

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة غرداية
Université de Ghardaïa

N° d'enregistrement

/ / / / /



كلية العلوم والتكنولوجيا
Faculté des Sciences et de la Technologie

قسم هندسة الطرائق

Département de Génie des procédés

Mémoire de fin d'étude, en vue de l'obtention du diplôme

Master

Domaine: Science et technologie

Filière: Génie des procédés

Spécialité: Génie chimique

Thème

**Etude de la performance d'un évaporateur a simple effet
pour le dessalement de l'eau de mer**

Présenté par :

**BEKKAYE Yacine
AMER Ilyes**

Soutenue publiquement le...../...../.....

Devant le jury composé de :

Prénom et nom	Grade	Université	Président
LALMI Djemoui	MCA	Université de Ghardaïa	Encadreur
ZITANI Brahim	MAA	Université de Ghardaïa	Examinateur
BENSEDDIK Abdelouahab	MRA	URAER	Examinateur

Année universitaire 2022

REMERCIEMENT

Merci Par-dessus tout, nous remercions Dieu Tout-Puissant de nous avoir donné de la force, du courage et de la patience d'avoir fait cet humble travail. Aussi, merci beaucoup pour nos chers pères. Nous remercions également tous les enseignants du génie chimique et l'ingénierie des méthodes qui nous ont accompagnées au cours de notre étude. Nous tenons à exprimer notre profonde appréciation et nos sincères remerciements à notre superviseur **Djemoui LALMI**, professeur à l'Université Ghardaïa pour sa précieuse supervision et son soutien quotidien qui ont permis de mettre en œuvre ce travail. Nous tenons à remercier nos collègues, avec qui nous avons passé des moments inoubliables pendant les années théoriques et tout en réalisant ce travail, ils ont toujours montré leur soutien et nous ont toujours encouragés à aller de l'avant. Enfin, nous tenons également à remercier tous ceux qui ont participé directement ou indirectement dans la réalisation de ce travail.

DEDICACE

Je dédie ce travail à mes parents qui ont toujours été à mes côtés pour me soutenir et me donner le courage de continuer à avancer dans mes études. Merci beaucoup ma maman et mon papa vous aiment tellement.

pour mon frère et mes soeurs. A mon ami qui a participé à l'honneur de faire ce travail : **YACINE BEKKAYE**. A toute la famille **AMAR** et la famille de **BEKKAY** à tous mes amis **ALOUT ABDEL WAHAB, BUSHLAGHEM ILYES, DADI BABA ZUHAIR, MOHAMED EL HADI**, et **ELIHM RAFEEQ**, et tous mes autres amis et collègues de la campagne 2021-2022. A notre superviseur, **DJEMOUI LALMI**, car il m'a apporté toute l'aide possible tout au long de ma carrière.

AMER ILYES

DEDICACE

Je fertilise ce travail pour mes parents qui étaient toujours à côté de moi pour me soutenir et me donner le courage de continuer à progresser dans mes études. Merci beaucoup à mon père et à ma mère, je t'aime tellement.

À mon frère et mes sœurs. À mon ami qui est partagé avec moi pour l'honneur de mener à bien ce travail: **ILYES AMER** .
Pour toute la mer. Pour tous mes amis, tous les autres amis et promotion 2021-2022. Notre superviseur **DJEMOUI LALMI** m'a apporté toute aide possible tout au long de mon travail.

YACINE BEKKAYE

SOMMAIRE

LIST DES FIGURES	I
LISTE DES TABLEAUX	II
LISTE DES ABREVIATIONS	II
Résume:	III
Abstract	IV
ملخص	V

INTRODUCTION GENERALE.....	1
----------------------------	---

CHAPITRE I GÉNÉRALITE SUR LE DESSALEMENT DE L'EAU DE MER

I.1 Introduction.....	3
I.2 Qualité de source d'eau :.....	4
I.2.1 Les eaux saumâtres.....	4
I.2.2 L'eau de mer.....	4
I.2.3 Composition de l'eau de mer.....	4
I.3 Dessalement de l'eau de mer	6
I.3.1 Historique de Dessalement.....	6
I.5 Différents systèmes de dessalement.....	10
1.5.1 Processus thermiques.....	10
I.5.1.1. Évaporation à simple effet	11
I.5.1.2. Distillation multi-effets.....	11
I.5.1.3 Distillation flash multi-étages (MFS)	12
I.5.1.4 Compression de vapeur.....	13
I.5.2 Processus membranaires	14
I.5.2.1 Osmose inverse RO	15
I.5.1.2 Électrodialyse	16
I.5.3 Autres processus	18
I.5.3.1 Congélation.....	18
I.5.3.2 Évaporation solaire	18
I.5.3.3 La potabilisation	19
I.6 Économie	20
I.7 Perspectives d'avenir.....	20
I.8 Recherche et développement	21
I.8.1 Dessalement thermique.....	23
I.8.2 Dessalement de membrane	23
I.8.3 Technologies alternatives de dessalement	24
I.8.4 Intégration énergétique	24

I.8.5 Systèmes hybrides	24
I.8.6 Aspects environnementaux	24
I.9 Remarques de conclusion.....	25

CHAPITRE II

LES EVAPORATEURS

II.1 Introduction.....	26
II.2 Types d'évaporateurs	27
II.2.1 Évaporateurs sous vide à circulation forcée.....	27
II.2.2 Évaporateurs verticaux à tube court.....	28
II.2.3 Évaporateurs à couches minces agité.....	29
II.2.4 Évaporateurs verticaux à long tube	30
II.2.5 Évaporateur à plaques avec joint	31
II.2.6 Évaporateurs à film tombant.....	32
II.2.7 Évaporateurs à film ascendant	34
II.2.8 Évaporateur de film de pulvérisation horizontal.....	35
II.2.9 Évaporateurs à compression de vapeur.....	36
II.3 Méthodes d'alimentation des évaporateurs	36
II.3.1 Avance directe.....	37
II.3.2 Retour en arrière.....	38
II.3.3 Alimentation mixte	39
II.3.4 Flux parallèle.....	40
II.4 Performance des évaporateurs	41
II.5 Considération relative à la conception thermique / des conduites de fumées.....	42
II.5.1 Taille du tube, disposition et matériaux	42
II.5.1.1 Coefficients de transfert de chaleur.....	42
II.5.2 Point d'ébullition (BPE)	43
II.5.2.1 Détermination de BPE.....	44
II.5.3 Sélection d'un évaporateur approprié.....	44
II.6 Considérations de conception mécanique	44
II.6.1 Température de fonctionnement et pression	45
II.6.2 Température et pression de conception.....	45
II.6.3 Pression de travail maximale admissible	45
II.6.4 Expansion thermique.....	45
II.7 Calcul de conception thermique	46
II.7.1 Calculs à effet unique.....	46
II.7.2 Calculs d'effets multiples	46
Conclusion.....	49

III.1 Introduction :	51
III.2 Définition d'un processus et d'un modèle :	51
III.2.1 Processus :	51
III.3 Modèles :	51
III.2.1 Définition :	51
III.2.2 Les étapes de la conception d'un modèle :	52
III.3 Evaporation de simple effet :	52
III.3.1. Description du procédé :	52
III.3.2 Modélisation de procédé :	56
III.3.2.1 Bilans de matière :	56
III.3.2.2 Bilans énergétiques dans l'évaporateur et le condenseur :	57
III.3.2.3 Surface de transfert de chaleur de l'évaporateur et le condenseur :	60
III.3.2.4 Paramètres de performance :	61

IV.1 Introduction :	63
IV.2 Microsoft Visual Basic :	63
IV.2.1 Choix du langage de programmation :	64
IV.2.2 Présentation du programme de calcul :	64
IV.3 Calcul de l'évaporateur à simple effet :	66
IV.3.1 Données du problème :	67
IV.3.2 Effet de la température et la salinité de l'eau de mer et la température d'ébullition sur le rapport de performance :	68
IV.3.4 Variation de la surface spécifique de transfert de chaleur en fonction de la température et la salinité de l'eau de mer:	70
IV.3.5 Variation du débit spécifique de l'eau de mer en fonction de la température d'ébullition :	71
IV.3.6 Variation du débit spécifique d'eau de mer de refroidissement en fonction de la salinité de l'eau de mer:	73
CONCLUSION GÉNÉRALE	75
REFERENCES BIBLIOGRAPHIE	77
ANNEXES	81

LIST DES FIGURES

Figure	Titres	P
Figure I 1	Principaux composants de l'eau de mer.....	6
Figure I 2	Principe d'un système de dessalement	8
Figure I 3	Classification Des procédés de dessalement.....	10
Figure I 4	Évaporation à simple effet	11
Figure I 5	Evaporator à multi flash stage[100].....	12
Figure I 6	Le processus de dessalement de MSF.....	13
Figure I.7	Compression de vapeur	14
Figure I. 8	Processus membranaires	15
Figure I 9	Osmose inverse RO	16
Figure I 10	Schéma du processus d'électrodialyse	17
Figure II 1	Évaporateurs sous vide à circulation forcée	28
Figure II 2	Évaporateur de type Calandria	29
Figure II 3	Évaporateur à couche mince agité.....	30
Figure II 4	Évaporateur verticale à long tube.....	31
Figure II 5	Évaporateur à plaques avec joint.....	32
Figure II 6	Évaporateur à film tombant.....	33
Figure II 7	Évaporateur à film ascendant	34
Figure II 8	Évaporateur de film de pulvérisation horizontal.....	35
Figure II 9	Évaporateurs à compression de vapeur	36
Figure II 10	Méthode d'alimentation avance directe.....	38
Figure II 11	d'alimentation retour en arrière.....	39
Figure II 12	Méthode d'alimentation mixte.....	40
Figure II 13	Méthode d'alimentation flux parallèle.....	41
Figure II 14	Débits et pression dans un évaporateur à triple effet.....	47
Figure III 1	Procèdes de dessalement par évaporation à simple effet.	54
Figure III 2	Les profils de température dans l'évaporateur et le condenseur	55
Figure IV 1	Feuille de calcul principale du programme.....	65
Figure IV 2	Feuille de calcul et menue secondaire programme	66
Figure IV 3	Effet de la température de l'eau de mer et d'ébullition sur le rapport de performance.	69
Figure IV 4	variation de rapport de performance en fonction de la température et la salinité de l'eau de mer.	69
Figure IV 5	variation de rapport de performance en fonction de la température et la salinité de l'eau de mer.	69
Figure IV 6	Effet de température d'eau de mer sur la surface spécifique de transfert de chaleur	70
Figure IV 7	variation de surface spécifique de transfert de chaleur en fonction de température et salinité de l'eau de mer.....	73
Figure IV 8	Effet de la température d'ébullition et celle de l'eau de mer sur le débit spécifique de l'eau de refroidissement.	72

Figure IV 9 Effet de la salinité et la température d'eau de mer sur le débit spécifique d'eau de mer. 73

LISTE DES TABLEAUX

Tableau	Titres	P
Tableau I.1	Classification des eaux selon la salinité	5
Tableau II. 1	Coefficients généraux de transfert de chaleur dans les évaporateurs	43

LISTE DES ABREVIATIONS

T	La température °C.
BPE	L'augmentation de point d'ébullition °C.
λ	La chaleur latente KJ / Kg.
M	Débit massique Kg / s.
sM	Débit spécifique
PR	Rapport de performance.
A	Surface d'échange de chaleur m ² .
sA	Surface d'échange de chaleur spécifique m ² /Kg. s.
Cp	Capacité thermique de l'eau KJ/Kg.°C .
U	Coefficient global de transfert de chaleur KJ/s.m ² . °C.
X	Salinité ppm.
LMTD	La différence logarithmique moyenne.
Q	La charge thermique KJ/s.
Les indices :	
s	Vapeur de chauffage.
b	Saumure.
c	Condensateur.
e	Evaporateur.
cw	Eau de mer
d	Distillat
f	Alimentation

Résumé:

L'eau est un élément clé et vital pour la survie de la vie sur terre. Les premières civilisations humaines étaient basées sur l'eau et son utilisation. Le développement démographique, l'augmentation des frais de subsistance, le développement industriel et agricole conduisent à la pollution de l'eau. Les problèmes liés à l'eau sont devenus plus importants compte tenu de la raréfaction des sources d'eau potable sur la planète, incitant les chercheurs à enquêter sur l'avenir de ce liquide, précieux pour la vie, et à travailler pour trouver de nouvelles sources d'eau. Prenez l'ancien que nous avons cité : le dessalement. En Algérie, la seule source d'eau potable est l'eau souterraine, qui est petite et limitée, nous devons donc nous efforcer d'utiliser les eaux méditerranéennes, notre travail a été fait avec différentes technologies de dessalement des eaux et Ainsi que l'étude de la technologie d'évaporation à simple effet à l'aide d'un programme de calcul écrit selon VISUAL BASIC (VB 6.0), qui calcule les paramètres de performance tels que l'efficacité, la surface d'échange thermique et le débit spécifique d'eau de mer de refroidissement et la connaissance des valeurs optimales, simple effet réglable Système d'évaporation, quelle est la meilleure technologie pour obtenir de l'eau potable avec des économies d'énergie, des performances élevées et une efficacité parfaite.

MOTS CLÉS:: *Eau, évaporateur, performance, dessalement et efficacité*

Abstract

Water is a key and vital element for the survival of life on earth. The first human civilizations were based on water and its use. Population development, increased living costs, industrial and agricultural development lead to water pollution. Water-related issues have become more prominent given the scarcity of drinking water sources on the planet, prompting researchers to investigate the future of this precious liquid for life, and to work to find new solutions. new sources of water. Take the old one we mentioned: desalination. In Algeria, the only source of drinking water is groundwater, which is small and limited, so we must strive to use Mediterranean waters, our work has been done with different water desalination technologies and study of single-effect evaporation technology using a calculation program written according to VISUAL BASIC (VB 6.0), which calculates performance parameters such as efficiency, heat exchange surface and specific flow rate of cooling seawater and knowledge of the optimal values, adjustable single effect Evaporation system, what is the best technology to obtain drinking water with energy savings, high performance and perfect efficiency

KEYWORDS: Water, evaporator, performance, desalination and efficiency

ملخص

الماء عنصر أساسي وحيوي لبقاء الحياة على الأرض. كانت الحضارات الإنسانية الأولى قائمة على الماء واستخداماته. تؤدي التنمية السكانية وزيادة تكاليف المعيشة والتنمية الصناعية والزراعية إلى تلوث المياه. أصبحت القضايا المتعلقة بالمياه أكثر بروزًا نظرًا لندرة مصادر مياه الشرب على الكوكب ، مما دفع الباحثين إلى استكشاف مستقبل هذا السائل الثمين مدى الحياة ، والعمل على إيجاد حلول جديدة. مصادر جديدة للمياه. خذ القديم الذي ذكرناه: التحلية. في الجزائر ، المصدر الوحيد لمياه الشرب هو المياه الجوفية ، وهي مياه صغيرة ومحدودة ، لذلك يجب أن نسعى جاهدين لاستخدام مياه البحر الأبيض المتوسط ، وقد تم عملنا باستخدام تقنيات مختلفة ، *VISUAL* لتحلية المياه ودراسة تكنولوجيا التبخر ذات التأثير الفردي باستخدام برنامج حسابي مكتوب وفقًا لـ ، والذي يحسب معلمات الأداء مثل الكفاءة وسطح التبادل الحراري ومعدل التدفق المحدد (*VB 6.0*) لمياه البحر الباردة ومعرفة القيم المثلى ونظام التبخر ذو التأثير الفردي القابل للضبط ، ما هي أفضل تقنية للحصول على مياه الشرب باستخدام توفير الطاقة والأداء العالي والكفاءة المثالية.

الكلمات المفتاحية: المياه ، المبخر ، الأداء ، التحلية والكفاءة

INTRODUCTION

GENERALES

INTRODUCTION GENERALE

L'eau douce, vitale pour la vie, est en quantité limitée sur Terre, et sa qualité est constamment menacée. Aujourd'hui, selon l'Organisation mondiale de la santé, une personne sur trois dans le monde n'a pas assez d'eau pour subvenir à ses besoins quotidiens. À l'échelle mondiale, le problème s'aggrave à mesure que les villes et les populations grandissent et que l'agriculture, l'industrie et les ménages ont perpétuellement besoin d'eau. Cela a le potentiel de compromettre sérieusement l'approvisionnement en eau douce de la majeure partie de l'humanité, alimentant ainsi les conflits entre pays voisins qui partagent une ressource commune. Face à cette situation, le dessalement des eaux de mer ou saumâtres constitue ainsi une des réponses possibles à la raréfaction des ressources en eau [1].

L'eau est abondante sur Terre, représentant 1,38 milliard de kilomètres carrés. Cependant, la majeure partie est constituée d'eau de mer (97,2%) et de glace (2,15%) qui ne peuvent pas être utilisées directement. L'accès facile à l'eau douce (lacs, rivières, certaines eaux souterraines) ne représente que 0,07 % de la ressource totale, soit environ 1 million de kilomètres carrés. Mais cette répartition de l'eau est très inégale. En fait, 10 pays se partagent 60 % de leurs réserves d'eau douce, tandis que les 29 autres pays (principalement en Afrique et au Moyen-Orient), en revanche, font face à des pénuries chroniques d'eau douce. Dans ces pays, 250 millions de personnes n'ont pas actuellement une consommation d'eau minimale de 1 000 mètres cubes par habitant et par an, selon l'Institut de l'eau. 400 millions de personnes vivent dans des environnements en situation de stress hydrique, estimé entre 1 000 et 2 000 mètres cubes par personne et par an [2].

Le dessalement (également appelé dessalement ou dessalement) est un processus par lequel de l'eau douce (potable ou, à moindre coût, d'irrigation) peut être obtenue à partir d'eau saumâtre ou saumâtre, en particulier d'eau de mer. Malgré son nom, il s'agit rarement de retirer le sel de l'eau, mais plutôt d'extraire de l'eau douce. En général, trouver des sources d'eau douce à traiter (eaux de surface, telles que lacs et rivières, ou eaux souterraines) est plus simple et plus économique que le dessalement de l'eau de mer. Cependant, dans de nombreuses régions du monde, les sources d'eau douce n'existent pas ou deviennent insuffisantes par rapport à la croissance démographique ou à la production industrielle.

Le dessalement de l'eau de mer est désormais un principe envisageable pour obtenir de l'eau potable du fait du nombre croissant d'êtres humains sur terre et de l'élévation du niveau de vie et de la rareté de cette ressource.

Les technologies actuelles de dessalement se divisent en deux catégories selon les principes appliqués :

- Procédés thermiques impliquant des transitions de phase : congélation et distillation.
- Procédés utilisant des membranes : osmose inverse et électrodialyse.

Parmi les procédés cités ci-dessus, la distillation et l'osmose inverse sont des technologies pour lesquelles la performance de la technologie de dessalement d'eau de mer a été prouvée, et ces deux procédés sont les plus vendus sur le marché mondial du dessalement d'eau de mer. Les autres technologies n'ont pas connu de croissance significative dans ce domaine en raison de problèmes généralement liés à la consommation d'énergie et/ou à l'ampleur des investissements requis.

Quel que soit le processus de séparation de saumure envisagé, toutes les usines de dessalement impliquent 4 étapes :

- Entrée eau de mer avec pompe et filtre grossier,
- Prétraitement avec filtration plus fine, ajout de biocides et de produits antitartre,
- Le processus de dessalement lui-même,
- Le post-traitement peut reminéraliser l'eau produite.

A l'issue de ces 4 étapes, l'eau de mer devient une eau de mer potable ou industriellement utilisable, qui doit contenir moins de 0,5 gramme par litre de sel [2].

Le plan d'action est conçu comme suit, après une introduction générale, le chapitre 1 est consacré aux généralités sur le dessalement de l'eau de mer dans le temps ou le chapitre II est consacré à l'évaporation et aux évaporateurs, le chapitre 3 décrit la modification de l'évaporation à simple effet, tandis que le chapitre 4 contient les résultats obtenus et leur interprétation. La fin de mémoire se termine par une conclusion générale.

CHAPITRE I
GÉNÉRALITE SUR LE DESSALEMENT DE L'EAU DE
MER

CHAPITRE I

GÉNÉRALITE SUR LE DESSALEMENT DE L'EAU DE MER

I.1 Introduction

Alors que l'approvisionnement mondial en eau douce se raréfie et que la population mondiale continue de croître [4], selon l'Organisation mondiale de la santé, près de 700 millions de personnes, soit une personne sur, n'avaient toujours pas accès à l'eau potable en 2015 [5]. Plus inquiétant encore, un rapport des Nations unies de 2006 estimait que d'ici 2025[6], 60 % de la population mondiale serait confrontée à des problèmes d'eau. L'eau est un élément essentiel à la vie, elle n'est pas seulement utilisée pour la boisson, mais aussi pour les activités domestiques (alimentation, lessive, lessive, etc.), l'industrie (alimentation, papier, automobiles, etc.), l'agriculture (irrigation), l'électricité génération, etc. À la surface de la terre L'eau dans le monde est très abondante, mais 97% des ressources en eau sur la terre sont de l'eau salée (océans), et les calottes polaires, qui représentent les 3/4 de l'eau douce sur terre, sont malheureusement inaccessibles [7].

L'eau que nous utilisons provient principalement des lacs, rivières, cycles de l'eau, puits et forages, soit 3% des réservoirs d'eau douce. La quantité d'eau douce disponible est inégalement répartie, car elle est relativement abondante dans certaines parties du globe et presque inexistante dans d'autres. Dans les zones où les ressources en eau sont assez abondantes, des problèmes d'eau potable liés à la pollution naturelle ou à la contamination humaine des ressources sont parfois constatés [7].

Le pourcentage de saumure est de 97 %. Les 3 % restants sont de l'eau douce, dont 80 % sont gelés dans des calottes glaciaires ou incorporés dans l'humidité du sol. Aucune des deux formes n'est facilement accessible aux humains. Le montant restant est d'environ 0,5%, assez pour soutenir toute vie sur Terre. Malheureusement, cette distribution d'eau ne garantit pas une utilisation complète à tous les endroits [8].

La plupart des précipitations se retrouvent sous la forme d'eaux souterraines ou d'aquifères profonds. Les aquifères profonds se sont révélés être une source fiable d'eau potable en bouteille. En effet, les taux d'utilisation de l'eau réglementés et limités de ces sources assurent une recharge naturelle adéquate des sources d'eau.

De plus, les processus naturels à travers diverses formations rocheuses fournissent à l'eau des minéraux naturels et maintiennent son pH à des niveaux acceptable [8].

I.2 Qualité de source d'eau :

I.2.1 Les eaux saumâtres

L'eau saumâtre est une eau non potable dont la salinité est inférieure à celle de l'eau de mer. L'eau saumâtre contient 1 à 10 grammes de sel par litre. Parfois, il s'agit d'eau de surface, mais le plus souvent, il s'agit d'eau souterraine, qui est déjà saturée de sel lorsqu'elle traverse le sol. Par conséquent, leur composition dépend de la nature du sol qu'ils traversent. Les principaux sels dissous sont CaCO_3 , CaSO_4 , MgCO_3 et NaCl [9].

I.2.2 L'eau de mer

L'eau de mer est un liquide très diversifié, car elle contient une cinquantaine d'objets simples. Les comptages de ces objets simples proviennent de l'hydrogène [10], de l'oxygène et l'eau de mer contient plus de 17 éléments chimiques dissous, dont seulement deux (sodium et chlore) représentent 85% du poids élémentaire total et sont donc caractérisés par la salinité, définie comme la total lorsque tout l'acide carbonique Le sel est converti en oxydes, le brome et l'iode sont remplacés par du chlore et toutes les matières organiques, la quantité résiduelle de solides (en grammes) contenue dans un kilogramme d'eau de mer a été oxydée et la salinité moyenne de l'eau de mer a été trouvée à 35 g/l , mais en pratique il faut tenir compte du fait que l'eau de mer contient généralement 35 à 42 g/l de sels minéraux dissous, et que la salinité varie d'une mer à l'autre[10]

I.2.3 Composition de l'eau de mer

Les principaux ions de l'eau de mer sont Na^+ , Ca^{+2} K^+ , Mg^{+2} , $(\text{SO}_4)^{-2}$ et Cl^- . Bien sûr, tous les autres ions présents dans la nature sont présents dans l'eau de mer, mais à des concentrations beaucoup plus faibles. La composition chimique de la haute mer est constante, mais le volume total de solides dissous varie en fonction de la zone locale. C'est parce que le moment de diffusion du sel, ou le temps qu'il faut pour que tous les océans se mélangent complètement, est bien inférieur au temps qu'il faut pour se remplir complètement. Une composition typique montre l'eau de mer, qui a une salinité totale de 36 000 ppm. De plus, les ions trouvés dans l'eau de mer comprennent

une grande variété de substances finement suspendues, à l'exclusion du sable, de l'argile, des micro-organismes, des virus et des substances colloïdales. Ces composés varient en taille de 5×10^{-2} à $0,15 \mu\text{m}$ [8].

Nommer avec précision les eaux côtières ou celles situées plus au large dans l'océan ou les océans où la salinité est la plus élevée. La salinité moyenne de l'eau de mer est d'environ 35 g/l, mais cette valeur varie selon les régions et les saisons : Baltique : 7 g/l, Méditerranée : 36 à 39 g/l, Golfe Persique : 40 à 70 g/l, Mer Morte : 270 g/l. [9]

Le pH moyen de l'eau de mer varie entre 7,5 et 8,4 (l'eau de mer est un milieu légèrement alcalin) et sa pression osmotique est d'environ 26 bars. Lorsque l'eau est classée en fonction de la quantité de solides dissous qu'elle contient, les données indiquées dans le tableau I.1 sont obtenues.

Type d'eau	Salinité (mg/L)
Eau douce	< 500
Eau légèrement saumâtre	1 000 – 5 000
Eau modérément saumâtre	5 000 – 15 000
Eau très saumâtre	15 000 – 35 000
Eau de mer	35 000 – 42 000

Tableau I.1 Classification des eaux selon la salinité [11].

L'eau de mer se compose d'eau et de sels et de petites quantités de diverses substances. Si plus des deux tiers des 94 éléments chimiques naturels sont présents dans l'eau de mer, la plupart sont petits et difficiles à détecter [11].

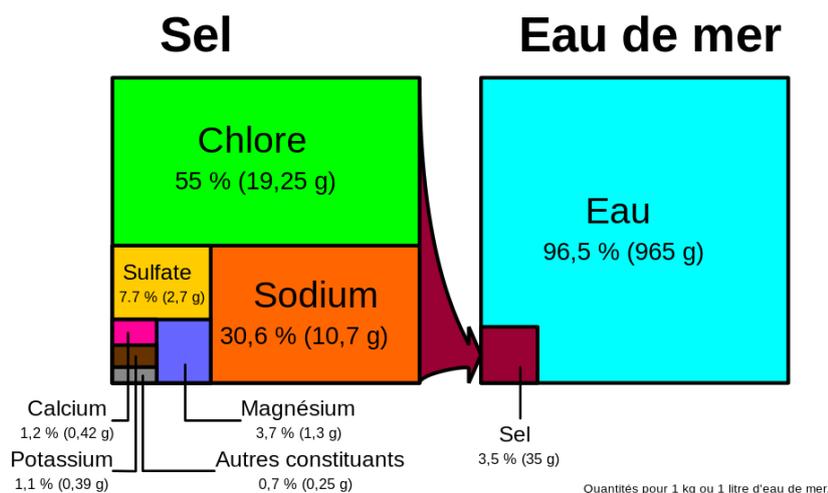


Figure I 1 Principaux composants de l'eau de mer [12].

I.3 Dessalement de l'eau de mer

De nombreux pays dans le monde souffrent de pénuries naturelles d'eau douce. En raison de la croissance démographique et de l'amélioration des conditions de vie, ainsi que de l'expansion des activités industrielles et agricoles, de plus en plus d'eau douce sera nécessaire à l'avenir. Les ressources en eau douce disponibles dans les rivières et les eaux souterraines sont actuellement limitées et s'épuisent à un rythme alarmant dans de nombreux endroits [13]. Aujourd'hui, certains pays comptent sur la technologie de dessalement pour répondre à leurs besoins en eau douce.

Au Moyen-Orient, le dessalement est une ressource d'eau douce importante et fiable dans des pays comme l'Arabie saoudite, les Émirats arabes unis et le Koweït [13]. De plus, le dessalement devrait continuer à prévaloir au Moyen-Orient [13]. Dans l'ensemble, on estime que plus de 75 millions de personnes dans le monde obtiennent de l'eau douce grâce au dessalement de l'eau de mer ou saumâtre [14].

I.3.1 Historique de Dessalement

L'idée d'extraire l'eau potable de la mer n'est pas nouvelle. La nature l'a toujours fait à travers le cycle naturel de l'eau. Sous l'action du soleil, les océans s'évaporent et la vapeur d'eau forme des nuages, qui peuvent faire tomber de la pluie ou de la neige une fois que de grandes quantités d'air humide atteignent les régions plus froides. L'eau de précipitation est pure car le sel de la mer ne s'évapore pas, seule l'eau s'évapore.

Face à l'approvisionnement en eau des navires, les anciens marins imitaient déjà la nature en faisant bouillir l'eau de mer et en extrayant de l'eau non salée en condensant la vapeur produite. Dans *Météorologique*, Aristote (384-322 av. J.-C.) écrit : « J'ai montré expérimentalement que la saumure évaporée se ramollit, tandis que la vapeur condensée ne réforme pas l'eau de mer. » Pline l'Ancien (23 -79, *Histoire Naturelle*), Alexandre Aphrodisiaque (150-215) et saint Basile (329-379, *Sermon*) semblent être les premiers à décrire le processus de potabilisation de l'eau de mer[15] . Mais ce n'est qu'au 18^{ième} siècle que les gens ont mentionné des procédés qui augmentaient les rendements, amélioraient la pureté de l'eau ou économisaient de l'énergie. Ce n'est qu'au début du 20^{ième} siècle que les premiers véritables procédés industriels de distillation, de concentration solutions et de production d'eau douce par évaporation puis condensation, ont vu le jour.

Puis, vers 1959, l'Université de Californie a développé un procédé appelé osmose inverse comme méthode pour séparer la mélasse (Dubrunfaut, 1853[17]) et les colloïdes (Graham 1854, origine du terme osmose[18]). C'est un procédé membranaire : en appliquant une pression, l'eau douce est extraite de l'eau salée à travers une membrane semi-poreuse. La première membrane commerciale date de 1970.

Pendant la Seconde Guerre mondiale, le besoin de développer une technologie de dessalement connue sous le nom de "dessalement" s'est fait sentir pour convertir l'eau salée en eau utilisable avec un approvisionnement limité en eau douce. Par la suite, le Congrès a adopté la loi sur la saumure en 1952, qui a fourni un soutien fédéral au dessalement. Le département américain de l'Intérieur, par l'intermédiaire de l'Office of Saltwater (OSW), a financé le développement initial de la technologie de dessalement et la construction d'usines de démonstration dans les années 1950 et 1960. Le dessalement est une science relativement nouvelle qui a connu un développement considérable dans la seconde moitié du 18^{ième} siècle, et les améliorations techniques se poursuivent encore aujourd'hui. Fait intéressant, l'une des premières usines de dessalement de démonstration construites aux États-Unis se trouvait à Freeport, au Texas, en 1961. Dow s'est associé au département américain de l'Intérieur pour construire une distillerie à tube long vertical (LTV) de 1 million de gallons par jour et 1,2 million de dollars afin de produire de l'eau pour la ville de Freeport et Dow. L'usine a été officiellement inaugurée le 21 juin 1961, sur simple pression d'un bouton

par le président John F. Kennedy à la Maison Blanche. Le vice-président Lyndon Johnson a assisté à l'inauguration à Freeport[19] .

Dans un discours consacré aux usines de dessalement, le président Kennedy a déclaré : "Aucun programme sur l'eau n'est plus important que nos efforts pour convertir l'eau de la ressource naturelle la plus grande et la moins chère du monde - nos océans - en eau potable". Une telle percée mettrait fin à lutttes acharnées entre voisins, nations et peuples." Ces déclarations sont encore vraies aujourd'hui, plus de 40 ans plus tard [19].

I.4 Définition et classification des procédés industriels de dessalement

Le processus connu sous le nom de dessalement implique la séparation de l'eau et des sels de l'eau brute, qui peut être de l'eau de mer ou de l'eau saumâtre d'origine continentale, bien qu'il existe différentes méthodes pour convertir l'eau de mer en eau douce, un processus global général s'applique à tout système. La nature réelle de chaque étape dépend de la méthode de dessalement utilisée. La Figure I.2 montre les étapes impliquées dans le processus [20] .

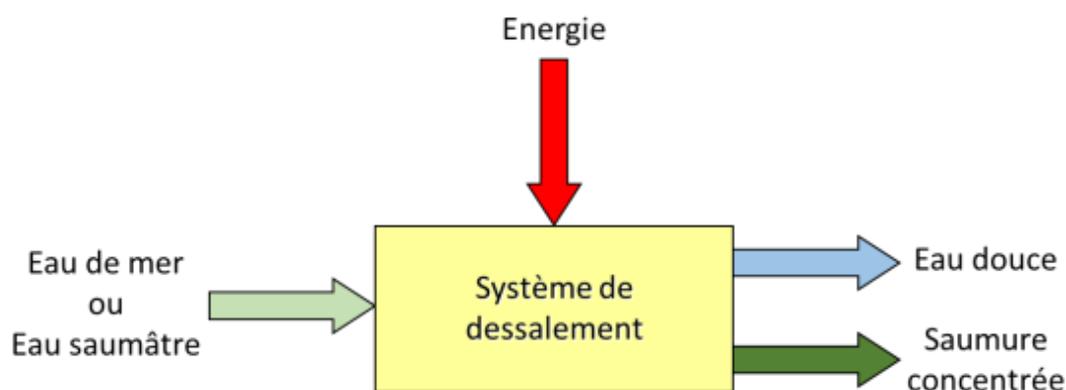


Figure I 2 Principe d'un système de dessalement [21]

Les techniques de séparation thermique se répartissent en deux grandes catégories ; la première est l'évaporation, suivie de la condensation de la vapeur d'eau formée, et la seconde est la congélation, suivie de la fusion des cristaux de glace formés à partir de l'eau. Le premier processus est le plus courant dans le dessalement et, dans presque tous les cas, il est ajouté aux unités de production d'électricité, qui peuvent être basées sur des systèmes de turbines à vapeur ou à gaz. Les processus d'évaporation peuvent

se produire sur la zone de transfert de chaleur, connue sous le nom d'ébullition ou de masse liquide, définie comme l'évaporation flash [8] .

Les processus d'évaporation comprennent le dessalement flash en plusieurs étapes (MSF), l'évaporation à effets multiples (MEE), l'évaporation à effet unique (SEE), l'humidification-déshumidification (HDH) et les alambics solaires. (HDH) et les alambics solaires diffèrent des autres processus d'évaporation comme suit :

- ✓ L'eau s'évapore à des températures inférieures au point d'ébullition.
- ✓ Le principal moteur de l'évaporation est la différence de concentration de vapeur d'eau dans le flux d'air [8].

Les processus de dessalement peuvent également être classés selon le type de forme d'énergie primaire utilisée pour conduire le processus. Ce classement est présenté. Comme indiqué, les processus d'énergie thermique se répartissent en deux catégories, à savoir l'ajout ou la suppression d'énergie. Dans le processus d'ajout d'énergie, y compris MSF, MEE, HDH et les processus combinés avec des pompes à chaleur, des pompes chimiques, des pompes à adsorption ou des pompes à chaleur et à absorption. La vapeur de chauffage pour ces processus peut être obtenue à partir d'une unité centrale de cogénération, d'une unité de chaudière dédiée ou de l'énergie solaire.

Le dessalement par extraction d'énergie comprend un processus de congélation. Les systèmes RO et MVC sont classés comme dessalement par énergie mécanique. Dans le processus RO, l'énergie mécanique (ou la pression différentielle à travers la membrane) entraîne l'eau à travers la membrane et retient le sel dans le flux de saumure. Pour le procédé MVC, l'énergie mécanique du compresseur de vapeur augmente la pression et la température de la vapeur de distillat, qui est utilisée pour chauffer l'eau de mer brute. La dernière catégorie est représentée sur la Fig. I.3 Séparation de l'eau et du sel à l'aide d'énergie électrique. Il s'agit d'un processus d'électrodialyse dans lequel l'énergie électrique entraîne des ions chargés à travers une membrane sélective[8].

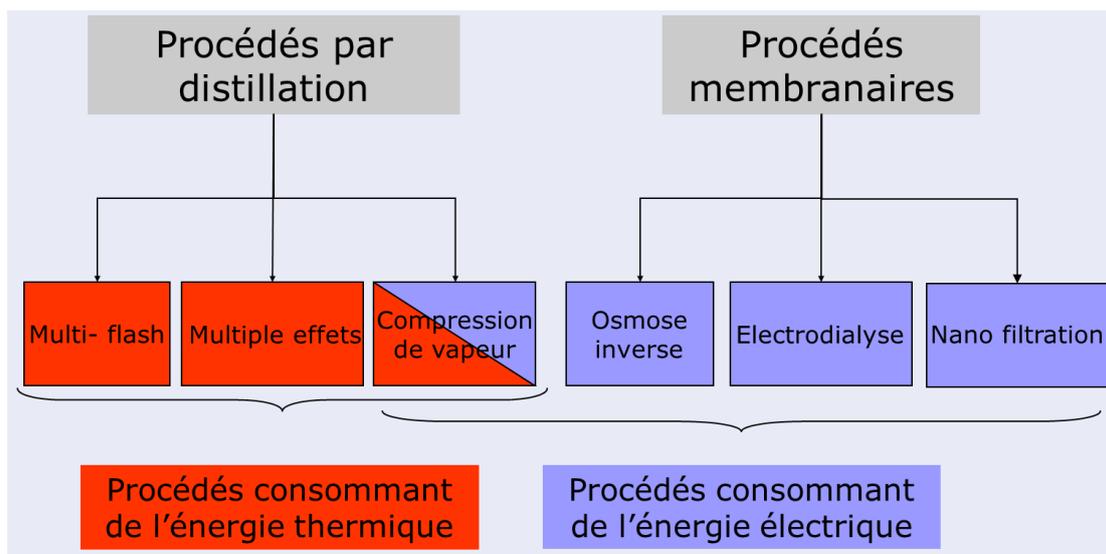


Figure I 3 Classification Des procédés de dessalement [21]

I.5 Différents systèmes de dessalement

1.5.1 Processus thermiques

Cette méthode simule le cycle hydrologique, chauffant l'eau salée pour produire de la vapeur d'eau, qui à son tour se condense pour former de l'eau douce sans sel. L'eau douce est minéralisée pour la rendre propre à la consommation humaine. Les considérations importantes pour cette méthode de dessalement sont une température correcte par rapport à la pression ambiante et une énergie de vaporisation suffisante pour la minimisation de l'énergie et le contrôle de l'encrassement. L'énergie nécessaire à l'évaporation est souvent réduite en utilisant plusieurs points d'ébullition dans des récipients successifs, chacun fonctionnant à une température et une pression plus basses, L'échelle de formation est contrôlée en contrôlant la température au sommet du processus ou en ajoutant des antitartres à partir d'eau de mer. Les procédés thermiques connus sont l'Évaporation à simple effet, le procédé flash multi-étages (MSF), le procédé de distillation à effets multiples (MED) et le procédé de distillation par compression de vapeur (VC) [22].

I.5.1.1. Évaporation à simple effet

Les systèmes de dessalement par évaporation à simple effet sont très limités applications industrielles. Le système est utilisé sur les navires océaniques. Ceci est dû au fait Le rapport de performance thermique du système est inférieur à 1, ce qui correspond à H. volume d'eau La quantité de vapeur de chauffage produite est inférieure à la quantité de vapeur de chauffage utilisée pour le système de fonctionnement. Cependant, il est important de comprendre ce processus car il représente de nombreux Composants qui composent d'autres systèmes de compression de vapeur à un étage, et Processus d'évaporation en plusieurs étapes. Ce sera plus facile à comprendre Ces systèmes sont plus complexes [23]

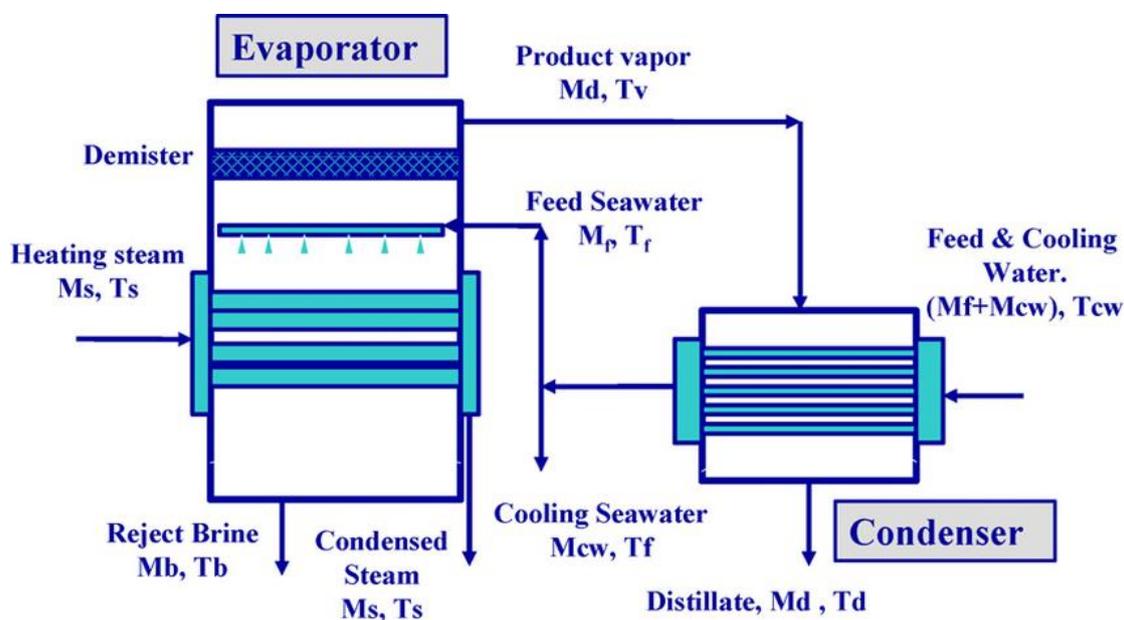


Figure I 4 Évaporation à simple effet [24]

I.5.1.2. Distillation multi-effets

Le procédé de distillation à effets multiples (MED) est la méthode de dessalement la plus ancienne et est thermodynamiquement très efficace. Le procédé MED se déroule dans une série d'évaporateurs appelés effets et utilise le principe de réduction de la pression ambiante dans différents effets. Ce processus permet à l'eau de mer de subir plusieurs ébullitions sans fournir de chaleur supplémentaire après la première action. L'eau de mer entre dans le premier effet et atteint le point d'ébullition après préchauffage dans le tube. L'eau de mer est pulvérisée sur la surface du tube d'évaporation pour favoriser une évaporation rapide. Les tubes sont chauffés par de la

vapeur fournie de l'extérieur par des équipements usuels à double usage. Le courant se concentre de l'autre côté du tube, et le condensat de vapeur est recyclé vers l'usine comme eau d'alimentation de la chaudière. Les économies de vapeur d'un appareil MED sont proportionnelles au nombre d'effets. Le nombre total d'effets est modélisé par la plage de température totale disponible et la différence de température minimale autorisée entre un effet et le suivant. Dans le premier effet, seule une partie de l'eau de mer appliquée au tube est évaporée. L'eau d'alimentation restante est envoyée au deuxième effet, où elle est à nouveau appliquée au faisceau de tubes. Les tubes sont à leur tour chauffés par la vapeur produite au premier effet. Cette vapeur se condense en un produit d'eau douce, tout en abandonnant la chaleur pour évaporer une partie de l'eau de mer restante dans l'effet suivant. Le processus d'évaporation et de condensation est répété de l'effet à chacun à une pression et une température successivement plus faible [22].

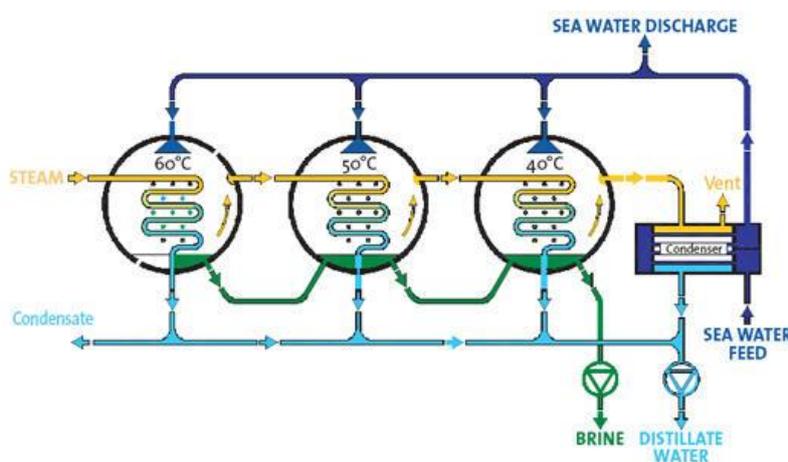


Figure I 5 Evaporator à multi flash stage[25]

I.5.1.3 Distillation flash multi-étages (MFS)

Dans l'évaporation flash, l'eau est chauffée sous pression, l'empêchant de s'évaporer lorsqu'elle est chauffée. Il passe ensuite dans une chambre séparée qui maintient une pression plus basse, lui permettant de s'évaporer, mais à l'écart des tubes chauffants, les empêchant ainsi de s'entarter. Comme le MED, un système de flash pratique a des compartiments, dont chacun est appelé une étape, d'où le nom Multi-Étage Flash (MSF). Lors de son introduction dans les années 1960, MSF offrait un peu moins d'efficacité énergétique que MED, mais les considérations d'échelle l'emportaient et MSF est devenu la norme de l'industrie. L'eau dessalée produite par le procédé MSF

contient généralement 2 à 10 ppm de solides dissous. Par conséquent, il est reminéralisé par un processus de consommation (ou de post-traitement) [22].

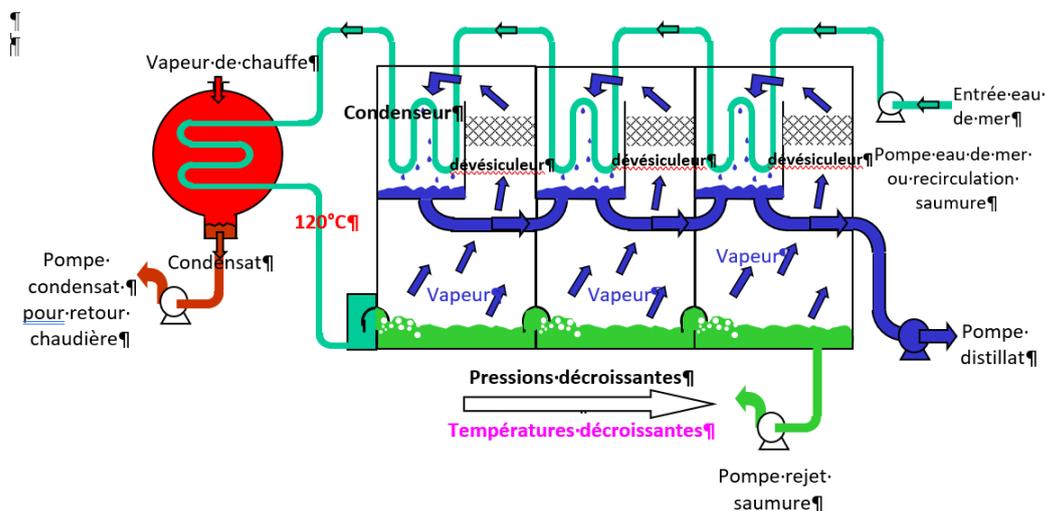


Figure I 6 Le processus de dessalement de MSF[25]

I.5.1.4 Compression de vapeur

La compression de la vapeur d'eau augmente sa température afin qu'elle puisse être utilisée comme source de chaleur dans le même réservoir qui la produit. Cela permet une récupération de chaleur lors de la distillation à simple effet. En compression thermique de vapeur, où le compresseur est entraîné par de la vapeur, ce type de système est simple par rapport au MSF et donc populaire dans le dessalement à moyenne échelle. En compression mécanique de vapeur, le compresseur est entraîné par un moteur diesel ou un moteur électrique [22].

L'eau produite par traitement thermique est très pure et ne contient presque pas de sel, et l'influence de la qualité de l'eau entrante sur la consommation d'énergie est presque négligeable. Le traitement thermique est la principale technologie de dessalement utilisée dans tout le Moyen-Orient car ces technologies peuvent produire de l'eau de haute pureté à partir d'eau de mer et le coût du carburant dans la région est faible [22].

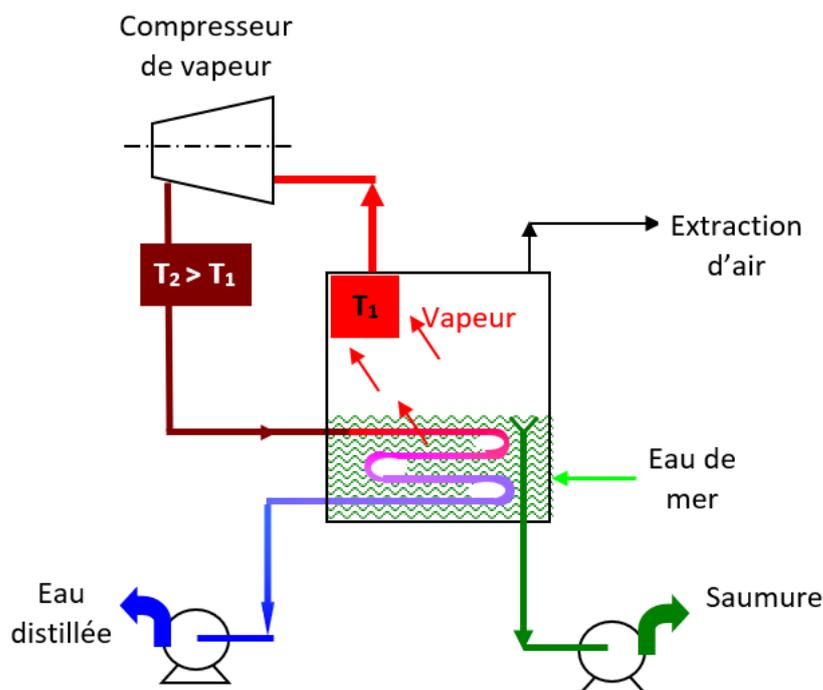


Figure I.7 Compression de vapeur [26]

I.5.2 Processus membranaires

Les membranes ont la capacité de différencier et de séparer sélectivement les sels et l'eau. Utilisant cette capacité, mais différemment dans chaque cas, trois procédés de dessalement membranaire ont été développés pour dessaler l'eau : l'électrodialyse (ED), l'osmose inverse (RO) et la nano filtration (NF) [22].

GOLD représente le segment du marché du dessalement qui connaît la croissance la plus rapide. Les technologies membranaires peuvent être utilisées pour le dessalement de l'eau de mer et de l'eau saumâtre, mais elles sont plus couramment utilisées pour le dessalement de l'eau saumâtre car la consommation d'énergie est proportionnelle à la teneur en sel de l'eau. Bien que la technologie thermique ait dominé depuis les années 1950 jusqu'à récemment, les procédés membranaires sont maintenant comparables aux procédés thermiques en termes de capacité globale de dessalement. Par rapport aux procédés de distillation thermique, la technologie membranaire a généralement des coûts d'investissement et une énergie requise inférieurs, ce qui permet de réduire les coûts d'exploitation. Réellement l'avancée la plus importante dans les systèmes membranaires a réduit les coûts des membranes d'un facteur d'environ 10 au cours des 30 dernières années, faisant du prétraitement et de la prise d'eau de mer les éléments les plus coûteux des systèmes membranaires. système membranaire .Cependant, la salinité de l'eau produite par le dessalement par

membrane (<500ppm TDS) a tendance à être supérieure à celle de la technologie thermique (<25ppm), mais la même qualité peut être obtenue par OI secondaire[13,22,24].

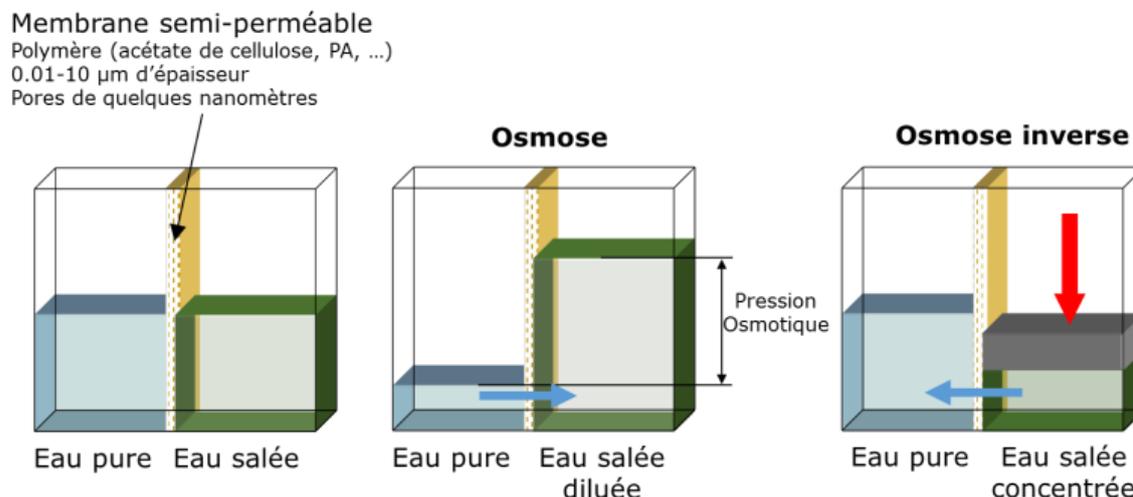


Figure I. 8 Processus membranaires [21]

I.5.2.1 Osmose inverse RO

Ce processus membranaire n'implique pas de transition de phase, le perméat (c'est-à-dire l'eau produite) traverse une membrane hydrophile sous une certaine pression appliquée, qui est supérieure à la pression osmotique de l'eau de mer, de sorte que l'eau s'écoule dans le même sens qu'elle s'écoule naturellement à travers la membrane, laissant le sel dissous, la concentration en sel augmente. La principale énergie nécessaire au dessalement est de pressuriser l'eau de mer récupérée par l'échangeur de pression (EP). Dans l'échangeur de pression, l'énergie contenue dans la saumure résiduelle est transférée hydrauliquement

Cela réduit considérablement les besoins énergétiques du processus de dessalement, réduisant ainsi les coûts d'exploitation. La pression nécessaire à la séparation varie entre 50 bar (eau de mer) et 20 bar (eau saumâtre) [25]. La pression osmotique dépend de la concentration de l'alimentation. Une configuration typique d'une grande salle d'opération en eau de mer se compose de quatre parties principales, à savoir

- ✓ Prétraitement de l'eau d'alimentation,

- ✓ Pompe haute pression,
- ✓ Séparation membranaire
- ✓ Pénétration post-traitement.

La Figure I.9 montre un système de dessalement OI. La consommation d'énergie de l'unité d'osmose inverse est d'environ 6-8 kWh/m³, sans récupération d'énergie, la récupération d'énergie est effectuée du côté haute pression et la consommation d'énergie est réduite à 4-5 kWh/m³ [26]. RO a aussi ses limites. Le principal problème auquel sont confrontées les unités d'osmose inverse est la sensibilité de la zone de prétraitement et de la membrane à l'encrassement. De plus, la température d'alimentation ne doit pas dépasser 40 °C pour éviter des dommages thermiques à la membrane[22] .

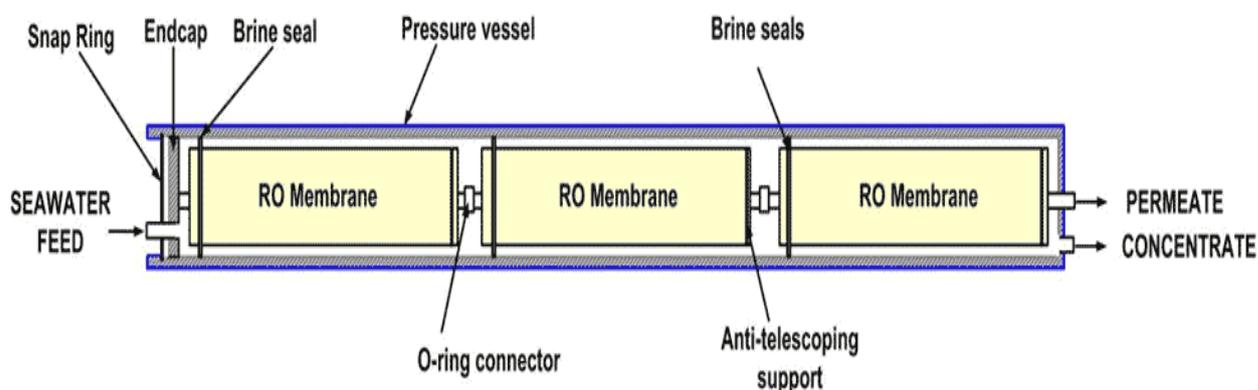


Figure I 9 Osmose inverse RO [21]

I.5.1.2 Électrodialyse

L'électrodialyse utilise également des membranes, mais contrairement à l'osmose inverse, les ions de sel sont délibérément transportés à travers la membrane, laissant derrière eux de l'eau douce. Deux types de membranes sont nécessaires : l'une qui laisse passer les anions mais pas les cations, et l'autre qui fait le contraire. Les films sont empilés alternativement et séparés par des entretoises. De l'eau salée est introduite dans la couche d'isolation sur un côté de la pile et une tension continue est appliquée à travers la pile. Les ions de sel traversent une membrane ou l'autre selon leur polarité, et lorsque l'eau quitte l'autre côté de la cellule, elle devient alternativement de l'eau douce et concentrée dans un compartiment séparé. Inverser la polarité de la tension appliquée inverse les compartiments eau douce et concentré, et Cela peut être fait périodiquement

(plusieurs fois par heure) pour réduire l'encrassement, appelé inversion de l'électrodialyse. L'électrodialyse a été commercialisée dans les années 1960 et est largement utilisée aujourd'hui pour dessaler l'eau saumâtre. La consommation d'énergie dépend largement de la concentration de l'eau d'alimentation, de sorte que l'électrodialyse est rarement utilisée pour le dessalement [22].

Dans les systèmes de dessalement basés sur l'électrodialyse (ED), la séparation des minéraux et de l'eau produite est obtenue en appliquant un courant continu à la source d'eau. Ce courant transporte les ions minéraux et d'autres ions fortement chargés contenus dans l'eau minérale à travers une membrane sélective d'ions vers une paire d'électrodes chargées de manière opposée, comme le montre la Figure I 10 [28].

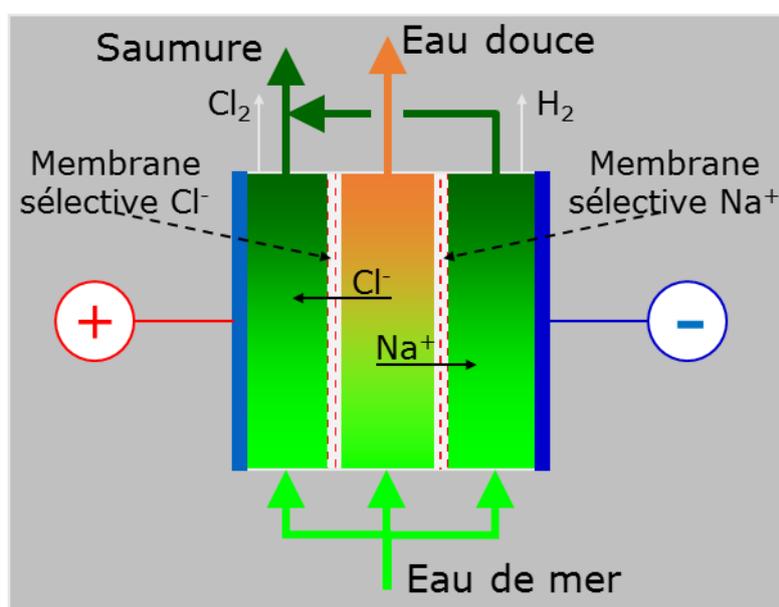


Figure I 10 Schéma du processus d'électrodialyse [21]

Au fur et à mesure que les ions s'accumulent sur les surfaces des électrodes, ils peuvent provoquer un entartrage au fil du temps, un nettoyage fréquent est donc nécessaire pour maintenir un processus ED stable. Une solution pratique à ce problème consiste à inverser périodiquement la polarité des électrodes chargées de manière opposée (généralement 2 à 4 fois par heure) pour éviter un nettoyage fréquent des électrodes. Un processus ED impliquant des changements périodiques de polarité du système est appelé processus d'inversion d'électrodialyse (EDR). Actuellement, presque tous les systèmes ED commerciaux sont de type EDR [22].

I.5.3 Autres processus

De nombreux autres procédés ont été développés pour dessaler l'eau de mer, qui n'ont pas encore atteint le niveau de succès commercial de MSF, MED et RO, mais ils peuvent devenir utiles dans des circonstances particulières ou lorsqu'ils sont développés. Ces processus importants comprennent la congélation et l'évaporation solaire [13].

I.5.3.1 Congélation

Pendant le processus de congélation, les sels dissous sont exclus pendant la formation des cristaux de glace. Dans des conditions contrôlées, l'eau de mer peut être dessalée en la congelant pour former les cristaux de glace. Avant que toute la masse d'eau ait été congelée, le mélange est habituellement lavé et rincé pour éliminer les sels dans l'eau restante ou adhérer à la glace. La glace est ensuite fondue pour produire de l'eau fraîche. Par conséquent, le processus de congélation est constitué du refroidissement de l'eau de mer, de la cristallisation partielle de la glace, de la séparation de la glace de l'eau de mer, de la fonte de la glace, Refroidissement et refroidissement. Plusieurs procédures ont été développées pour surveiller l'état des appareils. Ceux-ci incluent les fluides frigorigènes à trois points, secondaires, indirects, eutectiques et hydratés. Les avantages de la réfrigération comprennent des besoins énergétiques théoriques inférieurs, un potentiel minimal de corrosion et peu d'entartrage ou de précipitations. L'inconvénient de la congélation implique la manipulation de mélanges de glace et d'eau qui sont mécaniquement complexes à déplacer et à manipuler.

Un petit nombre d'usines ont été construites au cours des 40 dernières années, mais le processus de congélation n'a pas été commercialisé avec succès pour produire de l'eau douce à usage municipal. Le dernier exemple important d'usine de dessalement par réfrigération est l'installation solaire expérimentale construite en Arabie Saoudite en 1985 [30,31.32].

I.5.3.2 Évaporation solaire

Hydrologique naturel, dans lequel l'eau de mer est chauffée par les rayons du soleil pour produire Le dessalement utilisant l'énergie solaire directe a été largement étudié

et est utilisé depuis un certain temps. Le processus est souvent similaire à une partie du cycle de la vapeur d'eau. La vapeur d'eau se condense alors sur la surface froide et le condensat est collecté sous forme d'eau produite. Un exemple de ce type de procédé est un alambic solaire, dans lequel l'eau salée est chauffée dans un bassin au sol et la vapeur d'eau se condense sur une verrière en pente recouvrant le bassin [33 -34 ,35].

I.5.3.3 La potabilisation

L'eau dessalée produite par les usines MSF est d'une grande pureté et contient de très petites quantités de sels et de minéraux dissous. Par conséquent, l'eau est corrosive et corrosive pour les matériaux couramment utilisés dans les systèmes de distribution d'eau, tels que les métaux et le béton. Pour pallier les problèmes de corrosivité et de mauvais goût des distillats, de nombreux procédés de consommation ont été pratiqués ou proposés [40-49].

Outre la présence de chloration [47]. Ou l'absence d'aération [41,48], deux méthodes de traitement typiques sont l'injection de dioxyde de carbone et de chaux éteinte et d'eau gazeuse à travers un filtre à calcaire. Ce traitement aide à établir l'équilibre du carbonate de calcium et à former une couche protectrice qui inhibe la corrosion du carbonate de calcium. En tant que source de dioxyde de carbone, le gaz CO₂ du flux de gaz d'échappement MSF peut être utilisé.

Par conséquent, un processus typique de potabilisation consiste en quatre opérations unitaires - la chaux, la carbonatation, la chloration et l'aération. L'eau est reminéralisée avec l'ajout de chaux hydratée et de dioxyde de carbone à travers les étapes de chaux et de carbonatation pour augmenter la dureté, l'alcalinité, le pH et la teneur en minéraux dissous. La chloration est réalisée en injectant du chlore gazeux, de l'hypochlorite de sodium ou de l'hypochlorite de calcium pour désinfecter l'eau et éliminer la croissance bactérienne. L'aération est effectuée pour remplacer l'oxygène épuisé lors de la distillation MSF, améliorant ainsi le goût de l'eau. Pour le produit par RO, le post-traitement comprend généralement l'ajustement du pH, l'élimination des gaz dissous tels que le CO₂ et le H₂S, en fonction de l'influent, l'ajout chaux et désinfectés au chlore ou à l'hypochlorite de calcium [41, 47,48].

I.6 Économie

Au fil des ans, le coût de production de l'eau dessalée a baissé grâce aux progrès technologiques. Dans le même temps, le coût d'obtention et de traitement de l'eau des sources d'eau traditionnelles a également augmenté, car des niveaux de traitement accrus sont nécessaires pour répondre aux normes de qualité de l'eau plus strictes. De plus, le coût du dessalement est lié à l'emplacement de l'usine, à la quantité d'énergie utilisée et à d'autres coûts. Pour la production d'eau douce offshore en vrac, le choix entre les deux principaux procédés commerciaux de dessalement (MEE et RO) est largement déterminé par la manière dont chacun de ces deux procédés est appliqué dans une situation particulière, avec à la fois des considérations techniques et des propriétés économiques de l'eau de mer, Qualité de l'eau, sources d'énergie et de consommation, taille de l'usine, fiabilité de l'usine, élimination du concentré, empreinte, aspects liés à l'exploitation et à la maintenance, etc. capital, énergie, travail, produits chimiques, matériaux et consommables. De nombreuses analyses et comparaisons ont été effectuées pour évaluer les technologies et l'économie concurrentes[13,43,44,45,46].

Étant donné que le dessalement nécessite une certaine forme d'énergie, les systèmes de cogénération sont essentiels à la production d'électricité d'un point de vue économique. L'industrie vise à produire de l'eau dessalée à 50 centimes le mètre cube d'eau et de l'électricité à 2 centimes le kWh.

En règle générale, les aspects économiques du dessalement sont déterminés à l'aide d'une analyse des coûts du cycle de vie utilisant la méthode des coûts annuels uniformes.

I.7 Perspectives d'avenir

Au cours des deux dernières décennies, de nombreux progrès ont été réalisés dans les procédés de dessalement qui ont considérablement réduit le coût de production de l'eau. Cela a conduit à l'acceptation et à la croissance de l'industrie à l'échelle mondiale, en particulier dans les régions sèches du monde. Cependant, comme les coûts de dessalement restent élevés, de nombreux pays ne peuvent pas se permettre d'utiliser ces technologies comme ressource en eau douce. Il est donc nécessaire d'accentuer et de dynamiser la R&D (Recherche et Développement) en amélioration

technologique, ce qui permettra à terme de réduire le coût de production de l'eau dessalée. L'objectif ultime est de fournir de l'eau douce à faible coût et facilement disponible grâce au dessalement. Les travaux de recherche et développement sur divers sujets liés au processus de dessalement devraient se poursuivre. Mer, compris les éléments suivants [48,49] :

- Aspects économiques et techniques des différents procédés.
- Systèmes de cogénération et de dessalement efficaces.
- Utiliser l'énergie nucléaire et solaire.
- Traitement chimique de l'eau de mer.
- Procédé de distillation thermique à haute température.
- Convient pour divers processus dans des systèmes hybrides tels que MSF-RO, NF-RO et MSF-NF-RO.
- Intégration, optimisation et mélange d'électricité, de vapeur et d'eau.
- Sélectionner raisonnablement les matériaux de construction et développer des matériaux à moindre coût.
- Amélioration et développement de la membrane RO.
- Prévention du tartre et de la corrosion.
- Développement de grandes usines de dessalement.
- Contrôle de dessalement et système intelligent.
- Aspects environnementaux du rejet d'eau salée.
- Séparation magnétique de la dureté de l'eau de mer.

I.8 Recherche et développement

L'avancement et le développement de la technologie de dessalement ont t le résultat d'un norme effort de RD parrain et financé par l'eau de mer Service du Département américain de l'intérieur sur une période de 20 ans, de 1952 jusqu' a 1972[46-47]. Le

programme de RD d'OSW a eu un impact majeur sur le développement des procs de dessalement actuellement disponibles. Presque toutes les technologies adoptent commercialement³ aujourd'hui sont développés et testés dans le cadre² de ce programme.

Au cours des 20 années où OSW a développé des technologies de dessalement, de nombreux procédés de dessalement différents doivent encore sortir du laboratoire ou au-delà du stade de développement de l'usine pilote. Le processus d'évaluation et de recherche d'OSW comprend :

- Divers procédés de distillation thermique.
- Divers procédés membranaires.
- Évaporation solaire et distillation.
- Système d'électrolyse.
- Utiliser des algues pour transformer l'eau salée.
- Dessalement par extraction au solvant à haute pression.
- Utiliser des chélates pour éliminer les ions de l'eau de mer.
- Processus d'hydratation.
- Processus de congélation.

De plus, des dizaines de procédés de transfert de chaleur étudiés et testés comprennent :

- Tube de plongée.
- Compression de vapeur.
- Flash multi-niveaux Effet tube multi-vertical.
- Film à rainurer et film frottant.
- Échange de chaleur liquide-liquide.
- Évaporateur à film pulvérisé horizontal.

I.8.1 Dessalement thermique

Ce sont des consommateurs d'énergie. La recherche est basée sur le développement d'améliorations des performances et de conceptions simplifiées pour ces technologies de processus. Voici quelques sujets à considérer :

- Développer des sources d'énergie alternatives.
- Réduire et contrôler la mise à l'échelle et la mise à l'échelle.
- Matériaux de construction alternatifs.
- Optimisation de la conception des procédés.
- Améliorations dans la conception des composants.
- Système de contrôle pour optimiser la consommation des consommables [39-51-52] :

I.8.2 Dessalement de membrane

Les procédés de dessalement par membrane ont parcouru un long chemin ces dernières années et sont devenus compétitifs à certains endroits. La recherche est axée sur l'amélioration des performances des plantes. Voici quelques sujets à considérer pour améliorer le processus :

- Conception de modules membranaires.
- Nouvelle membrane
- Conception de procédés membranaires.
- Récupération d'énergie dans le procédé RO.
- Méthodes de prétraitement et de réduction de l'encrassement.
- Principes de base de la mise à l'échelle et de la mise à l'échelle.
- Conception d'équipements et de procédés.

I.8.3 Technologies alternatives de dessalement

La recherche se concentre sur le développement et les études de faisabilité de nouveaux concepts pour les processus de dessalement non traditionnels, ainsi que sur des études de faisabilité sur des concepts de dessalement qui n'ont pas été pleinement explorés. Voici des exemples de domaines envisagés pour les activités de R&D :

- Couplage procédé de dessalement d'eau de mer et énergie non conventionnelle.
- Nouveaux concepts de conception pour les procédés de dessalement non conventionnels.
- Développer de nouveaux concepts de design pour les équipements de procédés.
- Systèmes de mesure et de contrôle.
- Surveillance, contrôle et nettoyage du système de tartre.
- Nouveau concept de dessalement et étude de faisabilité.

I.8.4 Intégration énergétique

La consommation d'énergie de tous les processus de dessalement est bien supérieure aux exigences thermodynamiques minimales. Les coûts énergétiques sont une composante majeure des coûts d'exploitation des usines de dessalement. La recherche dans ce domaine est basée sur la réduction de la consommation d'énergie et l'utilisation de sources d'énergie alternatives bon marché. Des méthodes doivent être développées pour intégrer de manière rentable le dessalement aux systèmes d'énergie renouvelable.

I.8.5 Systèmes hybrides

La recherche R&D s'appuie sur la mise au point d'un procédé de dessalement hybride permettant de réduire les coûts d'investissement, d'exploitation et de maintenance.

I.8.6 Aspects environnementaux

L'ensemble du processus de dessalement doit être écologiquement durable. Les domaines suivants sont des sujets de recherche importants :

- Améliorer les procédés de dessalement pour réduire et/ou éliminer les eaux usées.

- Évaluer la composition des eaux usées de l'usine de dessalement.
- Procédures d'évaluation de l'impact environnemental des eaux usées des usines de dessalement.

L'impact environnemental de toutes les technologies de dessalement, qu'elles soient utilisées ou en cours de développement, doit être pris en compte. Cet objectif a été atteint en maintenant une vigilance envers la protection de l'environnement tout au long du processus de recherche. En outre, les problèmes environnementaux liés aux applications de dessalement sont à l'étude, tels que l'emplacement des usines de dessalement, les prises d'eau de mer et les rejets de saumure [13].

I.9 Remarques de conclusion

Au cours des dernières décennies, de nombreuses technologies de dessalement ont été introduites avec succès pour augmenter l'approvisionnement en eau dans les régions arides du monde. En raison du coût élevé du dessalement, de nombreux pays ne peuvent pas se permettre ces technologies comme ressource d'eau douce. Cependant, l'adoption de la technologie de dessalement dans certains pays montre que le dessalement fournit sans aucun doute une nouvelle ressource en eau qui n'est pas affectée par les changements de précipitations. Bien que la technologie de dessalement ait suffisamment avancé pour être une source fiable d'eau douce, certaines institutions mènent encore des travaux de recherche et de développement pour améliorer continuellement la technologie et réduire le coût du dessalement. Compte tenu de l'importance future et du grand potentiel du dessalement dans de nombreux pays, un programme de R&D multidisciplinaire et intégré à long terme est nécessaire pour rendre la technologie de dessalement abordable dans le monde entier. De tels programmes de R&D globaux et collectifs devraient être développés en collaboration avec le gouvernement, l'industrie, les universités et les instituts de recherche [13].

CHAPITRE II
LES EVAPORATEURS

CHAPITRE II

LES EVAPORATEURS

II.1 Introduction

L'évaporation est l'élimination du solvant sous forme de vapeur d'une solution, d'une bouillie ou d'une suspension d'un solide dans un liquide. L'objectif est de concentrer les solutés non volatils, tels que les composés organiques, les sels inorganiques, les acides ou les bases, à partir du solvant. Les solutés courants sont la soude caustique, la potasse caustique, le sulfate de sodium, le chlorure de sodium, l'acide phosphorique et l'urée. Le solvant le plus courant dans la plupart des systèmes d'évaporation est l'eau. L'évaporation diffère des autres opérations de transfert de masse telles que la distillation et le séchage. Dans la distillation, les composants d'une solution sont séparés en fonction de leur répartition entre les phases gazeuse et liquide en fonction des différences de volatilité relative des substances. Enlèvement de l'humidité d'une substance en présence d'un courant de gaz chaud pour évacuer l'humidité laissant un résidu solide car le produit est généralement appelé séchage. L'évaporation est normalement arrêtée avant que le soluté commence à précipiter dans le fonctionnement d'un évaporateur.

Invention de l'évaporateur : Norbert Rillieux est surtout connu pour avoir inventé l'évaporateur multi-effets pour le raffinage du sucre en 1881. Rillieux est né à la Nouvelle-Orléans, en Louisiane, en 1806. Il utilise la vapeur de la casserole pour chauffer le jus vers la casserole suivante pour une unité d'évaporation d'eau économe en énergie[54].

La vapeur produite dans un évaporateur est utilisée comme moyen de chauffage pour l'évaporateur suivant fonctionnant à une température et une pression inférieures. Par conséquent, la chaleur dégagée par la condensation de la vapeur du premier effet produit plus de vapeur dans le second effet. De cette manière, le système MEB (multi-ébullition) améliore le rapport de performance (PR), qui peut simplement prendre un maximum inférieur à l'unité en un seul effet. PR augmente à mesure que davantage d'effets sont utilisés, mais le nombre total d'effets est limité par la plage de température totale disponible et la différence de température minimale autorisée entre les effets successifs. La plage de température inférieure dépend de la température du

liquide de refroidissement disponible et de la limite supérieure du potentiel d'encrassement de la saumure, ainsi que de la température de l'alimentation en vapeur. Distinguer l'effet de la climatisation ne peut conférer moins de bénéfice au moment d'ébullition élevé (BPE) car il constitue une prédisposition à l'équilibre et la composante orientale de nombreux apports [55].

II.2 Types d'évaporateurs

L'évaporateur se compose d'un échangeur de chaleur pour faire bouillir la solution avec des dispositions spéciales pour la séparation des phases liquide et vapeur. La plupart des évaporateurs industriels ont des surfaces de chauffe tubulaires. Les tubes peuvent être horizontaux ou verticaux, longs ou courts ; le liquide peut être à l'intérieur ou à l'extérieur des tubes. Tout évaporateur contient une face de chauffage à travers laquelle la chaleur est transférée du terrain de chauffage à la solution bouillante de l'autre côté de la face de chauffage. De plus, la vapeur générée doit être efficacement séparée du liquide résiduel. La façon dont ces caractéristiques sont mises en pratique est ce qui distingue un type d'évaporateur d'un autre. Fondamentalement, en fonction de la nature du processus d'ébullition, l'évaporation du liquide se répartit en trois catégories principales, qui sont les suivantes :

- (a)- Piscine bouillante la piscine de liquide dans le vrac bout comme dans une bouilloire ou un rebouilleur à thermosiphon à rotation naturelle.
- (b)- Chauffage par convection comme dans les évaporateurs à rotation forcée.
- (c)- Évaporation du film l'évaporation a lieu à partir d'un film hash de liquide maintenu sur la face de chauffage. Les paragraphes suivants décrivent quelques évaporateurs typiques couramment utilisés dans la pratique industrielle [54] .

II.2.1 Évaporateurs sous vide à circulation forcée

Les évaporateurs à circulation forcée sont particulièrement indiqués lorsque le débit à traiter contient des substances incrustantes, des viscosités, des cristallisations, ou d'autres éléments qui empêchent d'effectuer une circulation naturelle.

Ce sont les dispositifs par compression mécanique de la vapeur avec le moins de consommation énergétique et ceux qui permettent de traiter les débits les plus importants (jusqu'à 20 000 litres/heure).

Les évaporateurs à vide à circulation forcée permettent de séparer de l'eau de grande qualité d'un effluent résiduel avec des polluants relativement concentrés grâce à l'application d'énergie thermique. Comme on travaille en conditions sous vide, on peut réduire la température d'ébullition, la consommation énergétique est donc réduite.

Grâce à l'utilisation d'évaporateurs sous vide il est possible de concentrer un effluent résiduel autant de fois qu'on le souhaite efficacement et simplement, pouvant parvenir à un déversement zéro si nécessaire. L'évaporation sous vide est une technologie qui permet de traiter des effluents qui, à cause de leur complexité, ne peuvent pas être traités par les techniques plus conventionnelles, car elles ne sont pas efficaces ou viables [56].

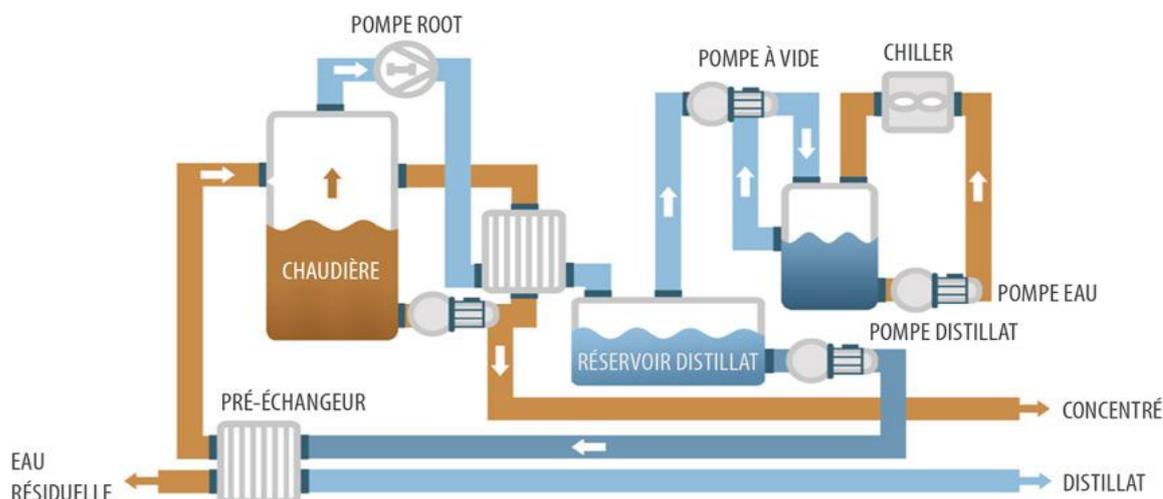


Figure II 1 Evaporateurs sous vide à circulation forcée [[56].

II.2.2 Évaporateurs verticaux à tube court

Les évaporateurs tubulaires de courte durée sont les plus anciens mais sont encore largement utilisés dans l'industrie sucrière pour contaminer les jus de fruits. Ceux-ci sont aussi appelés vaporisateurs Calandria ou Robert. Ce vaporisateur a été construit par Robert. Il est devenu si courant dans l'industrie de traitement des processus que cet évaporateur est parfois appelé évaporateur conventionnel. Les évaporateurs à tubes verticaux courts sont constitués d'un cylindre à tube court (environ 4 à 10 mètres de diamètre) dans une enveloppe cylindrique. C'est ce qu'on appelle une calandre. Un évaporateur de ce type est représenté sur la figure. II.2. L'alimentation

électrique est installée sur la plaque de conduit supérieure et la vapeur est introduite dans le réfrigérateur ou le congélateur. La solution est chauffée et évapore une partie du tube. Le canal du réseau central a un diamètre plus long. La zone de diffusion est généralement comprise entre 40 et 70% de la distribution totale du pipeline. Le taux de réussite/réussite correspond à plusieurs fois la vitesse d'alimentation. La surface de la sortie est généralement égale à la surface du flux tubulaire [54].

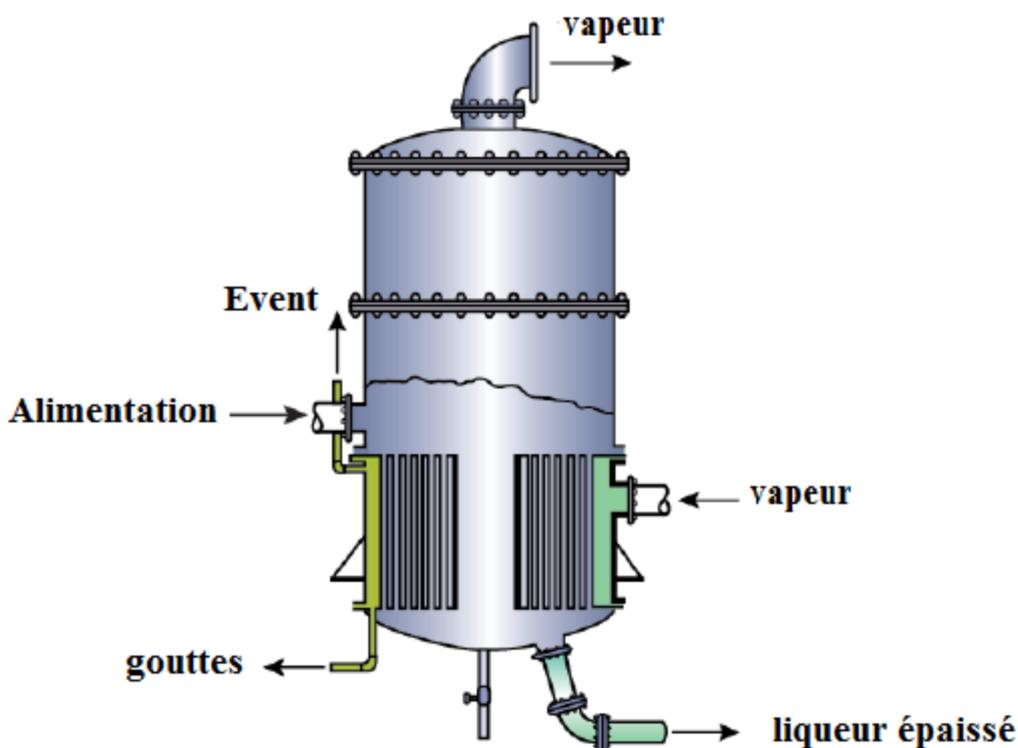


Figure II 2 Évaporateur de type Calandria [54].

II.2.3 Évaporateurs à couches minces agité

L'évaporateur à couche mince consiste en un cylindre vertical de vapeur et la solution d'alimentation s'écoule sous forme de film sur la surface interne d'une couche de taille moyenne (Fig. II.3). Le fluide est distribué sur la paroi du tuyau par une languette rotative fixée à un arbre placé coaxialement au tuyau intérieur.

La languette maintient une distance étroite d'environ 1,5 mm ou moins avec la paroi du tuyau. Le principal avantage est qu'il permet à la langue de tourner dans une

solution très visqueuse. Le matériau est adapté pour concentrer des solutions ayant une viscosité jusqu'à 100 P [54].

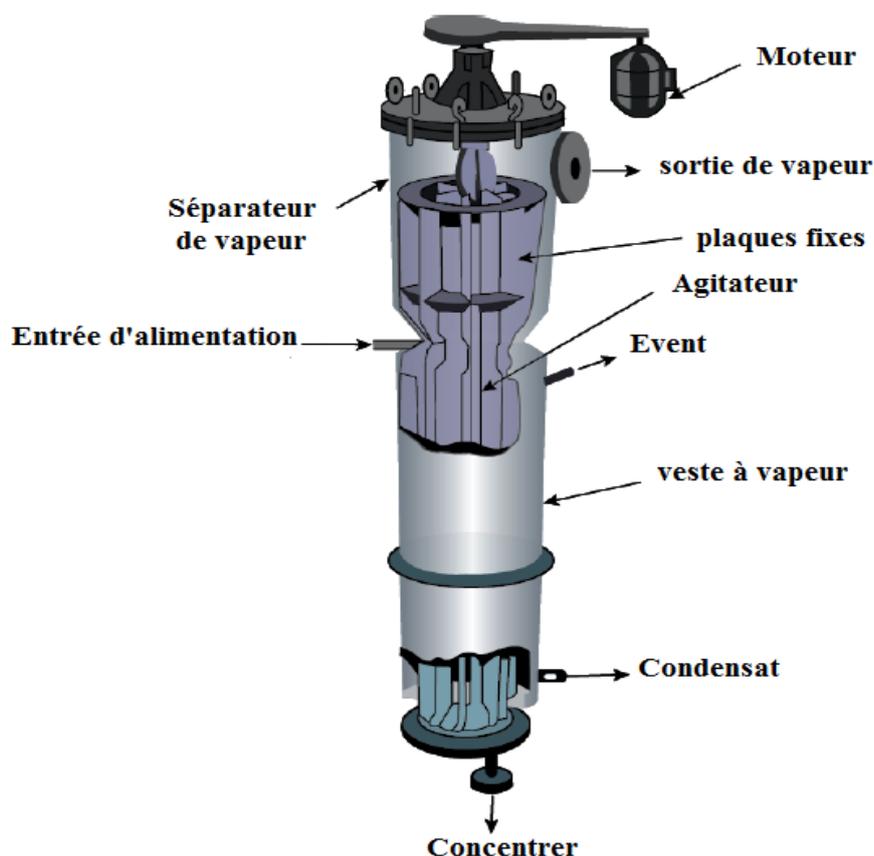


Figure II 3 Évaporateur à couche mince agité [54].

II.2.4 Évaporateurs verticaux à long tube

C'est l'évaporateur naturel portable le plus utilisé car il est souvent le moins cher en électricité. La longue structure tubulaire verticale est protégée par une coquille qui se prolonge dans une chambre à vapeur plus grande au sommet (Fig. II.4). L'évaporateur à tige longue (LTV) est constitué d'un seul échangeur de chaleur, de type tuyau. Dans ce type d'évaporateur, l'eau s'écoule sous forme de film mince le long du bord d'un long tuyau vertical (12 à 30 pieds de long). Les types de film supérieur et inférieur sont utilisés. La longueur du tube est généralement de 20 à 65 mètres. L'avantage principal de ce type d'évaporateur est son taux de transfert de chaleur plus élevé. La

nourriture entre le fond et le liquide commence à bouillir dans la partie inférieure du tube. Les évaporateurs LTV sont souvent utilisés pour concentrer des liquides noirs dans l'industrie du papier et de la pâte [54].

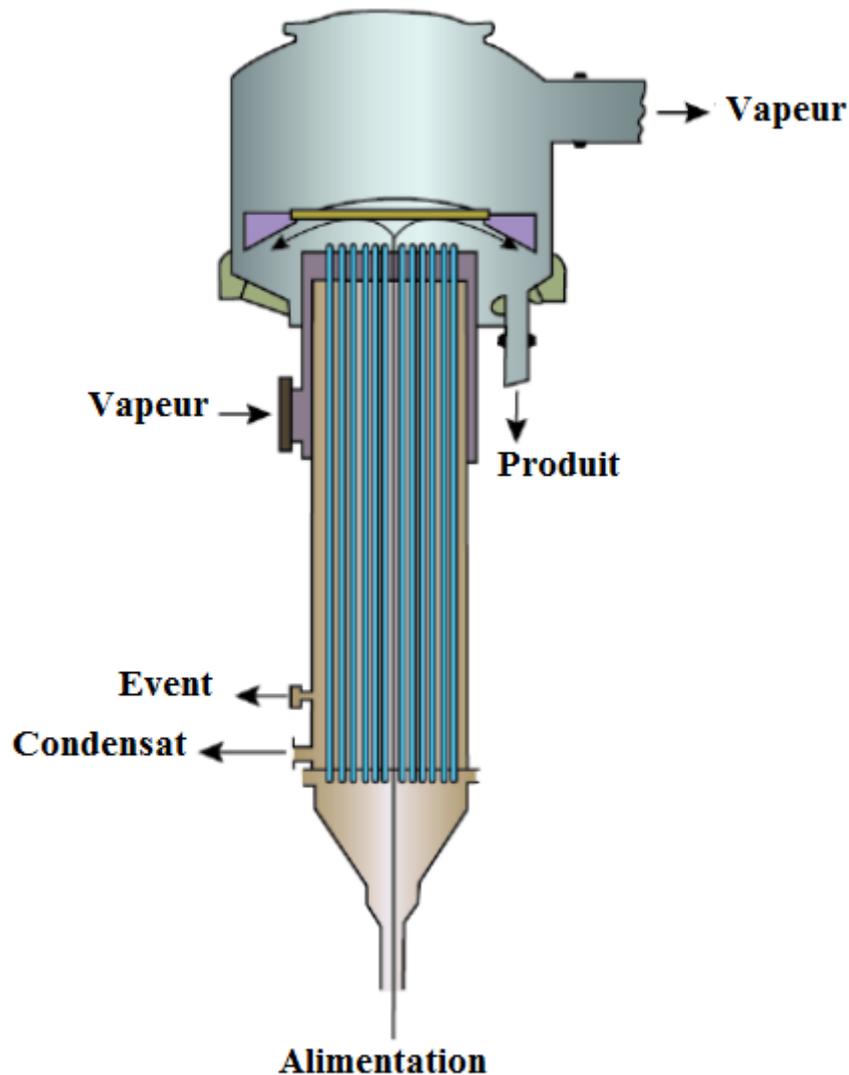


Figure II 4 Évaporateur verticale à long tube [54].

II.2.5 Évaporateur à plaques avec joint

Un évaporateur à plaques scellé est également appelé évaporateur à plaques car sa conception est similaire à un échangeur de chaleur à plaques. Plusieurs plaques à gaufres avec quatre ouvertures d'angle sont montées par des barres de support supérieures et inférieures. Des joints sont placés sur la périphérie de la plaque. Les joints d'interférence de deux plaques adjacentes empêchent le mélange des fluides et

dirigent les fluides vers leurs voies d'écoulement respectives à travers les ouvertures d'angle (Figure II.5). Selon la disposition des joints, les fluides peuvent s'écouler en série ou en parallèle. Le coefficient de transfert de chaleur est grandement amélioré en raison de la forte turbulence à travers le canal étroit. Cet évaporateur convient aux solutions à haute viscosité, entartrantes, moussantes et sensibles à la chaleur [54].

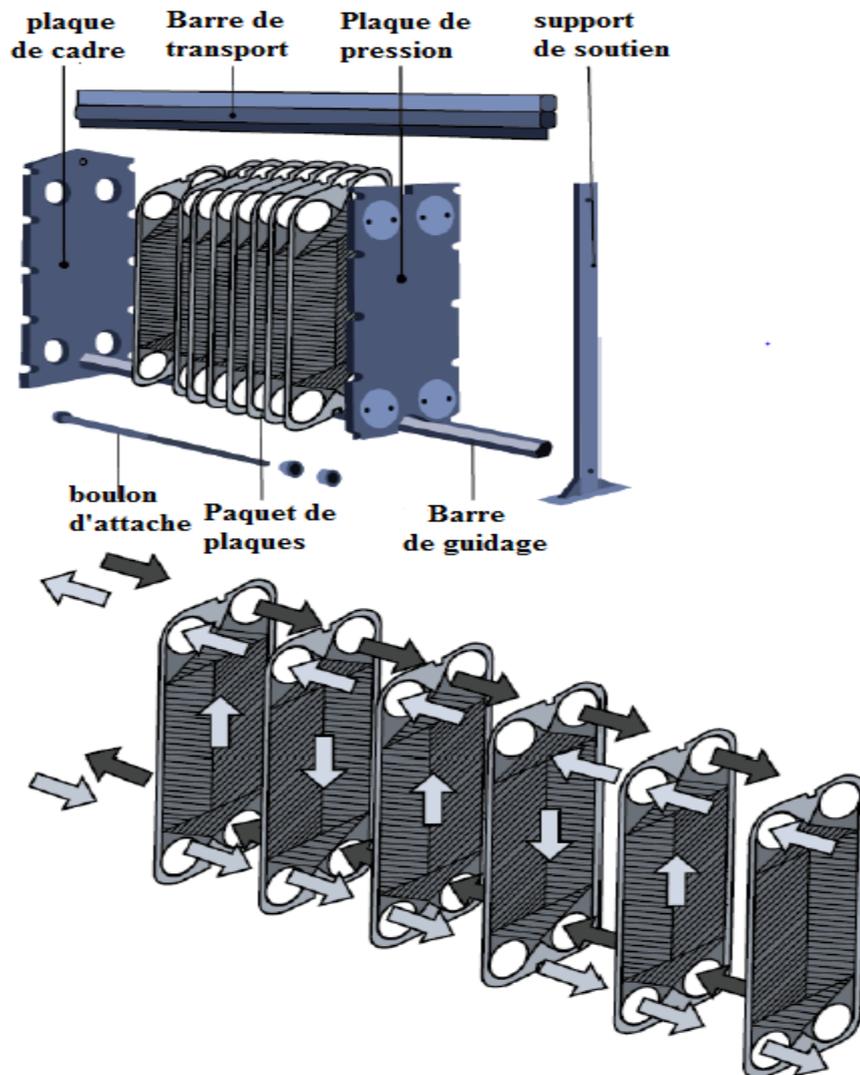


Figure II 5 Évaporateur à plaques avec joint [[54.

II.2.6 Évaporateurs à film tombant

Dans les évaporateurs à film tombant, le liquide et les vapeurs s'écoulent vers le bas en flux parallèle. Le liquide à concentrer est préchauffé à la température d'ébullition. Un film mince et uniforme pénètre dans les tubes chauffants via un dispositif de distribution dans la tête de l'évaporateur, s'écoule vers le bas à la température

d'ébullition et s'évapore partiellement. Ce mouvement descendant induit par la gravité est de plus en plus augmenté par le flux de vapeur à co-courant.

Les évaporateurs à film tombant peuvent fonctionner avec de très faibles différences de température entre le fluide chauffant et le liquide en ébullition, et ils ont également des temps de contact très courts avec le produit, généralement quelques secondes par passage. Ces caractéristiques rendent l'évaporateur à film tombant particulièrement adapté aux produits thermosensibles, et c'est aujourd'hui le type d'évaporateur le plus utilisé.

Cependant, les évaporateurs à film tombant doivent être conçus très soigneusement pour chaque condition de fonctionnement ; un mouillage suffisant de la surface chauffante par le liquide est extrêmement important pour un fonctionnement sans problème de l'installation.

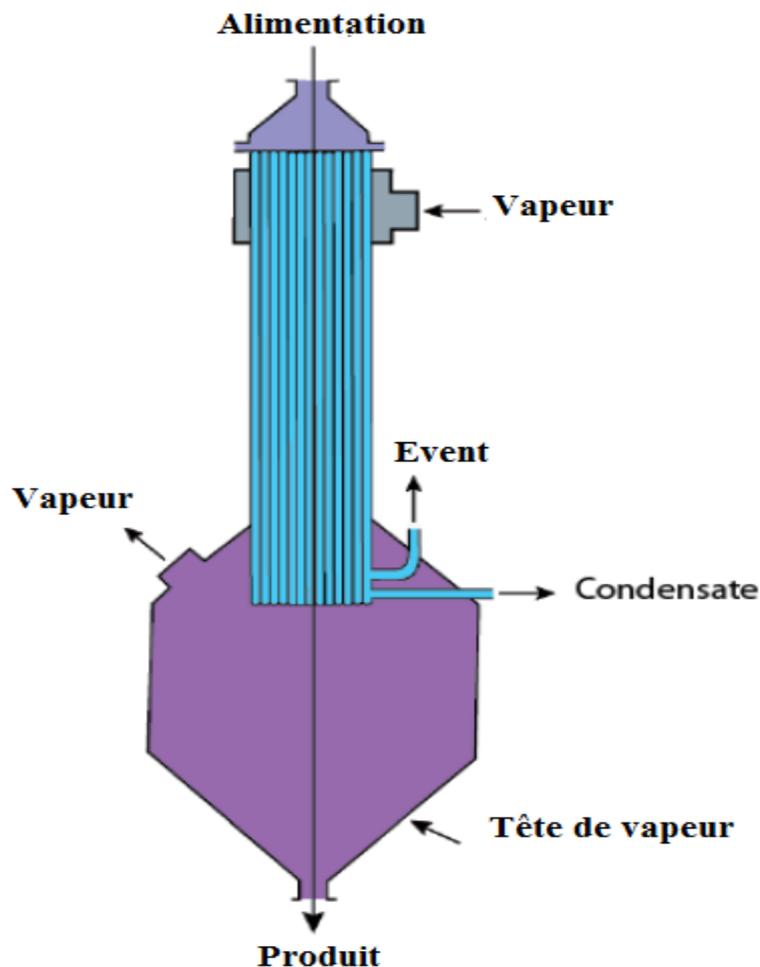


Figure II 6 Évaporateur à film tombant [54].

II.2.7 Évaporateurs à film ascendant

Ceux-ci fonctionnent sur le principe du "thermosiphon". L'alimentation pénètre au fond des tubes chauffants et, à mesure qu'elle chauffe, de la vapeur commence à se former. La force ascendante de cette vapeur produite lors de l'ébullition fait monter le liquide et les vapeurs en flux parallèle. Dans le même temps, la production de vapeur augmente et le produit s'aplatit en un film mince sur les parois des tubes, et le liquide remonte vers le haut.

Ce mouvement ascendant à co-courant a pour effet bénéfique de créer une forte turbulence dans le liquide. Ceci est avantageux lors de l'évaporation de produits très visqueux et de produits ayant tendance à encrasser les surfaces chauffantes. Habituellement, il doit y avoir une différence de température assez élevée entre les côtés de chauffage et d'ébullition de ce type d'évaporateur. Sinon l'énergie du flux de vapeur n'est pas suffisante pour véhiculer le liquide et produire le film ascendant. La longueur des tubes d'ébullition ne dépassera généralement pas 23 pieds. Ce type d'évaporateur est souvent utilisé avec la recirculation du produit, où une partie du concentré formé est réintroduite dans l'entrée d'alimentation afin de produire une charge liquide suffisante à l'intérieur des tubes d'ébullition.

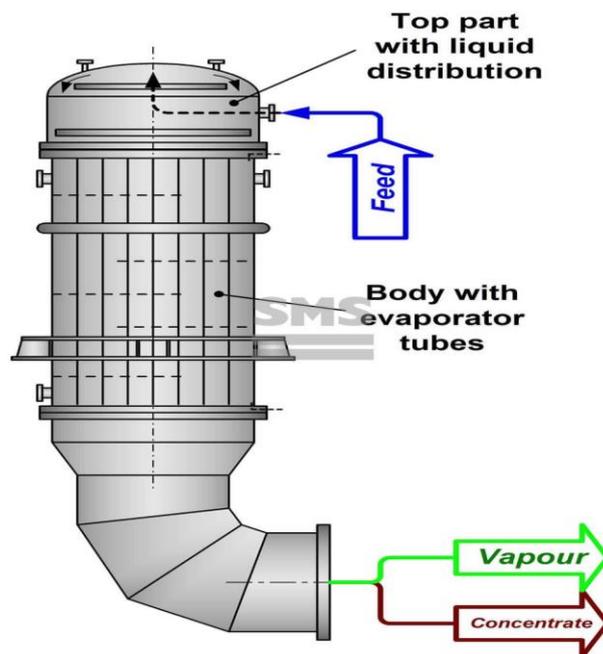


Figure II 7Évaporateur à film ascendant [57].

II.2.8 Évaporateur de film de pulvérisation horizontal

En raison du taux de mouillage élevé et de la distribution positive du liquide, cet évaporateur est plus adapté à la manipulation de liquides de détartrage. La formation de points secs ou une mauvaise distribution des fluides est complètement absente. Des coefficients de transfert de chaleur élevés sont atteints grâce à une ventilation positive et à la libération de vapeurs et d'inertes. La disposition des tubes carrés ou rectangulaires permet un nettoyage facile et approfondi des tubes par des moyens mécaniques ou chimiques. Cependant, il faut plus d'espace au sol [55].

Les installations utilisant des évaporateurs à couche mince à tube horizontal (HTFE) sont disponibles en deux modèles, empilés ou horizontaux. Les plantes empilées ont l'avantage évident d'être compactes dans un encombrement réduit, mais sont utilisées pour des rendements plus faibles. Dans les évaporateurs solaires empilés pour le dessalement, l'énergie solaire obtenue par les capteurs solaires est utilisée comme moyen de chauffage [55].

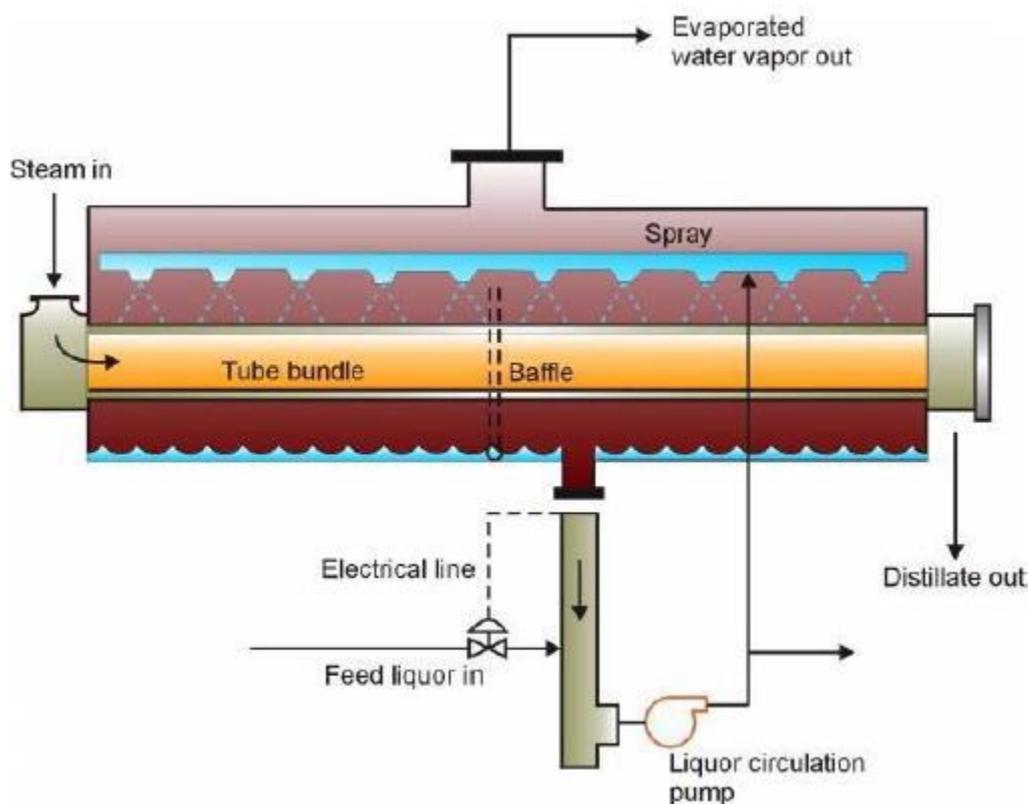


Figure II 8 Évaporateur de film de pulvérisation horizontal [55].

II.2.9 Évaporateurs à compression de vapeur

Ceux-ci sont largement utilisés pour dessaler l'eau salée et même l'eau de mer. La compression de vapeur est réalisée à l'aide de compresseurs mécaniques ou d'éjecteurs de vapeur, en fonction de la quantité de vapeur à traiter et du niveau de pression souhaité. Généralement, de tels compresseurs sont volumineux et coûteux. Les choix se limitent aux compresseurs centrifuges ou axiaux. En revanche, les éjecteurs à vapeur présentent de nombreux avantages, tels qu'une structure simple et aucune pièce mobile. Tout matériau résistant à la corrosion peut être utilisé pour leur construction et nécessite peu d'entretien. Ils peuvent gérer de grands volumes de vapeur à de faibles pressions de fonctionnement. Cependant, le principal inconvénient des éjecteurs à vapeur est qu'ils fonctionnent à une efficacité maximale dans des conditions de charge unique [55].

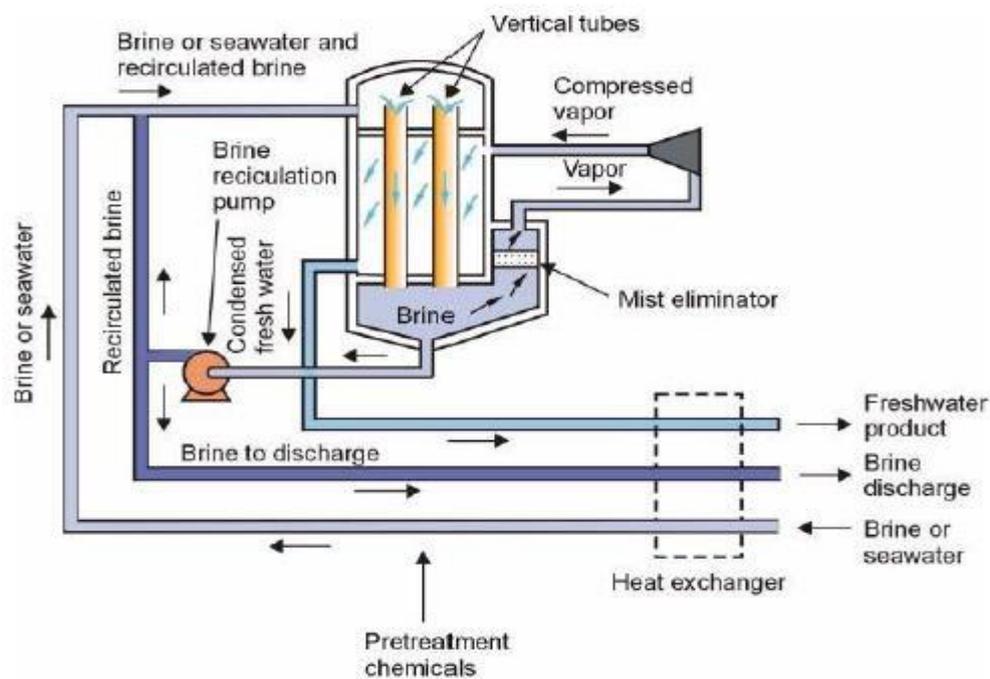


Figure II 9 Évaporateurs à compression de vapeur [55].

II.3 Méthodes d'alimentation des évaporateurs

Lorsqu'un seul évaporateur est utilisé pour la concentration, la vapeur qui en sort est condensée et rejetée. Ce type de fonctionnement est appelé évaporation à simple effet. Lorsqu'un certain nombre d'effets sont utilisés en série, de sorte que la vapeur sortant d'un effet est utilisée comme moyen de chauffage dans le coffre à vapeur de l'effet

suisant, on parle d'évaporation à effets multiples. L'évaporation à effet unique est simple mais ne parvient pas à utiliser efficacement la vapeur, tandis que les évaporateurs à effets multiples évaporent une plus grande quantité d'eau par kilogramme de vapeur consommée dans le processus d'évaporation. Cela entraîne une économie sur le coût de la vapeur, mais en même temps, le coût du matériel et de l'installation du système d'évaporateur augmente en raison du grand nombre d'effets impliqués. Il doit y avoir un compromis entre le coût du matériau et le coût de la vapeur et le nombre d'effets donnant le coût total minimum est la solution la plus thermo-économique. Bien que le nombre d'effets aille dans certains cas jusqu'à dix-sept mais ne devrait généralement pas dépasser sept, car au-delà, le coût du matériel et de l'installation des effets de l'évaporateur compense l'économie réalisée sur le coût de la vapeur[58].

La force motrice pour le transfert de chaleur est la différence de température entre la vapeur dans les tubes/serpentins et le produit dans le bac. La température de la vapeur est fonction de la pression de la vapeur. L'eau bout à 100 °C à une atmosphère, mais à d'autres pressions, le point d'ébullition change. A son point d'ébullition, la vapeur se condense dans les serpentins et cède sa chaleur latente. Si la température de la vapeur est trop élevée, la combustion/l'encrassement augmente, de sorte qu'il y a des limites à la hauteur des températures de vapeur. Le produit est également à son point d'ébullition. Le point d'ébullition peut être élevé avec une augmentation de la concentration du soluté. Cette élévation du point d'ébullition fonctionne sur les mêmes principes que l'abaissement du point de congélation.

Les vapeurs sont éliminées de l'effet précédent à la température d'ébullition du produit à cet effet de sorte qu'il n'existerait aucune différence de température si le vide n'était pas augmenté [58].

II.3.1 Avance directe

La méthode habituelle d'alimentation d'un évaporateur à effets multiples consiste à pomper le liquide léger dans le premier effet et à l'envoyer à son tour à travers les autres effets. C'est ce qu'on appelle l'avance. La concentration du liquide augmente du premier effet au dernier effet. Ce modèle d'écoulement de liquide est le plus simple. Cela nécessite une pompe pour alimenter la solution diluée au premier effet,

cependant, cela peut être fait sans pompes, puisque le débit est dans le sens de la pression décroissante, et les vannes de contrôle dans la ligne de transfert sont tout ce qui est nécessaire [58].

Avantages

- Simple à utiliser
- Moins cher
- Le liquide s'écoule d'un effet à l'autre, entraîné par le différentiel partiel entre les effets successifs, aucune pompe n'est donc nécessaire
- Moins de risque de détérioration des matériaux sensibles à la chaleur

Désavantages

- Réduction du taux de transfert de chaleur dans les effets secondaires et supérieurs
- L'alimentation ne doit pas être inférieure au point d'ébullition, car cela réduit l'économie de vapeur en consommant de la vapeur externe pour fournir de la chaleur sensible

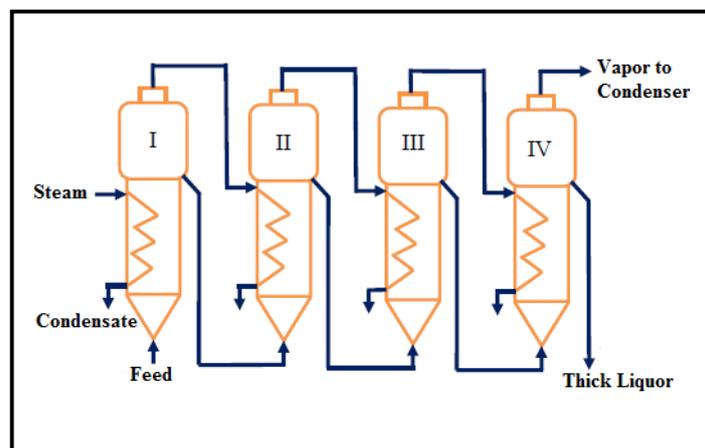


Figure II 10 Méthode d'alimentation avance directe [59].

II.3.2 Retour en arrière

Une autre méthode courante est l'alimentation en arrière, dans laquelle le liquide dilué est alimenté jusqu'au dernier effet, puis pompé à travers les effets successifs jusqu'au premier. Cette méthode nécessite une pompe entre chaque paire d'effets en plus de la

pompe à liqueur épaisse, puisque le débit va de la basse pression à la haute pression, l'alimentation en arrière donne souvent une capacité plus élevée que l'alimentation en avant lorsque la liqueur épaisse est visqueuse, mais elle peut donner une économie plus faible que l'alimentation directe lorsque la liqueur d'alimentation est froide[58].

Avantages

- La liqueur la plus concentrée est en contact avec la vapeur à la température la plus élevée
- Faible viscosité
- Taux de transfert de chaleur plus élevé en premier effet

Désavantages

- Des pompes inter-effets sont nécessaires
- Risque plus élevé d'endommagement du produit visqueux soumis à une température plus élevée
- Risque d'encrassement

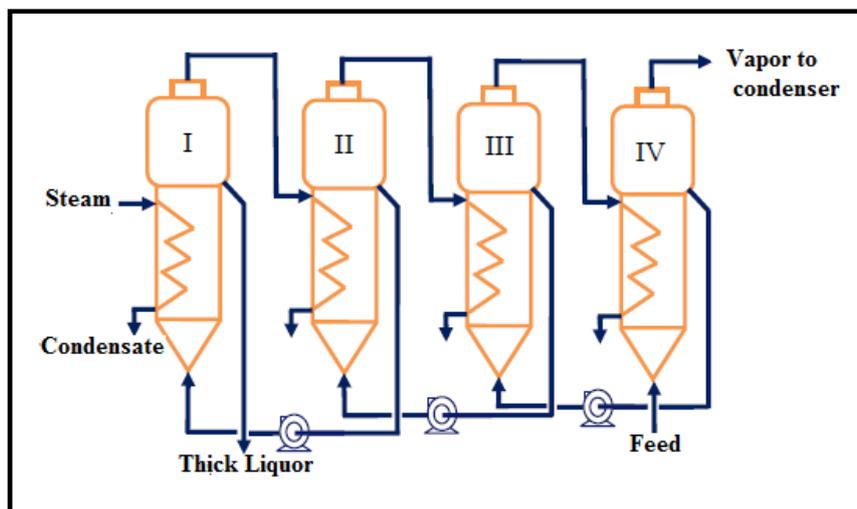


Figure II 11 d'alimentation retour en arrière [59].

II.3.3 Alimentation mixte

Dans l'alimentation mixte, le liquide dilué entre dans un effet intermédiaire, s'écoule dans l'alimentation directe jusqu'à la fin de la série, puis est pompé vers le premier effet pour la concentration finale. Cela élimine certaines des pompes nécessaires à

l'alimentation en retour tout en permettant que l'évaporation finale se fasse à la température la plus élevée [58] .

Avantages

- Combine la simplicité de l'avance vers l'avant et l'économie de l'avance vers l'arrière
- Utile pour la concentration d'un aliment très visqueux

Désavantages

- Tuyauterie et instrumentation plus complexes
- Plus cher

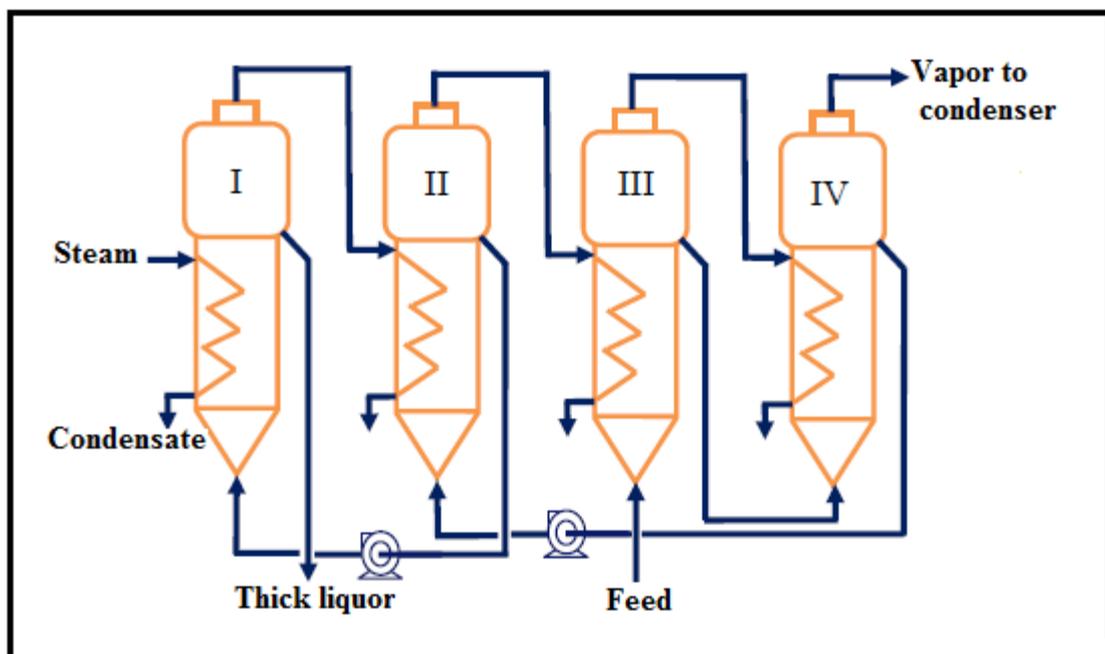


Figure II 12 Méthode d'alimentation mixte [59].

II.3.4 Flux parallèle

Dans les évaporateurs à cristallisation où la bouillie de cristal et de liqueur mère est retirée, l'alimentation peut être admise directement à chaque effet pour donner ce que l'on appelle une alimentation parallèle. En alimentation parallèle, il n'y a pas de transfert de liquide d'un effet à l'autre [58].

Avantages

- Plus adapté pour une utilisation avec des cristalliseurs
- Meilleur contrôle

Désavantages

- Disposition plus complexe
- Pompes généralement nécessaires pour chaque effet

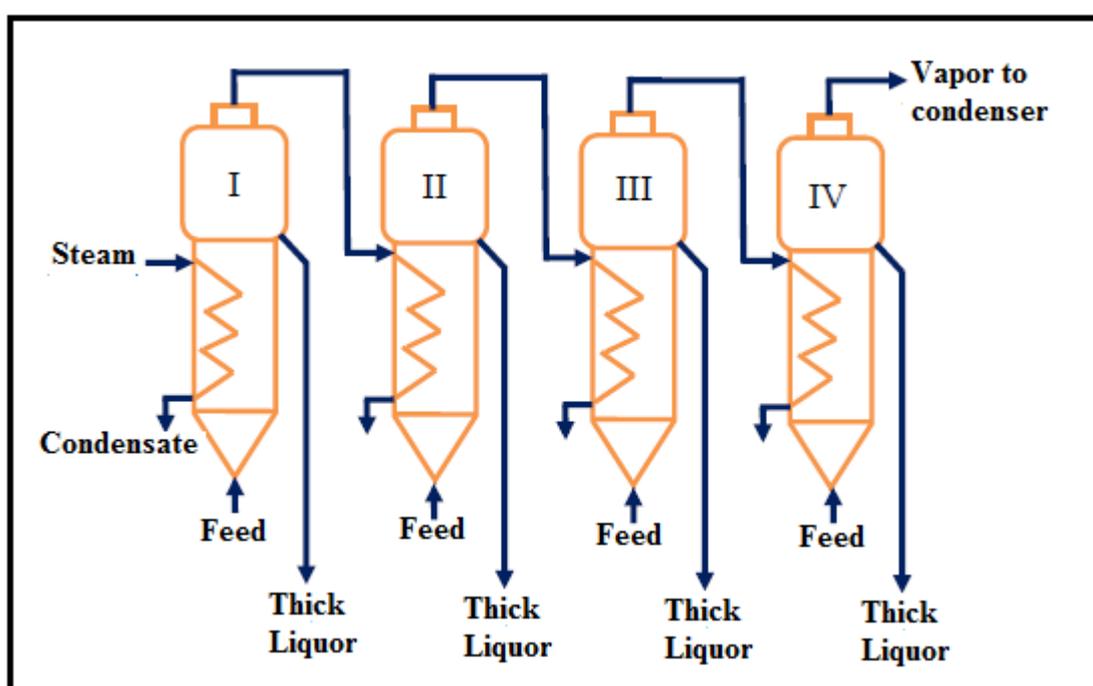


Figure II 13 Méthode d'alimentation flux parallèle [59].

II.4 Performance des évaporateurs

La performance d'un évaporateur chauffé à la vapeur se mesure en termes de capacité et d'économie. La capacité est définie comme le nombre de kilogrammes d'eau vaporisée par heure. L'économie (ou économie de vapeur) est le nombre de kilogrammes d'eau vaporisée à partir de tous les effets par kilogramme de vapeur utilisée. Pour un évaporateur à simple effet, l'économie de vapeur est d'environ 0,8 (<1). La capacité est d'environ n fois celle d'un évaporateur à simple effet et l'économie est d'environ $0,8n$ pour les évaporateurs à effet n . Cependant, des pompes, des tuyaux d'interconnexion et des vannes sont nécessaires pour le transfert de liquide

d'un effet à un autre effet, ce qui augmente à la fois les coûts d'équipement et de fonctionnement [58].

II.5 Considération relative à la conception thermique / des conduites de fumées

De nombreux facteurs doivent être soigneusement pris en compte lors de la conception des évaporateurs. Le type d'évaporateur ou d'échangeurs de chaleur, la circulation forcée ou naturelle, l'arrangement d'alimentation, l'élévation du point d'ébullition, le coefficient de transfert de chaleur, l'encrassement, la taille et l'arrangement des tubes sont tous très importants.

II.5.1 Taille du tube, disposition et matériaux

La sélection d'un diamètre de tube, d'une longueur de tube et d'une disposition de tube appropriés est déterminée par des calculs d'essais et d'erreurs. Si la chute de pression est supérieure à la chute de pression admissible, des ajustements supplémentaires du diamètre du tube, de la longueur du tube et de la disposition du tube sont nécessaires. Une variété de matériaux, notamment de l'acier à faible teneur en carbone, de l'acier inoxydable, du laiton, du cuivre, du cupronickel, etc. sont utilisés. Cependant, le choix des matériaux des tubes dépend de la corrosivité de la solution et des conditions de travail.

II.5.1.1 Coefficients de transfert de chaleur

Le coefficient de transfert de chaleur de la condensation de la vapeur côté calandre est normalement très élevé par rapport au côté liquide. Par conséquent, le coefficient de transfert de chaleur côté tube (côté liquide) contrôle pratiquement la vitesse de transfert de chaleur. Le coefficient global de transfert de chaleur doit être connu/calculé à partir des données de performance d'un évaporateur en fonctionnement du même type et traitant la même solution. Les valeurs typiques du coefficient global de transfert de chaleur sont données ci-dessous.

Type d'évaporateur	Coefficient global de transfert de chaleur	
	$W.m^{-2} \cdot ^\circ C^{-1}$	$Btu.ft^{-2}h^{-1}\cdot F^{-1}$
Evaporateur vertical à tube long. - Circulation naturelle. - Circulation forcée	1000-2700 2000-7500	200-550 400-1500
Évaporateurs verticaux ou à calandre à tube court	750-2500	150-500
Evaporateurs à film agité. - De faible à moyenne viscosité (<1 P). - Haute viscosité (> 1P)	1800-2700 1500	300-500 300
Évaporateurs à film tombant (viscosité <0,1 P)	500-2500	100-500
Évaporateurs à film montant	2000-5000	100-1000

Tableau II. 1 Coefficients généraux de transfert de chaleur dans les évaporateurs [54]

II.5.2 Point d'ébullition (BPE)

La plupart des évaporateurs produisent une liqueur concentrée avec un point d'ébullition considérablement plus élevé que celui du solvant pur (ou de l'eau). Ce phénomène est appelé élévation du point d'ébullition (BPE). Le BPE se produit lorsque la pression de vapeur d'une solution (généralement une solution aqueuse) est inférieure à celle du solvant pur à la même température. Le point d'ébullition d'une solution est une propriété collective. Cela dépend de la concentration de soluté dans la solution pour une paire de soluté et de solvant. Le BPE à partir de liqueur concentrée réduit la force motrice effective de la température par rapport au solvant pur en ébullition. La vapeur à l'équilibre générée à partir d'une solution présentant une élévation du point d'ébullition est surchauffée par rapport à la vapeur générée lors de l'ébullition du solvant pur. La vapeur est générée au point d'ébullition de la solution, qui est supérieur au point d'ébullition du composant pur. La vapeur, cependant, est sans soluté, elle ne se condensera donc pas tant que la chaleur supplémentaire correspondant à la montée ne sera pas éliminée, elle est donc surchauffée. Par conséquent, le BPE de la solution concentrée doit être connu pour la conception de l'évaporateur.

II.5.2.1 Détermination de BPE

Pour les solutions fortes, les données BPE sont estimées à partir d'une règle empirique dite règle de Dühring. Cela indique que le point d'ébullition d'une solution donnée est une fonction linéaire du point d'ébullition de l'eau pure à la même pression. Ainsi, si le point d'ébullition de la solution est tracé en fonction du point d'ébullition correspondant de l'eau pure à la même pression, une ligne droite est générée. Différentes lignes sont obtenues si ces tracés sont réalisés pour une solution de différentes concentrations. Le principal avantage est qu'une ligne de Dühring peut être tracée si les points d'ébullition d'une solution et de l'eau (lu à partir du tableau de vapeur) à deux pressions différentes sont connus. Cette ligne peut être utilisée pour prédire le point d'ébullition d'une solution à n'importe quelle pression.

II.5.3 Sélection d'un évaporateur approprié

Le choix du type d'évaporateur le plus adéquat dépend d'un certain nombre de facteurs. Principalement :

1. Débit.
2. Viscosité de la solution (et augmentation de son pendant l'évaporation).
3. Nature du produit et du solvant (sensibilité à la chaleur et à la corrosivité).
4. Caractéristiques d'encrassement.
5. Les caractéristiques mousseuses. Des directives de sélection fondées.

II.6 Considérations de conception mécanique

La température et la pression sont les deux facteurs importants qui affectent la conception mécanique des systèmes d'évaporateur. De nombreux autres facteurs tels que le démarrage, l'arrêt, la perturbation, l'assèchement, la charge externe des supports, la pression pulsée, la charge du vent, la charge sismique, etc. affectent également de manière significative le fonctionnement de l'évaporateur. Divers facteurs affectant la conception mécanique de l'équipement sont pris en compte et leur effet est détaillé dans la conception de l'échangeur de chaleur. Ici, les facteurs de température et de pression sont décrits ci-dessous en bref [59].

II.6.1 Température de fonctionnement et pression

La température de fonctionnement est la température qui est maintenue pour le fonctionnement spécifié de la cuve métallique convenablement choisie lors de la conception. La pression de fonctionnement est la pression au sommet d'un récipient sous pression.

Cependant, s'il s'agit d'un grand réservoir, il faut tenir compte de la charge hydraulique statique même en cas de dysfonctionnement [59].

II.6.2 Température et pression de conception

Il est important de déterminer la température et la pression de fonctionnement minimales et maximales anticipées afin d'obtenir la température et la pression de conception. La pression de conception est généralement la somme de la pression maximale admissible et de la hauteur statique du fluide dans le récipient sous pression. La combinaison de la température et de la pression a une incidence sur la conception mécanique de l'équipement. La plupart des considérations de conception sont également liées à la conception de la pression.

II.6.3 Pression de travail maximale admissible

La pression de service maximale admissible est la pression maximale à laquelle l'équipement peut fonctionner en toute sécurité. Normalement, elle ne doit pas être inférieure à la pression de service maximale prévue divisée par un facteur de 0,90

II.6.4 Expansion thermique

La dilatation thermique différentielle entre diverses parties de l'équipement a un effet significatif sur la conception mécanique. Il peut y avoir une différence significative de dilatation entre l'enveloppe et le côté du tube en raison de la différence de température de deux fluides. La dilatation thermique peut également déterminer la manière dont les tubes sont fixés à la plaque tubulaire. En général, un joint de dilatation approprié est placé au centre entre deux segments de la coque lorsque la dilatation différentielle peut être importante [59].

II.7 Calcul de conception thermique

II.7.1 Calculs à effet unique

Les calculs d'évaporateur à simple effet sont assez simples. La chaleur latente de condensation de la vapeur est transférée à travers la surface chauffante pour vaporiser l'eau d'une solution en ébullition. Par conséquent, deux équations d'équilibre enthalpique sont nécessaires pour calculer le taux de vaporisation du solvant et le taux de chaleur d'entrée nécessaire.

En général, il est possible de résoudre analytiquement les équations de l'énergie et du bilan matière par une approche séquentielle. Les hypothèses suivantes sont faites pour développer les équations de bilan de masse et d'énergie :

- Il n'y a pas de fuite ou d'entraînement
- Le débit de non condensable est négligeable
- La perte de chaleur du système d'évaporation est négligeable

À partir des données d'enthalpie de la solution, de la vapeur et de l'eau condensée, le taux d'apport de chaleur ou le débit de vapeur peuvent être calculés. Le coefficient de transfert de chaleur global DU (y compris le coefficient d'encrassement) peut être connu à partir des données de performance du fonctionnement du même type d'évaporateur et du même traitement de solution, ou une valeur raisonnable peut être sélectionnée à partir de manuels standard. Avec ces informations, la zone de transfert de chaleur requise peut être estimée. Utilisez la méthode décrite dans Conception d'échangeurs de chaleur à coque et à tube pour calculer la chute de pression côté tube et côté coque à partir de valeurs spécifiées pour la longueur, le diamètre et la disposition des tubes. Si la valeur de chute de pression est supérieure à la chute de pression admissible correspondante, d'autres ajustements de la configuration de l'échangeur de chaleur sont nécessaires [59].

II.7.2 Calculs d'effets multiples

En général, les nombres d'évaporateurs multi-effets nécessitent une méthode de test et une erreur car la plupart des équipements requis dépendent d'une température moyenne inconnue. Normalement, les points de transfert de chaleur dans toutes les sorties sont considérés comme égaux. L'utilisation d'un évaporateur de taille égale

pour tous les effets réduit considérablement les coûts d'équipement. Dans un problème d'évaporateur typique, vous disposez de la pression d'alimentation et de la température de la vapeur, de la pression pour la fonction de sortie finale, de l'alimentation et des estimations. Il est généralement nécessaire que le concepteur dispose d'estimations expérimentales des coefficients de transfert de chaleur totaux.

La stratégie globale consiste à estimer les températures intermédiaires. Les équations d'équilibre énergétique et matériel sont résolues séquentiellement pour déterminer la chaleur transférée dans chaque effet et la zone de transfert de chaleur. Si les zones ne sont pas égales, le calcul est répété pour réviser les températures intermédiaires et la procédure est répétée jusqu'à ce que la zone de transfert de chaleur soit égale dans tous les effets. La disposition d'un évaporateur à triple effet d'avance est illustrée à la Figure II.14. Les équations du bilan énergétique dans tous les effets sont données ci-dessous [59] :

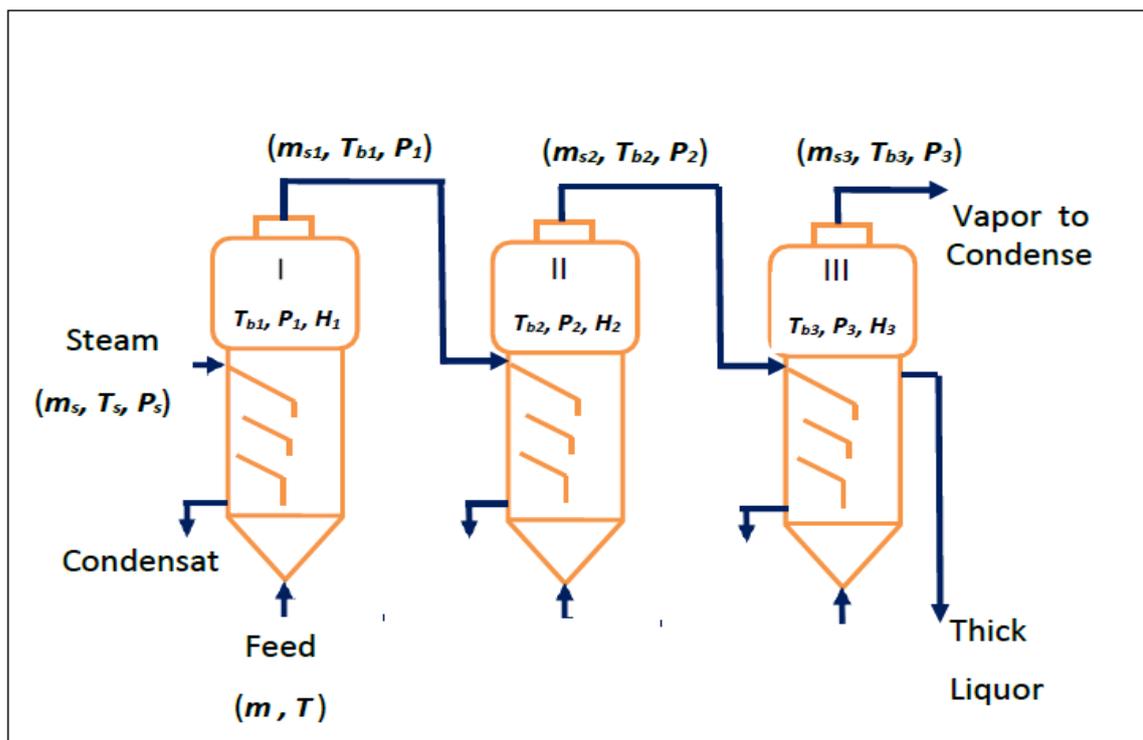


Figure II 14 Débits et pression dans un évaporateur à triple effet [59].

$$\text{Effet I} \quad m_f H_f + m_s H_s = (m_f - m_{s1})H_1 + m_{s1}H_{s1} + m_s H_{l1} \quad (2.1)$$

Si la chaleur sensible de la vapeur est négligée, cette équation peut être réécrite :

$$m_f H_f + m_s l_s = (m_f - m_{s1}) H_1 + m_{s1}H_{s1} \quad (2.2)$$

$$\text{Effet II} \quad (m_f - m_{s1}) H_1 + m_{s1}l_{s1} = (m_f - m_{s1} - m_{s2}) H_2 + m_{s2} H_{s2} \quad (2.3)$$

$$\text{Effet III} \quad (m_f - m_{s1} - m_{s2}) H_2 + m_{s2}l_{s2} = (m_f - m_{s1} - m_{s2} - m_{s3}) H_3 + m_{s3}H_{s3} \quad (2.4)$$

Où,

m_{sk} est le taux de vapeur généré dans le k nième effet.

m_f and m_s sont le débit d'alimentation et de vapeur.

H_k est l'enthalpie de la solution laissant le k nième effet à T_s et P_s .

H_{sk} est l'enthalpie de vapeur (Steam) générée dans le k nième effet

H_{lk} l'enthalpie de liquide dans le k nième effet.

λ_s est la chaleur latente de vapeur introduite dans le 1er effet à P_s .

λ_{s1} et λ_{s2} sont les chaleurs latentes de condensation de vapeur à pression P_1 et P_2 respectivement.

Si U_{D1} , U_{D2} et U_{D3} sont les coefficients de transfert de chaleur globaux correspondants et A_1 , A_2 et A_3 sont la zone de transfert de chaleur requise.

Alors il peut être écrit comme suit :

$$\text{Effect I: } Q_1 = m_s \lambda_s = U_{D1} A_1 (T_s - T_{b1}) = U_{D1} A_1 \Delta T_1$$

$$\text{Effect II: } Q_2 = m_{s1} \lambda_{s1} = U_{D2} A_2 (T_{w1} - T_{b2}) = U_{D2} A_2 \Delta T_2$$

$$\text{Effect III: } Q_3 = m_{s2} \lambda_{s2} = U_{D3} A_3 (T_{w2} - T_{b3}) = U_{D3} A_3 \Delta T_3$$

Où,

Q_k est la quantité de chaleur transférée en kth effet.

T_{bk} est le point d'ébullition de la solution en k nième effet à la pression qui prévaut.

T_s est la température de la vapeur se condensant dans le 1er effet.

$(T_{bk} - T_{wk})$ est l'élévation du point d'ébullition dans le k nième effet ou T_{wk} est le point d'ébullition du solvant pur (eau) en k nième effet à la pression ambiante.

Conclusion

L'économie de vapeur de l'évaporateur est également affectée par la température d'alimentation. Si les aliments n'atteignent pas le point d'ébullition, ils doivent être portés à cette température à l'aide de chaleur. La source réelle de ce préchauffage d'alimentation peut être de la vapeur provenant d'un évaporateur à simple effet ; un préchauffeur d'alimentation séparé peut être utilisé à cette fin.

CHAPITRE III
MODÉLISATION DE L'ÉVAORATEUR A
SIMPLE EFFET

CHAPITRE III

MODÉLISATION DE L'ÉVAORATEUR A SIMPLE EFFET

III.1 Introduction :

Dans la première partie de ce chapitre, nous rappelons les concepts de processus et de modèle, ainsi que de nombreux termes utilisés fréquemment dans le cadre de la modélisation. Dans la deuxième partie, nous aborderons le développement du modèle mathématique du processus d'évaporation à simple effet.

III.2 Définition d'un processus et d'un modèle :

III.2.1 Processus :

Un processus est caractérisé par :

- Une ou plusieurs grandeurs de sortie, mesurables, qui constituent le résultat du processus,
- Une ou plusieurs grandeurs d'entrée (ou facteurs), qui peuvent être de deux types,
 1. Des entrées sur lesquelles il est possible d'agir,
 2. Des entrées sur lesquelles il n'est pas possible d'agir, et est peuvent être aléatoires ou déterministes, mesurables ou non mesurables.

III.3 Modèles :

III.2.1 Définition :

Nous nous intéressons ici aux modèles mathématiques, qui représentent la relation entre les entrées et les sorties d'un processus à travers des équations. Si les équations sont algébriques, le modèle est dit statique. Le modèle est dit dynamique si ces équations sont respectivement des équations aux différences différentielles ou cycliques, à temps continu ou à temps discret. Un modèle est caractérisé par son domaine de validité, c'est-à-dire le domaine de l'espace d'entrée dans lequel l'accord entre les valeurs de sortie du processus calculées par le modèle et ses mesures est considéré comme satisfaisant en utilisant celles faites par le modèle.

III.2.2 Les étapes de la conception d'un modèle :

Lors de la conception d'un modèle de connaissances, la relation entre l'entrée et la sortie du modèle est directement dérivée des équations du phénomène physique (chimique ou autre) qui régissent la fonction du processus. Une fois le modèle obtenu sous forme analytique, si cette approximation est raisonnable, elle peut être approchée pour simplifier son expression (par exemple "linéariser" le modèle pour passer d'un modèle non linéaire à un modèle linéaire). Dans le cas d'une modélisation "boîte noire", la construction du modèle nécessite les trois éléments suivants :

- Une hypothèse sur l'existence d'une relation déterministe liant les entrées à la(ou aux) sortie(s).
- Une séquence de mesures des entrées et de la sortie du processus.
- Un algorithme d'apprentissage.

III.3 Evaporation de simple effet :

L'application industrielle des systèmes de dessalement par évaporation à simple effet est très limitée. Ce système est utilisé sur les navires. En effet, le rapport de performance thermique du système est inférieur à 1, c'est-à-dire que la quantité d'eau produite est inférieure à la quantité de vapeur surchauffée utilisée pour faire fonctionner le procédé. Cependant, la compréhension du processus est essentielle car il constitue plusieurs éléments qui forment d'autres systèmes de compression de vapeur à simple effet ainsi que des processus d'évaporation à effets multiples. Cela aidera à comprendre ces systèmes plus complexes.

III.3.1. Description du procédé :

La figure III.1 montre un diagramme schématique d'un système d'évaporation à simple effet. Les principaux composants de l'unité sont l'évaporateur et le préchauffeur ou condenseur d'alimentation. L'évaporateur se compose de tubes d'échange de chaleur évaporateur/condenseur, d'un espace vapeur, d'une piscine d'eau non évaporatoire, d'une ligne d'élimination des gaz non condensables, d'un distributeur d'eau et d'un dévésiculeur. Le préchauffeur d'alimentation est une structure à calandre et tube et fonctionne en mode contre-courant, où la chaleur latente de la vapeur de condensation est transférée à l'eau de mer d'entrée, y compris l'alimentation (M_f) et l'eau de mer de refroidissement (M_{cw}).

Apport d'eau de mer ($M_{cw}+M_f$) à température (T_{cw}) et salinité (X_f) est introduit côté tube du préchauffeur, dont la température monte jusqu'à (T_f). L'eau de refroidissement (M_{cw}) est rejetée à la mer.

La fonction de l'eau de refroidissement dans le condenseur est d'évacuer l'excès de chaleur ajouté au système par la vapeur de chauffage dans l'évaporateur. Cela signifie que l'évaporateur ne consomme pas toute la chaleur fournie, mais réduit sa qualité. Le chauffage de l'eau de mer d'alimentation (M_f) dans les tubes du condenseur de (T_{cw}) à (T_f) est essentiel pour améliorer les performances thermiques du procédé. La chaleur nécessaire au chauffage de l'eau de mer dans le condenseur est apportée par condensation de la vapeur d'eau formée par ébullition dans l'évaporateur (M_d).

La température de condensation de vapeur et par conséquent la pression dans l'espace de vapeur pour l'évaporateur et le condenseur est contrôlée par :

- le débit d'écoulement de l'eau de refroidissement, M_{cw}
- la température de l'eau d'alimentation, T_{cw} ;
- l'aire de surface de transfère de chaleur disponible dans le condenseur, A_c ;
- le coefficient global de transfère de chaleur entre la vapeur condensée et l'eau de mer en circulation, U_c ;

En conséquence, le condenseur a trois fonctions :

- enlever l'excès de chaleur du système;
- améliore le rapport de performance du processus ;
- ajuster la température d'ébullition à l'intérieur de l'évaporateur.

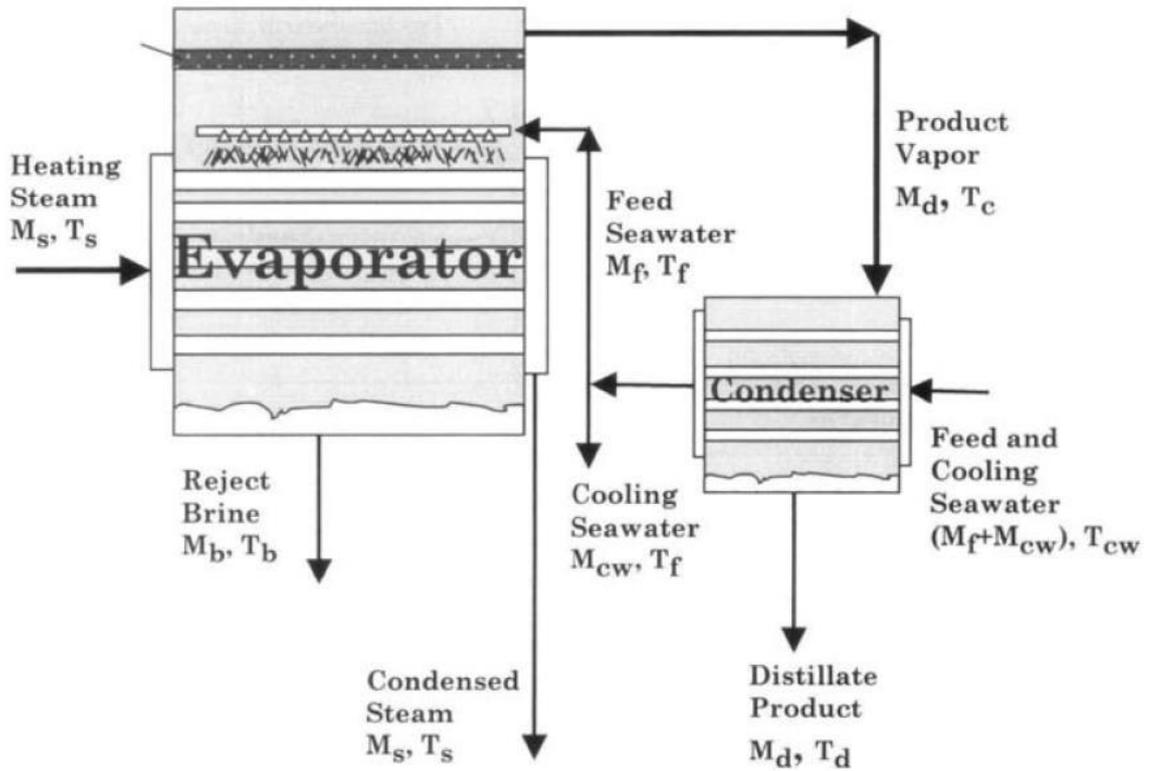


Figure III 1 Procèdes de dessalement par évaporation à simple effet [23].

L'alimentation en eau de mer (M_f) est traitée chimiquement et dégazée avant d'être pompée dans l'évaporateur. Un traitement chimique est nécessaire pour prévenir et éliminer la tendance à l'encrassement de l'évaporateur. Ces deux facteurs peuvent sérieusement affecter le fonctionnement de l'appareil. Dans l'évaporateur, l'eau d'alimentation est pulvérisée en haut, formant un mince film liquide sous les plaques tubulaires disposées horizontalement. La condensation de la vapeur saturée surchauffée et son dégagement de chaleur latente fournissent la chaleur latente nécessaire à l'évaporation de l'eau de l'alimentation en eau de mer.

En conséquence, la température (T_f) de l'eau d'alimentation s'élève jusqu'à sa température d'ébullition (T_b). L'importance de (T_b) peut être évaluée principalement par la nature des produits chimiques utilisés pour contrôler l'encrassement et l'état de la vapeur surchauffée. La vapeur formée par le flux (M_d) d'ébullition ne contient pas de sel. La figure III 2 montre que la température de la vapeur (T_v) produite est inférieure à la température du point d'ébullition de l'élévation du point d'ébullition (BPE). De même, la température de la vapeur de condensation (T_d) est inférieure à

celle de la vapeur produite par les pertes dues au désembuage, les lignes de transmission, et de condensation.

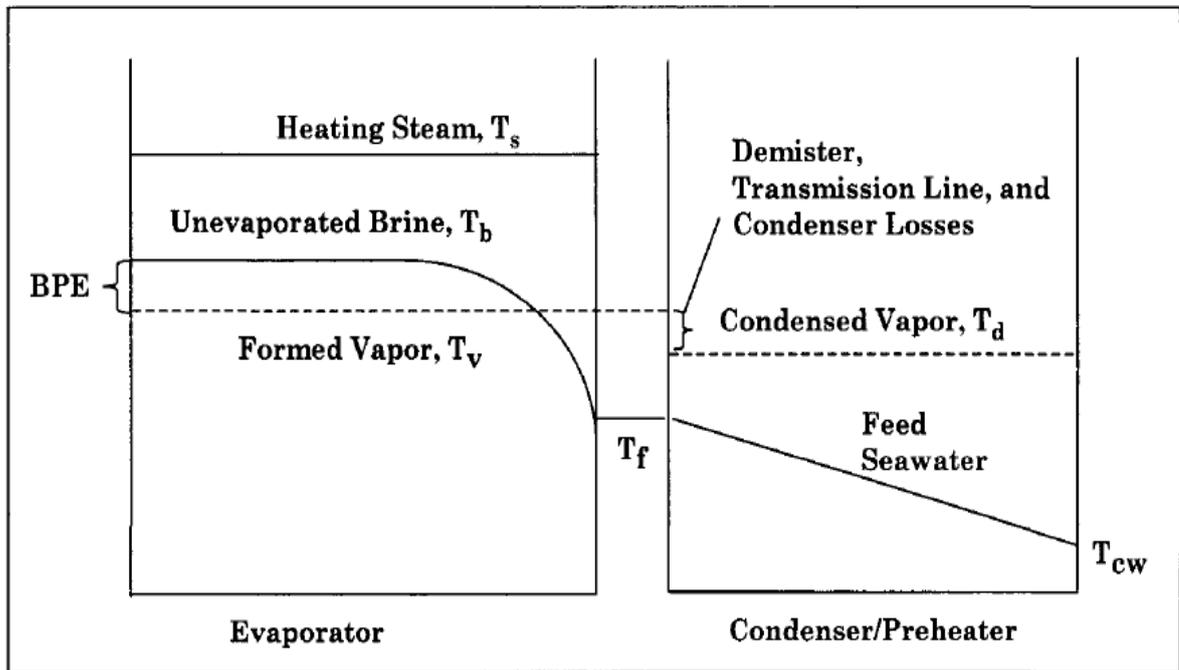


Figure III 2 Les profils de température dans l'évaporateur et le condenseur [23].

La vapeur résultante passe à travers un séparateur de brouillard à grille pour éliminer les gouttelettes de saumure entraînées. La vapeur doit être complètement exempte de gouttelettes de saumure pour éviter la contamination de l'eau produite. Cela empêche également les tubes du condenseur d'être exposés à l'eau salée, ce qui peut entraîner une corrosion de surface et réduire les taux de transfert de chaleur. De plus, dans les installations de compression thermique de vapeur, les gouttelettes d'eau entraînées dans la vapeur circulant dans l'éjecteur de vapeur peuvent provoquer la corrosion des tuyères et des diffuseurs. La température de saturation de la vapeur sortant du dévésiculateur est inférieure à (T_v).

Cette chute de température est causée par la chute de pression de friction dans le dévésiculateur. D'autres pertes de charge peuvent être localisées lors du transfert de vapeur entre l'évaporateur et le préchauffeur ; également la chute de pression se produit lors de la condensation de la vapeur. Cela réduira considérablement la température de condensation de la vapeur. Le gaz non condensable dans l'espace vapeur du condenseur doit être purgé en continu pour éviter une diminution de la capacité de transfert de chaleur du condenseur. De même, le gaz non condensable

réduit la pression partielle de la vapeur condensée. En conséquence, la condensation se produira à des températures plus basses. Cela réduit l'efficacité du processus en raison de la force motrice nette réduite pour le transfert de chaleur, abaissant ainsi la température de l'eau de mer à l'entrée (T_f).

Le dégazage se produit au point où la température se rapproche de la température de la charge. Il refroidit le gaz non condensable à la température la plus basse possible, réduit la quantité de vapeur qui peut s'échapper avec le gaz et réduit la quantité de gaz pompée. De plus, un condenseur à contre-courant peut être utilisé pour maintenir l'eau sortante à moins de 3° à 5 0C de la température de condensation de la vapeur saturée. Cela améliore les performances thermiques de l'unité et réduit le débit massique de l'eau de refroidissement.

III.3.2 Modélisation de procédé :

On a choisis d'utiliser un modèle compliqué pour un système d'évaporation à simple effet qui a été construit en se basant sur six points :

- Bilan de matière ;
- Bilans énergétiques de l'évaporateur et de condenseur ;
- Elévation du point d'ébullition et pertes thermodynamiques ;
- L'aire de surface de transfert de chaleur de l'évaporateur et de condenseur ;
- Evaluation des paramètres de performance.

III.3.2.1 Bilans de matière :

Le bilan matière d'un évaporateur est relativement simple à établir puisqu'il répond à l'équation suivante :

Solution d'alimentation = solution concentrée + eau évaporée

Dans le cas de précipitation de sel, il faut tenir compte de la phase solide et écrire :

solution d'alimentation = solution concentrée + sel précipité + eau évaporée

Les équilibres globaux de la masse et de sel supposent que l'eau de distillat est sans sel. Les deux équations d'équilibre sont données par:

$$M_f = M_d + M_b \quad (1)$$

$$M_f X_f = M_b X_b \quad (2)$$

M est le débit massique, X , la salinité, les indices b , d et f dénote la saumure rejetés, le distillat, et l'eau de mer d'alimentation respectivement. L'équation 1 peut être employée pour se débarrasser de M_f de l'équation 2 et générer une relation entre M_b et M_d . Cela peut être donné par la relation :

$$M_b = M_d \left(\frac{X_f}{(X_b - X_f)} \right) \quad (3)$$

De même, on peut être éliminé (M_b) de l'équation 2 pour trouver une relation entre M_f et M_d . Cependant on peut trouver :

$$M_f = M_d \left(\frac{X_b}{(X_b - X_f)} \right) \quad (4)$$

III.3.2.2 Bilans énergétiques dans l'évaporateur et le condenseur :

Le bilan énergétique de l'évaporateur comprend l'énergie de la vapeur surchauffée, de la vapeur formée, de l'eau de mer fournie et de la saumure retirée.

Dans l'évaporateur, de la vapeur saturée s'écoule de la chaudière à vapeur à un débit égal à M_s , élevant la température de l'eau de mer fournie (M_f) de la température d'entrée (T_f) à la température d'ébullition (T_b). De plus, il fournit la chaleur latente nécessaire pour vaporiser une masse de vapeur particulière (M_d). Par conséquent, cela ressemble à ceci :

$$Q_e = M_f C_p (T_b - T_f) + M_d \lambda_v = M_s \lambda_s \quad (5)$$

Q_e est la charge thermique de l'évaporateur, C_p est la chaleur spécifique de la saumure à pression constante et λ est la chaleur latente de vaporisation. La température de référence dans l'équation 5 est T_b . La chaleur spécifique de l'équation 5 est calculée en utilisant la température $(T_f + T_b) / 2$ et la teneur en sel X_f de l'eau de mer fournie.

Comme le montrent l'équation 5 et la figure 3.2, la température de la vapeur est égale à T_v et est inférieure à la température d'ébullition en raison de l'élévation du point d'ébullition BPE.

Le condenseur fonctionne sur la vapeur M_d formée par l'évaporateur. La chaleur latente de vaporisation est transférée à l'eau de mer fournie au débit massique de $M_f + M_{cw}$. L'eau de mer fournie M_f est introduite dans l'évaporateur. Par contre, le reste (M_{cw}) appelé eau froide est rejeté. La vapeur est supposée saturée à une température égale à T_v .

La charge thermique du condensateur est donnée par :

$$Q_C = (M_f + M_{cw})C_p(T_f - T_{CW}) = M_d\lambda_v \quad (6)$$

Q_C est la charge thermique du condenseur, et C_p est la chaleur spécifique de la saumure à la pression constante, M le débit massique, T est la température, et λ est la chaleur latente d'évaporation. Les indices $_{cw}$, $_f$, $_d$, et $_v$ dénotent l'eau de mer de refroidissement, l'eau de mer d'alimentation de l'évaporateur, la vapeur de distillat, et la vapeur de condensation respectivement. La chaleur spécifique de l'eau de mer, C_p est calculée au moyen de la température moyenne $(T_f + T_W)/2$ et la salinité de X_F .

Le bilan énergétique global pour le système est donné par :

$$M_s\lambda_s = M_bC_p(T_b - T_{CW}) + M_dC_p(T_v - T_{CW}) + M_{CW}C_p(T_f - T_{CW}) \quad (7)$$

La règle de liste parmi l'équation 7 est T_{cw} . Les entités particulières sont calculées à la règle normale marquée parmi tous les termes et une salinité X_b , 0, et X_f parmi les termes qui incluent M_b , M_d et M_{CW} , respectivement. L'équation 6 est utilisée parmi les termes pour la vapeur de distillat et la vapeur de condensation dans l'équation 7. Cette équation perdant l'inspection nutritive omnisciente à :

$$M_s\lambda_s = M_bC_p(T_b - T_f) + M_dC_p(T_v - T_f) + M_d\lambda_v \quad (8)$$

La température de la vapeur T_v est ensuite définie en termes de température d'ébullition (T_b) et l'élévation du point d'ébullition (**BPE**) :

$$T_b = T_v + \text{BPE} \quad (9)$$

La substitution de l'équation 9 dans l'équation 8 donne :

$$M_s\lambda_s = M_bC_p(T_v + \text{BPE} - T_f) + M_dC_p(T_v - T_f) + M_d\lambda_v \quad (10)$$

L'équation 10 peut être réarrangée comme suit:

$$M_s \lambda_s = M_b C_p (T_v - T_f) + M_b C_p \text{ BPE} + M_d C_p (T_v - T_f) + M_d \lambda_v \quad (11)$$

Le débit de saumure rejeté M_b , est éliminé dans l'équation 11 par l'utilisation de l'équation 3. Ceci mènera à :

$$M_s \lambda_s = M_d C_p (T_v - T_f) + M_d (X_f / (X_b - X_f)) C_p (T_v - T_f) + \\ M_d (X_f / (X_b - X_f)) C_p \text{ BPE} + M_d \lambda_v \quad (12)$$

L'équation 12 est simplifiée comme suit:

$$\lambda_s = M_d ((1 + X_f / (X_b - X_f)) C_p (T_v - T_f) + (X_f / (X_b - X_f)) C_p \text{ BPE} + M_d \lambda_v) \quad (13)$$

L'équation 13 est alors écrite en termes de rapport de débits du distillat et la vapeur surchauffée, ou le rapport de performance, PR Cela donne :

$$\text{PR} = \frac{M_d}{M_s} = \frac{\lambda_s}{\left(\lambda_v + C_p (T_v - T_f) \frac{X_b}{X_b - X_f} + \frac{X_f}{X_b - X_f} C_p \text{ BPE} \right)} \quad (14)$$

L'équation (14) est utilisée pour déterminer l'indice de performance du système en fonction de la température de l'alimentation et de la vapeur condensée, de la teneur en sel de l'alimentation et de la sortie de saumure, de l'élévation du point d'ébullition, de la chaleur latente de la vapeur surchauffée et de la vapeur condensée et de la capacité thermique (chaleur spécifique) de l'eau.

L'équation (6) peut être ajustée pour obtenir un débit d'eau de refroidissement spécifique. La dérivation de cette relation est expliquée comme suit :

$$M_{cw} C_p (T_f - T_{cw}) = M_d \lambda_d - M_f C_p (T_f - T_{cw}) \quad (15)$$

Le débit d'alimentation de l'eau de mer M_f est éliminé dans l'équation ci-dessus par l'utilisation de la relation donnée dans l'équation (4). On obtient ainsi :

$$M_{cw} C_p (T_f - T_{cw}) = M_d \lambda_d - M_d (X_b / (X_b - X_f)) C_p (T_f - T_{cw}) \quad (16)$$

En outre l'arrangement de l'équation (15) donne le débit spécifique de l'eau de refroidissement, qui est donnée par :

$$sM_{cw} = \frac{M_{cw}}{M_d} = \frac{\lambda_d - (X_b / (X_b - X_f)) C_p (T_f - T_{cw})}{C_p (T_f - T_{cw})} \quad (17)$$

III.3.2.3 Surface de transfert de chaleur de l'évaporateur et le condenseur :

Les dimensions de la surface de transfert de chaleur nécessaire dans l'évaporateur A_e sont obtenues à partir:

- La quantité de chaleur transférée Q_e .
- Le coefficient global de transfert thermique U_e .
- La différence entre la température de condensation de la vapeur, T_s et la température d'ébullition de l'eau de mer T_b .

Cette relation est donnée par :

$$A_e = Q_e / (U_e(T_s - T_b)) \quad (19)$$

En substituant la valeur de Q_e à partir de l'équation. 5 dans l'équation ci-dessus cela donne :

$$A_e = \frac{M_f C_p (T_b - T_f) + M_d \lambda_v}{U_e (T_s - T_b)} \quad (20)$$

Le débit d'eau de mer d'alimentation M_f est supprimé dans l'équation 20 à l'aide de l'équation 4. Ceci est lié à M_f , M_d et à la teneur en sel de l'alimentation et des déversements de saumure. Cela donne l'équation 20 :

$$A_e = \frac{M_d \left(\frac{x_b}{x_b - x_f} \right) C_p (T_b - T_f) + M_d \lambda_v}{U_e (T_s - T_b)} \quad (21)$$

L'équation 21 est configurée pour obtenir une zone de transfert de chaleur spécifique de l'évaporateur. Il est défini comme le rapport de la surface de transfert de chaleur au débit du produit de distillation. La formule résultante pour la surface spécifique de transfert de chaleur est donnée par :

$$\frac{A_e}{M_d} = \frac{\left(\frac{x_b}{x_b - x_f} \right) C_p (T_b - T_f) + \lambda_v}{U_e (T_s - T_b)} \quad (22)$$

L'équation (22) peut être écrite en terme de l'élévation de point d'ébullition (**BPE**) comme suit :

$$\frac{A_e}{M_d} = \frac{\left(\frac{X_b}{X_b - X_f}\right) C_p (T_b - T_f) + \lambda_v}{U_e (T_s - T_v - BPE)}$$

En analysant cette équation, on peut estimer que l'augmentation de (BPE) réduit la force motrice de la température et augmente ainsi la surface spécifique de transfert de chaleur. En d'autres termes, (BPE) fournit une résistance supplémentaire au transfert de chaleur.

La région de transfert de chaleur de l'évaporateur est généralement A_e . Le coefficient de transfert de chaleur global U_e lié à la surface extérieure est lié à la résistance thermique individuelle par l'équation suivante.

$$\frac{1}{U_e} = \frac{1}{h_i} \frac{r_o}{r_i} + R_{f_i} \frac{r_o}{r_i} + \frac{r_o \ln(r_o/r_i)}{K_w} + R_{f_o} + \frac{1}{h_o} \quad (23)$$

h est le coefficient de transfert de chaleur, R_f est la résistance à l'encrassement, K_w est la conductivité thermique du matériau et r est le rayon du tube. Les indices i et o indiquent respectivement la surface des tubes interne et externe.

Le transfert de chaleur entre la vapeur condensée et l'alimentation en eau dans le condenseur peut être décrit comme la charge du condenseur, le coefficient de transfert de chaleur total U_c , la zone de transfert de chaleur A_c du condenseur et la différence de température moyenne logarithmique $(LMTD)_c$, cependant:

$$A_c = \frac{Q_c}{U_c (LMTD)_c} = \frac{M_d \lambda_d}{U_c (LMTD)_c} \quad (24)$$

Le terme $(LMTD)_c$ est défini comme :

$$(LMTD)_c = \frac{(T_f - T_{cw})}{\ln \frac{(T_d - T_{cw})}{(T_d - T_f)}} \quad (25)$$

La surface spécifique de transfert de chaleur est donnée par :

$$\frac{A_c}{M_d} = \frac{\lambda_d}{U_c (LMTD)_d} \quad (26)$$

III.3.2.4 Paramètres de performance :

Les performances des systèmes mono actifs comprennent :

- La quantité d'eau douce produite par unité de masse de vapeur surchauffée, ou le rapport de puissance calorifique (PR) selon la formule. 14.
- Surface spécifique de transfert de chaleur (sA) donnée par les équations 22 et 27.
- Le débit d'eau de refroidissement spécifique donné par l'équation 17 (sM_{cw}).

Les rapports de performances thermiques et les débits de refroidissement spécifiques fournissent une mesure du coût d'exploitation du système. L'augmentation du rapport de performance thermique, implique la réduction de la consommation d'énergie, ce qui revient pour 3050% du coût du produit de l'unité. En d'autre part, la surface spécifique de transfert de chaleur est une mesure de la capitale du procédé.

Les paramètres du système ci-dessus sont définis par les relations suivantes:

$$PR = \frac{M_d}{M_s} = \frac{\lambda_s}{(\lambda_v + C_p(T_v - T_f) \frac{X_b}{X_b - X_f} + \frac{X_f}{X_b - X_f} C_p \text{ BPE})} \quad (27)$$

$$sA = \frac{A_e + A_c}{M_d} = \frac{\left(\frac{X_b}{X_b - X_f}\right) C_p (T_b - T_f) + \lambda_v}{U_e (T_s - T_b)} + \frac{\lambda_d}{U_c (\text{LMTD})_c} \quad (28)$$

et :

$$sM_{cw} = \frac{M_{cw}}{M_d} = \frac{\lambda_d - (X_b / (X_b - X_f)) C_p (T_f - T_{cw})}{C_p (T_f - T_{cw})} \quad (29)$$

L'équation 27 est une forme approximative de l'indice de performance, est obtenue en négligeant les effets secondaire de la chaleur, le deuxième et le troisième termes dans le dominateur. Le grandeur λ_v est supérieure à 2000 kJ / kg, tandis que l'ordre du seconde ou du troisième terme est de l'ordre de 50 kJ / kg. Ceci est obtenu par donner une valeur de C_p égale à 4 kJ / kg °C, $(T_v - T_f)$ égale à 5 °C, et $\left(\frac{X_b}{X_b - X_f}\right)$ égale à 2,5. Le résultat de cette analyse, montre que le rapport de performance pour une configuration à simple effet peut être rapproché par l'équation suivante :

$$PR = \lambda_s / \lambda_v \quad (30)$$

L'équation 30 est utile pour vérifier les résultats du modèle.

CHAPITRE IV
RESULTATS ET DISCUSSIONS

CHAPITRE IV

RESULTATS ET DISCUSSIONS

IV.1 Introduction :

Afin d'expliquer le déroulement de la fonction ou du processus d'un système, les chercheurs construisent un schéma de l'enchaînement des opérations de transformation à partir de diverses données et d'un certain nombre d'hypothèses : c'est un schéma d'un ensemble d'expressions mathématiques qui forment une maquette. Les équations liant les variables comportent des paramètres choisis le plus judicieusement possible. Sur la base de ces équations, divers paramètres de l'évaporateur à simple effet dans le processus de dessalement ont été calculés à l'aide d'un programme généré par Visual Basic.

En étudiant les données du processus de dessalement thermique de l'eau de mer et en analysant les résultats selon la conception d'un logiciel avancé qui a apporté une contribution significative au développement du dessalement de l'eau de mer.

IV.2 Microsoft Visual Basic :

Visual Basic est un outil développé par Microsoft pour développer facilement des applications qui s'exécutent sous Microsoft Windows®. Comme son nom l'indique, Visual Basic est un outil de visualisation qui crée une interface utilisateur graphique sans aucun concept de programmation en organisant des éléments graphiques à l'aide de la souris (boutons, images, champs de texte...).

L'avantage de ce langage est la possibilité d'associer des parties de code liées à des événements (clics de souris, appuis sur des touches, etc.) à des éléments d'interface. Pour cela, Visual Basic utilise un petit langage de programmation dérivé du BASIC (signifiant Beginner General Symbolic Instruction Code, ou Beginner's Multipurpose Symbolic Instruction Code). Le langage de script utilisé par Visual Basic est correctement nommé VB Script, il s'agit donc d'un sous-ensemble de Visual Basic.

La conception d'applications VB va un peu au-delà des cadres de programmation standard. En fait, les programmes traditionnels s'appuient sur le programme principal géré par la chaîne d'appel pour accomplir une tâche donnée. Une fois la tâche terminée, le programme s'arrête. Le point de départ d'une application VB est

généralement le système d'exploitation ou une fenêtre que l'utilisateur manipule à l'aide du clavier et de la souris. L'effort de programmation consiste alors à coder le processus qui s'exécute en réponse à chaque événement, s'arrêtant à la fermeture de la fenêtre principale de l'application. Ce mode de fonctionnement n'est pas propre à VB, on le retrouve également dans d'autres outils de développement d'applications graphiques.

IV.2.1 Choix du langage de programmation :

Un langage de programmation joue un rôle important dans l'interactivité d'un logiciel à travers les outils qu'il fournit au programmeur. La conception spéciale et conviviale du programme et l'affectation de contrôles Visual Basic aux sous-programmes en font le système de développement le plus innovant. Le système d'objets graphiques et de fenêtrage qu'il gère nous évite de manipuler des fichiers formatés (cas du Fortran) et nous offre la possibilité de créer un environnement de simulation facile à prendre en main doté d'une interface performante. Grâce à ce langage, développer des programmes performants et agréables en un temps record est devenu une réalité, grâce à ses outils de conception visuelle d'interfaces utilisateurs et de programmation événementielle, expliqués dans le fonctionnement de Visual Basic, c'est-à-dire sous Windows. Tous ces avantages nous ont amenés à choisir Visual Basic comme langage de programmation.

IV.2.2 Présentation du programme de calcul

Le programme de calcul de l'interface orientée objet générée par le langage Visual Basic 6.0, sa structure de base, en particulier le code exécutable, est très simple. Doté d'un environnement de développement interactif intégré, le logiciel est une application rapide avec une interface graphique liée aux fonctions de gestion fournies par l'application.

Le programme comprend d'autres options mineures, qui sont l'option de copier, coller et couper, deux boutons de commande "Calculer" pour lancer le programme et un bouton "Quitter" pour terminer le programme.

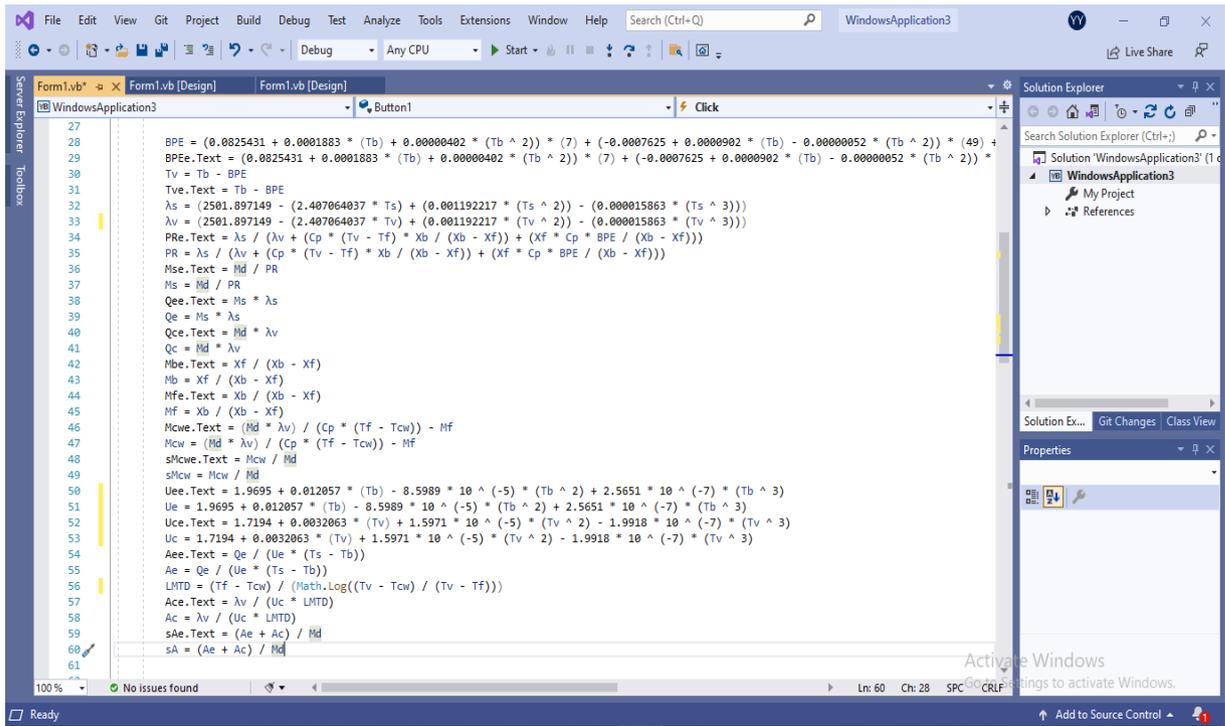


Figure IV 1 Feuille de programmation de programme

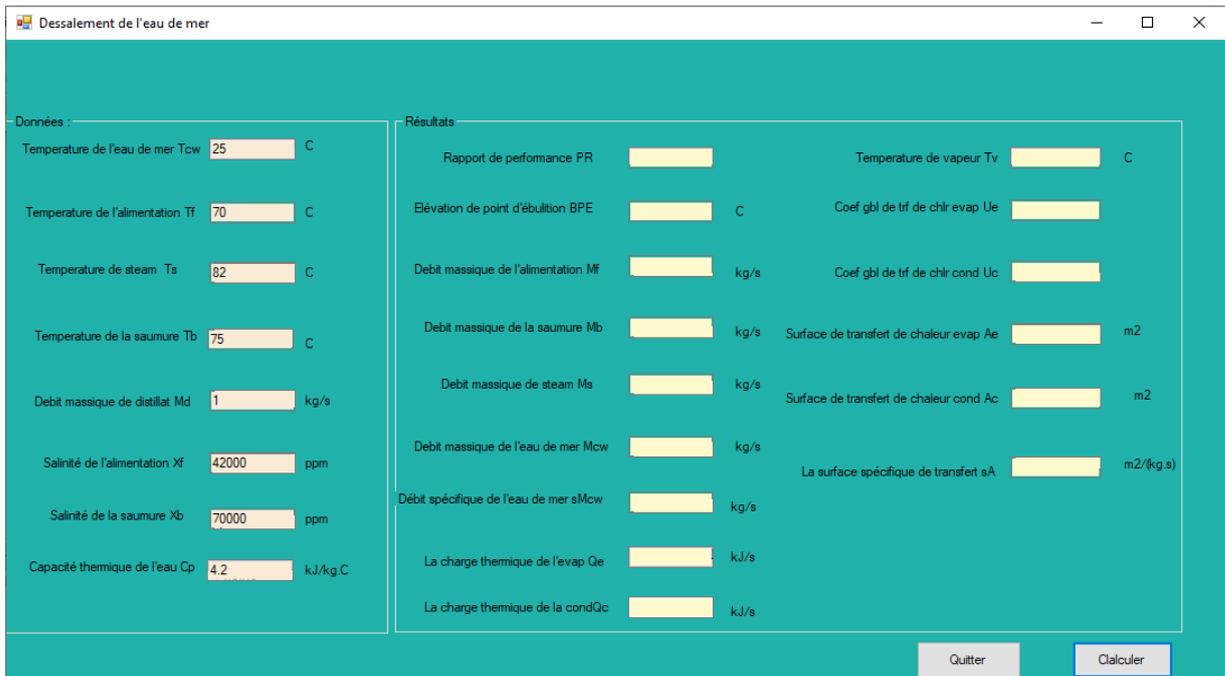


Figure IV 2 Feuille de calcul principale du programme

The screenshot shows a software window titled "Dessalement de l'eau de mer" with two main sections: "Données" (Inputs) and "Résultats" (Results).

Données	Résultats
Température de l'eau de mer T_{cw} : 25 °C	Rapport de performance PR: 0.9711032998
Température de l'alimentation T_f : 70 °C	Température de vapeur T_v : 74.09710745 °C
Température de steam T_s : 82 °C	Élévation de point d'ébullition BPE: 0.90289255 °C
Température de la saumure T_b : 75 °C	Coef gbl de trf de chir evap U_e : 2.3060578125
Débit massique de distillat M_d : 1 kg/s	Débit massique de l'alimentation M_f : 2.5 kg/s
Salinité de l'alimentation X_f : 42000 ppm	Coef gbl de trf de chir cond U_c : 1.96363375429
Salinité de la saumure X_b : 70000 ppm	Débit massique de la saumure M_b : 1.5 kg/s
Capacité thermique de l'eau C_p : 4.2 kJ/kg.C	Surface de transfert de chaleur evap A_e : 146.963285960 m ²
	Débit massique de steam M_s : 1.0297565666 kg/s
	Surface de transfert de chaleur cond A_c : 65.3073405916 m ²
	Débit massique de l'eau de mer M_{cw} : 9.7943544174 kg/s
	La surface spécifique de transfert sA : 212.270626552 m ² /(kg.s)
	Débit spécifique de l'eau de mer sM_{cw} : 9.7943544174 kg/s
	La charge thermique de l'evap Q_e : 2372.3408361 kJ/s
	La charge thermique de la cond Q_c : 2323.6329848 kJ/s

Buttons: Quitter, Calculer

Figure IV 3 Feuille de calcul et menue secondaire programme

IV.3 Calcul de l'évaporateur à simple effet :

Les propriétés d'un système à simple effet sont exprimées en fonction de la variation de la température d'ébullition (T_b). D'autres variables du système qui peuvent être incluses incluent la température et la salinité de l'eau de mer, qui sont affectées par l'emplacement de l'usine et les conditions climatiques. Les résultats sont présentés sous la forme d'une variation du rapport de performance (PR), de la surface de transfert de chaleur spécifique (sA) et du débit d'eau de refroidissement spécifique (sM_{cw}). Dans tous nos calculs, on suppose que la température de la vapeur de chauffage est supérieure de 7°C au point d'ébullition de la saumure, et que le point d'ébullition de la saumure est supérieur de 5°C à la température de l'eau de mer fournissant une valeur.

Les différences de rapport de performance de l'évaporateur à simple effet, de surface spécifique de transfert de chaleur et de débit d'eau de refroidissement spécifique en fonction de la température de l'eau de mer et de la température d'émission seront présentées dans les courbes calculées à l'aide du logiciel de calcul pour un évaporateur à simple effet individuel.

Le taux de transfert de chaleur dans l'évaporateur est généralement fonction de la différence de température. Il est souvent difficile de déterminer la température du liquide en tous points le long de la surface chauffée. La plupart des solutions aqueuses

ont une pression de vapeur inférieure à celle de l'eau à la même température. Ainsi, pour une pression donnée, le point d'ébullition de la solution est supérieur à celui de l'eau. Cette augmentation du point d'ébullition de l'eau s'appelle l'augmentation du point d'ébullition de la solution.

Les principales mesures de la performance de l'évaporateur sont la capacité et les cotes ou mesures économiques. La capacité est définie comme la quantité d'eau évaporée par heure. Une mesure d'économie est le rapport de la masse d'évaporation à la masse de transfert de chaleur du fluide utilisé (généralement de la vapeur). Lors de l'évaporation de l'eau par la vapeur, la mesure économique d'un évaporateur à effet unique est presque toujours inférieure à 1 ; mais dans les évaporateurs et les systèmes de compression de vapeur à effets multiples, elle est beaucoup plus grande.

Deux problèmes sont impliqués dans la conception des condenseurs de vapeur contenant des gaz non condensables :

- Influence des substances non condensables sur le taux de transfert de chaleur.
- Disposition physique des surfaces chauffantes pour permettre un passage correct de la vapeur à travers les surfaces chauffantes et les condensables.

L'effet des matériaux sans condensation sur les gaz sans condensation réduit les taux de transfert de chaleur de deux façons :

- Le coefficient de transfert de chaleur est réduit car la chaleur doit être transférée à travers le film de gaz.
- Si la concentration d'incondensables est importante, la différence de température disponible diminuera car la condensation n'est plus isotherme.

IV.3.1 Données du problème :

Les données suivantes sont utilisées dans le calcul de l'évaporateur à simple effet :
Paramètres physico-chimiques d'entrée dans l'évaporateur :

- La température de l'eau de mer, $T_{cw} = 5 - 30$ °C ;
- La température de l'eau d'alimentation, $T_f = 4 - 15$ °C.
- La température de la vapeur, $T_s = 4 - 15$ °C.
- La température d'ébullition, $T_b = 55 - 100$ °C.
- Le débit de distillat, $M_d = 1$ kg/s.
- La gamme de salinité de l'eau de mer, $X_f = 32\ 000 - 42\ 000$ ppm.

- La salinité de la saumure rejetée, $X_b = 70\ 000$ ppm.
- La capacité thermique de l'eau de mer, de distillat, et le rejet de la saumure sont supposés constante $C_p = 4,2$ kJ / kg °C.

IV.3.2 Effet de la température et la salinité de l'eau de mer et la température d'ébullition sur le rapport de performance :

L'effet de la température de l'eau de mer et du point d'ébullition sur le rapport de performance du processus de dessalement par évaporation à effet unique est illustré à la figure 4.1. Cependant, le rapport de performance en fonction de la température et de la salinité de l'eau de mer est illustré à la figure 4.2.

D'après la figure 4.1 on remarque que l'influence de la température d'ébullition (T_b) sur le rapport de performance dans l'intervalle d'étude ou de calcul est très faible, car on n'utilise que la variable T_b entre 55 et 100°C, $T_f = T_b - 5$, et $T_s = T_b + 7$. La variation du rapport entre la chaleur latente de la vapeur et la vapeur formée est quasi constante dans la plage de température d'ébullition utilisée dans les calculs. Si on ne travaille pas avec cette relation mais qu'on estime quand même que $T_{cw} < T_f < T_b < T_s$, on introduit T_f , T_b et T_s pour trouver d'autres résultats, par exemple si la température de vapeur de chauffage (T_s) ou la température d'ébullition (T_b) augmentent le rapport de performance diminue, par contre si la température d'alimentation diminue le rapport de performance diminue à nouveau. Les trois cas précédents réduisaient le rapport de performance, et cela était principalement dû à l'indépendance des trois températures avec le débit de distillat (M_d), le débit de vapeur de chauffage (M_s), la chaleur latente de la vapeur de chauffage (λ_s) et la vapeur d'eau (λ_v).

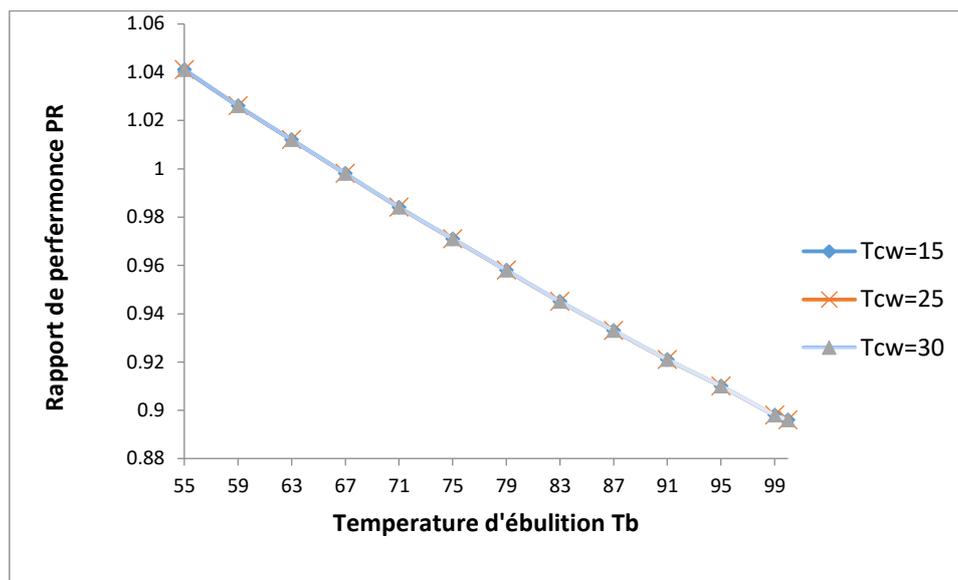


Figure IV 4 Effet de la température de l'eau de mer et d'ébullition sur le rapport de performance.

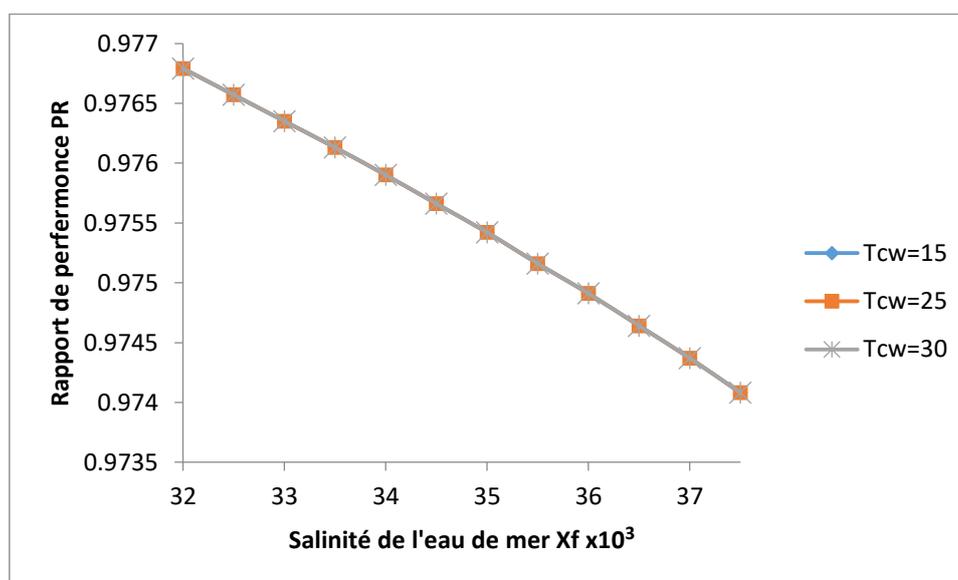


Figure IV 5 Variation de rapport de performance en fonction de la température et la salinité de l'eau de mer.

La figure IV 5 montre que la salinité provoque un changement infinitésimal sur le rapport de performance, et nous remarquons que la diminution de la salinité de l'eau de mer (X_f), augmente le rapport de performance (PR), et l'augmentation de la salinité de la saumure (X_b) augmente la performance (PR) car dans ces deux cas on utilise un débit de vapeur de chauffage largement faible.

IV.3.3 Effet de la température de l'eau de mer sur la surface spécifique de transfert thermique :

L'effet de la température de l'eau de mer sur la surface spécifique de transfert de chaleur dans un processus de dessalement par évaporation à effet unique est illustré dans la figure ci-dessous.

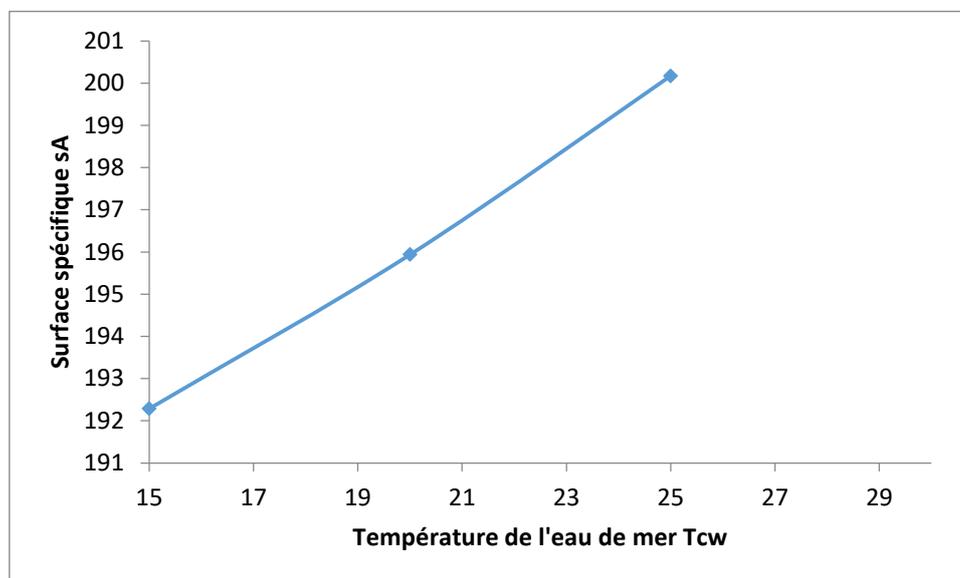


Figure IV 6 Effet de température d'eau de mer sur la surface spécifique de transfert de chaleur

La surface de transfert spécifique (SA) dépend de la température de l'eau de mer (M_{cw}) comme le montre la Fig. 4.3.

De cette figure, on peut voir que la température de l'eau de mer dépend de la surface de transport spécifique. En effet, l'étude de 4 cas de températures d'eau de mer différentes : 15, 20, 25, 30 °C, montre que la surface d'échange dans le condenseur dépend de la température de l'eau de mer (T_{cw}) car lorsque la température de l'eau de mer froide est plus faible (basse température) Nous aurons besoin d'une petite surface de contact et d'une petite surface d'échange pour condenser le distillat obtenu.

IV.3.4 Variation de la surface spécifique de transfert de chaleur en fonction de la température et la salinité de l'eau de mer:

La variation de la surface spécifique de transfert de chaleur en fonction de la température et la salinité de l'eau de mer, est illustrée dans la figure 4.4.

Cette figure décrit la dépendance entre la surface spécifique, la salinité de l'eau de mer et la température de l'eau de mer. Dans cette courbe, nous avons tracé trois états de température de l'eau de mer, c'est-à-dire d. 15, 20 et 25 °C, on voit donc qu'une

augmentation de la salinité de l'eau de mer favorise une augmentation de la surface de transport et inversement. De plus, une fois la salinité augmentée, cela nécessite une surface d'échange importante dans l'évaporateur pour demander l'évaporation de l'eau d'alimentation. De plus, à chaque fois que la température de l'eau de mer baisse et baisse, on n'aura besoin que d'une petite surface d'échange pour le condenseur.

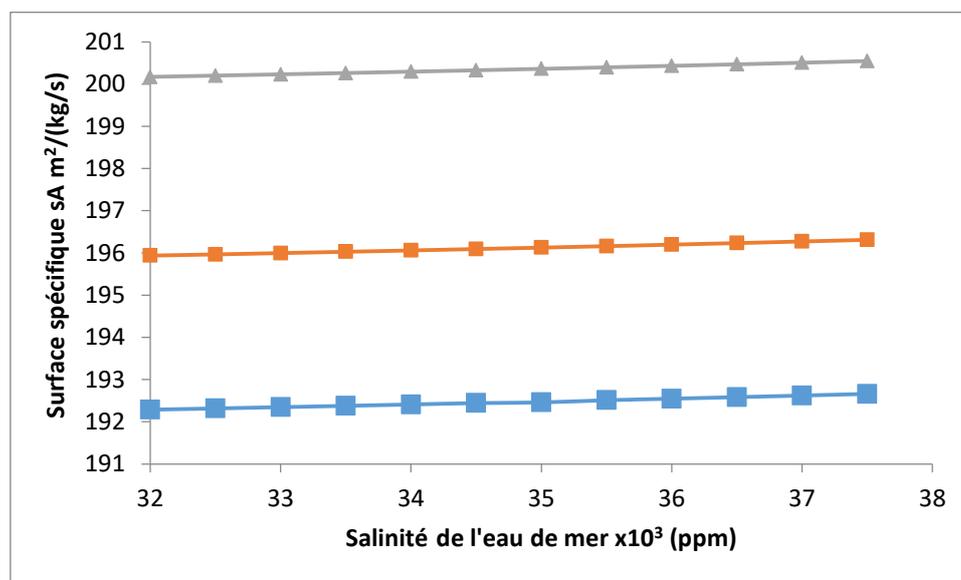


Figure IV 7 Variation de rapport de performance en fonction de la température et la salinité de l'eau de mer.

IV.3.5 Variation du débit spécifique de l'eau de mer en fonction de la température d'ébullition :

Les variations du débit spécifique de l'eau de refroidissement en fonction de la température d'ébullition et de la température d'eau de mer de prise sont montrées dans la figure 4.5.

L'effet de l'eau de mer et de la température d'ébullition sur le débit spécifique d'eau de refroidissement dans le procédé de dessalement par évaporation à effet simple est illustré dans la courbe ci-dessous.

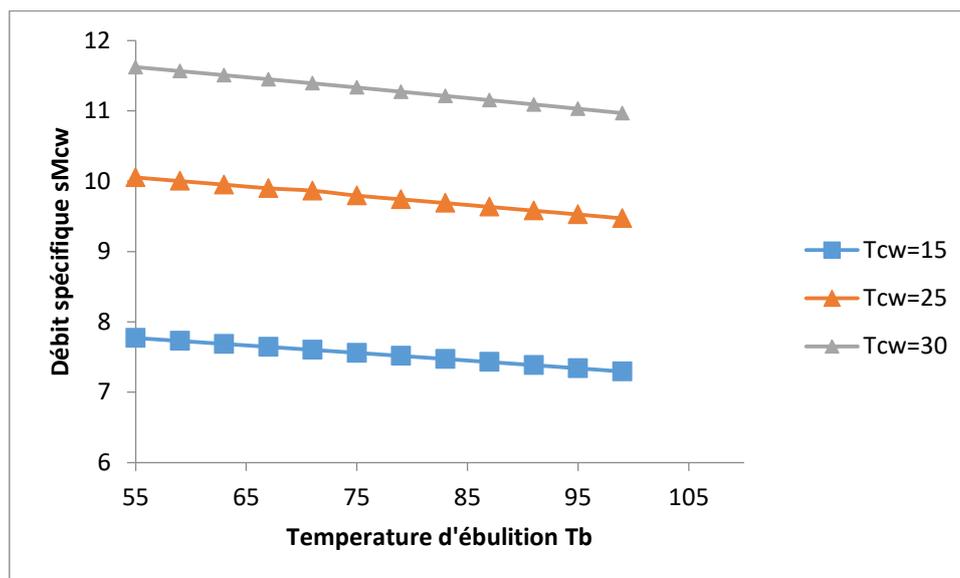


Figure IV 8 Effet de la température d'ébullition et celle de l'eau de mer sur le débit spécifique de l'eau de refroidissement.

Le débit d'eau de refroidissement spécifique dépend de la température d'ébullition, comme le montre la figure IV 8. A noter cependant que plus la température d'ébullition (T_b) augmente, plus le débit spécifique d'eau de refroidissement (sM_{cw}) diminue, et cela est principalement dû à la dépendance de la chaleur latente (λ_v) dans l'évaporateur qui est en principe liée à la température d'ébullition (T_b) selon la corrélation en annexe.

L'augmentation de la température d'ébullition diminue la chaleur latente de vaporisation (λ_v), qui diminue également le débit d'eau de mer de refroidissement, diminue automatiquement le débit de mer spécifique de l'eau de refroidissement (sM_{cw}), car la dépression de chaleur latente (λ_v) est équivalente à la dépression thermique échangée avec le terrain extérieur, il faut donc un petit débit d'eau de mer de refroidissement pour absorber cette quantité de chaleur.

Aux températures d'ébullition élevées, la quantité de chaleur absorbée par unité de masse d'eau de mer d'alimentation (M_f) augmente en raison de l'augmentation de la température de l'eau de mer d'alimentation (T_f). Cela diminue la chaleur démesurée qui doit être évacuée par l'eau de mer de refroidissement. De plus, la charge du condenseur est plus faible en raison de la dépression de la chaleur latente de la vapeur à haute température.

IV.3.6 Variation du débit spécifique d'eau de mer de refroidissement en fonction de la salinité de l'eau de mer:

La variation du débit spécifique d'eau de mer de refroidissement en fonction de la salinité de l'eau de mer est présentée dans la courbe de la figure ci-dessous. La figure 4.6 montre bien que le débit spécifique de l'eau de mer de refroidissement (sM_{cw}) est indépendant de la salinité de la saumure (X_b). Dans le cas de l'augmentation et de la diminution de la salinité, le débit spécifique reste constant. Mais par contre, d'après la figure 4.5 et la figure 4.6, le débit de l'eau de mer de refroidissement dépend de sa température (T_{cw}), parce que la diminution de la température de l'eau de mer (T_{cw}) favorise la diminution du débit spécifique de l'eau de mer (sM_{cw}), et vice versa.

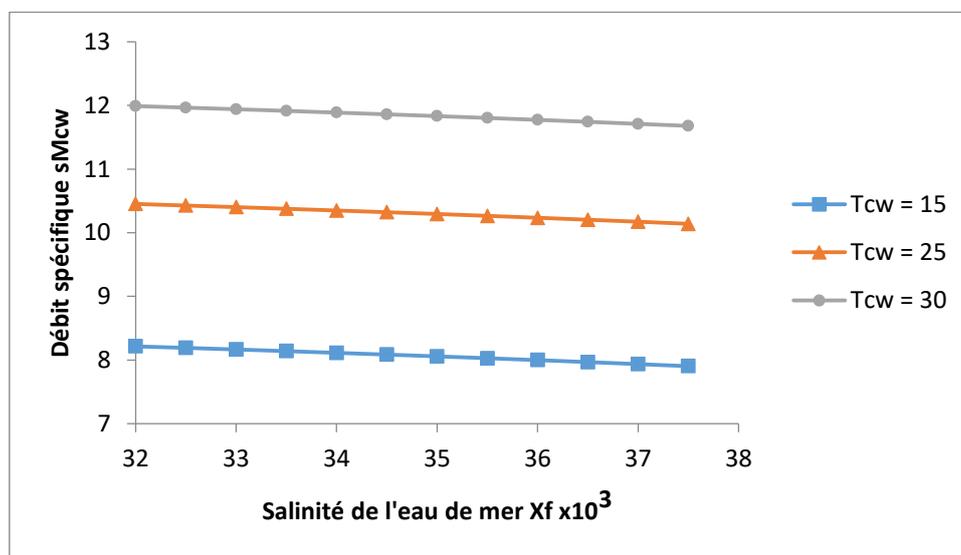


Figure IV 9 Effet de la salinité et la température d'eau de mer sur le débit spécifique d'eau de mer.

Dans la littérature, l'analyse du système de dessalement d'évaporation à simple-effet montre le besoin de gestion plus efficace de l'énergie de système. En outre, l'exploitation du système est recommandée à températures élevées d'ébullition. La gestion appropriée d'énergie air comme conséquence des rapports de performance plus élevés de système. Ceci sera trouvé dans d'autres systèmes à simple-effet, qui utilisent la contraction de vapeur, ou dans les configurations à effets multiples. Les systèmes opérants à des températures d'ébullition plus élevés résultent à la face spécifique de transfert thermique et le débit spécifique de l'eau de

refroidissement. Cette réduction abaisse le premier coût, c.-à-d., coût de construction de l'évaporateur, du condenseur, et la pompe de l'eau de mer. En outre, les frais de fonctionnement sont inférieurs en raison de la réduction de l'énergie exigée pour fonctionner l'unité de pompage de l'eau de mer.

CONCLUSION GÉNÉRALE

CONCLUSION GÉNÉRALE

Dans ce mémoire, on a étudié, calculer et discuter la performance de fonctionnement d'un évaporateur à simple effet. Pour une meilleur évaluation, il s'est avéré préférable d'avoir recours à un modèle mathématique, et faire le bon choix de la méthode de résolution et l'élaboration de l'algorithme de calcul, pour traduire numériquement les équations du modèle choisi, en utilisant ainsi un environnement de simulation de Visual Basic offrant le confort et la facilité d'utilisation grâce à son outil de conception visuelle de l'interface utilisateur et de programmation événementielle.

Le système de dessalement d'évaporation à simple effet à des applications industrielles très limitées. C'est parce que le système a un rapport thermique inférieur à 1; la quantité de l'eau produite est inférieur à la quantité de vapeur de chauffage employée pour fonctionner le système. Cependant, la compréhension de ce processus est essentielle puisqu'elle constitue plusieurs éléments formant d'autres systèmes de compression de vapeur à simple effet aussi bien que les processus d'évaporation à multiples d'effet. Ceci faciliterait la compréhension de ces systèmes, qui sont plus complexes.

Les résultats trouvés peuvent être résumé comme suit :

- Les paramètres de performance d'un évaporateur sont le PR, s_A et s_{Mcw} et il dépend généralement de la température de l'eau de mer T_{cw} , la température d'ébullition T_b et la salinité X ;

- Les résultats optimales sont pour un rapport de performance (PR) élevée, s_A et s_{Mcw} inférieurs.

- Le rapport de performance dans le dessalement par évaporation à simple effet est toujours inférieur à 1.

- Le rapport de performance est indépendant de la température de l'eau de mer T_{cw} , mais par contre la variation de la température d'ébullition, T_b et la salinité, X_i produit un changement infinitésimal c-à-d (<0.002) .
- La diminution de la surface d'échange s_A dépend de la diminution de la température ou la salinité de l'eau de mer, ou l'augmentation de la température d'ébullition T_b .
- La diminution du débit spécifique de l'eau de mer s_{Mcw} dépend de la diminution de la température de l'eau de mer T_{cw} , ou l'augmentation de la température d'ébullition T_b .
- Les bon résultats trouver sont à T_b élevée, T_{cw} et X inférieurs .
- pour un bon rendement nous préférons d'ajouter un compresseur , et d'augmenter le nombre d'effet .

REFERENCES
BIBLIOGRAPHIE

REFERENCES BIBLIOGRAPHIE

- [1] B. FATHALLI . Influence des paramètres opératoires sur les performances d'un système de dessalement par osmose inverse - juillet 2011-Université de Tunis El Manar, Ecole Nationale des Ingénieurs de Tunis .
- [2] P. Danis. Dessalement de l'eau de mer- Techniques de l'Ingénieur, Juin 2003- J 2700.
- [3] COSTON (H.M.) et LINDSEY (E.E.). – Selection and application of evaporator equipment (Choix et application de l'équipement d'évaporation). fév.1956- Chem. Eng. Progress, 52, no 2.
- [4] World Health Organisation. Progress on sanitation and drinking water, 2015 update and MDG assessment.
- [5] Nations-Unies L'eau, une responsabilité partagée [2ème Rapport mondial des Nations Unies sur la mise en valeur des ressources en eau UN-WATER/WWAP/2006/3]
- [6] S. Sethi, et G. Wetterau. Desalination of Seawater MANUAL OF WATER SUPPLY PRACTICES M61, 2011- First Edition. 6666 West Quincy Ave.: American Water Works Association,.
- [7] A. Maurel, Dessalement de l'eau de mer et des eaux saumâtres et d'autres procédés non conventionnels d'approvisionnement en eau douce. Technique et Documentation, 2ème édition (2006) : 286p.
- [8] Hisham T. El-Dessouky, Hisham M. Ettouney, Fundamentals of Salt Water Desalination. Amsterdam, The Netherlands : Elsevier Science B.V., 2002.
- [9] Danis P. Dessalement de l'eau de mer, Techniques de l'ingénieur – J2700 [Livre]. Juin 2003).
- [10] Alain Maurel, Dessalement de l'eau de mer et des eaux saumâtres et autres procédés non conventionnelles d'approvisionnement en eau douce, Edition : Technique et Documentation, Paris (2001).
- [11] AMMOUR F., KETTAB A. et OUSSEDIK S, Le dessalement des eaux de mer en Algérie : Expérience et perspectives. Hydrotop ,1-8. (2001).
- [12] AMMOUR F., KETTAB A. et OUSSEDIK S, Le dessalement des eaux de mer en Algérie : Expérience et perspectives. Hydrotop ,1-8. (2001).
- [13] Akili D. Khawaji, Ibrahim K. Kutubkhanah, Jong-Mihn Wie, Advances in seawater desalination technologies, Elsevier B.V.2008
- [14] IDA Desalting Inventory 2004: Desalination Business Stabilized on a High Level, Int. Desal. Water Reuse, 14 (2) (2004) 14–17.

- [15] J. D. Birkett, The History of Desalination Before Large-Scale Use, in Desalination and Water Resources - History, Development and Management of Water Resources, Vol.I. (2012) Paris: Unesco. pp.381-434 I (Encyclopedia of life support systems)
- [16] S. Loeb (1981), The Loeb-Sourirajan Membrane: How It Came About, in Turbak A.F. Synthetic membranes. Washington, DC: American Chemical Society. 9p. (ACS Symposium Series). doi: 10.1021/bk-1981-0153.ch001.
- [17] P. Jean, Pauli Anne-Marie (1995). Dialyse. Chromatographie et techniques séparatives. Paris : Techniques de l'Ingénieur - p 1525.
- [18] R. Michel. Membranes, transferts. Encyclopædia Universalis. Disponible sur : <http://www.universalis.fr/encyclopedie/membranes-transferts/> [Consulté le 23/01/2018] .
- [19] H. J. Krishna. Introduction to Desalination Technologies.
- [20] B. Mohamed. Dessalement d'Eau de Mer : Etude de Trois Stations du Littoral Algérois ; Université SAAD Dahleb (Blida), B.P 26 D Hadjout – W.Tipaza – 42200 – Algérie .
- [21] <https://www.encyclopedie-energie.org/le-dessalement-deau-de-mer-et-des-eaux-saumatres/>
- [22] DUNGLAS J. Le dessalement de l'eau de mer, une nouvelle méthode pour accroître la ressource en eau. Groupe eau. Académie d'agriculture de France. (2014).
- [23] Hisham T. El-Dessouky et Hisham M. Ettouney - Fundamentals of Salt Water Desalination (Fondamentaux de Dessalement de l'eau salée), Department of Chemical Engineering College of Engineering and Petroleum Kuwait University, (2002)
- [24] A flow diagram for a Single Effect Evaporation (SEE) system. | Download Scientific Diagram (researchgate.net)
- [25] Accueil BEI ERE (enseiht.fr)
- [26] Le dessalement de l'eau de mer et des eaux saumâtres | CultureSciences-Chimie (ens.fr)
- [27] Ghobeity. A.and Mitsos. A, Optimal time-dependent operation of seawater reverse osmosis, 2010. Desalination, Vol 263. pages76–88..
- [28] Nikolay Voutchkov, PE, BCEE Desalination Engineering Planning and Design The McGraw-Hill Companies, page 8-11 2013.
- [29] Mohsen, M.S. and Al-Jayyousi, O.R, Brackish water desalination: an alternative for water supply enhancement in Jordan, Desalination, 124, 163-174., (1999).
- [30] O.K. Buros, The U.S.A.I.D. Desalination Manual, International Desalination and Environmental Association, 1980.

- [31] W.E. Johnson, The story of freeze desalting, *Desal. Water Reuse*, 3 (4) (1993) 20–27.
- [32] King Abdulaziz City for Science and Technology, Solar Energy Water Desalination Engineering Test Facility, Riyadh, Saudi Arabia, 1986.
- [33] A.Y. Maalej, Solar Still Performance, in: *Proceedings of the 12th International Symposium on Desalination & Water Re-Use*, Malta, April 15–18, 1991.
- [34] A.M. El-Nashar, An optimal design of a solar desalination plant, *Desalination*, 93 (1993) 597–614.
- [35] O.K. Buros, *The Desalting ABC*, International Desalination Association, Topsfield, MA, USA, 1990
- [36] A.D. Khawaji and J.M. Wie, Potabilization of desalinated water at Madinat Yanbu Al-Sinaiyah, *Desalination*, 98 (1994) 135–146.
- [37] P.C.M. Kutty, A.A. Nomani and T.S. Thankachan, Evaluation of Water Quality Parameters in Drinking Water from SWCC MSF Plants, in: *Proceedings of the IDA World Conference on Desalination and Water Reuse*, Washington, DC, August 25–29, 1991.
- [38] A. Withers, Options for recarbonation and remineralisation and disinfection for desalination plants, *Desalination*, 179 (1–3) (2005) 11–24.
- [39] N.A. Nada, A. Zahrani and B. Ericsson, Experience on pre- and post-treatment from sea water desalination plants in Saudi Arabia, *Desalination*, 66 (1987) 365–383.
- [40] H. Al-Rqobal and A. Al-Munayyis, A recarbonation process for treatment of distilled water by MSF plants in Kuwait, *Desalination*, 73 (1989) 295–312.
- [41] G. Migliorini and R. Meinardi, 40 MIGD potabilization plant at ras laffan: design and operating experience, *Desalination*, 182 (1–3) (2005) 275–282.
- [42] Y. Ayyash, H. Imai, T. Yamada, T. Fukuda and T. Taniyama, Performance of reverse osmosis membrane in Jeddah Phase I Plant, *Desalination*, 98 (1994) 215–224.
- [43] A.D. Khawaji, J.M. Wie and A.A. Al-Mutairi, Technical and Economic Evaluation of Seawater MSF and RO Desalination Processes for Madinat Yanbu Al-Sinaiyah, in: *Proceedings of the IDA World Congress on Desalination and Water Reuse*, Manama, Bahrain, March 8–13, 2002.
- [44] M.A. Darwish, M.A. Jawad and G.S. Aly, Technical and economic comparison between large capacity MSF and RO desalting plants, *Desalination*, 76 (1989) 281–304.
- [45] N. Wade, Technical and Economic Evaluation of Distillation and Reverse Osmosis Desalination Processes, *Desalination*, 93 (1993) 343–363.
- [46] S. Ebrahim and M. Abdel-Jawad, Economics of seawater desalination by reverse

osmosis, *Desalination*, 99 (1994) 39–55.

[47] L.A. Awerbuch, Vision for Desalination—Challenges and Opportunities, in: *Proceedings of the IDA World Congress and Water Reuse*, Manama, Bahrain, March 8–13, 2002.

[48] A. Al-Azzazz and M.A.K. Al-Sofi, Future Trends in Desalination through Research and Development (R&D), *Proceedings of the IDA World Congress on Desalination and Water Reuse*, Manama, Bahrain, March 8–13, 2002.

[49] Middle East Desalination Research Center, *R&D Programs and Annual Report*, 2001.

[50] J.W.P. O’Meara, The OSW-20 years later, *Desal. Water Reuse*, 2 (2) (1992) 31–38.

[51] J.W.P. O’Meara, The OSW-20 years later, Part III, *Desal. Water Reuse*, 2 (4) (1992) 31–36.

[52] G.F. Leitner, Desalination R&D in Saudi Arabia, *Desal. Water Reuse*, 8 (4) (1999) 50–59.

[53] B.M. Misra, R&D on Desalination and Membrane Technology at Bhabha Atomic Research Center, *Desal. Water Reuse*, 6 (4) (1997) 35–39.

[54] NPTEL – Chemical Engineering – Chemical Engineering Design – II
Module #3 DESIGN OF EVAPORATOR

[55] Some Practical Aspects Of Desalination Processes

Asghar Husain, Adil Al Radif, Ali El Nashar, Roberto Borsani and Bushara M
International Center for Water and Energy Systems, Abu Dhabi, UAE

[56] <https://condorchem.com/fr/evaporateurs-sous-vide-circulation-force/>

[57] <https://www.sms-vt.com/fr/les-technologies/technologieevaporation/evaporateurs-tubulaires/>

[58] M. Suraira - Method of Feeding: Multiple Effect Evaporators (Mode d'alimentation : évaporateurs à effets multiples) .

[59] I. Rafik - Étude et simulation d'un évaporateur à simple effet avec compression thermique pour le dessalement de l'eau de mer

ANNEXES

1. BPE (Boiling Point Elevation) :

La corrélation de l'augmentation de la température d'ébullition est donnée comme suit :

$$\text{BPE} = A X + B X^2 + C X^3 .$$

avec :

$$A = 8.325 \times 10^{-2} + 1.883 \times 10^{-4} T + 4.02 \times 10^{-6} T^2 .$$

$$B = -7.625 \times 10^{-4} + 9.02 \times 10^{-5} T - 5.2 \times 10^{-7} T^2 .$$

$$C = 1.522 \times 10^{-4} - 3 \times 10^{-6} T - 3 \times 10^{-8} T^2 .$$

ou T c'est la température en (°C) et X le pourcentage de salinité , cette équation il est valable pour : $1 \leq X \leq 16\%$ et $10 \leq T \leq 180^\circ\text{C}$.

2. Le coefficient global de transfert de chaleur U_c et U_e :

il y'a plusieurs corrélation pour calculer le coefficient global de transfert de chaleur ; on utilise la corrélation suivante:

$$U_c = 1.7194 + 3.2063 \times 10^{-3} T_v + 1.5971 \times 10^{-5} T_v^2 + 2.9918 \times 10^{-7} T_v^3 .$$

$$U_e = 1.9695 + 1.2057 \times 10^{-2} T_b + 8.5989 \times 10^{-5} T_b^2 + 2.5651 \times 10^{-7} T_b^3 .$$

ou T est la température en °C , et U le coefficient global en $\text{KJ/s m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$.

3. La chaleur latente de l'eau λ :

la chaleur latente de l'eau est donnée par la corrélation suivante :

$$\lambda = 2501.897149 - 2.407064037 T + 1.192217 \times 10^{-3} T^2 - 1.5863 \times 10^{-5} T^3 .$$

dans l'équation précédente , T est la température chaud en °C , et λ est la chaleur latente en KJ/Kg . [29]

4. La méthode de calcule :

Dans cette exemple on utilise les donnée suivante :

- La température de l'eau de mer, $T_{cw} = 25^\circ\text{C}$.
- la température d'ébullition $T_b = 75^\circ\text{C}$.
- La température de l'eau d'alimentation, $T_f = 82^\circ\text{C}$.
- La température de la vapeur, $T_s = 82^\circ\text{C}$.
- Le débit de distillat, $M_d = 1 \text{ kg/s}$ (maintenu constant).
- La salinité de l'eau de mer = 42 000 ppm .
- La salinité de la saumure rejetée, $X_b = 70 \text{ 000 ppm}$.
- La température d'ébullition, $T_b = 75^\circ\text{C}$.
- La capacité thermique de l'eau de mer, de distillat, et le rejet de la saumure sont supposés constante $c_p = 4,2 \text{ kJ / kg }^\circ\text{C}$.

Le but de cette exemple est de présenter la méthode de calcule de surfaces d'échange , le rapport de rendement RP , et les débits de la saumure , de l'eau de mer ,de vapeur de chauffage et de l'alimentation .

- Calcul de l'élévation du point d'ébullition BPE (on utilise la corrélation dans l'annexe)

$$\begin{aligned} \text{BPE} &= (8.325 \times 10^{-2} + 1.883 \times 10^{-4} (75) + 4.02 \times 10^{-6} (75)^2) (7) \\ &\quad + (-7.625 \times 10^{-4} + 9.02 \times 10^{-5} (75) - 5.2 \times 10^{-7} (75)^2) (7)^2 \\ &\quad + (1.522 \times 10^{-4} - 3 \times 10^{-6} (75) - 3 \times 10^{-8} (75)^2) (7)^3 \\ &= 0.903 \text{ } ^\circ\text{C} . \end{aligned}$$

- La température résultant de la vapeur formée dans l'évaporateur (T_v) est calculée à partir de l'équation. 9 CHAPITRE III :

$$T_v = T_b - \text{BPE} = 75 - 0.903 = 74.097 \text{ } ^\circ\text{C} .$$

- Les températures de la vapeur de chauffage et de vapeur formée sont utilisés pour calculer la chaleur latente de la vapeur d'eau et de distillat, λ_s et λ_v , on utilise les corrélations dans l'annexe.

Les valeurs obtenues sont les suivantes :

$$\begin{aligned} \lambda_s &= 2501.897149 - 2.407064037 (82) + 1.192217 \times 10^{-3} (82)^2 - 1.5863 \times 10^{-5} (82)^3 \\ &= 2303.788 \text{ KJ/Kg} . \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \lambda_v &= 2501.897149 - 2.407064037 (74.097) + 1.192217 \times 10^{-3} (74.097)^2 - 1.5863 \times 10^{-5} \\ &\quad (74.097)^3 = 2323.6 \text{ KJ/Kg} . \end{aligned}$$

- Les coefficients globaux de transfert de chaleur dans l'évaporateur et le condenseur sont calculées en utilisant les corrélations données dans l'Annexe. Les valeurs obtenues pour les deux coefficients sont:

$$\begin{aligned} U_c &= 1.7194 + 3.2063 \times 10^{-3} (74.097) + 1.5971 \times 10^{-5} (74.097)^2 + 2.9918 \times 10^{-7} \\ &\quad (74.097)^3 . \\ &= 1.961 \text{ KJ/s m}^2 \text{ } ^\circ\text{C} . \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} U_e &= 1.9695 + 1.2057 \times 10^{-2} (75) + 8.5989 \times 10^{-5} (75)^2 + 2.5651 \times 10^{-7} (75)^3 . \\ &= 2.4983 \text{ KJ/s m}^2 \text{ } ^\circ\text{C} . \end{aligned}$$

- Les paramètres de performance du système sont calculées à partir des équations. 27,28,29 CHAPITRE III .

- Le rapport de performance thermique est donnée par :

$$\begin{aligned} PR &= \frac{M_d}{M_s} = \frac{\lambda_s}{(\lambda_v + C_p(T_v - T_f) \frac{X_b}{X_b - X_f} + \frac{X_f}{X_b - X_f} C_p BPE)} \\ &= 2303.788 / (2323.6 + 4.2(74.097 - 70) \frac{70000}{70000 - 42000}) \\ &= 0.97 . \end{aligned}$$

- la surface spécifique de transfert de chaleur est donnée par :

$$\begin{aligned} sA &= \frac{A_e + A_c}{M_d} = \frac{\left(\frac{X_b}{X_b - X_f}\right) C_p (T_b - T_f) + \lambda_v}{U_e (T_s - T_b)} + \frac{\lambda_v}{U_c (LMTD)_c} \\ &= \frac{\left(\frac{70000}{70000 - 42000}\right) 4.2(75 - 70) + 2323.6}{2.4983(82 - 75)} + \frac{2323.6}{(1.961)(18.12)} \\ &= 135.9 + 65.4 = 201.3 \text{ m}^2 / (\text{kg/s}) . \end{aligned}$$

- le débit spécifique de l'eau de mer est donnée par :

$$\begin{aligned} sM_{cw} &= \frac{M_{cw}}{M_d} = \frac{\lambda_v - (X_b / (X_b - X_f)) C_p (T_f - T_{cw})}{C_p (T_f - T_{cw})} \\ &= \frac{2323.6 - (70000 / (70000 - 42000)) 4.2(70 - 25)}{4.2(70 - 25)} \\ &= 9.8 . \end{aligned}$$

- d'après les équation 3 et 4 de CHAPITRE III :

$$M_b = X_f / (X_b - X_f) = 42000 / (70000 - 42000) = 1.5 \text{ Kg/s} .$$

$$M_f = X_b / (X_b - X_f) = 70000 / (70000 - 42000) = 2.5 \text{ Kg/s} .$$

Le débit de vapeur est obtenue à partir du résultat de rapport de performance, où :

$$M_s = M_d / PR = 1 / 0.97 = 1.03 \text{ Kg/s} .$$

- à partir les équations. 5 et 6, respectivement on calcule les charge de l'évaporateur et de condenseur comme suit:

$$Q_e = M_s \lambda_s = (1.03) (2303.788) = 2372.9 \text{ KJ/s} .$$

$$Q_c = M_d \lambda_v = (1) (2323.6) = 2323.6 \text{ KJ/s} .$$

- La charge du condensateur calculé , est utilisé pour obtenir le débit de l'eau de mer de refroidissement, M_{cw} :

$$M_{cw} = M_d \lambda_v / (C_p(T_f - T_{cw})) - M_f$$

$$= (1) (2326.34)/(4.2 (70 - 25)) - 2.5 = 9.8 \text{ Kg/s} .$$

- La surface de transfert de chaleur dans l'évaporateur A_e est obtenus à partir de l'équation.16 CHAPITRE III :

$$A_e = Q_e / (U_e (T_s - T_b)) = 2372.9/(2.4983(82-75)) = 135.686 \text{ m}^2 .$$

pour la surface de transfert de chaleur dans le condenseur A_c , on utilise l'équation.28 CHAPITRE III :

$$A_c = (sA \times M_d) - A_e = (201.3 \times 1) - 135.686 = 65.614 \text{ m}^2 .$$

ETUDE DE LA PERFORMANCE D'UN EVAPORATEUR A SIMPLE EFFETE POUR LE DESSALEMENT D'EAU De MER

BEKKAYE Yacine, AMER Ilyes and LALMI Djemoui,

¹**Laboratory of Materials, Energy Systems Technology and Environment**, Faculté des
Science et Technologie, Département d'automatique et électromécanique Université de
Ghardaia, Algeria
Emails: eldjemoui@gmail.com,

La vie sur Terre est basée sur un élément clé, et c'est l'eau. Les premières civilisations humaines étaient basées sur l'eau et son utilisation. Le développement démographique, l'augmentation des frais de subsistance, le développement industriel et agricole conduisent à la pollution de l'eau. Les problèmes liés à l'eau sont devenus plus importants compte tenu de la raréfaction des sources d'eau potable sur la planète, incitant les chercheurs à enquêter sur l'avenir de ce liquide, précieux pour la vie, et à travailler pour trouver de nouvelles sources d'eau. Prenez l'ancien que nous avons cité : le dessalement.

En Algérie, la seule source d'eau potable est la nappe phréatique qui est petite et limitée, il faut donc s'efforcer d'utiliser les eaux de la mer Méditerranée, nos travaux ont été menés sur différentes techniques de dessalement et les techniques d'évaporation à simple effet sont utilisées selon VISUAL BASIC (VB 6.0) Programme de calcul écrit, qui calcule les paramètres de performance tels que l'efficacité, la surface d'échange de chaleur et le débit spécifique d'eau de mer de refroidissement, et comprend les valeurs optimales pour le réglage des systèmes d'évaporation à simple effet et l'eau potable optimale pour économiser de l'énergie, haute rapport performance et efficacité parfaite. Quelle est la meilleure technologie.

KEYWORDS: *Eau, évaporateur, performance, dessalement et efficacité*



People's Democratic Republic of Algeria
Ministry of Higher Education and Scientific Research

University of Ghardaia

Faculty of science and technology



*Laboratory of Materials, Energy Systems Technology and
Environment, (MESTEL)*

CERTIFICATE OF PARTICIPATION

This is to certify that

Mr BEKKAYE Yacine (University of Ghardaia)

For his participation to study day "Environment and water treatment" Held at 11 Mai 2022, at University of Ghardaia
Presenting a poster entitled: « Etude De La Performance D'un Evaporateur A Simple Effet Pour Le Dessalement D'eau De Mer »

Co-authors : AMER Ilyes and LALMI Djemoui

President of the scientific day

رئيسة فرقة البحث
تتميم العواردة الطاهية والتجاليين
المبرياتية والتجاليين
زهرة بابا عيسى



بلعور عبد الرحمان



Etude de la performance d'un évaporateur à simple effet pour le dessalement de l'eau de mer



BEKKAYE Yacine , AMER ILYes et LALMI Djemoui

Laboratory of Materials, Energy Systems Technology and Environment, Faculté des Science et Technologie, Département génie des procédés ,Université de Ghardaïa, Alegria
Emails: eldjemoui@gmail.com,

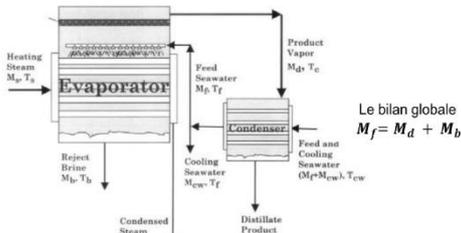
Résumé

La vie sur terre se base sur un élément clé est important lequel est l'eau. Les premières civilisations humaines se basaient sur l'eau et son utilisation. Le développement démographique, l'augmentation des dépenses de vie, le développement industriel et agricole amènent à la pollution de l'eau. Les problèmes en rapport avec l'eau s'accroissent vu la diminution des sources d'eau potable sur terre ce qui pousse les chercheurs à faire des études sur l'avenir de ce liquide, précieux pour la vie, et travailler aussi afin de trouver des nouvelles sources d'eau par rapport aux anciennes qu'on cite par exemple : le dessalement des eaux. En Algérie, la seule source de l'eau potable c'est bien celle souterraine qui est d'une quantité petite et limitée, de ce fait nous devons faire des efforts pour pouvoir profiter des eaux de la méditerranée, notre travail s'est fait sur les différentes techniques de dessalement des eaux et l'étude de la technique de l'évaporation à simple effet à l'aide d'un programme de calcul qu'on programmé selon VISUEL BASIC (VB 6.0), ce programme calcule les paramètres de performance comme l'efficacité, la surface d'échange thermique et le débit spécifique de l'eau de mer de refroidissement et la connaissance des meilleures valeurs sur laquelle on peut régler le système de l'évaporation à simple effet et quelle est la meilleur techniques pour avoir l'eau potable avec l'économie d'énergie et un rapport de performance élevé et une efficacité parfait.

Modèle mathématique

Les objectifs de cette partie incluent :

- ✓ Développement d'un modèle mathématique pour le processus d'évaporation à simple effet.
- ✓ Discuter et analyser les performances du processus d'évaporation à effet unique.



Procédés de dessalement par évaporation à simple effet.

Le rapport de performance:

$$PR = \frac{\lambda_s}{\left(\lambda_v + C_p(T_v - T_f) \frac{X_b - X_f}{X_b - X_f} + \frac{X_f}{X_b - X_f} C_p BPE \right)}$$

La surface spécifique de transfert de chaleur

$$sA = \frac{A_e + A_c}{M_d} = \frac{\left(\frac{X_b}{X_b - X_f} \right) C_p (T_b - T_f) + \lambda_v}{U_e (T_s - T_b)} + \frac{\lambda_d}{U_c (LMTD)_c}$$

Débit spécifique de l'eau de mer

$$sM_{cw} = \frac{M_{cw}}{M_d} = \frac{\lambda_d - (X_b / (X_b - X_f)) C_p (T_f - T_{cw})}{C_p (T_f - T_{cw})}$$

Résultats

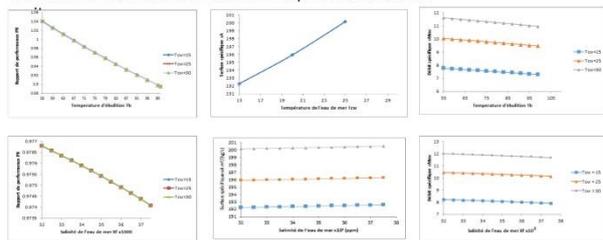
La validation de notre modèle théorique est faite avec des mesures réelles:

- ✓ La température de l'eau d'alimentation, $T_f = 4 - 15^\circ C$.
- ✓ La température de la vapeur, $T_s = 4 - 15^\circ C$.
- ✓ La température d'ébullition, $T_b = 55 - 100^\circ C$.
- ✓ La salinité de l'eau de mer = 32 000 - 42 000 ppm .
- ✓ La salinité de la saumure rejetée, $X_b = 70\ 000$ ppm
- ✓ Le débit de distillat, $M_d = 1$ kg/s.
- ✓ La capacité thermique de l'eau de mer, $C_p = 4,2$ kJ / kg $^\circ C$.

A partir de ces équations, on calcule au moyen d'un programme réalisé à l'aide de **Visual Basic 2019** les différents paramètres de l'évaporateur à simple effet dans le procédé de dessalement de l'eau de mer.



le résultat obtenu est finalement représenté comme



Conclusion

Cette problématique est un peu relativement originale mais d'actualité internationale puisqu'elle regroupe deux préoccupations majeures du monde actuel, à savoir le dessalement de l'eau de mer et sa modélisation numérique. Les résultats obtenus nous indiquent un choix pour notre processus de calcul avec un rapport de performance toujours inférieur à 1. Nous recommandons l'ajout d'un compresseur pour l'augmentation du rapport de performance.

Journée d'étude
Ghardaïa, 11 mai 2022

Université de Ghardaïa



Résumé

L'eau est un élément clé et vital pour la survie de la vie sur terre. Les premières civilisations humaines étaient basées sur l'eau et son utilisation. Le développement démographique, l'augmentation des frais de subsistance, le développement industriel et agricole conduisent à la pollution de l'eau. Les problèmes liés à l'eau sont devenus plus importants compte tenu de la raréfaction des sources d'eau potable sur la planète, incitant les chercheurs à enquêter sur l'avenir de ce liquide, précieux pour la vie, et à travailler pour trouver de nouvelles sources d'eau. Prenez l'ancien que nous avons cité : le dessalement. En Algérie, la seule source d'eau potable est l'eau souterraine, qui est petite et limitée, nous devons donc nous efforcer d'utiliser les eaux méditerranéennes, notre travail a été fait avec différentes technologies de dessalement des eaux et Ainsi que l'étude de la technologie d'évaporation à simple effet à l'aide d'un programme de calcul écrit selon VISUAL BASIC (VB 6.0).

Abstract

Water is a key and vital element for the survival of life on earth. The first human civilizations were based on water and its use. Population development, increased living costs, industrial and agricultural development lead to water pollution. Water-related issues have become more prominent given the scarcity of drinking water sources on the planet, prompting researchers to investigate the future of this precious liquid for life, and to work to find new solutions. new sources of water. Take the old one we mentioned: desalination. In Algeria, the only source of drinking water is groundwater, which is small and limited, so we must strive to use Mediterranean waters, our work has been done with different water desalination technologies and study of single-effect evaporation technology using a calculation program written according to VISUAL BASIC (VB 6.0).

ملخص

الماء عنصر أساسي وحيوي لبقاء الحياة على الأرض. كانت الحضارات الإنسانية الأولى قائمة على الماء واستخداماته. تؤدي التنمية السكانية وزيادة تكاليف المعيشة والتنمية الصناعية والزراعية إلى تلوث المياه. أصبحت القضايا المتعلقة بالمياه أكثر بروزًا نظرًا لندرة مصادر مياه الشرب على الكوكب ، مما دفع الباحثين إلى استكشاف مستقبل هذا السائل الثمين مدى الحياة ، والعمل على إيجاد حلول جديدة.مصادر جديدة للمياه. خذ القديم الذي ذكرناه: التحلية. في الجزائر ، المصدر الوحيد لمياه الشرب هو المياه الجوفية ، وهي مياه صغيرة ومحدودة ، لذلك يجب أن نسعى جاهدين لاستخدام مياه البحر الأبيض المتوسط ، وقد تم عملنا باستخدام تقنيات مختلفة لتحلية المياه ودراسة تكنولوجيا التبخر ذات التأثير الفردي باستخدام برنامج حسابي مكتوب وفقًا لـ VISUAL BASIC (VB 6.0).