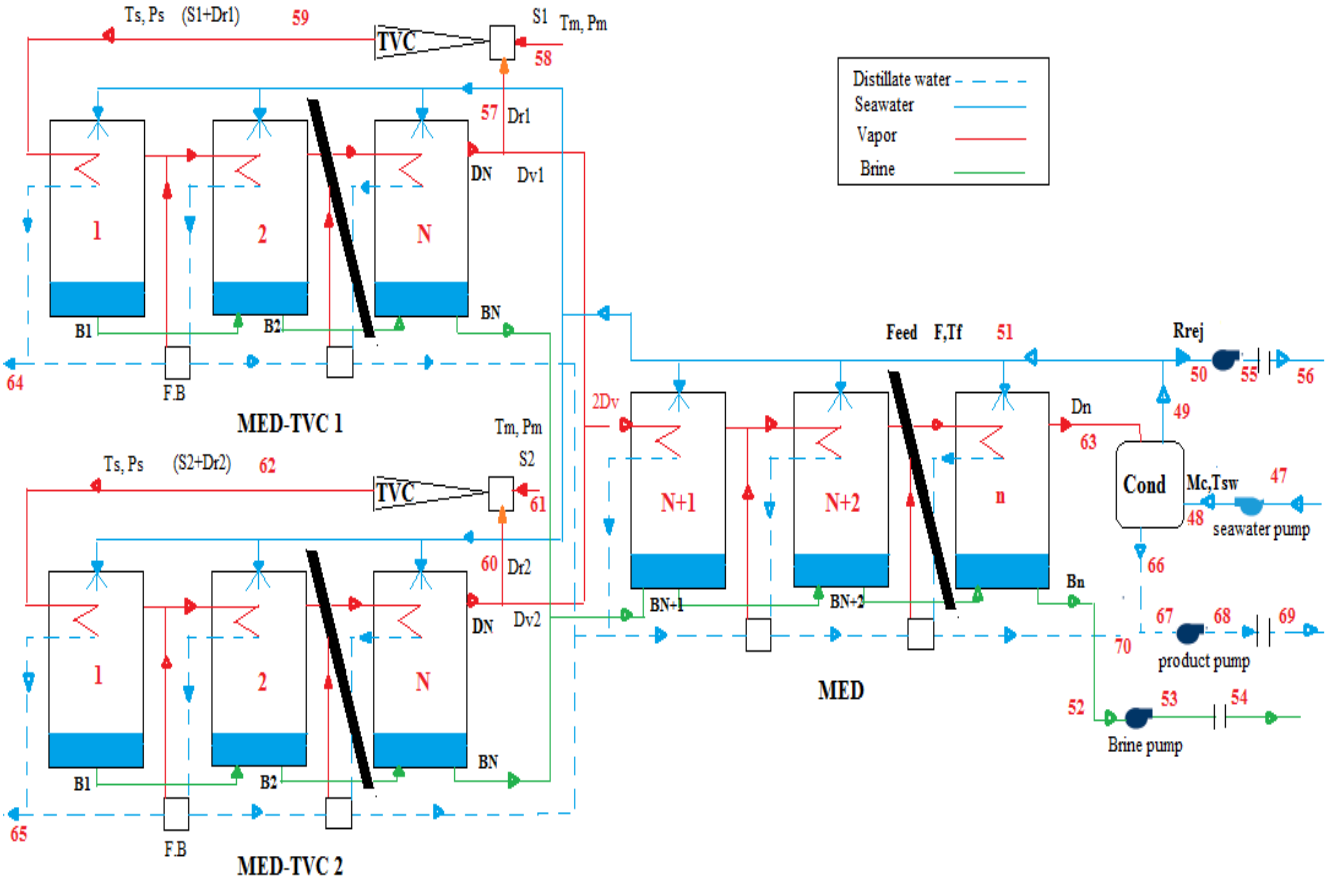


Figure (V.2) Diagramme de flux de processus schématique du système ME-TVC-MED [104].

Tableau (V.2) Caractéristiques techniques de l'unité de dessalement ME-TVC-MED.

Paramètre	**Valeur**	**Unité**
Température de l'eau de mer, T_{cw}	25	C°
Température de l'eau de mer d'alimentation, T_f	35	C°
Nombre d'effets, n	8	-
Débit de vapeur motrice, S	17.5	Kg/s
Température maximale de la saumure, T_1	65	C°
Minimum brine temperature, T_n	40	C°
Pression de vapeur motrice, P_m	101.31	Kpa
Salinité de l'eau d'alimentation, X_f	39000	Ppm

V.2.3. Description du système

En se référant à la Figure (V.1), cette centrale consiste en trois cycles principaux comprenant les cycles primaires, secondaires et tertiaires. Dans le cycle primaire, quatre cycles de refroidissement similaires (un réacteur et quatre générateurs de vapeur, quatre pompes et quatre pressuriseurs), contient un fluide caloporteur qui est l'eau. Ce circuit est toujours maintenu sous pression pour empêcher la vaporisation du fluide caloporteur à la température de fonctionnement du réacteur. Le pressuriseur est un composant de la boucle qui maintient la pression de la boucle de liquide de refroidissement. Au cours du cycle primaire, l'énergie thermique est dissipée par la réaction de fission du combustible nucléaire au cœur du réacteur. La chaleur générée par la réaction de fission est transférée dans le liquide de refroidissement (eau). Le liquide de refroidissement est recerclé ensuite dans les générateurs de vapeur et évapore le fluide de travail (vapeur) du cycle secondaire. Le circuit secondaire est basé sur un cycle Rankine similaire à celui de la plupart des centrales à vapeur. La vapeur sortante du générateur de vapeur est divisée en deux, une partie de la vapeur de sortie est dirigée vers la turbine HPT, le reste de la vapeur est utilisée pour réchauffer les flux extraits du séparateur d'humidité. La vapeur surchauffée provenant du préchauffeur est dirigée vers la turbine BPT. Enfin, dans le troisième circuit, l'eau de mer refroidit la vapeur, dans le condenseur, après sa sortie de la turbine à basse pression. Ce processus de refroidissement est nécessaire pour garantir tous les processus thermodynamiques de l'installation et comprit le refroidissement du réacteur, la production de vapeur et la production d'électricité. Le flux de sortie à la première ligne d'extraction de la turbine BPT

désigné par le numéro de flux 44 sur la Figure (V.1) est divisé en deux flux en numéros 46 et 14 (voir la figure (V.1)). Le flux numéro 46 est dirigé vers un échangeur de chaleur, à savoir une boucle d'isolation intermédiaire désignée par EX sur la figure (V.1). La chaleur latente du flux numéro 46 est transférée dans le flux d'eau en circulation pour le chauffer (environ 5 ° C). Une partie de cette eau chauffée jaillit dans la chambre de détente, formant la vapeur désignée par Min. Cette vapeur (Min) est utilisée dans les premiers des effets du processus MED-TVC en tant que vapeur motrice. L'échangeur de chaleur EX est utilisé pour empêcher le contact direct entre la vapeur de la centrale de production de PWR et l'eau d'usine de dessalement pour éviter la possibilité d'émission de radioactivité dans l'eau douce. Le flux numéro 46 utilisé pour générer la vapeur motrice de l'installation ME-MED-TVC est condensé dans l'échangeur de chaleur EX et renvoyé au cycle secondaire du PWR sous le numéro 45. Sur la figure (V.1), le système ME- MED-TVC est illustré schématiquement avec une boîte noire. La boîte noire est détaillée dans la Figure (V.2).

L'usine de dessalement extrait la vapeur du flux basse pression de la source de l'échangeur de couplage de la centrale nucléaire avec l'usine de dessalement (EX). La vapeur motrice (Min) se divise en deux parts égales (S1et S2). La vapeur motrice (S) se déplace directement vers le thermo-compresseur dans la section METVC comme le montre la Figure (V.2). La vapeur générée par l'effet final (N) de chaque unité ME-TVC se divise en deux ruisseaux. Le premier flux (Dv) est combiné avec le flux de l'autre unité ME-TVC et avancé vers le premier effet (N+1) de l'unité MED pour démarrer le processus de dessalage à basse température. Le deuxième flux (Dr) dans chaque unité ME-TVC est entraîné et comprimé par le thermo-compresseur, puis mélangé à la vapeur motrice (S) et déplacé vers le premier effet (S+Dr) de l'unité où il est condensé pour répéter le processus. La chaleur latente de condensation est considérée comme la principale source de chaleur pour évaporer une partie de l'eau d'alimentation et de la saumure dans les unités. Le processus d'évaporation dans le premier effet des deux unités ME-TVC dépend du phénomène d'ébullition, mais à la fois de l'ébullition et du flash dans les effets restants. Les vapeurs générées (D) dans les premiers effets de chaque unité MED-TVC sont dirigées vers les deuxièmes effets comme des effets secondaires, agissent comme des sources de chaleur dans l'effet suivant à une pression et une température plus basse. Les saumures chaudes quittant les premiers effets dans chaque unité MED-TVC passent dans les deuxièmes effets par les saumures (B1). Ce processus itératif est répété à travers tous les effets jusqu'aux effets finales (N) de chaque unité MED-TVC.

Le second flux (Dv) est combiné au flux de l'autre unité MED-TVC et dirigé au premier effet de l'unité MED pour démarrer le processus de dessalage à basse température. Ce processus est le même dans l'unité MED-TVC, et répété jusqu'au dernier effet (n) de l'unité MED.

À la fin, la vapeur générée par le dernier effet (n), est dirigé vers le condenseur où elle transfère sa chaleur latente à l'eau de refroidissement Mc et augmente sa température de Tsw à Tf. La partie de cette eau de refroidissement est utilisée comme alimentation pour les divers effets (F) et le reste est renvoyée à la mer (Rrej).

V.3. Modélisation et analyse du système

Le modèle mathématique qui représente l'analyse thermodynamique et exergétique de la cogénération PWR-ME-TVC-MED comprend trois équations principales : Bilan massique, bilan énergétique et bilan exergétique selon la première et la deuxième loi de la thermodynamique [(V.1), (V.2), (V.3)], ces équations sont respectivement.

- La loi du bilan massique pour chaque composant de la centrale :

$$\sum_i (\dot{m}_{in} - \dot{m}_{out}) = 0 \qquad \text{(V.1)}$$

- La première loi de la thermodynamique pour chaque composant de la centrale :

$$\sum_i \dot{m}_i h_i - \sum_e \dot{m}_e h_e - \dot{W} + \dot{Q} = 0 \qquad \text{(V.2)}$$

- Équation du flux exergétique pour chaque composant de la centrale :

$$\sum \dot{Q}\left(1 - \frac{T_0}{T}\right) - \dot{W} + \sum_i \dot{m}_i e_i - \sum_e \dot{m}_e e_e = \dot{S}_g \qquad \text{(V.3)}$$

Pour simplifier l'analyse, certaines hypothèses et caractéristiques du modèle de cogénération développé sont les suivantes :

- Le modèle de système hybride fonctionne en régime permanent.
- Le potentiel et l'exergie cinétique sont négligeables.
- Les pertes de charge dans toutes les canalisations et échangeurs de chaleur sont négligeables.

- Les pertes de chaleur dans les turbines et les pompes sont prises en compte.
- La différence de température entre les effets est égale.
- Le débit d'alimentation dans les effets est le même.
- La capacité thermique spécifique, l'élévation du point d'ébullition (BPE) et d'autres paramètres ont été calculés.
- Le distillat est sans sel.
- Les pertes thermodynamiques ont été étudiées.

V.3.1. Modèle de bilan massique et énergétique

Le bilan massique et énergétique de PWR est représente dans l'annexe D.

Pour évaluer la conservation de la masse et de l'énergie, il est nécessaire de déterminer certains paramètres inconnus, tels que le coefficient de transfert de chaleur et les propriétés physiques de l'eau. Ces équations directrices ont été développées dans le cas de l'usine de dessalement ME-TVC-TVC plus tôt dans le chapitre (IV). Mais il existe quelque des équations différentes de la précédente, et elles sont présentées dans le tableau (V.3).

Tableau (V.3) Équations du bilan massique et énergétique

Equations		**Descriptions**
$B_i = F_i + 2B_{i-1} + D_i$	(V.4)	Bilan massique de l'effet N+1
$B_i = F_i + B_{i-1} + D_i$	(V.5)	Bilan massique de l'effet N+2 à n
$X_i = \frac{F_i}{B_i} \times X_f + \frac{2B_{i-1}}{B_i} \times X_{i-1}$	(V.6)	Bilan de salinité de l'effet N+1
$X_i = \frac{F_i}{B_i} \times X_f + \frac{B_{i-1}}{B_i} \times X_{i-1}$	(V.7)	Bilan de salinité effet N+2 à n
$D_1 = \frac{1}{\lambda_1}\left[(S+D_r)\lambda_s - F_1 \times C_p(T_1 - T_f)\right]$	(V.8)	Vapeur générée lors du premier effet
$D_i = \frac{1}{\lambda_i}[(D_{i-1} + d'_{i-1})\lambda_{i-1} - F_i C_p(T_i - T_f) - B_{i-1}C_p(T_{i-1} - T_i)]$	(V.9)	Quantité de vapeur libérée par la seconde jusqu'à N
$D_{N+1} = \frac{1}{\lambda_{n+1}}[(2D_v)\lambda_N - F_{N+1i}C_p(T_{N+1} - T_f) - 2B_N C_p(T_N - T_{N+1})]$	(V.10)	Vapeur formée dans les effets N+1
$D_i = \frac{1}{\lambda_i}[(D_{i-1} + d'_{i-1})\lambda_{i-1} - F_i C_p(T_i - T_f) - B_{i-1}C_p(T_{i-1} - T_i)$	(V.11)	Vapeur formée dans les effets (N + 2) à n
$d'_i = D_{i-1}C_p\frac{T_{v,i-1} - T'_i}{\lambda_i}$	(V.12)	Quantité de vapeur éliminée dans les boites flash
$\Delta T = \frac{T1 - Tn}{n-1}$	(V.13)	Différence de température entre les effets
$\mathrm{A_e} = 2\sum_{i=1}^{N}\mathrm{A_i} + \sum_{i=N+1}^{n}\mathrm{A_i}$	(V.14)	Surface totale de transfert de chaleur

V.3.2.Aspect d'analyse exergétique

Les équations de base pour les analyses exergétique de l'usine de dessalement ont été développées dans le chapitre (IV), comme pour la centrale nucléaire, c'est comme suit :

Réacteur :

Dans la centrale nucléaire, chaque fragment de fission produit une quantité d'énergie cinétique de près de 84 MeV. Si les produits de fission sont considérés comme un gaz parfait étant à l'équilibre thermodynamique, ces fragments céderaient à une température de quantité Ta. A noter que cela correspond à l'énergie cinétique d'un fragment de fission tel que (3/2)kTa=84 MeV. En réalité, les produits de la fission ne sont pas des gaz monoatomiques. Le fragment de fission effectue le plus grand travail dans un processus théoriquement réversible, lorsque le processus présente le fragment à un état d'équilibre partagé avec l'environnement. De cette manière, le travail maximal par unité de masse des fragments de fission est donné par [53,55]

$$w_{u,max} = (h_a - h_0) - T_0(S_a - S_0) \qquad \text{(V.15)}$$

Dans le cas de Ta >> T0, Eq. (13) devient

$$w_{u,max} = (c_v T_a + P_a v_a) - (c_v T_0 + P_a v_0) - T_0(S_a - S_0) \cong c_v T_a \cong u_a \qquad \text{(V.16)}$$

Dans l'expression ci-dessus, le travail maximal peut être estimé à l'énergie de fission. Par la suite, on peut dire que toute l'énergie de fission est disponible en tant qu'œuvre. La puissance utile maximale $(\dot{W}_{u,max})_{fis}$ est égale à la puissance de fission u_a. Cette puissance est considérée comme étant délivrée aux crayons combustibles à une température de combustible constante T_{f0} Étant donné que Tfo est bien en dessous de Ta (la température des fragments), le combustible ainsi que les températures de surface de la gaine devraient être les mêmes dans les calculs.

Lors du transfert de puissance, la puissance des fragments de la fission s'avère hautement irréversible puisque $Ta >> T_{f0}$se maintient. Par conséquent, la puissance maximale fournie par le crayon combustible avec une température de gaine T_{f0} est

$$(\dot{W}_{u,max})_f = (\dot{W}_{u,max})_{fis}\,(1 - \frac{T_0}{T_{f0}}) \tag{V.17}$$

En conséquence, le taux d'irréversibilité se présente comme suit dans le cas d'un transfert de puissance des fragments de fission vers les crayons combustibles

$$\dot{I}_f = (\dot{W}_{u,max})_{fis} - (\dot{W}_{u,max})_f \tag{V.18}$$

Il est à noter que toute la puissance de fission du combustible est supposée être donnée au liquide de refroidissement dans ce cas. Le travail maximum disponible du liquide de refroidissement peut être écrit comme

$$(\dot{W}_{u,max})_c = \dot{m}_c((h_e - h_i) - T_0(S_e - S_i)) = \dot{E}x_e - \dot{E}x_i \tag{V.19}$$

Ainsi, le taux d'irréversibilité peut être donné comme la perte d'exergie

$$\dot{I}_c = (\dot{W}_{u,max})_f - (\dot{W}_{u,max})_c \tag{V.20}$$

Et la puissance de fission peut être exprimée comme

$$(\dot{W}_{u,max})_{fis} \cong \dot{m}_c(h_e - h_i) = \dot{E}_e - \dot{E}_i \tag{V.21}$$

En supposant adiabatique et indéformable, les termes d'énergie cinétique, de travail de cisaillement et d'énergie potentielle peuvent être négligés. Le taux d'irréversibilité est donc

$$\begin{aligned}\dot{I}_R = (\dot{W}_{u,max})_{fis} - (\dot{W}_{u,max})_c &= (\dot{E}_e - \dot{E}_i) - (\dot{E}x_e - \dot{E}x_i) \\ &= \dot{m}_c T_0 (S_e - S_i)_R\end{aligned} \tag{V.22}$$

Et l'efficacité exergétique est [54]

$$\varepsilon_R = \frac{\sum_e \dot{E}x_e - \sum_i \dot{E}x_i}{(\dot{W}_{u,max})_{fis}} \tag{V.23}$$

Turbine :

A partir de la première loi de la thermodynamique, la production d'électricité pour le système de turbine adiabatique peut être écrite comme :

$$\dot{W}_t = (\dot{W}_u)_t = \sum_i \dot{m}_i\, h_i - \sum_e \dot{m}_e\, h_e \tag{V.24}$$

Le taux d'irréversibilité comme mesure de la perte d'exergie peut être donné par [55]

$$\dot{I}_t = \sum_i \dot{E}x_i - \sum_e \dot{E}x_e - \dot{W}_t \quad \text{(V.25)}$$

Le travail réversible est donné par la différence des débits exergétiques qui entrent/sortent de la turbine, d'où l'Eq. (26) s'écrit

$$\dot{I}_t = T_0(\sum_e \dot{m}_e S_e - \sum_i \dot{m}_i S_i) \quad \text{(V.26)}$$

L'efficacité isentropique est

$$n_t = \frac{\dot{W}_t}{(\dot{W}_{u,max})} \quad \text{(V.27)}$$

Et l'efficacité exergétique est

$$\varepsilon_t = \frac{\dot{W}_t}{\dot{E}x_i - \dot{E}x_e} \quad \text{(V.28)}$$

Pompe :

La puissance d'entrée interne de la pompe peut être donnée comme

$$\dot{W}_p = \dot{m}_i h_i - \dot{m}_e h_e \quad \text{(V.29)}$$

Le taux d'irréversibilité est

$$\dot{I}_p = \sum_i \dot{E}x_i - \sum_e \dot{E}x_e - \dot{W}_p \quad \text{(V.30)}$$

L'efficacité isentropique est

$$n_p = \frac{(\dot{W}_{u,rev})_p}{\dot{W}_p} \quad \text{(V.31)}$$

Et l'efficacité exergétique est

$$\varepsilon_t = \frac{\dot{W}_t}{\dot{E}x_i - \dot{E}x_e} \quad \text{(V.32)}$$

Bilan énergétique et exergétique pour les réchauffeurs, refroidisseurs, réchauffeurs et condenseurs et générateurs de vapeur et effets et thermo-compresseur, …etc.[55].

Le travail réversible pour le transfert de chaleur est égal au taux d'irréversibilités à l'intérieur des réchauffeurs, refroidisseurs, réchauffeurs, condenseurs, effets et thermo-compresseurs et générateurs de vapeur. L'expression est

$$\dot{I}_{HT} = \dot{W}_{rev} - \dot{W}_u = \dot{W}_{rev} = \sum_i \dot{E}x_i - \sum_e \dot{E}x_e \qquad \text{(V.33)}$$

$\dot{W}_u$ =0 est présent, il n'y a pas de travail utile produit pendant le transfert de chaleur. L'efficacité de la deuxième loi peut être définie comme :

$$n_{HT} = \frac{\sum_e \dot{E}x_e}{\sum_i \dot{E}x_i} \qquad \text{(V.34)}$$

Et l'efficacité exergétique est [82]

$$\varepsilon = \frac{\Delta\dot{E}_{steam\ to\ be\ heated}}{\Delta\dot{E}_{steam\ used\ for\ heating}} \qquad \text{(V.35)}$$

L'exergie destruction des composantes de PWR est représente dans l'annexe F.

V.3.3. La performance du système

Les performances du système du modèle PWR-ME-TVC-MED peuvent être évaluées en fonction des éléments suivants :

V.3.3.1. Distillat total (D_t)

$$D_t = 2\sum_{i=1}^{N} D_i + \sum_{i=N+1}^{n} D_i \qquad \text{(V.36)}$$

V.3.3.2. Rapport de sortie de gain (GOR)

$$GOR = \frac{D_t}{2S} \qquad \text{(V.37)}$$

V.3.3.3. Consommation de chaleur spécifique, Q

$$Q = \frac{2S\lambda_m}{D_t} \quad \text{(V.38)}$$

V.3.3.4. Zone de transfert de chaleur spécifique, A_d

$$A_d = \frac{A_e + A_c}{D_t} \quad \text{(V.39)}$$

V.3.3.5. Efficacité exergétique ME-TVC-MED

$$\varepsilon_{MED} = \frac{\dot{W}_{min}}{\dot{E}_f} \quad \text{(V .40)}$$

V.3.3.6. Efficacité exergétique de la centrale de cogénération [82]

$$\varepsilon_{PWR+MED} = \frac{(\dot{W}_{u,max})_{fis} - \sum_{PWR+MED} \dot{I}}{(\dot{W}_{u,max})_{fis}} \quad \text{(V.41)}$$

V.4. Résultats et discussion

V.4.1. Validation du modèle

La centrale de cogénération proposée comprend une centrale nucléaire (PWR) couplée à une unité de dessalement ME-TVC-MED. Dans la présente étude, des analyses énergétiques et exergétiques sont menées pour le système de cogénération dans des conditions de fonctionnement stables.

Dans cette section, initialement, les résultats de performance de l'unité de dessalement ME-TVC-MED sont indiqués dans le tableau (V.4). La validation du modèle a été testée par rapport à certaines données disponibles dans la littérature, comparées à trois unités [36,29,112] illustrées dans le tableau (V.5).

Le diagramme d'équilibre thermique d'un système combiné PWR-ME-TVC-MED avec des états numérotés de 1 à 70 est représenté sur les figures (V.1) et (V.1). Les trois premiers états situés sur le PWR du circuit primaire, cependant, les états de 4 à 60 sont situés le long du flux sur l'unité de tuyauterie côté secondaire nucléaire, les états 47 à 70 sont situés le long du flux sur l'unité de dessalement (à l'entrée et à la sortie du composant concerné), tandis que

les flux 41 et 42 se produisent le long du flux sur la boucle fermée de l'unité PWR de l'unité de tuyauterie du système de refroidissement à l'entrée et à la sortie du condenseur.

Tableau (V.4) Données de performance de l'unité de dessalement.

Description	**Value**	**Unit**
La différence de température,ΔT	3.57	C°
Taux d'entrainement, (Ra)	0.806	-
Taux d'expansion, (ER)	6.667	-
Taux de compression, (CR)	1.953	-
Débit d'eau distillé, D_t	334.66	Kg/s
GOR	9.56	-
Débit d'eau de refroidissement, M_{cw}	1266.8	Kg/s
Consommation de chaleur spécifique, q	197.83	Kj/Kg
Zone de transfert de chaleur spécifique, A_d	302.23	m^2/Kg/s

Tableau (V.5) Comparaison du modèle mathématique avec trois usines casd'un nombre différent d'effets.

Usine de dessalement	Ref [36]		Ref [29]		Ref [112]	
	Modèle	Réelle	Modèle	Réelle	Modèle	Réelle
Conditions d'exploitation et de conception						
Nombre d'effets	8	8	4	4	6	6
Pression de vapeur motrice, kPa	2700	2700	21000	21000	2800	2800
Température maximale de la saumure, °C	63	63	63	63	63	63
Température minimale de la saumure, °C	42	42	48	48	44	44
Différence de température, °C	3	3	5	5	3.8	3.8
Température de l'eau de mer, C°	37	37	43	43	40	40
Débit de vapeur motrice, kg/s	17.5*2	17.5*2	8.5*2	8.5*2	11×2	11×2
Conception TVC						
Taux d'entrainement (Ra)	0.67	0.98	0.63	NA	0.65	NA
Taux d'expansion (ER)	17.6	18.7	11.5	NA	17.1	NA
Taux de compression (CR)	0.18	1.75	1.59	NA	0.17	NA
Performance du système						
Débit d'eau distillé, kg/s	378.94	349	114.8	127	188.03	184.38
Gain output ratio (GOR)	10.82	10	6.75	7.5	8.54	8.6
Consommation de chaleur spécifique, kJ/kg	174.71	223	280.12	NA	288.3	287.5
Zone de transfert de chaleur spécifique, m^2/kg/s	360.09	452.2	217.90	NA	221.32	310

Tableau (V.6) Débits totaux d'énergie et d'exergie pour la centrale de cogénération illustrée aux figures (V.1) et (V.2).

État NO	Débiténergétique total	Débitexergétique total	État NO	Débiténergétique total	Débitexergétique total
	E(MW)	**Ex(MW)**		**E(MW)**	**Ex(MW)**
1	29118.7	8868.3	36	44.1	5
2	25247.6	6941.7	37	47	3.6
3	25264	6952.2	38	16.1	4
4	5739	2148.5	39	22.6	0.3
5	5383.5	2014.4	40	33	0.3
6	4489.1	1331	41	30509.6	0
7	182	32.4	42	32944.2	37.5
8	4045.2	1217.1	43	44	4.9
9	350.3	129.6	44	186	48.7
10	151.4	39	45	23.9	3.7
11	4239	1287.6	46	95.5	25
12	420.3	137.9	47	125.6	0
13	261.7	78.9	48	125.7	0.06
14	90.4	23.7	49	176.1	0.922
15	221.3	49.7	50	75.6	0.386
16	265.3	45.9	51	100.5	0.526
17	70.1	5.4	52	58.6	1.374
18	2606.4	123.1	53	58.6	1.446
19	200.2	01	54	36.2	0.832
20	202.5	2.1	55	75.6	0.41
21	201.9	2.7	56	75.5	0.37
22	208.4	1.7	57	56.3	4.723
23	233.4	3.3	58	47.6	10.977
24	288	7	59	102.8	12.239
25	505.2	36.2	60	56.3	4.723
26	682.5	75.2	61	47.6	10.977
27	726.6	80.2	62	102.8	12.239
28	1228	157.9	63	51.1	2.367
29	1239.5	161.2	64	4.9	0.252
30	1522.4	248.6	65	4.9	0.252
31	1839.7	358.7	66	3.2	0.08
32	1867.9	368.9	67	55.5	1.405
33	123.2	26	68	55.4	1.398
34	226.2	39.5	69	35	0.959
35	387	53.6	70	52	1.321

Pour tous les états numérotés représentés sur les figures (V.1) et (V.2), l'état de référence pour la centrale nucléaire est choisi comme un liquide sous-refroidi à une pression ambiante de P=1,01 bar et une température de 25°C pour l'eau-vapeur, et pour l'unité de dessalement environnemental et à l'état mort étaient T=298K, P=1,01 bar et X_f=39000Ppm, ce qui représente les conditions d'admission de l'eau de mer pour cette analyse. Par conséquent, h=104,8374Kj/Kg, s=0,3661Kj/Kg.K.

L'énergie totale et les débits exergétiques jusqu'à la puissance de fission utile maximale est de 3854,7 MWth. Comme le montre le tableau (V.6), le rendement thermodynamique total de la centrale de cogénération PWR-ME-TVC-MED de 35,38% a été trouvé. Selon la littérature, la valeur d'efficacité thermodynamique d'une centrale de cogénération PWR-MED-TVC 1000MWe a été trouvée à 33,83 % [82]. En outre, les rendements thermiques des systèmes hybrides CANDU6-RO et SFR-RO sont respectivement de 32,8% et 36,8% [94]. Le rendement thermodynamique de la centrale de cogénération GT-MHR-RO a été trouvé à 41 % [95]. Ainsi, la centrale de cogénération discutée dans la présente étude a une valeur d'efficacité moyenne par rapport aux autres.

V.4.2. Analyse exergétique

Les résultats estimés par la présente étude, sont présentés succinctement dans les tableaux (V.7) et (V.8). Les rendements isentropiques des turbines basses et hautes pression, pompes : fluide de refroidissement du réacteur, eau d'alimentation, condensat principal, eau de mer, distillat, saumure et rejet sont estimés à 87,68 %, 86,9 %, 64,24 %, 76,68 %, 55,33 %, 69,56 %, 68,75 %, 86 %, 62,35 %, respectivement. Les schémas d'équilibre simplifiés de la centrale de cogénération PWR-ME-TVC-MED sont illustrés respectivement aux Figures (V.3) et (V.4). D'après les figures (V.1) et (V.2), il est évident que l'énergie du noyau fait un cycle suivant : le générateur de vapeur, l'unité de préchauffage, l'unité de production d'électricité et un flux d'énergie à travers la condensation. De plus, il y a une unité de dessalement. Dans le cas du diagramme d'équilibre exergétique Figure (V.4), les unités de production d'électricité, de production de vapeur, de condensation, de préchauffage et de dessalement devraient être des composantes clés. Les résultats détaillés de cette figure sont rapportés dans les Figure (V.5) et (V.6). L'efficacité de la centrale de cogénération et le taux des composants sont illustrés dans les Figure (V.5) et Figure (V.6) pour les composants de l'unité de dessalement, qui sont plus détaillés que les calculs thermodynamiques. Il a été

constaté que le cœur du réacteur présentait un taux irréversible de 50,28 % dans l'installation. Par ailleurs, il y a des évaporateurs à un taux irréversible de 51% dans l'unité de dessalement.

Tableau (V.7) Résultats d'analyse de la deuxième loi pour la centrale de cogénération PWR-ME-TVC-MED.

	Travail (MW)	Travail réversibl (MW)	Taux d'irréversibilité (MW)	Pourcentage d'irréversibilité **(%)**	Efficacité exergétique
Section de génération de vapeur					
Réacteur	1916.3	3854.7	1938.6	50.28	49.98
Générateurs de vapeur	0	147.08	147.08	3.81	92.98
Pompes à eau de réacteur	-16.36	-10.51	5.85	0.15	64.18
			2091.53	54.25	
Section de production d'électricité					
Turbine Hp	474.14	545.61	71.47	1.85	86.91
Turbine Lp	889.96	1014.8	124.84	3.23	87.69
Réchauffeur	0	20.21	20.21	0.52	77.81
Séparation de l'humidité	0	2.75	2.75	0.06	91.44
			219.27	5.64	
Section de condensation	0	92.42	92.42	2.39	30.71
Condenseur			92.42	2.39	
Section de préchauffage					
Chauffe-eau d'alimentation Lp-1	0	0.691	0.691	0.017	27.02
Chauffe-eau d'alimentation Lp-2	0	1.63	1.63	0.042	48.48
Chauffe-eau d'alimentation Lp-3	0	5.02	5.02	0.13	72.54
Chauffe-eau d'alimentation Lp-4	0	13.08	13.08	0.339	70.44
Chauffe-eau d'alimentation Lp-5	0	5.78	5.78	0.149	86.66
Chauffe-eau d'alimentation HP-1	0	9.89	9.89	0.256	78.46
Chauffe-eau d'alimentation HP-2	0	14.22	14.22	0.368	66.27
Chauffe-eau d'alimentation HP-3	0	2.71	2.71	0.07	65.54
Réservoir d'eau d'alimentation	0	3.15	3.15	0.082	34.48
Pompes à eau d'alimentation	-9.56	-5.29	8.27	0.214	34.51
Pompes à condensats principales	-2.23	-1.71	0.52	0.013	50
			64.96	1.685	
Boucle d'isolation intermédiaire					
Échangeur de chaleur (EX)	0	1.88	1.88	0.048	96.1
			1.88	0.048	
Unité de dessalement					
Thermo-compresseur	0	6.92	6.92	0.179	17.56
Évaporateurs	0	9.99	9.99	0.259	21.66
Condenseur	0	1.42	1.42	0.036	55.12

Pompe à eau de mer	-0.23	-0.16	0.170	0.004	30
Pompe à distillat	-0.16	-0.11	0.133	0.003	62.3
Pompe à saumure	-0.10	-0.086	0.014	0.0003	70
Pompe de rejet	-0.085	-0.053	0.062	0.001	37.5
			18.99	0.49	
Puissance			1364.1	35.38	
Déséquilibre			3.38	0.046	
Total			3855	100	

Tableau (V.8) Résultats d'analyse des 1er et 2emelois thermodynamique de la centrale de cogénération.

Puissances estimées à partir de l'étude actuelle	**Valeur**	**Unité**
Puissance thermique du réacteur	3854.7	MW
Puissance de turbine	1364.1	MW
Puissance de pompe à eau de réacteur	-16.36	MW
Puissance des pompes côté secondaire	-13.79	MW
Transfert de chaleur par condenseur	2436.54	MW
Puissance thermique du générateur de vapeur	3871.1	MW
Puissance nette du côté secondaire	1350.31	MW
Vapeur de chauffage de ME-TVC-MED	22.07	MW
Travail minimum de séparation	1.42	MW
Taux total d'irréversibilité du ME-TVC-MED	20.65	MW
Taux total d'irréversibilité PWR-ME-TVC-MED	2492.17	MW
Apport de chaleur net à l'eau d'alimentation	1363	MW
Taux d'irréversibilité total et travail net côté travail	3840.91	MW
Pourcentages obtenus par cette étude		
Pourcentage d'irréversibilité totale	64.51	%
Efficacité thermodynamique ou efficacité de PWR-ME-TVC-MED	35.38	%
Pourcentage d'erreur total	0.046	%
Efficacité exergétique du ME-TVC-MED	6.43	%

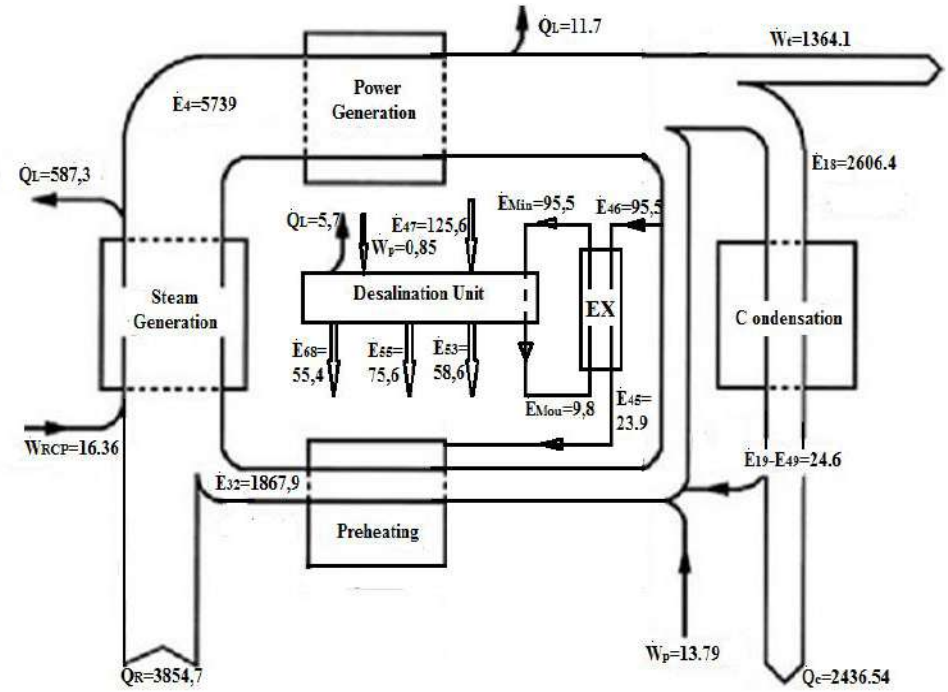


Figure (V.3) Bilan énergétique simplifié du PWR-ME-TVC-MED(en unités de MWth).

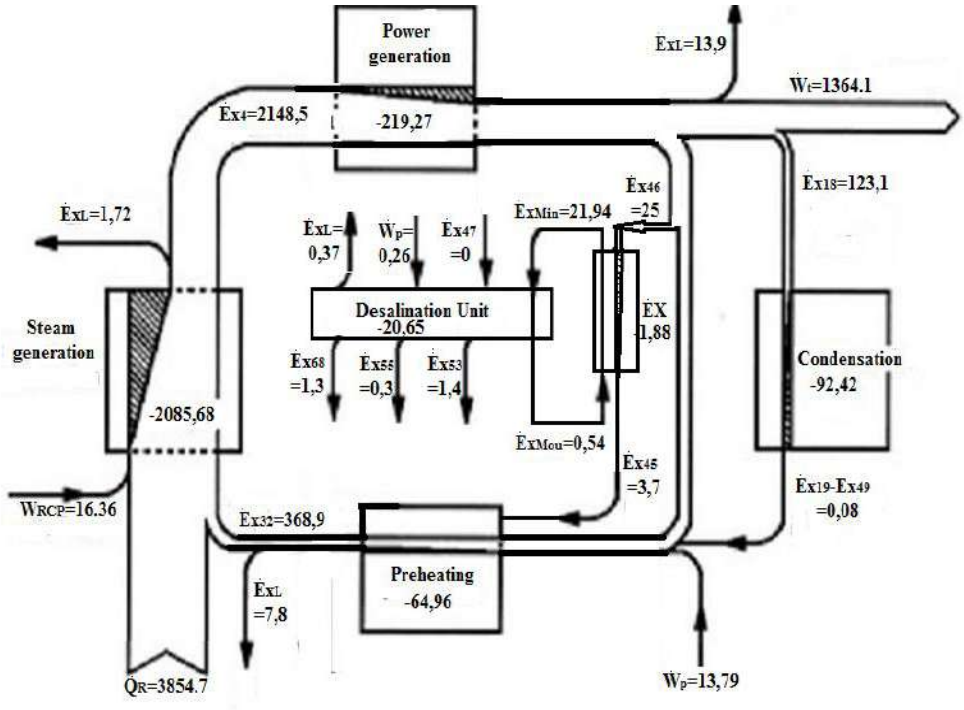


Figure (V.4) Bilan exergétique simplifié du PWR-ME-TVC-MED (en unités de MWth).

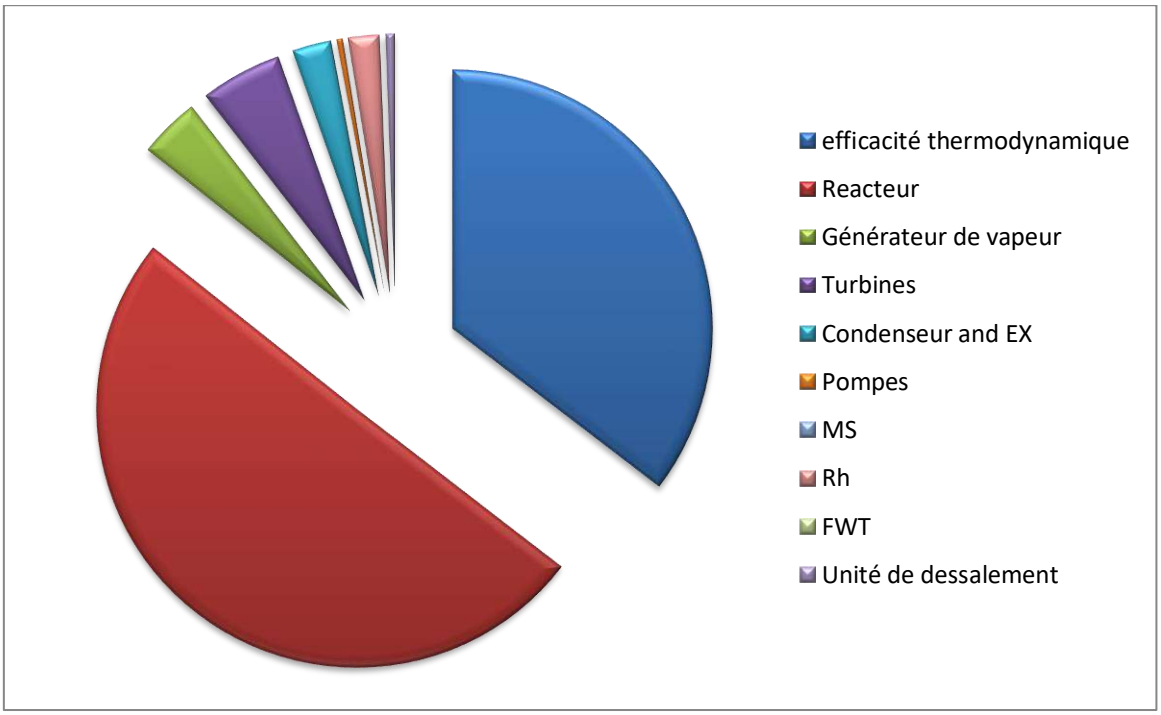


Figure (V.5) Rendements thermodynamiques et taux d'irréversibilité en pourcentage pourla centrale de cogénération.

La figure (V.5) montre les efficacités éxergétiques ainsi que la destruction éxergétique pour tous les composants en pourcentage de la destruction éxergétique totale. La destruction exergétique majeure se produit dans le cœur du réacteur en raison du processus de fission. Le transfert entre les crayons combustibles et le fluide caloporteur, les pertes de chaleur et les pertes de charge sont également importantes de cette manière. La turbine HP a un pourcentage relativement élevé de destruction d'éxergie par rapport aux autres composants du système, ce qui peut être attribué à une éxergie élevée du carburant. Un générateur de vapeur est considéré comme la troisième source d'irréversibilités représente une source majeure d'inefficacité dans le cycle en raison du nombre élevé de composants, des pertes de transfert de chaleur, de la différence de température et de la différence de pression. Mais il existe des différences substantielles entre PWR et ME-TVC-MED dans le niveau de destruction exergétique en raison des différences de capacité calorifique, de température d'entrée et de type de fluide de travail. La destruction éxergétique des autres composants est plutôt faible.

On estime un taux d'éxergie totale d'environ 64 % qui est produit à partir de l'énergie de fission est perdu dans une centrale de cogénération, environ 54 % de cette exergie est perdue dans la boucle primaire (cœur et générateurs de vapeur) de la centrale nucléaire

(PWR) via les pertes de chaleur et les pertes de charge par frottement dans le circuit primaire, puis les composants du circuit secondaire (turbines, condenseurs, réchauffeurs) ont des pertes d'environ 10 %. En outre, d'autres composants tels que le dessalement et l'EX ont une perte de 0,5%. Tandis que 66,2 % de l'exergie perdue dans la cogénération (PWR-MED-TVC) [82]. De plus, 62 % de l'éxergie est perdue dans la centrale VVER [55], et 53,7 % de l'éxergie du combustible est perdue dans la centrale PWR [54].

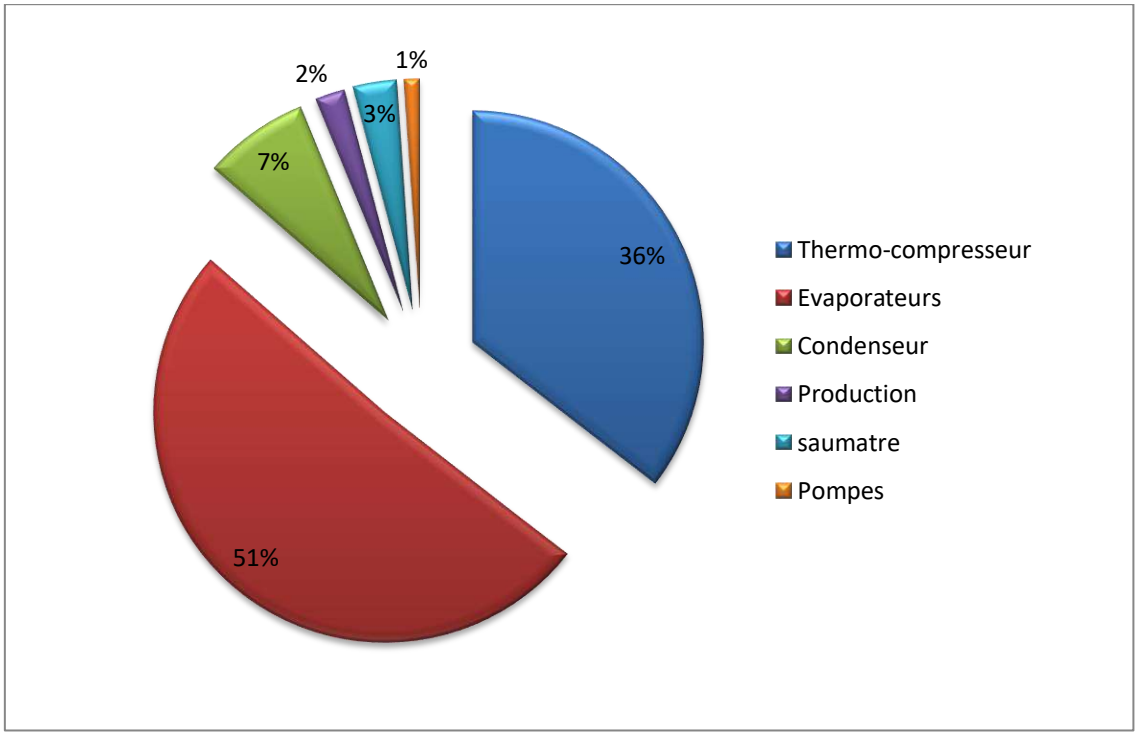


Figure (V.6) Destruction exergétique pour le composant de l'unité de dessalement.

L'efficacité exergétique de l'unité de dessalement s'est avérée être de 6,43 %. Selon la littérature, la valeur d'efficacité exergétique de l'unité de dessalement a été retrouvée à 7,58 % [104]. Ceci est cohérent avec les résultats pour les unités de dessalement thermique trouvés dans la littérature. Le processus de dessalement thermique contient nécessairement un grand nombre de composants et contient un état de changement (évaporation et condensation) c'est la principale raison de la mauvaise performance. En outre, le processus de distillation est extrêmement énergivore, se produisant à basse pression, ce qui augmente la quantité de chaleur latente de vaporisation. Le pourcentage de destruction exergétique des composants de l'unité de dessalement est illustré dans la Figure (V.6). Les résultats montrent que la source la plus élevée d'irréversibilités au sein d'une unité de dessalement se trouve dans les évaporateurs, le thermo-compresseur a un pourcentage de destruction exergique relativement

élevé par rapport aux composants restants du système. La destruction exergétique des autres composants est plutôt faible.

En considérant les résultats du système total, les irréversibilités totales sont estimées à 64 %. Pour obtenir le pourcentage total avec l'efficacité thermodynamique de la centrale de cogénération, l'efficacité peut être estimée à 35.38 % comme indiqué dans le tableau (V.7). Dans ce cas, le pourcentage de déséquilibre éxergétique pour la présente étude est de 0,046% pour l'ensemble du système.

Conclusion et recommendation

CONCLUSIONS ET RECOMMENDATIONS

L'objectif de ce travail de thèse repose principalement sur l'évaluation du potentiel du couplage de la technologie de dessalement par évaporation à effet multiple et les technologies d'énergie nucléaire dans le cadre d'assurer la disponibilité de l'eau douce, et la recherche des différentes possibilités d'amélioration des performances de ce type de couplage.

Les résultats de la modélisation de partie MED-TVC peuvent être résumés comme suit :

Les résultats obtenus ont montré que le système MED-TVC a une valeur d'efficacité exergétique très faible (3,46 %) car de la vapeur motrice à haute pression est utilisée pour renvoyer une fraction de la vapeur du dernier effet au premier. Cependant, les performances du système MED-TVC pourraient être encore améliorées en ajoutant plus de radiateurs entre les effets. Les résultats ont également confirmé que le procédé MED-TVC fonctionne à seulement 12,34 % de la limite thermodynamique de l'UPR, ce qui n'est pas durable pour les futurs approvisionnements en eau dessalée, et il existe donc de nombreuses possibilités d'améliorer les performances du système de dessalement pour atteindre l'UPR de 25 à 30 % d'ici l'hybridation des procédés existants et le développement de meilleurs matériaux.

Les résultats de l'analyse énergétique ont révélé que la principale source de pertes d'énergie est le condenseur, qui est suivi de l'éjecteur et des effets. Alors que d'un point de vue exergétique, le thermo-compresseur présente le plus haut niveau d'irréversibilités, qui représente plus de 82% de la destruction exergétique totale. Par conséquent, il est nécessaire de porter une attention particulière à ces composants pour améliorer les performances du système MED-TVC.

Par ailleurs, l'impact des différents paramètres de fonctionnement a été analysé et les points suivants peuvent être conclus :

- L'augmentation de la température de la saumure supérieure conduit à une diminution à la fois de l'efficacité exergétique et du travail de séparation minimum en raison de l'augmentation de la pression de vapeur. Par conséquent, une plus grande quantité de vapeur motrice est nécessaire pour comprimer la vapeur à une pression plus élevée.

- L'augmentation du nombre d'effets dans le système MED-TVC a augmenté le travail minimum de séparation en raison d'une plus grande production d'eau distillée, mais a amélioré les performances du système de dessalement.
- L'augmentation du débit de vapeur motrice diminuera l'efficacité exergétique et augmentera légèrement le travail minimum de séparation. Ceci est dû à l'augmentation de la quantité de vapeur entraînée pour un taux d'entraînement constant, ce qui va conduire à générer plus de vapeur et par conséquent plus de débit d'exergie de la production de chauffage.

Par ailleurs, les conclusions suivantes peuvent êtres tirées de l'analyse énergétique et exergétique du système étudié PWR-ME-TVC-MED:

- Il a été confirmé que le cœur est la principale source de perte d'exergie dans les centrales de cogénération. En effet, c'est la pire composante de l'ensemble de la centrale nucléaire en raison de l'irréversibilité de la transformation énergétique. Ce résultat signifie que le PWR a le plus grand potentiel pour améliorer l'efficacité de l'usine dans une telle centrale nucléaire PWR en considérant de nouveaux composants de récipient sous pression (cœur).
- Une amélioration substantielle des performances de la centrale de cogénération peut être obtenue en considérant le cœur des composants du réacteur. Alors que le rendement thermodynamique du PWR-ME-TVC-MED est de 35,38 %, les irréversibilités du cœur du réacteur et des turbines ont été calculées à 50,28 % et 5,8 %. Il existe également de faibles irréversibilités dans les composants des générateurs de vapeur, des condenseurs, des séparateurs d'humidité et des unités de dessalement.
- Dans l'unité de dessalement ME-TVC-MED, la principale perte d'éxergie en effets et dans le compresseur Thermo, qui représente 85 % de la valeur totale de la destruction d'éxergie.

Enfin et pour conclure, il est recommandé de :

- Compte tenu de toutes ces conclusions, l'optimisation des conditions de fonctionnement des conceptions existantes conduit à introduire de nombreuses possibilités d'amélioration de la conception et des performances de la centrale de

cogénération, sur la base de l'analyse menée. De manière générale, toute amélioration des performances thermodynamiques a un impact économique et environnemental.

- Combiner MED-TVC avec d'autres procédés de dessalement comme la distillation membranaire dans une centrale hybride pour accroitre davantage l'efficacité énergétique du système. Cette combinaison permettra une utilisation optimale de l'énergie et une réduction du coût de production.
- Combiner d'autres domaine industrielle avec centrale nucléaire tels que les usine qui fonctionné avec l'énergie thermique afin d'optimiser au maximum le système aussi bien du point de vue technique qu'économique.
- Intégrer la technique de dessalement par énergie nucléaire comme option dans le programme des énergies algérien ainsi que dans cadre de la planification des ressources en eau.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

[01] M.GHAZI, Modélisation, Analyse Thermo-Economique et Optimisation du Procédé de Dessalement d'Eau de Mer par Evaporation à Effet Multiple Combiné avec les Technologies d'Energie Renouvelables. Thèse de doctorat. Génie des Procédés Industriels Laboratoire ETACS. Ecole Mohammadia d'Ingénieurs, 2020. P: 225.

[02] G. Laura, Étude du comportement et modélisation d'une installation de dessalement d'eau de mer par distillation soumise à des régimes transitoires. Thèse de doctorat. Génie des procédés. Université de Lyon, 2019. Français. P: 145.

[03] Livre, Optimization of the coupling of nuclear reactors and desalination systems. Final report of a coordinated research project. 1999–2003.IAEA-TECDOC-1444 .ISBN92–0–102505–X.
https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/te_1444_web.pdf

[04] Z.TRIKI, Études, Analyses et Optimisation de la ConsommationÉnergétique des Unités de Dessalement pour les Sites Isolés. Thèse de doctorat. Génie Climatique. Université Constantine 1, 2014. P: 145.

[05] K. Allam, Distillation Membranaire des Eaux Saumâtres par Energie Solaire Thermique, thèse, Faculté des Sciences Ben M'sik. Université Hassan II de Casablanca, Maroc. 2018, P : 261

[06] O. Samaké, Analyse thermo-économique d'un système de dessalement par thermo compression de vapeur conception de l'éjecteur. Thèse,Faculté de génie mécanique, Sherbrooke (Québec) Canada. 2016, P : 217.

[07] B. Omar, Etude comparative de l'approvisionnement énergétique d'une station d'épuration d'eau par voie solaire thermodynamique et photovoltaïque, Thèse, Energies Renouvelable en Mécanique, USTHB Alger 2020, P177.

[08] A. Diaby, Etude expérimentale et simulée d'une installation de thermofrigopompe pour la production de froid et le dessalement. Thèse de doctorat à Saint-Malo, Ecole doctorale Sciences Pour l'Ingénieur, IUT de Rennes2017, P168.

[09] J. PMéricq. Approche intégrée du dessalement d'eau de mer : Distillation membranaire sous vide pour la réduction des rejets salins et possibilités de couplage avec l'énergie solaire. Thèse de doctorat. Génie des Procédés et de l'Environnement,

Université de Toulouse. France. 2009, P: 123.

[10] D, Saied. Contribution à l'optimisation du couplage des réacteurs nucléaires aux procédés de dessalement. Thèse de doctorat. L'UNIVERSITE PAULCEZANNE – AIX MARSEILLE III, 2007. P: 131.

[11] E, Lannick, Contribution à l'optimisation de la purification chimique et radiochimique du fluide primaire des centrales nucléaires à eau sous pression. Thèse doctorat. ÉCOLE CENTRALE DES ARTS ET MANUFACTURES « ÉCOLE CENTRALE PARIS », Spécialité : Chimie et Génie des Procédés, Laboratoire d'accueil : Chimie et Génie des Procédés.2004

[12] M. Brahim, Simulation de l'établissement de l'ébullition nucléée par l'approche CFD. Thèse de doctorat en Sciences en Génie des Procédés. Université Yahia Farès de Médéa, 2016. P: 153.

[13] Rapport d'ensemble sur la technologie nucléaire 2020. Imprimé par l'AIEA en Autriche Septembre 2020 IAEA/NTR/2020.Laboratoire national d'OakRidge ; Rosatom.

[14] https://www.oreilly.com/library/view/nuclearpower/9780128095126/xhtml/chp004.xhtml

[15] https://www.google.com/search?hl=enDZ&gbv=2&sxsrf=AOaemvLqAPeUdSYLnF4k9AvIAry9YVjq9A%3A163995.

[16] O.H Hamed. Thermal assessment of a Multiple Effect Boiling (MEB) desalination system, Desalination 86 (3), 325–339.1992

[17] M. El-Allawy, Predictive Simulation of the Performance of MED/TVC Desalination Distiller, IDA Conference, 2003 (Bahamas).

[18] M.A Darwish. H. El-Dessouky, Desalination by Distillation Processes, IDA Conference, 1995 (Abu Dhabi, UAE).

[19] O.A Hamed, A.M. Zamamiri, S. Aly, N. Lior, Thermal performance and exergy analysis of a thermal vapor compression desalination system, Energy Convers. Manag., 37(4), 379–387, 1996.

[20] N.M. Al-Najem, M.A. Darwish, F.A. Youssef, Thermovapor compression desalters: Energy and availability-Analysis of single-and multi-effect systems, Desalination,

110(3), 223–238, 1997.

[21] H.El-Dessouky, I. Alatiqi, S. Bingulac, H. Ettouney, Steady-state analysis of the multiple effect evaporation desalination process. Chemical Engineering &Technology: Industrial Chemistry-Plant Equipment-Process Engineering-Biotechnology 21, 437–451.1998

[22] H.T El-Dessouky, H.M. Ettouney, Multiple-effect évaporation désalination systems. Thermal analysis. Desalination 125, 259–276.1999

[23] H.T. El-Dessouky, H.M Ettouney,F. Al-Juwayhel, Multiple effectevaporation—vapour compression desalination processes. Chemical Engineering Research and Design 78, 662–676.2000

[24] H. El-Dessouky, H. Ettouney, I. Alatiqi, G. Al-Nuwaibit, Evaluation of steam jet ejectors. Chemical Engineering and Processing: Process Intensification 41, 551–561.2002

[25] H. El-Dessouky, H. Ettouney, H. Al-Fulaij, F. Mandani, Multistage flash desalination combined with thermal vapor compression. Chemical Engineering and Processing: Process Intensification 39, 343–356. 2000.

[26] H.M. Ettouney, H. El-Dessouky, Fundamentals of Salt Water Desalination, Kuwait University, Elsevier Science, Amesterdam, 2002. P: 185.

[27] H.S. Choi, T.J. Lee, Y.G. Kim, S.L. Song, Performance improvement of multiple-effect distiller with thermal vapor compression system by exergy analysis, Desalination, 182(1–3), 239–249, 2005.

[28] F.N. Alasfour, M.A. Darwish, A.O. Bin Amer, Thermal analysis of ME-TVC+MEE desalination systems, Desalination, 174(1), 39–61, 2005.

[29] M.A. Darwish, A. Alsairafi, Technical comparison between TVC/MEB and MSF, Desalination 170 (3), 223–239. Nov. 2004

[30] K. Mistry, J. Lienhard, An economics-based second law efficiency, Entropy 65 (7) , 2736–2765.2003

[31] M. Ameri, S.S Mohammadi, M. Hosseini, M. Seifi, Effect of design parameters on multi-effectdesalinationsystemspecifications, Desalination 245 (1–3), 266–283. Sep. 2009

[32] M. Al-Sahali, H. Ettouney, Developments in thermal desalination processes: design, energy, and costing aspects, Desalination 214 (3), 227–240.2007

[33] R.K Kamali, A.Abbassi, S.A SadoughVanini, A simulation model and parametric study of MED–TVC process. Desalination 235, 340–351.2009

[34] R. Kamali, A. Abbassi, S.A SadoughVanini, M. SaffarAvval, Thermodynamic design and parametric study of MED-TVC. Desalination 222, 596–604.2008

[35] A.O. Bin Amer, Development and optimization of ME-TVC desalination system, Desalination 249 (3), 1315–1331. Dec. 2009

[36] A. Binamer, Second law and sensitivity analysis of large ME-TVC desalination units, Desal. Water Treat., 53(5), 1234–1245, 2015.

[37] R. Kouhikamali, M.S Mehdizadeh, M. Process investigation of different locations of thermo-compressor suction in MED–TVC plants. Desalination 280, 134–138.2011

[38] R. Kouhikamali, N. Sharifi, Experience of modification of thermo-compressors in multiple effects desalination plants in Assaluyeh in IRAN. Applied Thermal Engineering 40, 174–180.2012

[39] E.Janghorban, I. Ataei, A. Shetty K, V., Oh, T., Park, J.H., Yoo, C. Modeling and genetic algorithm-based multi-objective optimization of the MED-TVC desalination system. Desalination, 292(0), pp.87–104.2012

[40] S.W. Ihm, K. Bourouni, C. Siklawi, M.A. Saroosh, A. Nafey, J. Choi, J. Park, Optimization of large-scale high temperature MED-TVC systems: numerical & experimental Verification, IWA World Water Congress& Exhibition, pp. 16–21. September, 2012

[41] m. Khoshgoftar, M.H Ghalami, H. Amidpour, M Hamedi, M.H, Optimal coupling of site utility steam network with MED-RO desalination through total site analysis and exergoeconomic optimization. Desalination, 316(0), pp.42–52.2013

[42] I.S. Al-Mutaz, I. Wazeer, Development of a steady-state mathematical model for MEE-TVC desalination plants, Desalination 35,19–18. 2014

[43] I.S. Al-Mutaz, I. Wazeer, Optimization of location of thermo-compressor suction in MED-TVC desalination plants, Desalin. Water Treat. 57, 26562–26576 July.55 February, 2016

[44] P. Bandelier, Le dessalement d'eau de mer et des eaux saumâtres. Encyclopédie de l'Energie. 2016 URL : http://encyclopedie energie.org/articles/le-dessalement-d%E2%80%99eaude- mer-et-des-eaux-saum%C3%A2tres.

[45] S. Sadri S, R. HaghighiKhoshkhoo, M. Ameri, Multi-objective optimization of the

MED-TVC system with exergetic and heat transfer analysis, Energyequipsys, 5(4), 419–430, 2017.

[46] N. Eshoul, A. Almutairi, R. Lamidi, H. Alhajeri, A. Alenezi, Energetic, exergetic, and economic analysis of MED-TVC Water desalination plant with and without preheating, Water, 10(3), 1–17, 2018.

[47] H. Sayyaadi, A. Saffari, A. Mahmoodian, Various approaches in optimization of multi-effects distillation desalination systems using a hybrid meta-heuristic optimization tool, Desalination, 254 (1–3), 138–148, 2010.

[48] I.J. Esfahani, A. Ataei, K.V. Shetty, T.S. Oh, J.H. Park, C.K. Yoo, Modeling and genetic algorithm-based multi-objective optimization of the MED-TVC desalination system, Desalination, 292, 87–104, 2012.

[49] M.L. Elsayed, O. Mesalhy, R.H. Mohammed, L.C. Chow, Exergy and thermo-economic analysis for MED-TVC desalination systems, Desalination, 447, 29–42, 2018.

[50] J. Khorshidi, N.S. Pour, T. Zarei, Exergy Analysis and Optimization of Multi-effect Distillation with Thermal Vapor Compression System of Bandar Abbas Thermal Power Plant Using Genetic Algorithm, Iran. J. Sci. Technol., 43, 13–24, 2019.

[51] M. Tontu, B. Sahin, M. Bilgili, An evaluation of multi-effect desalination with a thermal vapor compression system in terms of thermo-economics, Int. J. Exergy., 30(2), 126–138, 2019.

[52] C. Cao, L. Xie, S. Xu, Y. Du, Exergy analysis and optimization of MED–TVC system with different effect group divisions, Desalination, 500, 114891, 2021.

[53] A.Durmayaz, H.Yavuz. Exergy analysis of a pressurized-water reactor. Appliedenergy. 2001. https://doi.org/10.1016/S0306-2619(00)00071-4.

[54] T. Sayyaadi, Energy and exergy flows in a typical pressurized light water thermal power plant, I. J. of energy research, (33),378–395, 2009.

[55] R. Terzi, Application of Exergy Analysis to Energy Systems, Application of Exergy, TolgaTaner, IntechOpen: London, UK, 2018.

[56] J. G. O. Marques, A. L. Costa, C. Pereira, and Â. Fortini, OF Energy and Exergy Analyses of Angra 2 Nuclear Power Plant. pp. 1–18, 2019.

[57] R. B. Eshun, Energy and Exergy Based Performance Analysis of Westinghouse AP1000 Nuclear Power Plant, vol. 4 (1), 1–10, 2019.

[58] S. Nisan, N. Benzarti. A comprehensive economic evaluation of integrateddesalination systems using fossil fuelled and nuclear energiesand including their environmental costs. Desalination 229. 125–146. 2008

[59] S. Nisan, S. Dardour and Y. Dumont,N. Reguigui. Inter-regional collaborative nuclear desalination studies by France and Tunisia; the TUNDESAL project. Int. J. Nuclear Desalination, Vol. 1, No. 3, 2004

[60] S. Nisan, G. Caruso, J.-R. Humphries, G. Mini, A. Naviglio, B. Bielak,O.Asuar Alonso, N. Martins, L. Volpi. Sea-water desalination with nuclear and other energy sources:the EURODESAL project. Nuclear Engineering and Design 221, 251–275, 2003

[61] G. Zhihua, D. Xiaoze, Y.Lijun, Y. Yongping, W.Shaorong, Simulation on the start-up of MED seawater desalinationsystem coupled with nuclear heating reactor. Applied Thermal Engineering 28 ,203–210.2008

[62] M. SSaadawy, Optimum thermal coupling system for co-generation nuclear desalination plants. Int. J. Nuclear Desalination, Vol. 2, No. 1, 2006

[63] M.Tabet, AHtet, A MarrouniAlami,Optimisation of the coupling of nuclear reactors and desalination systems in Morocco. Int. J. Nuclear Desalination, Vol. 2,No. 1, 2006

[64] D. Xiaoze, W. Shaorong, Y. Lijun. Performance of a seawater desalination system coupled with a nuclear heating reactor under off-design operating conditions. Desalination 174, 315-323. 2005

[65] B.M. Misra, J. Kupitz. The role of nuclear desalination in meeting the potable water needs in water scarce areas in the next decades. Desalination 166, 1-9. 2004

[66] M.Lecomte,P. Bandelier,Desalinated water production optimization using a high temperature reactor in a cogeneration mode, Int. J. of Nuclear Desalination, Vol. 1, No. 1, 2003

[67] S. Ibrahim, A1-Mutaz,Coupling of a nuclear reactor to hybrid RO-MSF desalination Plants,Desalination 157,259—268;2003

[68] S. Ibrahim, Al-Mutaz,Hybrid RO MSF: a practical option for nuclear desalination,Int. J. of Nuclear Desalination, Vol. 1, No. 1, 2003

[69] W. Shaorong, D. Xiaozhe,A preliminary optimization analysis on design

parameters of the VTE-MED process coupled with nuclear heating reactor,Desalination 155, 171-178, 2003

[70] A. Belkaid , S. A Amzert,Y. Bouaichaoui, H. Chibane, Economic Study of Nuclear Seawater Desalination for Mostaganem Site,Procedia Engineering 33, 134 – 145, 2012

[71] Y.Bouaichaoui, A.Belkaid , S.A Amzert, Economic and Safety Aspects in Nuclear Seawater Desalination, Procedia Engineering 33,146 – 154, 2012

[72] B.M Misra, Seawater desalination using nuclear heat/electricity —Prospects and challenges, Desalination 205, 269–278, 2007

[73] S. Nisan, S. Dardour, Economic evaluation of nuclear desalination systems, Desalination 205, 231–242, 2007

[74] W.Shaorong, Analysis of water production costs of a nuclear desalination plant with a nuclear heating reactor coupled with MED processes, Desalination 190, 287–294, 2006

[75] L.Tian, Y. Tang, Y. Wang, Economic evaluation of seawater desalination for a nuclear heating reactor with multi-effect distillation, Desalination 180, 53-61, 2005

[76] L. Tian, J. Guo, Y. Tang, Li Cao, A historical opportunity: economic competitiveness ofseawater desalination project between nuclear and fossil fuel while the world oil price over $50 per boe—part A: MSF, Desalination 183, 317–325; 2005

[77] S-H. Kim, Y-D. Hwang, T. Konishi,H. Hastowo, A preliminary economic feasibility assessment of nuclear desalination in Madura Island, Int. J. Nuclear Desalination, Vol. 1, No. 4, 2005

[78] L. Tian, Y. Wang, J. Guo, A comparative economic analysis of the contribution of nuclear seawater desalination to environmental protection using the clean development mechanism (CDM), Desalination 157, 289-296, 2003

[79] W. Shaorong, Z. Zhang, An approach to improve the economy of desalination plants with a nuclear heating reactor by coupling with hybrid technologies, Desalination 155, 179-185, 2003

[80] M.H. Khoshgoftar, M. Amidpour, Multi-objective thermoeconomic optimization of coupling MSF desalination withPWR nuclear power plant through evolutionary

algorithms, Desalination 249, 1332–1344, 2009

[81] M. H Khoshgoftar, M. Amidpour, M. H Hamedi, Optimization of the coupling of pressurized water nuclear reactorsand multistage flash desalination plant by evolutionary algorithms and thermoeconomic method, Int. J. Energy Res;33:77–99, 2009

[82] K. Ansari, H. Sayyaadi, M. Amidpour, Thermoeconomic optimization of a hybrid pressurized water reactor (PWR)power plant coupled to a multi effect distillation desalination system withthermo-vapor compressor (MED-TVC), Energy 35, 1981–1996, 2010

[83] K. Ansari, H. Sayyaadi, M.Amidpour, A comprehensive approach in optimization of a dual nuclear power anddesalination system, Desalination 269, 25–34, 2011

[84] P. Asiedu-Boateng, E.H.K.Akaho, B.J.B. Nyarkob, S. Yamoah, Modeling and simulation of cogeneration nuclear power plant for seawaterdesalination, Nuclear Engineering and Design 242, 143– 147, 2012

[85] S.Dardour, S. Nisan, F.Charbit, Utilisation of waste heat from GT–MHR and PBMR reactorsfor nuclear desalination, Desalination 205, 254–268, 2007

[86] H-S. Kim, H. NO, Thermal coupling of HTGRs and MED desalination plants, and its performance andcost analysis for nuclear desalination, Desalination 303, 17–22, 2012

[87] G. Alonso, S. Vargas, E-d. Valle, R. Ramirez, Alternatives of seawater desalination using nuclear power, Nuclear Engineering and Design 245, 39– 48, 2012

[88] V. Zare, M. Yari, S.M.S. Mahmoudi, Proposal and analysis of a new combined cogeneration system based on theGT-MHR cycle, Desalination 286, 417–428, 2012

[89] X. Yan, H. Noguchi, H. Sato, Y. Tachibana, K.Kunitomi and R. Hino, Study of an incrementally loaded multistageflashdesalination system for optimum use of sensible wasteheat from nuclear power plant, Int. J. Energy Res;37:1811–1820, 2013

[90] A-M. Elaskary, System Simulation for Coupling Nuclear Power Plants and Desalination in Different Scenarios, International Journal of Scientific & Engineering Research, Volume 4, Issue 4, April-2013

[91] M-Y. Park, E-S. Kim, Thermodynamic evaluation on the integrated system of

VHTR andforward osmosis desalination process, Desalination 337, 117–126, 2014

[92] A.K. Adak, P.K. Tewari, Technical feasibility study for coupling a desalination plant to anAdvanced Heavy Water Reactor, Desalination 337, 76–82, 2014

[93] M-G. Abdoelatef, R-M. Field, L-Y. Kwan, Thermodynamic Evaluation of Coupling APR1400 with a Thermal Desalination Plant, International Journal of Chemical, Molecular, Nuclear, Materials and Metallurgical Engineering Vol:9, No:11, 2015

[94] S–D. Khan, S-N. Danish, S. Haider, Sh-D. Khan, Theoretical calculation simulation studies of ABVnuclear reactor coupled with desalination system, Int. J. Energy Res;39:1554–1563, 2015

[95] F. Khalid, I.Dincer, M-A Rosen, Comparative assessment of CANDU 6 and Sodium-cooled Fast Reactorsfor nuclear desalination, Desalination 379, 182–192, 2016

[96] F. Khalid,I.Dincer,M- A Rosen,Analysis and Assessment of a Gas Turbine-Modular HeliumReactor for Nuclear Desalination, Journal of Nuclear Engineering and Radiation Science, Vol. 2/ 031014-1, ULY 2016

[97] S.Dardour, H.Safa, Energetic and economic cost of nuclear heatimpact on the cost of desalination, EPJ Nuclear Sci. Technol.3, 1, 2017

[98] E. Priego, G. Alonso,E-d. Valle, Ramon Ramirez, Alternatives of steam extraction for desalination purposes usingSMART reactor, Desalination 413, 199–216, 2017

[99] S-D. Khan, K. Nuclear, Power Plant(KANUPP) As Case Study for Techno-Economic Assessment of Nuclear Power Coupled with Water Desalination, Energy, 2017

[100] M. W. SHAHZAD, The hybride multi-effect desalination (MED) and the adsorption (AD) cycle for desalination, doctoral thesis, national university of Singapore, p308, 2013.

[101] S. K. Salem, Mathematical Modeling of Multi-Effect Thermal Vapor Compression Desalination Processes, doctoral thesis, United Arab Emirates University, p106, 2002.

[102] F. Al Juwayhel, Analysis of single effect evaporator desalination system combined with vapor compression heat pumps, Desalination 114, 253- 275, 1997.

[103] H. Jean-Pierre, La maintenance des centrales nucléaires. https://www.lavoisier.fr/livre/electricite-electronique/la-maintenance-des-centrales-

nucleaires/hutin/descriptif-9782743021283.

[104] A. Almutairi, P. Pilidis, N. Al-Mutawa, M. Al-Weshahi, Energetic and exergetic analysis of cogeneration power combined cycle ad ME-TVC-MED water desalination plant: Part-1 operation and performance, Appl. Therm. Eng., 103, 77–91, 2016.

[105] M.H. Sharqawy, J.H. Lienhard V, S.M. Zubair, Thermophysical properties of seawater: a review of existing correlations and data, Desal. Water Treat., 16, 354–380, 2010.

[106] M.H. Sharqawy, J.H. Lienhard V, S.M. Zubair, On exergy calculations of seawater with applications in desalination systems, Int. J. Therm. Sci., 50(2), 187–196, 2011.

[107] K.C. Ng, M. Burhan, Q. Chen, D. Ybyraiykul, F.H. Akhtar, M. Kumja, R.W. Field, M.W. Shahzad, A Thermodynamic Platform for Evaluating the Energy Efficiency of Combined Power Generation and Desalination Plants, NPJ Clean Water, 4–(1), 1–10, 2021.

[108] M.W. Shahzad, M. Burhan, K.C. Ng, A Standard Primary Energy Approach for Comparing Desalination Processes, NPJ Clean Water 1,1–7, 2019.

[109] K.C. Ng, M.W. Shahzad, H.S. Son, O.A. Hamed, An exergy approach to efficiency evaluation of desalination, Appl. Phys. Lett. 110, 184101, 2017.

[110] M.W. Shahzad, M. Burhan, H.S. Son, S.J. Oh, K.C. Ng, Desalination Processes Evaluation at Common Platform: A Universal Performance Ratio (UPR) Method, Appl. Therm. Eng., 134 , 62–67, 2018.

[111] C. Temstet, G. Canton, J. Laborie, A. Durante, A large high-performance MED plant in Sicily, Desalination, 105(1–2), 109–114, 1996.

[112] S. AL-Habshi, Simulation and economic study of the MED-TVC units at Umm Al-Nar desalination plant. Thesis report, UAE, 2002. https://scholarworks.uaeu.ac.ae/all_theses.

Annexes

Annexe A : Propriétés thermodynamiques de l'eau pure

Les équations suivantes d'El-Dessouky et Ettouney [26], ont été utilisées pour déterminer les propriétés thermodynamiques de l'eau pure :

$$h_f = -0.33635409 + 4.20755011T - 6.200339 \times 10^{-4}T^2 + 4.959374 \times T^3 \quad \text{(A.1)}$$

$$h_g = 2501.689845 + 1.806916015T + 5.087717 \times 10^{-4}T^2 - 1.221 \times 10^{-5}T^{-3} \quad \text{(A.2)}$$

$$S_f = -0.00057846 + 0.015297489T - 2.63129 \times 10^{-5}T^2 + 4.11959 \times 10^{-8}T^3 \quad \text{(A.3)}$$

$$S_g = 9.149505306 - 2.581012 \times 10^{-2}T + 9.625687 \times 10^{-5}T^2 - 1.786615 \times 10^{-7}T^3 \quad \text{(A4)}$$

Annexe B : Propriétés thermodynamiques de l'eau de mer

Les corrélations de Sharqawy et al [105, 106]. Dépendent de certaines constantes qui sont utilisées pour calculer la densité, l'enthalpie et l'entropie de l'eau de mer, comme illustré dans le tableau B1.

Tableau (B1) : Les constantes

a_1-a_5	b_1-b_5	b_6-b_{10}	c_1-c_5	c_6-c_{10}
$a_1=8.020\times10^{2}$	$b_1=-2.348\times10^{4}$	$b_6=-4.417\times10^{1}$	$c_1=-4.231\times10^{2}$	$c_6=-1.443\times10^{-1}$
$a_2=-2.001$	$b_2=3.152\times10^{5}$	$b_7=2.139\times10^{-1}$	$c_2=1.463\times10^{4}$	$c_7=5.879\times10^{-4}$
$a_3=1.677\times10^{-2}$	$b_3=2.803\times10^{6}$	$b_8=-1.991\times10^{4}$	$c_3=-9.880\times10^{4}$	$c_8=-6.111\times10^{1}$
$a_4=-3.060\times10^{-5}$	$b_4=-1.446\times10^{7}$	$b_9=2.778\times10^{4}$	$c_4=3.095\times10^{5}$	$c_9=8.041\times10^{1}$
$a_5=-1.613\times10^{-5}$	$b_5=7.826\times10^{3}$	$b_{10}=9.728\times10^{1}$	$c_5=2.562\times10^{1}$	$c_{10}=3.035\times10^{-1}$

B.1 Volume spécifique

La densité de l'eau pure est inférieure à celle de l'eau de mer en raison de la présence de sel, etc. ; par conséquent, le volume spécifique est plus élevé. Dans la littérature, l'utilisation d'un volume spécifique est préférable à la densité car elle est directement liée au débit. La relation entre eux est inversement proportionnelle et s'écrit :

$$v_{sw} = \frac{1}{\rho_{sw}} \tag{B1}$$

La variation de volume spécifique de l'eau de mer avec la pression est très faible et peut être omise dans les applications de dessalement. Sharqawy et al. [106] introduit des corrélations empiriques pour la densité de l'eau de mer et de l'eau pure, telles qu'elles sont données par les expressions suivantes :

$$\rho_{sw} = \rho_w + w_s(a_1 + a_2T + a_3T^2 + a_4T^3 + a_5w_sT^2) \tag{B2}$$

$$\rho_w = 9.999 \times 10^2 + 2.034 \times 10^{-2}T - 6.162 \times 10^{-3}T^2 + 2.261 \times 10^{-5}T^3 - 4.657 \times 10^{-8}T^4 \tag{B3}$$

Où ρ_w et ρ_{sw} sont la densité de l'eau pure et de l'eau de mer, respectivement, en kg/m3.La concentration en sel notée w_s est en kg_s/kg_{sw}.

B.2 Enthalpie spécifique

L'enthalpie spécifique de l'eau pure est plus élevée que celle de l'eau de mer en raison de la présence de sels, etc., dans l'eau de mer, qui augmentent sa capacité calorifique et agissent comme une résistance thermique. L'enthalpie spécifique de l'eau de mer peut être calculée par:

$$h_{sw} = h_w - w_s(b_1 + b_2w_s + b_3w_s^2 + b_4w_s^3 + b_5T + b_6T^2 + b_7T^3 + b_8w_sT + b_9w_s^2T + b_{10}w_sT^2) \tag{B4}$$

Où $h_w$est l'enthalpie spécifique de l'eau pure en (J/kg) et est obtenu par :

$$h_w = 141.355 + 4202.070T - 0.535T^2 + 0.004T^3 \tag{B5}$$

La variation de la pression du cours d'eau, par rapport à l'état de l'environnement, affectera la valeur de l'enthalpie spécifique de l'eau de mer. L'expression suivante est utilisée pour déterminer l'enthalpie spécifique de l'eau de mer à différentes pressions :

$$h_{sw} = (T, p, w_s) = h_{sw}(T, p_0, w_s) + v(p - p_0) \quad \text{(B6)}$$

B.3 Entropie spécifique

L'entropie spécifique de l'eau pure est supérieure à celle de l'eau de mer en raison de la capacité calorifique plus élevée de cette dernière. L'entropie spécifique de l'eau de mer peut être calculée comme suit :

$$S_{sw} = S_w - w_s(c_1 + c_2 w_s + c_3 w_s^2 + c_4 w_s^3 + c_5 T + c_6 T^2 + c_7 T^3 + c_9 w_s^2 T + c_{10} w_s T^2) \quad \text{(B7)}$$

Où S_w est l'entropie spécifique de l'eau pure en (J/(kg.k)) et est obtenu à partir de :

$$S_w = 0.1543 + 15.383T - 2.996 \times 10^{-2} T^2 + 8.193 \times 10^{-5} T^3 - 1.37 \times 10^{-7} T^4 \quad \text{(B8)}$$

Comme illustré dans l'éq. (B7), l'entropie spécifique dépend de la température et de la concentration en sel, alors que l'effet de la pression peut être négligé dans la plupart des cas.

B.4 Potentiel chimique

Le potentiel chimique est un facteur crucial dans l'évaluation des systèmes énergétiques, en particulier lorsque la concentration du fluide de travail est modifiée par un processus de mélange ou un processus de dessalement.

Le potentiel chimique est une propriété intensive qui mesure la tendance d'un flux à libérer des particules vers un autre flux. Le potentiel chimique peut être considéré comme faisant passer les particules de niveaux élevés à faibles. Cela dépend principalement de la composition chimique, et à un état d'équilibre, tous les composants ont les mêmes valeurs. Les potentiels chimiques de l'eau et du sel dans l'eau de mer sont obtenus en utilisant les dérivées de la fonction d'énergie totale de Gibbs comme illustré, respectivement, dans les équations suivantes :

$$\mu_w = \frac{\partial G_{sw}}{\partial m_w} = g_{sw} - w_s \frac{\partial g_{sw}}{\partial w_s} \tag{B9}$$

$$\mu_s = \frac{\partial G_{sw}}{\partial m_s} = g_{sw} + (1 - w_s) \frac{\partial g_{sw}}{\partial w_s} \tag{B10}$$

Oùg_{sw} est l'énergie de Gibbs spécifique de l'eau de mer et s'exprime comme suit :

$$g_{sw} = h_{sw} - (T + 273.15) S_{sw} \tag{B11}$$

La différenciation de l'énergie de Gibbs spécifique par rapport à la salinité telle qu'elle apparaît dans les équations (B9 et B10) peut être calculée en utilisant les dérivées des corrélations d'enthalpie et d'entropie comme suit :

$$\frac{\partial g_{sw}}{\partial w_s} = \frac{\partial h_{sw}}{\partial w_s} - (T + 273.15) \frac{\partial S_{sw}}{\partial w_s} \tag{B12}$$

Notez que les différenciations de l'enthalpie et de l'entropie, m équations B4 et B7, par rapport à la salinité seront les suivantes:

$$-\frac{\partial h_{sw}}{\partial w_s} = b_1 + 2b_2 w_s + 3b_3 w_s^2 + 4b_4 w_s^3 + b_5 T + b_6 T^2 + b_7 T^3 + 2b_8 w_s T + 3b_9 w_s^2 T + 2b_{10} w_s T^2 \tag{B13}$$

$$-\frac{\partial S_{sw}}{\partial w_s} = c_1 + 2c_2 w_s + 3c_3 w_s^2 + 4c_4 w_s^3 + c_5 T + c_6 T^2 + c_7 T^3 + 2c_8 w_s T + 3c_9 w_s^2 T + 4c_{10} w_s T^2 \tag{B14}$$

Annexe C: Destruction d'exergie des composants du système MED-TVC

Composant	Équation	n
Destruction d'exergie des effets	$\dot{E}_5 + \dot{E}_{17} - \dot{E}_7 - \dot{E}_{13} - \dot{E}_{12} - \dot{E}_{11}$	(C 1)
Destruction d'exergie du thermo-compresseur	$\dot{E}_{15} + \dot{E}_{16} - \dot{E}_{17}$	(C 2)
Destruction d'exergie du condenseur	$\dot{E}_2 + \dot{E}_{14} - \dot{E}_3 - \dot{E}_8$	(C 3)
Destruction d'exergie de la production	$\dot{E}_{10} - \dot{E}_{20}$	(C 4)
Destruction d'exergie de la saumure	$\dot{E}_7 - \dot{E}_{19}$	(C 5)
Destruction d'exergie des pompes	$(1 - 0{,}75)E_{pp}$	(C 6)
Travail minimal de séparation	$\dot{E}_{19} + \dot{E}_{20} + \dot{E}_{21} - \dot{E}_{18}$	(C 7)
Exergie d'entrée	$\dot{E}_{16} + E_{PP}$	(C 8)
Destruction totale d'exergie	Exergie entrée − travail minimal de séparation	(C 9)

Annexe D : le bilan massique et énergétique du réacteur PWR

D.1. Equation de bilan massique

Bilan massique du réacteur et du générateur de vapeur

$$\dot{m}_1 = \dot{m}_2 = \dot{m}_3 \quad \text{(E 1)}$$

$$\dot{m}_4 = \dot{m}_{32} \quad \text{(E 2)}$$

Bilan massique des turbines basses et haute pression

$$\dot{m}_9 = \dot{m}_4 - \dot{m}_5 \quad \text{(E 3)}$$

$$\dot{m}_{12} = \dot{m}_5 - \dot{m}_6 \quad \text{(E 4)}$$

$$\dot{m}_{18} = \dot{m}_{11} - \dot{m}_{14} - \dot{m}_{15} - \dot{m}_{16} - \dot{m}_{17} \quad \text{(E 5)}$$

Bilan massique de condenseur

$$\dot{m}_{19} = \dot{m}_{18} + \dot{m}_{40} \quad \text{(E 6)}$$

D.2. Equation de bilan énergétique

La puissance thermique total libéré par le réacteur

$$P_{rea} = \dot{m}_1(h_1 - h_3) \quad \text{(E 7)}$$

Puissance de générateur de vapeur

$$\dot{Q}_{SG} = \dot{m}_1(h_1 - h_2) \quad \text{(E 8)}$$

Travail des pompes

$$\dot{W}_{p,i} = \dot{m}\dot{(}h_s - h_e) \quad \text{(E 9)}$$

$$\dot{W}_{tot,p} = \sum_{i=1}^{i} \dot{W}_{p,i} \quad \text{(E 10)}$$

Bilan énergétique de condenseur, réservoir d'eau d'aimantation, les appareils de chauffage, séparateur d'humidité, …etc

$$\dot{Q} = \dot{m}(h_e - h_s) \quad \text{(E 11)}$$

Puissance des turbines hautes et basse pression

$$\dot{W}_{HPT} = \dot{m}_5 - (\dot{m}_6 h_6 + \dot{m}_{12} h_{12}) \quad \text{(E 12)}$$

$$\dot{W}_{LPT} = \dot{m}_{11} h_{11} - (\dot{m}_{44} h_{44} + \dot{m}_{15} h_{15} + \dot{m}_{16} h_{16} + \dot{m}_{17} h_{17} + \dot{m}_{18} h_{18}) \quad \text{(E 13)}$$

$$\dot{W}_{\boldsymbol{tot,T}} = \dot{W}_{HPT} + \dot{W}_{LPT} \quad \text{(E 14)}$$

La puissance nette de centrale PWR

$$\dot{W}_{net,PWR} = \dot{W}_{HPT} + \dot{W}_{LPT} - \dot{W}_{tot,p} \quad \text{(E 15)}$$

Rendement thermique de PWR

$$\eta_{PWR} = \dot{W}_{net,PWR}/P_{rea} \quad \text{(E 16)}$$

Annexe E: Destruction d'exergie des composants du système MED-TVC

Composants	Equations	
(Rea)	$\dot{Q}_{fiss} + \dot{E}x_3 - \dot{E}x_1$	(F 1)
(SG)	$\dot{E}x_1 + \dot{E}x_{32} + \dot{E}x_4 - \dot{E}x_2$	(F 2)
(MS)	$\dot{E}x_6 - \dot{E}x_7 - \dot{E}x_8 - \dot{E}x_{13}$	(F 3)
(RH)	$\dot{E}x_8 + \dot{E}x_9 - \dot{E}x_{10} - \dot{E}x_{11}$	(F 4)
Condenser	$\dot{E}x_{18} + \dot{E}x_{40} + \dot{E}x_{41} - \dot{E}x_{19} - \dot{E}x_{42}$	(F 5)
(HPT)	$\dot{E}x_5 - \dot{E}x_{12} - \dot{E}x_6 - \dot{W}_{HPT}$	(F 6)
(LPT)	$\dot{E}x_{11} - \dot{E}x_{44} - \dot{E}x_{15} - \dot{E}x_{16} - \dot{E}x_{17} - \dot{E}x_{18} - \dot{W}_{LPT}$	(F 7)
(LPH1)	$\dot{E}x_{21} + \dot{E}x_{47} - \dot{E}x_{22} - \dot{E}x_{40}$	(F 8)
(LPH2)	$\dot{E}x_{22} + \dot{E}x_{37} - \dot{E}x_{23} - \dot{E}x_{39}$	(F 9)
(LPH3)	$\dot{E}x_{17} + \dot{E}x_{23} + \dot{E}x_{45} - \dot{E}x_{38} - \dot{E}x_{24}$	(F 10)
(LPH4)	$\dot{E}x_{16} + \dot{E}x_{24} - \dot{E}x_{25} - \dot{E}x_{37}$	(F 11)
(LPH5)	$\dot{E}x_{15} + \dot{E}x_{25} - \dot{E}x_{26} - \dot{E}x_{43}$	(F 12)
(FWT)	$\dot{E}x_{14} + \dot{E}x_{27} + \dot{E}x_{35} - \dot{E}x_{28}$	(F 13)
(HPH1)	$\dot{E}x_7 + \dot{E}x_{13} + \dot{E}x_{29} + \dot{E}x_{34} - \dot{E}x_{30} - \dot{E}x_{35}$	(F 14)
(HPH2)	$\dot{E}x_{12} + \dot{E}x_{30} + \dot{E}x_{33} - \dot{E}x_{31} - \dot{E}x_{34}$	(F 15)
(HPH3)	$\dot{E}x_{10} + \dot{E}x_{31} - \dot{E}x_{32} - \dot{E}x_{33}$	(F 16)
P 1	$\dot{E}x_{19} + \dot{W}_{P1} - \dot{E}x_{20}$	(F 17)
P 2	$\dot{E}x_{36} + \dot{W}_{P2} - \dot{E}x_{43}$	(F 18)
P 3	$\dot{E}x_{28} + \dot{W}_{P3} - \dot{E}x_{29}$	(F 19)
P 4	$\dot{E}x_2 + \dot{W}_{P4} - \dot{E}x_3$	(F 20)