

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

**UNIVERSITÉ de BLIDA 1**

**Faculté de Technologie**

**Département de Génie des Procédés**



# Mémoire

En vue de l'obtention du diplôme de

**MASTER EN GENIE DES PROCEDES**

**Spécialité : Génie chimique**

Intitulé du mémoire

***Déshydratation de la saumure rejetée par  
la station de dessalement de FOUKA***

Présenté par :

Bouchama Meriem

Boudahdir Khaoula

Encadré par :

Dr. Sadek Igoud

Dr. Fatiha Atmani

Année universitaire 2015/2016

## Résumé

L'objectif de ce mémoire est la déshydratation de la saumure dans un distillateur pilote de forme chapelle. Le principe de fonctionnement du distillateur est l'évaporation-condensation de la saumure, qui a un impact néfaste sur l'environnement, soit par des rayons solaires ou par une résistance électrique afin de la déshydrater pour produire de l'eau distillée et du sel.

Un plan d'expérience est suivi pour cette étude afin de minimiser le nombre d'expériences tout en maximisant l'information obtenue, les paramètres qui influent sur la production de l'eau distillée sont la température de chauffage, la salinité et le volume de la saumure introduit dans le distillateur. Les résultats obtenus ont montré l'efficacité du distillateur avec un rendement de 75% pour une température et une salinité égales respectivement à 150°C et 62g/l. La simulation numérique tridimensionnelle à l'aide d'un logiciel Ansys FLUENT 15.0 qui est un modèle numérique en volumes finis a été aussi adopté.

**Mots clés :** saumure, distillateur, évaporation-condensation, plan d'expérience, simulation numérique, VOF, FLUENT.

The objective of this memory is dehydration of brine in a pilot distiller chapel form. The principle of operation of the distiller is evaporation-condensation of brine, which has a detrimental impact on the environment, either by sunlight or by an electrical resistance in order to dehydrate for producing distilled water and salt .

An experimental plan (design) is followed for this study in order to minimize the number of experiments while maximizing the information obtained, the parameters affecting the production of distilled water are heating temperature, salinity and the volume of brine introduced into the distiller. The results showed the efficiency of the distiller with a yield of 75% for temperature and salinity respectively equal to 150 ° C and 62g / l. A three-dimensional numerical simulation using ANSYS FLUENT 15.0 was also adopted.

**Keywords :** brine, distiller, evaporation-condensation, experimental design, Numerical simulation, VOF, FLUENT.

الغرض من مشروع التخرج هو تجفيف محلول ملحي في جهاز تقطير تجريبي. مبدأ التشغيل لجهاز التقطير هو التبخر والتكثيف للمحلول الملحي، الذي له تأثير سلبي على البيئة، إما عن طريق أشعة الشمس أو عن طريق المقاومة الكهربائية لإنتاج الماء المقطر والملح. نقتراح نموذج متعدد الحدود لتقييم تأثير مختلف العوامل لظمان حسن سير هذه العملية و استخدام القيم المثالية. ويتبع خطة تجريبية لهذه الدراسة من أجل تقليل متعدد التجارب مع تعظيم المعلومات التي تم الحصول عليها، المعايير التي تؤثر على إنتاج الماء المقطر هي درجة الحرارة، نسبة الملوحة وحجم المحلول الملحي. أظهرت النتائج كفاءة التقطير بنسبة 75٪ لدرجات الحرارة 150 درجة مئوية و نسبة الملوحة المقدرة ب 62 ANSYS FLEUNT 15.0 اعتمد أيضا لدراسة التجربة. غ/ لتر. دراسة رقمية ثلاثية الأبعاد باستخدام البرنامج

الكلمات المفتاحية: محلول ملحي, جهاز التقطير , التبخر والتكثيف, نموذج متعدد الحدود, المحاكاة الرقمية, FLEUNT, VOF

## *Remerciement*

*En préambule à ce mémoire nous remerciant ALLAH qui nous a aidé et nous a donné la patience et le courage durant ces longues années d'étude.*

*Les premières personnes que nous tenons à remercier nos encadrants Madame ATMANI et Monsieur IGOUDE, pour l'orientation, la confiance, la patience qui ont constitué un apport considérable sans lequel ce travail n'aurait pas pu être mené au bon port. Qu'ils trouvent dans ce travail un hommage vivant à leur haute personnalité.*

*Nous aimerons adresser un remerciement particulier à Monsieur Tassalit Djilali, Monsieur Youcef, madame Sabti Aïcha, madame Nadia Chekir et madame Tigrine pour leur aide, leur gentillesse et leur soutien tout au long de ce travail.*

*Nous tenons à exprimer nos sincères remerciements à tous les enseignants du département de Génie des Procédés ainsi qu'aux personnels de centre de recherche l'UDES .*

*Nos parfonds remerciement pour les membres de jury qui ont accepté d'évaluer ce travail.*

*Merci* 

# *Dédicace*

*A la mémoire de mon père.*

*Très facile pour moi de ne pas oublier les encouragements, les soutiens, les conseils, l'ouverture d'esprit, la disponibilité . . . l'amour de mon père.*

*Mais très difficile pour moi oublier les souvenir de mon père.*

*A ma très chère mère.*

*A qui je dois tout simplement tout et qui m'a toujours entouré de sa amour et encouragement, le long de mes années d'étude.*

*A mon frère Kamal et hamza mes sœurs et leurs maris*

*A les enfants de mes sœurs : Mohamed, Moaad, Sifo, Khalil, Issam, housseem*

*A mon binôme Meriem avec qui j'ai collaboré mon projet de fin d'étude. En*

*fin à tous ceux qui m'apprécient à ma juste valeur.*

*A toutes ma famille.*

*A mes meilleures amies Pour leurs soutiens dans les moments difficiles.*

*Khaoula*

## **Sommaire**

Liste des tableaux

Liste des figures

Liste des abréviations

INTRODUCTION GENERALE ..... 1

### **CHAPITRE 1 : REVUE BIBLIOGRAPHIQUE**

1.1. LES PREVISIONS D'UN DEFICIT HYDRIQUE MONDIAL.....3

1.2. LE DESSALEMENT DANS LE MONDE ET EN ALGERIE : ETAT DES LIEUX.3

1.2.1. Le dessalement dans le monde.....3

1.2.2. Le dessalement en algérien.....4

1.3. LES TECHNIQUES DE DESSALEMENT : ETAT DE L'ART .....5

1.3.1. Les principales étapes du dessalement.....5

1.3.2. le dessalement par énergie conventionnelle.....6

1.3.3. le dessalement par énergie solaire.....7

1.4. LA PRODUCTION DE LA SAUMURE : PRINCIPAL INCONVENIENT DU DESSALEMENT.....9

1.4.1. Salinité de l'eau de mer et de la saumure.....9

1.4.2. Propriétés de la saumure.....11

1.4.3. Caractérisation physico-chimiques de la saumure de la baie de bou-ismaïl.....11

1.5. LE REJET DE LA SAUMURE.....12

1.5.1. Les procédés de rejet utilisés.....	13
1- Le rejet en mer.....	13
2- l'injection de la saumure dans les puits.....	14
3- L'évacuation de la saumure dans des bassins d'évaporation.....	14
1.5.2. Les impacts du rejet de la saumure sur l'environnement.....	15
1.6. VALORISATION DE LA SAUMURE.....	16
1.6.1. Les différents Type de sel .....	16
1.6.1.1. Le sel gris.....	16
1.6.1.2. Le sel blanc.....	16
1.6.1.3. Le sel rose.....	17
1.6.1.4. Le sel rouge.....	17
1.6.1.5. Le sel bleu.....	17
1.6.1.6. Le sel noir.....	17
1.6.2. La production de l'hypochlorite de sodium (eau de Javel).....	17
1.7. LES DIFFERENTS TYPES DE DISTILLATEURS SOLAIRES.....	18
1.7.1. Le distillateur solaire à simple effet et à double pentes.....	19
1.7.1.1. Echanges thermiques.....	19
1.7.1.2. Paramètres influant le fonctionnement du distillateur à effet de serre...	19
1.7.2. La serre utilisée pour le séchage solaire.....	20
1.7.2.1. Serre ouverte.....	20
1.7.2.2. Serre fermée.....	21

## **CHAPITRE 2 : MATERIELS ET METHODES**

2.1. MATERIELS UTILISE.....	22
2.2. MONTAGE EXPERIMENTAL.....	22
2.3. CONDITIONS OPERATOIRES .....	23
2.4. PROCEDURE EXPERIMENTALE.....	23
2.4.1. Déshydratation de la saumure par énergie conventionnelle.....	23
2.4.2. Déshydratation de la saumure par énergie solaire.....	24
2.4.2.1. Caractérisations volumétriques et quantitatives.....	24

2.4.2.2. Caractérisations physico-chimiques de l'eau distillée.....	25
2.5. TECHNIQUES ANALYSES.....	26
2.5.1. Analyse de l'eau distillée et du la saumure.....	26
2.5.1.1. Mesure de la conductivité, du PH et de la salinité.....	26
2.5.1.2. Mesure de la turbidité.....	26
2.5.1.3. Mesure de la quantité des sels dissous dans l'eau.....	26
a. Mesure de la quantité de $Ca^{2+}$ dans l'eau .....	26
b. Mesure de la dureté TH (Le titre hydrotimétrique) dans l'eau .....	26
c. Mesure de l'alcalinité TA (Le titre alcalimétrique) dans l'eau .....	26
d. titre alcalimétrique complet T.A.C.....	26
e. Dosage des chlorures.....	27

### **CHAPITRE 3 : RESULTATS ET DISCUSSION**

3.1. INTRODUCTION.....	28
3.2. RESULTATS ET DISCUSSION.....	28
3.2.1. Composition chimique de la saumure et de l'eau de mer.....	28
3.2.2. Caractérisations volumétrique de l'eau distillée produite.....	29
3.2.3. Caractérisations physico-chimiques de l'eau distillée produite.....	29
3.2.3.1. La salinité.....	29
3.2.3.2. Evolution de la conductivité en fonction du temps.....	29
3.2.3.3. Evolution de pH en fonction de temps.....	30
3.2.3.4. Evolution de volume en fonction de temps.....	30
3.2.3.5. Quantité de sel produite.....	31
3.3. ETUDE DUS EFFETS INFLUENÇANT LA DESHYDRATATION DE LA SAUMURE.....	32

3.3.1. Méthodologie de plan d'expérience.....	32
3.3.2. BUT DE LA METHODOLOGIE.....	32
3.3.3. AVANTAGES DES PLANS D'EXPERIENCES.....	32
3.3.4. MATRICE D'EXPERIENCE.....	33
3.3.5. ANALYSE STATIQUE D'ANOVA.....	34
3.3.6. Paramètres d'étude.....	34
3.3.6.1. Conditions optimales.....	34
3.3.6.2. Domaine expérimentale étudié.....	35
3.3.6.3. Résultats du plan d'expérience.....	35
3.3.6.4. Matrice d'expériences.....	35
3.3.6.5. Analyse statique d'ANOVA.....	36
3.3.6.6. Analyse statique du $R^2$ .....	37
3.3.6.7. Analyse graphique des résidus.....	38
3.3.6.8. Analyse graphique des effets et des interactions.....	39
3.3.6.9. Analyse de Pareto.....	40
3.3.6.10. Analyse des courbes d'ISO réponse .....	41
a. Intersection entre la température de chauffage et la salinité volume d'eau fixe .....	41
b. Intersection entre la température de chauffage et le volume d'eau a salinité fixe .....	43
c. Intersection entre le volume d'eau et la salinité à une température de chauffage fixe.....	45

## **CHAPITRE 4 : SIMULATION NUMERIQUE**

4.1. INTRODUCTION.....	47
4.2. PRESENTATION DU LOGICIEL FLUENT.....	48

4.3. GENERATION DE LA GEOMETRIE DU DISTILLATEUR SOUS LE PREPROCESSEUR GAMBIT .....	48
4.4. PROCEDURE DE CALCUL SOUS FLUENT.....	50
4.5. RESULTATS NUMERIQUES.....	53
4.5.1. Valeurs des variables de discrétisation.....	53
4.5.2. Sous relaxation.....	54
4.5.3. Paramètres physico-chimiques du fluide et solide.....	54
4.5.4. Evolutions des résidus de calcul.....	55
4.5.5. Evolution de la température .....	56
4.5.6. Evolution des phases .....	57
4.5.7. Evolution de la densité.....	58
4.6. CONCLUSION.....	60
CONCLUSION.....	61

## **LISTE DES EQUATIONS**

(3.1) : Equation de plans d'expériences

(3.2) : Equation de rendement

(3.3) : Equation du rendement en %

(3.4) : Equation de carré moyen

(3.5) : Equation polynomiale de second ordre

(3.6) : Equation du Résidus

(3.7) : Equation du L'analyse Pareto

## **LISTE DES FIGURES**

### **CHAPITRE 1 : REVUE BIBLIOGRAPHIQUE**

Figure 1.1 : Evolution du déficit hydrique entre 1995 et 2025 .....	3
Figure 1.2 : Le dessalement de l'eau de mer en Méditerranée .....	4
Figure 1.3 : Localisation des usines de dessalement de l'eau de mer en Algérie.....	4
Figure 1.4 : Le principe de dessalement de l'eau de mer.....	6
Figure 1.5 : Première usine de dessalement par distillation solaire à effet de serre(Chili) 1872 .....	9
Figure 1.6 : Dessalement par distillation alimentée par chauffe-eau solaire .....	9
Figure 1.7 : Dessalement par distillation par concentration solaire Qatar 2012.....	9
Figure 1.8 : Projet de dessalement par concentration solaire au Qatar .....	9
Figure 1.9 : Rejet de la saumure en mer .....	14
Figure 1.10 : Rejet utilisant l'évaporation par pulvérisation (évaporateur Turbo-Mist).....	15
Figure 1.11 : Production de sel, Salar de Uyuni(Bolivie) .....	16
Figure 1.12 : Distillateur solaire à effet de serre et à double pentes.....	18
Figure 1.13 : distillation à effets multiples.....	18
Figure 1.14 : Séchage solaire des boues .....	21
Figure 1.15: Exemple de serre fermée - Extraction par cheminée .....	21

### **CHAPITRE 2 : MATERIELS ET METHODES**

Figure 2.1 : Schéma du distillateur.....	23
Figure 2.2 : Le montage de distillateur avec énergie électrique.....	24
Figure 2.3 : La partie inferieur du distillateur en acier, contenant la plaque absorbante noir et un Isolation thermique.....	25
Figure 2.4 : Le distillateur solaire .....	25

### **CHAPITRE 3 :INTERPRETATION ET DISCUSSIONS DES RESULTATS**

Figure 3.1: Variation de la conductivité d'eau en fonction du temps.....	29
Figure 3.2. : Variation de PH d'eau en fonction du temps.....	30
Figure 3.3 : Variation de volume d'eau produite en fonction du temps.....	30
Figure 3.4 : Les valeurs de répons prédites par le modèle en fonction des valeurs observées.....	38
Figure 3.5 : Résidus observés en fonction des valeurs prévues.....	38
Figure 3.6 : Analyse graphique des effets.....	39
Figure 3.7 : Analyse graphique de Pareto.....	40
Figure 3.8 : parcelles de contours et surface de réponse en trois dimensions pour des volumes d'eau fixes.....	41
Figure 3.9 : parcelles de contour et surface de réponse en trois dimensions pour des Salinités fixes.....	43
Figure 3.10 : parcelles de contour et surface de réponse en trois dimensions pour des températures fixes.....	45

### **CHAPITRE 4 : SIMULATION**

Figure 4.1 : création de la géométrie en 3D.....	49
Figure 4.2: Maillage des parois.....	49
Figure 4.3: Maillage des différentes surfaces et du volume du distillateur.....	50
Figure 4.5 : Résidus de calcule numérique.....	55
Figure 4.6 : Evolution de la température statique au cours du temps.....	57
Figure 4.7: Evolution de la phase vapeur a t=0s.....	57

Figure 4.8: Evolution de la phase vapeur a t=5jr.....	58
Figure 4.9: Evolution de la densité a t=0s.....	59
Figure 4.10 : Evolution de la densité a t=5s.....	59
Figure 4.11 : Evolution de la densité a t=10s.....	59
Figure 4.12 : Evolution de la densité a t=20s.....	60

## **LISTE DES TABLEAUX**

### **CHAPITRE I : REVUE BIBLIOGRAPHIQUE**

Tableau 1.1 : Capacité de MSF et Osmose Inverse dans l'Algérie.....	5
Tableau 1.2: Caractéristiques des principales technologies de dessalement.....	7
Tableau 1.3 :Composition standard de l'eau de mer océaniqueet l'eau saumure.....	10
Tableau 1.4 : Propriétés de NaCl.....	11
Tableau 1.5: Résultats des analyses physico chimiques de la saumure et de l'eau de mer.....	12
Tableau 1.6 : Caractéristique de la saumure pour la production de l'eau de javel.....	17

### **CHAPITRE 3 : RESULTATS ET DISCUSSION**

Tableau 3.1 : Composition chimique du la saumure et de l'eau d'mer.....	28
Tableau 3.2 : Variation volumétrique de la production de l'eau distillée .....	29
Tableau 3.3 : La quantité de sel obtenue de chaque expérience.....	31
Tableau 3.4 : caractérisation des échantillons moyens de distillée par énergie solaire et conventionnelle.....	31
Tableau 3.5 : Gammes et niveau expérimentaux des variables indépendantes d'essais.	35
Tableau 3.6 : Matrice du plan expérimental.....	36
Tableau 3.7 : ANOVA pour la réponse de surface du modèle quadratique.....	37
Tableau 3.8: Evolution du rendement de la production de l'eau distillée pour différents volumes.....	42
Tableau 3.9 : Evolution du rendement de la production de l'eau distillée pour des	

salinités différentes.....	44
Tableau 3.10: Evolution du rendement de la production de l'eau distillée pour différentes températures.....	45

#### **CHAPITRE 4 : SIMULATION NUMERIQUE**

Tableau 4.1 : les valeurs des variables de discrétisation.....	54
Tableau 4.2 : les valeurs de sous relaxation des différentes variables.....	54
Tableau 4.3 : Paramètres physico-chimiques de l'eau.....	55

#### *liste des abréviations*

MSF : Distillation à détente étagée

MED : Multi-Effet-Distillation (distillation à effet multiple)

VCD : Distillation par Compression de Vapeur

OI : Osmose Inverse

ED : Electrodialyse.

EDTA : acide citrique (Éthylène Diamine Tétra-Acétique)

CDER :Centre de Développement des Energies Renouvelables

TA : Le titre alcalimétrique

T.A.C : Le titre alcalimétrique complet

TH :Le titre hydrotimétrique

T : température (°C)

t : le temps (min)

CFD : ComputationalFluid Dynamics

GAMBIT : Geometry And Mesh Building Intelligent Toolkit

VOF :Volume of fluid

V : le volume (ml ou l)

NTU : Unité turbidité dite néphélométrique.

TDS : Taux des sels dissous

EDTA : Éthylène Diamine Tétra-Acétique

NaOH : L'hydroxyde de sodium

NET : Le Noir ériochrome T

H ,h : la hauteur (cm)

L : la Longueur (cm)

e : la Peaussière (cm)

l : La largeur (cm)

AgNO<sub>3</sub> : nitrate d'arguait

- **PRESENTATION DE L'UDES**



L'Unité de Développement des Équipements Solaires a été créée par arrêté N° 008 du 9 Janvier 1988 de la Présidence de la République (Journal officiel N°06 du 10 février 1988). Depuis le 05 décembre 2007, date de publication de l'arrêté ministériel portant création des Entreprises Publiques à caractère Scientifique et Technique, l'UDES a été intégrée dans l'EPST Centre de Développement des Energies Renouvelables.

Les missions principales de l'Unité de Développement des Équipements Solaires sont de :

- Réaliser des travaux de conception, de dimensionnement et d'optimisation des équipements en énergies renouvelables pour la production de la chaleur, l'électricité, le froid et le traitement des eaux ;
- Mettre en œuvre toutes études et recherches de développement de procédés technologiques de fabrication de prototypes, équipements et des préséries ;
- Etablir des études technico-économiques, d'engineering pour mettre en place des installations pilotes en vue d'assurer le transfert et la maîtrise de nouvelles technologies;

- Mettre en place les techniques de caractérisation, de tests, de contrôles qualité et de conformité, en vue d'assurer la qualification, l'homologation et la certification des équipements développés [1].

- **LOCALISATION DU SITE D'EXPERIMENTATION**

L'Unité de Développement des Equipements Solaires « UDES » est rattachée au Centre De Développement des Energies Renouvelables « CDER » de Bouzaréah sous la tutelle de Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique « MERS ». Le siège de l'unité de recherche est situé à Bou-Ismaïl, dans la wilaya de Tipasa [1].

- **LOCALISATION DE L'USINE DE DESSALEMENT DE L'EAU DE MER DE FOUKA :**

La station de dessalement d'eau de mer de Fouka est située dans la commune de Fouka (daïra de Douaouda), quelques kilomètres à l'est de l'UDES. Elle a été réalisée et est exploitée par l'entreprise "Myah Tipasa" qui représente un groupement d'entreprises constitué d'AEC (Algerian ElectricalEnergy) et de la canadienne "SNC Lavallin",

L'usine utilise le procédé membranaire par osmose inverse dessalé quotidiennement 120 000 m<sup>3</sup>, dont 60 000 m<sup>3</sup> destinés à ALGER pour les communes de ZERALDA, MEHALMA, STAOUELI et AÏNBENIAN. Les 60 000 m<sup>3</sup> restants couvrent les besoins de 17 communes comptant une population estimée à 476 372 habitants : DOUAOUDA, FOUKA, BOU ISMAIL, AIN TAGOURAIT, ATTATBA et CHAIBA.

Le procédé de dessalement utilisé engendre également la production de la saumure qui constitue le retentât de la filtration. Cette saumure est caractérisée par, en moyenne,

1,5 à 2 fois la concentration en sel (NaOH) par rapport à l'eau de mer. L'usine rejette en mer 55% du volume de l'eau de mer dessalée ; soit environ 146 600 m<sup>3</sup> par jour [2].

## INTRODUCTION GENERALE

L'eau est une substance essentielle à la survie et au développement de l'humanité. Mais que va devenir cette fragile ressource ?

pour mieux préserver l'avenir en matière de dégagement et de mobilisation des ressources en eau, il est plus judicieux de repenser à la planification des ressources en eau conventionnelles dans le cadre d'une vision globale qui intègre également l'utilisation des ressources en eau non conventionnelles notamment le dessalement de l'eau de mer et des eaux saumâtres

Le dessalement des eaux saumâtre et de l'eau de mer procure une solution séduisante à cette problématique. C'est pourquoi le marché du dessalement est d'ores et déjà en pleine expansion avec une progression de 7% par an. Les procédés de dessalement ayant montré leur fiabilité sont [3] : l'osmose-inverse, la distillation à effet multiple ....etc.

Le distillateur solaire est une technique passive, nécessitant des moyens limités pour distiller de l'eau salée, saumâtre ou souillée grâce à la chaleur du Soleil. Ce procédé élimine aussi les impuretés telles que les métaux lourds et les micro-organismes [4].

La production du distillateur dépend du gradient de température qui existe entre la température de l'eau dans le bassin et la couverture transparente du distillateur [3].

L'objectif de ce travail est l'étude des performances d'un distillateur fonctionnant par énergie solaire et électrique conventionnelle pour déshydrater la saumure rejetée par

la station de dessalement de Fouka et ce dans le but de produire du sel et de l'eau distillée. Afin d'améliorer ses performances, plusieurs solutions sont proposées :

- Une optimisation du fonctionnement du distillateur qui nécessite le recours à des méthodes numériques poussées pour simuler: L'hydrodynamique, La cinétique et le Transfert thermique par la méthode CFD (computational fluid dynamics) en utilisant l'interface de simulation Ansys FLUENT.
- Un plan d'expérience pour analyser simultanément les effets des variables d'entrée sur une variable de sortie.

Ce travail a été effectué au laboratoire Épuration et valorisation des eaux de rejet (UDES), et il est structuré en quatre chapitres :

Le premier chapitre comporte une synthèse bibliographique sur les eaux saumâtres et l'eau de mer, le distillateur solaire et les différentes techniques de dessalements.

Le deuxième chapitre est consacré à la description des instruments de mesure utilisés, ainsi que le mode opératoire suivi pour chaque méthode.

Quant au troisième chapitre, il est consacré à la caractérisation de l'eau distillée obtenue. L'étude paramétrique de la déshydratation de la saumure est également présentée, suivie d'une modélisation du phénomène par le plan d'expérience.

Le quatrième chapitre de ce mémoire est consacré dans un 1<sup>er</sup> temps à une synthèse bibliographique sur la simulation numérique avec l'logiciel ANSYS FLUENT et dans un second temps, à l'interprétation des résultats numériques obtenus.

Ce travail se termine par une conclusion qui résumé les résultats obtenus et trace quelques perspectives pour le futur.

## ***CHAPITRE 1 : REVUE BIBLIOGRAPHIQUE***

## 1.1 LES PREVISIONS D'UN DEFICIT HYDRIQUE MONDIAL

En 2013, une étude des Nations Unies [5] a évalué la population mondiale à 7 milliards de personnes. Cette étude a prévu que cette population atteindra 9,1 Milliards de personnes, en 2050.

La demande en eau augmentera également sous l'effet du changement climatique, particulièrement dans les zones arides et semi-arides comme c'est le cas de la région de l'Afrique du Nord et moyen orient (Figure 1.1). Cela est induit par l'augmentation des températures et une grande variabilité des précipitations sous l'effet des rejets de plus en plus importants du CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère [5].

Pour répondre au déficit hydrique existant et surtout celui prévu, le recours au dessalement de l'eau de mer a été la principale solution proposée et actuellement la plus répandue.

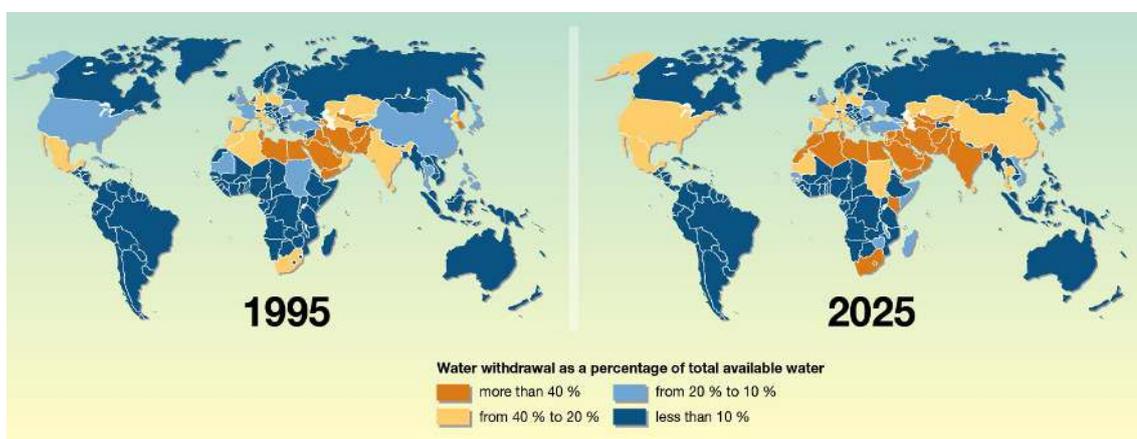


Figure 1.1 : Evolution du déficit hydrique entre 1995 et 2025 [6].

## 1.2 LE DESSALEMENT DANS LE MONDE ET EN ALGERIE

### 1.2.1 Le dessalement dans le monde

Seul 0,03% de l'eau totale mondiale est de l'eau douce disponible. Actuellement, selon les Nations Unies [7], un milliard de personnes vivent dans des zones où l'eau est rare. L'accès à l'eau est, fondamentalement, un enjeu multidimensionnel.

L'un des groupes de pays les plus défavorisés sont les Pays Sud-Méditerranéens car ils sont situés dans une zone aride caractérisée par des ressources en eau raréfiées. Il est estimé que ces pays détiennent moins de 1% de l'eau douce renouvelable mondiale. En plus, leurs réserves d'eau diminuent à un rythme accéléré, évalué à un tiers par rapport aux niveaux de 1960 et le seront de moitié d'ici à 2050.

En 2010, la moyenne annuelle du volume d'eau disponible par habitant dans la plupart de ces pays est estimée à environ 1000 m<sup>3</sup>, ce chiffre devrait atteindre les 460 m<sup>3</sup> d'ici 2023.

Face à la rareté de l'eau, de plus en plus menaçante, le dessalement de l'eau de mer et de l'eau saumâtre offre une importante opportunité particulièrement en Méditerranée (figure 1.2). En 2015, cette alternative a permis de produire 86, 8 millions m<sup>3</sup>/jour d'eau douce à 70 % à partir d'eau de mer et 30% d'eau saumâtre [8]. Ce marché, comptant plus de 18000 usines de dessalement augmenterait de 10% par an. Le secteur justifie cet attrait économique par la possibilité quasi-illimitée de produire de l'eau douce et la chute de ses coûts particulièrement par la technique membranaire (osmose inverse) [8].

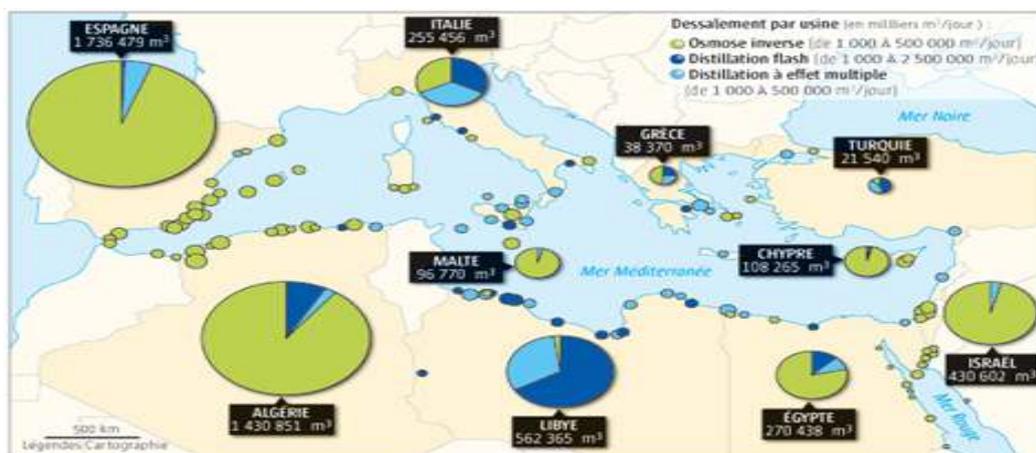


Figure 1.2 : Le dessalement de l'eau de mer en Méditerranée [9].

### 1.2.2. Le dessalement en Algérie

A l'instar des pays vulnérables en ressources hydriques, particulièrement ceux de la Méditerranée sud, l'Algérie a choisi dès 2003, de faire face au déficit des ressources hydriques par le dessalement de l'eau de mer [10].

Depuis 2008 à ce jour, le nombre des grandes installations de dessalement de l'eau de mer est estimé à 13 usines réparties sur le littoral (figure 1.3). Ces dernières ont une capacité de production d'eau douce de 1 606 880 m<sup>3</sup>/jour (tableau 1.1) et utilise presque exclusivement la technologie membranaire de l'osmose inverse.



Figure 1.3 : Localisation des usines de dessalement de l'eau de mer en Algérie [11]. A part les grandes installations, l'Algérie a également mis en service de petites installations des mono-Blocs qui sont gérées par des sociétés régionales de traitement et de distribution de l'eau. La capacité de production totale de l'eau douce dessalée est estimée à 57 500 m<sup>3</sup>/j [12].

Tableau 1.1 : Capacité de MSF et Osmose Inverse dans l'Algérie[13].

LOCALISATION	CAPACITE (m <sup>3</sup> /j)	PROCEDE	MISE EN SERVICE
Kahrama (Arzew)	86 880 et 320 MW	MSF	12 /11/ 2005
Hamma (Alger)	200 000	Osmose Inverse	02/02/2008
Skikda (Zone Industrielle)	100 000		03/03/2009
Beni Saf (Ain Temouchent)	200 000		15/11/2009
Souk Tlata (Tlemcen)	200 000		13/05/2011
Fouka (Tipasa)	120 000		30/07/2011
Mostaganem	200 000		28/09/2011
Hunnaya (Tlemcen)	200 000		30/07/2012
Cap Djenet (Boumerdès)	100 000		28/09/2011
Ténès (Chlef)	200 000		19/07/2007
Magtaa (Oran)	500 000		Juin 2016
Béjaïa	100 000		En cours de lancement
Oued Sebt	100 000		
El Taref	100 000		
<b>TOTAL</b>	<b>1 606 880</b>		<b>Horizon 2016</b>

### 1.3. LES TECHNIQUES DE DESSALEMENT

#### 1.3.1. Les principales étapes du dessalement

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

- Une prise d'eau
- Un prétraitement
- Une 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 [14].

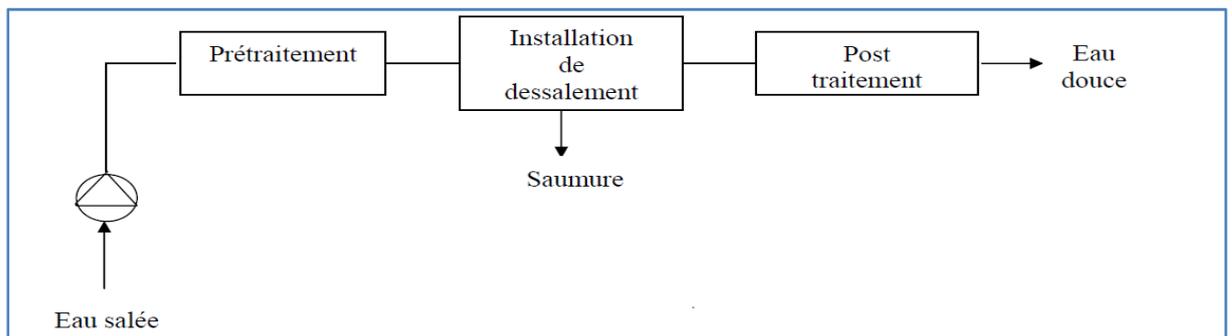


Figure 1.4 : Le principe de dessalement de l'eau de mer[14].

### 1.3.2. Le dessalement par énergie conventionnelle

Les différents procédés peuvent être classés en trois grandes familles.

#### 1. Les procédés chimiques

Échange d'ions, extraction par solvant.

#### 2. Les procédés faisant intervenir un changement de phase

- Evaporation,
- Congélation.

#### 3. Les procédés membranaires

Ces procédés traitent la saumure.

Transfert d'ions sous l'action d'un champ électrique (électrodialyse) ou d'un gradient de pression.

Transfert d'eau sous l'action d'un gradient de pression (osmose Inverse) ou sous l'action d'un gradient de température (thermo-osmose).

Une synthèse des technologies les plus utilisées pour le dessalement de l'eau de mer est présentée dans le tableau 1.5. Ces technologies sont basées sur deux procédés principaux : séparation par évaporation et par membrane [14].

Tableau 1.2:Caractéristiques des principales technologies de dessalement [14].

Osmose Inverse(OI)	Processus membranaire, le système le plus commun en service. Une membrane semi-perméable sépare deux solutions de concentrations différentes.
Electro-Dialyse (ED)	Procédé membranaire. Une série de membranes est placée entre deux électrodes et subit un champ électrique. Il est en général approprié à l'eau saumâtre et pour traiter les puits pollués.
Distillation à détente étagée (MSF)	Procédé 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 provoque l'évaporation d'une partie de l'eau.
Distillation à effet multiple (MED)	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 VCD	Procédé d'évaporation, basé selon le principe d'une pompe à chaleur. Cycles répétés de condensation et d'évaporation
----------------------	--

En général, tous les procédés 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 des unités de dessalement. Actuellement, le procédé de dessalement par osmose inverse est le procédé le plus efficace en termes d'énergie et coûts [14]. En effet, 4 à 5 kWh sont nécessaires pour traiter un mètre cube d'eau par osmose inverse contre 15 kWh pour le procédé thermique (distillation) [9].

### **1.3.3. Le dessalement par énergie solaire**

Les procédés utilisés pour le dessalement de l'eau sont très consommatrices en énergie, même si la tendance est à la baisse, notamment grâce au développement de l'osmose inverse et d'autres technologies innovantes (**le dessalement par énergie conventionnelle**).

En moyenne, dessaler 1 m<sup>3</sup> d'eau moyennement salée nécessite une quantité d'énergie estimée entre 3 à 4 kWh par osmose inverse et jusqu'à 40 kWh par Distillation à détente étagée ou multi-flash (MSF) (Tableau 1.2). Cette énergie est le plus souvent fournie par des combustibles fossiles qui présentent pour l'environnement l'inconvénient d'émettre des polluants atmosphériques, notamment du dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>), des oxydes de soufre et d'azote et des particules solides[7].

Etant donné que la principale barrière au dessalement à savoir forte consommation énergétique qui a des répercussion directe sur son coût et sur le rejet des gaz à effet de serre, le recours à l'utilisation des énergies renouvelables s'est imposé pour optimiser d'avantage cette technologie et lui assurer sa durabilité.

Deux principales approches existent : la première consiste en la génération de l'électricité par des centrales fonctionnant aux énergies renouvelables (centrales photovoltaïques, centrales à concentration solaire...); ce qui évite de modifier la technologie de dessalement particulièrement l'osmose inverse. Cette configuration existe aussi à petite échelle pour des approvisionnements domestiques à partir des eaux saumâtres et polluées. En Algérie, cette application a été expérimentée par le Centre de Développement des Energies Renouvelables (CDER), à la fin des années 1990, pour l'approvisionnement de 800 habitants à Hassi-Khebi, à 400 km au nord-est de la ville de Tindouf [15].

La seconde configuration utilisée pour le dessalement par énergie renouvelables est utilisée pour le chauffage de l'eau au cours de l'évaporation ou la distillation. Dans ce domaine d'application, différentes configurations peuvent exister :

- L'utilisation directe de l'énergie solaire à travers des distillateurs à effet de serre,
- L'utilisation indirecte de l'énergie thermique générée par le soleil (chauffe-eau, concentrateurs...), la biomasse (biogaz, bio-carburants, ...), la géothermie.
- L'utilisation indirecte de l'énergie solaire à travers des matériaux à changement de phase pour le stockage de la chaleur (énergie thermique),

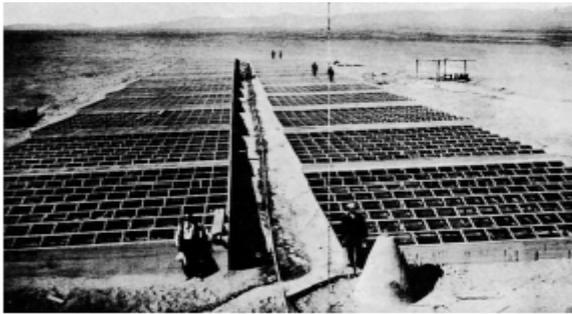


Figure 1.5 : Première usine de dessalement par distillation solaire à effet de serre (Chili) 1872 [16].



Figure 1.6 : Dessalement par distillation alimentée par chauffe-eau solaire [17]



Figure 1.7: Dessalement par distillation alimentée par concentration solaire Qatar 2012 [18].



Figure 1.8: Projet de dessalement concentration solaire au Qatar [18].

## **I.4. LA PRODUCTION DE LA SAUMURE : PRINCIPAL INCONVENIENT DU DESSALEMENT**

Le principal impact environnemental associé aux procédés de dessalement est la production de saumure : c'est une solution à forte teneur en sels qui résulte de la « concentration » de l'eau de mer ou de l'eau saumâtre dessalée.

### **1.4.1. Salinité de l'eau de mer et de la saumure**

La principale différence entre l'eau douce, l'eau de mer et la saumure est la différence de salinité (c'est la concentration en sels dissous en mg/l ou ppm, particulièrement le chlorure de sodium : NaCl).

La salinité de l'eau de mer peut varier suivant la localisation sur le globe terrestre: la salinité la plus basse se rencontre au voisinage des pôles et elle augmente au fur et à mesure que l'on se rapproche de l'équateur. Mais l'ordre de grandeur de 35 g/l est retenu comme valeur standard de salinité de l'eau de mer. Quelques valeurs moyennes de la salinité de l'eau de mer sont données ci-dessous [19]:

- Mer Baltique: 7 g/l
- Océan atlantique: 35 g/l
- Mer Méditerranée: 38 g/l
- Mer Rouge: 40 g/l
- Mer Morte: 270 g/l

La composition standard de l'eau de mer océanique et celle de la saumure sont données dans les tableaux suivants :

Tableau 1.3 :Composition standard de l'eau de mer océaniqueet l'eau saumure [19].

	<b>Composition de l'eau de mer (g/l)</b>	<b>Proportion (%)</b>	<b>Composition de l'eau saumure (g/l)</b>	<b>Proportion (%)</b>
<b>Sodium</b>	11,035	30,64%	104,0	38,0%
<b>Magnésium</b>	1,330	3,69%	0,4	0,1%
<b>Calcium</b>	0,418	1,16%	1,8	0,7%

<b>Potassium</b>	0,397	1,10%	1,5	0,5%
<b>Strontium</b>	0,014	0,04%	/	/
<b>Chlorures</b>	19,841	55,08%	160,0	58,5%
<b>Sulfates</b>	2,769	7,69%	6,0	2,2%
<b>Bicarbonates</b>	0,146	0,41%	/	/
<b>Bromures</b>	0,068	0,19%	/	/
<b>Fluorures</b>	0,001	0,00%	/	/
<b>Total</b>	36,02	100%	273,70	100%

Il est à remarquer que les ions qui sont présents majoritairement dans l'eau de mer et la saumure sont le chlorure  $\text{Cl}^-$  et le sodium  $\text{Na}^+$ . Nous constatons aussi d'après ces deux tableaux que la proportion de chaque ion est sensiblement la même dans les 2 cas [19].

Les propriétés de NaCl sont regroupées dans le tableau ci-dessous:

Tableau 1.4 : Propriétés de NaCl [19]

	<b>Formule</b>	<b>Masse molaire (g/mol)</b>	<b>Masse volumique (<math>\text{Kg/m}^3</math>)</b>	<b>Chaleur de cristallisation <math>L_c(\text{Kj/mol})</math></b>
<b>Chlorure de sodium</b>	NaCl	58,44	2163	-1,6

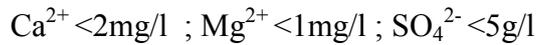
#### **1.4.2. Propriétés de la saumure**

En général, la saumure se caractérise par les propriétés suivantes [20] :

- La saumure doit être claire et transparente,
- Sans odeur désagréable
- pH entre 5,6 et 6,2
- Ne doit pas dépasser les normes de qualité (quantités d'impuretés et Éléments chimiques nuisibles faibles)
- Composition chimique des ions ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{ClO}_3^-$ ) est conforme aux normes.

- Concentration de la saumure doit être comprise entre 290 et 300 g/l, (NaCl).

Quant à la composition de la saumure purifiée, elle est donnée comme suit [20]



### **1.4.3. Caractérisation physico-chimiques de la saumure de la baie de bou-ismaïl**

Concernant l'eau de mer prélevée au niveau de la baie de Bou-Ismaïl et la saumure rejetée par l'usine de dessalement, les analyses effectuées ont montré que la composition chimique et la quantité des éléments chimiques dans la saumure et l'eau de mer diffèrent [20].

Le (tableau 1.5) résume l'analyse physico chimique de l'eau de mer et de la saumure de l'installation de dessalement

Tableau 1.5: résultats des analyses physico chimiques de la saumure et de l'eau de mer [20].

	saumure	Eau de mer
Turbidité (NUT)	0.19	24,6
Conductivité (ms/cm)	91.4	54
T°(C)	24.4	24,1
pH	8.197	8,401
Salinité	66.9	36,1
TDS (mg/l)	/	/
Oxygène dissout (mg/l)	58.5	61,8
Nitrite (mg/l)	0	0,04
Phosphate (mg/l)	0	0,17
Ammonium (mg/l)	0.35	1,27
Nitrate (mg/l)	0	0,02
Calcium (mg/l)	920	400
Magnésium (mg/l)	2088	1224
Dureté (°F)	1100	610
Chlorure (mg/l)	38572,864	21555,424
Bicarbonate (mg/l)	/	/
TAC (°F)	24,5	16
Sulfate (mg/l)	1821,95	/

## **1.5. LE REJET DE LA SAUMURE**

Considérée comme un déchet liquide, la saumure des usines de dessalement est généralement rejetée par dispersion dans la mer, particulièrement dans les régions côtières, Dans ce cas de figure, l'utilisation de la technique de l'osmose inverse est reconnue moins polluante comparativement aux procédés de l'Electro-Dialyse (ED), Distillation à Détente Etagée (MSF), et Distillation à Effet Multiple (DME) (tableau I.5) puisque moins polluante. En effet, Les caractéristiques de l'osmose inverse indiquent que le volume des rejets de la saumure compte environ le même volume transformé en eau douce. Par conséquent, la concentration de la salinité de la saumure représente 1 à 1,5fois celle de l'eau de mer utilisée [21].

C'est en zones terrestre que la problématique du rejet de la saumure est la plus difficile à résoudre. Deux principales solutions sont utilisées [7] :

### **1.5.1. Les procédés de rejet utilisés**

#### **1.5.1.1. Le rejet en mer**

L'élimination de la saumure (55 à 70% du débit d'alimentation) par son rejet en mer constitue un vrai problème environnemental nécessitant son étude lors de l'implantation d'une unité de dessalement.

Ayant une densité beaucoup plus élevée que l'eau de mer (50 à 75 g/L), elle se dépose sur le fond marin proche de la sortie de la conduite (effet panache) et forme ainsi une couche très salée pouvant engendrer des impacts négatifs sur la faune et la flore maritime ainsi que d'éventuelles activités humaines [22].

Trois techniques sont utilisées [22]:

##### **a. MELANGE**

Afin d'éviter l'effet panache, il est avantageux de placer la sortie de la conduite au niveau d'un courant fort, optimisant ainsi le **mélange de la saumure** et de l'eau de mer.

##### **b. DIFFUSION**

La **diffusion de la saumure** peut être réalisée à l'aide d'une conduite perforée installée sur le sol sous-marin. Les diffuseurs consistent en des vannes anti retour caoutchouc. Une pompe de décharge doit alors être prévue afin de fournir une pression suffisante.

### c. DILUTION

Lorsqu'une limite maximale de décharge doit être respectée, la saumure doit être diluée avec:

- Eau fraîche naturelle (rivière) si l'installation est située près d'un delta
- Effluent d'eau usée rejeté dans la mer
- L'eau de mer venant de la pompe d'alimentation, ce qui nécessite une capacité de prise d'eau de mer plus importante.

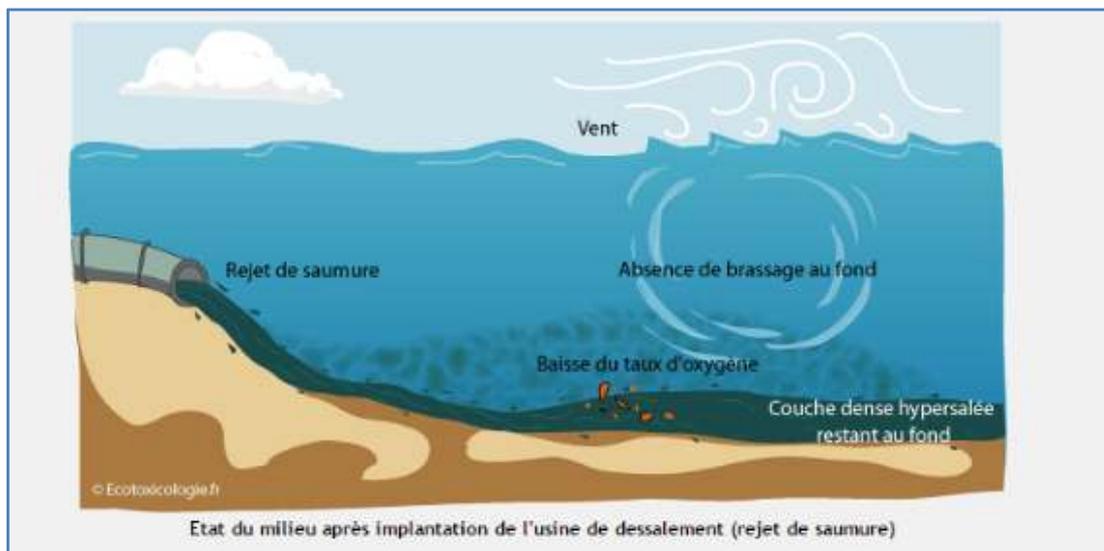


Figure 1.9 : Rejet de la saumure en mer [9].

#### **1.5.1.2. L'injection de la saumure dans les puits**

Cette solution a été jugée dangereuse pouvant entraîner la destruction de la nappe aquifère et compromettre son exploitation à long terme à cause des risques de contamination et des fissures.

#### **1.5.1.3. L'évacuation de la saumure dans des bassins d'évaporation**

L'évaporation solaire est la plus appropriée pour extraire l'eau de la saumure par évaporation naturelle, particulièrement dans les régions relativement chaudes, avec un climat sec (cas de l'Arabie Saoudite et le Nouveau Mexique).

Pour améliorer l'évaporation naturelle des bassins, il est entrepris :

- Evaporation par pulvérisation (figure 1.10) qui réduit la taille du bassin d'évaporation d'un sixième,
- Production de turbulences dans le bassin ;
- Circulation de la saumure sur des surfaces inclinées et rugueuses ;
- Création de débits d'air au-dessus du bassin d'évaporation

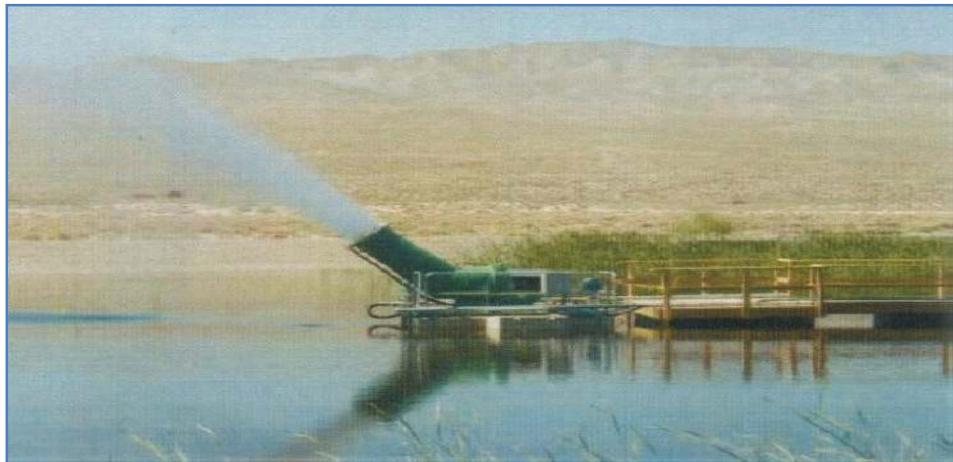


Figure 1.10 : Rejet utilisant l'évaporation par pulvérisation (évaporateur Turbo-Mist) [7].

### **1.5.2. Les impacts du rejet de la saumure sur l'environnement**

Les scientifiques s'accordent sur le fait que les impacts des effluents issus des usines de dessalement sont principalement dus à la forte concentration en sel et dans une moindre mesure à la présence de produits chimiques (utilisés pour le fonctionnement de l'usine) et à la température potentiellement élevée de ces eaux [9].

- Un rejet continu d'eaux avec une forte salinité et une température élevée, induisant une diminution de la teneur en oxygène, qui peut être fatal pour certains organismes et provoque aussi un changement durable dans la diversité des espèces.
- Une disparition du corail et des organismes planctoniques et une diminution des populations de poissons à proximité du rejet de l'unité de dessalement.
- Une diminution de la diversité et de l'abondance de la macrofaune benthique

Mis à part le rejet de la saumure, l'augmentation de la consommation de l'énergie électrique, provoque également la pollution environnementale particulièrement par l'augmentation de l'émission des gaz à effet de serre. Il est indiqué qu'Indépendamment de leurs impacts négatifs sur la santé, les émissions des gaz à effet de serre contribuent au changement climatique, avec ses effets négatifs sur l'élévation du niveau de mer, la vie marine côtière, les zones humides, les forêts, la biodiversité et la désertification. En général, environ 15% de la consommation totale en énergie est attribuable au secteur de l'eau. [7].

## 1.6. VALORISATION DE LA SAUMURE

Ce procédé existe à l'état naturel puisqu'il est utilisé pour la production du sel à partir de l'eau de mer dans les salières (figure 1.11). Au fur et à mesure de l'évaporation de l'eau de mer, le sel cumulé est groupé sous forme de dôme [23].



Figure 1.11: Production de sel, Salar de Uyuni (Bolivie) [24].

Dans plusieurs civilisations, le sel a été considéré comme une valeur symbolique.

En Bolivie, le salar d'Uyuni (Figure 1.11) constitue le plus grand désert de sel du monde dont la formation remonte à 10.000 ans [24].

### 1.6.1. Les différents Type de sel

#### **1.6.1.1. Le sel gris**

C'est le sel marin à l'étal brut n'ayant subi aucun traitement ni lavage. Il est récolté sur une terre argileuse et il est chargé de minéraux et d'oligo-éléments qui lui donnent cette couleur [20].

#### **1.6.1.2. Le sel blanc**

C'est du sel gris qui a subi plusieurs lavages successifs pour lui enlever ses impuretés, le plus souvent il s'agit de sel raffiné, qui a perdu la plus grande partie de ses minéraux et donc de sa couleur aussi [20].

#### **1.6.1.3. Le sel rose**

Le sel rose Maras du Pérou prit leur couleur de leur teneur élevée en sels minéraux, et notamment en fer [20].

#### **1.6.1.4. Le sel rouge**

Il provient d'Alaca d'Hawai et il contient une argile volcanique riche en oxyde de fer.

#### **1.6.1.5. Le sel bleu**

Originaire d'Iran, il est parsemé de cristaux de sylvinite, un minéral riche en potassium [20].

#### **1.6.1.6. Le sel noir**

Il provient lui aussi des îles Hawaï notamment des roches de lave noire mélangées avec une petite partie de charbon dans les bassins où il est récolté [20].

### **1.6.2. La production de l'hypochlorite de sodium (eau de Javel)[20]**

La station de traitement d'eau potable du barrage Medaouar, Timgad-W- Batna, produit de l'eau de javel.

Le procédé d'électrolyse exige l'emploi de la saumure de bonne d'eau de javel qualité pour réaliser une bonne production comme le montre le tableau 1.6Ci-dessous.

Tableau 1.6 :Caractéristique de la saumure pour la production de l'eau de Javel [20]

Caractéristique de la saumure	% Max	%Min
Salinité	99,5	98,8
Calcium	0,09	0,05
Magnésium	0,15	0,06
Sulfates	0,38	0,34

### 1.7. LES DIFFERENTS TYPES DE DISTILLATEURS SOLAIRES

Différentes conceptions de distillateurs solaires à effet de serre, ou à effet simple, ont été étudiées notamment : hot box à simple et double pentes, à cascade, sphérique, à cône, mèche... Ces derniers utilisent le rayonnement solaire direct ou sont associés à des équipements solaires thermiques (capteurs thermiques à eau ou à air...) et de stockage pour augmenter leurs faibles rendements estimés entre 3 et 4 l/m<sup>2</sup>/jour [21].

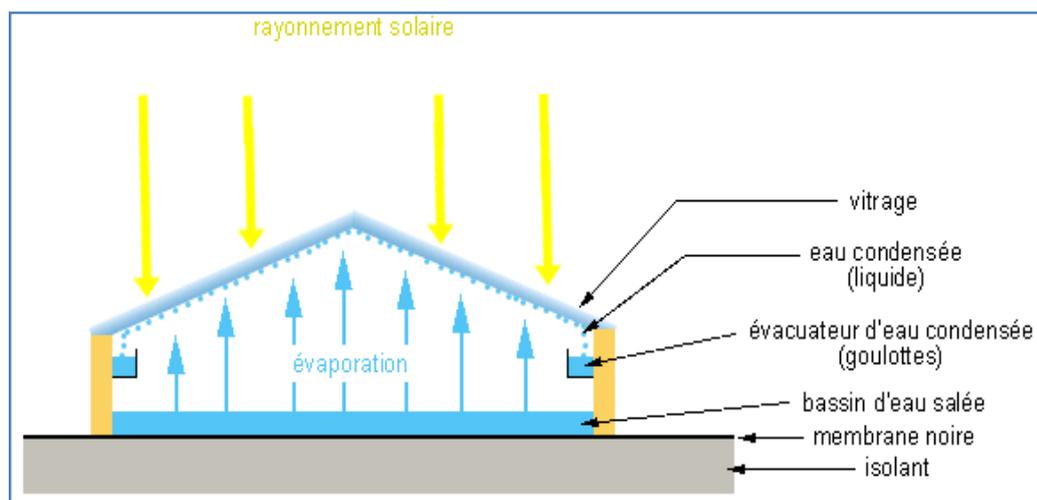


Figure 1.12 :Distillateur solaire à effet de serre et à double pentes [25]

Le même procédé de distillation mais avec des configurations différentes a également été utilisé. C'est notamment le cas de la distillation à multiple effets alimentée par des capteurs solaires thermiques (figure 1.13).

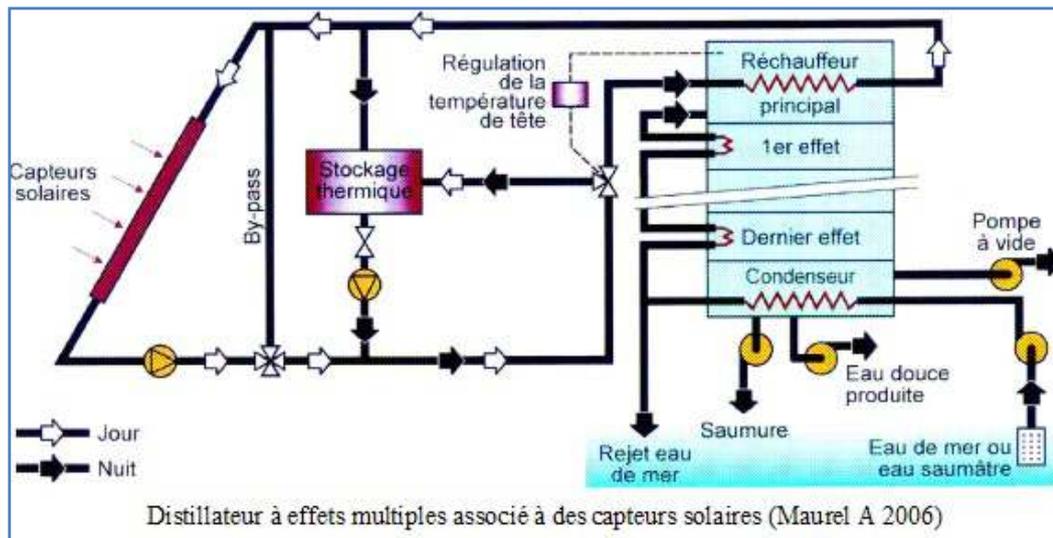


Figure 1.13:distillation à effets multiples [26].

### 1.7.1. Le distillateur solaire à simple effet et à double pentes

Cet équipement (figure 1.13) se compose d'un absorbeur, thermiquement isolé, et d'une couverture transparente. Il a été fortement étudié pour le dessalement de l'eau saumâtre et mer. En 1872, il a été utilisé dans la première usine de dessalement par énergie solaire (figure 1.13). Cet usine produisait  $22,7 \text{ m}^3/\text{jour}$  d'eau potable à partir d'effluent de mine salé contenant  $140 \text{ g/l}$  de sel [16].

Le fonctionnement du distillateur consiste en l'exposition au soleil d'une lame d'eau, de mer ou d'eau saumâtre, contenue dans le bassin (figure 1.12). Celle-ci se chauffe à l'intérieur du distillateur qui devient saturé en vapeur d'eau (douce). Au contact de la paroi en verre, relativement froide, la vapeur se condense. Les gouttes d'eau douce produites glissent sur le couvert du distillateur pour être recueillies en bas du vitrage dans une gouttière [27].

#### 1.7.1.1. Echanges thermiques

Grâce à l'énergie solaire, le fonctionnement du distillateur est induit par les différents flux thermiques qui en résultent [28] :

- par rayonnement, ou par convection entre la saumure et les vitres du distillateur.

#### 1.7.1.2. Paramètres influant le fonctionnement du distillateur

Les principaux paramètres qui influent le fonctionnement du distillateur [27] sont:

- Les paramètres de constructions ;
- Les paramètres métrologiques ;
- L'épaisseur de l'eau ou de la saumure à distiller.

## **1. Paramètres de constructions**

### **• Couverture**

La couverture transparente intervient essentiellement par sa nature pour transmettre le maximum de rayonnement solaire. Il faut qu'elle soit hydrophobe pour permettre le ruissellement des gouttes d'eau condensées (distillat). Elle doit aussi résister aux attaques du vent et des poussières.

### **• Inclinaison de la couverture**

Son inclinaison, par rapport à l'horizontale, doit optimiser la quantité de l'énergie solaire introduite dans le distillateur et minimiser la distance entre l'eau à distiller et la couverture de condensation. L'angle d'inclinaison doit faire l'objet d'un choix judicieux.

### **• absorbeur**

Les études faites dans ce domaine montrent que la surface absorbante peut être construite par plusieurs matériaux (bois, métal, béton, matière synthétique ou en verre ordinaire). Le choix de la matière de la surface absorbante, ou bac noir, dépend de son inertie thermique, de la résistance à l'oxydation par l'eau et aux dépôts minéraux.

## **2. Paramètres métrologiques**

Les études faites par plusieurs chercheurs ont montré que les paramètres les plus fréquemment retenus [27] sont :

- L'intermittence des nuages ;
- La variation du rayonnement global incident et du rayonnement diffus ;
- Le vent et la température ambiante.

### **1. Epaisseur de l'eau à distiller**

L'épaisseur de l'eau ou de la saumure à distiller joue un grand rôle dans la production du distillateur. Cette dernière est d'autant plus importante que l'épaisseur est faible, cependant plus l'épaisseur est grande plus la distillation dure dans le temps. [27]

### **1.7.2. La serre utilisée pour le séchage solaire**

C'est une autre variante de la distillation solaire. Dans cet équipement, l'eau évaporée n'est pas condensée pour la production de l'eau distillée mais rejetée vers le milieu ambiant [23,29].

#### **1.7.3.1. Serre ouverte**

La serre est équipée par des ouvertures en partie basse et en partie haute afin de favoriser la convection naturelle (cas typique des serres horticoles) et est démunie de porte. Dans ce cas, le taux de renouvellement de l'air n'est pas parfaitement maîtrisé car seule l'action sur l'ouvrant en toiture permet de gérer le débit de ventilation dans la serre [30].

#### **1.7.3.2. Serre fermée**

La serre fermée (figure 1.15) ne contient aucune ouverture libre. La ventilation de la serre est exclusivement forcée. Celle-ci est effectuée par des ventilateurs situés en pignon ou par une cheminée dans le cas d'un environnement "sensible"[30].



Figure 1.15 :Exemple de serre fermée - Extraction par cheminée [30]

Ce traitement est reconnu très efficace pour la déshydratation des boues. L'eau éliminée est estimée entre 50 à 70% pour les boues partiellement séchées et jusqu'à 97% pour celles liquides [31].

## ***CHAPITRE 2 : MATERIELS ET METHODES***

Ce chapitre a pour objectif de présenter le matériel et les méthodes utilisés au cours de cette étude.

## **2.1. MATÉRIELS UTILISÉS**

Le matériel utilisé les de cette étude :

- un Distillateur ;
- un conductimètre électrique : pour mesurer la salinité et la conductivité de la saumure de marque de marqueinoLab cond7110 (annexe1.1) ;
- Un pH mètre ;
- Un turbidimètre ;(annexe 1.2)
- Des Pipettes et de béchers : pour les prélèvements des échantillons de l'eau épurée ;
- Une Eprouvette graduée ;
- Une Plaque chauffante de marque FISHER SCIENTIFIC.

## **2.2. MONTAGE EXPERIMENTAL**

Le distillateur solaire utilisé dans cette étude est d'une conception très simple. Il s'agit du distillateur chapelle; il présente l'avantage d'être facile à construire et surtout à maintenir.

Il est essentiellement constitué comme le montre la figure 2.1 de :

1. Un bac absorbant ;
2. Un Caisson intérieure en acier ;
3. Une isolation thermique ;
4. Un Caisson extérieure en verre.

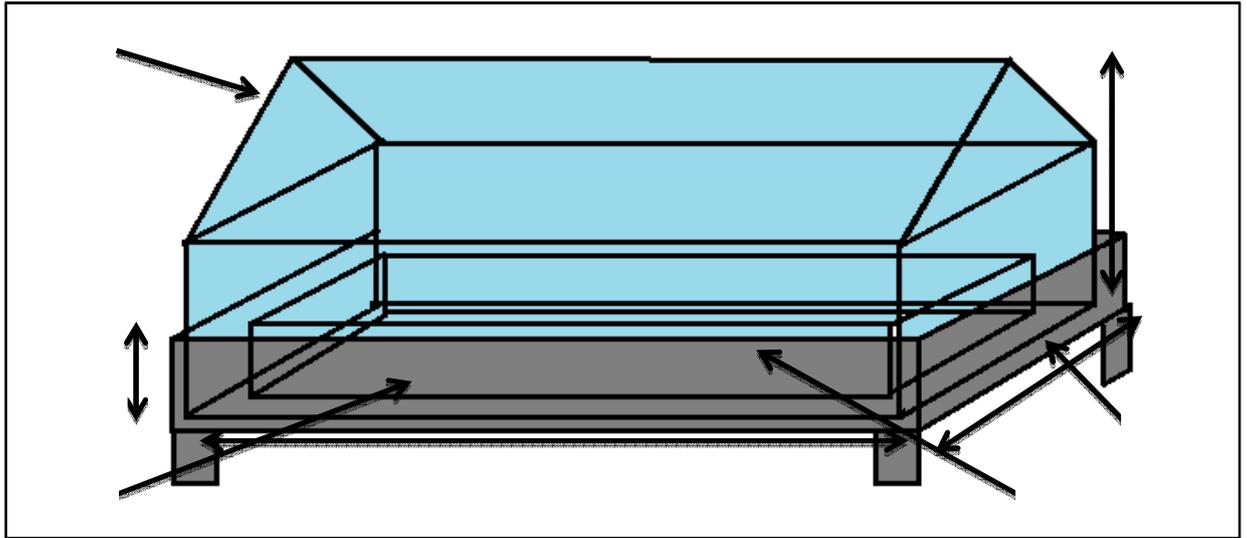


Figure 2.1 : Schéma du distillateur

Les caractéristiques du distillateur sont :

- La hauteur :  $H=20,5\text{cm}$  ;  $h=5\text{cm}$  ;
- Longueur :  $L= 45 \text{ cm}$  ;
- L'épaisseur :  $e=0,5 \text{ cm}$  ;
- La largeur :  $l=30\text{cm}$ .

### 2.3. CONDITIONS OPERATOIRES

Les domaines de variation des conditions opératoire sont :

- Un volume de 500ml de saumure est introduit dans le distillateur ;
- Prélèvements chaque 40 min ;
- Distillation avec énergie électrique (deux température sont choisies  $T_1 =100 \text{ }^\circ\text{C}$  ;  $T_2 = 150^\circ\text{C}$ ) ;
- Distillation avec l'énergie solaire.

### 2.4. PROCEDURE EXPERIMENTALE

#### 2.4.1. Déshydratation de la saumure par énergie conventionnelle

Au début de chaque expérience nous alimentons le distillateur avec de la saumure récupérée à partir de l'usine de dessalement de FOUKA W.TIPAZA. la saumure est à la  $T^\circ = 22^\circ\text{C}$

Par la suite, le distillateur est installé sur deux résistances qui assure une évaporation suivie d'une condensation sur toutes les parois du distillateur.

Au cours de cette opération et avec un pas de 40min nous prélevons l'eau distillée produite pour la caractériser.

A la fin de l'opération, nous remarquons l'apparition d'une fine couche de sel sur la feuille du papier aluminium qui recouvre le caisson métallique du distillateur. Cela indique que la déshydratation de la saumure est complète. Le sel cumulé est récupéré, pour le déshydrater dans une étuve à 105 °C pendant 1 heure puis pesé sur une balance analytique.

Ce protocole a été reproduit dans les mêmes conditions pour des températures de chauffage de 100 °C et 150°C Pour chaque T°, 3 essais ont été effectués.



Figure 2.2 : Le montage de distillateur avec énergie électrique

## **2.4.2. Déshydratation de la saumure par énergie solaire**

### **2.4.2.1. Caractérisations volumétriques et quantitatives**

Le même procédé de déshydratation de la saumure (par évaporation contrôlée) est reproduit sauf que le la concrétisation de ce procédé repose sur le fait que le chauffage par énergie conventionnelle est remplacé par le rayonnement solaire.

Pour optimiser ce type de chauffage, nous avons procédé à l'isolation thermique du caisson métallique du distillateur. Une lame de 5 cm de polystyrène adhère à la partie inférieure du caisson. Quant aux parties latérales, elles sont recouvertes par une lame de polystyrène de 2 cm (Figure 2.3).



Figure 2.3 : La partie inférieure du distillateur en acier, contenant la plaque absorbante noir et un Isolation thermique.

Au cours des expérimentations, Nous avons constaté que la production de l'eau distillée était plus lente. A cet effet, nous n'avons pas effectué des prélèvements tous les 40 min mais un seul prélèvement a été fait à la fin de l'expérimentation (lors de la récolte du sel).

Le chauffage solaire n'est pas un procédé rapide vue que la température climatique influe directement sur la production de l'eau et le sel, alors pour chaque 500ml on ne peut jamais produire du sel durant la journée et l'évaporation de l'eau n'est pas complète à 100%.



Figure 2.4 : Le distillateur solaire

#### **2.4.2.2. Caractérisations physico-chimiques de l'eau distillée**

Au cours des expérimentations, des analyses ont été effectuées pour caractériser :

- 1- La saumure récupérée de la station de dessalement de l'eau de mer de Fouka.
- 2- L'eau distillée récupérée au cours des expérimentations de déshydratation de la saumure.

## **2.5. TECHNIQUES D'ANALYSES**

### **2.5.1. Analyse de l'eau distillée et du la saumure**

#### **2.5.1.1. Mesure de la conductivité, du PH et de la salinité**

#### **2.5.1.2. Mesure de la turbidité**

On place un tube rempli d'eau à analyser dans le turbidimètre à l'aide des rayons. Ces derniers vont être absorbés par les particules en suspension qui se trouvent dans l'eau. Plus l'eau est trouble, plus la turbidité est grande.

#### **2.5.1.3. Mesure de la quantité des sels dissous dans l'eau**

##### **a. Mesure de la quantité de $\text{Ca}^{2+}$ dans l'eau**

Le principe est de prendre 50ml de l'eau à analyser rajouter 2ml de la solution d'hydroxyde de sodium (2M) en présence d'un indicateur colore (Murexide).

##### **b. Mesure de la dureté TH (Le titre hydrotimétrique) dans l'eau**

On verse dans un bécher un volume de 50ml d'échantillon (eau), ajouter 4ml de solution de pH égal à 10 avec une petite quantité d'un indicateur coloré NET (Le Noir ériochrome T) afin de donner une couleur violet au mélange, puis à l'aide d'une burette graduée qui contient un volume de 50ml de EDTA on titre la solution.

##### **c. Mesure de l'alcalinité TA (Le titre alcalimétrique) dans l'eau**

Le titre alcalimétrique ou T.A mesure la teneur en alcalis libres ( $\text{OH}^-$ ) et en carbonates ( $\text{CO}_3^{2-}$ ). Prendre 50ml d'eau à analyser, ajouter 1 à 2 gouttes de phénophtaléine et 3 gouttes de thiosulfate. Une coloration rose apparaît. Verser ensuite HCl (0.01mol) tout en agitant.

##### **d. titre alcalimétrique complet T.A.C**

Le principe consiste à déterminer des concentrations en ions bicarbonates ( $\text{HCO}_3^-$ ). Carbonates ( $\text{CO}_3^{2-}$ ), et hydroxyde ( $\text{OH}^-$ ) grâce à la mesure de l'acide chlorhydrique nécessaire pour amener à pH 8,3 et 4,5 l'échantillon à analyser.

La première détermination (pH) sert à calculer le titre alcalimétrique (TA). La seconde (pH=4,5) sert à calculer le titre alcalimétrique complet (TAC).



L'expérimentation consiste à fixer le pH d'une solution de 100ml à une valeur de 8,3

**e. Dosage des chlorures**

Le dosage des chlorures est réalisé par titrage au nitrate d'argent ( $\text{AgNO}_3$ ) dans un mélange contenant 100 ml d'échantillon avec une quantité de  $\text{K}_2\text{CrO}_4$ , on obtient avant le dosage une couleur jaune due à l'indicateur coloré  $\text{K}_2\text{CrO}_4$ .

## ***CHAPITRE 3 : RESULTATS ET DISCUSSION***

### 3.1. INTRODUCTION

Dans ce chapitre, nous exposons l'ensemble des résultats expérimentaux obtenus lors de cette étude, ainsi que leur interprétation.

Ces résultats concernent essentiellement l'effet des paramètres externes et internes sur le fonctionnement du distillateur, la variation de la température, du pH, de la conductivité et du volume récupéré au cours du temps soit par le chauffage solaire ou par chauffage électrique.

Afin de traiter la saumure, nous avons conçu un distillateur pilote à effet de serre « Hot box » à double chapelle qui fonctionne par chauffage thermique et par chauffage solaire pour récupérer une quantité importante d'eau distillée et récolter du sel au niveau des parois.

### 3.2. RESULTATS ET DISCUSSION

#### 3.2.1. Composition chimique de la saumure et de l'eau de mer

Le tableau 3.1 donne la composition chimique de l'eau saumâtre et de l'eau de mer.

Tableau 3.1 Composition chimique du la saumure et de l'eau de mer.

Paramètres / type d'eau	Eau de mer	Eau saumure
Conductivité (ms/cm)	47	75.1
Salinité (g/l)	32	59.9
pH	7.61	7.64
Température (°C)	20	20

Nous remarquons d'après ce tableau que la salinité et la conductivité de la saumure sont presque deux fois plus grandes que celles de l'eau de mer, ceci s'explique par la quantité élevée de sel dans la saumure.

### 3.2.2. Caractérisations volumétrique de l'eau distillée produite

Tableau 3.2: Variation volumétrique de la production de l'eau distillée [32].

Mois de l'année 2012	Production moy. de l'eau distillée (ml / m <sup>2</sup> / j)	Températures			Rayonnement Solaire (W/m <sup>2</sup> )	
		Temp. ambiante	Caisson	Eau (Max)	Max.	Moy.
Avril	2 083,33	-	-	-	1195	429,56
Juin	5 251,73	30,56	63,85	79,57	900	494,85
Septembre	2 691,00	31,10	60,30	71,65	784	428,92

D'après ce tableau, on peut constater que la production d'eau distillée par rayonnement solaire durant le mois de juin était meilleure que les mois d'avril et septembre, cela est due à l'influence de la température sur le rendement.

### 3.2.3. Caractérisations physico-chimiques de l'eau distillée produite

#### 3.2.3.1. La salinité

Pour les deux procédés utilisés (chauffage thermique et chauffage solaire), Nous avons remarqué d'après les résultats obtenus, que la salinité est nulle pour tous les prélèvements effectués.

#### 3.2.3.2. Evolution de la conductivité en fonction du temps

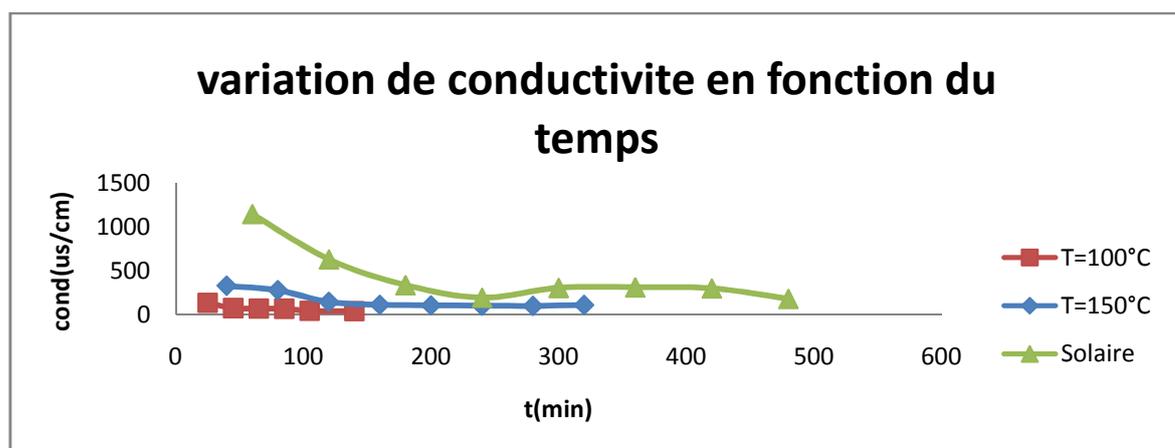


Figure 3.1: Variation de la conductivité d'eau en fonction du temps.

La conductivité électrique caractérise l'aptitude d'un matériau ou d'une solution à laisser les charges électriques se déplacent librement (le passage d'un courant électrique)

D'après la figure 3.1, On remarque que la conductivité des échantillons pour chaque prélèvement diminue en fonction du temps.

### 3.2.3.3. Evolution de pH en fonction de temps

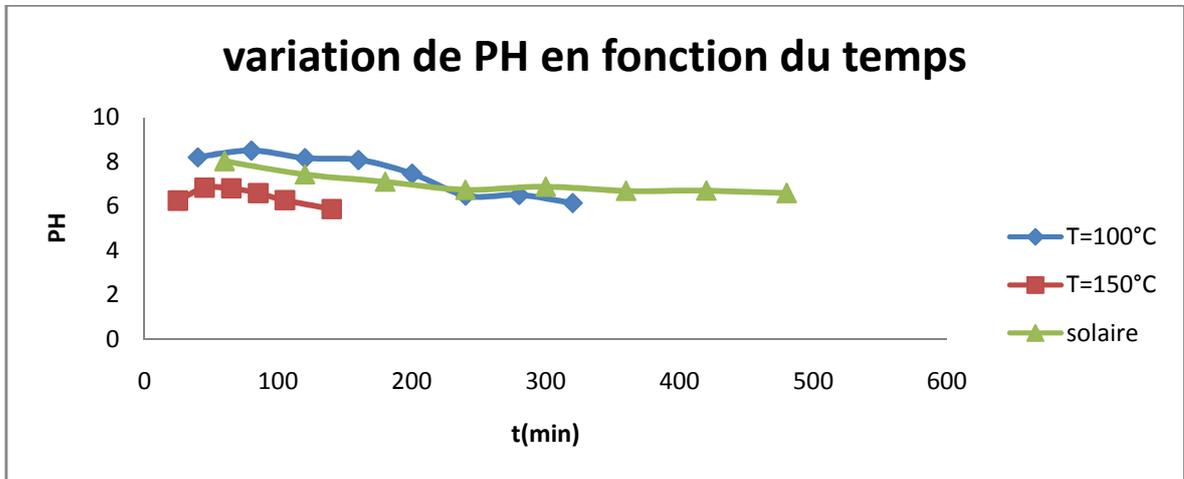


Figure 3.2. : Variation de pH d'eau en fonction du temps.

Pour le chauffage solaire ou électrique, nous constatons d'après la figure 3.2 que le pH de l'eau distillée est pratiquement constant au cours du temps.

### 3.2.3.4. Evolution de volume en fonction de temps

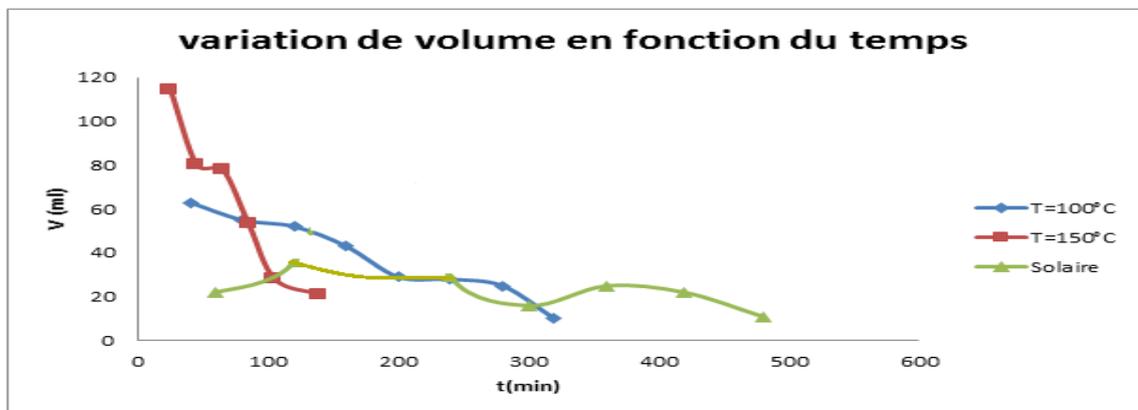


Figure 3.3 : Variation de volume d'eau produite en fonction du temps.

D'après le graphique ci-dessus, on remarque que le volume d'eau distillée prélevé diminue en fonction du temps, Mais cette diminution est plus rapide par chauffage thermique et pour une température égale à 150°C.

Le volume de la saumure dans le distillateur commence à baisser ce qui provoque une production faible d'eau pour les prélèvements qui suivent.

### 3.2.3.5. Quantité de sel produite

Le tableau 3.3 donne les quantités de sel obtenues pour chaque expérience

Tableaux.3.3:La quantité de sel obtenue.

N	la T 100°C				la T de 150°C		
	1	2	3	4	1	2	3
<b>masse de sel(g)</b>	29,469	32,18	31,48	33,631	31,53	30,26	35,3

La quantité de sel produite au cours des deux expériences est de l'ordre de  $m=30g$ , cette valeur dépend des volumes de la saumure utilisée.

Les paramètres physico-chimique de la saumure après traitement sont regroupés dans le tableau 3.4.

Tableau 3.4 : caractérisation physico-chimique de l'eau distillée.

Paramètres	L'eau obtenue par chauffage électrique	L'eau obtenue par chauffage solaire
PH	7.48	8.27
Conductivité ( $\mu s/m$ )	203	1376
Turbidité (NTU)	0.93	19.9
$Ca^{2+}$ (mg/l $CaCO_3$ )	0.5	1.9
TH (mg/l $CaCO_3$ )	0.9	5.9
TA (mg/l $CaCO_3$ )	0	0
TAC (mg/l $CaCO_3$ )	3.6	9.9
$Cl^-$ (mg/l)	6.7	52.3
TDS=conductivité*0.55(mg/l)	111.65	756.8

## 3.3. ETUDE DUS EFFETS INFLUENÇANT LA DESHYDRATATION DE LA SAUMURE

### 3.3.1. Méthodologie de plan d'expérience

Les plans d'expériences permettent d'organiser au mieux les essais qui accompagnent une recherche scientifique ou des études industrielles. Ils sont applicables à de nombreuses disciplines et à toutes les industries à partir du moment où l'on recherche le lien qui existe entre une grandeur d'intérêt,  $y$ , et des variables,  $x_i$ . Il faut penser aux plans d'expériences si l'on s'intéresse à une fonction du type [33] :

$$Y=f(x_i) \quad (3.1)$$

Avec les plans d'expériences on obtient le maximum de renseignements avec le minimum d'expériences. Pour cela, il faut suivre des règles mathématiques et adopter une démarche rigoureuse. Il existe de nombreux plans d'expériences adaptés à tous les cas rencontrés par un expérimentateur. Les principes fondamentaux de cette science seront indiqués et les principaux plans seront passés en revue [33].

### **3.3.2. But de la méthodologie**

- Organiser mathématiquement les conditions expérimentales pour choisir les plus informatives permettant de minimiser le nombre d'expériences tout en maximisant l'information obtenue,
- Modéliser les variations d'un certain nombre de variables  $Y$ , que nous appellerons réponses (l'analyse chimique par exemple) en fonction d'autres variables  $X$  appelées variables mesurables (mesure de paramètres physico-chimiques par exemple),
- Optimisation des procédés chimiques [33].

### **3.3.3. Avantages des plans d'expériences**

Les plans d'expériences permettent une diminution considérable du nombre d'essais et une interprétation rapide et sans équivoque. Ils fournissent des résultats faciles à présenter [34].

- La possibilité d'étudier un très grand nombre de facteurs,
- La détection des interactions éventuelles,
- La modélisation aisée des résultats,

-La détermination des résultats avec une bonne précision [34].

Cette méthodologie fait appel à un vocabulaire spécifique qu'il faut rappeler ou préciser [35]:

- **Facteur** : c'est un paramètre supposé influencer le phénomène étudié.
- **Réponse** : c'est un paramètre caractérisant le résultat du phénomène.
- **Plan d'expérimentation** : c'est un ensemble des conditions expérimentales déterminées par la stratégie expérimentale choisie et le domaine expérimental retenu.
- **Matrice d'expérience** : c'est un tableau exprimé en variable codées utilisables pour un nombre illimité de problèmes car il est dépendant uniquement de la stratégie expérimentale choisie.

#### **3.3.4. Matrice d'expérience**

Le coefficient du modèle polynomiale du second ordre pour les trois variables est calculé à partir d'un grand nombre d'expériences n.

Les trois variables ont été étudiés à trois niveaux : -1, 0, +1 avec un modèle polynôme de second ordre [35] :

$$Y\% = A_0 + A_1X_1 + A_2X_2 + A_3X_3 + A_{12}X_1X_2 + A_{13}X_1X_3 + A_{23}X_2X_3 + A_{11}X_1^2 + A_{22}X_2^2 + A_{33}X_3^2 \quad (3.2)$$

Y : le rendement en % qui est calculé comme suit :

$$Y\% = \frac{C_0 - C_f}{C_0} \quad (3.3)$$

$A_0$  : le coefficient d'interception ;

$A_{11}, A_{22}, A_{33}$ : les termes quadratiques ;

$A_{12}, A_{13}, A_{23}$ : Les coefficients d'interaction ;

$X_1, X_2, X_3$  : les variables indépendantes étudiées ;

$C_0$  : concentration initiale (mol/l) ;

$C_f$  : concertation finale (mol/l) .

### **3.3.5. Analyse statique d'ANOVA**

L'analyse de variance (ANOVA) subdivise la variation totale dans un ensemble de données en composants à des sources spécifiques de variation dans le but de tester des hypothèses sur les paramètres du modèle [35].

Le niveau de confiance (R) est un paramètre très important pour déterminer l'effet des paramètres du modèle et leurs interactions [35].

Les résultats sont évalués avec diverses statistiques descriptives telles que la valeur de p (la probabilité), F-valeur et le degré de liberté.

$$\text{Carré moyen} = \frac{\text{Somme des carrées}}{\text{Degrés de libeté}} \quad (3.4)$$

Le coefficient de détermination ( $R^2$ ) de chaque coefficient dans l'équation polynomiale de second ordre est déterminé par le test F et des valeurs de probabilité de Fisher  $>F$  qui implique que lorsque le rapport de Fisher augmente, la probabilité diminue.

### **3.3.6. Paramètres d'étude**

#### **3.3.6.1. Conditions optimales**

La déshydratation de la saumure par chauffage électrique dépend de plusieurs variables tels que, le volume de la saumure, la température de chauffage et la salinité. La présence de ces trois variables nécessite un grand nombre d'expériences.

Le plan Box-Behnken a été choisit pour sa propriété et pour sa capacité à entreprendre une étude des K premiers facteurs en se servant de la possibilité d'ajouter de nouveaux résultats sans prendre les essais déjà effectués [35].

Un nombre total de 15 expériences a été employées pour la modélisation de la surface de réponse et l'ordre des expériences a été organisé de façon aléatoire.

#### **3.3.6.2. Domaine expérimentale étudié**

Les niveaux expérimentaux choisis pour les trois facteurs étudiés sont présentés dans le tableau suivant :

$X_1$  : Volume de la saumure (ml)

$X_2$  : Température de chauffage (°C)

$X_3$  : la salinité (g/l)

Tableau 3.5 : Gammes et niveau expérimentaux des variables indépendantes d'essais

Domaine d'étude			
Variables indépendantes	-1	0	1
Volume d'eau ( $X_1$ , ml)	250	500	750
Température de chauffage ( $X_2$ , °C)	80	115	150
Salinité ( $X_3$ , g/l)	40	62	84

### **3.3.6.3. Résultats du plan d'expérience**

Les résultats des expériences du plan Box-Behnken sont représentés par une matrice d'expérience dans un tableau montrant les combinaisons statiques des variables étudiées [35].

Les 15 expériences employées pour la modélisation de surface de réponses et les résultats observés et prévus du rendement sont également représentés dans le tableau. Le logiciel MODDE a été utilisé pour calculer les coefficients de l'équation d'ajustement de second ordre. Par conséquent, chaque réponse sera exprimée par une équation polynomiale de second ordre.

### **3.3.6.4. Matrice d'expériences**

Les résultats des différentes combinaisons statistiques des variables étudiées avec le rendement (%) sur une durée de 4heures sont regroupés dans le tableau 3.6

Tableau 3.6 : Matrice du plan expérimental.

N° EXP	X <sub>1</sub> (V d'eau (ml))	X <sub>2</sub> (T° chauffage (°C))	X <sub>3</sub> (salinité (g/l))	Rendement	
				Observé (ml)	Prédit
1	250	80	62	107	124,187
2	750	80	62	221	215,563
3	250	150	62	225	230,438
4	750	150	62	726	708,813
5	250	115	40	161	153,625
6	750	115	40	516	531,25
7	250	115	84	225.5	210,25
8	750	115	84	395	402,375
9	500	80	40	216	206,188
10	500	150	40	482	483,938
11	500	80	84	150	148,063
12	500	150	84	460	469,813
13	500	115	62	308	308
14	500	115	62	308	308
15	500	115	62	308	308

Le rendement de la saumure observée est en accord avec celui déterminé par l'équation

L'équation polynomiale de second ordre est :

$$F=308+142.438X_1+149.875X_2-18.0625X_3+4.56246X_1^2+7.18749X_2^2+11.8125X_3^2+96.75X_1X_2-46.375X_1X_3+11X_2X_3 \quad (3.5)$$

### **3.3.6.5. Analyse statique d'ANOVA**

La signification de chaque paramètre de modèle a été déterminée au moyen de la valeur de Fisher (F) et de la valeur de p, D'après les résultats du tableau III.3, nous avons conclu que les variables indépendantes du modèle quadratique, à savoir le volume la saumure (X1), la température de chauffage (X2), et la salinité (X3), sont des paramètres très significatifs car la valeur de p est inférieure à 0,001.

La valeur de P correspondant a la mesure, implique la faisabilité du modèle pour le phénomène de la déshydratation de la saumure.

Tableau 3.7 : ANOVA pour la réponse de surface du modèle quadratique.

<b>distila</b>	<b>Coeff. SC</b>	<b>Std. Err.</b>	<b>P</b>	<b>Conf. int</b>
<b>Constant</b>	308	9,75	5,96926 10 <sup>-007</sup>	25,063
<b>V</b>	142,438	5,97063	2,41069 10 <sup>-006</sup>	15,348
<b>T</b>	149,875	5,97063	1,87241 10 <sup>-006</sup>	15,348
<b>Sal</b>	-18,0625	5,97063	0,0292408	15,348
<b>v*v</b>	4,56246	8,78853	0,625816	22,5917
<b>T*T</b>	7,18749	8,78853	0,450656	22,5917
<b>sal*sal</b>	11,8125	8,78853	0,236683	22,5917
<b>v*T</b>	96,750	8,44374	8,86994 10 <sup>-005</sup>	21,7054
<b>v*sal</b>	-46,375	8,44374	0,00273198	21,7054
<b>T*sal</b>	11	8,44374	0,249433	21,7054
N = 15	Q <sup>2</sup> =	0,942	Cond. no. =	4,2385
DF = 5	R <sup>2</sup> =	0,996	Y-miss =	0
	R <sup>2</sup> Adj. =	0,990	RSD =	16,8875
			Conf. lev. =	0,95

### **3.3.6.6. Analyse statique du R<sup>2</sup>**

La variation des valeurs prédites par le modèle en fonction des valeurs observées est représentée sur la figure 3.4, Les résultats indiquent un bon accord entre les valeurs expérimentales et celles prédites, car le coefficient de corrélation qui évalue quantitativement la corrélation entre les données expérimentales et les réponses prédites est R<sup>2</sup>=0.996

La valeur de R<sup>2</sup> proche de 1 indique une bonne fiabilité du modèle dans la précision de la déshydrations de la saumure.

La valeur de (R<sup>2</sup><sub>adj</sub>) est une mesure de qualité d'un ajustement, il a pour but de corriger la valeur de R<sup>2</sup>, (R<sup>2</sup><sub>adj</sub>) également corrige la valeur de R<sup>2</sup> pour la dimension de l'échantillon et le nombre de termes dans le modèle à l'aide des degrés de liberté sur ses calculs.

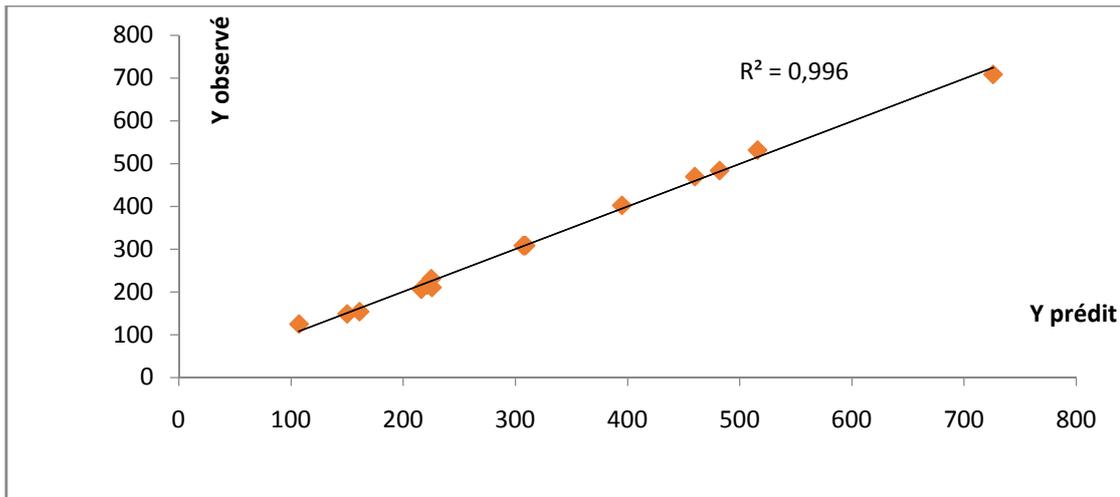


Figure 3.4: Les valeurs de répons prédites par le modèle en fonction des valeurs observées.

### 3.3.6.7. Analyse graphique des résidus

En plus du coefficient de corrélation, l'adéquation des modèles a été également évaluée par une représentation graphique des résidus. Ces résidus représentent la différence entre la valeur observée et la valeur prédit.

L'analyse graphique des résidus nous montre la différence entre la valeur observée et la valeur prédite ;

$$\text{Résidus} = \text{Valeur Prédite} - \text{Valeur observée} \quad (3.6)$$

La figure 3.5 représente le tracé des résidus observés en fonction des valeurs prévues, les valeurs des réponses prédites en abscisses et les résidus en ordonnées.

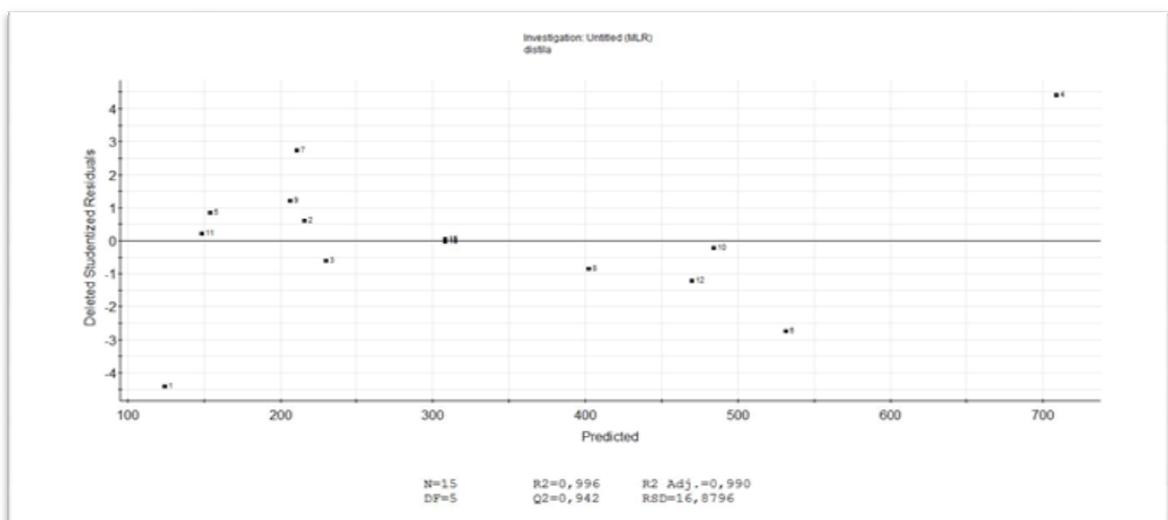


Figure 3.5: Résidus observés en fonction des valeurs prévues.

D'après cette figure 3.5 on remarque que les points expérimentaux observés sont dispersés de façon aléatoire autour de la ligne.

Les pentes sur la ligne signifient que la prévision est exacte et les points au-dessus de la ligne (les valeurs positives des résidus) révèlent une surestimation tandis que les points en dessous de la ligne (les valeurs négatives) révèlent une sous-estimation.

### 3.3.6.8. Analyse graphique des effets et des interactions

Les effets des différents facteurs ainsi que leur interaction sont représentés sur la figure suivante :

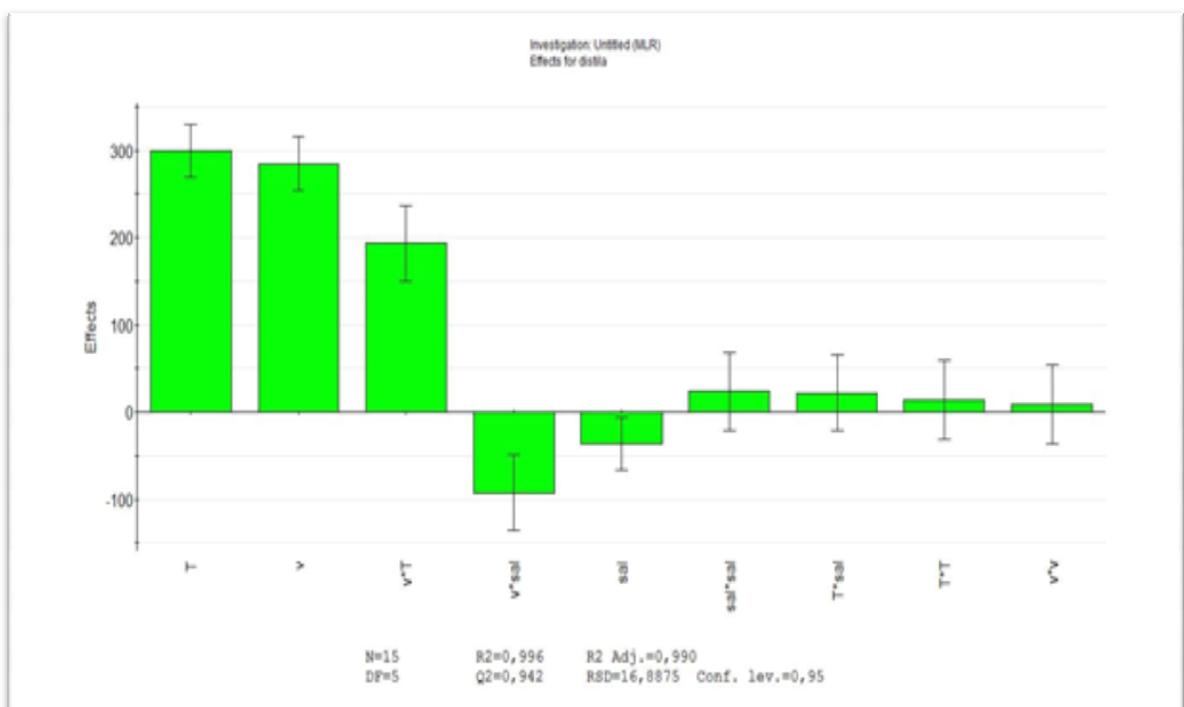


Figure 3.6 : Analyse graphique des effets.

D'après l'analyse graphique des effets, nous constatons que :

- La température de chauffage a un effet très important sur le procédé de la déshydratation de la saumure par chauffage électrique cet effet est positif sur la production de l'eau distillée, plus la température augmente plus le rendement est meilleur.
- Nous constatons aussi d'après cette figure, que plus le volume d'eau introduit dans le réacteur est grand plus le rendement de la production est meilleur. Par conséquent le volume d'eau a un effet positif sur le rendement

- La salinité de l'eau à un effet négatif sur la production d'eau distillée, quand la salinité augmente, le rendement diminue.
- L'interaction entre le volume d'eau introduit et la température présente un effet positif sur le rendement de la production d'eau

### 3.3.6.9. Analyse de Pareto

L'analyse Pareto fournit une information plus significative pour interpréter les résultats, cette analyse donne l'effet en pourcentage de chaque facteur sur la réponse, selon la relation suivante :

$$P_i = \left( \frac{A_i^2}{\sum A_i^2} \right) * 1000 \quad (3.7)$$

Le diagramme de Pareto montre que parmi toutes les variables étudiées, la température de chauffage présente l'effet principal sur l'efficacité de la déshydratation de la saumure pour la production de l'eau distillée avec une valeur de 40.89%, Néanmoins le volume d'eau introduite pour chaque expérience a un effet assez important avec un pourcentage d'efficacité de valeur 36.94%, Pour les autres facteurs, nous constatons qu'il y'a une faible influence sur la production d'eau distillée.

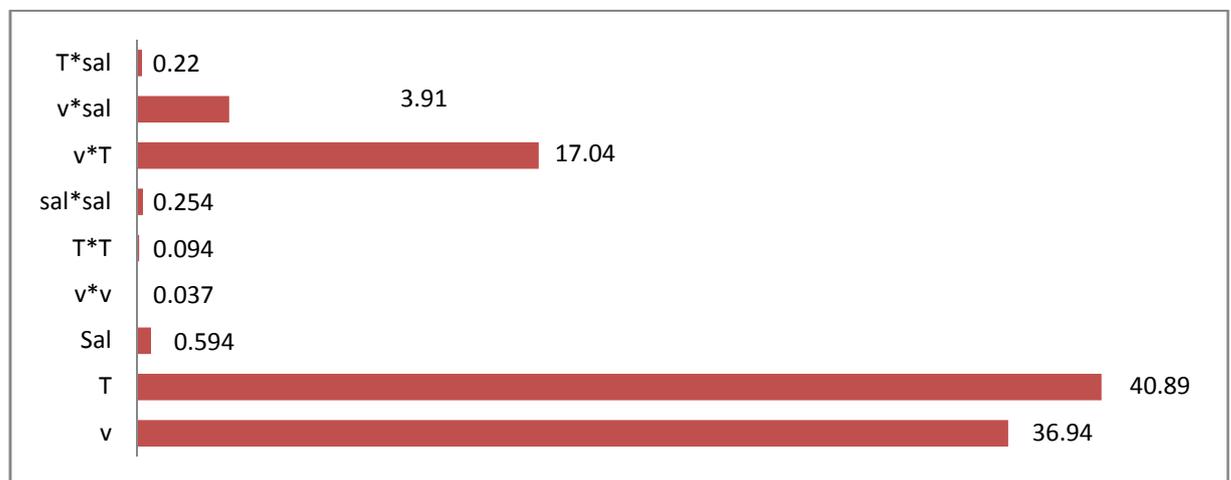


Figure 3.7 : Analyse graphique de Pareto

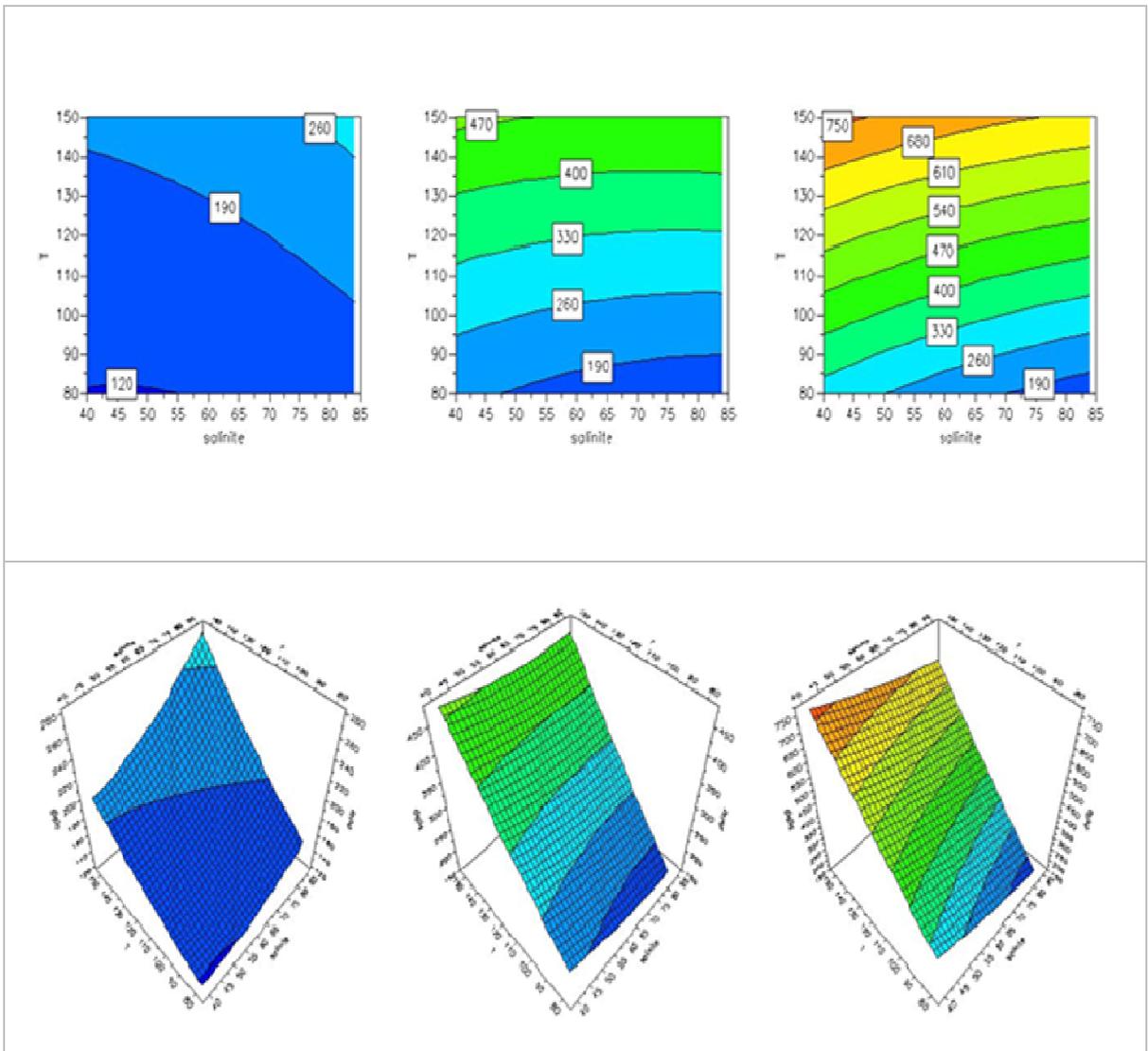
### 3.3.6.10. Analyse des courbes d'ISO réponse

Le logiciel MODDE 6.0 produit des surfaces de réponse en trois dimensions (3D) et en deux dimensions (2D) et des parcelles de contour (contour plots), ces surfaces sont des représentations graphiques de l'équation de régression pour l'optimisation des

conditions d'expérimentation. Chaque courbe représente une infinité de combinaisons qui a été obtenu en faisant varier deux facteurs et en fixant le troisième.

**a. Intersection entre la température de chauffage et la salinité a volume d'eau fixe**

Les figures 3.8 donnent les interactions entre la température de chauffage et la salinité en utilisant un volume fixe de  $V=250\text{ml}$ ,  $500\text{ml}$ ,  $750\text{ml}$ . Nous constatons qu'à chaque fois que le volume de l'eau augmente, l'interaction entre la température de chauffage et la salinité augmente aussi.



$V=250\text{ml}$     $V=500\text{ml}$

$V=750\text{ml}$

Figure 3.8 : parcelles de contours et surface de réponse en trois dimensions pour des volumes d'eau fixes

Pour un volume d'eau égale à 250ml et en faisant varier la température entre 80°C et T=150°C et la salinité entre 40g/l et 85g/l, le rendement de la production est faible et ne dépasse pas 26% cela implique que en diminuant le volume d'eau, l'influence de la salinité est remarquable.

Pour un volume d'eau égale à 500ml, le rendement minimal obtenu est de l'ordre de 19% pour une salinité et une température varient respectivement entre 48g/l et 85g/l et 80°C et 90°C. Par contre le rendement est maximal 47% pour une salinité variant entre 40g/l et 52g/l et une température comprise entre 145°C et 152°C.

Une faible salinité et une forte température induit une augmentation du rendement l'ensemble des résultats sont regroupés dans le tableau 3.8.

Tableau 3.8 : Evolution du rendement de la production de l'eau distillée pour différents volumes

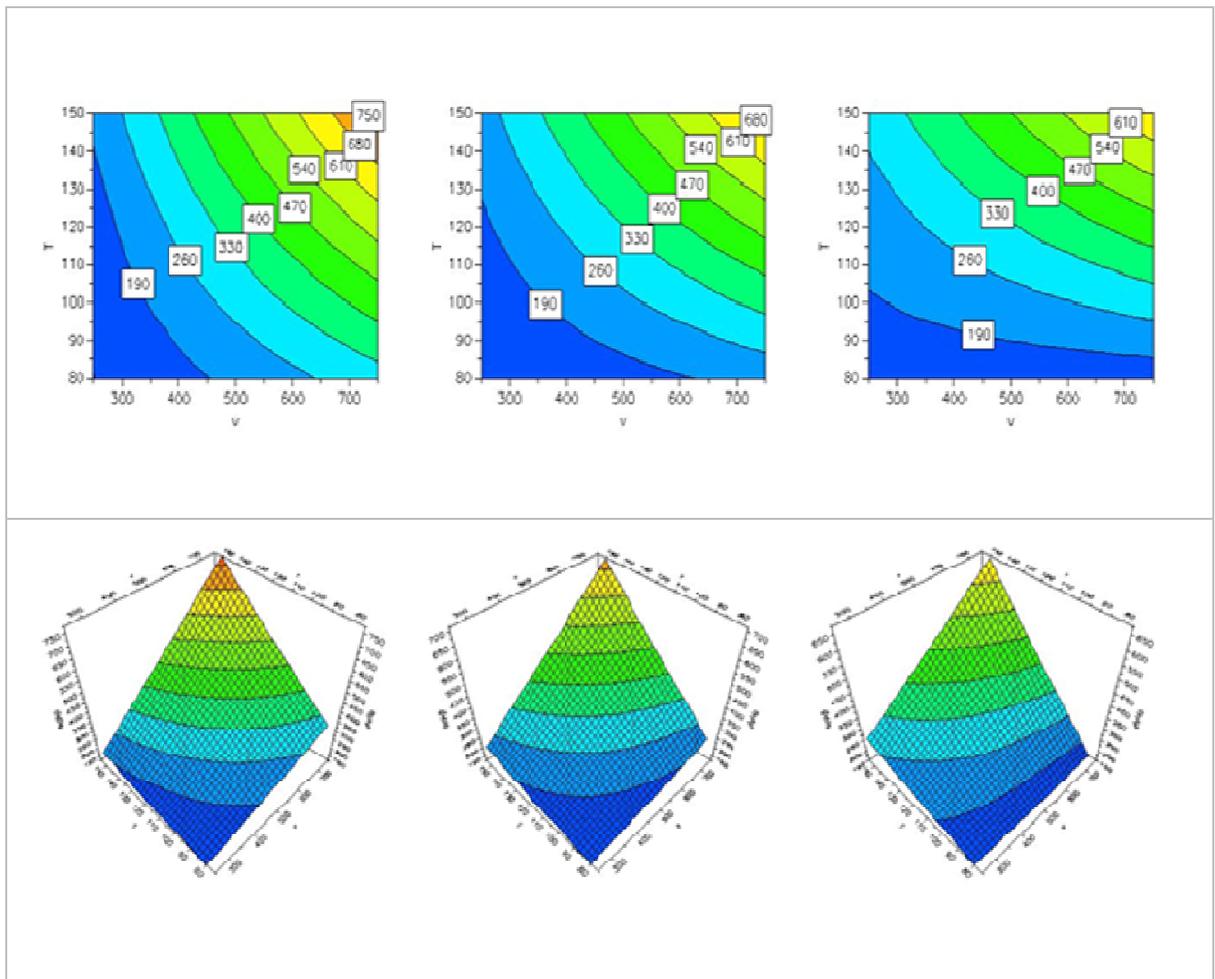
Volume d'eau injecté (ml)	R <sub>minimum</sub> %	R <sub>maximum</sub> %
250	12	25
500	19	47
750	19	75

D'après le tableau ci-dessus, nous remarquons que la production de l'eau distillée par chauffage électrique est favorisée par la diminution de la salinité et l'augmentation de la température de chauffage dans le distillateur.

**b. Intersection entre la température de chauffage et le volume d'eau a salinité fixe**

Les contours dans la figure 3.9 illustrent l'effet de l'interaction de la température de chauffage et le volume d'eau pour des valeurs de salinités fixes.

Nous constatons d'après cette figure que le volume d'eau produit est influencé par l'augmentation de la température et du volume d'eau utilisé simultanément. La distillation est favorisée dans le sens d'augmentation de ces deux paramètres.



Sal=40g/l

Sal=62g/l

Sal=84g/l

Figure 3.9 : parcelles de contour et surface de réponse en trois dimensions pour des

Salinités fixes

Pour une salinité égale à 40g/l, les contours et surfaces de réponse montrent que les effets linéaires, quadratiques et les interactions sont significatifs car le seuil maximal (R=75%) de rendement est atteint à un volume d'eau égale à 750ml et une température de 150°C.

Le rendement minimum est égal à 19% pour des températures inférieures à 140°C et un volume inférieur à 480 ml.

L'efficacité de rendement de la production d'eau distillée est liée au taux de salinité.

Pour une salinité égale à 62 g/l, l'influence de la température et du volume est remarquable. Nous constatons d'après la figure (3.9) que pour un volume et une T° élevés, le rendement est égale à 68%.

Tableau 3.9 : Evolution du rendement de la production de l'eau distillée pour des salinités différentes

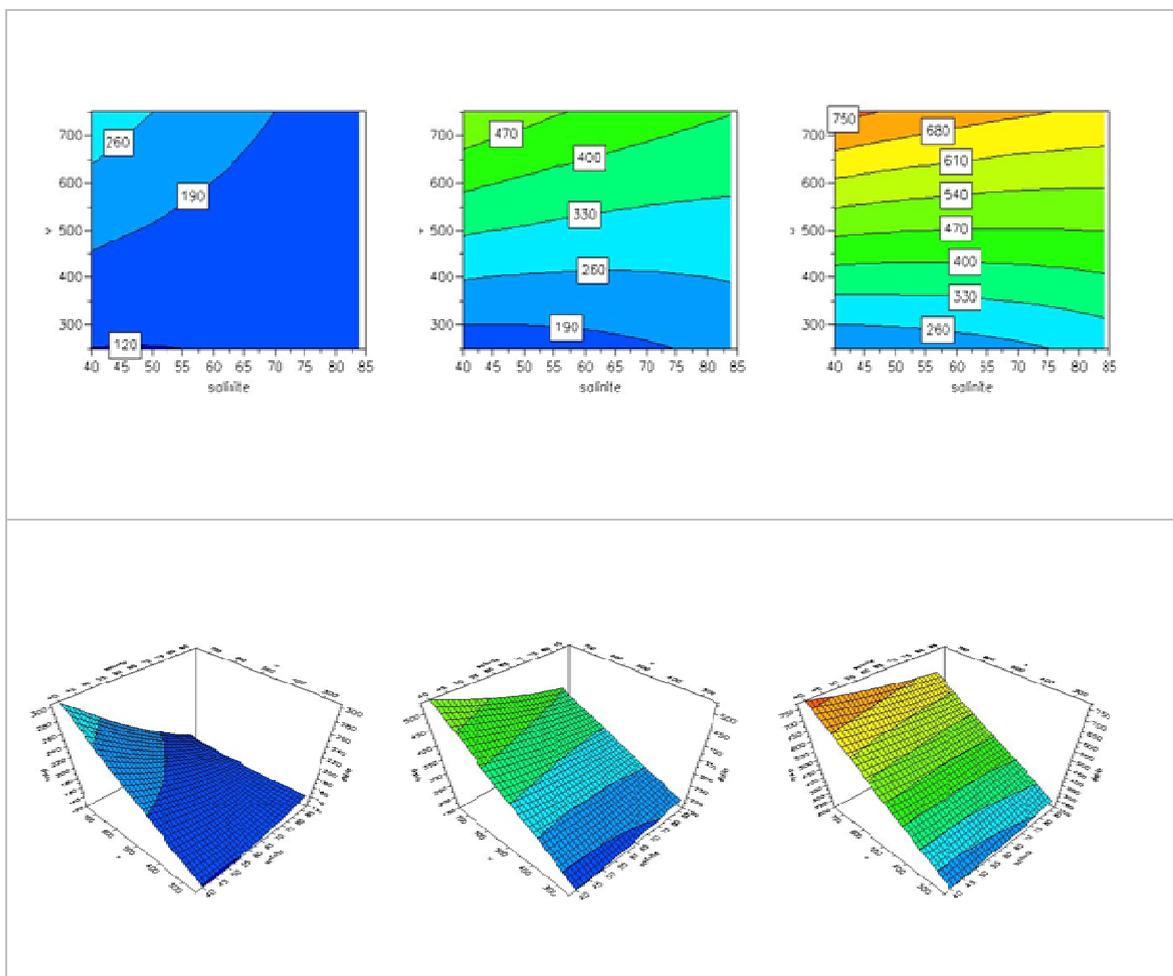
Salinité (g/l)	R <sub>minimum</sub> %	R <sub>maximum</sub> %
40	19	75
62	19	68
84	19	61

Les valeurs obtenues sont rassemblées dans le tableau 3.9 qui montre que la quantité d'eau produite augmente par l'augmentation de volume d'eau injectée dans le distillateur et la température pour une valeur fixe de la salinité. Cette valeur est située entre 190 et 750 ml en maximum. D'autre part nous remarquons que le taux maximum du rendement diminue en augmentant la salinité.

**c. Intersection entre le volume d'eau et la salinité a une température de chauffage fixe**

La figure 3.10 présente l'interaction entre le volume d'eau et la salinité a une température de chauffage fixe pour la distillation de différents volumes d'eau en faisant varier la température de chauffage de 80, 115 et 150 °C.

La figure 3.10 montre qu'en fixant la température de chauffage à de 80, 115 et 150 °C, une légère influence de la salinité sur le rendement est obtenue. Ceci est expliqué par les lignes horizontales sur les différents contours.



T=80°C

T=115°C

T=150°C

Figure 3.10 : parcelles de contour et surface de réponse en trois dimensions pour des températures fixes.

Le rendement de la production d'eau distillée augmente avec l'augmentation de volume d'eau introduit dans le distillateur et diminue avec l'augmentation de la salinité.

Dans le cas d'une température fixée à 80°C, le rendement est maximum et il est égale à 26% pour une faible salinité approximativement égale a 40g/l et un volume d'eau assez important (750ml), pour une température élevée à l'ordre de 115°C, le rendement augmente linéairement avec la quantité d'eau introduite jusqu'à atteindre une valeur de 47%. Les valeurs trouvées sont regroupées dans le tableau 3.10

Tableau 3.10 : Evolution du rendement de la production de l'eau distillée pour différentes températures.

Température (°C)	R <sub>minimum</sub> (ml)	R <sub>maximum</sub> (ml)
80	120	260
115	190	470
150	260	750

D'après le tableau ci-dessus, le rendement de la production d'eau distillée est plus important car il passe de 260 jusqu'à 750 avec un rendement minimum de 120, cela implique que on variant la salinité et le volume d'eau injecté avec une température fixé, la salinité n'influe pas sur la production de l'eau par chauffage électrique.

## ***CHAPITRE 4 : SIMULATION NUMERIQUE***

## 4.1. INTRODUCTION

La simulation numérique est la méthode la plus performante en matière d'analyse des phénomènes physiques. La résolution consiste en la discrétisation en modèles élémentaires faciles à manipuler. Elle présente plusieurs avantages, entre autres, sa rapidité de prédiction, son coût non élevé, ses informations complètes et détaillées ainsi que sa capacité à simuler des conditions réelles et idéales [36].

Cette partie de notre travail traite la simulation numérique de la déshydratation la saumure rejetée par l'usine de dessalement de FOUKA à travers l'utilisation d'un distillateur à effet de serre

Notre approche consiste à utiliser la technique ComputationalFluidDynamic (CFD) conduit à l'aide de code de calcul Fluent 15.0.0

A cet effet, le poste de travail, utilisé pour ces simulations, est une station de calcul de Modèle : HP Z820 Workstation et Processeur : Intel ® Xeon ® CPU E5-2660 0 @ 2,20 GHz (processeurs) avec une mémoire installée (RAM) :24,0 Go et un type du système : Système d'exploitation 64 bits et type de carte graphique : NVIDIA GeForce GTX 770 / 4096 Mo.

## **4.2. PRESENTATION DU LOGICIEL FLUENT**

La ComputationalFluidDynamic (CFD) est basé sur la résolution des équations d'état par la méthode des volumes finis et comprend trois (03) étapes essentielles [37] :

1. Pré-traitement.
2. Solver.
3. Post-traitement.

Fluent est un logiciel de calcul numérique destiné à simuler les phénomènes de transfert de matières, de transfert de chaleur et de transfert de mouvement.

Les étapes de la simulation sous fluent consiste en :

1. Génération de la géométrie
2. Processing ou calcul sous Fuent
3. Post processing

## **4.3. GENERATION DE LA GEOMETRIE DU DISTILLATEUR SOUS LE PREPROCESSEUR GAMBIT**

C'est la phase de prétraitement qui permet de définition et la construction du phénomène à étudier à l'aide du préprocesseur Gambit 2.3.16. Ce dernier est un outil graphique qui permet de visualiser la géométrie et le maillage du domaine. Les étapes suivies sont présentées ci-après.

### **Etape1/ Création de la géométrie**

En respectant les dimensions réelles du distillateur, nous avons utilisés les différentes fonctionnalités du logiciel Gambit pour créer sa géométrie en 3 dimensions (figure 4).

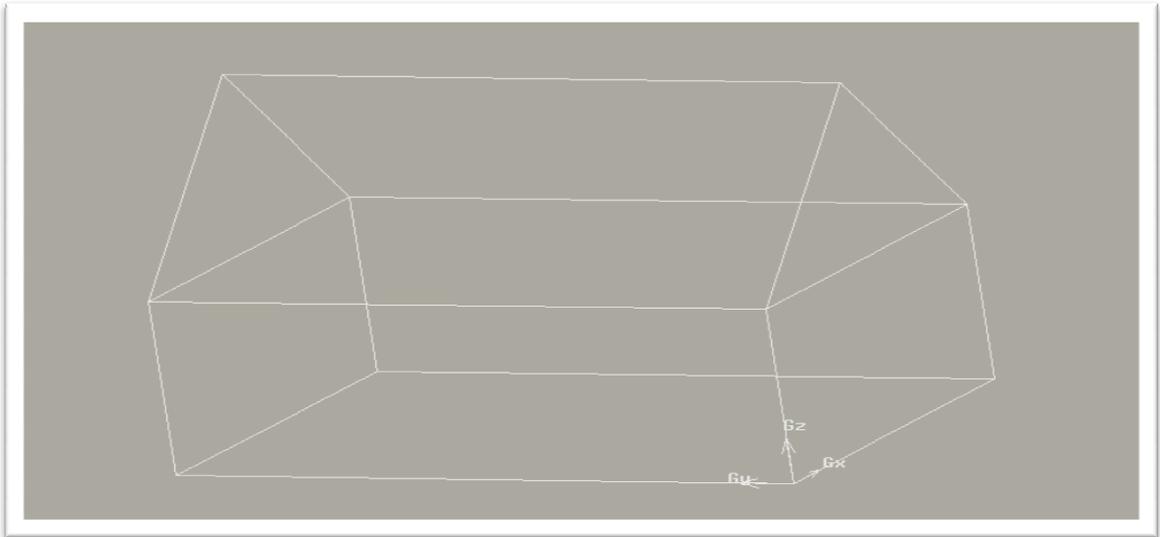


Figure 4.1 : Création de la géométrie en 3D

### Etape 2/Maillage

Le maillage adopté est uniforme et structurée à élément hexaédrique de taille 0.1, il est réalisé en 3 étapes :

- Maillage des lignes (parois)
- Maillage des surfaces planes
- Maillage des volumes

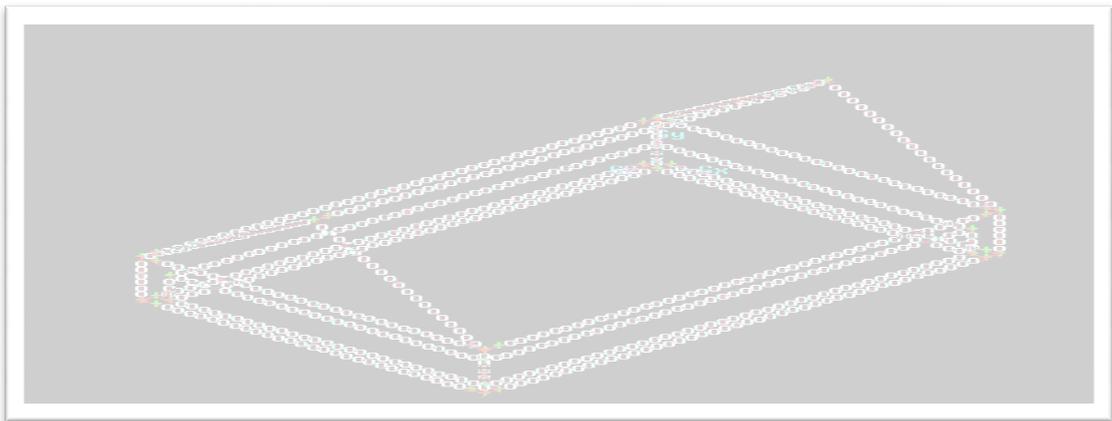


Figure 4.2: Maillage des parois.

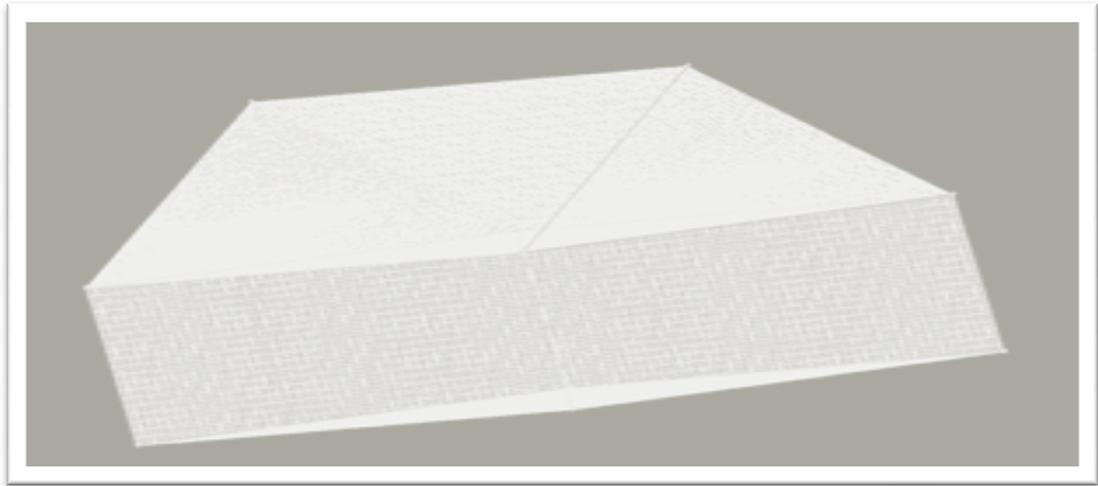


Figure 4.3: Maillage des différentes surfaces et du volume du distillateur

### **Etape 3/ Conditions aux limites**

Selon la géométrie du distillateur étudié, 09 surfaces sont délimitées. Les expérimentations menées ont consisté au chauffage par énergie conventionnelle (plaques chauffantes) du caisson du distillateur. Cela, afin de provoquer le phénomène d'évaporation de la saumure contenue dans le caisson. Il est à rappeler que la saumure chauffée est en régime stationnaire.

Selon le protocole expérimental adopté, les conditions aux limites attribuées aux 09 surfaces du distillateur sont de type WALL.

### **Etape 4/ Exportation du maillage vers fluent**

Après le maillage du distillateur, le fichier est transféré vers le logiciel fluent pour simuler son fonctionnement. Le fichier doit avoir une extension « Mesh ».

## **4.4. PROCEDURE DE CALCUL SOUS FLUENT :**

### **Etape 1/ Procédure sous fluent**

Afin d'effectuer la simulation du comportement du distillateur sous Fluent, nous avons mis sa géométrie à l'échelle réelle : pour notre cas, l'unité de mesure utilisée est le centimètre.

## **Etape 2/ Choix du solveur**

Après la mise à l'échelle, nous avons choisi le solveur par « défaut implicite avec pression bases ». Ce solveur permet de résoudre les équations de continuité, de quantité de mouvement et de l'énergie pour les écoulements incompressibles

## **Etape 3/Choix du model**

La bibliothèque du logiciel Fluent renferme plusieurs modèles numériques. Notre choix s'est porté sur le modèle « Volume Of Fluid » (VOF) qui interprète au mieux le phénomène à étudier.

En effet, le modèle VOF (Volume Of Fluid) est conçu pour la simulation hydrodynamique de deux ou plusieurs fluides non miscibles et qui permet de suivre la position de l'interface entre les fluides. Le modèle VOF utilise une équation unique à toutes les phases pour le bilan de quantité de mouvement et introduit la notion de fraction volumique de phase pour traduire la présence ou non d'une phase en un point donné de l'espace à un temps donné [37].

Dans notre cas, Le modèle choisi permet, à chaque itération, de calculer la fraction volumique respective d'air et d'eau dans chaque volume de contrôle constituant la géométrie air/eau qui intervient dans le calcul de la masse volumique qui permet le passage de l'ensemble de 'particules' d'eau vers deux volumes superposés d'eau et d'air. La surface libre est donc l'interface de ces deux volumes.

## **Etape 4/ Introduction des phases**

L'évolution du phénomène étudié se compose de deux (02) phases : liquide et vapeur. Pour les introduire dans le logiciel FLUENT nous avons suivi les étapes suivantes :

- Define → phases → phase 1 (vapeur), phase 2 (liquide)

## **Etape 5/ Conditions aux limites**

Les conditions aux limites choisies dans notre cas sont :

- La base du caisson du distillateur est la source de chaleur. La température de cette source est égale à 395 K.

Les parois du distillateur sont à la température ambiante (sans source de chaleur). Leur température est fixée à 295 K. Il est à noter que ces parois sont adiabatiques.

## **Etape 6/ Critère de convergence**

S'agissant de la fraction volumique de la saumure, elle a été choisie par défaut à 0,1. Après le choix des conditions initiales et des critères de convergence, nous avons lancé le calcul sous Fluent en prenant en considération les paramètres « RUN CALCULATION » à savoir :

- Un STEP SIZE = 0.000001 (le temps de convergence)
- Un nombre maximum des itérations égal a 100000
- Une boucle des itérations égale à 20
- itérations du volume de la phase liquide, du volume de la phase vapeur, de la vitesse suivant l'axe (x ;y ;z) , de la continuité et de l'énergie.

## **4.5. RESULTATS NUMERIQUES**

La simulation de la déshydratation par chauffage thermique de la saumure a été effectuée sous 'Fluent' en utilisant un modèle d'écoulement multiphasique et en activant l'équation d'énergie.

La distillation est un phénomène diphasique où la saumure représente la phase incompressible et la vapeur d'eau représente la phase compressible. Le modèle "VOF" simule les écoulements de ces deux fluides immiscibles par la résolution des équations de continuité, de mouvement et d'énergie en régime transitoire. Le "VOF" utilise une seule équation pour le bilan de quantité de mouvement pour les deux phases. La résolution de ce bilan des champs de vitesse. La fraction volumique pour chaque phase est calculée à partir de l'équation de continuité. En effet, nous introduisons la notion de la "Fraction volumique de phase" pour traduire la présence ou non d'une phase en un point donné dans le domaine du calcul à un temps donné.

Pour les résultats obtenus, nous aurons recours au code CFD FLUENT la version 15.0, commercialisé par FLUENT, ce dernier est basé sur la méthode numérique des volumes finis.

La résolution effectuée par le logiciel FLUENT simulé le mouvement de liquide par le chauffage électrique. En utilisant la méthode VOF (L'approche Volume Of Fluide.

Afin de prendre en compte, l'effet de la gravité sur le phénomène, "Implicit body force" a été sélectionné.

Le profil de températures au sein du distillateur est obtenu par la résolution de l'équation d'énergie.

### **4.5.1. Valeurs des variables de discrétisation**

Les schémas de discrétisation des différentes variables sont résumés dans le tableau suivant :

Tableau 4.1 : les valeurs des variables de discrétisation.

Variable	Schéma
Pression	PRESTO
fraction de volume	Géo-Reconstruct
Couplage pression-vitesse	PISO
Quantité de mouvement	Décentré amont 1er ordre

#### **4.5.2. Sous relaxation**

Les sous relaxations sont régulièrement utilisés dans les problèmes non linéaires pour éviter que le processus itératif ne diverge. Elle consiste à diminuer la rapidité des changements d'une variable, d'une itération à l'autre, par l'introduction d'un coefficient de sous relaxation

Dans notre cas ; les valeurs de sous relaxation sont données dans le tableau suivant :

Tableau 4.2 : les valeurs des facteurs de sous relaxation des différentes variables.

Variable	Facteurs de sous relaxation
Pression	0.3
Quantité de mouvement	0.7
Energie	1
Densité	1

#### **4.5.3. Paramètres physico-chimiques du fluide et solide**

Pour effectuer une simulation dans logiciel FLUENT, l'introduction des paramètres de fluide est nécessaire.

Tableau 4.3 : Paramètres physico-chimiques de l'eau

Paramètres	Valeurs
Masse volumique ( $\text{kg.m}^{-3}$ )	998.2
La masse moléculaire ( $\text{k. kmol}^{-1}$ )	18.0152
Chaleur spécifique ( $\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$ )	4182
Viscosité dynamique ( $\text{kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}$ )	0.001003
Conductivité thermique ( $\text{W .m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ )	0.6
Coefficient d'expansion ( $\text{K}^{-1}$ )	0.000151

#### 4.5.4. Evolutions des résidus de calcul

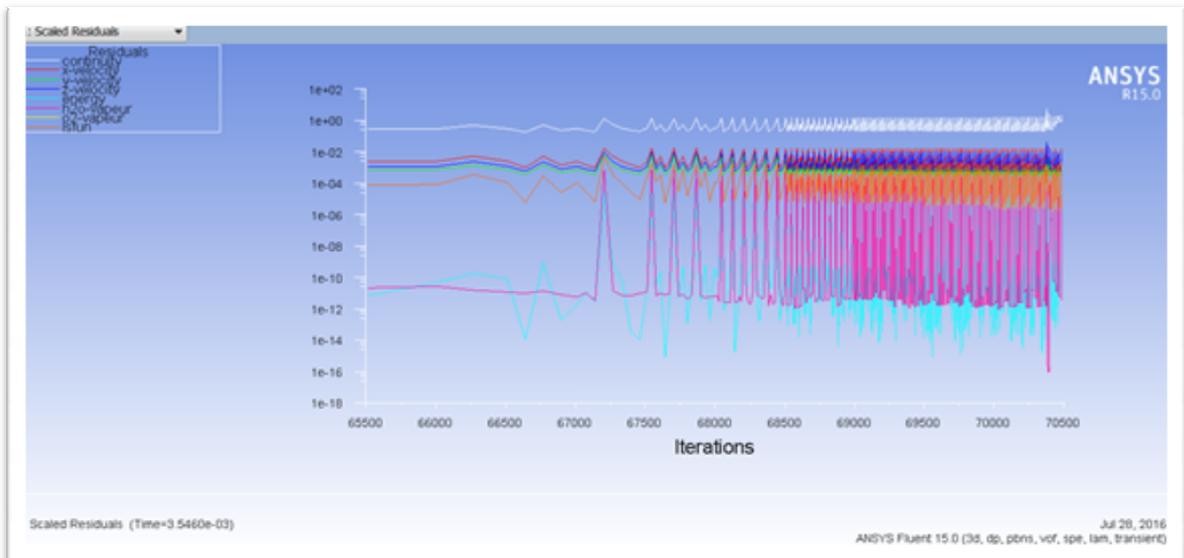


Figure 4.5 : Résidus de calcul numérique

Le calcul itératif a été poursuivi jusqu'à ce que les solutions convergent vers les critères choisis au préalable.

Le but essentiel de notre approche numérique est de simuler la forme de distillateur est voir l'importance de l'influence de la température de chauffage au cours du procédé.

La simulation de notre approche d'évaporation-condensation dans un distillateur à double chapelle consiste à résoudre le phénomène diphasique à cause de la présence de deux phases, la première phase est liquide et la 2ème phase vapeur. Ces deux dernières sont introduites dans les paramètres de FLUENT.

Les résidus de calcul de cette simulation nous indiquent le développement de phénomène, ce dernier nous indique le déroulement de l'énergie de la vitesse et du changement de phase.

Nous avons lancé les calculs dans une station de mémoire installée (RAM) :24,0 Go pour réaliser la simulation tridimensionnelle en passant par logiciel GAMBIT afin de réaliser la géométrie et le maillage puis par logiciel FLUENT pour faire les calculs et le déroulement de phénomène, on a utilisé deux fluides différents (air-eau) séparés par une interface liquide-gaz avec un solide qui a les propriétés du verre (plexy-glass), le modèle choisi dans notre cas est le VOF qui est spécialement conçu pour l'écoulement diphasique (2 ou plusieurs fluides)

Afin d'examiner l'influence de la température sur l'écoulement des deux fluides, on a maintenu la température de chauffage constante sur la partie inférieure du distillateur à  $T=375^{\circ}\text{C}$ , avec des vitres adiabatiques.

#### **4.5.5. Evolution de la température**

Au début de phénomène, nous remarquons que la variation de la température selon l'axe Z était nulle. Après plusieurs jours de calcul dans la station, un gradient thermique s'est développée entre les deux phases (eau-air) suivant l'axe Z cela est justifié par la formation d'une couche limite thermique sur la paroi inférieure.

Une convection naturelle provoque la formation des petites bulles qui se déplacent du haut vers le bas à cause de la source de chaleur.

L'évolution de la température au cours du temps indique que l'évaporation du liquide (eau) a lieu à cause de flux de chaleur reçu par la source inférieure de la plaque, produisant une vapeur d'eau montant vers le haut du distillateur.

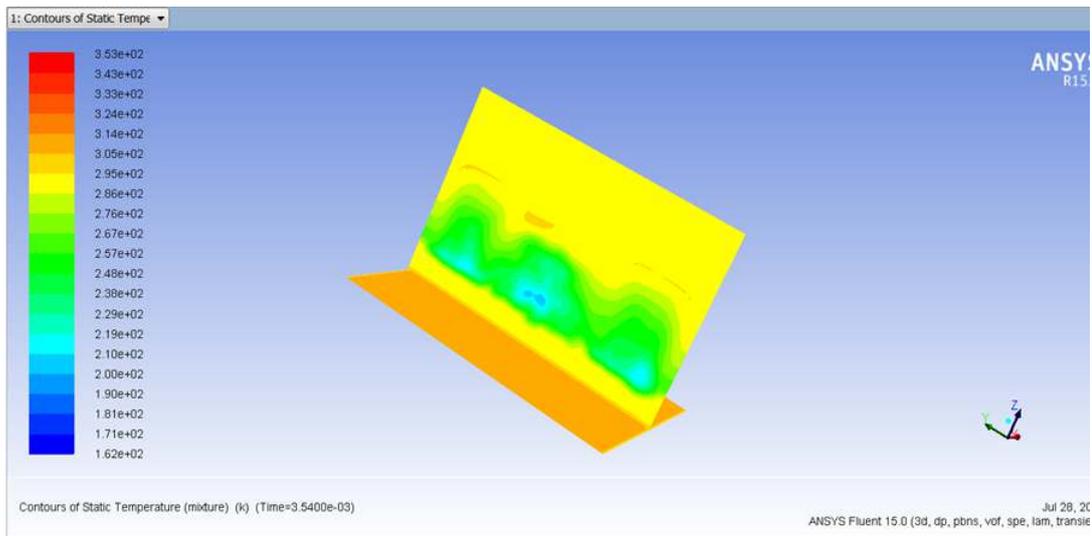


Figure 4.6 : Evolution de la température statique au cours du temps.

#### 4.5.6. Evolution des phases

La fonction PATCH dans FLUENT a pour but d'assembler les deux phases du phénomène.

Au début de la simulation l'interface gaz-liquide.

Après des jours de calculs le développement progressif commence à s'améliorer par la formation des petites bulles au niveau de l'interface qui se traduit par l'évaporation des molécules d'eau en formant une vapeur d'eau, cette dernière est en plein agitation de la partie inférieure vers la partie supérieure (vitrage).

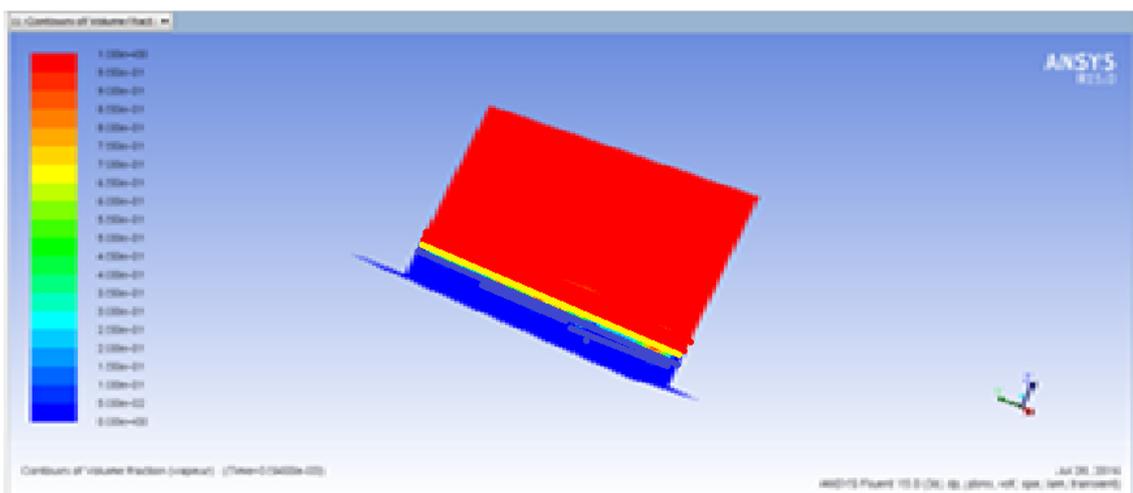


Figure 4.7 : Evolution de la phase vapeur a t=0s.

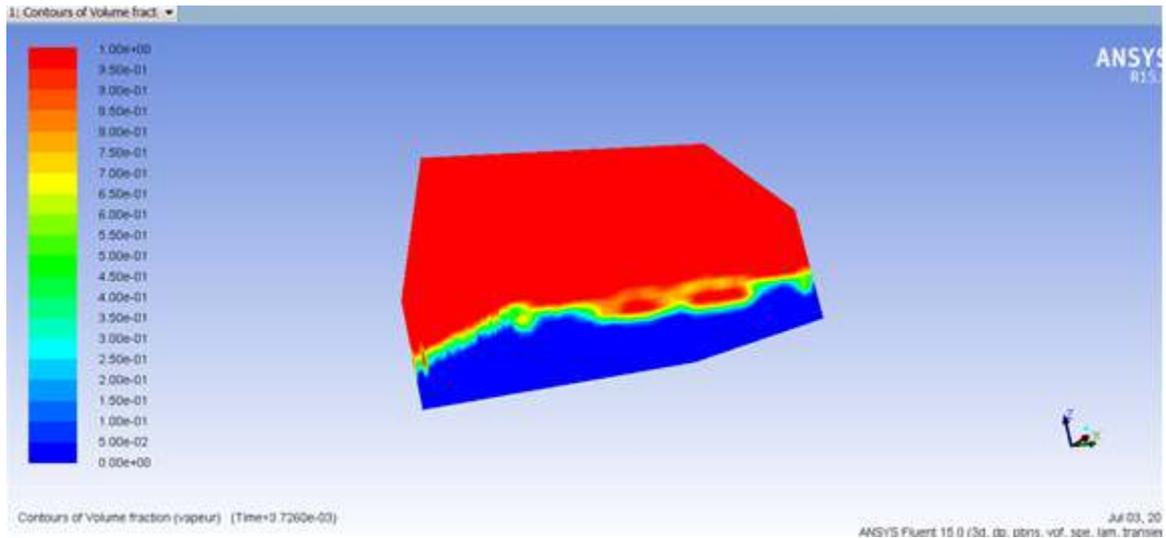


Figure 4.8 : Evolution de la phase vapeur a  $t=5jr$ .

La figure 4.8 présente la distribution de la fraction volumique de la phase liquide dans le distillateur. Nous remarquons que la vapeur d'eau commence à se former à la surface de l'eau saumâtre et qu'elle occupe la partie supérieure du distillateur. Nous observons aussi le début d'un phénomène de condensation sur les parois relativement froides du distillateur.

#### 4.5.7. Evolution de la densité

Les figures 4.9 ; 4.10; 4.11 et 4.13 Représentent l'évolution de la densité volumique du mélange (air-eau) en fonction du temps.

A cause de la température de chauffage sur la partie inférieure de distillateur, La forme de l'interface ne devient plus une ligne droite durant le temps. Le transfert de chaleur par convection aura lieu car le liquide commence à se chauffer progressivement.

Nous remarquons le transfert de masse se produit par l'évaporation des molécules d'eau, cela provoque le changement phasique de l'état liquide vers l'état vapeur et la formations des gouttelettes d'eau au niveau de l'interface.

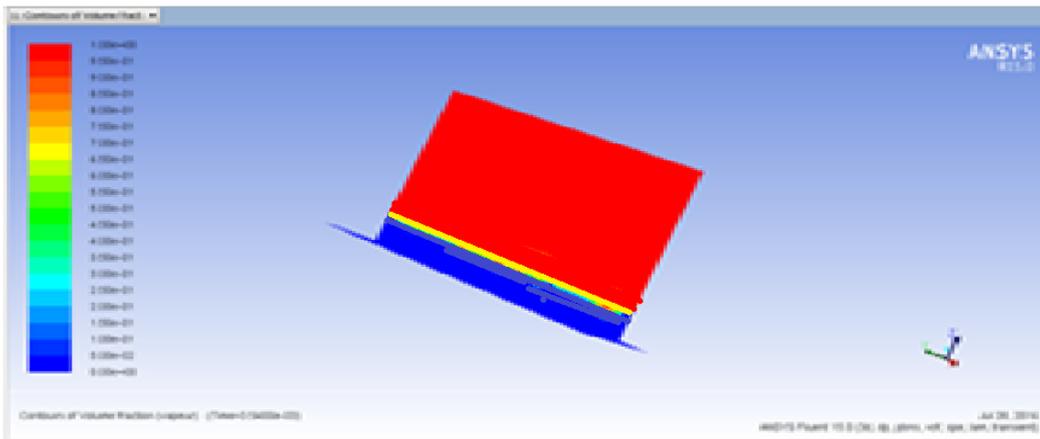


Figure 4.9 : Evolution de la densité a  $t=0s$ .

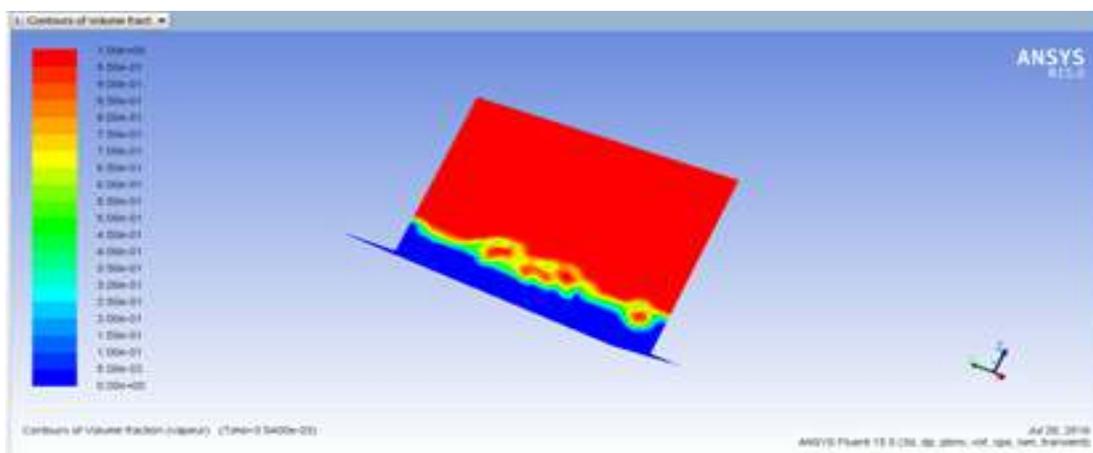


Figure 4.10 : Evolution de la densité a  $t=5jr$ .

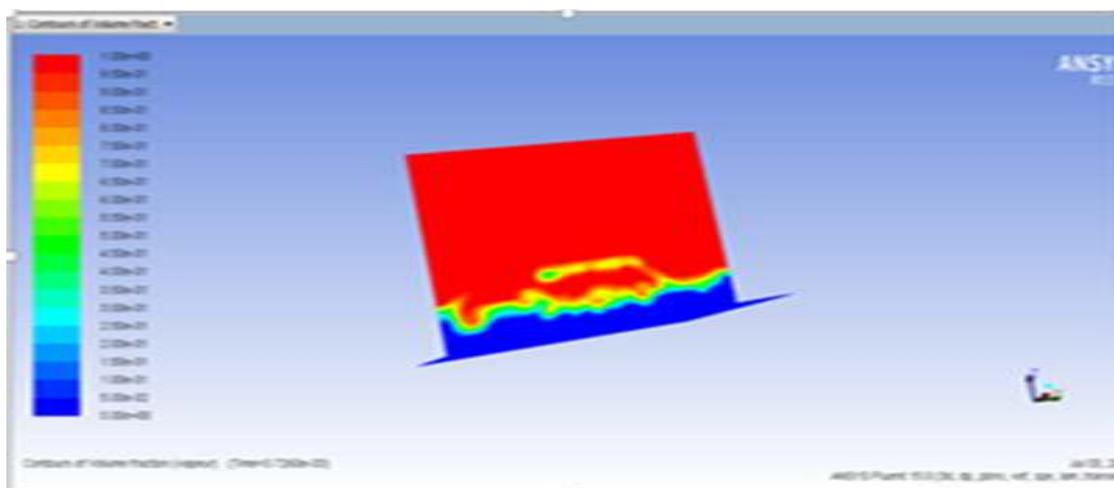


Figure 4.11 : Evolution de la densité a  $t=10jr$ .

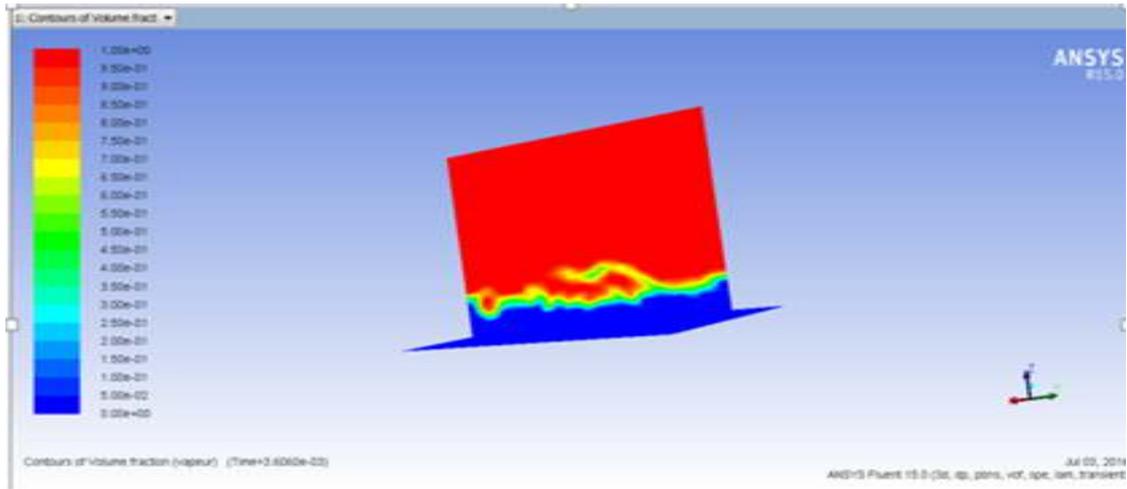


Figure 4.12: Evolution de la densité a t=20jr.

#### **4.6.CONCLUSION**

Nous avons présenté, dans ce chapitre, les étapes recommandées pour conduire une étude de simulation par la méthode de la CFD en utilisant les logiciels GAMBIT et FLUENT.

Pour cela, nous avons définis le modèle physique considéré (VOF) ainsi que les équations qui le régissent.

Ensuite, nous avons spécifié les conditions aux limites, les conditions initiales et les critères de convergence pour le lancement du calcul de simulation du phénomène de la déshydratation de la saumure utilisant un distillateur à effet de serre.

## CONCLUSION

Dans ce présent travail, nous nous sommes intéressées à l'étude expérimentale et numérique d'un distillateur solaire en utilisant un système d'évaporation-condensation par chauffage électrique et solaire.

L'efficacité de la production de l'eau distillée dépend de plusieurs paramètres tels que : la température, le volume de la saumure introduit et la salinité.

Les résultats obtenus peuvent être résumés comme suit :

- Le chauffage par les rayons solaire dépend du changement climatique qui influence indirectement sur la production de l'eau et du sel.
- La température de chauffage a un effet très important sur le procédé de la déshydratation de la saumure par chauffage électrique. Cet effet est positif sur la production de l'eau distillée, plus la température augmente ( $T=150^{\circ}\text{C}$ ) plus le rendement est meilleur (75%).
- Le volume d'eau distillée obtenu diminue en fonction du temps, mais cette diminution est plus rapide par chauffage thermique et pour une température égale à  $150^{\circ}\text{C}$ .
- La salinité de l'eau a un effet négatif sur la production d'eau distillée, quand la salinité augmente, le rendement diminue.
- L'interaction entre le volume d'eau introduit et la température présente un effet positif sur le rendement de la production d'eau.

La simulation numérique tridimensionnelle à l'aide du logiciel Ansys FLUENT 15 par le modèle VOF est très complexe à réaliser, en particulier pour cette étude qui est basée sur le changement diphasique de la phase liquide à la phase vapeur.

Comme perspective de ce travail, nous proposons le procédé de couplage (chauffage solaire- chauffage électrique) pour améliorer les performances du distillateur.

## BIBLIOGRAPHIE

[3] : HALLOUFI OUAHID :«ETUDE DE LA PERFORMANCE D'UNDISTILLATEUR SOLAIRE PAR UN SYSTEME DE PRE-CHAUFFAGEOLAIRE DE L'EAU SAUMATRE» ,2010.

[4] : [www.fr.wikipedia.org/wiki/Distillateur\\_solaire](http://www.fr.wikipedia.org/wiki/Distillateur_solaire).

[5]: IPCC Fourth Assessment Report, How will climate change affect the balance of water demand and water availability? Climate Change 2007 .

[6] : Philippe Rekacewicz, Vital Water Graphics, UNEP/GRID-Arendal, 2005.

[7] :HusseinAbazza, CONSIDÉRATIONS ÉCONOMIQUES CONCERNANT L'APPROVISIONNEMENT EN EAU PAR DESSALEMENT DANS LES PAYS DU SUD DE LA MÉDITERRANÉE, 2012.

[8] :International Desalination Association (IDA).

[9] : Le dessalement de l'eau de mer : les impacts.

[10] : Décret exécutif N° 03-239 du 29 juin 2003 fixant les conditions et modalités d'exploitation des ressources en eaux non-conventionnelles par la société par actions «Kahraba Wa Ma » dans la commune d'Arzew. Journal Officiel de la République Algérienne N° 40 correspondant au 02 Juillet 2003.

[11] :M. Djeddi, Algerian Energy Company Spa. Quarantième anniversaire de la création de l'Université des Sciences et des Technologies Houari Boumediene, Forum Université-Entreprises.

[12] : Programme de dessalement d'eau de mer, Direction de l'Alimentation en Eau Potable DAEP 2012. Ministère des Ressources en Eau, Algérie 2014.

[13] : Selim TOUHANT, Amélioration de la Gouvernance du Service Public de l'Eau. 9ème Salon international des équipements, des technologies et des services de l'eau, SIEE-Pollutech, Centre de Conventions d'Oran, Algérie 2013.

[14] :HABET Lila , CONTRIBUTION A L'ETUDE DES IMPACTS DU DESSALEMENT DES EAUX DE MER SUR L'ENVIRONNEMENT : CAS DU LITTORAL DE BOUMERDES ,2009/2010.

[15] :A. Sadi, Le Dessalement Solaire - Considérations Techniques. Rev. Energ. Ren: Chemss 2000 91-97,2000.

[16] :E. Delyannis – Historic background of desalination and renewable energies. SolarEnergy 75 (2003) 357–366.

[17] :ThermoSolar, Votre partenaire avec plus de 35 ans d'expérience dans la technique solaire.

[18] :The Sahara Forest Project From vision to reality. Qatar pilot plant.

[19] :<http://hmf.enseeiht.fr/travaux/bei/beiere/content/2012-g04/proprietes-eau-de-mer-et-saumure>. Energies renouvelables et environnement “bureau d'etudesindustriales” .

[20] :Moumnihadjira (valorisation de la saumure des installations de dessalement) 2012-2013.

[21] :AdilBushnak, Évaluation des meilleures technologies disponibles pour le dessalement en zones rurales/locales. Gestion Intégrée Durable de l'Eau – Mécanisme de Soutien (SWIM - SM).

[22] : Dessalement par osmose inverse: Elimination de la saumure.

[23] : <http://www.batiproducts.com/Stereau/Helioplus/fiche/r?id=1533882945#>.

[24] : SalarD'uyuni[https://fr.wikipedia.org/wiki/Salar\\_d%27Uyuni](https://fr.wikipedia.org/wiki/Salar_d%27Uyuni)Production de sel, **Salarde Uyuni** (Bolivie).

[25] : C. Brison, J-C Perret, J-P Canler – Le séchage solaire des boues : État actuel de l'art et retours d'expérience. Document technique N°36 Fonds National pour le Développement des Adductions d'Eau (FNDAE), 2010.

[26] : Alain Maurel, Dessalement de l'eau de mer et des eaux saumâtres. Ed lavoisier 2006.

[27] : FEDALI SAIDA, MODELISATION ET CONCEPTION D'UN DISTILLATEUR SOLAIRE DES EAUX SAUMATRES A BAS COÛT POUR LES COMMUNAUTES RURALES.

[28]: Aayush Kaushal, A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews 14 (2010) 446–453.

[29] : [www.outilssolaires.com/installation/photovoltaique/applications+a147.html](http://www.outilssolaires.com/installation/photovoltaique/applications+a147.html).

[30]: MODELISATION ET CONCEPTION D'UN DISTILLATEUR SOLAIRE DES EAUX SAUMATRES A BAS COÛT POUR LES COMMUNAUTES RURALES.

[31] : Fiche technique, Thermo-System, Igoud et all., 2015.

## Annexes

### Annexe 1.1



Figure 1.1 : un conductimètre

### Annexe 1.2



Figure 1.2 : un turbidimètre

### Annexe 2.1 : T 100°C

t	t (min)	cond(us/cm)	PH	V(ml)	T°C	T°C de PH
10h30min	40	330	8,2	63	27,7	28,8
11h10min	80	280	8,5	55	26	27,9
11h50min	120	146	8,16	52	25	26,9
12h30min	160	113,5	8,08	43	24,1	26,2
13h10min	200	106	7,46	29	23,7	25,7
13:50min	240	103	6,47	28	23,6	25,3
14h30min	280	100	6,5	25	23	25,5
15h10min	320	111	6,14	10	22,4	25,5

**Annexe 2.2 :T 150°C**

t	t (min)	cond(us/cm )	V (ml)	PH	T °C	T°C de PH
09:54						
10:20	25	133,6	114	6,25	29,6	30
10:40	45	74,5	80	6,83	33,4	34,1
11	65	69,4	78	6,8	33,5	33,6
11:20	85	67,3	53	6,59	30	29,2
11:40	105	42,3	28	6,27	23,5	25,5
12:15	140	40	21	5,87	22,8	25,3

**Annexe 2.3 : Solaire**

Temps	T°C distillateur	T°C eau	Volume (ml)	COND(us/cm)	PH
10 :30	62°C	30°C	106	337=25°C	7.1=25°C
11 :30	60°C	30°C	29	194.1=25°C	6.74=25°C
12 :30	62°C	34°C	16	306=24°C	6.88=25°C
01 :30	60°C	36°C	25	312=26.7°C	6.69=25°C
02 :30	60°C	38°C	22	507=27.4°C	6.70=25°C
03 :30	60°C	38°C	11	181,4=26.3°C	6.59=25°C

