

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

UNIVERSITE ABOUBEKR BELKAID TLEMCEM

FACULTE DE TECHNOLOGIE

Département de Génie Mécanique

Mémoire pour l'obtention du

Diplôme de Master en Génie Mécanique

Option **Génie Energétique et Environnement**

Intitulé

**MODÉLISATION ET ÉTUDE DE
L'ÉCOULEMENT DANS LA CHAMBRE DE
FLASHING LORS D'UN PROCESSUS DE
DESSALEMENT D'EAU DE MER**

Présenté par

Mr. BOUKHIAR Hachimi Radhwane

Mr. KRIOU Amine Zin Laabidine

Soutenu en juin 2014 devant le jury composé de

Dr. SAIM Rachid

Dr. SELADJI Chakib

Dr. FRAINE Youssouf

Dr. KORTI Nabil

Dr. SAIB Hind

Président

Encadreur

Co-Encadreur

Examineur

Examinatrice

Remerciements

Tout d'abord, louange à « Allah » qui nous a guidé sur le droit chemin tout au long du travail et nous a inspiré les bons pas et les justes reflexes. Sans sa miséricorde, ce travail n'aurait pu aboutir.

A travers ce modeste travail, nous tenons à exprimer toute notre gratitude a nos parents en premier lieu. Qu'ils trouvent ici tous nos remerciements pour leur soutien, aide et sacrifice

Au cours de notre travail de master, toute l'aide et conseil nous ont été promulgués par mes encadreurs, Mr SELADJI CHAKIB et Mr FRAIN YOUCEF. Avec toute notre sympathie, nous tenons à vous exprimer notre gratitude.

Nous voudrions ensuite remercier tous les membres du jury qui ont jugé ce travail de mémoire de master et nous ont fait honorés leurs remarques constructives :

Mr **SAIM Rachid** qui nos a fait l'honneur d'accepter la présidence du jury. Nous exprimons nos vifs remerciements à Mr **KORTI Nabil** et Mme **SAIB Hind** pour avoir accepté de faire partie du jury.

Dédicaces

De la part de Mr. BOUKHIAR Hachimi Radhwane ;

w ARISTOTE w

LA RICHESSE CONSISTE BIEN PLUS DANS L'USAGE QUE DANS LA
PROPRIETE

Je dédié cet humble travail a celle qui a éclairée mon chemin et mes idées et m'as toujours comblée de ses prières, mon étoile, ma chère Maman, a celui qui croit en moi quoi que je fasse mon repère dans cette vie mon Papa et aussi mes chères frères Adnane, Sofiane, Rayan et à mon unique sœur Zazi.

Et à mes chères grands parents : Baba hadj, Mani, Ba, Muma

Merci

Dédicaces

De la part de kriou amin zin laabiddin;

Je dédie ce travail à mes chers parents, jamais je ne saurais m'exprimé quant aux sacrifices et aux dévouements que vous avez consacrés à mon éducation et à mes études. Les mots expressifs soient-ils restent faibles pour énoncer ma gratitude hautement profonde.

Pour mes frères et pour ma chère sœur.

Et ma meilleure amie Sousou

Et à tous mes amis avec lesquels j'ai partagé mes moments de joie et de bonheur, a toute la famille Kriou et Ben madeh et pour toute personne m'ayant aidé de prés ou de loin, qu'il trouve ici l'expression de ma reconnaissance.

Table des matières

Introduction générale.....	1
----------------------------	---

Chapitre 1	Les principales technologies de dessalement des eaux de mer
-------------------	--

1.1. Introduction :	2
1.2 Les procédés de distillation	4
1.2.2 Distillation à simple effet :	7
1.2.3 Distillation à effet multiple (Multi-Effect distillation MED):	9
1.2.4. Distillation à détente étagées (Multi-Stage Flash distillation MSF) :	11
1.3. Les procédés membranaires :	12
1.3.1. Osmose inverse :	12
1.3.2. Electrodialyse :	15
1.3.3. Autres méthodes :	16
1.4. Le dessalement en Algérie :	17
1.4.1. Historique et constat de l'expérience Algérienne :	17
1.4.2. Les ressources en eau en Algérie :	19
1.4.3. Capacité installée :	20
1.4.4. Les avantages et les inconvénients de dessalement de l'eau de mer en Algérie :	21
1.4.5. Aboutissement du dessalement dans le pays :	22
1.4.6. Soulagement de la demande en eau :	23
1.5. Caractéristiques hydrodynamiques – mouvement de l'eau en mer :	23
1.5.1. Les vents :	23
1.5.2. la houle :	24
1.5.3. les marées :	24
1.5.4. caractère physique des eaux de mer :	24
1.5.4.1. Température :	24
1.5.4.2. Salinité :	25

1.6.Complexe de Dessalement d'eau de mer et Production d'électricité d'Arzew station KAHRAMA	25
1.6 .1.Localisation de la station KAHRAMA :.....	25
1.6.2.Système de Dessalement	26
1.6.3.Unité de Dessalement	26
1.6.4 Description de système de la station KAHRAMA	26
1.7.Conclusion :.....	30

Chapitre 2 Analyse détaillé de la technique de Dessalement multi flashing

2.1. Introduction :.....	31
2.2. Technologie	32
2.3 . Les procedes	32
2.3.1. L'alimentation en eau de mer	32
2.3.2. Le prétraitement	32
2.3.3. Installation de Dessalement :.....	32
2.3.4. Le post-traitement	33
2.4. Prise d'eau de mer et système de rejet	33
2.4.1. La prise d'eau	33
2.4.2. Système de filtrage d'eau de mer	33
2.4.3. Système de pompage d'eau de mer	34
2.4.4. Système de pompes d'eau de mer d'incendie	35
2.4.5. Injection des produits chimiques :	35
2.4.6. Système électro chloration d'eau de mer	35
2.4.7. Système d'émissaire de rejet	36
2.4.8. Equipements de surveillance :	36
2.5. Processus de distillation à étapes multiples flash(DF) :.....	37
2.5.1. Description générale :.....	37
2.5.2. Parties d'une installation	39
2.5.3. Prétraitement :.....	39
2.5.3.1. Filtration :.....	39
2.5.3.2. Réglage du pH :.....	39
2.5.3.3. Traitement désincrustant :.....	39
2.5.3.4. Dégazage et désaération :	39

2.5.3.5. Evaporateur DF	40
2.5.3.6. Chambres d'évaporation.....	40
2.5.3.7. Étapes de Rejet de la Chaleur :	41
2.5.3.8. Étapes de Récupération de Chaleur :.....	42
2.5.3.9. Chaudière principale :	42
2.5.3.10. Ejecteurs à vide	42
2.6. Comparaison :	44
2.7. Conclusion :	46

Chapitre 3 Les principales technologies de dessalement d'eau de mer

3.1 Introduction :	47
3.2 Dévésiculateur « Demister »	48
3.2.1 Introduction.....	48
3.2.2 Principe de fonctionnement du demister :.....	49
3.2.3 Conclusion :	50
3.3.Simulation numerique	51
3.4.Modelisation mathematique :	53
3.4.1. Les équations de Navier-Stokes :	53
3.4.2. L'équation de continuité :	53
3.4.3. L'équation de conservation de la quantité de mouvement :.....	53
3.4.4. La résolution du Turbulence :.....	54
3.4.5. Modèle de turbulence $k - \epsilon$:.....	55
3.4.6. Écoulement en milieu poreux :	55
3.5.Procédure et étape de simulation numérique :.....	56
3.6.Préparation du calcul sur FLUENT :	60
3.7. Conclusion	61

4.1. Introduction.....	62
4.2. Les résultats du modèle :	63
4.2.1.Comparaison avec les données expérimentales et Corrélations	65
4.2.2.L'effet du profile de vitesse :	66
4.2.3.Les effets visqueux et les effets inertiels :.....	69
4.2.4.L'effet de la localisation du Demister :	70
4.2.5.Comparaison entre différent emplacement de demister :.....	71
4.3.Conclusion :	72
Conclusion Général.....	73

Annexe.

Bibliographie

Résumé

Abstract

ملخص

Liste des figures

CHAPITRE 1

Figure. I. 1: procédés industrialisés de dessalement.....	5
Figure. I. 2: Schéma général d'une installation de dessalement.....	5
Figure. I. 3: distillation à simple effet, source SIDEM	6
Figure. I. 4 .Schéma de principe d'un système d'évaporateurs multiples effets (MED).	8
Figure .I. 5.un processus typique de MSF.	9
Figure .I. 6 .les grandes usines de dessalement par MSF se sont contractées dans les années 1994-2012.	11
Figure. I. 7. Principe de distillation à compression de vapeur.	11
Figure.I. 8. Principe de l'osmose et de l'osmose inverse	13
Figure. I. 9.principe de l'électrodialyse	15
Figure. I. 10.Ensemble de l'usine KAHRAMA.....	28
Figure. I. 11.Schéma simplifié d'évaporateur MSF.....	29
Figure. I. 12Situation géographique des stations de dessalement d'eau de mer.	29

CHAPITRE 2

Figure .II. 1.Schéma général d'une installation de dessalement (source : Maurel A.2006).....	32
Figure .II. 2 .Dégrilleur.....	34
Figure .II. 3.Schéma simplifié du système d'électro chloration d'eau de mer.....	36
Figure .II. 4.Schéma de procédé d'une unite MSF simple.....	38
Figure .II. 5 . Evaporateur et dégazeur	41
Figure .II. 6.Schéma des unités de chaudière (HRSG)	43
Figure .II. 7.Distillateur par détentes successives (Source : Danis P., 2003).....	43

CHAPITRE 3

Figure.III. 1 Diffèrent type de dévésiculateur	50
Figure.III. 2Schéma du problème considéré	52
Figure.III. 3Création de la géométrie	58
Figure. III. 4. Maillage quadratique de la géométrie.....	59
Figure .III. 5. Détermination des conditions aux limites	59
Figure. III. 6.Exportation du maillage	60
Figure. III. 7 .Version 2ddp de démarrage du Fluent.....	60

CHAPITRE 4

Figure .IV. 1.Conteur de la vitesse [m/s] a et la pression statique[Pa] b.....	63
Figure .IV. 2.la vitesse de la vapeur à l'entrée et à la sortie.	64
Figure .IV. 3 la pression statique à l'entrée et à la sortie.	64
Figure .IV. 4validation des résultats expérimentaux vs le modèle du milieu poreux.....	66
Figure .IV. 5.Profil de vitesse à l'entrée de FC.....	67
Figure .IV. 6Conteur de la pression pour les trois configurations.	67
Figure .IV. 7: Conteur de la vitesse pour les trois configurations.....	68
Figure .IV. 8.l'effet de hauteur sur la chute de la pression	70
Figure .IV. 9. La géométrie de (a) et (b).....	71
Figure .IV. 10.profil de pression [pa] entre deux géométries différentes	72
Figure .IV. 11.profil de la vitesse [m/s] entre deux géométries différentes.....	72

Liste des tableaux

CHAPITRE I

Tableau I. 1. Différents techniques de dessalement.....	3
Tableau I. 2.différentes installations en Algérie.	19
Tableau I. 3.Stations «monobloc» en Algérie :.....	21

CHAPITRE II

Tableau .II.1.Wittholz M.K. et al., 2008 ; Frioui S.,Oumeddour R., 2008.	44
Tableau .II.2.comparaison des procédés	45
Tableau .II.3.comparaison des procédés par l'énergie.....	45

CHAPITRE III

Tableau. III. 1.Les propriétés physiques de dévésiculeur.....	53
Tableau. III. 2.la sensibilité de la maille à la chute de pression.....	58

CHAPITRE IV

Tableau .IV. 1.Les propriétés du milieu poreux utilisé :.....	65
Tableau .IV. 2.les résultats de la simulation vs l'expérimental	65
Tableau .IV. 3.variation de la vitesse en fonction du profil a l'entrée.....	68
Tableau .IV. 4.l'effet de la résistance inertielle.....	69
Tableau .IV. 5.l'effet de la résistance du a la viscosité.....	69
Tableau .IV. 6.les déférentes valeurs de la chute de pression et les vitesses correspondent	70

Abréviation

MSF	Multi-Stage-Flash distillation (distillation à détente étagées)
MED	Multi-Effect-Distillation (distillation à effet multiple)
RO ou OI	Reverse Osmosis <i>ou</i> Osmose Inverse
SWRO	Sea Water Reverse Osmosis (dessalement d'eau de mer par osmose inverse)
BWRO	Brackish Water Reverse Osmosis (dessalement d'eau saumâtre par osmose inverse)
ED	Electrodialyse.
ERD	Electrodialyse inverse
VCD	Distillation par Compression de Vapeur
VTE	Tubes Verticaux Arrosés

Nomenclature

Symbole	Variables	Unités
Q_R	débit de rejet	(l/min)
T	température	(°C)
E	Porosité	(%)
D_p	diamètre	(m)
C₂	effet Inertiel	(m ⁻¹)
β	Perméabilité	(m ²)
L	Epaisseur	(m)
V_L	Vitesse laminaire de fluide	(m/ s)
V	Vitesse normale	(m/s)
δ	Densité	(kg/ m ³)
C_p	Chaleur spécifique	(J. Kg-1.K-1)
L₁.L₂.L₃	Localisation	(m)
g	Gravité	(m /s ²)
p	Pression	(Pa)

Introduction Générale

L'insuffisance des ressources en eau douce et les besoins d'eau potable seront de plus en plus manifestés dans les années à venir. Il est très vraisemblable que le problème de l'eau sera considéré comme un des facteurs déterminants de la stabilité d'un pays. Près d'un milliard d'êtres humains à travers le monde sont dépourvus d'eau potable ; il faut donc leur assurer un minimum de 5 litres d'eau par jour et par habitant, conformément aux normes de l'OMS. Pour faire face à cette pénurie annoncée d'eau, de nouvelles techniques de production d'eau potable sont déjà mises en place pour satisfaire les besoins de la population. Une des techniques prometteuse pour certains pays est le dessalement de l'eau de mer.

Le marché du dessalement connaît une forte hausse, dans les pays en situation de manque d'eau, et particulièrement ces dernières années avec l'amélioration des techniques utilisées. L'Algérie est classée comme une zone semi-aride a adopté une stratégie à moyen terme consistant la réalisation des stations de dessalement. Elle a choisie, comme alternative, le dessalement de l'eau de mer pour faire face à la demande croissante en eau potable.

Nous nous proposons à travers ce mémoire d'étudier le phénomène de l'écoulement dans la chambre de flashing lors d'un processus de dessalement de l'eau de mer, Ils concernent la simulation d'une partie de Demister (dévésiculateur) inséré dans une chambre de vaporisation et traversé par un écoulement de vapeur d'eau.

Ce mémoire est présenté sous la forme de quatre chapitres. Dans le premier chapitre, nous étudions les principales technologies de dessalement des eaux de mer. Le deuxième chapitre est consacré à la définition du phénomène (MSF) multi-stage flash et le principe de cette technique. Après un stage au niveau de station de dessalement KAHRAMA –ARZEW on a commencé le troisième chapitre, qui est consacré à la préparation de la simulation, le choix du logiciel et son principe de calcul, pour ça nous avons utilisés « Ansys 14.5-fluent » comme un simulateur et nous avons choisis une géométrie 2ddp qui a été réaliser en utilisons le logiciel « Gambit 2.3.16 ». Puis en a défini les paramètres du problème ; ensuite le modèle mathématique qui inclue les équations.

Dans le quatrième et dernier chapitre, on a la visualisation des résultats, l'interprétation des déférentes figures et courbes qui donne une vue interne de phénomène qui passe à l'intérieur de la chambre de vapeur exactement au niveau de Demister.

Chapitre 1

Les Principales Technologies De Dessalement Des Eaux De Mer

1.1 Introduction

La crise de l'eau potable annoncée pour les années 2000-2020 relance fortement l'intérêt de développer rapidement des techniques de dessalements moins chers, plus simples, plus robustes, plus fiables, si possible moins consommatrices d'énergie et respectant l'environnement [1].

Les technologies communes pour le dessalement d'eau de mer sont basées sur deux processus principaux : séparation par évaporation et par membrane, comme montré dans le tableau 1.1, [2, 3,4].

Osmose inverse (OI)	<ul style="list-style-type: none"> - Processus membrane. - le système le plus commun en service. - Une membrane semi-perméable sépare deux solutions de concentration différentes
Electrodialyse	<ul style="list-style-type: none"> - Processus membrane. - Une série de membrane est placé entre deux électrodes et subit un champ électrique. - Il est en générale approprié à l'eau saumâtre et pour traiter les puits pollués.
Distillation à détente étagée (MSF)	<ul style="list-style-type: none"> - Processus d'évaporation, en combinaison avec des centrales électriques. - Le système inclut une série de compartiments. - L'écoulement d'eau chaude dans un compartiment avec une basse pression résulte l'évaporation d'une partie de l'eau.
Distillation à effet multiple (MED)	<ul style="list-style-type: none"> - Processus d'évaporation. - Basé sur le cycle de la chaleur latente en produisant un ruisseau d'eau. - Habituellement utilisé en combinaison avec les centrales électriques.
Distillation par compression de vapeur (VCD)	<ul style="list-style-type: none"> - Processus d'évaporation basé selon le principe d'une pompe à chaleur. - Cycle répétés de condensation et d'évaporation.

Tableau .I. 1 Différents techniques de dessalement.

En général, tous les processus d'évaporation exigent de grandes quantités d'énergie et conviennent donc seulement aux secteurs qui sont riches en carburant à bon marché. Les coûts d'énergie sont des dépenses principales de production aux usines de dessalement et, le processus d'osmose inverse est le procédé le plus efficace de dessalement en termes d'énergie et coûts [5,6].

1.2. Les procédés de distillation

L'eau de mer chauffée émet une vapeur d'eau pure qu'il suffit de condenser pour obtenir de l'eau douce. Ce principe de dessalement très simple est utilisé depuis longtemps. Les différents procédés peuvent être classés en trois grandes familles [7]:

- les procédés faisant intervenir un changement de phase :
 - évaporation,
 - congélation.
- les procédés de permutation sélective à travers une membrane :
 - Transfert d'ions sous l'action d'un champ électrique (électrodialyse) ou d'un gradient de pression (piezodialyse),
 - Transfert d'eau sous l'action d'un gradient de pression (osmose inverse) ou sous l'action d'un gradient de température (thermo osmose).
- les procédés chimiques :
 - Echange d'ions,
 - Extraction par solvant.

En fait, la totalité des installations actuellement en service fait appel à deux grandes familles de procédés : les procédés par évaporation et les procédés de séparation par membranes qui sont plus récents (Figure 1.1) [7].

En regardant toutes les usines de dessalement dans le monde nous nous rendons compte simplement que trois technologies principales de dessalement sont employées :

- ❖ Le processus MSF : 43,5% de production du monde.
- ❖ L'osmose inverse : 43,5% de production du monde.
- ❖ Le processus MED ; qui a augmenté nettement dans le monde.

En ce qui concerne l'eau de mer comme eau d'alimentation, le MSF mène à 66,3% et l'OI à 22,4% [7].

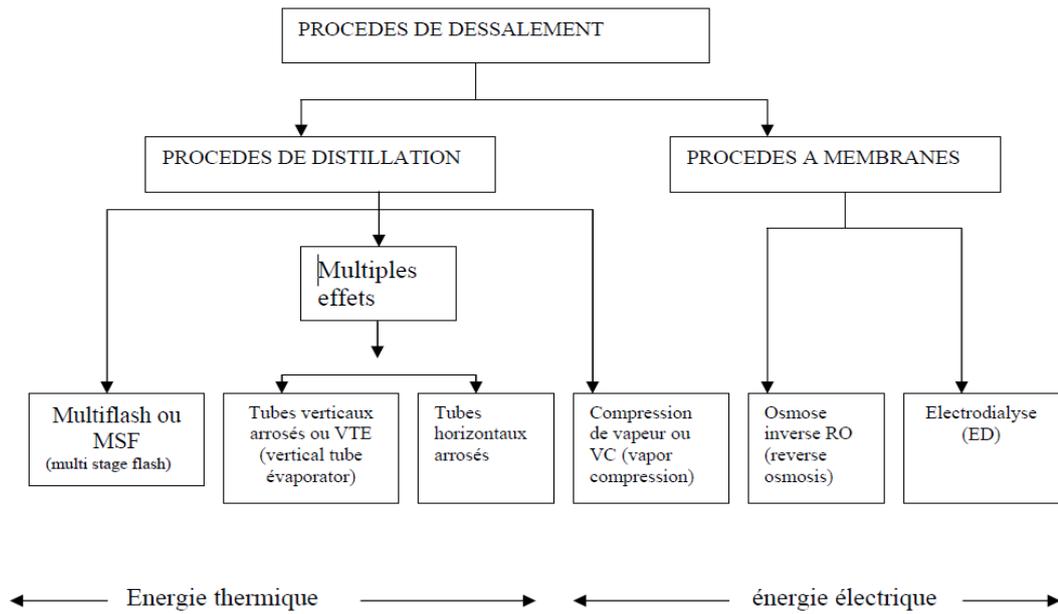


Figure 1.1: Procédés industrialisés de dessalement [7].

Une installation de dessalement peut-être schématiquement subdivisée en 4 postes :

- Une prise d'eau ;
- Un prétraitement ;
- L'installation de dessalement proprement dite ;
- Post-traitement.

A l'issue de ces 4 étapes, l'eau de mer est rendue potable ou utilisable industriellement. Elle doit alors contenir moins de 0,5 g de sels par litre.

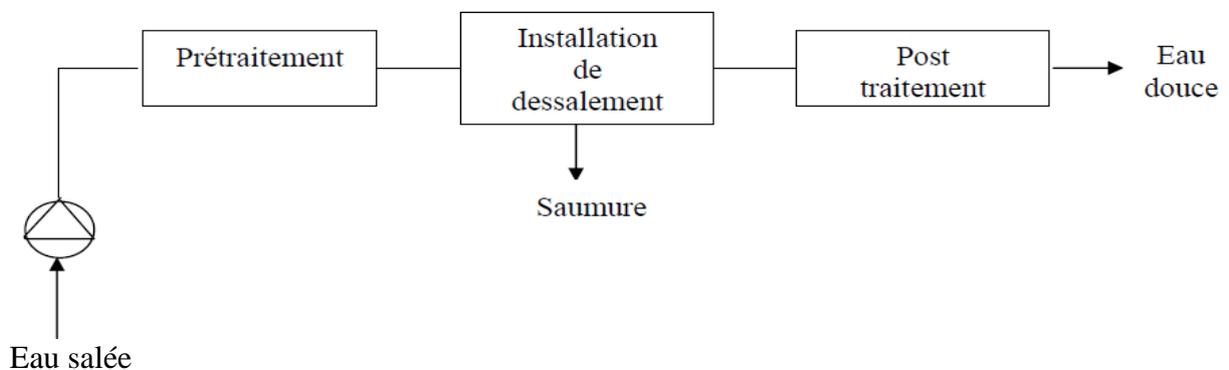


Figure 1.2: Schéma général d'une installation de dessalement [7].

1.2.1. Distillation à simple effet

Ce procédé est mis en œuvre depuis longtemps sur les navires, où les moteurs Diesel émettent une quantité significative de chaleur récupérable. Son principe est simple : il reproduit le cycle naturel de l'eau. Dans une enceinte fermée, un serpentin de réchauffage porte à ébullition l'eau de mer (Figure 1.3).

La vapeur produite se condense au contact d'un deuxième serpentin alimenté par l'eau de mer froide. Un éjecteur (ou une pompe) évacue les gaz incondensables. Un groupe électropompe soutire l'eau condensée ; un deuxième l'eau de mer concentrée ou saumure [8].

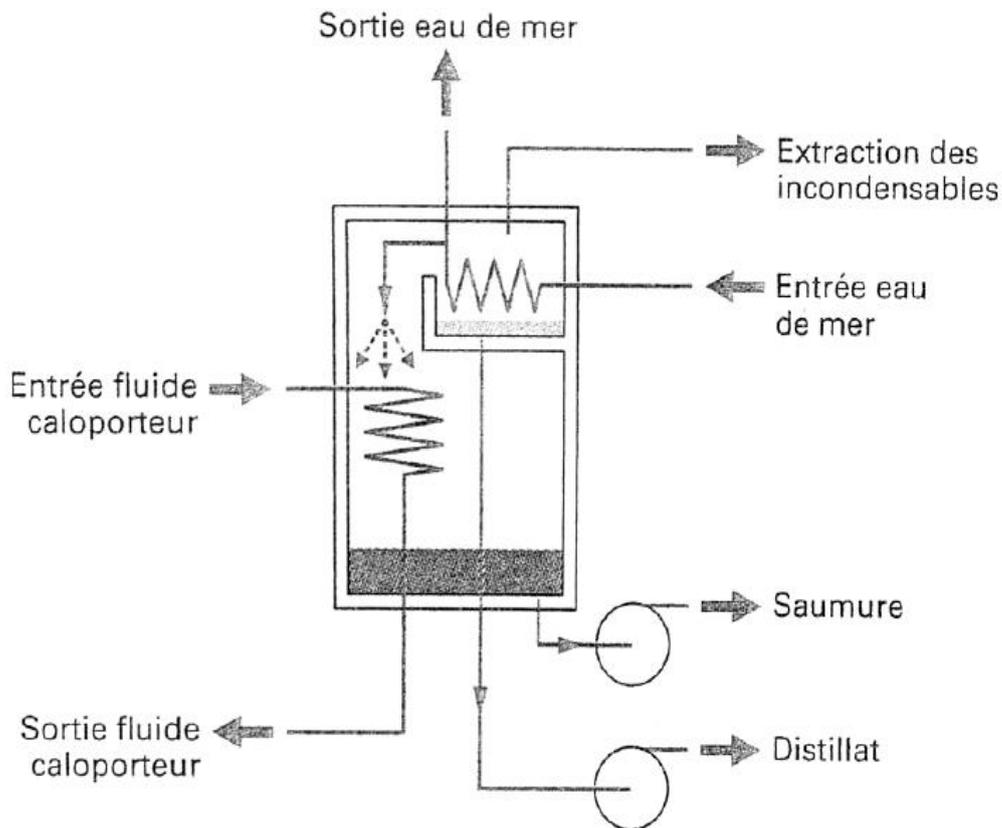


Figure 1.3 : Distillation à simple effet, source SIDEM

1.2.2. Distillation à effet multiple (Multi-Effet distillation MED)

Ce procédé est basé sur le principe d'évaporation, sous pression réduite, d'une partie de l'eau de mer préchauffée à une température variant entre 70 et 80°C [16,2].

L'évaporation de l'eau a lieu sur une surface d'échange, où elle est assurée par détente au sein des étages successifs. La chaleur transférée au travers de cette surface est apportée soit par une vapeur produite par une chaudière, soit par une eau chaude provenant d'un récupérateur de chaleur. [9].

La vapeur ainsi produite dans le premier effet est condensée pour produire de l'eau douce dans le deuxième effet où règne une pression inférieure, ainsi la chaleur de condensation qu'elle cède permet d'évaporer une partie de l'eau de mer contenue dans le deuxième effet et ainsi de suite (Figure 1.4).

Ainsi ; seule l'énergie nécessaire à l'évaporation dans le premier effet est d'origine externe. La multiplication du nombre d'effets permet donc de réduire la consommation spécifique (énergie/m³ d'eau douce produite) [10].

Plusieurs technologies d'évaporateurs multiples effets existent :

✚ Les évaporateurs à multiples effets à tubes horizontaux arrosés

Sont les appareils les plus utilisés actuellement, dans ces appareils, le fluide de chauffage s'écoule dans les tubes horizontaux tandis que l'eau de mer à évaporer est arrosée de façon à s'écouler sous forme de film le plus uniforme possible sur l'extérieur des tubes. La vapeur produite dans la calandre (enceinte cylindrique qui contient le faisceau de tubes) est ensuite envoyée dans les tubes de l'effet suivant où elle cédera son énergie de condensation.

Ces évaporateurs présentent un très bon coefficient d'échange grâce à l'écoulement en film de l'eau de mer. C'est la raison pour laquelle ils remplacent actuellement les plus anciens évaporateurs à faisceau de tubes noyés dans lesquels les tubes étaient plongés dans l'eau de mer [10].

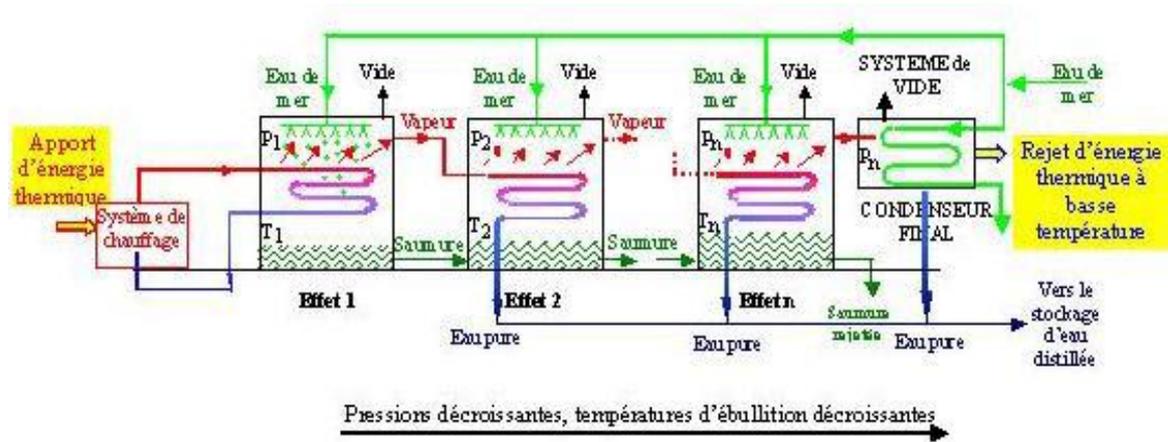


Figure 1.4 : Schéma de principe d'un système d'évaporateurs multiples effets (MED).

Des évaporateurs multiples effets à plaques

Sont également en cours de développement. L'eau de mer à évaporer s'écoule alors sous forme de film mince le long d'une mince plaque métallique chauffée par la vapeur provenant de l'effet précédent qui s'écoule le long de l'autre face de la plaque métallique.

De nombreuses plaques entre lesquelles s'écoulent alternativement l'eau de mer et la vapeur de chauffage sont associées en parallèle pour constituer un effet. La vapeur produite est recueillie dans une calandre cylindrique dans laquelle sont placées les plaques. Cette vapeur est ensuite envoyée entre les plaques situées dans une calandre qui constitue le deuxième effet et ainsi de suite.

L'énergie requise est principalement l'énergie thermique à fournir à la chaudière produisant le fluide de chauffage pour le premier effet. On peut cependant utiliser des chaleurs résiduelles en couplant le procédé MED à des usines de production d'électricité ou des usines rejetant produisant les eaux résiduelles à des températures de l'ordre de 80°C. Il faut également de l'énergie électrique pour les pompes de circulation et la production de vide [5,11].

1.2.3. Distillation à détente étagées (Multi-Stage Flash distillation MSF)

La distillation est la plus vieille de toutes les technologies de dessalement. Processus de distillation (MSF) à détente étagées (Figure 1.5) a été employé pendant beaucoup d'années et est maintenant le plus grand secteur dans l'industrie de dessalement [12].

Le processus de MSF produit 56% en tout d'eau douce par rapport aux autres technologies de dessalement [13].

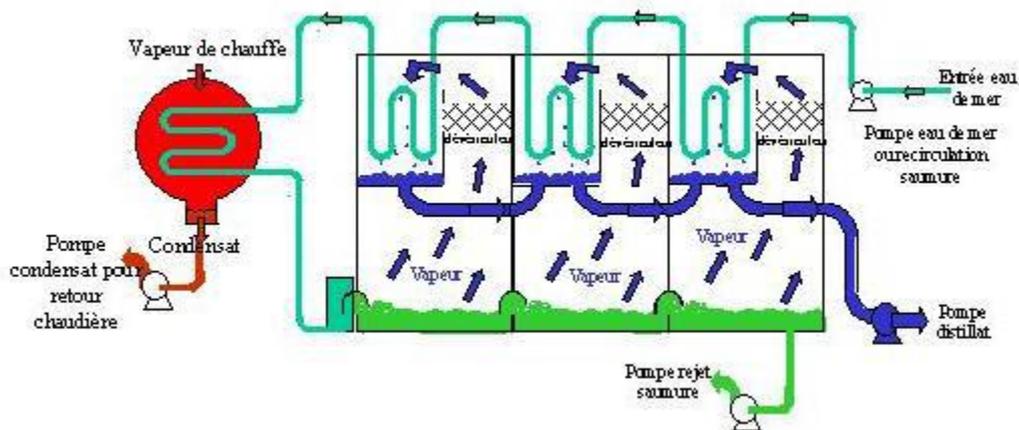


Figure 1. 5 : un processus typique de MSF [14]

MSF n'a pas eu une grande efficacité mais une énorme capacité, [15]. Il est considéré comme une énergie intensive [16].

Même si ce n'est pas la technologie de dessalement performante, MSF est le plus populaire. La principale raison c'est sa grande fiabilité, sa flexibilité d'opération et influence relativement une basse de salissure causée par le sel (tartres) dans les échangeurs de chaleur [17].

La conception typique d'une installation de MSF se compose d'une section de rejet de chaleur, d'une section d'entrée de la chaleur et d'une section de récupération de la chaleur entre eux (Figure 1.5). L'eau de mer brute est examinée et chlorée avant d'entrée aux étapes successives. Elle sera pompée dans des tubes de condensateur d'une étape à l'autre, alors que la saumure chaude coule au fond de ces étapes dans la direction opposée.

La saumure passe partiellement (flash) en vapeur lors d'entrée dans la prochaine étape et se condense dans le tube externe du condensateur. Lorsque la température de la saumure diminue de l'étape à l'autre, la détente dans l'étape suivante est réalisée par le chauffage global à basse pression. Dans la section d'entrée de la chaleur, la vapeur du réchauffeur est ajoutée et se condense dans le tube du condensateur.

A la dernière étape, la saumure est divisée en jet recyclé et en jet d'échappement, qui est rejeté à la mer. Le jet recyclé est combiné avec la nouvelle alimentation et réintroduit à la section de récupération de la chaleur. La partie de réutilisation de saumure augmente l'extraction d'eau douce et réduit simultanément la consommation des produits chimiques en prétraitement de l'usine.

Aujourd'hui, la plupart des usines de MSF fonctionnent avec recyclage de saumure mais Hamed et al. (1999), déclarent que sans saumure recyclée, pas de nécessité d'anticalcaire et la saumure rejetée devient moins concentrée.

Entre le rejet de chaleur et la section de récupération de la chaleur, l'eau entrante est également divisée en jet de décharge et en jet d'alimentation. La décharge sert seulement au refroidissement. Les produits chimiques résiduels sont présents dans l'échappement de la saumure de la dernière étape.

Puisque la saumure rejetée est habituellement mélangée avec deux fois la quantité d'eau de refroidissement, la salinité, la température et les concentrations en produits chimiques seront diminuées avant la décharge à la mer.

En raison de l'opération du chauffage d'eau de mer, la conception du processus doit tenir en compte les problèmes qui résultent de cet environnement dur et les différentes étapes de prétraitement sont généralement nécessaires pour augmenter la durée de vie des installations de MSF **[18]**.

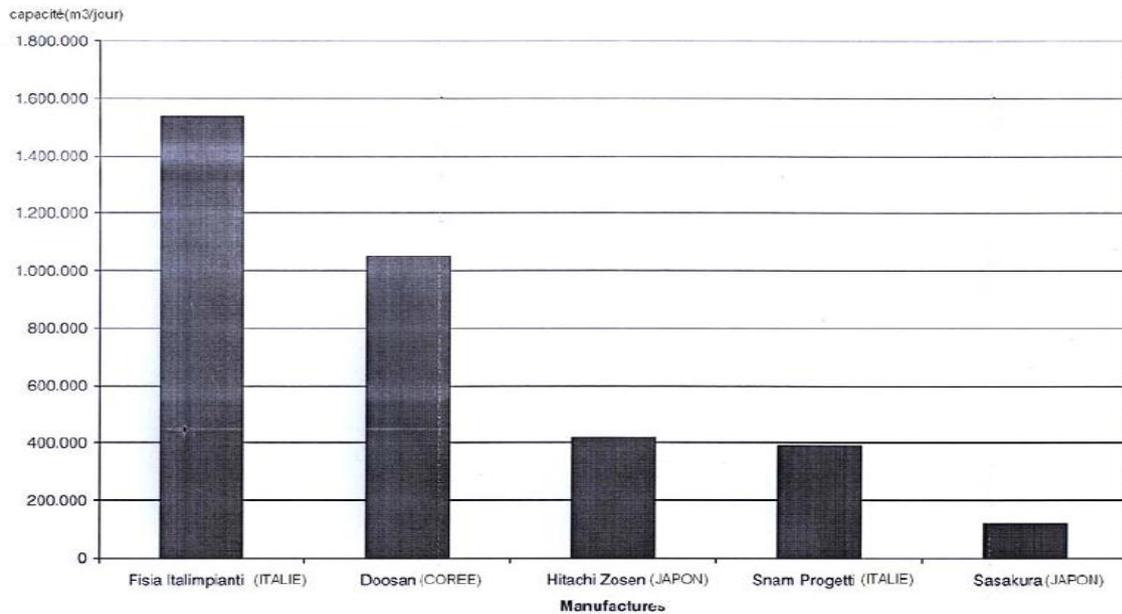


Figure 1. 6 : les grandes usines de dessalement par MSF se sont contractées dans les années 1994-2012 [19].

1.2.4. Distillation par compression de vapeur (VC)

L'eau de mer à dessaler est portée à ébullition dans une enceinte thermique isolée. La vapeur produite est aspirée par le compresseur qui élève sa température de saturation. Cette vapeur traverse ensuite un faisceau tubulaire placé à la base de l'enceinte et se condense en provoquant l'ébullition de l'eau salée, [20].

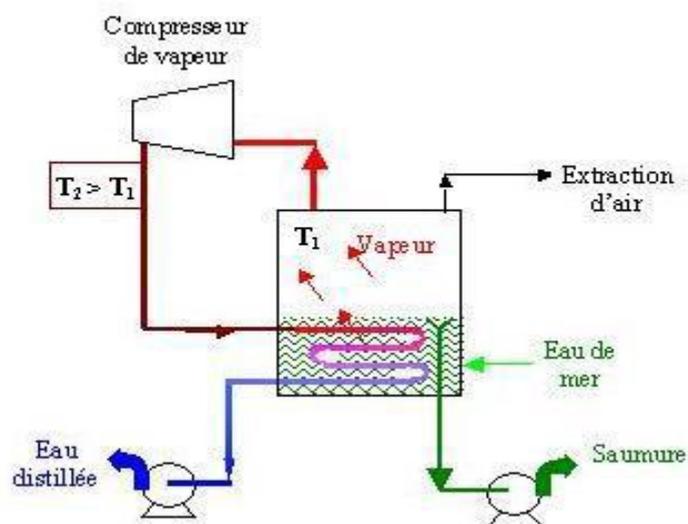


Figure 1.7 : Principe de distillation à compression de vapeur [10].

1.3. Les procédés membranaires

Les membranes ont la capacité de différencier et séparer sélectivement les sels et l'eau. En utilisant ces capacités mais différemment dans chaque cas, deux procédés de dessalement à membrane ont été développés et sont actuellement disponibles au marché. L'électrodialyse (ED) est un processus qui emploie le potentiel électrique pour déplacer les sels sélectivement par une membrane.

L'eau produite est sortie comme eau douce. L'osmose inverse (OI) est un processus à pression-conduit, la pression étant employé pour la séparation en permettant à l'eau douce de se déplacer à travers une membrane, et les sels se disposent dans la solution de saumure, [21].

1.3.1. Osmose inverse

L'osmose inverse est un procédé de séparation de l'eau et des sels dissous au moyen de membranes semi-perméables sous l'action de la pression (54 à 80 bars pour le traitement de l'eau de mer). Ce procédé fonctionne à température ambiante et n'implique pas de changement de phase. Les membranes polymères utilisées laissent passer les molécules d'eau et ne laissent pas passer les particules, les sels dissous, les molécules organiques de 10-7 mm de taille. La teneur en sels de l'eau osmosé est de l'ordre de 0,5 g.L-1 [10].

A. Principe de l'osmose inverse

On appelle osmose le transfert de solvant (eau dans la plupart des cas) à travers une membrane semi-perméable sous l'action d'un gradient de concentration.

Soit un système à deux compartiments séparés par une membrane semi-perméable et contenant deux solutions de concentrations différentes (Figure 1.8).

Le phénomène d'osmose va se traduire par un écoulement d'eau dirigé de la solution diluée vers la solution concentrée. Si l'on essaie d'empêcher ce flux d'eau en appliquant une pression sur la solution concentrée, la quantité d'eau transférée par osmose va diminuer.

Il arrivera un moment où la pression appliquée sera telle que le flux d'eau s'annulera. Si, pour simplifier, nous supposons que la solution diluée est de l'eau pure. Cette pression d'équilibre est appelée pression osmotique.

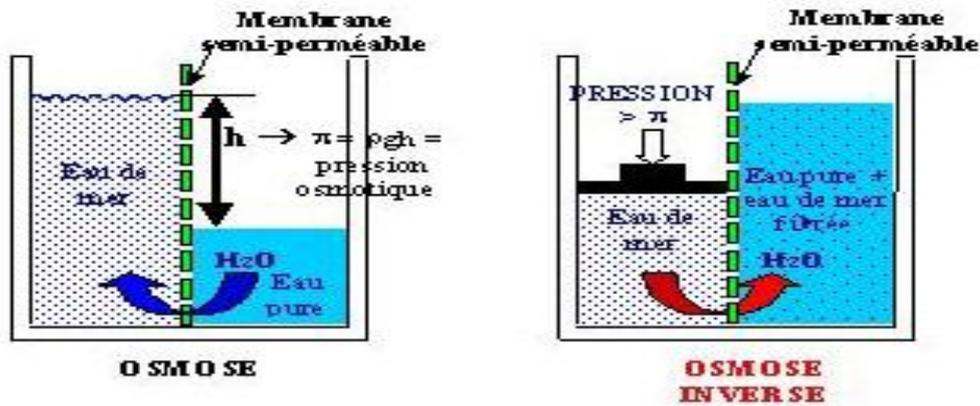


Figure 1.8 : Principe de l'osmose et de l'osmose inverse.

Une augmentation de la pression au delà de la pression osmotique va se traduire par un flux d'eau dirigé en sens inverse du flux osmotique (Figure 1.9), c'est-à-dire de la solution concentrée vers la solution diluée : c'est le phénomène d'osmose inverse, [10].

La pression osmotique est importante, et ne peut pas être négligée devant la pression opératoire. Elle est de quelques bars pour une eau moyennement saumâtre, mais avoisine de 2,5 MPa (25 bars) pour l'eau océanique, et dépasse nettement cette valeur en mer rouge ou dans le golf persique, où sa concentration atteint 41 g/l [22].

L'osmose inverse permet en principe d'atteindre deux objectifs, selon que le produit valorisable est constitué par le perméat (a) ou par le retentât (b) :

- a. Réduire la concentration totale en solutés ; les principales applications sont la production d'eau potable à partir de gisements saumâtres ou d'eau de mer, et l'amélioration de la qualité de l'eau à usage industriel, notamment dans l'industrie des composants électroniques.
- b. Augmenter la concentration d'une solution ; la déshydratation partielle des jus dans l'industrie alimentaire en constituant une application intéressante, à en juger par l'expansion du procédé par rapport aux méthodes concurrentes (évaporation, congélation), [22].

B. Application industriel

Le dessalement des eaux saumâtres et de l'eau de mer est l'application la plus importante (95%) de l'osmose inverse.

Depuis 20 ans, un effort continu a été fait pour fournir de l'eau potable, sanitaire, ou d'irrigation dans des zones arides ou dépourvues de disponibilités locales d'une qualité standard ; la plupart des installations sont en territoire anglophone (Etats-Unis, Moyen-Orient, états du golfe persique), mais il en existe en Europe, en Afrique et en U.R.S.S. L'ensemble représentait en 1980 une production quotidienne voisine de 8 000 000 m³ d'eau potable, dont 5% à partir d'eau de mer, répartie sur quelques 2000 points du globe.

La charge est d'abord filtrée, micro filtrée (5 μ m), puis prétraité par ajustement de pH (≤ 7) et adjonction d'un inhibiteur de précipitation (hexamétaphosphate de sodium) pour protéger les membranes de la dégradation chimique et du colmatage.

Des dépôts apparaissent néanmoins, sous forme de colloïdes organiques ou minéraux, de précipités (CaSO₄, CaCO₃) et de mucosités d'origine bactérienne. Pour enlever ces dépôts sans abîmer la membrane, on injecte des produits à action chimique (acide citrique, EDTA, détergents à enzymes, émulsifiants non ioniques, formaldéhyde) ou physique (frottement par lit de billes, inversion périodique et brève du flux) [22].

La pompe d'alimentation génère un débit d'eau de mer à pression de 50 – 80 atmosphères, à travers le système de membrane. L'eau dessalée, qui est passée par les membranes d'osmose inverse, reçoit alors un traitement final ; ce qui inclut l'ajustement de son rapport de réactivité, la réduction de sa corrosivité et sa désinfection.

La saumure est déchargée par une turbine, ce qui récupère 30 - 40% de l'énergie investie par la pompe de ce processus et, est alors retournée à la mer.

Un système secondaire utilisé pour le nettoyage périodique des membranes est installé à chaque usine d'osmose inverse [22].

1.3.2. Electrodialyse

❖ Principe et application

L'électrodialyse est une technique séparative dans laquelle des espèces ionisées minérales ou organiques dissoutes, telles que sels, acides ou bases, sont transportées à travers des membranes ioniques et sous l'action d'un champ électrique. Lorsqu'une solution ionisée est envoyée dans les compartiments séparant ces membranes, les cations migrent vers la cathode (-) et les anions vers l'anode (+), en traversant respectivement les membranes cationique (C) et anionique (A).

Grâce à une disposition alternée des membranes, les ions capables de traverser les membranes cationiques sont arrêtés par les membranes anioniques, et réciproquement (figure I.9) ; il en résulte une augmentation de la concentration dans les compartiments de même parité (concentrât) et une diminution dans les compartiments adjacents (diluât), [22].

Pour chaque faraday (96 490 coulombs) traversant l'appareil, il est séparé $N/2$ équivalent-gramme de sel, N étant le nombre total de compartiments autres que ceux qui contiennent les électrodes, [23].

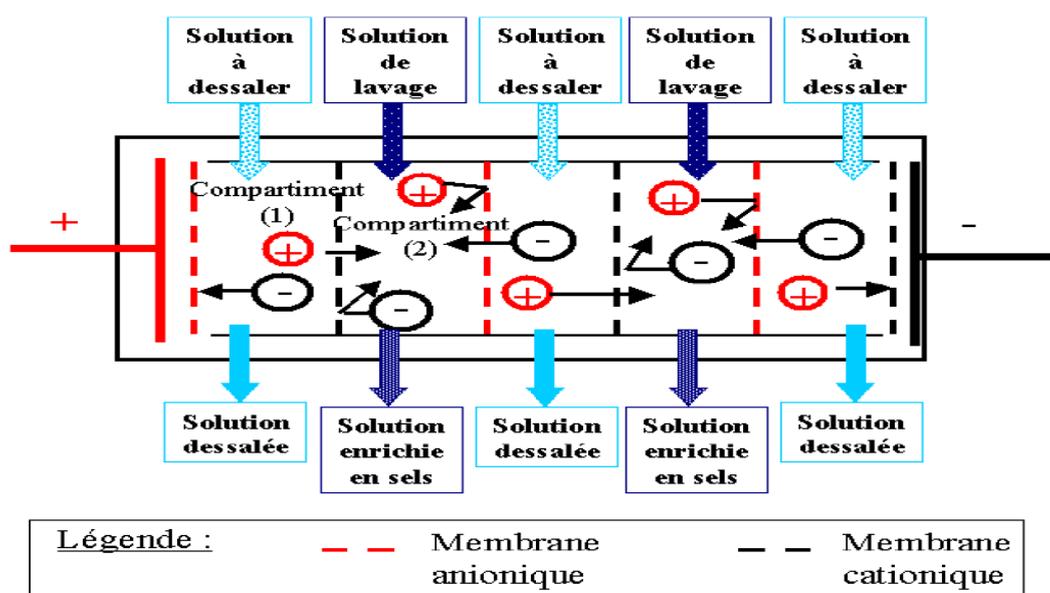


Figure 1.9 Principe de l'électrodialyse.

En effet, l'électrodialyse peut obtenir de divers effets de dessalement. Cependant, dans le cas du dessalement profond, le problème d'entartrage hérite le jeu, [24]. Il est relié à la précipitation des sédiments de CaCO_3 , de CaSO_4 et de $\text{Mg}(\text{OH})_2$ sur la surface des membranes dans les cellules de concentré. Pour éviter le phénomène, on peut changer la polarité de l'électrode (ce processus est connu comme inversion d'électrodialyse (EDR) [25, 26].

Une autre solution est l'addition des produits chimiques appropriés au jet de concentré (un acide inorganique et hexamétaphosphate de sodium). Puisque le processus d'EDR n'élimine pas les ions gênant (lourd) (Ca^{2+} , Mg^{2+} , HCO_3^- , SO_4^{2-}) de l'eau, il y a toujours un risque que les sédiments précipiteront sur la surface du concentré.

Ce moyen, particulièrement à une concentration plus élevée en sel dans l'eau d'alimentation, la nécessité de changer la polarité de l'électrode assez souvent. Ceci a comme conséquence une diminution du recouvrement de l'eau parce qu'après chaque changement de la direction du champ électrique une certaine quantité du jet de produit doit être éliminé en jet de rebut, [25].

1.3.3. Autres méthodes

D'autres méthodes sont de congélation, distillation à membrane, l'humification solaire et processus solaires et éoliens. Ces processus n'ont pas réalisé le même niveau du succès commercial, mais ils peuvent prouver l'objet de valeur dans des circonstances spéciales ou encore avec d'autres avances ou améliorations technologiques.

Les éléments communs à tous les processus sont le besoin d'énergie et de production d'un haut jet de concentré appelé le rejet de saumure ou le jet de rebut, ce qui prouve que les méthodes de distillation sont des consommateurs d'énergie élevée indépendamment de teneur en sel dans l'eau, considérant que OI a une demande énergétique inférieure selon la concentration en sels.

Avances technologiques dans le transfert thermique, technologie de membrane, machines de récupération d'énergie, la fabrication des produits chimiques pour le traitement de l'eau et la combinaison des méthodes ou des processus ont réduit la consommation d'énergie par mètre cube, [21].

1.4. Le dessalement en Algérie

La crise de l'eau qui sévit un peut partout à travers le monde n'a pas épargné l'Algérie. Les spécialistes estiment, aujourd'hui, que la mobilisation de ressources supplémentaires devient impérative et passe –entre autres entre des mesures urgentes- par le recours à des solutions non conventionnelles telles que le dessalement de l'eau de mer et des eaux saumâtres.

L'engagement d'un ambitieux programme de dessalement de l'eau de mer est déjà entamé par les pouvoirs publics et envisage d'atteindre la capacité d'un million de mètres cubes par jour. Cependant, la concrétisation d'un tel défi impose la disponibilité de ressources humaines compétentes.

L'Algérie avec un climat semi-aride et avec des ressources en eau souvent utilisés intensivement, souffre temporairement en eau de stockage, avec un niveau élevé d'utilisation de ces ressources en eau. La demande en eau croit rapidement et l'eau disponible décroît.

L'Algérie a choisi le dessalement d'eau de mer pour faire face à la demande domestique et industrielle en eau dans le pays.

1.4.1. Historique et constat de l'expérience Algérienne

L'expérience Algérienne en matière de dessalement des eaux est étroitement liée au développement de l'industrie et tout particulièrement de l'industrie pétrolière et sidérurgique. Le recours au dessalement en vue d'un usage destiné exclusivement à l'alimentation de la population en eau potable est quasi-inexistant.

Une seule expérience a été tentée dans une situation où il n'existait aucune autre solution. Il s'agit de l'unité de déminéralisation d'Ouled Djellaba dans la willaya de Biskra (sud-est Algérien). [27]

Dans l'industrie, la déminéralisation et le dessalement sont utilisés pour assurer la fourniture de l'eau: de chaudière ; de refroidissement ; de traitement.

En 1964, trois petits blocs de 8 m³/h chacun ont été installés au complexe Gaz liquéfié d'Arzew (ville côtière à l'ouest du pays). Le procédé utilisé est la distillation à multiple effet « Multi effet distillation, MED ».

En 1969, une autre installation a vu le jour à Arzew avec une capacité de production de 4560 m³/j. le procédé utilisé est le multi stage flash – MSF.

D'autres installations ont été mises en exploitation pour les besoins en eau de haute pureté nécessaire au processus des complexes de production de l'électricité (Cap Djenet à l'Est d'Alger) et l'industrie de liquéfaction (Arzew et Skikda).

Il y a également quelques installations qui sont destinées, principalement dans le sud, à fournir de l'eau de qualité pour la consommation humaine dans les bases pétrolières.

On retrouve l'ensemble des procédés classiques de déminéralisation : électrodialyse, échanges d'ions, distillation et osmose inverse.

On notera une forte concentration d'installation d'électrodialyse dans le sud et d'échanges d'ions à Annaba, ce qui traduit la confiance des exploitants dans un procédé leur ayant donné satisfaction. Il ressort aussi que si le nombre d'installation de dessalement fonctionnant par osmose inverse est réduit, il n'en demeure pas moins que du point de vue capacité de production, ce procédé occupe une place remarquable. [27]

Le tableau ci-dessous présente les différentes installations qui sont mise en service :

sites	Nombre d'unités	Débit m ³ /j	procédé	Mise en service
Skikda	1	1440	Flash	1971
Skikda	2	720	Flash	//
Skikda	-	1440	Echangeurs d'ions	//
Annaba	2	960	//	//
Annaba	2	3600	//	1973
Ghazaouet	1	840	//	1974
Arzew	6	3888	Électrodialyse	1975
Arzew	-	960	Échangeurs d'ions	//
Hassi Messaoud	6	1000	Electrodialyse	//
Hassi Messaoud	2	110	//	1976
Hassi Touil	1	55	//	1977
Arzew	1	350	Thermocompression	1978
Annaba	3	14180	Multi flash	//
Hassi Messaoud	2	350	Electrodialyse	//
Bel Abbes	-	1500	Echangeurs d'ions	//
Haoud Berkaoui	1	55	Electrodialyse	1979
Hassi Messaoud	2	300	//	//
Rhoud El Baguel	1	25	//	//
Arzew	1	960	Multi flash (5 étages)	//
Annaba	2	144	Echangeurs d'ions	//
Annaba	2	576	//	//
Hassi Rmel	3	792	Osmose inverse	//
Annaba	2	6240	Echangeurs d'ions	1980
Ghardaia	-	960	Osmose inverse	//
Arzew	1	960	Multi flash (6 étages)	//
Mostaganem	-	57600	Osmose inverse (6lignes)	//
Rhoud El Baguel	2	300	Electrodialyse	1981
Biskra	-	864	Osmose inverse	//
Annaba	1	1800	Echangeurs d'ions	//
Reghaia	-	160	//	1982
arzew	1	1200	Compression vapeur	//

Tableau .I. 2 .Différentes installations en Algérie. [27]

1.4.2. Les ressource en eau en Algérie

En moyenne cent milliards de m³ d'eau précipite annuellement sur le nord de l'Algérie, 150 millions de mètres cubes seulement alimentent les nappes phréatiques. Le reste, soit 850 millions de mètres cubes s'évapore dans l'atmosphère. Les potentialités en eaux superficielles de l'Algérie sont estimées à environ 13 milliards m³ dont 11.5 milliards de m³ dans les bassins côtiers et 627 millions de m³ dans les bassins sahariens et 733 millions de m³ dans les hautes plaines. Pour ce qui est des eaux souterraines, elles sont estimées à 1.8 milliards de m³ dans le Nord.

Les ressources mobilisables totales en eau de surface sont évaluées à 5.7 milliards de m^3 dans le sud du pays.

D'autres ressources non négligeables peuvent être mobilisées pour l'agriculture. Par exemple, il s'agit de traitement des eaux usées dont le volume est d'environ 600 millions de m^3 .

Si toutefois les stations d'épurations sont fonctionnelles. L'eau de mer dont 15 millions de m^3 sont traitées annuellement par des unités de dessalement installées au long du littoral [28].

1.4. 3. Capacité installée

L'expérience Algérienne, dans le dessalement remonte aux années 60. La première installation a été implantée à Hassi Messaoud pour le traitement des eaux saumâtres parla SONATRACH. Vers le milieu des années 70, on avait prévu de réaliser une centrale électrique à Marsat El-Hadjadj, près d'Arzew utilisé pour alimenter une usine de dessalement de 800 m^3/j soit près de 30 millions de m^3 /an. Cette eau devrait subvenir aux besoins des unités de la zone industrielle d'ARZEW (ZIA).

Au début des années 80, la sécheresse qui sévissait en Oranais, mis en danger le fonctionnement de la ZIA. En 2002, la sécheresse a menacé sérieusement les ressources en eau, où les réserves avaient atteint un niveau alarmant. Pour faire face, plusieurs petites unités ont été installées un peu par tout.

Actuellement 23 stations « monobloc » d'une capacité totale de 57500 m^3/j sont installées presque dans toutes les wilayas de la bande côtière, d'attendre 52 en 2010.

Une dizaine de grosses unités plus de 50000 m^3/j installées dans les grandes villes (Hamma 200000 m^3/j , Arzew 90000 m^3/j). Le site le plus important à Hamma la plus grosse unité de dessalement en Afrique par procédé d'osmose inverse mise en fonction en février 2008 qui répond à 25% des besoins domestiques en eau de la capitale. D'autres stations sont en cours de réalisation (Jijel 50000 m^3/j , El- Kala 50000 m^3/j , Ain Timouchent 150000 m^3/j , Annaba 100000 m^3/j). D'atteindre le volume de 1040000 m^3/j en 2009.

La quantité d'eau dessalée en Algérie est estimée à 60 millions m³ (dans le monde arabe 4537 millions de m³), [28].

Numéro	Localisation	Capacité m ³ /j	Population à servir	L'année mise en service
01	Hamma	200000	1333.320	1 ^{er} trimestre 2008
02	Kahrana	90000	540000	3 ^{ème} trimestre 2005
03	Skikda	100000	666.660	2 ^{ème} trimestre 2007
04	Beni- Saf	150000	999.990	3 ^{ème} trimestre 2007
05	SoukTleta	100000	666.660	1 ^{er} trimestre 2007
06	Mostaganam	100000	666.660	3 ^{ème} trimestre 2007
07	Zéralda	100000	666.660	1 ^{er} trimestre 2008
08	Cap Djinet	100000	666.660	2 ^{ème} trimestre 2008
09	JJijel	50000	333.330	1 ^{er} trimestre 2009

Tableau .I. 3 . Stations «monobloc» en Algérie [29].

1.4.4. Les avantages et les inconvénients de dessalement de l'eau de mer en Algérie :

Le dessalement d'eau de mer est un moyen moderne pour avoir de l'eau. C'est l'une des techniques les plus utilisées pour permettre de produire de l'eau non conventionnelle afin de pouvoir pallier les déficits constatés par rapport à la disponibilité de l'eau conventionnelle [30].

Les principaux avantages du procédé de dessalement sont :

- L'Algérie dispose d'un littoral de 1200 km.
- L'utilisation de l'eau de mer qui est une ressource pratiquement non polluante et inépuisable.
- La population ainsi que l'industrie à grande consommation d'eau se trouvent à proximité de la mer.
- Le domaine de dessalement de l'eau de mer a connu ces dernières années une avancée technologique remarquable grâce au développement de différents procédés (l'osmose inverse).
- Une importante demande en eau se situent à proximité de la côte ce qui réduit davantage les prix de revient d'eau.

L'un des grands avantages de dessalement d'eau de mer est la sécurisation de l'alimentation en eau (potable ou industrielle) des différents consommateurs, car cette ressource n'obéit pas aux aléas climatiques et elle permet donc de produire d'une manière permanente les quantités voulues, des quantités journalières qui dépassent les 200 000m³/j, [30].

Malgré que le dessalement de l'eau de mer apporte une réponse aux besoins d'eau (domestique et industrielle), quelque soit le procédé utilisé il n'est pas sans inconvénients :

- ✓ Les installations de dessalement coûtent cher et elles se caractérisent par leur grande consommation énergétique ;
- ✓ Ces installations dégagent des gaz à effet de serre, ce qui provoque le réchauffement climatique ;
- ✓ Elles détruisent les zones côtières ;
- ✓ Elles bouleversent les écosystèmes, car elles rejettent des déchets appelés saumure (de l'eau fortement salée), certaines espèces ou végétations sont très sensibles à la salinité ;
- ✓ Présence de traces de métaux lourds échappés des installations ;

Les rejets associés aux unités de dessalement comme les eaux provenant du nettoyage (filtres à sable, membranes et dépôts) contaminent le milieu, [30].

1.4.5. Aboutissement du dessalement dans le pays

L'implantation d'usine de dessalement, selon la démarche utilisée par l'Algerian Energy Company, a plusieurs aspects, nous citons notamment :

- Economique :
- Non-recours à la garantie de l'Etat pour le montage de ces projets ;
- Participation étrangère majoritaire dans le capital de la société de projet ;
- Participation à l'absorption du déficit en eau au niveau national ;
- Libérer les quantités d'eau utilisées par la population et l'industrie à l'agriculture, ce qui nous permettra d'améliorer les rendements et, par voie de conséquence, l'autosuffisance alimentaire ;

- Création d'emploi pendant la réalisation et pendant l'exploitation de ces usines ;
- Création de nouveaux métiers (spécialistes en dessalement).
- Social :
 - Rendre l'eau disponible d'une manière permanente pour satisfaire les populations
 - Amélioration de la qualité de vie de la population et l'hygiène ;
 - Participation au bien-être de la population.
- Technologique :
 - Transfert des technologies de dessalement évident ;
 - Amélioration de la recherche et du développement dans ce domaine en vue d'atteindre d'autres performances.
- Environnemental :
 - Préserver nos réserves d'eau albiennes et, par voie de conséquence, préserver l'avenir des générations futures ;
 - Améliorer le cadre de vie ainsi que celui de l'environnement car la technique utilisée maîtrise les différentes émissions qui peuvent provenir de ces usines [30].

1.4.6. Soulagement de la demande en eau

Du fait que les stations de dessalement seront installées tout au long du littoral, l'eau potable livrée par ces stations peut être utilisée pour couvrir les besoins des régions côtières et, par conséquent, les autres ressources non conventionnelles seront mobilisées pour satisfaire la demande se situant à l'intérieur du pays.

D'autre part, le dessalement d'eau de mer est une source inépuisable qui permet d'avoir une alimentation continue en eau de consommation (domestique et industrielle), [30].

1.5. Caractéristiques hydrodynamiques – mouvement de l'eau en mer

1.5.1. Les vents

Parmi les différents facteurs responsables de la dispersion des matières en suspension et de la contamination des mers, le vent occupe la place principale. En effet,

le vent contribue énormément à la poussée de la matière en suspension vers la côte créant des zones où s'entassent différents objets d'usage domestique rendant la côte impropre aux loisirs, [31].

1.5.2. La houle

La houle est une oscillation de la partie superficielle d'un plan d'eau, générée initialement par le vent. Elle se propage plus ou moins régulièrement jusqu'à l'approche des côtes où elle subit des modifications par réfraction, diffraction et déferlement, [32]. L'intérêt principal des études de houle, est surtout l'action de celle-ci sur le littoral.

Arrivant au voisinage de la côte, la houle par les mouvements oscillatoires des particules d'eau qu'elle entretient au voisinage du fond met le matériau côtier suffisamment fin en agitation. Donc un transport est possible, [33].

L'étude de Benslama, [33] fait ressortir une nette répartition saisonnière des directions de propagation :

- ✓ En période hivernale (Novembre à Février), les directions dominantes sont relevées dans les secteurs d'Ouest à Nord-Ouest.
- ✓ En période estivale (Avril à Septembre) ce sont les houles d'Est et de Nord-Est qui sont de loin les plus fréquentes.

1.5.3. Les marées

On sait qu'en méditerranée, d'une façon générale l'amplitude de marées est tellement faible qu'elle peut être pratiquement considérée comme nulle, [31]. En effet, sur le littoral Algérien, l'amplitude de la marée est de l'ordre de 30 cm, valeur trop faible pour créer un courant de marée [34].

1.5.4. Caractère physique des eaux de mer

1.5.4.1. Température

Les résultats de la campagne « MEDIPROD V-2 », indiquent une fluctuation verticale et temporelle de la température des eaux, valeurs oscillant en moyenne entre 14,5°C en surface et 13°C à des profondeurs de 800 mètres. Le refroidissement est remarqué sur

toute la colonne d'eau avec une diminution sensible à partir de 400 mètres d'immersion pour atteindre 12,96°C à 800 mètres [35].

1.5.4.2. Salinité

La valeur de la salinité est le résultat du bilan de précipitation et d'évaporation du fait des faibles précipitations et d'une grande évaporation. Ce bilan est négatif pour la méditerranée.

En général, elle emprunte à l'Atlantique l'eau en déficit à travers le détroit de Gibraltar, [36].

Pour la région d'ARZEW, elle est comprise entre 32 g/l et 33g/l en mois d'hivers et de 37g/l et 38g/l en mois d'été, et la répartition verticale des salinités montrent un accroissement de ces dernières de la surface vers le fond.

1.6. Complexe de Dessalement d'eau de mer et Production d'électricité d'Arzew station KAHRAMA



1.6.1. Localisation de la station KAHRAMA

La station de dessalement de KAHRAMA de la région d'Oran est localisée à 40 km de l'Est d'Oran. Elle est basée sur le principe de Multi Flash. Cette station a été mise en service pour satisfaire les besoins en eau potable d'une grande capacité de 90000 m³/j.

Elle est conçue pour traiter l'eau de mer provenant en bordure de la mer méditerranéenne. La conception de la station de KAHRAMA est installée dans un endroit bien choisi. La prise en pleine mer est utilisée pour alimenter la station. [37].

Voici la description des composants principaux de l'usine :

- ✚ Centrale électrique : Générateur à turbine à gaz, système de gaz combustible, Chaudière (HRSG), Transformateur principal ;
- ✚ Usine de dessalement : Réchauffeur de saumure, prise d'eau de mer, rejet de saumure, bacs d'eau ;
- ✚ Autres : Système de déversement de vapeur, système d'alimentation d'eau, etc.

Le plan d'implantation de l'ensemble de l'usine figure sur la page suivante.

1.6.2. Système de dessalement

Le système de dessalement consiste en 03 unités identiques de dessalement, et les systèmes communs qui comportent le système de nettoyage par acide, les filtres de charbon activé et le système de traitement d'eau dessalée. [37].

1.6.3. Unité de dessalement

Chaque unité de dessalement produit l'eau distillée à taux de 29.629 m³/jour avec la qualité de 5ppm TDS en moyenne. La plupart d'eau produite est traitée pour être potable, et le reste d'eau non-traitée est utilisé pour l'eau d'appoint de chaudière et d'autres utilisations.

1.6.4. Description de système de la station KAHRAMA

- ❖ Principe de dessalement par "détente (Flash)"

Mettre en œuvre ce phénomène au maximum, l'évaporateur à détente de multi-étage (Multi-Stage Flash) est divisé en un certain nombre d'étages dont chacun est à pression successivement plus basse. Ces pressions respectives sont maintenues par le système de vide.

La pompe d'eau de mer, refoule l'eau de mer à travers les condenseurs en passant par les filtres d'eau de mer, une partie de l'eau de mer est dérivée avant d'entrer à la chambre d'eau du 17eme étage d'évaporateur, pour refroidir le système de recirculation de l'aspiration d'air. [37].

L'eau réchauffée, provenant des étages de rejet de chaleur 15,16 et 17, sera retournée à la mer. D'abord une partie de l'eau de mer chaude sera dérivée à la sortie de l'étage 15 pour être amenée au procédé comme eau d'alimentation, elle remplace la saumure.

L'eau d'alimentation sera mélangée par le réservoir de produits chimiques. Ensuite elle est dégazée dans le 17eme étage d'évaporation par le vide se trouvant dans celui-ci, pour écouler ensuite dans la tuyauterie cotée aspiration de la pompe de recirculation, en se mélangeant avec la saumure de recirculation qui abandonnera le dernier étage de l'évaporateur. [37].

La saumure de recirculation est refoulée à travers le faisceau de tubes du condenseur des étages de récupération de la chaleur 1 à 14 de l'évaporateur, et réchauffée par la chaleur d'évaporation de la vapeur condensable de chaque étage. Du dernier condenseur d'évaporateur la saumure coule vers le réchauffeur final, ou elle est portée à la température maximale prévue.

Le réchauffeur final sera chauffé par l'eau de la chaudière. La pompe de recirculation fait circuler l'eau chaude à travers un circuit fermé.

La saumure chaude de recirculation sera amenée au premier étage d'évaporation, la pression dans la première chambre de détente est un peu plus réduite que la pression de saturation qui correspond à la température de la saumure entrant, de manière qu'une partie de la saumure s'évapore.

La vapeur ascendante coule à travers un séparateur d'humidité et se condense finalement sur les parois des tubes du condenseur dans la partie supérieure de l'étage d'évaporation.

Au fond de l'étage, la saumure coule par des passages spéciaux vers la prochaine chambre de détente ou la pression est encore plus réduite que la pression de saturation,

qui correspond à la température de saumure ; par ce fait une partie de la saumure s'évapore de nouveau. Ce procédé se répète dans chaque étage.

Le distillat goutte des parois des tubes dans les cuves à distillat existant dans chaque étage, ensuite il coule d'un étage à l'autre par les orifices de passage, pour être finalement évacué au dernier étage par la pompe de distillat.

Une partie de la saumure concentrée sera refoulée par la pompe de saumure du dernier étage au canal de saumure tandis que la partie principale de la saumure coule vers la pompe de recirculation. Les gaz non condensables, seront évacués par une pompe d'éjection de vapeur et par une pompe d'éjection d'eau [37].

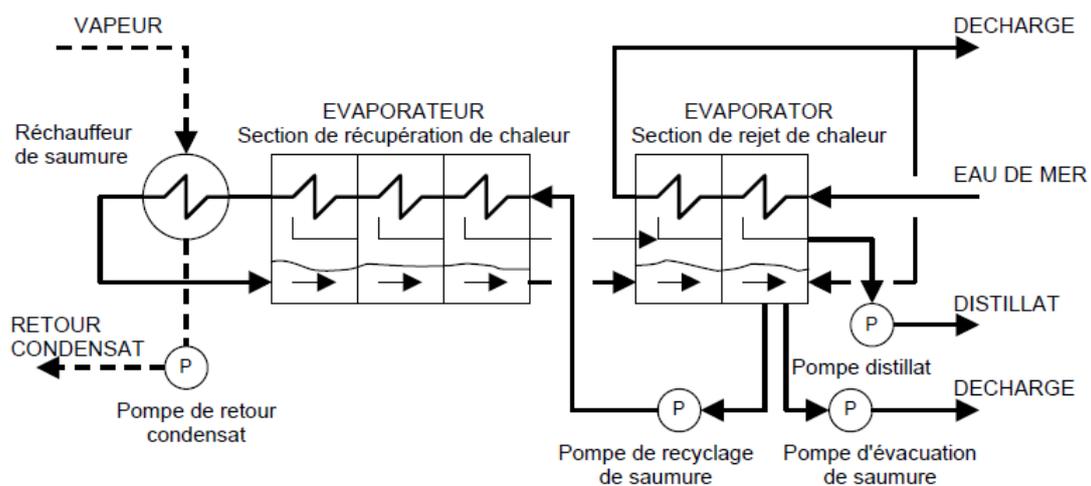


Figure 1.10 Schéma simplifié d'évaporateur MSF [37].

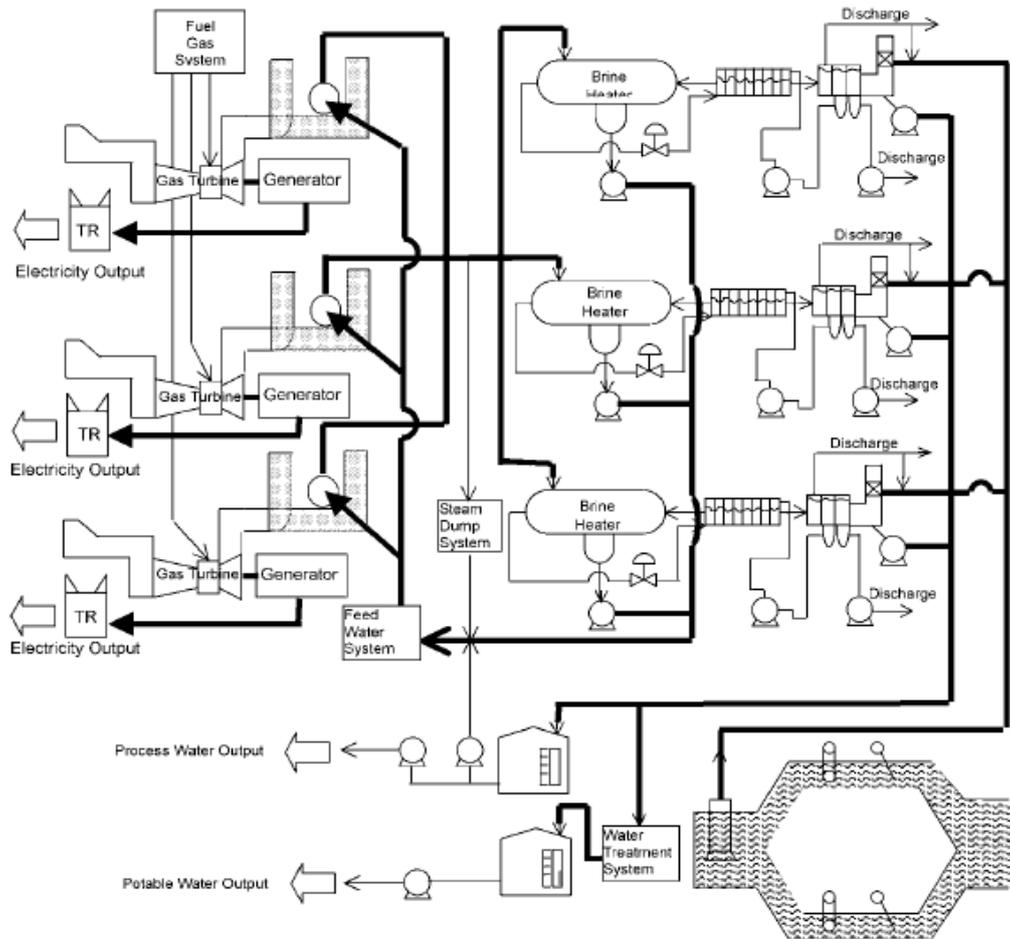


Figure 1.11 .Ensemble de l'usine KAHRAMA [37].

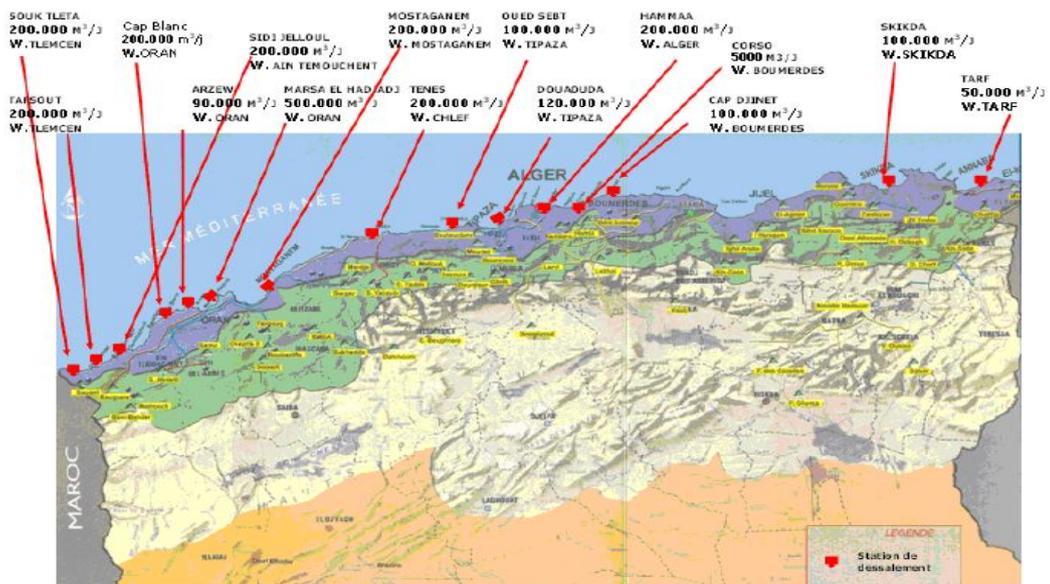


Figure 1.12 Situation géographique des stations de dessalement d'eau de mer [36].

1.7. Conclusion

La distillation, même si elle comporte quelques inconvénients où même si elle coûte assez chère est un procédé couramment utilisé pour le dessalement de l'eau de mer. C'est aussi un des plus connus et un des plus simples à reproduire. En effet, seule la source d'énergie est difficile à trouver.

En fin, nous pouvons affirmer que cette technique restera longtemps en 1ère place dans la catégorie « Dessalement d'eau de mer » jusqu'à la découverte d'un procédé plus performant et moins coûteux.

Dans le chapitre qui va suivre nous allons nous étaler plus amplement sur la technique dite Multi-flashing.

Chapitre 2

Analyse Détaillé De La Technique De Dessalement Multi Flashing

2.1. Introduction

La distillation par détentes successives est apparue en 1960 pour essayer de résoudre les problèmes de la distillation à effets multiples. En effet, 60% des usines de dessalement utilisent le MSF grâce à sa simplicité de fonctionnement et d'exploitation. Le procédé de cette méthode est assez simple.

La distillation flash est la production de vapeur par une soudaine réduction de pression dans un liquide chaud se trouvant initialement aux alentours de sa température d'ébullition. En réduisant la pression, on réduit la température, ce qui provoque la réduction de la chaleur sensible dans le liquide et l'on dispose d'énergie pour la production d'une petite quantité de vapeur.

2.2. Technologie

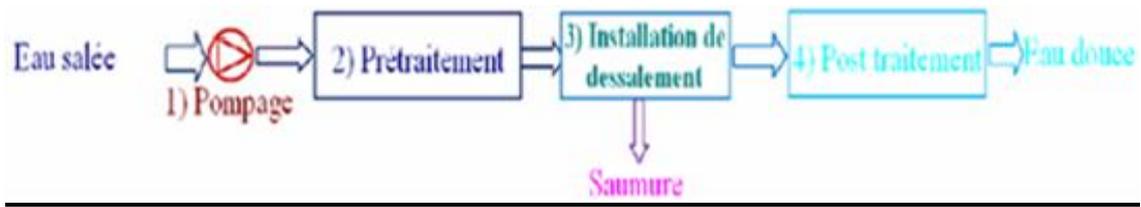


Figure. 2. 1 .Schéma général d'une installation de dessalement (source : Maurel A.2006)

2.3. Les Procédés

Pour dessaler l'eau il existe diverses techniques, certaines sont plus adaptées à un environnement donné que d'autres. Actuellement on utilise cinq techniques regroupées en deux familles : les procédés de distillation et les procédés membranaires. Les deux fonctionnent selon le même principe général.

2.3.1. L'alimentation en eau de mer

Peut s'effectuer soit par prise directe, soit par puits côtiers. Ce dernier système permet d'obtenir une eau non turbide, ce qui soulage les prétraitements.

2.3.2. Le prétraitement

- a. Chloration : Bloque la prolifération des organismes vivants. Evite l'obstruction des conduites.
- b. Filtration : Protège les pompes et assure le bon fonctionnement des pulvérisateurs.
- c. Antitartre : La distillation favorise précipitation du carbonate de calcium qui se dépose sur la paroi des échangeurs et réduit le transfert de chaleur.

2.3.3. Installation de dessalement

- a. Procédés de distillation : L'eau de mer chauffée produit de la vapeur d'eau qu'il suffit de condenser pur obtenir de l'eau pure.
- b. Procédés membranaires : L'eau et les sels dissous sont séparés au moyen de membranes sélectives.

2.3.4. Le post-traitement

Permet de potabilité l'eau en 2 étapes (en sortie de l'unité de dessalement, l'eau n'est pas potable car elle est déminéralisée).

- Correction de la corrosivité : le traitement consiste à ajouter du Ca(OH)_2 CaCO_3 .
- Désinfection finale : bien que certains procédés (osmose inverse) retiennent tous les microorganismes, il est nécessaire d'assurer une désinfection à la sortie de l'usine.

2.4. Prise d'eau de mer et système de rejet

Le système de prise d'eau de mer fournit l'eau de mer filtrée et chlorite à :

- Unités de dessalement
- Système d'eau de refroidissement
- Système d'eau d'incendie
- Système d'électro chloration .Le système d'émissaire de rejet décharge l'eau de mer, la saumure et les effluents à la mer, provenant de :
- Unités de dessalement
- Système d'eau de refroidissement
- Système d'égout d'eaux générales
- Système d'égout d'eau huileuse (eau sans huile)
- Système d'égout d'eau chimique (eau neutralisée)

2.4.1. La prise d'eau

L'exploitation d'une centrale thermique de grande puissance demande pour réduire la chaleur résiduelle d'importantes quantités d'eau de refroidissement, les besoins de la centrale de KAHRAMA s'élèvent à $30\text{m}^3/\text{s}$. Cette eau est prélevée de la mer à 7m de profondeur. La prise d'eau se trouve à 900m du côté, l'arrivée de l'eau à la station de pompage se fait par trois canaux en béton d'un diamètre de 2.7m, [37].

2.4.2. Système de filtrage d'eau de mer

Le système de filtrage d'eau de mer est composé de deux (02) lignes de grillage; chaque ligne est pourvue d'un crible à grosses mailles pour la canalisation de prise d'eau de mer, des batardeaux, d'un mécanisme de dégrilleur et d'un filtre à chaîne. Chaque dégrilleur est composé d'une grille à barreaux et d'un mécanisme de dégrilleur équipé d'un système indépendant de détecteur de perte de hauteur. Le filtre à chaîne est

composé d'une bande de panneaux de tamisage suspendu au niveau de deck sur un arbre entraîné et équipé d'un dispositif indépendant de mesure de perte de hauteur.

Le système d'eau de lavage est composé de deux pompes (2X100%); chacune est dimensionnée pour envoyer l'eau à deux filtres à chaîne simultanément. L'opération est commandée en mode "LOCAL" par le tableau de commande local et les boîtes de commande, ou en mode "A DISTANCE" par DCS.

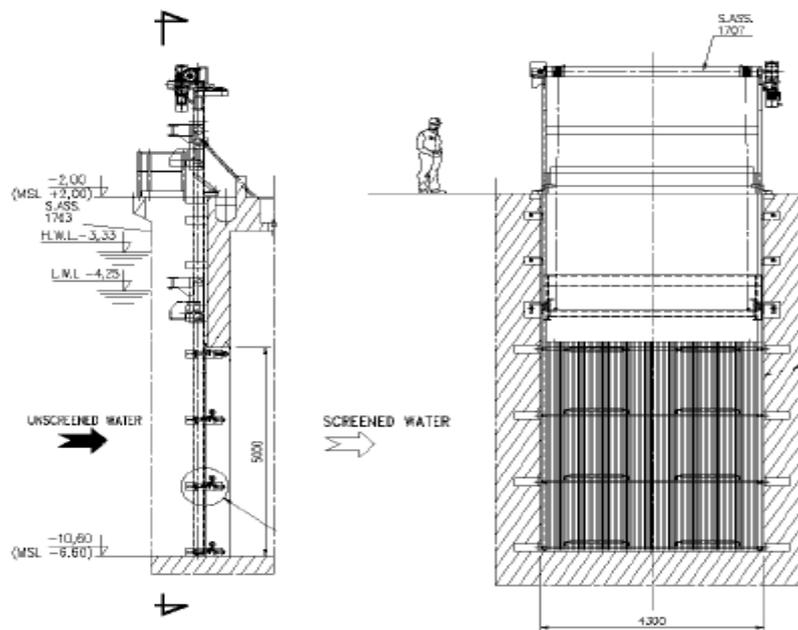


Figure. 2. 2 .Dégrilleur

2.4.3. Système de pompage d'eau de mer

Le système de pompage d'eau de mer est composé des pompes suivantes :

- 4 pompes alimentaires d'eau de mer (l'une est en réserve avec capacité 100%)
- 2 pompes d'eau de mer de refroidissement (l'une est en réserve avec capacité 100%).

Les pompes alimentaires d'eau de mer fournissent l'eau de mer aux unités de dessalement comme eau de refroidissement. La pompe d'eau de mer de refroidissement fournit l'eau de mer au refroidisseur d'eau de mer de refroidissement. L'eau de mer venant des unités de dessalement et du refroidisseur d'eau de refroidissement est retournée à la mer à travers le ponceau de rejet.

2.4.4. Système de pompes d'eau de mer d'incendie

Le système d'eau de mer d'incendie est composé de :

- 1 pompe d'eau de mer d'incendie (entraînée par moteur électrique)
- 1 pompe d'eau de mer d'incendie (entraînée par moteur diesel)

Les deux pompes (entraînées par moteur électrique et diesel respectivement) démarrent automatiquement et séquentiellement lors que la pression du réseau d'incendie chute au-dessous de valeur de consigne. Les temporisateurs séquentiels réglés à l'intervalle de 5 à 10 secondes sont prévus dans chaque contrôleur pour empêcher le démarrage simultané des deux pompes. [37].

2.4.5. Injection des produits chimiques

Les systèmes d'injection des produits chimiques ont pour but de protéger l'installation de dessalement d'eau de mer contre l'entartrage (BELGARD de CIBA-GEITY à base de polymères maléiques est le plus utilisé, [37]), les salissures (l'acide chlorhydrique à 5% environ, [37]) et la formation de mousse (Belite à 0.1mg/l, [37]).

L'eau de mer, pour la centrale thermique, est traitée au chlore actif, ce procédé détruit les organismes se trouvant dans l'eau de mer.

Le contenu de chlore actif est mesuré et si sa teneur augmente, on ajoute le bisulfite de sodium (Na_2SO_3) dans l'eau de mer servant d'eau d'alimentation, ce qui neutralise le chlore, [37].

2.4.6. Système électro chloration d'eau de mer

Le système électro chloration d'eau de mer utilise l'eau de mer comme matière première pour produire l'hypochlorite de sodium (NaOCl) pour empêcher la croissance biologique et le tartrage dans l'eau de mer.

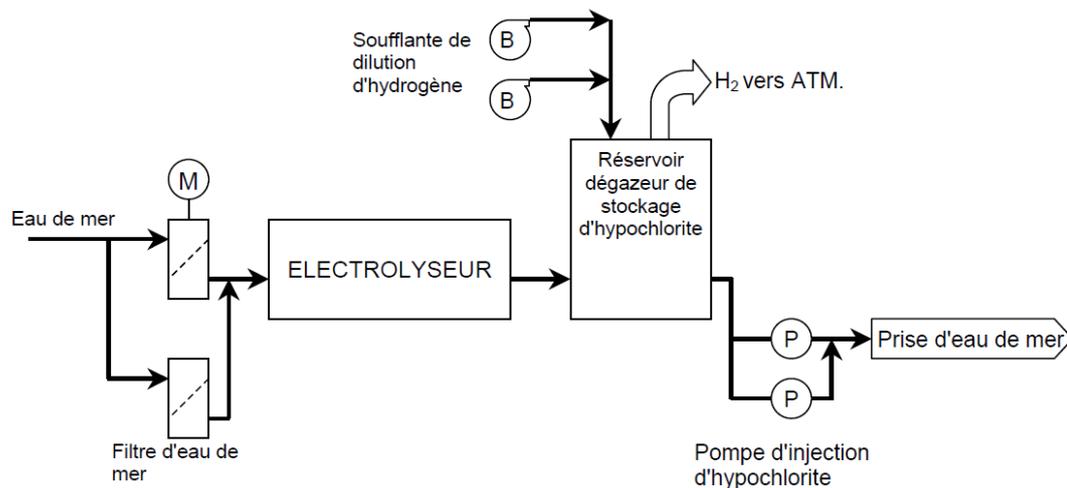


Figure. 2. 3.Schéma simplifié du système d'électro chloration d'eau de mer. [37].

2.4.7. Système d'émissaire de rejet

L'eau de mer déchargée et la saumure évacuée des unités de dessalement ainsi que l'eau de mer de refroidissement du refroidisseur d'eau de mer de refroidissement sont retournées à la mer à travers le ponceau d'émissaire de rejet. Les saumures sont rejetées dans à la mer le plus loin possible des côtes. Salinité et température: L'exposition continue à une plus forte salinité (1,5 à 2 fois celle du milieu) et à une température plus élevée (jusqu'à + 5°C) nuit à certaines espèces en favorise d'autres. [37].

2.4.8. Equipements de surveillance

La conception de base du fonctionnement d'évaporateur se base sur la télécommande et la télésurveillance, les instruments indicateurs pour le fonctionnement et la surveillance sont arrangés sur les pupitres de commande ceux-ci comprennent en outre des boutons- poussoirs et interrupteurs pour démarrer et arrêter l'installation, des instruments de réglage et de télé contrôle, ainsi qu'un système d'alarme et un diagramme d'ensemble. Additionnelle-ment on a placé des instruments sur les appareils, tels que indicateurs de pression, de température de niveau, de conductivité ainsi qu'un dispositif de sécurité pour la chaudière, [37].

2.5. Processus de distillation à étapes multiples flash(DF)

2.5.1. Description générale

Ce procédé dit Flash consiste à maintenir l'eau sous pression pendant toute la durée du chauffage ; lorsqu'elle atteint une température de l'ordre de 120°C, elle est introduite dans une enceinte (ou étage) où règne une pression réduite. Il en résulte une vaporisation instantanée par détente appelée Flash. Une fraction de l'eau s'évapore puis va se condenser sur les tubes condenseurs placés en haut de l'enceinte, et l'eau liquide est recueillie dans des réceptacles en dessous des tubes.

C'est l'eau de mer chaude qui se refroidit pour fournir la chaleur de vaporisation, l'ébullition s'arrête quand l'eau de mer a atteint la température d'ébullition correspondant à la pression régnant dans l'étage considéré. Le phénomène de flash est reproduit ensuite dans un deuxième étage où règne une pression encore plus faible. La vaporisation de l'eau est ainsi réalisée par détentes successives dans une série d'étages où règnent des pressions de plus en plus réduites. [37].

On peut trouver jusqu'à 40 étages successifs dans une unité MSF industrielle. Pour chauffer l'eau de mer jusqu'à 120°C, l'eau de mer circule d'abord dans les tubes des condenseurs des différents étages en commençant d'abord par le dernier étage où la température est la plus faible, elle est alors préchauffée en récupérant la chaleur de condensation de la vapeur d'eau.

Elle est finalement portée à 120 °C grâce à de la vapeur à une température supérieure à 120°C produite par une chaudière ou provenant d'une centrale de production d'électricité.

On remarque lors du phénomène de flash que des gouttelettes d'eau salée peuvent être entraînées avec la vapeur, elles sont séparées grâce à un dévésiculateur constitué par une sorte de grillage qui limite le passage des gouttelettes qui retombent alors au fond de l'enceinte.

L'avantage principal du procédé MSF est que l'évaporation de l'eau de mer ne se produit pas autour des tubes de chauffe puisque le liquide « flashe » ceci limite les risques d'entartrage. L'énergie requise est principalement l'énergie thermique à fournir à la chaudière, cette énergie peut être peu coûteuse si on récupère de la vapeur basse

pression à la sortie d'une turbine de centrale électrique. Il faut également fournir de l'énergie électrique pour les pompes de circulation de l'eau de mer.

Le procédé MSF ne permet pas une flexibilité d'exploitation. Aucune variation de production n'est tolérée, c'est pourquoi ce procédé est surtout utilisé pour les très grandes capacités de plusieurs centaines de milliers de m³ d'eau dessalée par jour.

Une MSF de petite capacité avec un ratio de performance 6 nécessite environ 70-80 kWh d'énergie thermique équivalente par kilo d'eau distillée produite, en plus d'une consommation électrique de 4-6 kWh/m³ pour le pompage et les systèmes auxiliaires. Une unité MSF de grande taille avec un PR de 9.5 consomme près de 38kWh/m³ d'énergie équivalente contre ≈ 4.5 kWh/m³ pour des unités SWRO de capacité similaire. Il est à noter qu'en convertissant l'énergie thermique en consommation électrique équivalente, le rendement de la conversion doit être pris en compte.

Doosan Heavy Industries & Construction a créé la plus grande unité d'évaporation multi flash (MSF) d'une capacité de 91 000 m³/jour pour l'usine de dessalement de Ras Al Khair en Arabie Saoudite. [37].

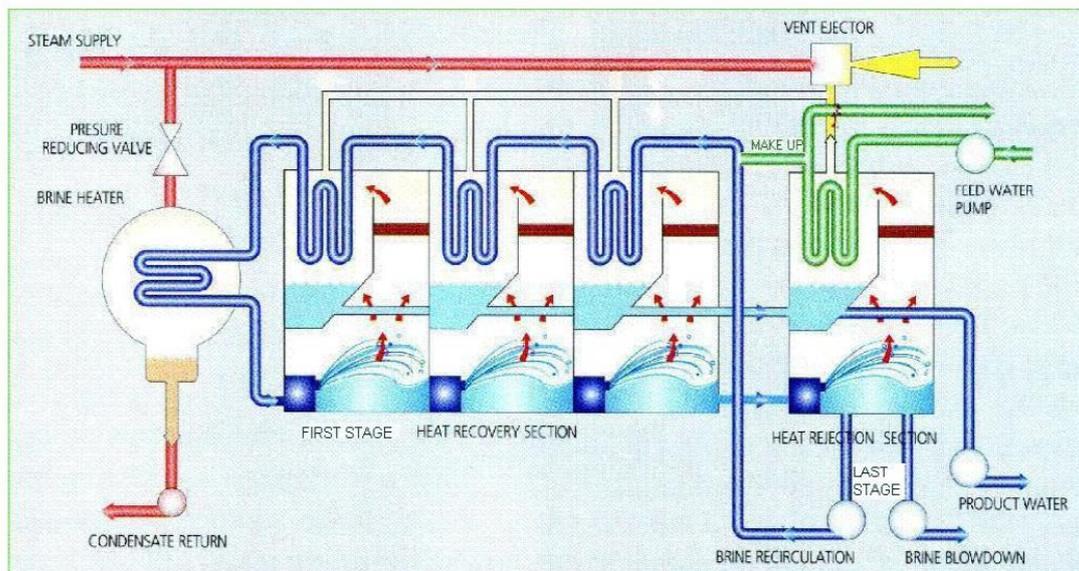


Figure. 2. 4.Schéma de procédé d'une unité MSF simple [40].

2.5.2. Parties d'une installation

Le diagramme de flux d'un système DF comprend les sections suivantes:

- Prétraitement ;
- Distillation flash ;
- Chaudière principale ;
- Éjecteurs à vide.

2.5.3. Prétraitement

Le prétraitement des eaux d'alimentation d'une unité DF se compose de :

2.5.3.1. Filtration

Élimination de la matière en suspension au moyen d'une filtration. Dans une station DF, le type de filtres le plus utilisé est du type DUPLEX ; on utilise également des filtres à panier avec un diamètre de trous inférieur à 10mm.

2.5.3.2. Réglage du pH

Le pH de l'eau de mer est relativement élevé, ce qui facilite la précipitation des sels peu solubles principalement des carbonates et des sulfates de calcium. En faisant diminuer le pH par l'addition d'un acide, principalement sulfurique, on peut travailler à de plus grandes concentrations sans risque d'incrustations.

Dans la plupart des installations, on réalise l'addition d'acide sulfurique concentré de façon continue jusqu'à obtention d'un pH dans l'eau d'alimentation.

2.5.3.3. Traitement désincrustant

Pour éviter la précipitation de sels à l'intérieur des tubes de condensation, on ajoute à l'eau d'alimentation un produit désincrustant à base de polyphosphates.

2.5.3.4. Dégazage et désaération

Avant de l'introduire dans le corps de l'évaporateur on doit éliminer du courant liquide de circulation les gaz dissous (CO₂, etc.). Le système d'élimination préliminaire des gaz consiste en une tour où l'eau est distribuée par un système d'aspersion sur un joint. Une fois saturée d'air, on fait passer cette eau par une tour où se produit la désaération par la création d'un vide avec des éjecteurs de vapeur

2.5.3.5. Evaporateur DF

Le système d'évaporation se compose d'un nombre de sections ou étapes. Les plus chaudes sont dénommées de récupération de la chaleur et les plus froides de rejet de la chaleur. Les sections de rejet de la chaleur se trouvent à la fin du processus. Ces étapes se refroidissent directement avec de l'eau de mer. On y élimine la chaleur absorbée dans les étapes précédentes du système.

D'autre part, les sections de récupération de la chaleur constituent le cœur de la Station et ce sont celles qui reçoivent l'eau chauffée au préalable dans la chaudière principale. Au cours de ces étapes, la condensation a lieu également dans les tubes qui passent dans la partie supérieure des chambres. [37].

2.5.3.6. Chambres d'évaporation

Chaque étape consiste en une chambre d'évaporation sous un banc de tubes de condensation. Dans la chambre, il se produit un certain degré de vide où a lieu l'évaporation. Le vide dans chaque chambre se maintient grâce à une fermeture hydraulique. L'alimentation est introduite dans l'étape à travers un orifice qui sert à rabaisser la pression au-dessous de la valeur de saturation correspondante à la température en amont de l'orifice.

Cette chute de pression donne lieu au refroidissement du courant d'eau d'alimentation et à la production simultanée d'une petite quantité de vapeur, le courant liquide se trouvant à une pression inférieure à la pression de vaporisation correspondante à sa propre température. En d'autres mots, à chacune des étapes, le liquide rencontre une pression inférieure à celle de l'équilibre et donc, une partie du liquide s'évapore en faisant descendre la température du liquide jusqu'à ce qu'elle corresponde à la température de saturation de l'étape.

La vapeur produite par cette évaporation instantanée à chaque étape, se condense autour des tubes de condensation par lesquels circule comme liquide réfrigérant l'eau salée qui se chauffe au fur et à mesure qu'elle passe d'étape en étape.

La vapeur passe par un éliminateur de gouttes ou "demister" avant sa condensation. Le condensé de chaque étape se récupère et passe à l'étape suivante, de telle façon que la température du condensé descend progressivement, et cède en même

temps une petite quantité de chaleur à l'eau dans des étapes de plus en plus froides. Donc, à chacune des étapes, circulent les courants de:

- Courant de circulation d'eau de mer froide à l'intérieur des tubes du condensateur depuis les étapes froides, ou de rejet de la chaleur, à l'étape la plus chaude. Le débit est constant et la température augmente par absorption l'énergie latente de condensation de la vapeur qui se condense à l'extérieur des tubes.
- Courant d'alimentation d'eau de mer depuis la chaudière principale jusqu'à la dernière étape de rejet de chaleur, par l'extérieur des tubes, tout au long des différentes sections. Au fur et à mesure qu'une partie de l'eau salée se transforme en vapeur, le débit et la température du courant circulant diminuent.
- Courant de condensé est récupéré dans des plateaux et traverse les successives étapes de la première à la dernière. Le débit augmente à chacune des étapes avec la vapeur condensée.

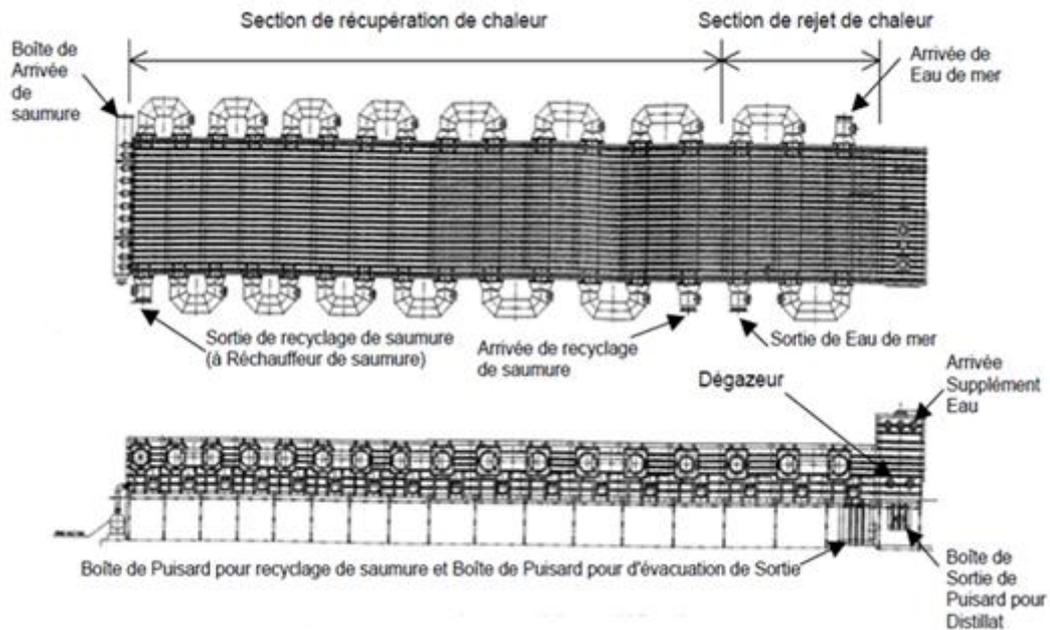


Figure. 2. 5.Évaporateur et Dégazeur

2.5.3.7. Étapes de Rejet de la Chaleur

Ces étapes se trouvent à la fin de l'unité. C'est par elles qu'entre l'eau froide dans les tubes de la partie supérieure des chambres. Dans ces tubes circule un plus haut débit

d'eau de mer que dans les étapes de récupération postérieure puisqu'on y incorpore une certaine quantité d'eau de mer (80% du débit) qui refroidit la chaleur apportée dans une autre partie de l'unité. Le reste (20%) se mélange avec le courant d'alimentation et entre à nouveau dans la chaîne des étapes de récupération de chaleur par l'intérieur des tubes de condensation

2.5.3.8. Étapes de Récupération de Chaleur

Les chambres des étapes de récupération de chaleur sont identiques à celles de rejet de chaleur. Les eaux qui y circulent par la partie supérieure dans les tubes de condensation augmentent de température au fur et à mesure qu'elles permettent la condensation dans les différentes étapes. Tandis que la partie qui descend des chambres circule en direction contraire de celle de l'eau chauffée au préalable dans la chaudière principale et qui, par conséquent, baisse de température à chaque étape. Le flash se produit par le vide correspondant qui existe entre chaque chambre.

2.5.3.9. Chaudière principale

C'est un échangeur de chaleur entre l'eau à la sortie du condenseur de la section de récupération de chaleur et la vapeur provenant d'une source extérieure. L'eau absorbe la chaleur cédée par la vapeur extérieure en se condensant et atteint sa température maximale.

2.5.3.10. Ejecteurs à vide

Dans les étapes "flashing", on obtient le vide au moyen des éjecteurs de vapeur. Pour simplifier le contrôle de sortie de vapeur, on utilise deux soupapes pour chaque étape situées aux bouts et connectées extérieurement. Au démarrage, on utilise un éjecteur à amorce. Le niveau de vide à chaque étape est calculé selon la température de l'eau de circulation et la perte de pression provoquée par les éléments de « flash ».

Les éjecteurs à vide se composent d'un venturi qui crée lorsque circule de la vapeur une dépression dans l'orifice de sortie de la chambre qui extrait les gaz de son intérieur. Dans les installations industrielles on le place habituellement à chaque 2 ou 3 étapes. La différence de vide entre étapes se maintient au moyen d'une fermeture hydraulique dans le circuit d'eau salée en évaporation.

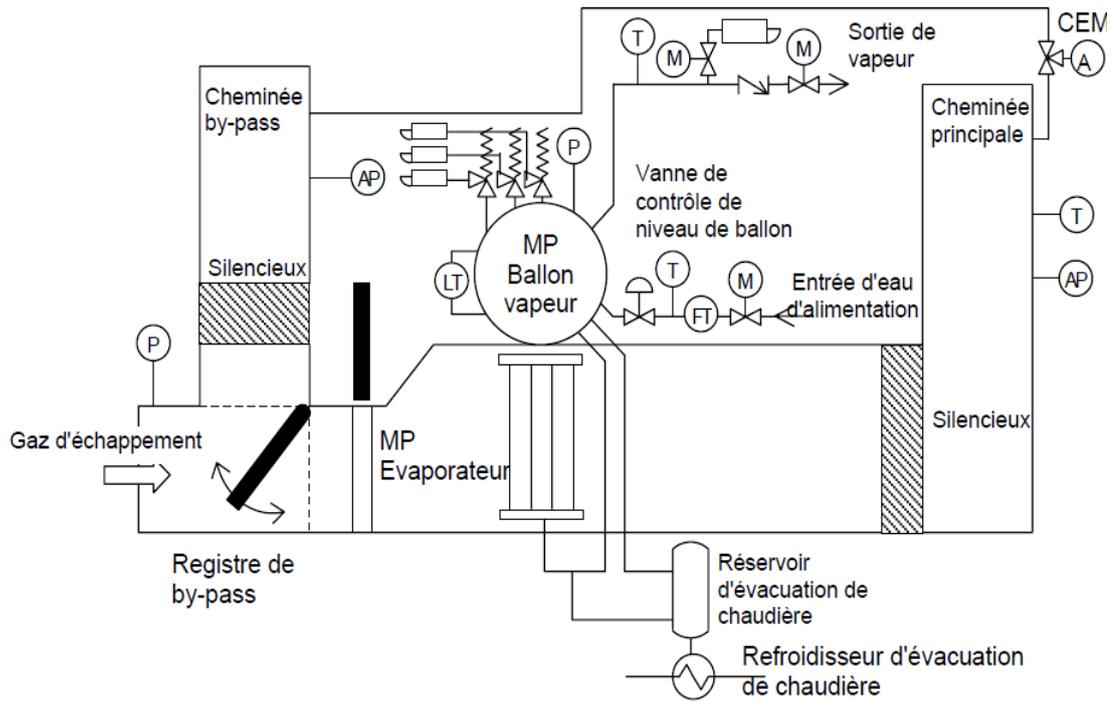


Figure. 2. 6.Schéma des unités de chaudière (HRSG) [37].

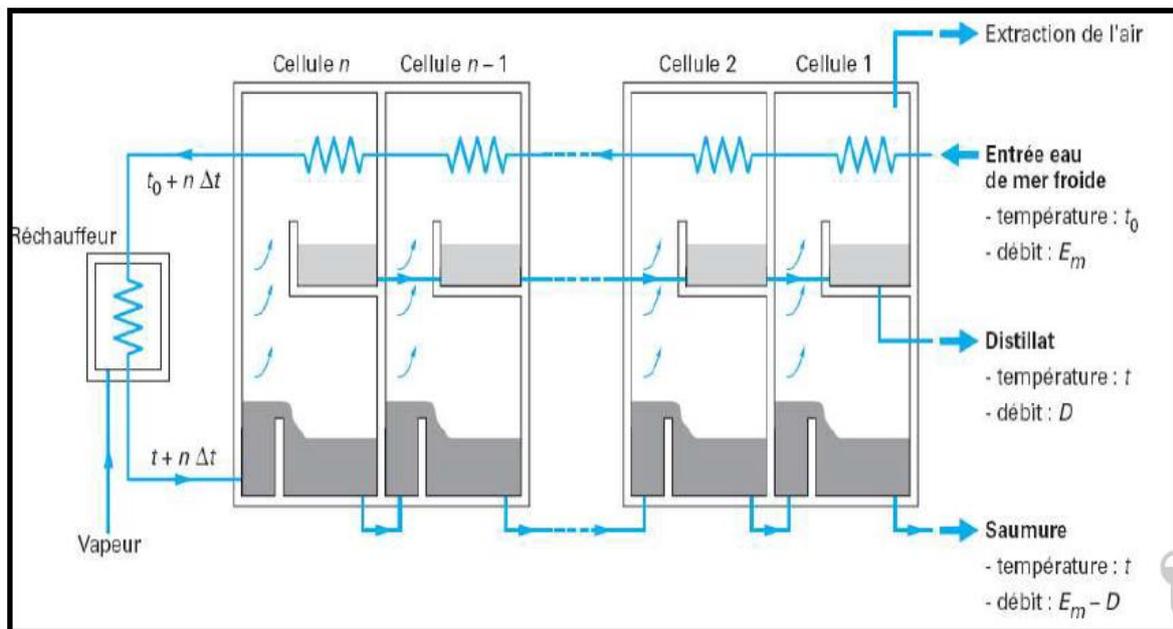


Figure. 2. 7 .Distillateur par détente successive (Source : Danis P., 2003)

2.6. Comparaison

Les tableaux suivants permettent de comparer le coût de l'eau produite selon la technique, à une capacité donnée (Indépendamment de la source d'énergie). On voit nettement l'effet de la capacité sur le coût final. L'effet d'échelle est important.

		Capacité (m3/jour)		10000	
Technologie		OI (eau saumâtre)	OI (eau de mer)	MSF	MED
Investissement (€/m3/jour)		575	1427	3408	2023
Coût de l'eau (€/m3)		0.27	0.67	1.40	0.83
		Capacité (m3/jour)		50000	
Technologie		OI (eau saumâtre)	OI (eau de mer)	MSF	MED
Investissement (€/m3/jour)		376	1050	2122	1539
Coût de l'eau (€/m3)		0.18	0.50	0.87	0.63
		Capacité (m3/jour)		275000	
Technologie		OI (eau saumâtre)	OI (eau de mer)	MSF	MED
Investissement (€/m3/jour)		241	756	1286	1153
Coût de l'eau (€/m3)		0.11	0.36	0.53	0.48
		Capacité (m3/jour)		500000	
Technologie		OI (eau saumâtre)	OI (eau de mer)	MSF	MED
Investissement (€/m3/jour)		206	676	1078	1042
Coût de l'eau (€/m3)		0.10	0.32	0.44	0.43

Tableau. 2. 1. Wittholz M.K. et al, 2008 ; Frioui S., Oumeddour R., 2008. [38].

Le dessalement est un processus très consommateur d'énergie. Pour le MED et les usines MSF, l'énergie principale est sous forme de chaleur, mais un peu d'énergie électrique est exigée pour les pompes et les auxiliaires.

Comparaison des procédés	MSF	MED	MED-TVC	MVC	OI
Température de fonctionnement (°C)	< 120	< 70	< 70	< 70	< 45
Principale source d'énergie	Thermique	Thermique	Thermique	Mécanique (via électricité)	Mécanique (via électricité)
Consommation thermique (kWh/m ³)	12	6	21	Pas applicable	Pas applicable
Consommation électrique (kWh/m ³)	3.5	1.5	1.5	8-14	4-7
Salinité de l'eau brute (g/l)	30 – 100	30 – 100	30 – 100	30 – 50	1 – 45
Salinité de l'eau traitée (mg/l)	< 10	< 10	< 10	<10	< 500
Capacité d'un train (m ³ /j)	5.000 – 60.000	500 – 12.000	100 – 20.000	10 – 2.500	1 – 10.000
Avantages	Technique éprouvée	20 % moins cher que le MSF	Capacité, robustesse	Simplicité	Modularité
Inconvénients	Investissement, consommation	Capacité plus faible que MSF	Consommation	Capacité limitée	Fragilité

Tableau. 2. 2comparaison des procédés [30].

Séparation	Énergie employée	Procédure physique	Méthode de dessalement
Eaux des sels	Thermique	Évaporation	Distillation soudaine par effet flash (MSF)
			Distillation par multieffet (MED)
			Compression thermique de la vapeur (TVC)
			Distillation solaire
	Mécanique	Cristallisation	Congélation
			Formation des hydrates
			Distillation par membranes
Mécanique	Filtration et évaporation	Evaporation	
		Filtration	
Sels des eaux	Electrique	Filtration sélective	Electrodialyse (ED)
	Chimique	Echange	Echange ionique (EI)

Tableau. 2. 3.comparaison des procédés par l'énergie [37].

2.7. Conclusion

Le procédé MSF est une technologie bien maitrisable, fiable, robuste, présente un succès dans le monde entier depuis plusieurs années. L'installation de ce procédé est assurée par plusieurs fabricants en site Doosan, Fisia, Aqua Tech, Hitachi Zosen, etc.

Malgré sa consommation d'énergie spécifique élevée, ce procédé reste intéressant dans le cas où l'énergie thermique est à faible coût. Pour de grosses installations l'effet d'échelle permet de réduire sensiblement des coûts.

Dans le prochain chapitre, nous consacrons des efforts à l'analyse des pertes de charges ayant lieu dans la chambre d'évaporation, un des éléments essentiels dans le système MSF.

Chapitre 3

Modélisation numérique et Simulation

3.1 .Introduction

Ce chapitre présente la modélisation mathématique bidimensionnelle du dévésiculeur(demister) à grillage métallique, inséré dans une chambre de vaporisation et traversé par un écoulement de la vapeur d'eau turbulente. Il y a lieu de noter que notre problème vu sa complexité sera simplifié en analysant uniquement la partie dynamique faisant abstraction de l'équation d'énergie .En effet, les seules équations de Naviers stoks dans le canal seront traitées.

D'un autre côté, le milieu ou se fait l'élimination des gouttelettes de la saumure sera analysé comme un milieu poreux, où l'adoption d'un modèle mathématique basé sur les lois de Darcy permettra de rendre compte de l'écoulement circulant. La méthode numérique sera ensuite présentée. Le logiciel ANSYS FLUENT 14.5 associé au meilleur GAMBIT a été choisi pour le maillage car il est applicable à une grande variété de problèmes.

Dans les littératures il y'a deux principaux sujets de préoccupation en l'élimination des gouttelettes de la saumure par le dévésiculateur à grillage métallique .Il s'agit de la perte de charge et l'efficacité d'élimination de brouillard .La présente simulation ne porte que sur le chute de pression à travers le dispositif antibuée. On prend en compte la vitesse de la vapeur, la dimension de l'antibuée, leur porosité, leur localisation et l'épaisseur.

La chute de pression obtenue a été jugée en un accord raisonnable avec les données de la littérature publiée et il s'ensuit une tendance compatible avec la corrélation empirique de Svendsen's choisit pour validé notre travail.

3 .2 Dévésiculateur « Demister filtre poreux »

3 .2.1Introduction

L'enlèvement des gouttelettes liquides entrainées dans la vapeur ou le gaz est essentiel pour prévenir l'échec du matériel, contamination du produit ou pollution de l'environnement. Les demisters sont utilisés dans la distillation, fragmentation, refroidissement, évaporation, ébullition, et filtres de ruisseau. L'enlèvement d'embuée de gouttelettes est désirable ou même obligatoire pour divers raison qui incluent :

- ❖ Récupération de produits précieux ;
- ❖ Amélioration du contrôle d'émission ;
- ❖ Protection du matériel à l'aval ;
- ❖ Améliorer la pureté du produit.

Il y a plusieurs configurations utilisées pour filtrés les gaz ou les vapeurs, telles que :

- ❖ Des réservoirs de sédimentation,
- ❖ Filtre,
- ❖ Cyclones,
- ❖ Précipitation électrostatique,
- ❖ Cloisons/girouettes et
- ❖ Des Demisters grillagées.

Chacun de ces appareils opère sous des principes différents (McCabe, Smith, et Harriott, 2000). Le choix d'une des méthodes citées dépend de :

- ❖ La dimension des gouttelettes/embuer,
- ❖ Taux d'écoulement et
- ❖ La température (Ettouney 2005).

Dans le flash multi-étagé (détentes étagées) de dessalement, la vapeur d'eau provenant de l'eau de mer entraîne avec elle de la saumure sous forme d'embuée de gouttelettes fines.

Les gouttelettes de l'eau salée doivent être enlevées avant la condensation de la vapeur sur les tubes du condenseur.

- ✚ **Remarque :** si le Demister ne fonctionne pas correctement, les gouttelettes d'eau salée entraînés réduiront la qualité de l'eau distillée et formeront un étalonnage de sel sur la surface externe des tubes du condenseur. Les premiers effets résultent dans la disposition du produit du distillat à cause limites imposé par l'utilisateur dernier, surtout si l'eau du produit est utilisée comme maquillage pour les chaudières.
- ✓ L'étalonnage du tube du condenseur réduit le coefficient du transfert de la chaleur et rehausse la corrosion.

3.2.2 Principe de fonctionnement du Demister

Le Demister est constitué d'un tapis composés de beaucoup de couches de grillage (est une couverture poreuse simple de fil en métal qui retient des gouttelettes liquides entraînées par la vapeur d'eau), chacune chancelé relativement aux prochains.

Ces tapis sont placés horizontalement faisant face au courant de la vapeur montante. Au fur et à mesure que la vapeur monte, les gouttelettes se rassemblent sur les fils de la maille, et vont fusionnez pour donner des plus grandes gouttes qui vont tomber goutte à goutte à partir de la couche inférieure dû au poids.

La fonction du grillage est d'augmenter la dimension de la gouttelette de l'eau salée au point où ils seront trop grands pour être entraînées par la vapeur montante. Les séparateurs de ce design présentent une très petite résistance au courant de vapeur permettent une production du distillat avec une très basse salinité, habituellement entre 0 à 5 ppm.

La performance de la maille du Demister à éliminer les gouttelettes de liquide dépend de beaucoup de design variables tel que les grilles de support, la vitesse de la vapeur, le diamètre du fil, l'épaisseur du coussin, et le matériel de construction.

Comme la maille de fil n'est pas rigide, il doit être supporté par des grilles convenables. Pour obtenir une perte minimale de pression, débit maximal et efficacité maximale, les grilles de support doivent avoir un haut pourcentage de passage libre. Pour avoir un avantage plein des 98% ou du volume libre dans les fils de la maille, le passage libre à travers les grilles du support doit être supérieur à 90% de la surface de la grille du support. [42].

Si le passage libre à travers les grilles du support est beaucoup inférieur à 90% de sa surface, le liquide accumulé est empêché de s'écouler en arrière à travers les grilles du support, causant une pré-inondation.

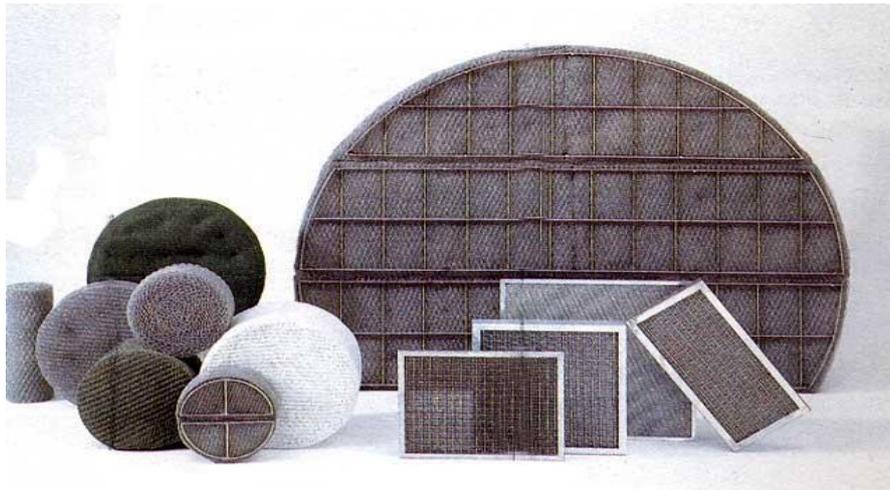


Figure. 3.1 Différent type de Dévésiculateur[42].

3.2.3 Conclusion

De tous ce qui précède nous pouvons dire que le Demister est une étape quasiment indispensable dans un procédé de dessalement par Multi-Stage flash car elle permet la prévention de l'échec du matériel, contamination du produit ou la pollution de l'environnement. Ils sont aussi essentiels du fait qu'ils permettent la production du distillat avec une très basse salinité. Aussi nous avons vu les effets engendrés par un mal fonctionnement du Demister.

Comme nous avons pu évoquer au début de ce chapitre, la partie qui concernera l'étude numérique sera consacrée au demister.

3.3 Simulation Numérique

Il est clair que dans la chambre dite d'évaporation dans le système MSF fais intérieur plusieurs phénomènes à avoir un changement de phase : liquide -vapeur par effet de dépression, échange d'énergie entre les différent constituant de système et des phénomènes de diffusion massique.

Au regard de la complexité du phénomène et au regard de l'apport négligeable de ces dernier thermique, seul les équations de mouvements seront traitées.

La simulation est réalisée en considérant une seule chambre de l'auto-évaporation à grande échelle d'une usine opérationnelle typique de dessalement MSF et d'une véritable dimension d'un Dévésiculeur industriel.

Configuration et capacité du Dévésuculeur

La configuration et les dimensions sont basées sur l'usine opérationnelle Sidi-Krir de dessalement à Alexandrie, Egypte (Chambre flash MSF typique - FC - dimensions).

Une usine basé sur MSF à 20 étages avec une capacité de production arrive jusqu'à 5000m³/jour. La première chambre fournit une quantité de 12.6 tonne/h, basée sur une profondeur de 7 m. **[39]**

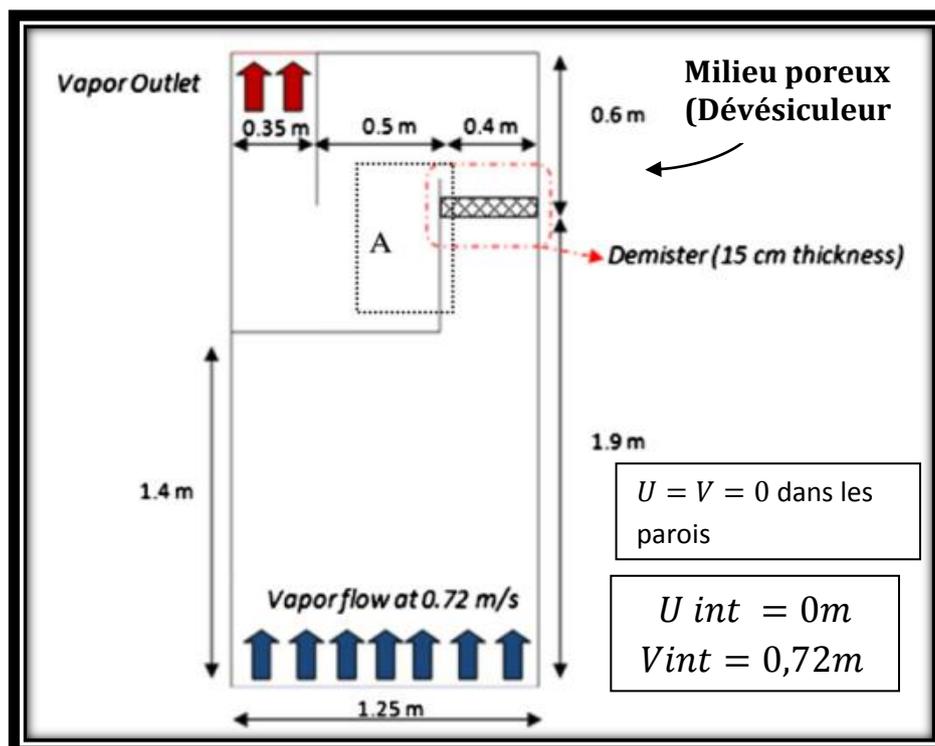


Figure.3.2 Schéma du problème considéré.

✚ Condition au la limite

- Vitesse d'entrée = 0.72 m /s
- Pression de sortie = 100 Pa
- Effet pariétal $U = V = 0$ dans les parois

La réalisation d'une simulation 2D symétrique donne un taux de production équivalent par la profondeur de l'unité égale $12.6/7=1.8$ tonne/h.

Et la supposition que 100% de la vapeur est condensé avec la densité de l'eau sous forme vapeur de 0.5542 kg/m^3 donne une vitesse moyenne à l'intérieur de la chambre de vaporisation égale à 0.72 m/s. [39]

De la même façon, pour la chambre 10ème et 20ème, les vitesses sont 0.619 m/s et 0.441 m/s respectivement. Ces trois vitesses seront d'une considération primaire dans le modèle et l'écoulement de la vapeur est supposé uniforme à partir du fond de la chambre (figure 3.2).

Ces valeurs sont encore relativement faibles par rapport à d'autres grandes installations de production et l'hypothèse dite que la vitesse d'entrée est uniforme reste

un peu restrictive que le processus de l'auto-évaporation (la source principale de la production de la vapeur) a eu lieu dans le quart de la longueur de FC. [39]

La hauteur (m)	Diamètre (m)	La densité (kg/m ³)	La surface (m ² /m ³)	Porosité %
0.15	0.28	125.8	224	98.4

Tableau 3.1. Les propriétés physiques de dévésiculeur.

3.4. Modélisation Mathématique

3.4.1. Les équations de Navier-Stokes

Les équations de Navier-Stokes décrivent la conservation de la masse et de la quantité de mouvement d'un fluide.

3.4.2. L'équation de continuité

L'équation de conservation de la masse se présente sous la forme suivante :

$$\frac{\delta \rho}{\delta t} + \nabla(\rho \vec{v}) = S_m \quad (1)$$

Où ρ est la densité, $\vec{v} = ui + vj$ la vitesse du fluide et S_m le terme source massique.

$\nabla = \left(\frac{\partial}{\partial x} i + \frac{\partial}{\partial y} j \right)$ Représente l'opérateur gradient. L'écoulement est considéré stationnaire et incompressible. De plus le système est isolé, il n'y a donc pas d'apport de masse et le terme source est nul. Ainsi l'équation de continuité se simplifie et s'écrit finalement, en 2D:

$$\frac{\delta u_i}{\delta x_i} = 0 \quad (2)$$

3.4.3. L'équation de conservation de la quantité de mouvement

Pour un écoulement stationnaire, prend en considération l'effet de gravité, l'équation de conservation de quantité de mouvement s'écrit en 2D dans un système cartésien [40]

$$\frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_i} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \right) \right] + \frac{\partial(-\rho u_i' u_j')}{\partial x_j} + \rho g_i \quad (3)$$

Où p est la pression statique, μ est la viscosité moléculaire et δ_{ij} le symbole de Kronecker.

Ces équations de continuité et de conservation de la quantité de mouvement sont les équations de Navier-Stokes moyennées par la procédure de Reynolds, ou système RANS (pour "Reynolds-Averaged Navier-Stokes"). Le terme des contraintes de Reynolds $-\rho u_i' u_j'$ représente les contraintes turbulentes. Le modèle de turbulence est alors utilisé pour calculer cette quantité.

3.4.4. La résolution du Turbulence

Pour représenter les contraintes de Reynolds, le modèle utilisé dans ce travail emploie l'hypothèse de Boussinesq (1877) qui exprime les contraintes turbulentes par analogie avec les contraintes laminaires [40]:

$$-\rho u_i' u_j' = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} \quad (4)$$

Avec δ_{ij} le symbole de Kronecker et k l'intensité turbulente définie par:

$$k = \frac{1}{2} (u'^2 + v'^2 + w'^2) \quad (5)$$

k est l'énergie cinétique, μ_t est la viscosité causée par la collision des échelles de turbulence :

$$\mu_t = C \rho V_t L_t \quad (6)$$

Où V_t est l'échelle turbulente de vitesse, L_t l'échelle de longueur et C est une constante. Les échelles sont calculées par l'intermédiaire d'un modèle de turbulence approprié c'est le Modèle $k - \varepsilon$.

Par conséquent, la fermeture du système ci-dessus est réalisée avec l'intégration de deux équations de transport supplémentaires : une équation différentielle pour l'échelle de vitesse, une autre pour la longueur.

L'intérêt du modèle $k - \epsilon$ est de pouvoir spécifier les distributions de V_t et L_t de façon indépendante dépendamment des conditions d'écoulement, contrairement aux modèles à zéro ou une équation qui ne font qu'estimer l'une ou les deux échelles par l'introduction d'expressions algébriques, une bonne estimation étant difficile à obtenir dans le cas d'écoulements complexes.

3.4.5. Modèle de turbulence $k - \epsilon$

Le modèle $k - \epsilon$ a été développé par Jones et Launder et est le plus répandu des modèles de turbulence à deux équations. Il est employé dans de nombreuses applications car il utilise une équation pour déterminer chacune des échelles de turbulence. La première concerne k l'énergie cinétique de turbulence et prend $V_t = k^{1/2}$ comme échelle de vitesse. La viscosité turbulente s'écrit alors. [40]

$$\mu_t = C_\mu \rho k^{1/2} L_t \quad (7)$$

Le taux de dissipation ϵ dépend naturellement de k et L_t , ainsi que d'une constante notée D . Il est défini par :

$$\epsilon = \frac{D k^{3/2}}{L_t} \quad (8)$$

La viscosité turbulente μ_t se calcule en combinant k et ϵ comme suit :

$$\mu_t = \frac{C_\mu \rho k^2}{\epsilon} \quad (9)$$

Les constantes empiriques du modèle $k - \epsilon$ sont :

$$C_\mu = 0.09 ; C_1 = 1.44 ; C_2 = 1.92 ; \sigma_k = 1.0 ; \sigma_\epsilon = 1.3$$

3.4.6. Écoulement en milieu poreux

Les écoulements en milieu poreux peuvent être classés en fonction de leur nombre de Reynolds, représentant le rapport des effets inertiels et visqueux, selon trois régimes [40]

- Régime de Darcy, pour $Re < 6$
- Régime transitoire, pour $6 < Re < 40$
- Régime inertiel pour $Re > 40$

Lorsque les effets de la viscosité sont prépondérants, la perte de pression relative au sein du milieu se détermine avec la loi empirique de Darcy (1856) :

$$\frac{\partial p}{\partial x_i} = -\frac{\mu}{\alpha} u_i \quad (10)$$

Où α est la perméabilité du milieu, μ la viscosité du fluide et u_i la vitesse de l'écoulement suivant la composante x_i

Lorsque le nombre de Reynolds augmente, les effets d'inertie deviennent importants. Un terme de résistance inertielle s'ajoute au terme de friction visqueuse dans la perte de pression, l'écoulement est alors décrit par la loi de Forchheimer (1901). Il faut signaler que les paramètres définis dans les équations 10, 11, 12 sont obtenus par moyenne dans volume élémentaire représentatif. Ce qui diffère totalement les équations de Navier-Stokes obtenues par le biais principe de la mécanique des milieux continus.

$$\frac{\partial p}{\partial x_i} = -\left(\frac{\mu}{\alpha} u_i + \beta \rho u_i |u_i|\right) \quad (11)$$

3.5. Procédure et étape de simulation numérique

La réalisation du modèle numérique du Dévésiculeur se fait par 1 'intermédiaire d'un code de calcul qui résout les équations de Navier-Stokes, appelé couramment code CFD (pour "Computational Fluid Dynamics"). C'est le logiciel commercial ANSYS FLUENT 14.5, utilisant la méthode des volumes finis, qui est employé dans ce travail [41]

L'intérêt d'un tel code est qu'il peut code de calcul résout les équations qui gouvernant la conservation de la masse et de la quantité de mouvement.

L'équation de l'énergie n'est pas résolue, car on 'a pas atteindre de la résoudre dû à la complexité du phénomène de la condensation de l'eau et l'élimination de la saumure qui nécessite plus de temps pour comprendre les équations gouvernantes, et trouvés une méthode de résolutions. Plus le manque des données et la difficulté de manipuler logiciel de simulation CFD ANSYS Fluent 14.5.

Être utilisé très rapidement et pour une grande variété de problèmes. L'objectif étant d'étudier un objet de géométrie complexe avec plusieurs phénomènes, dans un environnement stationnaire ou instationnaire, il apparaît à priori que l'utilisation d'un outil de calcul courant déjà éprouvé est la solution la plus efficace.

- **Hypothèses**

Au cours de la simulation nous allons considérer les hypothèses suivantes :

- Le régime de l'écoulement est stationnaire
- Le fluide qui s'écoule est la vapeur d'eau c'est un fluide Newtonien, visqueux et incompressible.
- L'écoulement est Turbulent (le modèle $k - \epsilon$).
- Le milieu poreux est isotrope et homogène.
- Les propriétés thermiques de la vapeur d'eau sont sel de l'ANSYS fluent 14.5 ; 0.5542 kg/m^3 de la densité et $1.34 \cdot 10^{-5} \text{ kg/m s}$ de la viscosité
- La pression à la sortir de la chambre est 100 Pa.
- Les conditions en limites sont déclarées au-dessus (voir la figure (3.2))

- **Dessin et génération du maillage**

La génération du maillage par GAMBIT passe par les étapes suivantes :

- Création de la géométrie :

Pour créer la géométrie du système, il existe plusieurs méthodes :

- Utiliser la base des géométries prédéfinies
- Ou créer la surface à partir des points et des lignes

Puisque notre modèle est un peu complexe alors on doit choisir la 2^{ème} méthode :

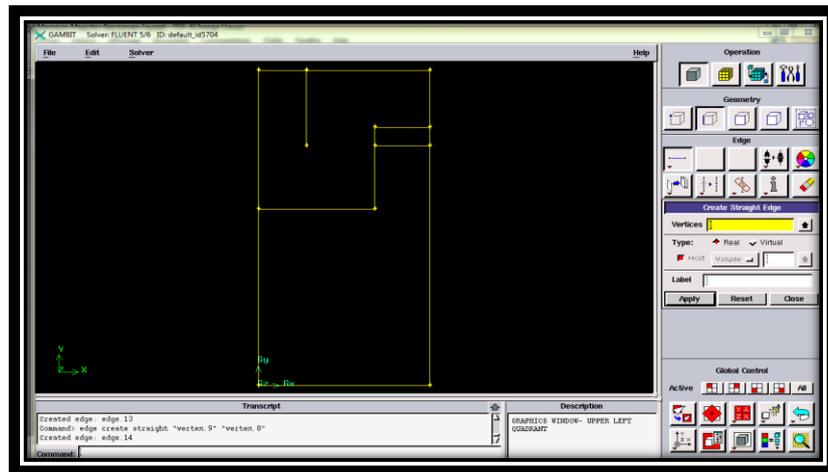


Figure. 3.3 Création de la géométrie

➤ Maillage de la géométrie

Afin d'assurer une bonne précision des résultats, plusieurs maillages ont été testés, le tableau ci-dessous représente les différents résultats des pertes de charges. Le maillage comportant 885 600 cellules, considéré comme maillage très raffiné, est la référence de calcul des erreurs.

	Nombre du celles	∇p (Pa)	Erreur%
Très raffiné	885 600	46.4934	-
Moyenne	221 400	46.22	-0.4
maillage grossier	55 350	45.81467	-1.5

Tableau 3.2 La sensibilité de la maille à la chute de pression

Avec une erreur de 0,4%, le maillage comprenant 221 400 cellules semble un bon compromis avec un temps de calcul beaucoup moins important. Dans la suite de l'étude, ce maillage sera adopté pour le calcul des différents paramètres.

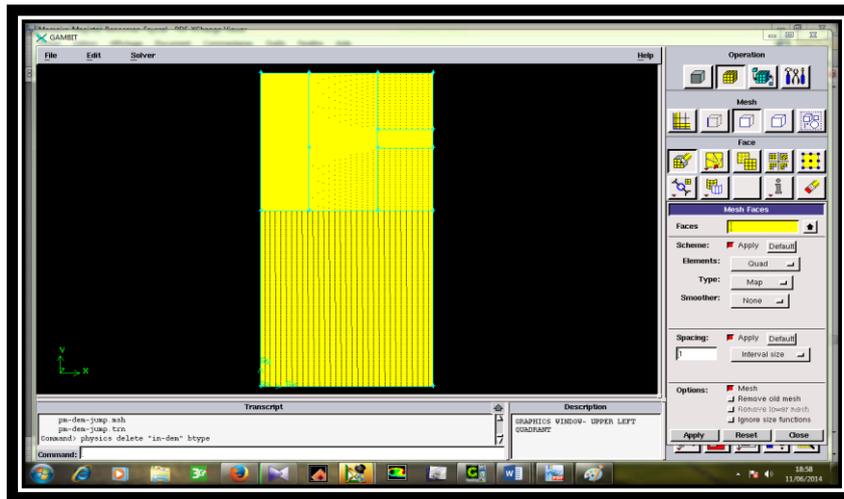


Figure. 3. 4. Maillage quadratique de la géométrie

- Condition aux limites : GAMBIT permet de déclarer le type des différentes conditions aux limites.

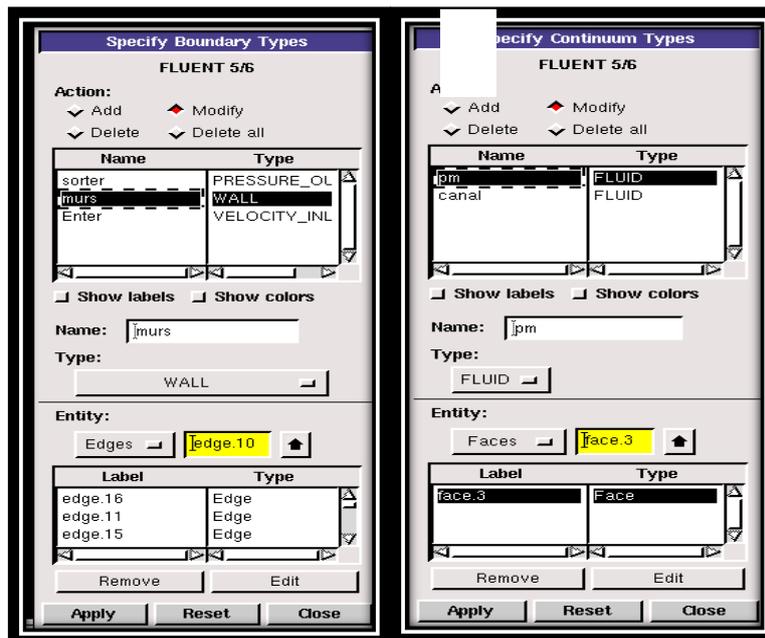


Figure.3. 5. Détermination des conditions aux limites

- Exporter le maillage et sauvegarder le fichier :

On exporte un fichier contenant le maillage de notre modèle physique étudié portant le nom de dem-pm.msh. (Fichier représentant le maillage).

File → Export → Mesh

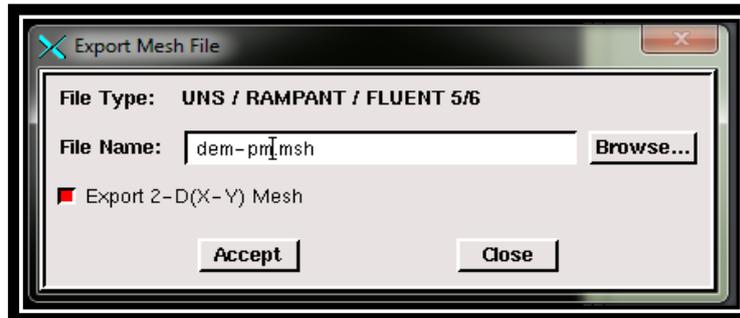


Figure 3.6. Exportation du maillage.

3.6. Préparation du calcul sur FLUENT

- ✓ *Etape 1 : Démarrer Fluent 2ddp : 2ddp signifie bidimensionnel double précision.*

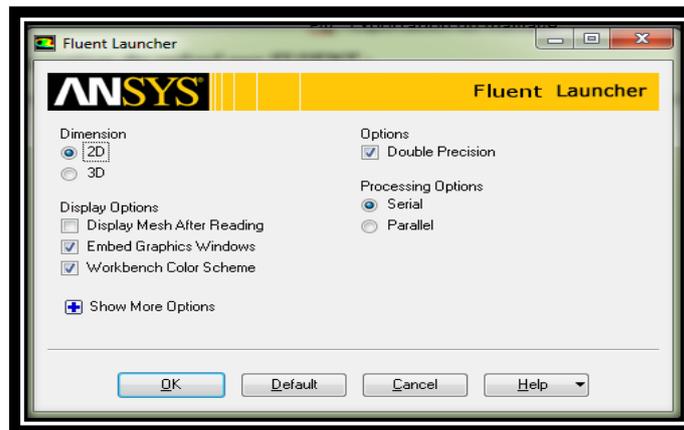


Figure 3.7. Version 2ddp de démarrage du Fluent.

- ✓ *Etape 2 : Ouvrir le Fichier Mesh enregistré précédemment :*

File → Read → Mesh

Mesh → checks → mooth and swap

✓ **Etape 3 : Définition du modèle :**

Define → General → Solver (unsteady, steady); gravity (selon l'axe des y);

Define → Models → viscous $k - \epsilon$; stander wall function.

Materials → fluid → water-vapor default values.

Cell zones → pm → les paramètres du milieu poreux (les effets visqueux et inertielles).

Boundary conditions (paroi, entrer, sortir,...).

Solutions Methods : second ordre pour la turbulence et la quantité du mouvement et standard pour la pression avec l'Algorithme SIMPLE.

Residual Monitors : pour notre cas on à choisit 10^{-6} .

Initialisation du système et démarrage du calcule.

A la fin du calcule on clique display pour voir les résultats.

3.7. Conclusion

Au terme de ce chapitre, il nous a été donné de mettre en forme le modèle mathématique représentant l'aspect dynamique de l'écoulement de la vapeur d'eau traversant le demister. La résolution numérique a été faite par le biais du logiciel ANSYS FLUENT 14.5. Dans ce qui va suivre, un certain nombre de résultats vont être discutés et interprètes.

Chapitre 4

Résultat Et Interprétations

4. 1. Introduction

Comme nous venons de le préciser dans un chapitre précédent, la partie maitresse dans un système MSF est bien entendu la chambre d'évaporation. Afin de mettre en exergue les conditions régnantes dans cette partie, nous avons entrepris un certains nombres d'analyses et études Donc, cette partie, consacrée aux résultats, consistera en l'analyse de plusieurs paramètres. Un premier segment est dédié à la validation des résultats du modèle adopté une seconde partie est mené à fin d'évaluer l'influence du profile de vitesse à l'entrée de la chambre d'évaporation. L'influence des effets visqueux et inertiels ont fait l'objet d'une troisième partie. Enfin la position du demister dans la chambre FC a été également examinée.

4.2 Les résultats du modèle

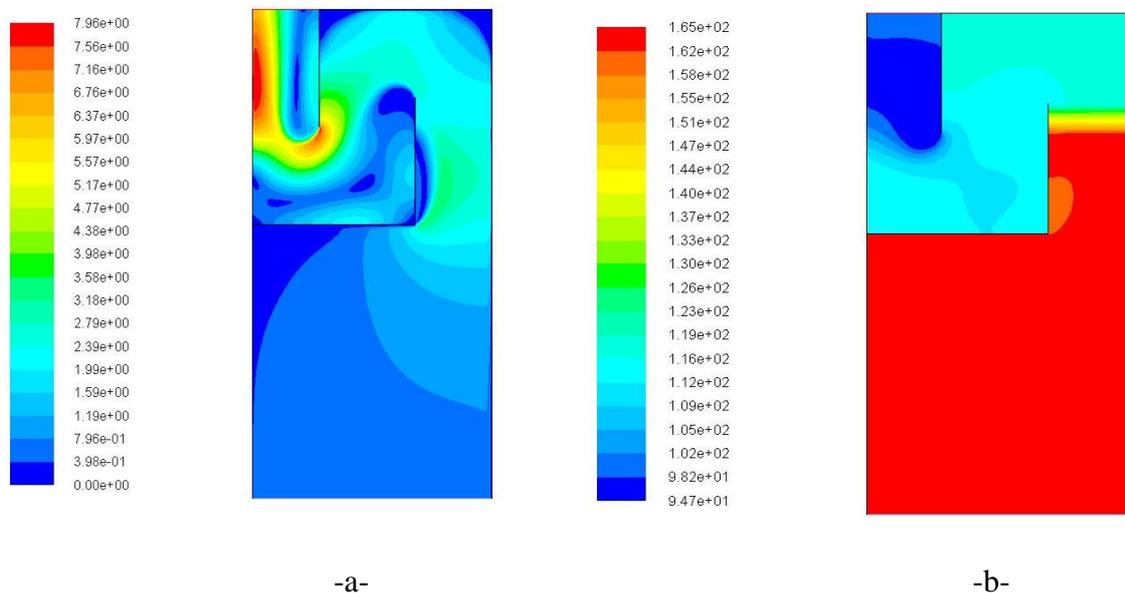


Figure .4. 1. Contour de la vitesse [m/s] a et la pression statique [Pa] b

Les lignes de courants de vitesses sont représentées dans la figure 8.a. Lorsque le flux de vapeur d'eau approche du canal de dévésiculateur, il y a lieu de constater la manifestation de certains vecteurs de vitesse. En effet, deux zones de recirculations sont identifiées l'une à côté du coin du condenseur et l'autre localisée à l'entrée de la zone du milieu poreux. Cela influence considérablement sur l'écoulement ainsi que sur le profil de pression et l'efficacité de la séparation. Afin de réduire les pertes de charges il est recommandé d'éviter les changements brusques de géométrie, de façon plus précise les coins doivent subir un lissage aérodynamique.

L'étude du profil de vitesse figure 4.2 fait ressortir les constatations suivantes, un profil plus ou moins constant avec un extrêmu à la position $X=0.95$ m. Ce profil est justifié par les changements de directions de l'écoulement de l'autre côté à la sortie du dévésiculateur le profil de vitesse semble plus constant. Cela peut s'expliquer par le fait que le milieu poreux joue un rôle d'homogénéisateur.

Les vitesses de l'écoulement avant et après le dévésiculateur sont 2.55 m/s et 2.25 m/s respectivement. Ce résultat peut paraître ambigu. En fait, cela peut s'expliquer par le début de la condensation qui a pour résultat l'augmentation de la masse volumique de la vapeur d'eau. En vertu du principe de la conservation de masse, la vitesse doit forcément diminuer.

La distribution de la pression présentée sur la figure 4.1 .b au-dessus est presque constante le long de la chambre et atteint sa valeur maximale avant le demister.

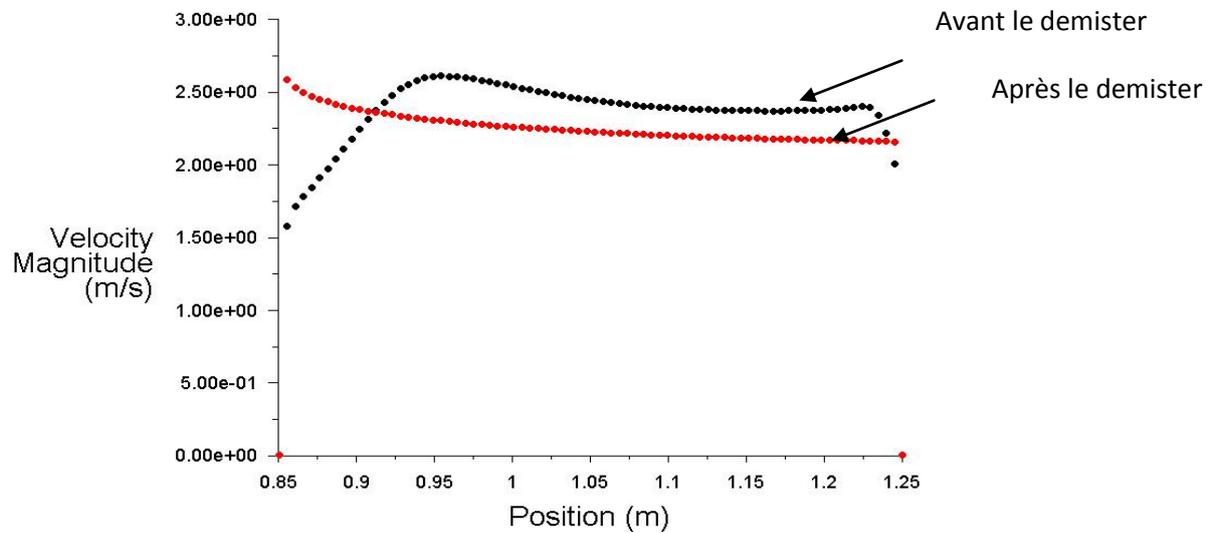


Figure .4. 2.la vitesse de la vapeur à l'entrée et à la sortie.

La pression comme illustrée dans la **figure 4.1** montre une chute brutale de la pression a l'entrée du demister et se voit diminuer progressivement tout le long de l'écoulement. Le profil de la pression statique calculé le long de la largeur du Demister est représenté sur la **figure 4.3**. Elle donne les valeurs avant et après le dispositif poreux .nous pouvons constaté aisément une chute de pression $46 Pa$. de $159.7 Pa$ et $113.5 Pa$ respectivement.

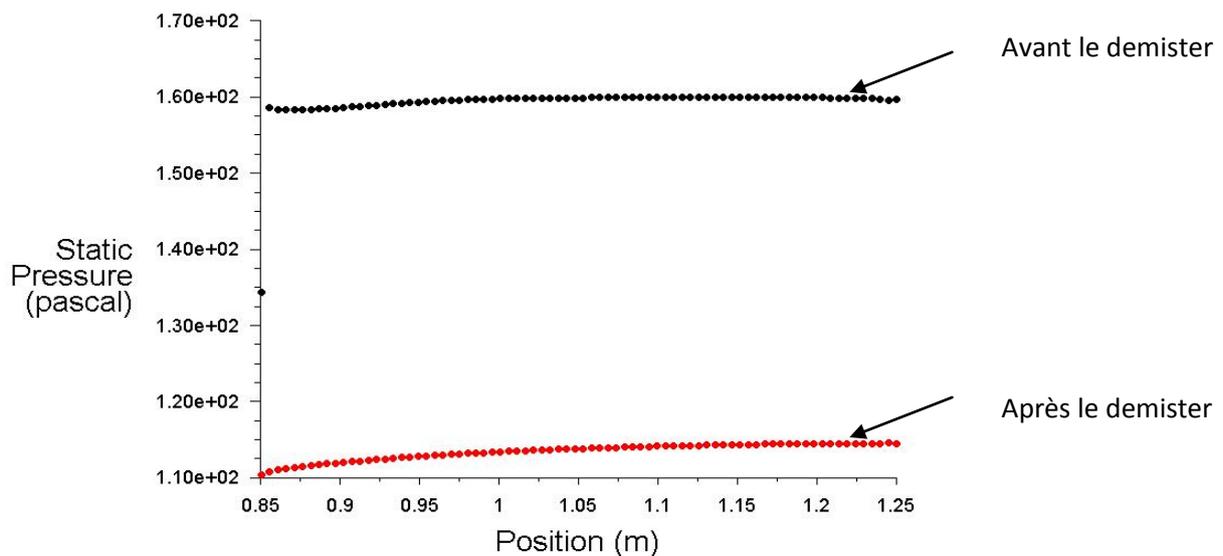


Figure .4. 3 la pression statique à l'entrée et à la sortie.

4.2.1. Comparaison avec les données expérimentales

La vitesse d'entrée de la vapeur 0,72m /s dans la chambre de vaporisation a donné lieu à une chute de pression moyenne à travers le dispositif ayant une valeur de 46.22Pa. La vitesse moyenne de la vapeur d'eau calculée lors de notre simulation à l'entrée de Demister atteint une valeur de 2.38 m/s. D'un autre coté la chute de pression est comparée à celles obtenues par la corrélation empirique de Svendsen's [42]

Porosité	ϵ	0.984
Diamètre (m)	Dp	0.00028
Perte d'inertie (1/m)	C_2	209.9
Perméabilité m^2	α	$1.95 * 10^{-6}$
L'épaisseur (m)	L	0.15

Tableau 4. 1. Les propriétés du milieu poreux utilisé

La différence entre les résultats obtenus par la simulation avec ceux de l'expérimental correspondant aux vitesses à l'entrée de la chambre de vaporisation est représentée dans le tableau suivant. Ces vitesses sont de la 1ère chambre à 0.72 m/s, la 5ème chambre à 0.66 m/s, la 10ème chambre à 0.619 m/s, la 15ème chambre à 0.543 m/s et la 20ème chambre à 0.441 m/s.

Les vitesses calculées présentées sur le tableau sont des vitesses à l'entrée de la canalisation ou le dévésiculeur est localisé.

Les chambres	La vitesse initiale (m/s)	La vitesse Calculée (m/s)	∇p (Pa) Model Milieu poreux	∇p (Pa) Svendsen et la déference %
20	0.441	1,56	17,88	21,16 -15.50
15	0.543	1,92	26,71	28,03 -4.7
10	0.619	2,19	34,44	34,39 0.14
5	0.66	2,34	39,01	37,94 2.8
1	0.72	2,55	46,22	43,27 6.81

Tableau 4. 2. Les résultats de la simulation vs l'expérimental

Comme présenté dans le tableau ci-dessus, l'écart entre la simulation numérique issue de notre travail et la corrélation empirique de Svendsen's est surestimé de 6.81 % et sous-estimé de 15.5 % dans la 1ère chambre et la 20ème chambre respectivement. Cette différence de résultats les deux méthodes (expérimentaux et simulations) est causé par le régime de l'écoulement considéré, la formation du zone de recirculation, la

turbulence, l'écoulement au niveau des parois, qui somme toute est traité par une formule à une seule équation.

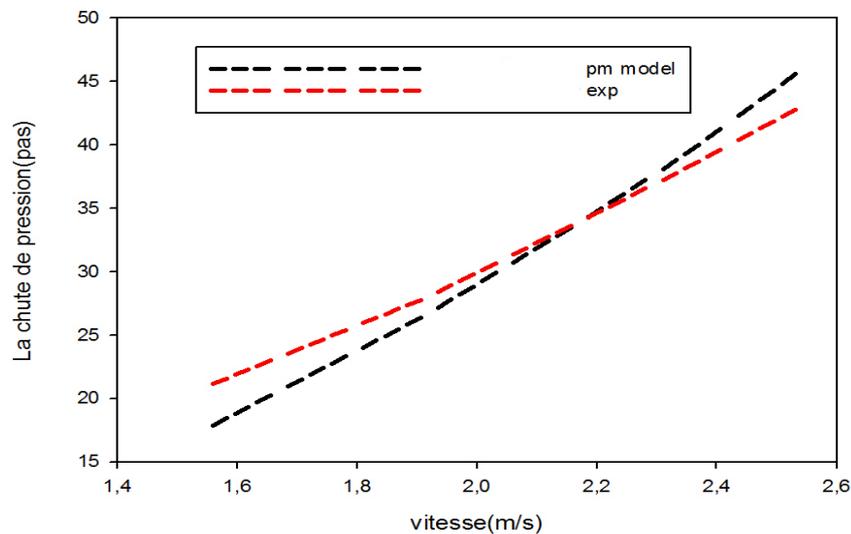


Figure 4.4 validation des résultats expérimentaux vs le modèle du milieu poreux

Il ya lieu d'indiquer qu'une simulation CFD effectuée par Rahimi a montré des résultats semblables, mais peu précis en les comparant avec les notre. En effet, la comparaison avec le travail expérimental de H-El-Dessouky [43] l'écarte constaté est de l'ordre de 14-21 %. [39]

4.2.2. L'effet du profile de vitesse

Dans cette partie, un autre paramètre a été analysé en faisant varier le profil de la vitesse de la vapeur à l'entrée qui ne permet pas de voir une meilleure représentation de l'auto-évaporation. En effet, des profils linéaire, constant et parabolique ont été suggérés à l'entrée. En fait, cette analyse a été également proposée à l'étude par [43]. Dans ce qui va donner, la vitesse de la vapeur à l'entrée de la chambre a été modifiée d'un profile uniforme à une vitesse linéaire décroissante, et une vitesse parabolique comme la montre la figure 4.5 :

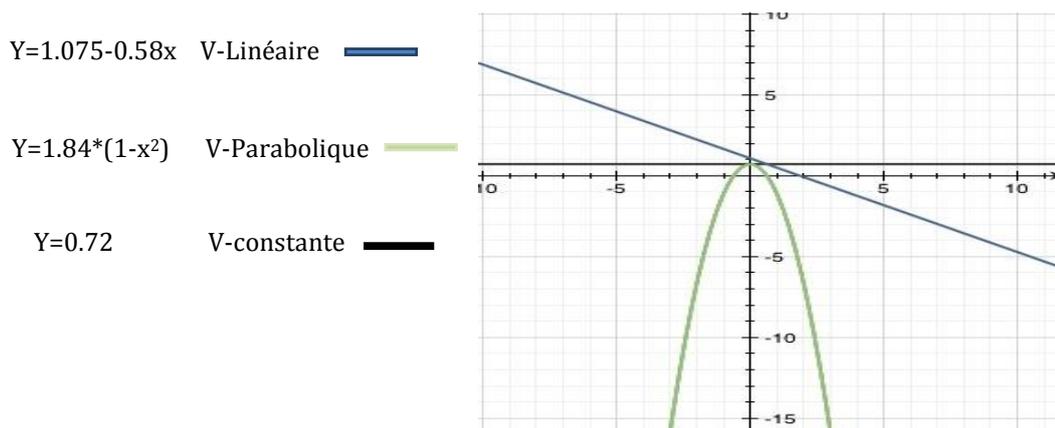


Figure .4. 5.Profil de vitesse à l'entrée de FC

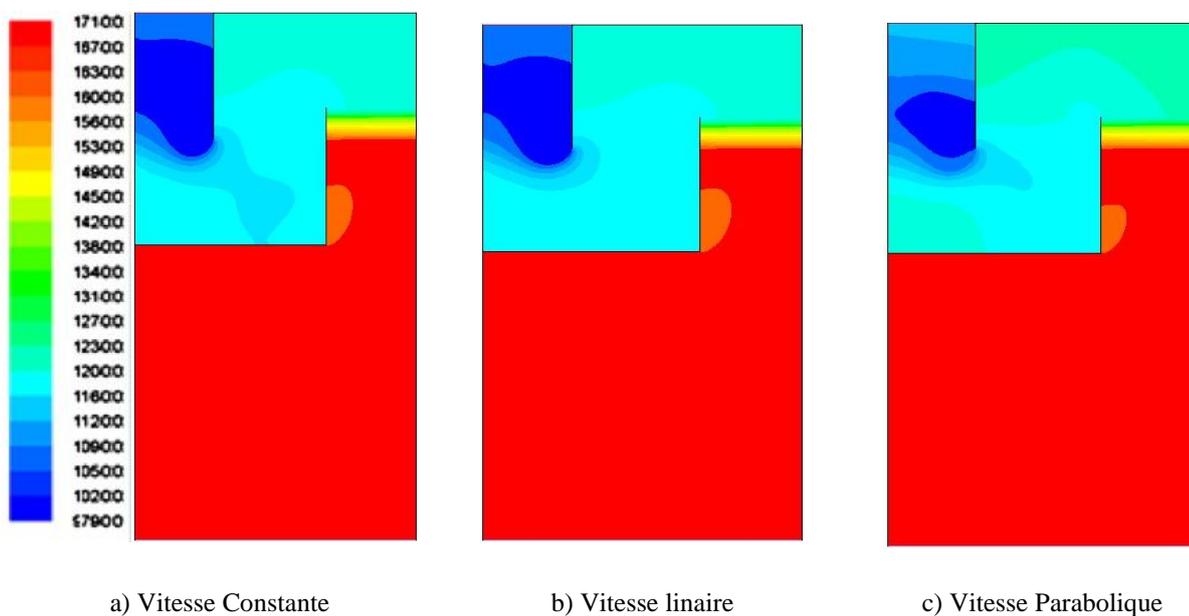


Figure .4. 6. Contour de la pression pour les trois configurations.

Les résultats obtenus de la simulation en fonction du profil de la vitesse à sur la chute de pression sont représentés sur le **tableau 4.3**. La vitesse de la vapeur moyenne dans tous les cas est maintenue à 0,72m / s.

Type de vitesse	Constante	Linaire	Parabolique
La vitesse moyenne à l'entrer de Demister[m/s]	2.38	3.56	2.36
La vitesse moyenne à la sortir de Demister[m/s]	2.25	3.37	2.25
La chute de pression au niveau de Demister[Pa]	46.22	100	46.42

Tableau .4. 3 : *variation de la vitesse en fonction du profil à l'entrée.*

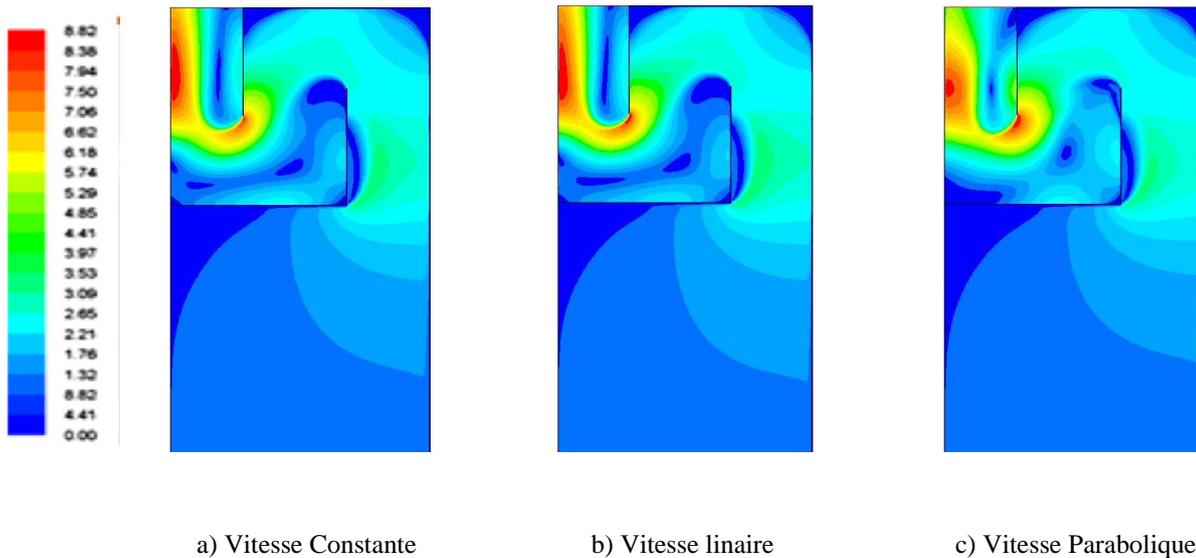


Figure .4. 7: *Contour de la vitesse pour les trois configurations*

En dépit des variations de vitesse à l'entrée de la chambre, le profile de la vitesse devient uniforme à l'entrée de demister. Le flux massique moyen à la sortie du demister reste globalement constant et la vitesse découlement avoisine la valeur de 2.25m/s. Toutefois, le profile linéaire présente quelque incohérence et cela est du probablement à une difficulté de programmation de l'UFD

Comme prévu, la chute de pression aussi ne montre pas également un changement significatif pour les deux cas qui montrent une légère variation ainsi inférieure à 0,30 Pa.

Concernant le profil linéaire on remarque des valeurs de vitesse élevées atteindre la valeur max de 4.82 m/s ; et le plus remarquable est le chute de pression ayant une valeur très importantes de 100 Pa.

En résumé, le profil de vitesse à l'entrée de la chambre de vaporisation à un effet plus ou moins négligeable sur la performance du dévésiculeur.

4.2.3. Analyse des effets visqueux et inertiels

Dans cette section, une analyse d'un autre paramètre a été réalisée en faisant varier la valeur de la viscosité et les résistances inertielles. Pour ce faire, nous prenons des valeurs de 209,9 [m^{-1}] et 512820 [m^{-2}] de la résistance inertiel et visqueuse respectivement comme référence. Ces valeurs sont variées progressivement de 10% (de 70% à 130% de leur valeur initiales) pour évaluer leur effet sur la perte de charge calculée à travers le dispositif Demister.

Les résistances inertielles	% de la valeur originale	$\Delta p(pas)$	Erreurs %
146.93	70%	33.08	-28.42
167.92	80%	37.47	-18.93
188.91	90%	41.85	-9.45
209.9	100%	46.22	-
230.89	110%	50.63	9.54
251.88	120%	55.03	19.09
272.87	130%	59.41	28.53

Tableau .4. 4 L'effet de la résistance inertielle

Comme on peut le constater, d'après le tableau 6, la diminution de la résistance inertielle permet de réduire la chute de pression par un taux constant.

La résistance du a la viscosité (m^{-2})	% de la valeur originale	$\Delta p(pas)$	Erreurs %
358974	70%	45.73	-1.06
410256	80%	45.78	-0.96
461538	90%	46.01	-0.45
512820	100%	46.22	-
564102	110%	46.47	0.54
615384	120%	46.70	1.03
666666	130%	46.93	1.51

Tableau .4. 5. L'effet de la résistance du a la viscosité.

Par exemple, la réduction de la résistance inertielle de 30% a entraîné une diminution de la chute de pression de 28.42 %; et de même, l'augmentation de la résistance inertielle de 30% a entraîné une augmentation de la chute de pression 28.53%.

Le tableau indique que le taux de la chute de pression est variable si on prend 30% en réduction ou en augmentation 1.06 % et 1.51 % respectivement ; ce qui implique

qu'il y'a un effet de la viscosité sur la perte de charge mais reste un effet moins important.

4.2.4. L'effet de la localisation du Demister :

Dans cette partie, nous nous proposons examiner la localisation du dévésiculateur selon la hauteur de la chambre de vaporisation de 1.4 [m] à 1.55 [m] et 1.70 [m] à 1.85 [m] ; et voir la distribution de la vitesse et la variation de la chute de pression afin de comparer les résultats avec ceux obtenus de la 1ère simulation avec une position de 1.9 m à 2.05 m de la hauteur

V à l'entrée [m/s]	$\nabla p1$ [Pa]	$\nabla p2$ [Pa]	$\nabla p3$ [Pa]	V1 [m/s]	V2 [m/s]	V3 [m/s]
0.72	46.22	46.51	46.17	2.55	2.46	2.39
0.66	39.01	39.26	38.97	2.34	2.25	2.18
0.619	34.44	34.66	34.40	2.19	2.11	2.05
0.543	26.71	26.89	26.68	1.92	1.85	1.79
0.441	17.88	18.00	17.86	1.56	1.50	1.45

Tableau .4. 6. Les différentes valeurs de la chute de pression et les vitesses correspondant

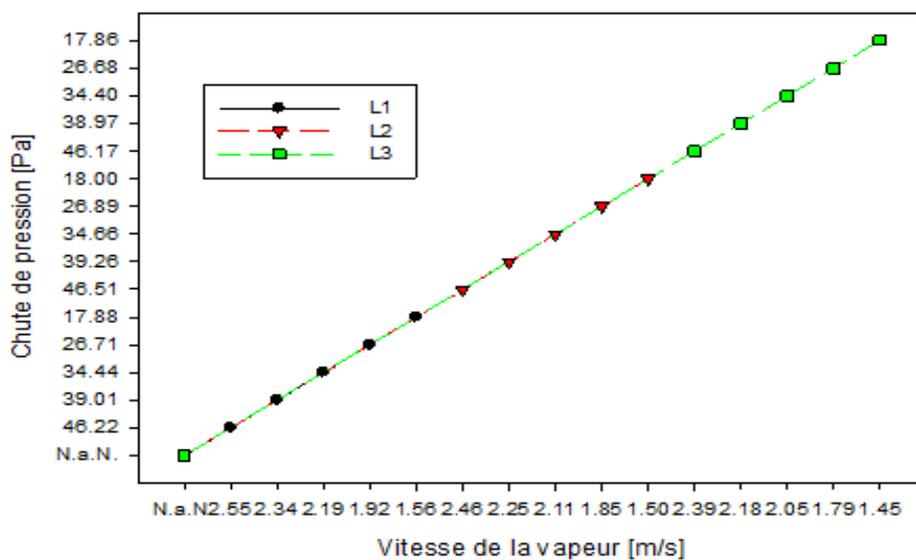


Figure .4. 8.L'effet de hauteur sur la chute de la pression

Après la schématisation des résultats sur la figure 14 si dessus, nous constatons que la localisation du Demister selon la hauteur n'a aucun effet sur les pertes de charge, toutes les données sont confondues.

4.2.5. Comparaison entre différent emplacement de demister

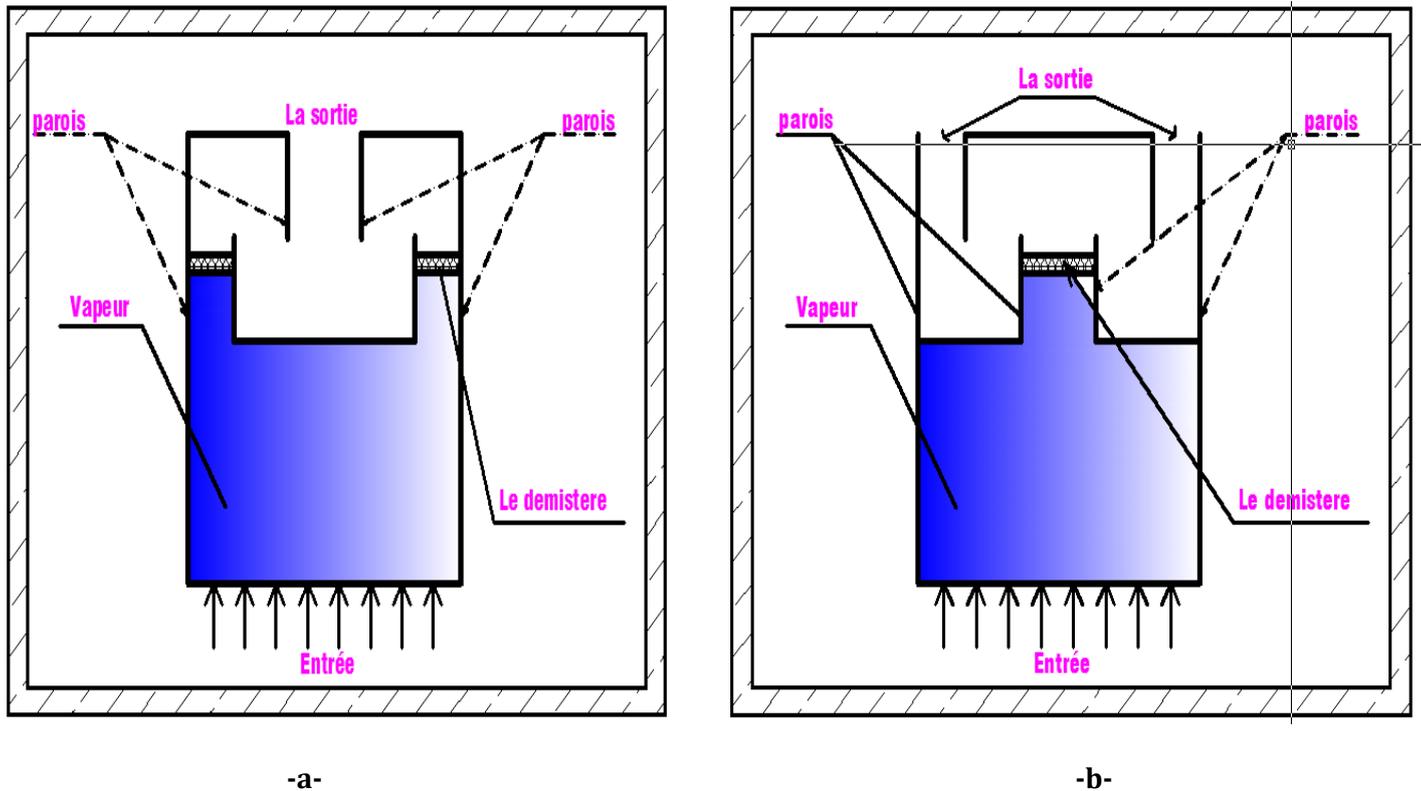


Figure 4. 9. La Géométrie de (a) et (b)

Deux configurations ont été comparées, l'une avec deux entrées et une sortie représentant deux(02) demisters de 20cm de largeur. L'autre est constitué d'un seul demister de 40cm de largeur avec deux (02) sorties. Cette comparaison nous a permis de constaté une perte de charge plus importante dans le premier cas, en effet la valeur maximal est cde l'ordre de 160 Pa pour atteindre une pression de sortie de 100 Pa. Le second cas fait apparaitre une pression de 150 Pa . Les 10 Pa qui différencient les 2 cas peuvent jouer un rôle très important dans la condensation. Et par conséquent dans tout le processus.

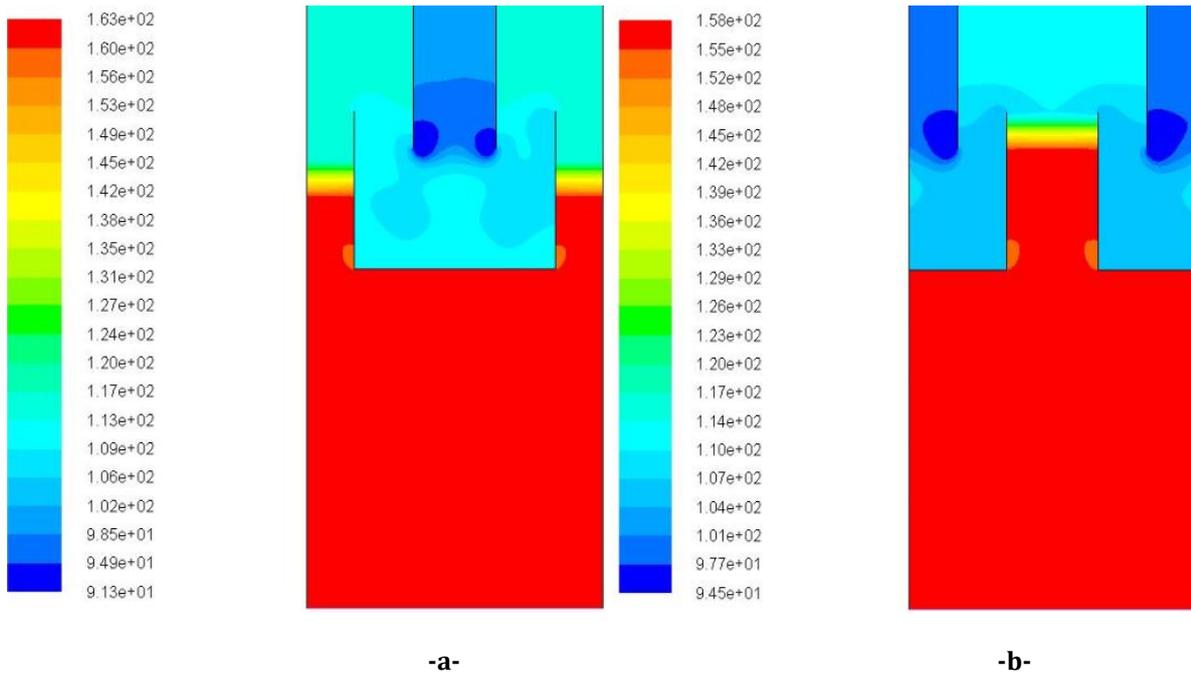


Figure .4. 10.Profile de pression [pa] entre deux géométries différentes

Nous voyons à travers cette figure que la vapeur d'eau empreinte (2) deux chemins distincts dus aux différents parois, les profils de vitesse touchés en conséquence. il est remarquable que la vitesse est maximale dans la simulation (a) à la sortie (coté centrale) avec une vitesse 7.48 m/s. Par contre la vitesse maximale dans la seconde simulation est de 6.09 m/s. Ce qui expliquera les pertes de charges plus importants dans la simulation (a).

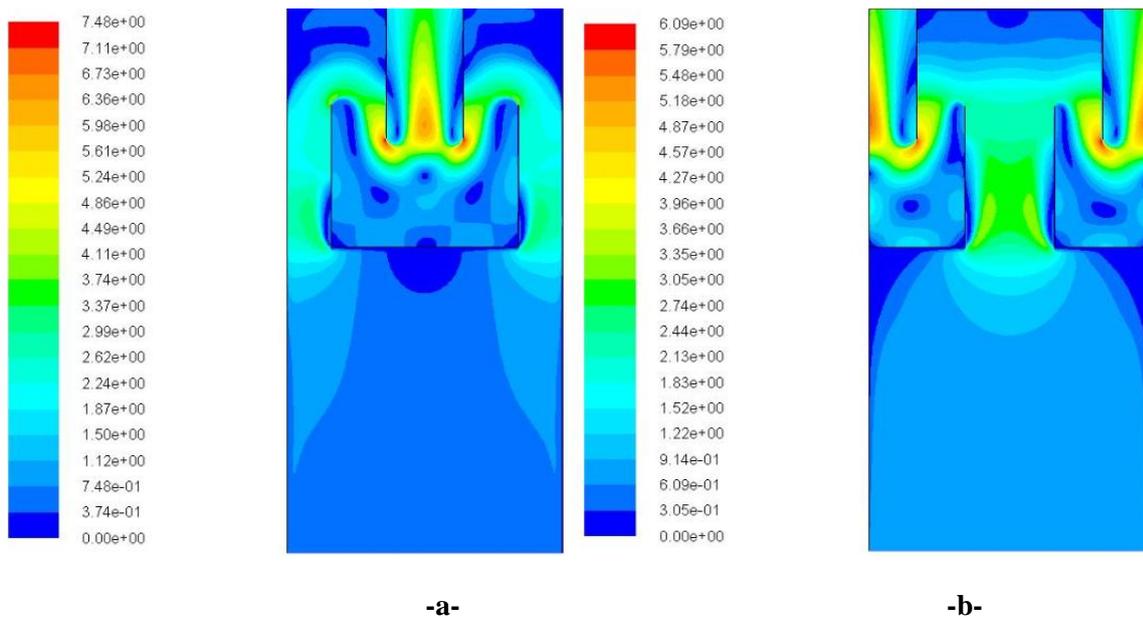


Figure .4. 11.Profile de la vitesse [m/s] entre deux géométries différentes

4.3. Conclusion :

Au terme de ce chapitre, il ya lieu de mettre en relief les résultats et constatations suivantes, suite à la simulation effectuée par le CFD Fluent.

- ✓ Les résultats de validation ont démontré une bonne précision du code de calcul. Comparé à l'étude antérieure.
- ✓ Les comparaisons avec des travaux expérimentaux ont fait apparaitre un meilleur résultat, comparé à cette évoqué par l'auteur.
- ✓ Des cas étendus à savoir la disposition du demister, la configuration du système de chambre d'évaporation et les attribues de l'effet inertiels et visqueux font apparaitre de nouveaux résultats, pouvant être exploités ultérieurement dans de nouvelles études.

CONCLUSION GENERALE

L'étude que nous venons de présenter a comme objectives, l'analyse des différents paramètres influents sur le système de dessalement d'eau de mer par effets multi flashing.

Une attention particulière a été accordée au demister , l'élément clé de la séparation entre la vapeur d'eau et la saumure prévenant de l'eau de mer .

Afin d'aborder le problème proprement dit une analyse bibliographique a été menée afin de mettre en relief les aspects théoriques et pratiques de cette technique une approche numérique par CFD Fluent a permis d'aboutir une modélisation aussi fiable que possible et d'entreprendre par la suite un certain nombre de simulation, d'analyse et de comparaison.

Au terme de cette étude nous pouvons conclure :

- 1- Les résultats de validation ont démontré une bonne précision du code de calcul. Comparé a l'étude antérieure.
- 2- Les comparaisons avec des travaux expérimentaux ont fait apparaitre un meilleur résultat, comparé a cette évoqué par l'auteur.
- 3- Des cas étendus a savoir la disposition du demister, la configuration du système de chambre d'évaporation et les attribues de l'effet inertiels et visqueux font apparaitre de nouveaux résultats, pouvant être exploités ultérieurement dans de nouvelles études.

Enfin, certaines perspectives et recommandation sont suggérer.

En effet, l'effet thermique qui a été occulté dans cette étude doit être reconsidérer. D'autre configuration du système de dessalement peuvent être également recommandée à l'étude pour de nouveaux travaux.



Annexe .I : photos de l'unité (MSF) KAHRAMA



Annexe .I : photos de l'unité (MSF) KAHRAMA



Annexe .I : station KAHRAMA



Annexe .I : photos sur la propagation de la saumure KAHRAMA

Références bibliographiques

- [1] Philippe Bandelier et Jean-Claude Deronzier. « Groupement pour la recherche sur les échangeurs thermiques (GRETh) ».
- [2] A.Zfaty, «Report submitted to Israel Water Commissioner », 1997 (in Hebrew)
- [3] Adan, «Report submitted to Israel Water Commissioner », 2000 (in Hebrew)
- [4] Adan, «Report submitted to Israel Water Commissioner », 1998 (in Hebrew, ADN4285a)
- [5] W.S. Winston and K. Sirkar, « Membrane Handbook », 1992.
- [6] T. Altman, « New Power and Water Co-generation concept with Application of Reverse Osmos (RO) Desalination », Salzgitter Anlagenbau GmbH, 2000.
- [7] Alain .MAUREL. «Dessalement de l'eau de mer et des eaux saumâtres», édition technique et documentation, 2001
- [8] Patrick DANIS, « dessalement de l'eau de mer », technique de l'ingénieur, Doc.J2700
- [9] Khalid Z. Al-Subaie, « Precise way to select a desalination technology », Desalination,Vol. 206, pp: 29–35 ,(2007)
- [10] Viviane Renaudin, « le dessalement de l'eau de mer et des eaux saumâtres »,CNRS, Nancy, 2003
- [11] Rachel Einav***, Kobi Hamssib, Dan Periyb , «The footprint of the desalination processes on the environment », Desalination, Vol. 152, pp: 141-154 ,(2002)
- [12] M.S. Tanvir, I.M. Mujtaba*, « Neural network based correlations for estimating temperature elevation for seawater in MSF desalination process »
- [13] Hussain.A, ed., « Integrated Power and Desalination Plants ». Oxford, Eolss Publishers Co.Ltd.,2003.
- [14] [http:// www.CultureScience](http://www.CultureScience), Chimie.Ens.Fr/dossiers chimie –société
- [15] I.S. Park, S.M. Park, J.S. Ha, « design and application of thermal vapour compressor for multi- effect desalination plant », Desalination ,Vol.182 ,pp: 199-208 ,(2005).
- [16] Marian G. Marcovecchio, Sergio F. Mussati, Pio A. Aguirre, Nicolas J. and Scenna;«optimization of hybrid desalination processes including multi stage flash and reverse osmosis systems », Desalination, vol. 182, pp: 111–122, (2005).
- [17] P. Fiorini, E. Sciubba; « Thermo-economic analysis of a MSF desalination plant »; Desalination, Vol. 182, pp: 39–51, (2005)
- [18] G.L. Meerganz von Medeazza; « “Direct” and socially-induced environmental impacts of desalination »; Desalination Vol.185 , pp: 57–70 ,(2005)
- [19] Roberto Borsani, Silvio Rebagliati; « Fundamentals and costing of MSF desalination plants and comparison with other technologies »; Desalination, Vol. 182, pp: 29–37, (2005)
- [20] S.NISA Direction de la recherche technologique CEA/Grenoble (mise à jour septembre 2001)
- [21] Nicos X. Tsiourtis, « Desalination and the environment »; Desalination ,Vol.141,pp : 223-236, (2005)
- [22] J.P. BRUN; « procédés de séparation par membranes » ; MASSON ; 1989
- [23] Paul VAURS ; « le dessalement de l'eau de mer » ; juillet 2005
- [24] Jacek Wisniewski, Agnieszka Rozanska ; « Donnan Dialysis with anion-exchange membranes as a pretreatment step before electro-dialytic desalination » ; desalination Vol.191,(2006)
- [25] F.H. Meller ; « Electrodialysis and electro-dialysis reversal technology » ; Ionics brochure. 1984
- [26] H . Strathmann ; « Ion-Exchange Membrane Separation Processes » ; Elsevier, Amsterdam,2004
- [27] S.KEHAL. «Rétrospective et perspective du dessalement en Algérie ». Desalination,Vol. 136, , (2001)
- [28] Ahmed Kettab ; « Les ressources en eau en Algérie: stratégies, enjeux et vision »; Desalination Vol.136 , pp : 25–33 ,(2001)

- [29] Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement ; -programme d'Aménagement côtier - Zone côtière Algérois- Gestion intégrée des ressources en eau et assainissement liquide -Diagnostic- juin (2005).
- [30] N.SABER. «L'eau, c'est la vie». Energie& mines .Avril 2004
- [31] Nakhle. K.F ; « Le mercure, le cadmium et le plomb dans les eaux littorales libanaises : apport et suivi au moyen de bioindicateurs qualitatifs (éponges, bivalves et gastéropodes) » ; Thèse de Doctorat, Université Paris 7 ; 229p ; (2003)
- [32] Guilcher. A ; « précis d'hydrologie marine et continentale » ; Edition : Masson, Paris ;1979
- [33] Dussart. B ; « Limnologie, l'étude des eaux continentales », deuxième édition ; Boudée ; 736p ; 1992
- [34] Bouhamadouche. M ; « Sédimentologie du plateau continental Est-Algérois (Boumerdes-Boudouaou El Bahri) » ; mémoire de magistère ; USTHB ; Alger, 142p ; 1993
- [35] Lacomb. H ; Tchernia. P ; « Caractère hydrologiques et circulation des eaux en méditerranée ». The mediterranean sea a national sedimentation laboratory; Stanley ed; 1972
- [36] Benslama. H ; « Apport détritique de oued Isser et rôle du canyon d'Alger dans la dynamique des sédiments du plateau continental de la baie de Zemmouri El Bahri » ; Thèse de magister ; USTHB 2003
- [37] Manuel de la station de dessalement de Arzew du 20012, Document interne. «Dessalement de l'eau de mer par les réacteurs nucléaires » .pdf 2007KWU. Service de formation professionnelle, N° 5515 Documentation de la centrale thermique de KAHRAMA
- [38] Wittholz M.K. et al., 2008 ; Frioui S., Oumeddour R., 2008)
- [39] Numerical simulation of vapor flow and pressure drop across the demister of MSF desalination plant / journal homepage: www.elsevier.com/locate/enconman*/ Article history: Rahimi R, Abbaspour D. Determination of pressure drop in wire mesh mist eliminator byCFD. Chem Eng Process 2008;47:1504–8.
- [40] École de technologie supérieure université du Québec /calcul direct des performances aérodynamique et acoustique d'un silencieux industriel par modélisation CFD, et optimisation aérodynamique Montréal .le 25 Juin 2005
- [41] Dynamic Modeling of Multi Stage Flash (MSF) Desalination Plant Department of Chemical Engineering University College London July 2011
- [42] Experimental characterization of pressure drop in dry demisters at low and elevated pressures. t. helsør and h. svendsen_department of chemical engineering, ntnu, trondheim, norway.
- [43] Performance of wire mesh mist eliminator Hisham T. El-Dessouky a,*, Imad M. Alatiqi a, Hisham M. Ettouney a,Noura S. Al-Deffeeri b ;Received 10 August 1998; received in revised form 8 April 1999; accepted 9 April 1999

Résumé

A travers ce mémoire, la thématique de la production d'eau potable par méthode dite « Multi-flashing a été abordé. Une attention particulière a été consacrée à l'analyse de la partie maitresse du système à savoir la chambre d'évaporation. La vapeur produite lors de la décompression a fait l'objet d'une modélisation et une simulation numérique, abordons ainsi la partie dynamique de l'écoulement de la vapeur traversant un filtre de nature poreuse. Ce dernier permet la séparation des gouttelettes d'eau salées, situées dans les différents étages. Les résultats présentés évoquent les champs de vitesses et de pressions générés au cours de l'évolution de la vapeur dans la chambre d'évaporation.

Les résultats obtenus ont été validées par d'autres résultats expérimentaux et extrapolés sur de nouvelles situations tant sur le plan design de la chambre que sur le plan conditions d'entrée de cette vapeur. L'influence des effets de viscosité et inertiels ont été également examinés.

Abstract

In this memory, we will study a method of water Desalination; it is called "multi-stage flashing", based on the effect that the degree of liquids boiling related with the pressure, whenever the pressure drop the boiling degree drop down with it. In this way the salty water goes after heating to multi-stage with a low pressure; so the water turns from liquid to vapor which will be condensed on cold surfaces then collected and treated to become potable water.

We have based in this research on studying the demister that allows the separation of the salty water drops, which are situated in the stage. We have done an analysis about the pressure changes of different velocity values, and that supposing that the demister is porous to solve the different effect: , viscosity, localization, velocity profile; and this after validating the simulation results with an experiment work.

ملخص

الطريقة المعتمدة في تحلية الماء والتي نحن بصدد دراستها هي التقطير الومضي متعدد المراحل، اعتماداً على الحقيقة التي تقر أن درجة غليان السوائل تتناسب طردياً مع الضغط الواقع عليها فكلما قل الضغط المطبق على السائل تنخفض درجة غليانه. واعتماداً على هذه الطريقة تمر المياه المالحة بعد تسخينها إلى غرف متتالية ذات ضغط منخفض فتحول المياه إلى بخار ماء يتم تكثيفه على أسطح باردة ويجمع ويعالج ليصبح صالح للشرب

اعتمدنا في هذا البحث على دراسة المقسم الجزئي المسؤول عن فصل قطرات الماء المالحة الموجودة على مستوى الغرفة حيث قمنا بدراسة تحليلية لتغيرات الضغط لمختلف قيم السرعة وهذا يفرض أن المقسم الجزئي عبارة عن وسط مثغور كحل لدراسة مختلف التأثيرات، القصور الذاتي، اللزوجة، التموضع، مسار السرعة، وهذا بعد مطابقة نتائج المحاكات مع نتائج العمل التجريبي.