



MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITÉ ABDELHAMID IBN BADIS - MOSTAGANEM



Faculté des Sciences Exactes et d'Informatique

Département de Chimie

Filière : Chimie appliquée

MÉMOIRE DE FIN D'ETUDES

**Pour l'Obtention du Diplôme de Master en
Chimie**

Présenté par :

BAGHDADI Sihem

KHALFA Malika El Batoul

THEME :

**L'opération de lessivage chimique du dessaleur "D"
au niveau du complexe GL1/Z**

Soutenu le : 30/06/2024

Devant le jury composé de :

Président : HAMOUDI Naima **MAB** **Université de Mostaganem**

Examineur : KHALDI Hafsa **MAB** **Université de Mostaganem**

Encadrant : HAMIANI Abdelkader **MCB** **Université de Mostaganem**

Année Universitaire: 2023-2024

Remerciements

Au terme de ce travail, Nous remercions avant tout « ALLAH » le tout Puissant, qui nous a donné la force, la patience, et le courage pour l'accomplissement de ce travail.

Nous tenons à adresser nos sincères remerciements à tous ceux qui y ont contribué.

Il s'agit :

Notre promoteur HAMIANI Abdelkader, enseignant à l'Université de Mostaganem, pour nous avoir guidées pendant toute la période de travail.

Nous n'aurions jamais pu mener ce travail à bien sans son exigence, sa disponibilité et ses conseils pertinents. Ses grandes qualités scientifiques et humaines nous aidé, motivé, et tout en offrant une grande liberté dans la recherche.

Nous tenons aussi à remercier sincèrement les membres de jury :

Mme.HAMOUDI Naima enseignante à l'Université de Mostaganem de nous avoir fait l'honneur de présider le jury.

Mme.KHALDI Hafsa enseignante à l'Université de Mostaganem d'avoir accepté d'examiner notre travail.

Un spécial remerciement au personnel du complexe GL1/Z particulièrement aux DRH et de département de production de GL1/Z

Nous voulons exprimer notre reconnaissance spéciale envers notre encadrante du complexe GL1/Z Mme. BELADJI Samia pour son leadership inspirant, son soutien constant et sa capacité à nous guider vers l'atteinte de nos objectifs avec bienveillance et assurance.

Nous exprimons aussi nos vifs remerciements aux nos enseignants de FSEI, et surtout les enseignants de la spécialité de chimie appliquée, pour

leur aide et leurs conseils scientifiques. Et pour tout personnel administratif et technique de la Faculté des Sciences Exactes et d'Informatique.

Merci enfin, à toute personne, qui a contribué, de près ou de loin à l'aboutissement de ce travail.

Dédicaces

"Je dédie ce modeste travail à la mémoire de mes grands-parents maternels. Puisse Dieu les accueillir en sa sainte miséricorde et que ce travail soit une prière pour leurs âmes."

À mes très chers parents avec toute ma reconnaissance :

À ma maman, pour ses nombreux sacrifices consentis et leur prière tout au long de mes études. Aucun mot ne peut suffire pour te remercier.

À mon cher papa qui a été toujours compréhensif, et qui n'a jamais cessé de ménager ses efforts pour mon éducation. Sa chaleur paternelle a été et sera toujours pour moi un grand réconfort.

À ma seule chère sœur Meriem, ma source de joie et de Bonheur

À nos oncles, mes tantes, cousins et cousines ainsi qu'à toutes nos familles

À mes chères copines : Chahra, Chaima, Batoul, Maria, Rahma, Imene . Je

N'oublierai jamais ses encouragements tant au niveau personnel que professionnel.

Tous mes professeurs qui m'ont enseigné

A toute la promotion de chimie appliquée.

Sihem

Dédicaces

À Mes chers parents,

Je vous dédie ce succès avec tout mon amour et ma reconnaissance. Vous m'avez toujours soutenu, encouragé et guidé tout au long de mon parcours. Votre dévouement, votre sacrifice et votre foi en moi ont été essentiels pour que j'atteigne cet objectif. Je vous serai éternellement reconnaissant.

À ma grande et ma petite famille,

Merci d'avoir été à mes côtés, de m'avoir épaulé et de m'avoir donné la force de persévérer. Votre présence rassurante et votre affection ont été un véritable réconfort dans les moments difficiles. Je suis fier de pouvoir partager cette réussite avec vous.

À tous ceux qui m'ont aidé,

Professeurs, mentors, amis, je vous exprime ma plus profonde gratitude. Votre soutien, vos conseils et votre bienveillance ont été déterminants pour ma réussite. Je n'y serais pas arrivé sans vous.

Ce diplôme est le vôtre autant que le mien. Merci du fond du cœur

Latouf

Remerciements	
Dédicace	
Résumé	
Liste des tableaux	
Liste des figures	
Liste des abréviations	

Sommaire

Introduction générale	2
------------------------------------	----------

Chapitre I Généralité sur le dessalement de l'eau de mer

1. Introduction.....	6
2. Généralité sur l'eau de mer.....	6
2.1. Composition de l'eau de mer	7
2.2 Salinité.....	7
2.3. Conductivité	8
2.4. Les impacts de l'eau de mer	8
3. Généralité sur le dessalement de l'eau de mer	9
3.1. Les principaux procédés de dessalement	9
3.2. Technique de dessalement.....	10
3.2.1. Distillation à détente étagées (Multi Stage Flash distillation MSF)	11
3.2.2. Distillation à multiple-effet (MED).....	13
3.2.3. Procédé membranaire	15
3.3. Avantages et inconvénients du dessalement de l'eau de mer	17

Chapitre II Description de la zone d'étude

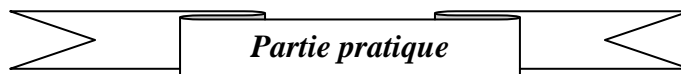
1. Introduction.....	20
2. Présentation du Complexe GL1/Z.....	21
2.1. Historique du Complexe	21
2.2. Description et mission du Complexe	21
2.3. Les différentes Zones du Complexe GL1/Z.....	21
2.3.1. Zone d'utilité	21
2.3.2. Zone de process	23
2.3.3. Zone de pompage.....	27
2.3.4. Zone de stockage	27
3. Dessalement au niveau de complexe GL1/Z.....	28
3.1. Les ajouts chimiques dans une station de dessalement	28
3.1.1. Agents antitartres.....	28
3.1.2. Agents anti mousses	29
3.2. Description générale d'une unité de dessalement MSF	29
3.2.1. Description le principe de fonctionnement.....	30
3.3. Description du procédé EJECTOCOMPRESSEUR utilisé	31
3.3.1. Les avantages du procédé EJECTOCOMPRESSEUR.....	32
3.3.2. Schéma de principe.....	32
4. Les différents circuits de dessalement.....	33
4.1. Circuit eau de mer	33
4.2. Circuit eau saumâtre.....	34
4.3. Circuit eau Distillée.....	35
4.4. Circuit vapeur.....	35
5. Les Problèmes d'exploitation.....	36

5.1. Productions insuffisantes.....	36
5.2. Les causes possibles d'un débit bas	36
6. Procédure de lessivage acide de l'unité.....	37
6.1. Acide sulfamique et inhibiteur de corrosion	37
6.1.1. Acide sulfamique.....	37
6.1.2. Les inhibiteurs de corrosion	38
6.2. Déroulement de l'opération.....	39
6.2.1. Préparation de l'unité.....	39
6.2.2. Préparation du bac préparation d'acide	39
6.3. Déroulement de l'opération de lessivage acide.....	40
6.4. Phase de neutralisation.....	41
6.5. Phase de rinçage.....	41
6.6. Inspection	42

Chapitre III Les problèmes Techniques en dessalement

1. Introduction.....	44
2. Problèmes techniques rencontrés en dessalement	44
2.1. Problèmes d'entartrage.....	44
2.1.2. Différents moyens de lutte contre l'entartrage	46
2.2. Problème de la corrosion.....	47
2.2.1. Les causes de la corrosion	47
2.2.2. La protection contre la corrosion.....	48
3. Impacts environnementaux du dessalement de l'eau	49
3.1. Impacts négatifs du dessalement	49
3.2. Rejets chimiques	49

3.3. Rejets de saumures	50
3.4. Rejets atmosphériques	50
Conclusion	50



Chapitre IV Méthode et matériels

1. Introduction.....	52
2. Le problème de l’entartrage et essai de détartrage	52
2.1. Les étapes de test de détartrage	53
2.1.1. But de manipulation.....	53
2.1.2. Réactifs utilisés lors de la manipulation	53
2.1.3. Mode opératoire.....	53
3. Analyse des ions calcium et magnésium dans le tartre par la méthode d'absorption atomique ISO (10697-1 (1992)).	58
3.1. But de la manipulation	58
3.2. Mode opératoire	58
4. Suivi de l’opération du lessivage du dessaleur D	59
4.1. Situation des unités de dessalement via le bilan global de production	59
4.2. Opération du lessivage du dessaleur D	59

Chapitre V Résultats et discussion

1. Les résultats du test de détartrage	62
2. Analyse de la qualité du tartre.....	67
3. Suivi la production du dessaleur D	68

4. La réaction de détartrage.....	70
Conclusion générale.....	73
Références bibliographiques.....	75

Liste des figures

Figure 1: Principales compositions de l'eau de mer.....	7
Figure 2: Salinité moyenne de l'eau de mer exprimée en gramme de sel par kilogramme d'eau de mer.....	8
Figure 3: Procédé de distillation	10
Figure 4: Multi-Stage Flash MSF à 3 étages.	12
Figure 5: Schéma d'une cellule d'un système par détente successives (MSF)	12
Figure 6: Schéma d'un système d'évaporateurs multiples effets (MED).	14
Figure 7: Schéma d'une unité d'évaporation simple-effet avec compression de vapeur.....	15
Figure 8: Principe de l'électrolyse.....	16
Figure 9: Principe de l'osmose et de l'osmose inverse	17
Figure 10: Usine de liquéfaction de gaz naturel.	20
Figure 11: Schéma descriptif du procédé	26
Figure 12: Principe de fonctionnement d'un système par détente successives (MSF) à 3 étages..	31
Figure 13: Structure 3D et 2D de l'acide sulfamique.....	37
Figure 14: Acide sulfamique « Cristaux /poudre »	37
Figure 15: Détartrage d'une canalisation.	47
Figure 16: Corrosion des canalisations.....	48
Figure 17: La corrosion des métaux	48
Figure 18: Titration avec le NaOH.....	55

Figure 19: Préparation de solution.....	56
Figure 20: Balance analytique.....	56
Figure 21: Échantillon de tartre.	56
Figure 22: Différentes solutions d'acide sulfamique.....	57
Figure 23: Un bain marie.	57
Figure 24: Entartrage des tubes	59
Figure 25: Variation du pH en fonction du temps.	64
Figure 26: Le temps nécessaire en minute pour le détartrage de 4g du tartre pour chaque [C] d'acide sulfamique.....	65
Figure 27: Production mensuelle du dessaleur D enregistrée Année 2022.	68
Figure 28: Production mensuelle du dessaleur D Période 2023	69
Figure 29: Production du dessaleur D JAN-MARS-2024	69
Figure 30: Evolution du pH en fonction de l'injection de l'acide sulfamique lors de lessivage chimique du dessaleur D 12/07/2023.....	70
Figure 31: Suivi de la teneur en ion Ca^{2+} (ppm) lors du lessivage chimique du dessaleur D juillet 12/07/2023	71
Figure 32: Taux de l'ion Cu^{2+} lors du lessivage chimique du dessaleur D 12/07/ 2023.....	71

Liste des tableaux

Tableau 1: Composition molaire du GNL	27
Tableau 2: Condition de stockage du GNL	27
Tableau 3: Les valeurs théoriques de la masse de l'acide sulfamique utilisé dans chaque solution	54
Tableau 4: Détermination expérimentalement de % massique de la solution d'acide sulfamique approprié à chaque concentration et le volume du NaOH	62
Tableau 5: Détermination du pH des différentes concentrations en fonction du temps	63
Tableau 6 : Concentration de la composition du tartre.....	67

Liste des abréviations

(NH₄) HSO₄ : bisulfate d'ammonium

°C : degré Celsius

BBT : Bleu de bromothymole

Bar abs : bars absolus

barg : bar gauge

Ca⁺² : Ion calcium

CaC : carbonate de calcium

CaSO₄ : Sulfate de calcium

CO₂ : dioxyde de carbone

Cu⁺² : Ion cuivre

d : Densité

ED : électrodialyse

EM : L'électrolyse à membranes

Fe⁺² : Ion ferreux

g : gramme

g/l : gramme par litre

g/mole : gramme par mole

GL1/Z : Gaz Liquéfié N°1. D'Arzew

GN : Gaz naturel

GNL : Gaz Naturel Liquéfié

Hg : mercure

HSO₃NH₂ : Acide sulfamique

Kg : kilogramme

KW : kilowatts

m³ : mètre cube

m³ / h : mètre cube par heure

MED : distillation multiple effets

MEA : Mono Ethanol Amine

Mg⁺² : Ion magnésium

Mg(OH)₂ : Hydroxyde de magnésium

mg/l : milligramme par litre

mm : millimètre

MSF : multi stage flash

MCR : Multi Composants Réfrigérant

MW : mégawatt

NALCO 131S : Un produit chimique de lutte contre les mousses fabriqué par l'entreprise
NALCO

NaCl : Chlorure de sodium

NaOH : Soude caustique

OI : osmose inverse

pH : Potentiel d'hydrogène

PO₄ : Le phosphate

P : Pression

ppm : Parties par millions

PSC : Profession et Catégorie Socioprofessionnel

SAA : Spectromètre d'adsorption atomique

SIDEM : Société Internationale de Dessalement d'Eau de Mer

SONATRACH : Société Nationale de Transport et Commercialisation des Hydrocarbures

T : Température

t/h : tonne par heure

TG : turbogénérateur

tr/min : tour par minute

V_E : Volume équivalent

Résumé :

Le complexe GL1/Z, qui s'appuie sur des installations de dessalement pour la production de vapeur, est confronté au défi de maintenir une efficacité opérationnelle grâce à une surveillance vigilante. L'accumulation de dépôts de sel, sous-produit du processus de dessalement, représente une menace significative pour les performances des équipements, nécessitant des procédures périodiques de détartrage. Typiquement, l'acide sulfamique est utilisé comme agent principal pour le détartrage chimique, bien que son utilisation comporte des risques inhérents de corrosion. Cette étude se penche spécifiquement sur la détermination de la concentration la plus efficace d'acide sulfamique pour les opérations de détartrage dans l'unité de dessalement D du complexe GL1/Z. En optimisant cette concentration, l'objectif principal est de prolonger la durée de vie opérationnelle des équipements et d'assurer une efficacité à long terme tout en atténuant les risques potentiels liés à la corrosion.

Mots clés : GL1/Z , dessalement , vapeur, dépôts de sel , détartrage , acide sulfamique , corrosion , efficacité opérationnelle , Surveillance , performances des équipements.

Abstract :

The GL1/Z complex, relying on desalination facilities for steam production, faces the challenge of maintaining operational efficiency through vigilant monitoring. The accumulation of salt deposits, a byproduct of desalination, poses a significant threat to equipment performance, necessitating periodic descaling procedures. Typically, sulfamic acid serves as the primary agent for chemical descaling, though its use carries inherent risks of corrosion. This study specifically delves into determining the most effective concentration of sulfamic acid for descaling operations in desalination unit D within the GL1/Z complex. By optimizing this concentration, the primary goal is to extend the operational lifespan of equipment and ensure sustained long-term efficiency while mitigating the potential for corrosion-related issues.

Key word : GL1/Z , Desalination , Steam , Salt deposits , Descaling , Sulfamic acid , Corrosion , Operational efficiency , Monitoring , Equipment performance.

المخلص :

المجمع GL1/Z ، الذي يعتمد على مرافق التحلية لإنتاج البخار، يواجه تحدي المحافظة على كفاءة التشغيل من خلال المراقبة اليقظة. تراكم ترسبات الملح، كنتاج فرعي لعملية التحلية، يشكل تهديدًا كبيرًا لأداء المعدات، مما يستدعي إجراءات دورية للتخلص من الكلس. عادةً، يُستخدم الحمض السلفاميك كوكيل رئيسي للتخلص الكيميائي، على الرغم من أن استخدامه يحمل مخاطر تآكل متراكمة. تركز هذه الدراسة بشكل خاص على تحديد التركيز الأكثر فعالية للحمض السلفاميك لعمليات التخلص من الكلس في وحدة التحلية D في مجمع GL1/Z. من خلال تحسين هذا التركيز، يكمن الهدف الرئيسي في تمديد العمر التشغيلي للمعدات وضمان الكفاءة على المدى الطويل مع التقليل من المخاطر المحتملة المتعلقة بالتآكل.

الكلمات المفتاحية المجمع GL1/Z , تحلية المياه , البخار , ترسبات الملح , ازالة الترسبات , حمض السلفاميك , تآكل , كفاءة التشغيل , مراقبة , اداء المعدات.

Introduction générale

Introduction générale

Les infrastructures du gaz naturel liquéfié (GNL) représentent des consommateurs majeurs de vapeur, remplissant une double fonction cruciale en tant que fournisseur d'énergie pour le chauffage et en tant que moteur pour les équipements rotatifs.

L'eau distillée ou dessalée est principalement utilisée pour produire de la vapeur ou comme fluide de refroidissement dans les échangeurs et les condenseurs.

Le complexe GL1/Z utilise un procédé de distillation comprenant cinq unités de type multi stage flash (MSF) à simple effet et une unité de dessalement par procédé ejecto-compresseur. Ces unités peuvent fonctionner de manière indépendante ou en parallèle, avec une capacité de production individuelle de 45 m³/h de distillat, totalisant une capacité calculée de 270 m³/h pour les six unités [1].

À l'heure actuelle, le complexe GL1/Z opère à un taux de production très bas, ne représentant que 7 % de sa capacité, en raison de la mise hors service des cinq autres dessaleurs pour des travaux de réhabilitation, notamment des opérations de retubage. Afin de garantir le bon fonctionnement de l'unique unité de dessalement, le dessaleur D, une attention particulière est portée à la surveillance de la production et au respect des intervalles réguliers de lessivage chimique.

Les unités de dessalement d'eau de mer sont généralement sujettes à l'entartrage et à l'accumulation de sels, résultant de la conversion alcaline des bicarbonates en carbonates, principalement due au chauffage de l'eau de mer lors de son utilisation.

L'entartrage est un phénomène courant qui affecte les réchauffeurs de saumure, les condenseurs, les évaporateurs et les faisceaux tubulaires, entraînant une diminution des performances de l'installation à mesure que l'épaisseur des dépôts de tartre évolue.

Il convient de souligner que le traitement par injection continue d'un antitartre, habituellement des polyphosphates, ne parvient pas à prévenir entièrement la formation de dépôts, en particulier sur les parties exposées à des températures élevées. Ces dépôts doivent être éliminés après un certain nombre d'heures de fonctionnement de l'unité de dessalement.

Lorsque les performances des unités de dessalement commencent à décliner, il est fort probable qu'un entartrage se soit formé dans l'installation, nécessitant une élimination rapide. Dans la plupart des cas, cette élimination est réalisée en utilisant un acide, communément appelé « lessivage acide ».

Le processus de lessivage sera réalisé en utilisant de l'acide sulfamique ($\text{NH}_2 \text{SO}_3\text{H}$) comme agent nettoyant, auquel sera ajouté un inhibiteur de corrosion nommé "Rhodine 141M", afin de réduire l'effet agressif et corrosif de l'acide.

L'objectif central de notre mémoire de fin d'études consiste à examiner les multiples objectifs du processus de lessivage chimique appliqué dans les installations de dessalement de l'unité GL1/Z du complexe.

Cependant, cette opération délicate peut entraîner une corrosion irréversible, provoquant des perforations dans les tubes et équipements du dessaleur, ce qui se traduit par une baisse de production ou un arrêt prolongé.

Dans ce contexte, notre étude se concentre sur la détermination de la concentration d'acide sulfamique la plus efficace pour éliminer les dépôts de tartre liés à l'unité de dessalement D.

Notre travail est organisé en cinq chapitres :

Le premier chapitre se concentre sur une revue de la littérature concernant le dessalement, couvrant les notions générales ainsi que les différentes méthodes utilisées à grande échelle pour le dessalement et la déminéralisation des eaux salées.

Le second Chapitre se focalisera sur la description détaillée de la zone d'étude et la présentation des procédés de dessalement au sein du complexe GL1/Z.

Le troisième Chapitre se penche sur les problèmes techniques rencontrés dans le processus de dessalement de l'eau, tels que la corrosion, l'entartrage et les impacts environnementaux sur le dessalement.

Le quatrième Chapitre détaille les équipements et les méthodes d'analyse utilisés pour appliquer le lessivage chimique dans le processus de détartrage sur divers échantillons de tartre.

Dans le cinquième Chapitre nous présentons les résultats des analyses effectuées ainsi que les discussions qui en découlent.

Pour conclure, nous proposerons une synthèse globale de nos résultats, accompagnée de recommandations pertinentes.

Chapitre I
**Généralité sur
le dessalement
de l'eau de
mer**

1. Introduction

L'eau est présente en abondance sur terre, totalisant 1380 millions de km³. Cependant, la grande majorité est composée d'eau de mer (97,2 %) et de glace (2,15 %), ce qui la rend directement inutilisable. L'eau douce, plus accessible via les lacs, les fleuves et certaines nappes souterraines, ne représente que (0,07 %) de cette ressource totale, soit environ un million de km³. Cependant, sa répartition est très inégale. En effet, 60 % des réserves d'eau douce sont partagées entre seulement dix pays, tandis que vingt-neuf autres, principalement en Afrique et au Moyen Orient, sont confrontés à une pénurie chronique [2].

Selon le Water Resources Institute, 250 millions de personnes dans ces régions ne disposent pas du minimum vital d'eau, défini à 1000 m³ par habitant et par an, tandis que 400 millions vivent en situation de stress hydrique, avec un approvisionnement estimé entre 1000 et 2000 m³ par habitant et par an. On estime également que d'ici 2050, compte tenu de la croissance démographique et de l'augmentation des besoins en eau, 2,5 milliards de personnes pourraient être touchées par le manque d'eau [2].

Pour répondre à la future pénurie d'eau, il est impératif de développer de nouvelles méthodes de production d'eau potable afin de répondre aux besoins croissants de la population mondiale. Parmi ces approches prometteuses, le dessalement de l'eau de mer ou des eaux saumâtres se démarque. Bien que les techniques de dessalement de l'eau de mer soient opérationnelles depuis de nombreuses années, leur coût élevé (généralement entre 1 et 2 euros par m³) limite souvent leur utilisation aux pays riches. Cependant, ces dernières années ont vu une expansion significative de la capacité des usines de dessalement, accompagnée d'une baisse notable des coûts de production par m³ [2].

2. Généralité sur l'eau de mer

L'eau de mer est l'eau salée des milieux marins et océaniques. Elle est une solution saline dont la concentration des sels minéraux dissous avoisine 35 parties pour mille (35 g/L) en moyenne. Sa principale substance chimique est le chlorure de sodium (le sel de cuisine), mais 79 autres éléments la compose [3].

2.1. Composition de l'eau de mer

L'eau de mer est une solution dans l'eau H_2O de nombreuses substances dissoutes différentes. Jusqu'à 2/3 des éléments chimiques naturels sont présents dans l'eau de mer, bien que la plupart ne trace que. Six composants, tous des ions, représentent plus de 99 % de la composition du soluté [4].

Les chlorures sont à plus de 55 % à l'origine, avec le chlorure de sodium $NaCl$ (sel de cuisine), mais elle contient aussi des sulfates, des bicarbonates, des bromures et du Fluor parmi les anions, et parmi les cations, du sodium (plus de 30 %), du magnésium, du calcium, du potassium, du strontium, et l'acide borique comme molécule non dissociée [4].

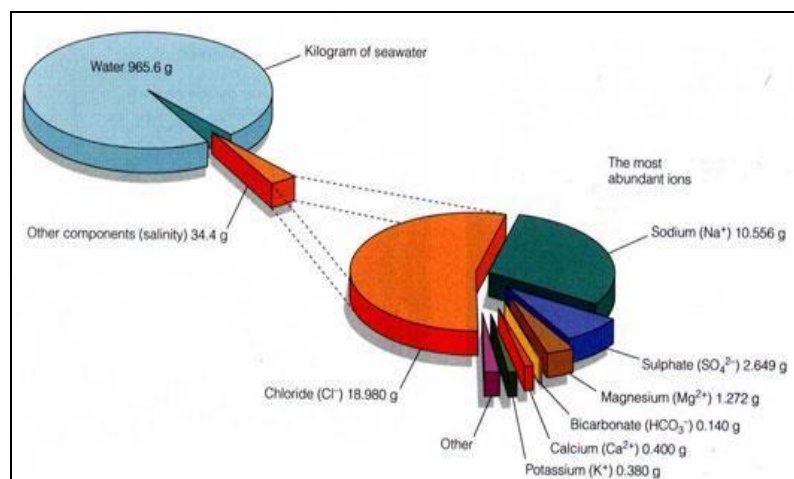


Figure 1: Principales compositions de l'eau de mer [4].

2.2 Salinité

L'eau de mer présente une grande concentration des sels dissous. Sa salinité varie à la surface du globe terrestre, en fonction de la latitude, de l'ouverture des mers vers les océans, de leurs dimensions, des apports terrestres, des courants... [5].

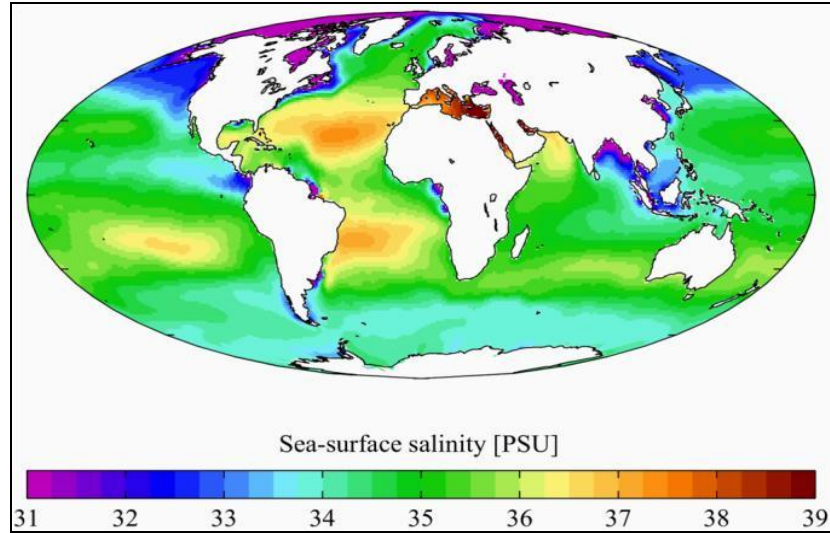


Figure 2 : Salinité moyenne de l'eau de mer exprimée en gramme de sel par kilogramme d'eau de mer [5].

2.3. Conductivité

L'eau de mer a une conductivité électrique élevée, à laquelle contribuent la polarité de l'eau et l'abondance des ions dissous.

Les sels dans l'eau se dissocient en ions. Un ion est un atome chargé positivement ou négativement et, par conséquent, échange des électrons avec le milieu. Ils peuvent absorber et libérer des électrons aux particules voisines. La conductivité varie principalement avec la température et la salinité (plus la salinité est élevée, plus la conductivité est élevée), et sa mesure permet, à température contrôlée, de connaître la salinité [6].

2.4. Les impacts de l'eau de mer

Les caractéristiques naturelles de l'eau de mer entraînent de nombreux obstacles dans l'exploitation des condenseurs, notamment :

- La prolifération des algues et des coquillages
- La corrosion des matériaux.
- L'entartrage.

3. Généralité sur le dessalement de l'eau de mer

Le dessalement de l'eau (également appelé dessalage ou désalinisation) est un processus qui permet d'obtenir de l'eau douce, à partir d'une eau saumâtre ou salée (eau de mer, notamment). En dépit du nom, il s'agit de retirer le sel de l'eau, mais plutôt, à l'inverse, d'extraire de l'eau douce. Les systèmes de dessalement se caractérisent par leur rendement et le taux de sel résiduel. Dans tous les cas, Le dessalement produit une saumure dont il faut se débarrasser, ce qui n'est pas un problème en bord de mer là où le courant est important, mais peut l'être à l'intérieur des terres, et dans certains écosystèmes comme les lagons, baies, lagunes [2].

➤ **Le prétraitement de l'eau de mer :**

Les niveaux de salinité, les concentrations en matières en suspension et en matières organiques dans les océans et les mers varient considérablement à travers le monde. Les procédés de prétraitement de l'eau de mer avant le dessalement visent à éliminer les particules en suspension et le plancton qui pourraient obstruer les équipements de dessalement [4].

Les méthodes de prétraitement de l'eau de mer comprennent :

- **La chloration** : Inhibe la croissance des organismes vivants, prévenant ainsi l'obstruction des conduites.
- **La filtration** : Garantit le bon fonctionnement des pompes et des pulvérisateurs en éliminant les impuretés.

3.1. Les principaux procédés de dessalement

Bien sûr, rien ne paraît plus facile que d'imiter la nature. Il suffit de distiller de l'eau de mer pour en extraire de l'eau douce, c'est à dire produire de la vapeur d'eau en faisant bouillir l'eau de mer et récupérer l'eau douce par condensation de la vapeur. Il est à noter qu'à cause de la présence de sel, l'eau salée bout à une température légèrement supérieure à l'eau pure. La différence de température d'ébullition entre l'eau salée et l'eau douce à une pression donnée est appelée écart ébullioscopique [4].

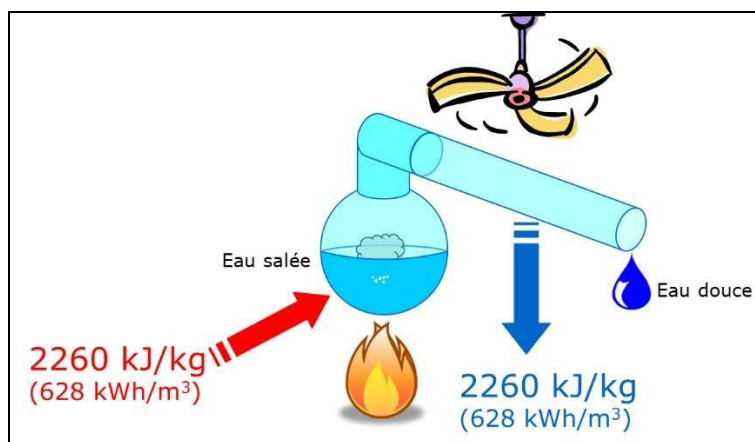


Figure 3 : Procédé de distillation [7].

3.2. Technique de dessalement

Les technologies actuelles de dessalement des eaux sont classées en deux catégories, selon le principe appliqué :

- a) Le procédé qui fait intervenir le changement de phase : « La distillation », qui est composé de deux types :
 - **Multi-stage-flash (MSF)**
 - **Multi-effect-distillation (MED)**
- b) Le procédé utilisant des membranes :
 - **l'électrolyse**
 - **l'osmose inverse (OI)**

Concernant les méthodes mentionnées précédemment, il est établi que la distillation et l'osmose inverse se distinguent par leur efficacité avérée dans le processus de dessalement de l'eau de mer.

En effet ces deux procédés sont les plus commercialisés dans le marché mondial du dessalement. Les autres techniques n'ont pas connu un essor dans le domaine à cause de problèmes liés généralement à la consommation d'énergie et/ou à l'importance des investissements qu'ils requièrent [8].

Quel que soit le procédé de sel et de l'eau envisagée, toutes les installations de dessalement comportent 04 étapes :

- Une prise de l'eau de mer avec une pompe et une filtration grossière.
- Un prétraitement avec une filtration plus fine, l'addition des composés biocides et de produit antitartre.
- Le procédé de dessalement lui-même.
- Le post-traitement avec une éventuelle minéralisation de l'eau produite.

A l'issue de ces 04 étapes, l'eau est rendue potable ou utilisable industriellement, elle doit contenir moins de 2 ppm de matière dissoute [8].

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

L'unité de dessalement de l'eau de mer est principalement composée d'un évaporateur à flash multiple (MSF), comprenant 12 cellules disposées en configuration à deux passes. Chaque passe comprend 6 cellules où se produit principalement le processus de flash, favorisé par le vide créé par la batterie d'éjecteurs installée sur la partie supérieure du dessaleur. De plus, l'unité comprend un condenseur intégré qui sert à préchauffer l'alimentation et à condenser l'eau distillée produite sur sa partie externe. Elle comprend également un réchauffeur de saumure destiné à atteindre le gradient de température souhaité pour l'alimentation [2].

L'unité comporte aussi un ensemble de pompe servant à véhiculer les différents liquides au sein de l'unité et des équipements auxiliaires qui sont destinés à l'injection des différents produits chimiques (l'anti-tarte et l'anti-mousse). On procède à la vaporisation en fournissant de l'énergie sous forme de chaleur. Et température varie entre 85°C et 95°C, et salinité de l'eau douce obtenue par ce procédé est inférieure à 100 mg/L [2].

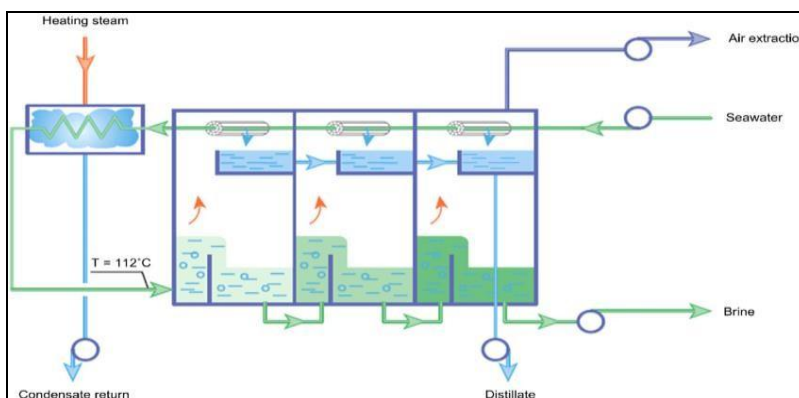


Figure 4. Multi-Stage Flash MSF à 3 étages [9].

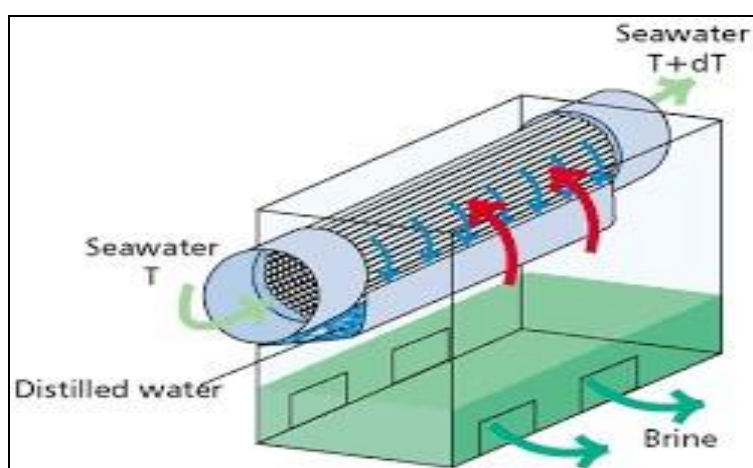


Figure 5: Schéma d'une cellule d'un système par détentes successives (MSF) [9].

L'unité comporte aussi un ensemble de pompe servant à véhiculer les différents liquides au sein de l'unité sans oublier les équipements auxiliaires qui sont destinés à l'injection des différents produit chimique (l'anti- tartre, l'anti- mousse ...) On procède à la vaporisation en fournissant de l'énergie sous forme de chaleur. Dans la distillation moderne, la température de travail varie entre 85°C et 95°C la salinité de l'eau douce obtenue par ce procédés et toujours inférieure à 100 mg/l. Cette eau lorsqu'elle est destinée à la consommation.

Par contre il y a un autre procédés dans on fait condenser dans un second évaporateur la vapeur produite par un premier évaporateur ; dans un second évaporateur on obtient alors une vapeur a pression plus faible, en suite on effectue la condensation [2].

3.2.2. Distillation à multiple-effet (MED)

Ce procédé est basé sur le principe de l'évaporation, sous pression réduite, d'une partie de l'eau de mer préchauffée à une température variant entre 70 et 80°C. L'évaporation de l'eau a lieu sur une surface d'échange, contrairement au cas du procédé précédent, où elle est assurée par détente au sein des étages successifs.

La chaleur transférée au travers de cette surface est apportée soit par une vapeur produite par une chaudière, soit par une eau chaude provenant d'un récupérateur de chaleur. La vapeur ainsi produite dans le 1er effet est condensée pour produire de l'eau douce dans le 2ème effet où règne une pression inférieure, ainsi la chaleur de condensation qu'elle cède permet d'évaporer une partie de l'eau de mer contenue dans le 2ème effet et ainsi de suite. Ainsi seule l'énergie nécessaire à l'évaporation dans le premier effet est d'origine externe. La multiplication du nombre d'effets permet donc de réduire la consommation spécifique (énergie/m³ d'eau douce produite) [2].

Plusieurs technologies d'évaporateurs multiples effets existent

- Les évaporateurs multiples effets à tubes horizontaux arrosés sont les appareils les plus utilisés actuellement. Dans ces appareils le fluide de chauffage s'écoule dans les tubes horizontaux tandis que l'eau de mer à évaporer est arrosée de façon à s'écouler sous forme de film le plus uniforme possible sur l'extérieur des tubes. La vapeur produite dans la calandre (enceinte cylindrique qui contient le faisceau de tubes) est ensuite envoyée dans les tubes de l'effet suivant où elle cédera son énergie de condensation. Ces évaporateurs présentent un très bon coefficient d'échange grâce à l'écoulement en film de l'eau de mer. C'est la raison pour laquelle ils remplacent actuellement les plus anciens évaporateurs à faisceau de tubes noyés dans lesquels les tubes étaient plongés dans l'eau de mer. Un système compact à bases de plaques Easy MED constitué de cellules élémentaires comprenant une zone d'évaporation et une zone de condensation breveté en 1998.

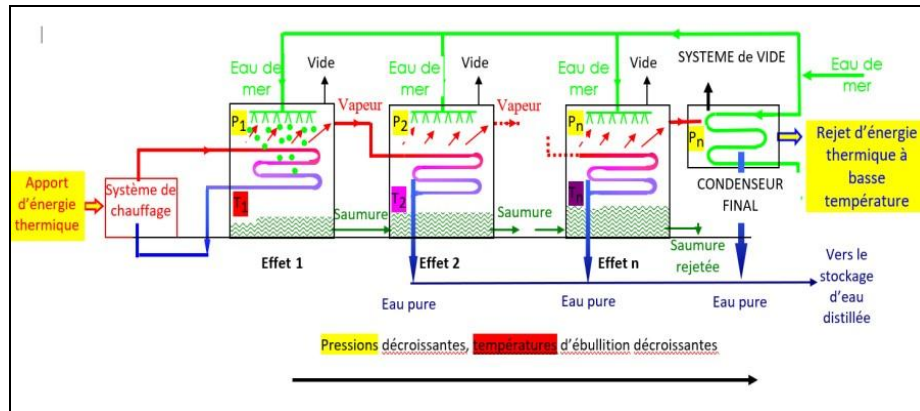


Figure 6: Schéma d'un système d'évaporateurs multiples effets (MED) [2].

Des évaporateurs multiples effets à plaques sont également en cours de développement. L'eau de mer à évaporer s'écoule alors sous forme de film mince le long d'une mince plaque métallique chauffée par la vapeur provenant de l'effet précédent qui s'écoule le long de l'autre face de la plaque métallique. De nombreuses plaques entre lesquelles s'écoulent alternativement l'eau de mer et la vapeur de chauffage sont associées en parallèle pour constituer un effet. La vapeur produite est recueillie dans une calandre cylindrique dans laquelle sont placées les plaques. Cette vapeur est ensuite envoyée entre les plaques situées dans une calandre qui constitue le deuxième effet et ainsi de suite. Également en cours de développement. L'agencement judicieux de cellules élémentaires pour que chaque zone d'évaporation se situe entre deux zones de condensation de l'effet précédent permet d'obtenir un appareil plus compact puisqu'il ne nécessite pas une volumineuse calandre pour chaque effet.

L'énergie requise est principalement l'énergie thermique à fournir à la chaudière produisant le fluide de chauffage pour le premier effet. On peut cependant utiliser des chaleurs résiduelles en couplant le procédé MED à des usines de production d'électricité ou des usines rejetant produisant les eaux résiduelles à des températures de l'ordre de 80 °C. Il faut également de l'énergie électrique pour les pompes de circulation et la production de vide. Afin de limiter la consommation d'énergie thermique, il est aussi possible d'utiliser la compression mécanique de vapeur. Ceci est possible dans le cas de l'évaporation simple ou multiple effet. La vapeur produite dans le dernier effet ou dans l'effet unique (pour de petites unités) est aspirée par un compresseur. Après compression, la température de saturation de la vapeur haute pression est

augmentée. Cette vapeur peut donc être utilisée (elle est envoyée dans les tubes du faisceau tubulaire) pour porter à ébullition l'eau de mer dans l'évaporateur où règne une pression plus faible. La vapeur haute pression est ainsi condensée et se transforme en eau distillée liquide et le cycle se reproduit avec la vapeur produite par l'évaporation partielle de l'eau de mer [2].

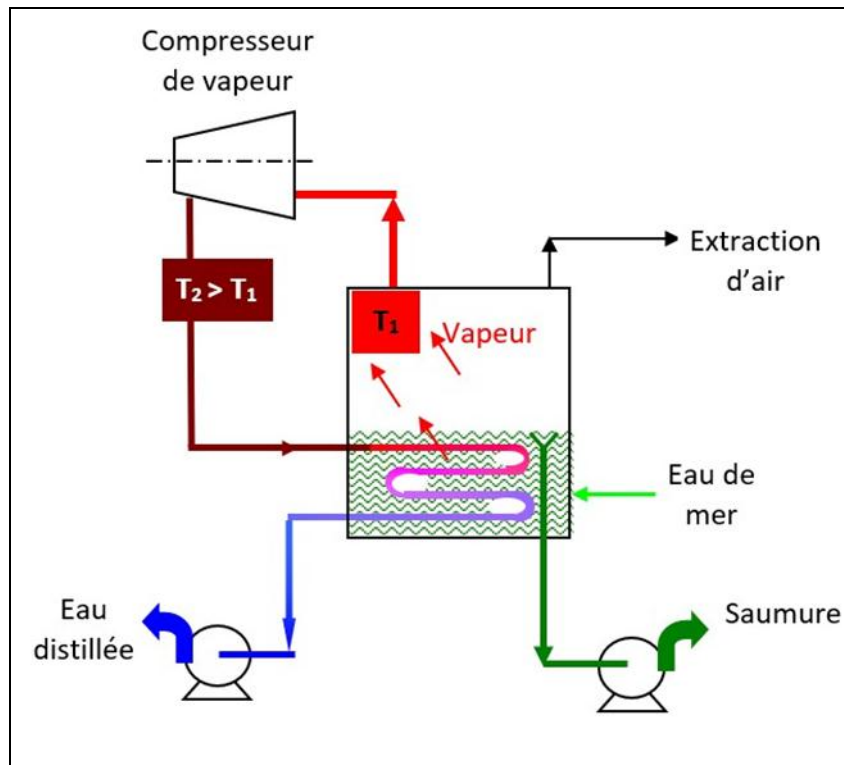


Figure 7: Schéma d'une unité d'évaporation simple-effet avec compression de vapeur [2].

3.2.3. Procédé membranaire

Les principaux procédés à membranes utilisés dans le domaine du dessalement sont : l'électrodialyse et l'osmose inverse.

- **L'électrodialyse (ED) :**

L'électrodialyse est un procédé qui utilise la mobilité des ions d'un électrolyte soumis à un champ électrique, le dessalement étant assuré par des membranes qui éliminent sélectivement sels, ce qui permet d'obtenir de l'eau douce. L'électrodialyse fonctionne sur le principe du rejet d'ions grâce à leur charge. Les techniques de l'électrodialyse sont : la dialyse et l'électro – d'ionisation.

On distingue trois types d'électrodialyse :

- L'électrodialyse dite conventionnelle (ED)
- L'électrodialyse à membrane bipolaire (EDMB)
- L'électrolyse à membranes (EM)

Le point commun de ces techniques est la mise en œuvre de membranes échangeuses d'ions permettant de transférer des ions de façon sélective sous l'effet d'un champ électrique [2].

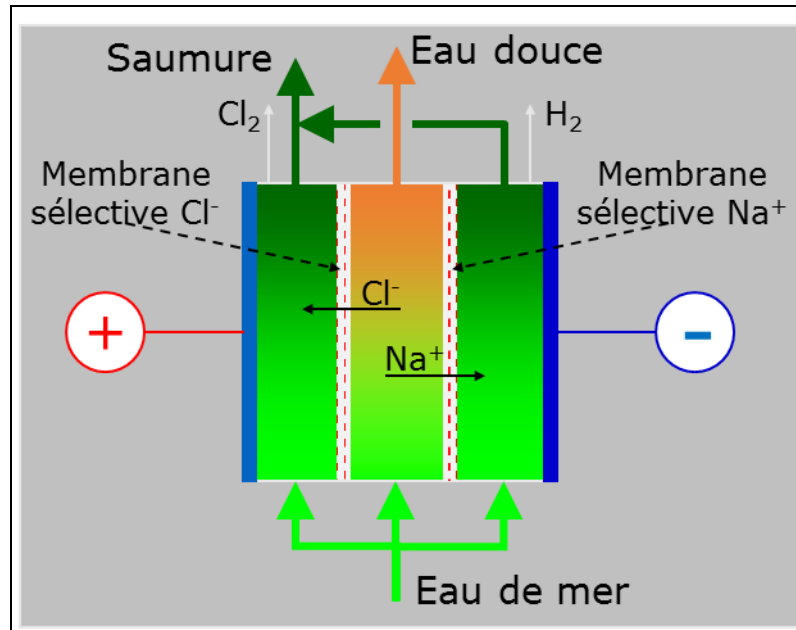


Figure 8: Principe de l'électrolyse [7].

- **L'osmose inverse « OI »**

L'osmose un phénomène qui tend à équilibrer la concentration en soluté de part et d'autres d'une membrane semi-perméable. C'est un phénomène naturel, notamment à travers les membranes cellulaires.

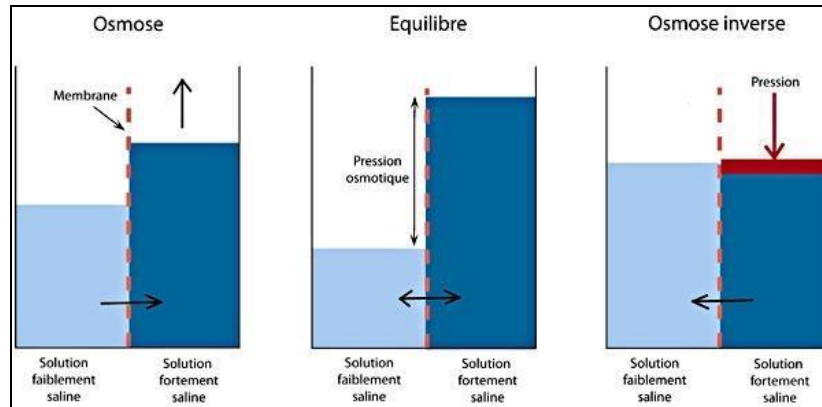


Figure 9: Principe de l'osmose et de l'osmose inverse [10].

L'osmose inverse utilise des membranes denses qui laissent passer l'eau et arrêtent tous les sels. Cette technique est utilisée pour :

- Le dessalement des eaux de mer
- Le dessalement des eaux saumâtres
- La production d'eau ultra pure
- La production d'eau de process.

➤ Principe de l'osmose inverse

Le procédé OI (Osmose inverse) consiste à séparer les substances dissoutes d'une solution salée pressurisée en la faisant diffuser à travers une membrane. A mesure qu'une quantité de l'eau diffuse à travers la membrane, la concentration en sels de la fraction restante augmente. Dans le même temps, une partie de l'eau d'alimentation est rejetée sans diffuser à travers la membrane

3.3. Avantages et inconvénients du dessalement de l'eau de mer

La disponibilité de l'eau de mer, ressource inépuisable, permet de répondre aux besoins en eau potable dans les zones côtières où la population et l'industrie sont grandes consommatrices d'eau. La proximité de la ressource énergétique ou sa production combinée peuvent également rendre le dessalement de l'eau de mer économiquement viable [7].

Le dessalement de l'eau de mer, malgré ses avantages en termes de réponse aux besoins en eau, présente également des inconvénients :

1. **Consommation énergétique élevée** : Le processus de dessalement, qu'il soit basé sur la distillation thermique ou l'osmose inverse, nécessite une quantité significative d'énergie, ce qui peut entraîner des coûts élevés et des impacts environnementaux liés à la production d'électricité.
2. **Production de saumure** : Le dessalement génère de la saumure concentrée, un sousproduit contenant des sels et des produits chimiques rejetés dans l'environnement marin, ce qui peut avoir des effets néfastes sur les écosystèmes marins.
3. **Coût financier** : Les installations de dessalement nécessitent des investissements importants en infrastructure et en maintenance, ce qui peut rendre le coût de l'eau produite plus élevé que d'autres sources d'eau.
4. **Impact environnemental** : Outre la production de saumure, le dessalement peut avoir d'autres impacts sur l'environnement, tels que la consommation d'énergie fossile, les émissions de gaz à effet de serre et la perturbation des écosystèmes marins.
5. **Dépendance à l'énergie** : Le dessalement est fortement dépendant de l'énergie pour fonctionner, ce qui peut poser des défis en termes de durabilité et d'empreinte carbone, en particulier dans les régions où l'énergie est coûteuse ou non renouvelable [7].

Chapitre II

Description de la zone d'étude

1. Introduction

Les installations de GNL sont d'importants utilisateurs de vapeur, à la fois comme source d'énergie pour le chauffage et pour alimenter les machines en mouvement. Au cours des cinq dernières décennies, le dessalement a connu une expansion significative. Tant sur le plan économique que technique, sa viabilité est bien établie, permettant la production d'une grande quantité d'eau de haute qualité. À l'échelle mondiale, plus de 9500 unités produisent 11,8 milliards de mètres cubes d'eau par ans, représentant 0,3% de la consommation mondiale en eau [11].

L'eau distillée ou dessalée est principalement utilisée dans les complexes de GNL pour générer de la vapeur ou servir de réfrigérant dans les échangeurs et les condenseurs situés dans la zone utilités. Son utilisation principale est l'affectation aux chaudières. Chaque unité est conçue pour fonctionner séparément ou en parallèle avec les autres unités, et une interconnexion avec le complexe GL1/Z permet de s'approvisionner en eau distillée en cas de besoin.



Figure 10 : Usine de liquéfaction de gaz naturel [12].

2. Présentation du Complexe GL1/Z

2.1. Historique du Complexe

Le complexe GL1/Z est l'un des plus importants complexes industriels de transformation des hydrocarbures en Algérie, exploité par la société SONATRACH.

Il a démarré en 1977 et sa capacité de production est de 17.6 million de m³/ans de gaz naturel liquéfié. Le gaz naturel est acheminé de Hassi R'mel par gazoduc, à travers 5 installations de compression de 42 pouces de diamètre et sur distance de 500KM, sous une pression de 45 à 46 bars et une température ambiante jusqu'au complexe GL1/Z, où il doit subir les différents traitements conduisant à sa liquéfaction [13].

2.2. Description et mission du Complexe

Le complexe GL1/Z parmi les plus importantes réalisations industrielles de la SONATRACH. Le complexe a été conçu dans le but de liquéfier le gaz naturel provenant de HASSI R'MEL réduisant de 600 fois son volume. Ceci en vue de faciliter son stockage, transport et commercialisation vers l'étranger dans des navires appelés « méthaniers » [13].

2.3. Les différentes Zones du Complexe GL1/Z

Le complexe GL1/Z comprend Trois (03) zones essentielles :

- Zone d'utilité.
- Zone de process.
- Zone du stockage.

2.3.1. Zone d'utilité

Cette zone assure de manière ininterrompue la fourniture de toutes les ressources essentielles pour l'initialisation et le bon fonctionnement des trains de liquéfaction, incluant la production d'électricité, d'eau distillée et le circuit d'eau de mer.

Au niveau de cette zone on trouve :

- Les unités de production de la vapeur
- Les unités de dessalements

- Turbo générateur pour la production de l'électricité [10].

A/ La source d'énergie :

La vapeur d'eau est la source d'énergie choisie pour le complexe.

- 06 chaudières (04 MH et 02 IHI) de 400 tonnes/heure Chacune à 62 Bars et 442°C [13].

B/ La source de refroidissement :

L'eau est la source de refroidissement véhiculée par un ensemble de six (06) pompes de grande puissance de 175000 m³/h pour chacune [13].

C/ La production d'électricité :

La production d'électricité est assurée par trois turbos générateurs (TG) de puissance de 18 MW chacune. Les besoins du complexe sont de l'ordre de 36 MW, en plus de la production des TG, il y a une source complémentaire (réseau SONELGAZ) et une autre de GL2/Z pour une éventuelle compensation de l'énergie en cas de nécessité [13].

D/ Circuit d'eau de mer :

L'eau de mer est utilisée dans les différentes unités du Complexe comme source chaude des cycles frigorifiques et comme source froide des cycles de vapeur et par ailleurs l'eau de mer sert aussi pour la production d'eau dessalée.

L'eau de mer est pompée à partir du grand bassin par six pompes de repère avec deux boites de distributions l'une servant à alimenter les trains 100/200/300 et l'autre pour les trains de production 400/500/600 [13].

E/ Unité de dessalement :

L'eau dessalée est produite au moyen du dessalement d'eau de mer. Cette aire comprend six unités de dessalement, fonctionnant en parallèle et produisant 45 m³/h d'eau dessalée chacun. Par ailleurs, le complexe GL1/Z s'est doté récemment d'un nouveau type de dessaleur, suivant le procédé d'ejecto-compresseur. Cette eau sert à alimenter les chaudières pour la production de

vapeur, entre autre cette eau dessalée est utilisée aussi comme fluide de refroidissement pour certain équipement mécanique tel que les pompe [14].

2.3.2. Zone de process

Le complexe GL1/Z a pour mission de traiter le gaz transporté par gazoduc en provenance des champs gaziers de Hassi R'mel en gaz naturel liquéfié (GNL) avec possibilité d'extraction du propane, du butane et de la gazoline, ce gaz est ensuite transporté dans les méthaniers à destination de l'étranger [15]. Le complexe GL1/Z comprend six (06) trains de liquéfaction identiques d'une production en parallèle. Chaque train de liquéfaction est composé de huit (08) sections :

1. La section de décarbonatation (élimination du CO₂) :

Le gaz d'alimentation à son entrée dans le train passe par un ballon séparateur où tous les hydrocarbures lourds en suspension sont récupérés et éliminés, et sous une pression de 40 bars et une température de 38°C le GN circule dans une colonne à 27 plateaux vers le haut en contre-courant avec la solution du mono-éthanol-amine (MEA) solution aqueuse à 15%, pour être débarrasser du 2 à une teneur inférieure à 90 ppm en tête de colonne, il sera acheminé ensuite vers la section de déshydratation [16].

Cette section comporte deux étapes importantes à savoir :

- L'absorption.
- La régénération.

2. La section déshydratation de (élimination du H₂O) :

Cette section consiste à l'élimination de l'eau contenue dans le gaz naturel. Pour cela, il est fait usage de deux sécheurs à tamis moléculaires. Le gaz naturel entre dans l'échangeur où il se refroidit au propane, puis il se dirige vers le ballon séparateur « A » et à la sortie du sécheur il existe des filtres servant à la récupération des particules solides [16].

3. La section de démercurisation (élimination du mercure « Hg ») :

La démercurisation est une opération importante dans le traitement du gaz naturel, Cette installation consiste à piéger le mercure (Hg) contenu dans le gaz et cela pour éviter que le

mercure attaque particulièrement les équipements en aluminium (Al) comme le cas de l'échangeur principal de la section de liquéfaction. Le gaz sortant de cette section ne doit pas dépasser une concentration de 7 nano grammes de mercure [16].

4. Section pré-refroidissement :

Avant d'introduire le gaz naturel dans la section de séparation de la tour de lavage, il subit un pré-refroidissement pour que sa température soit portée à (-34°C) dans les deux échangeurs. Ces équipements sont des échangeurs classiques sauf que leur isolation thermique compte énormément afin d'éviter les pertes frigorifiques. Le pré- refroidissement s'effectue à l'aide du propane comprimé à partir d'un turbocompresseur [16].

5. La section séparation et tour de lavage (phase lourde/phase légère) :

La séparation est une étape importante dans le cycle de liquéfaction du gaz naturel, l'après pré-refroidissement, le gaz est acheminé dans une tour de séparation. A ce stade la séparation est une distillation classique qui sépare le produit en deux phases bien distinctes : produits lourds et produits légers.

Le gaz entre dans la tour de lavage au niveau du 9^{ème} plateau où il aura une séparation entre phase légère et phase lourde par le reflux [16].

➤ Déméthanisation :

Les composés légers méthane en majorité sont séparés des hydrocarbures lourds et passent dans la colonne à contre-courant par rapport à un débit de reflux continu cascasant le long des plateaux du déméthaniseur. Les vapeurs de tête sont partiellement condensées dans un condenseur sous l'effet de réfrigérant puis séparées dans le ballon de reflux. Les vapeurs non condensées fournissent une source d'appoint en méthane alternative au système de compression de MCR (multi composant réfrigérant) [16].

➤ Déméthanisation :

Le débit d'hydrocarbure lourd venant de la colonne de déméthanisation est à son tour fractionné dans le déméthaniser afin de produire essentiellement de l'éthane comme produit de tête. L'éthane obtenu sert d'appoint réfrigérant (MCR) [16].

➤ **Dépropanisation :**

La colonne de dépropanisation est alimentée par un courant continu d'hydrocarbure venant de la colonne d'éthanisation. Cette section a pour but de produire du propane pour les appoints PCS et un appoint pour le circuit de réfrigération de propane [16].

➤ **Débutanisation :**

Les fractions lourdes de la colonne de dépropanisation constituent une alimentation pour la dernière colonne de distillation de la section de fractionnement. Le produit débutanisé du fond est refroidit puis envoyé vers le stockage dans la sphère de gazoline [16].

6. La section de liquéfaction :

Le gaz naturel issu du laveur est alors prêt à être liquéfié à une température permettant son transport dans un méthanier à une pression proche de la pression atmosphérique.

Le gaz est envoyé à l'échangeur de chaleur principal, où il circule vers le haut à travers un faisceau de serpentins tubulaires. Le gaz naturel est refroidi et liquéfié à (-148 °C) et 25 bar, et s'écoule vers le bas du côté calandre de l'échangeur à travers le réfrigérant mélangé [17].

Le gaz naturel liquéfié est détendu à travers une vanne puis envoyé dans un vase d'expansion d'azote avec une pression effective de 0,3 bar. Une partie du GNL forme une vapeur expansée composée d'azote et de méthane, la température chute donc à (-161 °C) [11].

Le gaz naturel liquéfié est envoyé au réservoir de stockage par la pompe à GNL. La vapeur détendue du vase d'expansion d'azote est utilisée comme réfrigérant. Il traverse l'échangeur de gaz d'échappement et liquéfie un petit échantillon du flux de gaz naturel provenant du laveur. La vapeur chauffée est envoyée à un compresseur de gaz pour être utilisée comme gaz combustible. Le débit réduit du flux de gaz liquéfié est détendu dans un vase d'expansion d'azote [17].

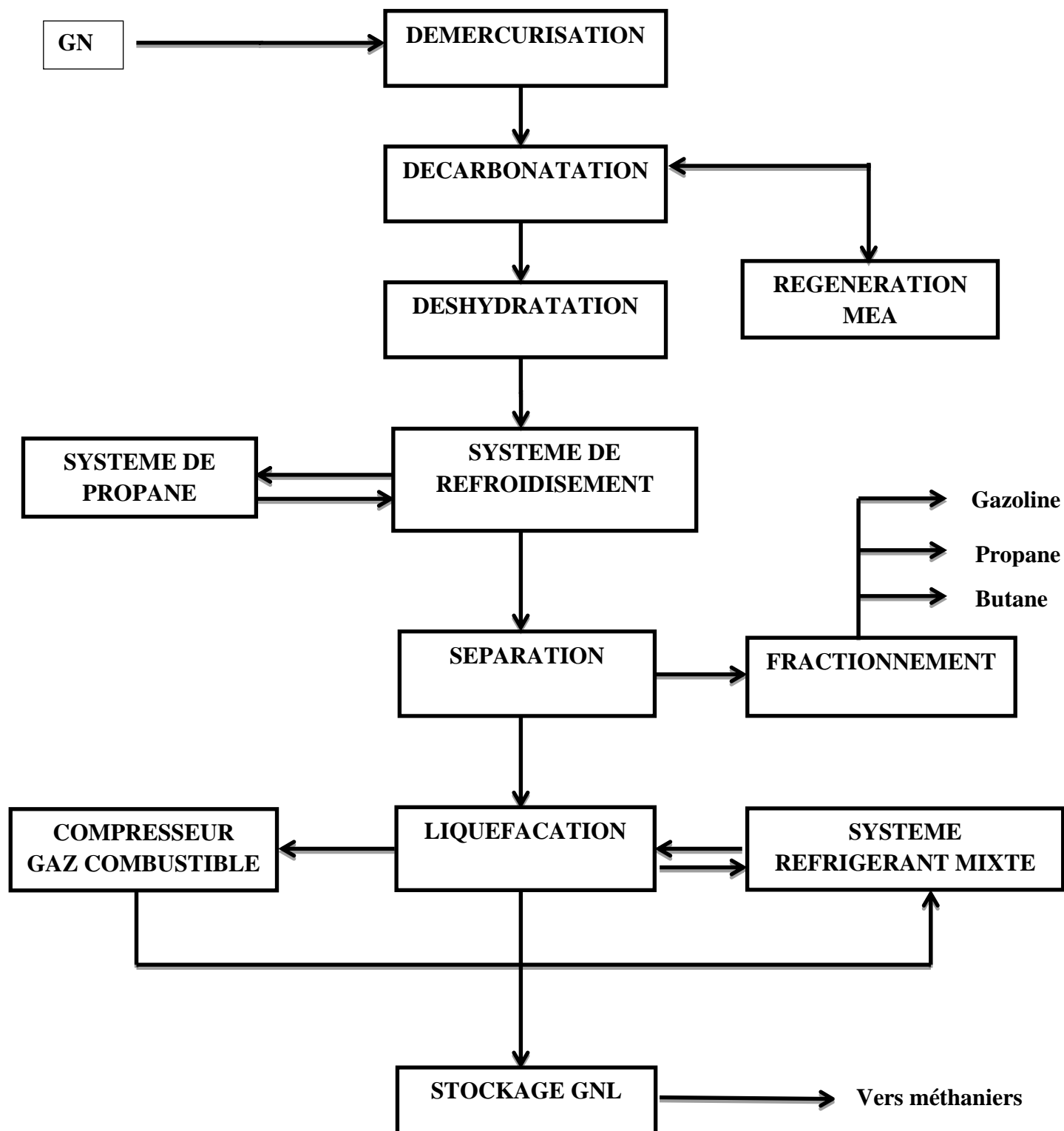


Figure 11: Schéma descriptif du procédé

2.3.3. Zone de pompage

Cette zone contient une station de pompage de GNL d'une capacité de 10000 m³/h et deux quais d'expédition avec dix bras de chargement pour méthaniers de 50000 m³ à 125000 m³ [12].

2.3.4. Zone de stockage

Cette zone comprend trois bacs de GNL qui assurent le stockage de la totalité de la production de GNL des six trains. Les bacs de stockage à double paroi métallique d'une capacité unitaire de 100 000 m³ permettent de stocker le GNL à une pression légèrement supérieure à la pression atmosphérique et à une température de (-162°C). Lors du remplissage des réservoirs, une certaine quantité du produit se vaporise [17].

Tableau 1: Composition molaire du GNL [17].

<i>Gaz</i>	<i>Minimum (X%)</i>	<i>Maximum (X%)</i>
<i>N₂</i>	0.60	1.40
<i>CH₄</i>	84.00	92.50
<i>C₂H₆</i>	6.0	8.50
<i>C₃H₈</i>	2.20	3.0
<i>iC₄H₁₀</i>	0.30	0.50
<i>nC₄H₁₀</i>	0.30	0.7
<i>iC₅H₁₂</i>	0.00	0.02

Tableau 2: Condition de stockage du GNL [17].

<i>Caractéristiques</i>	<i>Valeurs</i>
Masse moléculaire (g/mole)	18,2
Pression (bar)	1,03
Température (°C)	-162

3. Dessalement au niveau de complexe GL1/Z

Les complexes de GNL, tels que le GL1/Z, sont de grands consommateurs de vapeur, qui est utilisée comme source d'énergie de chauffage et comme force motrice pour les machines tournantes au sein du complexe. Le système de dessalement d'eau de mer et d'eau distillée est situé dans la zone des services utilisés du complexe, où l'eau distillée est produite pour répondre aux besoins en eau de processus.

L'eau distillée est principalement utilisée pour alimenter les chaudières et les appoints au sein du complexe. Le dessalement de l'eau de mer est un processus crucial pour garantir un approvisionnement adéquat en eau distillée pour les activités du complexe.

Il existe six (6) unités de dessalement au niveau du complexe GL1/Z, chacune ayant une capacité de production spécifique. Ces unités fonctionnent ensemble pour répondre aux besoins en eau distillée du complexe, contribuant ainsi au bon fonctionnement et à la durabilité de cette installation industrielle en Algérie.

- Cinq (05) dessaleurs 052-R-601/602/603/606/607 de type MSF.
- Un (01) 052-R-605 de type éjecto-compresseur.

3.1. Les ajouts chimiques dans une station de dessalement

3.1.1. Agents antitartres

Les dépôts de tartre sont un problème majeur dans les installations de dessalement, car ils entraînent des difficultés d'exploitation et une perte de rendement.

L'anti-tartre de type (poly phosphates) est efficace pour prévenir la formation de tartre tenace et incrustant sur les surfaces d'échange de chaleur, notamment sur les tubes, dans les installations où la température maximale de la saumure avoisine les 95°C. En contrôlant le dépôt de carbonate de calcium (CaCO_3) par injection de cet agent antitartre, il permet de travailler à des températures supérieures à 50°C. En maintenant une concentration d'antitartre entre 2 ppm et 5 ppm, ces installations fonctionnent avec un minimum de dépôts, assurant une meilleure transmission de chaleur et un rendement optimal.

3.1.2. Agents anti mousses

La formation de mousse dans les systèmes de dessalement peut être causée par la présence d'organismes microscopiques dans l'eau de mer, et cette formation de mousse varie en fonction de la température de l'eau. Pour éviter ce problème de moussage, l'injection d'un agent anti-mousse comme le **NALCO 131S** est une solution. Une fois absorbé à la surface de l'eau, cet agent provoque la formation de bulles plus volumineuses, plus fragiles et moins nombreuses. Cela favorise l'éclatement de ces bulles et réduit ainsi la formation de mousse indésirable dans l'évaporateur.

3.2. Description générale d'une unité de dessalement MSF

L'unité de dessalement équipée de cinq unités évaporateurs d'eau de mer de type MSF est principalement constituée des éléments suivants :

- Evaporateur à flashes multiples de 12 cellules allongées dans une configuration à deux passes, avec chaque passe comprenant 06 cellules pour la détente de l'eau de mer d'une cellule à l'autre jusqu'à la 12ème.
- Un condenseur en forme de U incorporé servant au préchauffage de l'eau de mer d'un côté et à la condensation de la vapeur produite de l'autre côté.
- Un réchauffeur de saumure à deux passes pour atteindre la température d'eau de mer désirée.
- Une pompe Booster (surpression) pour alimenter l'unité en eau de mer.
- Une pompe de saumure pour évacuer vers le canal de rejet.
- Une pompe de produit (eau distillée) pour refouler vers le stockage ou l'égout.
- Une pompe de condensats pour refouler vers le stockage ou l'égout.
- Un filtre autonettoyant avec un by-pass à l'entrée de l'eau de mer.
- Deux pompes doseuses d'antitartre montées sur un réservoir.
- Deux pompes doseuses d'anti mousse montées sur un réservoir.

Le système de vide comprenant :

03 Condenseurs barométriques pour les dessalements A/B/C

02 Condenseurs barométriques pour les dessalements E/F

04 Ejecteurs de maintien et 01 éjecteur de démarrage pour A/B/C/E/F

02 réservoirs de produits chimiques pour chaque unité.

3.2.1. Description le principe de fonctionnement

Pour traiter l'eau de mer provenant du collecteur d'utilité, qui a une pression de 1.6 à 1.8 bar, il est nécessaire de la soumettre à un traitement physique par filtration et chimique par chloration au niveau de la pomperie d'eau de mer pour éliminer les matières en suspension, telles que les algues et les moules.

L'eau de mer est aspirée par la pompe booster et admise après filtration vers les tubes de condenseur de 12 étages. Elle traverse ces étapes successives pour assurer un préchauffage côté tube ou les vapeurs cèdent leurs calories côté calandre. Ensuite, l'eau est dirigée vers le réchauffeur de saumure pour recevoir l'énergie calorifique nécessaire pour la production d'eau distillée. L'eau chauffée passe dans le premier étage jusqu'au dernier étage, ce qui permet à une partie de l'eau de mer de s'évaporer et de former une vapeur qui est entraînée par le système de vide vers le condenseur où elle est condensée en distillat [18].

Les gouttelettes de saumure entraînées par la vapeur sont éliminées par un traitement chimique ou l'injection d'agent anti-mousse qui rend la bulle d'air plus volumineuse, ce qui permet d'éclater la bulle d'air d'une part et d'autre part un traitement physique par un séparateur d'humidité (Demister) pour extraire les gouttelettes d'eau contenues dans la vapeur produite.

A la sortie des 12 étages, l'eau non évaporée (saumure) doit être évacuée vers le canal de rejet. L'eau distillée produite est transférée vers le bac de stockage. Pour garantir un fonctionnement à long terme de l'unité, il est important de veiller à la bonne injection d'anti-tartre [19].

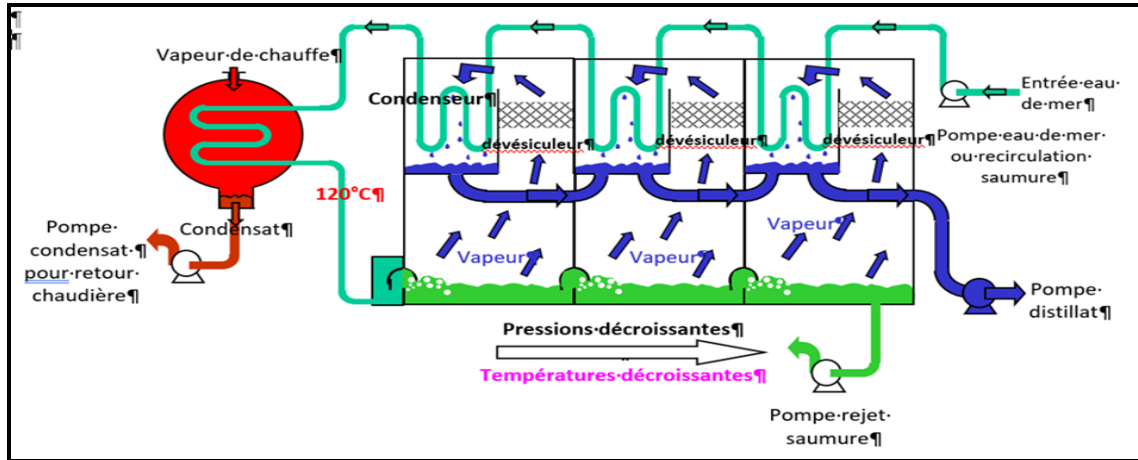


Figure 12: Principe de fonctionnement d'un système par détentes successives (MSF) à 3 étages [20].

3.3. Description du procédé EJECTOCOMPRESSEUR utilisé

Ce procédé est basé sur le principe de l'évaporation, sous pression réduite, d'une partie de l'eau de mer préchauffée à une température variant entre 70 et 80°C. L'évaporation de l'eau a lieu sur une surface d'échange, contrairement au cas du procédé précédent, où elle est assurée par détente au sein des étages successifs.

Le procédé MED est similaire au procédé MSF (Multi-Stage Flash) dans le sens où l'eau de mer est introduite de manière successive dans des cellules à pression décroissante, permettant ainsi d'abaisser la température nécessaire pour porter l'eau à ébullition à chaque étape.

L'installation MED est composée de deux enceintes, appelées effets, fonctionnant à des pressions et températures décroissantes. La vapeur d'eau est introduite dans la première cellule où elle se condense, libérant de l'énergie qui permet de vaporiser l'eau de mer. Cette vapeur est ensuite dirigée vers la seconde cellule où elle se condense à nouveau, vaporisant l'eau de mer à son tour.

Une partie de la vapeur produite dans la deuxième cellule est condensée dans un condenseur distillateur et préchauffage l'eau de mer, tandis que l'autre partie est aspirée par un éjecteur-compresseur qui la mélange avec de la vapeur motrice pour la comprimer à une température permettant de faire fonctionner la première cellule [21].

3.3.1. Les avantages du procédé EJECTOCOMPRESSEUR

Le procédé multiple effet avec ejecto-compresseur offre divers avantages, notamment :

- Température de fonctionnement basse (inférieure à 65°C) pour limiter l'entartrage et la corrosion.
- Faible consommation d'énergie.
- Production d'eau d'une grande pureté.
- Absence de traitements coûteux de l'eau de mer.
- Conception compacte facilitant le montage sur charpente métallique et réduisant les travaux d'installation.

3.3.2. Schéma de principe

- L'eau de mer provient de la pomperie sera aspirer par une pompe booster et refouler vers le condenseur distillateur passant par un premier système de filtration menue d'un filtre autant nettoyant plus un filtre manuel comme by passe en cas de dysfonctionnement.
- Un condenseur distillateur pour préchauffage de l'eau de mer d'une part et condensation de la vapeur produite de deuxième cellule d'autre part.
- L'eau de mer véhiculer vers les deux cellules sera traité par une injection permanent de produits chimiques (PO_4 , NALCO131S) et filtrer dans un deuxième stade filtration.
- L'évaporateur est composé de deux cellules fonctionnant à des températures et pressions décroissantes. La vapeur d'eau à 70°C et 0,31 bar abs est introduite dans la première cellule, où elle se condense sur un faisceau tubulaire arrosé extérieurement par de l'eau brute. La chaleur latente de condensation permet d'évaporer une partie de cette eau brute à 61,8°C et 0,22 bar abs.
- Cette vapeur produite passe alors dans la deuxième cellule où elle se condense à son tour, vaporisant une partie de l'eau d'arrosage à 55,3°C et 0,16 bar abs. Une partie de cette vapeur de la deuxième cellule est aspirée par l'ejecto-compresseur pour alimenter la première cellule.
- Le reste de la vapeur de la deuxième cellule est condensé dans un condenseur distillateur refroidi par l'eau brute. L'eau condensée dans les deux cellules et le condenseur est récupérée pour produire l'eau distillée.

- L'eau condensée provenant de la cellule 1 et du condenseur distillateur est acheminée vers la cellule 2 à travers un tube en U. Dans cette cellule, elle est extraite par la pompe d'eau distillée. De même, l'eau brute non évaporée de la cellule 1 est transférée vers la cellule 2 par un tube en U pour être extraite par la pompe de saumure.
- Le thermo compresseur, alimenté par la vapeur motrice provenant de la zone des utilités à 10,3 barg, aspire la vapeur de la cellule 2 et la comprime par mélange jusqu'à une pression plus élevée (0,32 bar abs) nécessaire pour l'introduire dans la cellule 1.
- Pendant la phase de démarrage, un éjecteur de démarrage à vapeur aspire l'air présent à l'intérieur de l'évaporateur pour créer le vide initial. Ensuite, le vide est maintenu à l'aide d'une batterie de deux éjecteurs d'entretien.
- L'eau de mer d'appoint introduite dans chaque cellule contient des gaz incondensables qui se dégagent avec la vapeur d'eau. Ces gaz incondensables se regroupent au point froid de chaque faisceau, rejoignant ensuite la vapeur produite dans la cellule suivante à travers des orifices prévus à cet effet. Ces gaz incondensables passent de cellule en cellule, se regroupant finalement au point froid du condenseur.
- Les gaz incondensables (CO_2 , O_2 , N_2) qui se dégagent de l'eau de mer dans les cellules sont aspirés par un éjecteur d'entretien fonctionnant à la vapeur [22].
- Le mélange de gaz incondensables et de vapeur d'eau en sortie de l'éjecteur est envoyé dans un condenseur refroidi par l'eau de mer d'appoint. La vapeur d'eau s'y condense, tandis que les gaz incondensables sont rejetés dans l'atmosphère [22].
- Les condensats provenant du condenseur de buées et du condenseur de l'éjecteur sont renvoyés vers l'eau distillée produite par le faisceau de la première cellule [22]

4. Les différents circuits de dessalement

4.1. Circuit eau de mer

Le circuit eau de mer comprend essentiellement :

- **Une pompe booster** : alimentée à partir du collecteur eau de mer a les caractéristiques principales suivantes :

- Débit maxi 280 t/h.
 - Vitesse de rotation 1470 tr/mn.
 - Puissance absorbée maxi 27,7 KW.
 - La pompe refoule dans un collecteur qui alimente l'unité de dessalement [23].
 - Le collecteur est équipé d'un système de filtration comprenant 2 filtres (un filtre à nettoyage automatique et un filtre à panier) ayant une finesse de filtration de 1 mm [23].
- **Circuit d'unité :**
 - Une tuyauterie relie le collecteur eau de mer à l'entrée du condenseur distillateur.
 - A la sortie du condenseur distillateur la ligne eau de mer se divise en deux :
 1. Une ligne de rejet d'eau de mer équipée d'une vanne de contrôle pneumatique (TV 040401).
 2. Une ligne d'appoint d'eau de mer comprenant :
 - Un système de filtration avec deux filtres (un filtre à nettoyage automatique et un filtre à panier) ayant une finesse de filtration de 0,5mm.
 - Les condenseurs d'éjecteurs.
 - Des lignes d'appoint vers chaque cellule, équipées chacune d'une vanne de contrôle de débit (FV-04080DA & FV-04080DB).
 - Les lignes d'appoint alimentent des buses de pulvérisation qui arrosent les faisceaux de chaque cellule [23].

4.2. Circuit eau saumâtre

Le circuit d'extraction de saumure comprend principalement les éléments suivants :

- Une pompe centrifuge saumure (052-R-605-J5) avec un débit nominal de 105 t/h, un débit maximal de 125 t/h, une vitesse de 1500 tr/mn et une puissance absorbée maximale de 15,3 KW.
- Un circuit d'aspiration comprenant :
 - Une vanne d'isolement à l'aspiration de la cellule 4 (04074V1).

- Une vanne d'isolement (05070V1) pour se connecter au réseau d'eau de service de rinçage.
- Un circuit de refoulement comprenant :
 - Un clapet anti-retour (04075V1).
 - Une vanne de contrôle de niveau (LV 04094).
 - Une vanne d'isolement (04076V1) pour se connecter au circuit d'appoint (recirculation pour rinçage et lessivage acide) [23].

4.3. Circuit eau Distillée

Le circuit eau distillé comprend principalement :

- Une pompe centrifuge eau distillée (052- R- 605 - J4) avec les caractéristiques suivantes :
 - Débit nominal : 55.5 t/h maxi : 60 t/h
 - Vitesse de rotation : 1500 tr/mn.
 - Puissance absorbée : 17,2 KW (au débit maxi).
 - Un refroidisseur d'eau distillée (échangeur à plaques refroidi par l'eau de mer) avec vannes d'isolement et un by-pass [22].

4.4. Circuit vapeur

Venant du réseau de vapeur MP, une ligne vapeur alimente l'unité, cette tuyauterie alimente :

- L'éjecteur de démarrage, qui est équipé d'une vanne d'isolement (05003V1) pour contrôler l'écoulement de vapeur vers cet équipement.
- Les éjecteurs d'entretien, qui sont équipés d'une vanne d'isolement pneumatique (05005V1) pour gérer le flux de vapeur vers ces équipements.
- L'éjecto-compresseur, qui est alimenté par la vanne pneumatique de régulation de pression (PV040100D) pour contrôler la pression de vapeur dans le système [23].

5. Les Problèmes d'exploitation

5.1. Productions insuffisantes

En cas de diminution de la production au niveau de l'unité, il est essentiel d'effectuer les vérifications suivantes pour diagnostiquer et résoudre le problème :

- Vérifier la conformité aux conditions du schéma thermique.
- Contrôler la pression vapeur à l'entrée de l'ejecto-compresseur.
- S'assurer que le débit d'arrosage est suffisant et que les faisceaux sont correctement arrosés.
- Examiner la présence de saumure noyant les faisceaux de chauffe.
- Vérifier le niveau de saumure dans la cellule.
- Contrôler l'absence d'obstruction des faisceaux par de l'eau distillée.
- Vérifier le bon fonctionnement du circuit d'extraction d'eau distillée.
- Assurer le bon état de l'éjecteur d'entretien.
- Respecter la fréquence recommandée pour les lessivages, environ deux fois par an [22].

5.2. Les causes possibles d'un débit bas

Les facteurs pouvant entraîner une diminution du débit d'eau de mer sont les suivants :

- Pression insuffisante de l'eau de mer vers l'unité.
- Dysfonctionnement de la pompe d'eau de mer et pression disponible à son aspiration.
- Encrassement ou obstruction du condenseur distillateur ou des condenseurs d'éjecteur.
- Obstruction des tubes au niveau des boîtes à eau des condenseurs.
- Encrassement ou colmatage des filtres d'alimentation ou d'appoint en eau de mer.
- Pression différentielle élevée des filtres.
- Mauvais fonctionnement des vannes de régulation d'appoint des régulateurs de débit.
- Buses d'arrosage des cellules obstruées [22].

6. Procédure de lessivage acide de l'unité

6.1. Acide sulfamique et inhibiteur de corrosion

6.1.1. Acide sulfamique

L'acide sulfamique, également connu sous les noms d'acide sulfamique, acide aminosulfonique, acide amidosulfonique ou acide amidosulfurique, est un composé chimique de formule HSO_3NH_2 . Il est un solide cristallin blanc et stable, soluble dans l'eau, où il s'hydrolyse lentement en bisulfate d'ammonium $(\text{NH}_4)\text{HSO}_4$. L'acide sulfamique fond à une température de 205°C et se décompose en eau H_2O , trioxyde de soufre SO_3 , dioxyde de soufre SO_2 et diazote N_2 à des températures plus élevées. Il est utilisé comme détartrant et détergent [24].

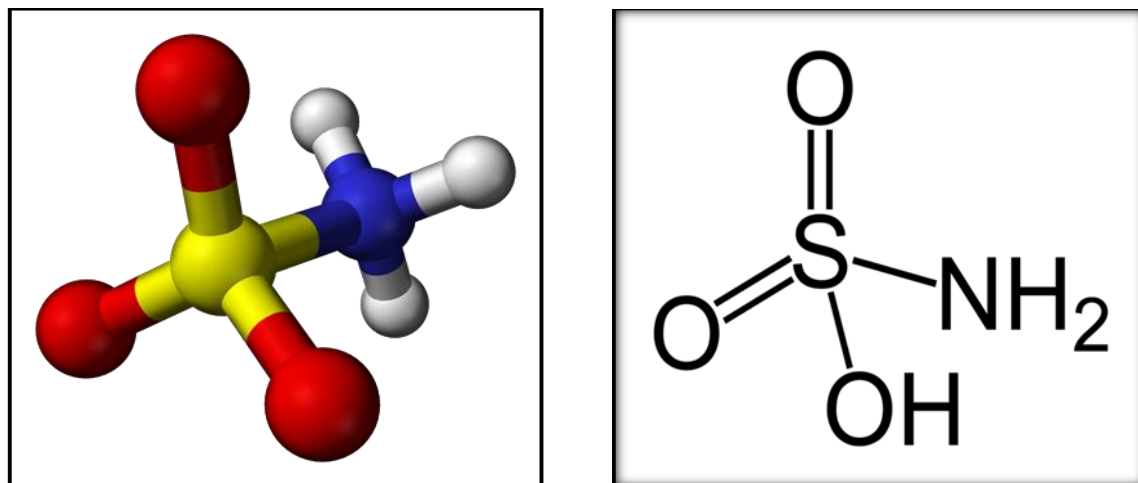


Figure 13: Structure 3D et 2D de l'acide sulfamique.

➤ **Identification :**

- Nom IUPAC : acide sulfamique
- Synonyme : acide sulfamidique
- Apparence : cristaux ou poudre
- Incolore et inodore.



Figure 14: Acide sulfamique « Cristaux /poudre » [24].

➤ **Propriétés chimiques :**

- Formule brute : H_3NSO_3
- Masse molaire : $97,094 \pm 0,006 \text{ g. mol}^{-1}$.

➤ **Propriétés physiques :**

- Température de fusion « °C » : 205 °C
- Température de décomposition « °C » : 209 °C
- Densité : 2,126
- Valeur du pH : 1,18 dans le soluté 1 %.

6.1.2. Les inhibiteurs de corrosion

Un inhibiteur de corrosion est un composé chimique qui, ajouté à faible concentration au milieu corrosif ralentit ou stoppe le processus de corrosion d'un métal placé au contact de ce milieu [24].

➤ **Les inhibiteurs d'attaque acide :**

Les inhibiteurs d'attaque acide, souvent des composés organiques, fonctionnent en créant une couche adsorbée à la surface du métal, d'une épaisseur similaire à une couche mono-moléculaire. Cette couche agit en bloquant la décharge des ions hydrogène et la dissolution des ions métalliques, protégeant ainsi le métal de la corrosion en milieu acide.

❖ **Le Rhodine 141M :**

C'est un inhibiteur d'attaque acide principalement utilisé pour des opérations de nettoyage industriel en présence d'acide sulfamique.

○ **Caractéristiques du Rhodine 141M :**

Aspect : poudre beige légèrement humide

Densité apparente :

- ✓ Produit tassé : 0,94
- ✓ Produit non tassé : 0,78

Les concentrations recommandées de Rhodine 141M varient en fonction de la température d'utilisation de l'acide sulfamique lors des opérations de nettoyage industriel :

- Pour des températures ambiantes, utiliser 5% en poids de la quantité d'acide sulfamique.
- Pour des températures comprises entre la température ambiante et 50°C, utiliser 10% en poids de la quantité d'acide sulfamique [24].

6.2. Déroulement de l'opération

6.2.1. Préparation de l'unité

Après l'arrêt de l'installation et la mise de l'appareil à la pression atmosphérique, les étapes suivantes sont nécessaires :

1. Ouvrir les trois (03) trous de visite pour évacuer les gaz produits par la réaction pendant l'opération de lessivage.
2. Isoler les filtres automatiques (alimentation et appoint) pour éviter tout endommagement par la solution acide.
3. Vérifier le bon état de fonctionnement de tous les équipements (pompes, vannes).
4. Assurer la disponibilité des utilités telles que l'air, l'électricité, la vapeur, l'eau de mer, l'eau d'appoint, etc.
5. Vérifier la disponibilité sur site des quantités adéquates de produits chimiques (acide sulfamique, Rhodine 141M et soude caustique).
6. Effectuer un rinçage de l'unité pendant au moins 30 minutes en établissant une circulation via la pompe saumure 052-R-605-J5, avec la vanne 04076V1 de la ligne 6" WCR-04076 ouverte, la vanne 04076V1 de la ligne 4" WC-04076 fermée, et la vanne TV-040401 fermée manuellement [22].

6.2.2. Préparation du bac préparation d'acide

1. Installation du SKID près du dessalement « D ».

2. Monter la tuyauterie pour relier la pompe du bac d'acide au point B à l'aspiration de la pompe de saumure.
 3. Préparer le système conformément à la procédure établie.
 4. Alimenter le système SKID en condensat depuis le dessalement le plus proche à l'aide d'un flexible bien fixé et remplir la citerne avec du condensat.
 5. Mettre en service la pompe du SKID pour effectuer un test.
 6. Ajouter 150 kg d'acide sulfamique (six sacs de 25 kg chacun).
 7. Introduire 4,5 kg d'inhibiteur de corrosion (Rhodine 141M).
 8. Injecter la solution d'acide préparée dans l'évaporateur.
- ❖ Les étapes 6, 7 et 8 seront répétées en fonction de l'évolution de l'opération de lessivage acide, en se basant sur les analyses effectuées [22].
- ❖ Il existe un acide sulfamique inhibé avec la Rhodine 14.

6.3. Déroulement de l'opération de lessivage acide

1. Ouvrir les vannes d'isolement du filtre manuel à panier d'eau de mer d'appoint et fermer les vannes d'isolement du filtre automatique 052-R-605 P1. Fermer les vannes d'isolement du filtre à panier d'alimentation 052-R-605 P ; vidanger les filtres automatiques.
2. Ouvrir la vanne d'aspiration de l'éjecteur de démarrage.
3. Remplir l'évaporateur en eau distillée ou condensât jusqu'au niveau de l'alarme « Niveau Haut » saumure.
4. Injecter la solution d'acide préparée contenue dans le bac.
5. Etablir une circulation par la pompe saumure avec les vannes appropriées ouvertes et fermées.
6. Éviter le débordement de la solution acide à l'intérieur des tubes des faisceaux.

7. Mesurer le pH de la solution en circulation et répéter l'injection d'acide jusqu'à ce que le pH descende en dessous de 2.
8. Mesurer régulièrement le pH pendant le processus.
9. Arrêter la pompe de saumure après le lessivage.
10. Procéder à la neutralisation de la solution en circulation selon les étapes définies.

Cette procédure vise à effectuer un lessivage acide de manière contrôlée et sécurisée, en suivant des étapes précises pour garantir l'efficacité de l'opération [22].

6.4. Phase de neutralisation

Les normes algériennes pour les rejets liquides industriels exigent un pH des effluents compris entre 6,5 et 8,5. À la fin de l'opération de lessivage, le pH doit se stabiliser autour de 2. Pour neutraliser la solution, introduire entre 60 kg et 75 kg de soude caustique (NaOH) dans le bac, équivalant à la moitié de la masse d'acide résiduel, puis suivre les étapes suivantes :

1. Activer la pompe d'injection.
2. Mettre en service la pompe de saumure.
3. Surveiller le pH de la solution en circulation.
4. Dès que le pH atteint une valeur comprise entre 6,5 et 8,5, arrêter la neutralisation.
5. Vidanger entièrement la solution neutralisée de tout le circuit de nettoyage [22].

6.5. Phase de Rinçage

- ❖ Pour effectuer un rinçage de l'unité à l'eau de mer, il est nécessaire de mettre en service les circuits d'eau de mer et de saumure. Un rinçage à l'eau distillée ou à l'eau d'appoint via la ligne 2 WMU-05070 en ouvrant la vanne 05070V1 peut être réalisé si l'unité est à l'arrêt.
- ❖ Après le rinçage, il est recommandé de mettre l'unité en service pendant 24 heures avant de procéder à une inspection interne de contrôle. Si cela n'est pas possible, il est essentiel de ventiler correctement l'unité avant d'ouvrir pour inspection.

- ❖ Il est conseillé d'effectuer un nettoyage du filtre manuel (d'appoint) après chaque opération de lessivage.
- ❖ À la fin de l'opération de rinçage, il est nécessaire de nettoyer les compartiments saumure à l'eau de service pour éliminer la boue et le tartre adhérents aux parois internes de l'unité [22].

6.6. Inspection

1. Ouvrir les trois (03) trous de visites des cellules (1) et (2).
2. Procéder à une inspection des deux faisceaux de chauffe, buses d'arrosage et les fonds des compartiments de la saumure des deux cellules [22].

Chapitre III

Les problèmes

Techniques en

dessalement

d'eau de mer

1. Introduction

Le dessalement de l'eau de mer est parfois présenté comme la solution miracle aux problèmes de rareté de l'eau potable. Outre le fait qu'elle demeure financièrement inaccessible aux pays pauvres (en revenus ou en pétrole), ces technologies demeurent de grosses consommatrices d'énergie et la question de leur impact environnemental est loin d'être résolue. Trop souvent, la mise en place d'installations de dessalement est un moyen de contourner des problèmes criants de gâchis ou de mauvaise gouvernance de l'eau et d'esquiver les réformes nécessaires [25].

2. Problèmes techniques rencontrés en dessalement

Les problèmes techniques rencontrés dans les divers procédés de dessalement sont principalement associés à l'utilisation de solutions salines concentrées ou à la création d'eaux agressives, caractérisées par un excès de dioxyde de carbone par rapport à l'équilibre. Ces problèmes se manifestent sous forme de corrosion et de dépôts de tartre [25].

2.1. Problèmes d'entartrage

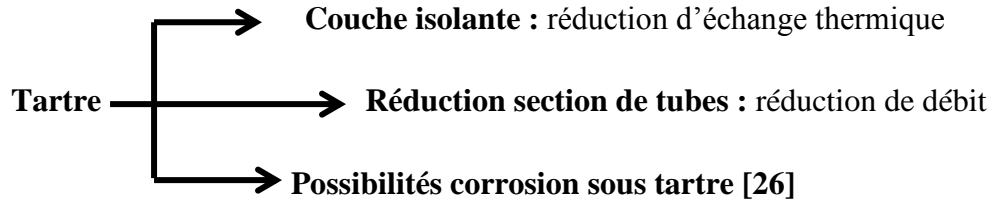
Le tartre, un dépôt calcaire résultant de la précipitation des minéraux contenus dans l'eau sous l'influence de la chaleur, est principalement composé de carbonates de calcium (CaCO_3) et se forme couramment sur les surfaces internes des chaudières, des canalisations d'eau ou de vapeur, entre autres [26].

➤ Généralités sur la théorie de l'entartrage :

Lorsque l'eau de mer est chauffée dans un évaporateur, les limites de solubilité sont atteintes ou dépassées, ce qui entraîne la formation de dépôts sur les surfaces d'échange de chaleur. Ces dépôts sont principalement composés de carbonate de calcium (CaCO_3), d'hydroxyde de magnésium ($\text{Mg}(\text{OH})_2$) et de sulfate de calcium (CaSO_4). Pour qu'il y ait dépôt de tartre sur une surface d'échange, deux conditions principales doivent être réunies :

- **La condition thermodynamique** : il est nécessaire que la limite de solubilité soit dépassée, ce qui signifie qu'il y a une sursaturation des ions dans l'eau. C'est l'aspect thermodynamique.

- **La condition cinétique** : il faut ensuite que la vitesse de dépôt soit suffisamment rapide. C'est l'aspect cinétique [26].
- **Problèmes engendrés par le tartre** :



2.1.1. Causes de l'entartrage

Le tartre, un dépôt souvent rigide et adhérent, parfois poreux, est principalement composé de carbonates de calcium présents dans l'eau. Ces dépôts de tartre, présents dans les canalisations d'eau, les échangeurs de chaleur, les chaudières, les résistances de chauffe-eau, etc., posent des problèmes significatifs et récurrents. Ils entraînent des coûts importants pour la maintenance des conduites d'eau et des systèmes de chauffage, ainsi que des pertes énergétiques considérables. L'ampleur de l'entartrage dépend de divers facteurs tels que [27] :

- **Dureté de l'eau** :

Est le principal facteur qui contribue à l'entartrage. Plus l'eau contient de sels de calcium et de magnésium, plus elle est dure, et plus il y a de risque de formation de dépôts de carbonate de calcium (CaCO_3) sur les surfaces en contact avec l'eau. Ainsi, une eau très dure, avec une forte concentration de ces minéraux, aura une plus grande propension à former du tartre que de l'eau douce. La dureté de l'eau est donc un élément clé dans le phénomène d'entartrage [27].

- **Température de l'eau** :

La température de l'eau est un facteur clé dans le phénomène d'entartrage. La réaction chimique qui provoque la précipitation du carbonate de calcium (CaCO_3) est largement favorisée par l'élévation de la température, qui libère du gaz carbonique et accélère ainsi la formation de tartre [4].

➤ **Éléments favorisants :**

La présence d'ions Fe^{+2} provenant de la corrosion des composants métalliques d'une installation, même en faible concentration (de quelques dizaines à quelques centaines de microgrammes par litre), favorise l'entartrage. En revanche, la présence d'ions cuivre ou zinc dans l'eau limite le dépôt de tartre, le maintenant en suspension. Cependant, même des éléments en cuivre peuvent s'entartrer avec le temps, comme c'est le cas des chaudières Frisquet en cuivre qui nécessiteront un détartrage du corps de chauffe [27].

2.1.2. Différents moyens de lutte contre l'entartrage

Pour éviter la formation de tartre et maintenir le bon fonctionnement des installations, Une première solution consiste à jouer sur le procédé même : apport d'énergie calorifique supplémentaire dans le cas des procédés de distillation, application d'une pression supérieure dans celui des procédés membranaires. Une deuxième solution consiste à prétraiter l'eau par :

- L'ajout d'acide qui induit une décarbonatation du milieu par dégazage du gaz carbonique formé à partir des hydrogénocarbonates.
- L'ajout de chaux et de germes de cristallisation qui favorisent la précipitation du carbonate de calcium.
- L'emploi d'inhibiteurs d'entartrage : poly phosphaté, organophosphate, polyèrespoly carboxyliques.

Quelle que soit la solution adoptée, elle augmente le coût du dessalement [28].

➤ **Inhibiteurs d'entartrage :**

Les inhibiteurs d'entartrage sont des composés utilisés à faible dose (quelque ppm) dans l'eau d'appoint pour prévenir ou réduire la formation de dépôts sur les parois des équipements. Ces produits tartriques agissent en évitant ou en minimisant les dépôts qui pourraient se former, contribuant ainsi à maintenir les installations en bon état de fonctionnement.

➤ **Le lessivage acide :**

L'opération de lessivage acide recommandée pour enlever les dépôts de tartre consiste à circuler une solution concentrée d'acide inhibé, composée d'acide sulfamique et de Rhodine 141,

pour dissoudre le tartre sans endommager les tubes des faisceaux. Pendant cette opération, les faisceaux tubulaires sont arrosés, et la durée du lessivage dépend de la quantité de tartre à éliminer. Il est crucial de noter avec précision la quantité d'acide utilisée, la durée du lessivage, les variations de pH et la température de l'eau de dilution. Le produit recommandé est une solution d'acide sulfamique, avec une proportion maximale de 8 à 10 % en poids, et il est inhibé par 2 à 5 % en poids avec la Rhodine 141M [26].



Figure 15: Détartrage d'une canalisation [29].

2.2. Problème de la corrosion

La corrosion est la détérioration des métaux due à des réactions chimiques ou électrochimiques lorsqu'ils sont exposés à un environnement aqueux ou gazeux [30].

2.2.1. Les causes de la corrosion

➤ **Structure chimique et physique des métaux :**

La présence d'impuretés, qu'elles soient métalliques ou non métalliques, accélère la corrosion des métaux.

➤ **Effet des milieux acides :**

La variation du pH de l'environnement provoque une corrosion accélérée de différents métaux.

➤ **Effet de la température :**

La vitesse de corrosion des métaux croît en fonction de l'élévation de la température.

➤ **Concentration des sels :**

La concentration des sels dissous dans l'eau, tels que les chlorures, sulfates, etc., influence la corrosion des métaux. Lorsqu'elle est élevée, elle augmente la conductivité électrique de l'eau [4], ce qui accélère le processus de corrosion en facilitant le passage du courant électrique. Cela signifie que la présence de sels dissous dans l'eau peut augmenter la corrosion des métaux, notamment en présence d'oxygène.



Figure 16: Corrosion des canalisations [31].



Figure 17: La corrosion des métaux [32].

2.2.2. La protection contre la corrosion

La protection contre la détérioration des métaux peut se faire en agissant soit sur la nature du milieu exemple l'eau, soit sur la nature du métal [26].

- Utilisez un revêtement ou un matériau tel que de la graisse, de l'huile, de la peinture ou de la fibre de carbone.
- Utilisation de métaux non corrosifs, tels que l'acier inoxydable ou l'aluminium.
- Les inhibiteurs de corrosion

3. Impacts environnementaux du dessalement de l'eau

Les impacts d'une usine de dessalement peuvent être divisés en deux catégories : ceux liés à la phase de construction, tels que la transformation de l'occupation des sols, les conséquences visuelles et les nuisances sonores, et ceux liés à la phase d'exploitation, notamment les émissions atmosphériques, les rejets dans l'eau (saumure concentrée et produits chimiques), les dommages potentiels aux écosystèmes marins (faune et flore), la perturbation d'écosystèmes importants, ainsi que les impacts sur la qualité de l'air et de l'eau. Ces activités de construction et d'exploitation peuvent avoir des répercussions significatives sur les zones côtières, nécessitant une évaluation environnementale approfondie pour identifier et atténuer ces impacts [33].

3.1. Impacts négatifs du dessalement

Les activités de dessalement de l'eau de mer entraînent des conséquences néfastes sur l'environnement, principalement liées à l'emplacement des conduites d'entrée et des canalisations de rejet saumure, qui sont l'origine de la plupart des impacts environnementaux négatifs. Les sources d'eau appropriées pour le dessalement peuvent avoir des origines de base fondamentale : eau de mer et eau souterraine. Le dessalement d'eau de mer ou de l'eau saumâtre des usines d'osmose inverse peuvent avoir plusieurs aspects négatifs directs ou indirects sur l'environnement [34].

- Les impacts sur l'environnement marin dus à l'utilisation de divers produits chimiques.
- Les rejets de saumures concentrées dans la mer peuvent avoir des impacts négatifs sur l'environnement marin.
- Impacts marins éco toxicologiques des unités de dessalement des eaux de mer.
- Impacts de la salinité.

3.2. Rejets chimiques

Les usines de dessalement recourent à des produits chimiques pour le traitement initial et final de l'eau, principalement en tant qu'agents biocides, antitartre, antisalissure et antimousse, ce qui altère la composition de la saumure concentrée. La présence de métaux provenant de la corrosion des installations affecte également la composition de cette saumure concentrée [33].

3.3. Rejets de saumures

Les usines de dessalement rejettent des saumures concentrées, pouvant atteindre jusqu'à deux fois la concentration en sels de l'eau de mer initiale, soit environ 70 g/L. Ces saumures sont également rejetées à des températures plus élevées, de 10 à 15°C dans le cas des procédés de distillation.

Ces rejets de saumures concentrées et chaudes peuvent avoir des impacts néfastes sur les écosystèmes marins, notamment lorsqu'ils sont déversés dans des zones côtières sensibles. La forte salinité et la température élevée peuvent être extrêmement dommageables pour la faune et la flore marine.

Le rejet de ces saumures en mer peut modifier la salinité et la température de l'eau, perturbant l'équilibre des écosystèmes. À l'intérieur des terres, le risque de pollution des eaux souterraines est également présent si les bassins de rétention ne sont pas étanches.

Pour limiter ces impacts, des systèmes de diffuseurs sont aujourd'hui mis en place afin de mieux diluer les saumures dans l'eau de mer et réduire la zone d'influence. Cependant, une évaluation environnementale approfondie reste essentielle avant la mise en place de toute usine de dessalement [35].

3.4. Rejets atmosphériques

Les usines de dessalement, principalement alimentées par des énergies fossiles, émettent des polluants atmosphériques tels que le dioxyde de carbone, les oxydes de soufre et d'azote, ainsi que des particules solides, contribuant ainsi de manière directe ou indirecte à la pollution de l'air [36].

Conclusion

Ce chapitre a mis en évidence les problèmes techniques et environnementaux liés au dessalement d'eau de mer. L'entartrage et la corrosion nécessitent des solutions adaptées, tandis que les rejets de saumures et de produits chimiques peuvent perturber les écosystèmes marins. Une évaluation environnementale approfondie et des mesures d'atténuation sont essentielles pour assurer un développement durable de cette technologie.

Chapitre IV
**Méthode et
matériels**

1. Introduction

L'accumulation de dépôts alcalins peut affecter la performance de l'unité, surtout lorsqu'elle est soumise à des températures élevées. Même avec un traitement antitartre continu, il semble qu'il soit nécessaire d'éliminer ces dépôts périodiquement pour assurer le bon fonctionnement de l'unité. Respecter les recommandations de SIDEM et nettoyer l'unité tous les six mois semble être une pratique judicieuse pour maintenir son efficacité à long terme.

Pour éliminer complètement les dépôts de tartre, on recommande une opération de lessivage acide. Cette procédure implique la circulation d'une solution concentrée d'acide inhibé, tel que l'acide sulfamique, afin de dissoudre le tartre sans endommager les tubes des faisceaux.

Pour maintenir une unité en bon état et opérant dans ses conditions thermiques de conception, deux lessivages acides par an suffisent généralement. Le processus de lessivage implique d'arroser les faisceaux tubulaires avec une solution d'acide pendant une durée déterminée en fonction de l'ampleur des dépôts de tartre à éliminer.

Pendant l'opération de lessivage chimique, il est crucial de noter attentivement la quantité d'acide utilisée, la durée du lessivage, ainsi que les variations de pH et de température de l'eau de dilution. Cela permet de garantir un nettoyage efficace tout en évitant les effets indésirables sur l'unité.

Une fois l'opération de lessivage achevée, des échantillons des paramètres de fonctionnement de l'unité seront prélevés pour évaluer ses performances.

Le produit recommandé pour le lessivage est l'acide sulfamique, généralement en solution dans une proportion maximale de 8 à 10 % en poids (typiquement entre 3 à 5 tonnes par lessivage). Cet acide est habituellement inhibé par 2 à 5 % en poids avec de la Rhodine141M pour assurer un processus de nettoyage efficace [37].

2. Le problème de l'entartrage et essai de détartrage

Dans cette section, nous allons chercher à définir la concentration optimale d'acide sulfamique à utiliser lors du lessivage chimique des unités de dessalement. Cela sera réalisé en

menant un test de détartrage sur divers échantillons de tartre prélevés lors de l'inspection des unités de dessalement.

La première étape réalisée, lors du test de détartrage, est la préparation des solutions d'acide Sulfamique à différentes concentrations (3%, 4%, 5%, 7%, 10%). Ces solutions d'acide Sulfamique sont préparées dans un volume de 250ml d'eau distillée. Dans chacune des solutions préparées, nous allons introduire une masse de tartre identique qui est de 04 g. Ensuite, nous allons introduire les solutions préparées dans un bain marie. La température de réalisation du test est fixée à 50 °C.

Ainsi, en fonction du temps nous allons prélever la valeur du pH pour chaque solution. La stabilisation des valeurs du pH pour chaque solution indiquera la fin du test de détartrage.

2.1. Les étapes de test de détartrage

2.1.1. But de manipulation

Cette approche implique de mesurer les valeurs du pH pour chaque solution d'acide sulfamique préparée à différents intervalles de temps. En utilisant le test de détartrage, on peut alors déterminer la concentration optimale d'acide sulfamique à employer lors du lessivage chimique des unités de dessalement

2.1.2. Réactifs utilisés lors de la manipulation

- ❖ L'acide Sulfamique.
- ❖ La soude caustique (NaOH) à 0,5 M.
- ❖ Indicateur BBT.

2.1.3. Mode opératoire

Préparation des solutions d'acide Sulfamique à différentes concentrations (3%, 4%, 5%, 7%, 10%).

- a) **Calcul théorique de la masse de l'acide sulfamique appropriée à chaque concentration**

$$C = n / V$$

$$n = m / M$$

$$C = m / (V * M)$$

$$\text{La masse (m)} = C * V * M$$

Avec : $M = 97,1 \text{ g/mol}$; $V = 250 \text{ ml}$.

Exemple de calcul :

Calcul de la masse de l'acide Sulfamique introduite dans la solution de concentration de 3% :

$$\text{La masse (m)} = C * V * M = 0,03 * 250 * 10^{-3} * 97,1 = 0,73 \text{ g.}$$

Le tableau suivant résume toutes les masses utilisées à différentes concentrations lors de la manipulation

Tableau 3: Les valeurs théoriques de la masse de l'acide sulfamique utilisé dans chaque solution

Concentration HSO_3NH_2	3%	4%	5%	7%	10%
Masse (m)	0,73 g	1,21 g	1,69 g	2,42 g	2,91 g

b) Calcul expérimental de la masse de l'acide sulfamique appropriée à chaque concentration

- Détermination du % massique de la solution d'acide Sulfamique utilisé :
- Prélever 10 ml de la solution d'acide Sulfamique préparé et y ajouter trois (03) gouttes de l'indicateur BBT.
- Titrer cette quantité avec de la soude caustique (NaOH) à 0,5 normal (N1), jusqu'au virage de la couleur du rose claire au bleu

- Noter le volume de la chute de la burette. Soit V_{burette} le volume du NaOH utilisé



Figure 18 : Titrage avec le NaOH (Photo prise par KHALFA.B/BAGHDADLS)

Calcul du % massique :

$$\% \text{ massique} = (V_E * M) / (d * 10)$$

Avec :

- Masse molaire : $M=97,1 \text{ g/mol}$.
- Densité de l'acide Sulfamique : $d = 2,15$.
- Volume prélevé de la solution d'acide Sulfamique =10 ml.

1°) Après la préparation des solutions d'acide Sulfamique à différentes concentrations, introduire une masse identique de tartre chaque solution soit quatre (04) g

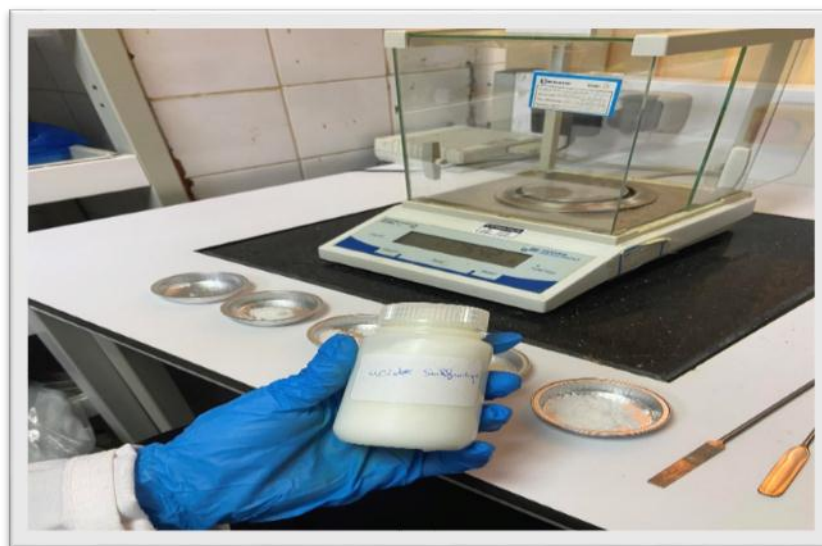


Figure 19: Préparation de solution (Photo prise par KHALFA.B/BAGHDADLS)



Figure 20: Balance analytique .



Figure 21: Échantillon de tartre.



Figure 22: Différentes solutions d'acide sulfamique (Photo prise par KHALFA.B/BAGHDADLS).

2°) Après avoir prélevé le pH des solutions préparées à $T = 25\text{ °C}$ selon la norme ASTM D1293-78, introduire ces dernières dans un bain marie et fixer la température de travail à 50 °C

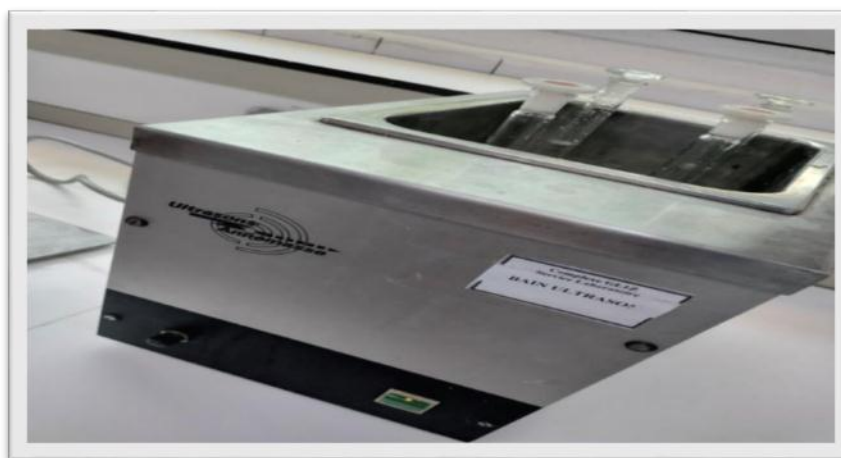


Figure 23: Un bain marie (Photo prise par KHALFA.B/BAGHDADLS).

3°) Mesurer ainsi le pH des différentes solutions en fonction du temps, à l'aide du pH mètre, jusqu'à la stabilisation de tous les pH. Ce qui indique la fin du test de détartrage

3. Analyse des ions calcium et magnésium dans le tartre par la méthode d'absorption atomique ISO (10697-1 (1992)).

3.1. But de la manipulation

Nous avons opté pour l'analyse des ions calcium et des ions magnésium dans les solutions après le détartrage soit la dissolution du tartre (fin de l'essai) par la méthode d'absorption atomique avec flamme, cette analyse est dans l'optique de déterminer la composition du tartre ainsi que les proportions de ces éléments dans le tartre.

3.2. Mode opératoire

1. préparation des échantillons :

Filtrer les échantillons pour éliminer les particules solides en suspension.

2. Préparation des solutions d'étalonnage : Assurez-vous que les solutions d'étalonnage couvrent la plage de concentrations attendue dans vos échantillons.

3. Préparation des échantillons : Diluer les échantillons pour ajuster leur concentration dans la plage de calibration de l'instrument.

4. Mesure des échantillons : placer les échantillons dans le passeur d'échantillon de l'équipement (SAA) ; sélectionner la longueur d'onde caractéristique du Ca^{+2} et Mg^{+2} et mesurer l'absorbance pour chaque échantillon.

5. Analyse des échantillons : les résultats de l'analyse de la concentration des éléments Ca^{+2} et Mg^{+2} sont réalisés sur la base de trois répliques et cela pour une meilleure précision.

6. Expression des résultats : les résultats sont exprimés en mg/l.

4. Suivi de l'opération du lessivage du dessaleur D

4.1. Situation des unités de dessalement via le bilan global de production

Suite à la disponibilité d'une seule unité de dessalement en service, le complexe a eu recours à la station de Kahrama pour combler le déficit en eau dessalée et afin d'établir une situation sur l'exploitation de ce dessaleur, nous nous sommes focalisé sur sa production soit la quantité produite du distillat ainsi que sur la disponibilité de cette unité de dessalement et cela pendant toute la période de notre stage.

4.2. Opération du lessivage du dessaleur D

Suite à la baisse de performance du dessaleur D, il a été procédé à son arrêt. L'inspection de l'unité de dessalement a révélé une présence de tartre qui couvre la partie externe des tubes des cellules 1 et 2 (figure 24)

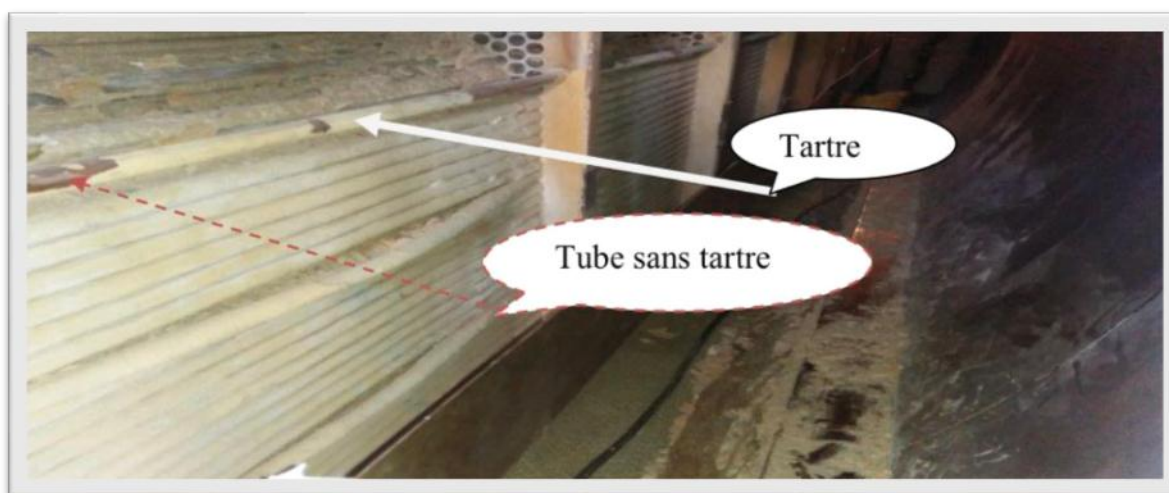


Figure 24 : Entartrage des tubes (Photo prise par le service inspection)

Dans le but d'enlever les dépôts du tartre, une opération de lessivage a été lancée et qui consiste à faire circuler une solution d'acide sulfamique inhibée afin de dissoudre le tartre et cela conformément à la procédure du manuel opératoire. L'opération de lessivage effectuée a enregistré une consommation de 1125 Kg d'acide sulfamique et nous a permis de suivre l'opération de lessivage avec la mesure du potentiel d'Hydrogène, la concentration de l'acide sulfamique ainsi que les taux du Ca^{+2} et Mg^{+2} , indicateurs de l'évolution du détartrage en tenant

compte de la concentration de l'ion cuivreux « Cu^{+2} » indispensable pour suivre ou non l'opération du lessivage.

Chapitre V
**Résultats et
discussion**

1. Les résultats du test de détartage

Les résultats de la manipulation sont consignés dans le tableau ci-dessous :

- a) Calcul expérimental de la masse de l'acide sulfamique appropriée à chaque concentration.

Calcul du % massique :

$$\% \text{ massique} = (V \text{ burette} * M) / (\text{densité} * 10)$$

Exemple de calcul :

- ✚ Détermination de la proportion en masse de l'acide sulfamique ajoutée à la solution de concentration 3% :

$$\% \text{ massique} = (0.68 * 97.1) / (2.15 * 10) = 3.07\%$$

Les résultats sont synthétisés dans le tableau suivant :

Tableau 4: Détermination expérimentalement de % massique de la solution d'acide sulfamique approprié à chaque concentration et le volume du NaOH

Concentration (Théoriquement)	3%	4%	5%	7%	10%
V _E (ml)	0.68	0.89	1.1	1.61	2.25
Concentration (Expérimental)	3.07%	4.01%	4.96%	7.27%	10.16%



La proximité entre les concentrations expérimentales et théoriques suggère la validité de l'expérience, confirmant ainsi que toutes les variables et conditions expérimentales ont été adéquatement contrôlées.

a) Comparaison du pH avant et après l'ajout du tartre dans la solution de l'acide sulfamique.

Observation : Le pH de l'eau distillée avant l'addition de l'acide est de 6,82.

pH avant ajout de tartre : l'acide sulfamique pur est généralement bas, typiquement compris entre 1 et 2, dans notre expérience, nous avons mesuré un pH de 1,28.

pH après ajout de tartre : légère augmentation du pH de la solution, ce qui suggère la présence de tartre.

b) Les résultats du test de détartrage.

Les résultats de la manipulation sont consignés dans le tableau ci-dessous :

Tableau 5: Détermination du pH des différentes concentrations en fonction du temps

concentration	3%	4%	5%	7%	10%
PH à t = 10min	0.95	0.83	0.78	0.65	0.46
pH à t = 30min	1.00	0.88	0.85	0.74	0.57
pH à t = 45min	1.04	0.94	0.9	0.80	0.63
pH à t = 60min	1.09	0.99	0.94	0.84	0.63
pH à t = 75min	1.12	1.03	0.97	0.84	0.63
pH à t = 90min	1.14	1.06	0.97	0.84	–
pH à t = 105min	1.16	1.09	0.97	–	–
pH à t = 120min	1.18	1.09	–	–	–
pH à t = 135min	1.18	1.09	–	–	–

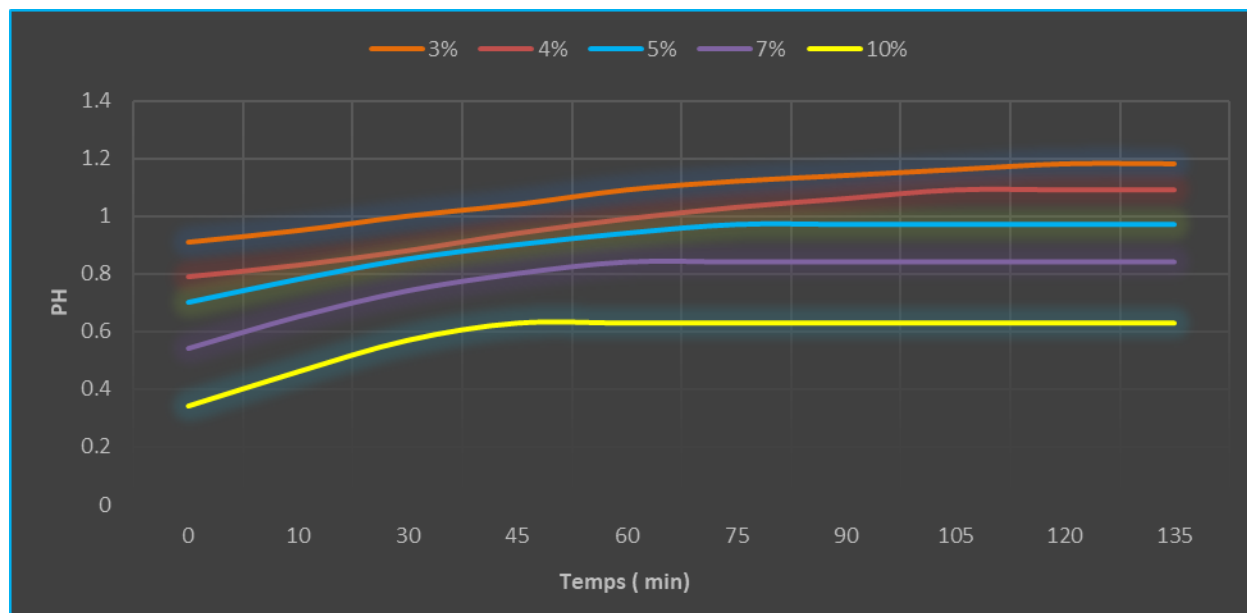


Figure 25 : Variation du pH en fonction du temps.

La figure N°25 illustre les changements de pH en fonction du temps, mettant en évidence plusieurs points :

- À mesure que le temps avance, le pH de la solution augmente progressivement jusqu'à atteindre une stabilité. Cette augmentation du pH est observée pour toutes les concentrations, et elle est attribuée à la dissolution du tartre, principalement composé de Ca^{+2} et Mg^{+2} .
- La stabilisation du pH pour chaque solution d'acide sulfamique marque la fin du test de détartrage.
- Chaque concentration d'acide sulfamique a permis de dissocier une quantité spécifique de tartre. Le temps nécessaire pour détartrer à chaque concentration est représenté dans la figure N°26 ci-dessous.

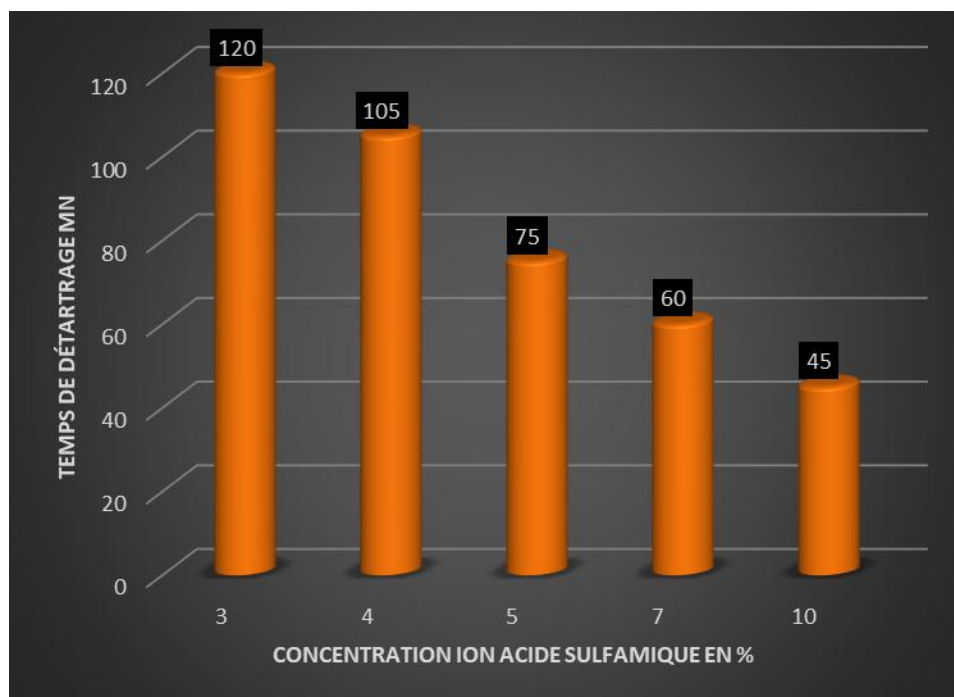


Figure 26: Le temps nécessaire en minute pour le détartrage de 4g du tartre pour chaque [C] d'acide sulfamique.

La Figure N°26 démontre une relation inverse entre la concentration de l'acide sulfamique et le temps requis pour le détartrage : à mesure que la concentration d'acide sulfamique augmente, le temps nécessaire pour le détartrage diminue.

- Le détartrage le plus rapide, à 45 minutes, a été observé avec une concentration d'acide sulfamique de 10 %.
- Les concentrations de 7 % et 5 % ont également montré des temps acceptables, compris entre 60 et 75 minutes.
- En revanche, les concentrations de 4 % et 3 % ont nécessité des temps de détartrage considérablement plus longs, respectivement 105 minutes et 120 minutes.

Lorsqu'on utilise une concentration élevée d'acide sulfamique pour un lessivage chimique, en raison de sa nature d'acide fort, cela peut engendrer des impacts significatifs sur les surfaces des unités de dessalement, en particulier sur les parties détartrées exposées. Ceci peut entraîner un risque sérieux de corrosion, voire de perforation, si l'exposition à l'acide n'est pas contrôlée de manière adéquate.

Il est crucial de choisir une concentration appropriée d'acide sulfamique pour minimiser ces risques. Les résultats de nos tests indiquent qu'une concentration comprise entre 5 % et 7 % est généralement recommandée. Au-delà de 5 %, le temps nécessaire pour le détartrage devient acceptable, tout en réduisant les risques de corrosion. Cependant, l'utilisation d'une concentration de 10 % expose davantage les surfaces aux risques de corrosion.

➤ **La concentration idéale pour un lessivage chimique efficace**

Après avoir analysé les résultats du test de détartrage, nous avons sélectionné une concentration d'acide sulfamique de 5 % pour le lessivage chimique des unités de dessalement, motivés par les raisons suivantes :

- La concentration de 5 % a démontré être la plus efficace pour le processus de détartrage, offrant un temps de traitement optimal tout en minimisant les risques de corrosion des surfaces traitées. Cette concentration permet une action efficace contre les dépôts de tartre tout en préservant l'intégrité des matériaux, ce qui est essentiel pour prolonger la durée de vie des équipements.
- En utilisant une concentration de 5 % d'acide sulfamique, le processus de lessivage peut être suivi et contrôlé de manière précise. Cette concentration fournit une force de nettoyage adéquate pour éliminer les résidus et les impuretés, tout en permettant un contrôle optimal de la réaction chimique. Cela garantit une efficacité maximale du processus de nettoyage tout en minimisant les risques de sous-utilisation ou de surutilisation du produit chimique.
- Sur le plan économique, l'utilisation d'une concentration de 5 % d'acide sulfamique est avantageuse car elle permet d'optimiser l'utilisation du produit. En ajustant la concentration à ce niveau spécifique, les coûts liés à l'achat et à la manipulation de l'acide sulfamique sont réduits tout en maintenant une efficacité de nettoyage élevée. Cela se traduit par des économies à long terme pour l'entreprise tout en garantissant des performances de nettoyage de qualité.

2. Analyse de la qualité du tartre

La composition principale du tartre comprend principalement des ions Ca^{2+} (calcium) et Mg^{2+} (magnésium), qui se combinent avec d'autres éléments pour former des dépôts calcaires dans les installations industrielles et les systèmes de traitement de l'eau. Le tableau qui suit résume les teneurs en ions calcium (Ca^{2+}) et magnésium (Mg^{2+}) mesurées dans un échantillon de tartre à 5%.

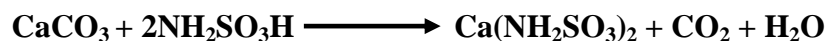
Tableau 6 : Concentration de la composition du tartre

Composition de tartre	Echantillon de 5%
Calcium Ca^{2+} (mg/l)	1500
Magnésium Mg^{2+} (mg/l)	28.8

L'étude de la composition du tartre révèle qu'il est constitué principalement de sels de calcium (Ca^{2+}) et de magnésium (Mg^{2+}). Les ions calcium représentent environ 98% des dépôts minéraux.

Pour éliminer efficacement ces dépôts calcaires, un procédé de détartrage ou de lessivage chimique est mis en œuvre. Ce traitement consiste à injecter une solution d'acide sulfamique (HSO_3NH_2) dans les équipements encrassés.

La réaction chimique suivante représente l'interaction entre le tartre et l'acide sulfamique :



La réaction impliquant l'acide sulfamique et l'hydroxyde de magnésium ($\text{Mg}(\text{OH})_2$) est exprimée par :



3. Suivi la production du dessaleur D

Le lessivage chimique peut être effectué de manière périodique, idéalement tous les six mois, afin de prévenir une accumulation excessive de dépôts.

- En 2022, en raison d'une production insuffisante, le lessivage a été effectué à deux reprises : une première fois en mars, puis une seconde fois en novembre.

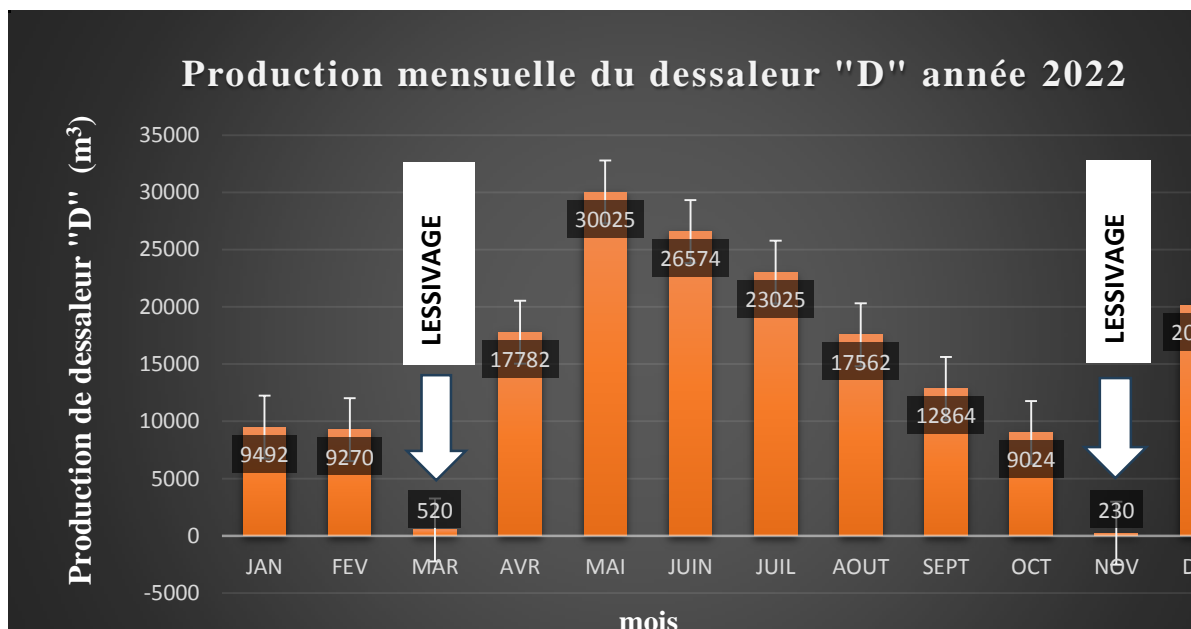


Figure 27: Production mensuelle du dessaleur D enregistrée Année 2022.

- En juillet 2023, une autre session de lessivage a été réalisée pour remédier à la faible production constatée. Après le lessivage, une pause de deux mois (Novembre et Décembre) a été observée pour procéder au retubage.

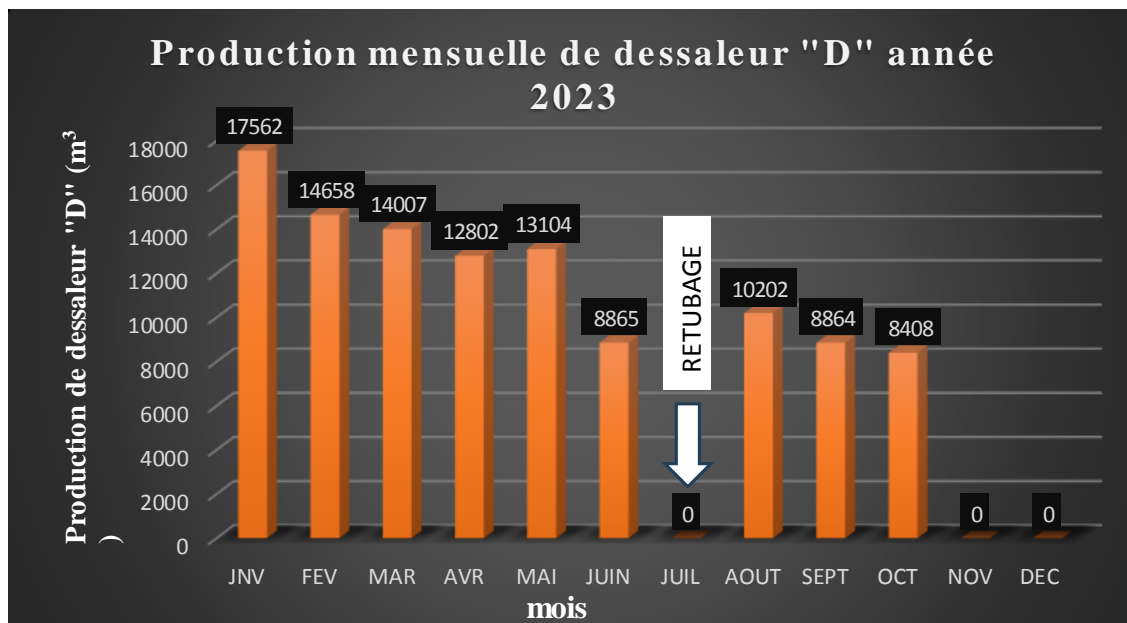


Figure 28 : Production mensuelle du dessaleur D Période 2023

- En janvier 2024, après le lessivage, une production d'eau distillée satisfaisante a été observée dans les deux mois ont suivi.

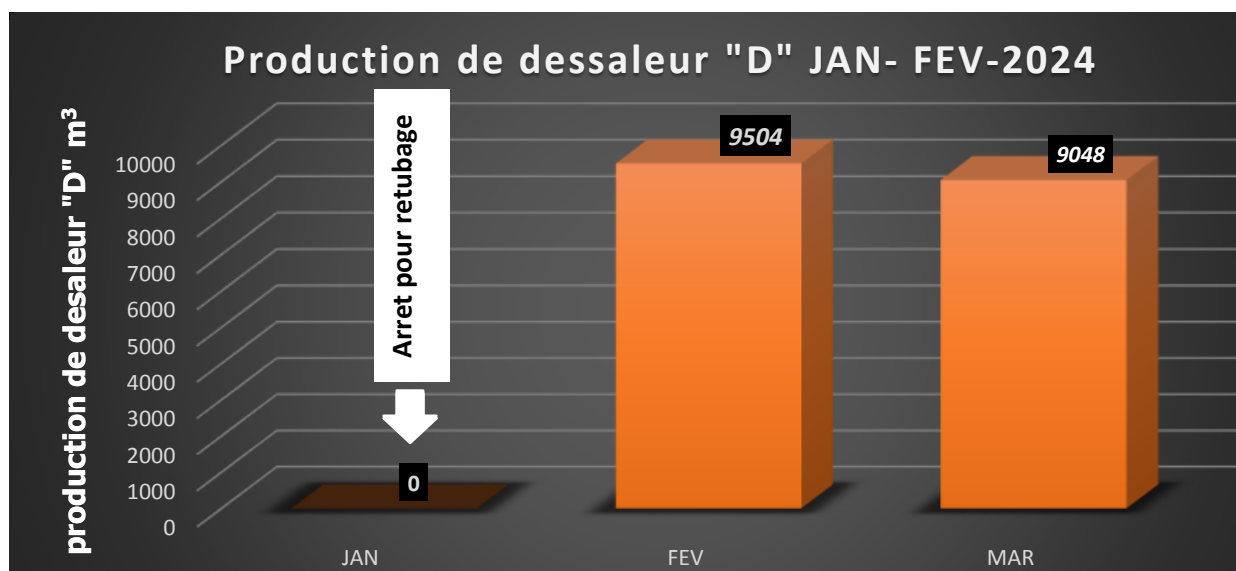


Figure 29 : Production du dessaleur D JAN-MARS-2024

4. La réaction de détartrage

Une Opération de lessivage du dessaleur D par l'utilisation de l'acide Sulfamique a été effectuée durant le mois de Juillet 2023. Cette opération était en fonction de l'évolution du détartrage et les constatations lors des inspections.

La figure ci-dessous (Figure .N° 30) montre clairement, que cette opération a été réalisée avec une concentration faible en acide sulfamique soit <5% ; la figure N°30 montre aussi que lors du lessivage, les valeurs du pH enregistrées oscillaient entre un pH minimal de 0,6 et maximal de 2,5.

Durant cette opération, le taux en ion Ca^{+2} augmentait d'une façon significative avec des valeurs qui dépassaient 16 000 ppm (Figure.N°31) ; sinon la plupart des taux de l'ion Cu^{+2} enregistrés étaient inférieures à 100 ppm.

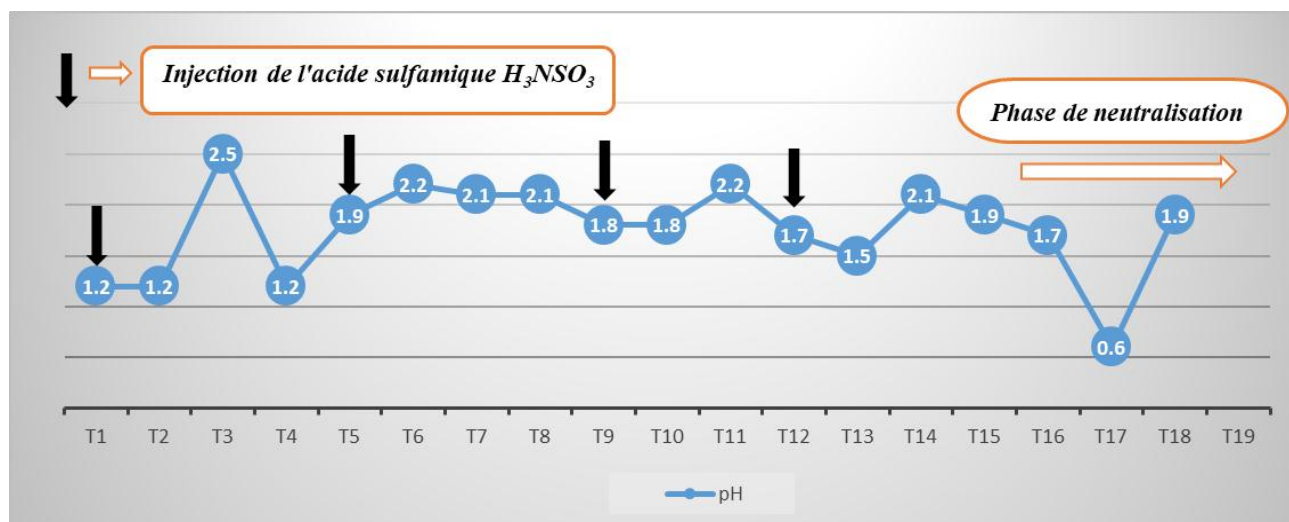


Figure 30 : Evolution du pH en fonction de l'injection de l'acide sulfamique lors de lessivage chimique du dessaleur D 12/07/2023

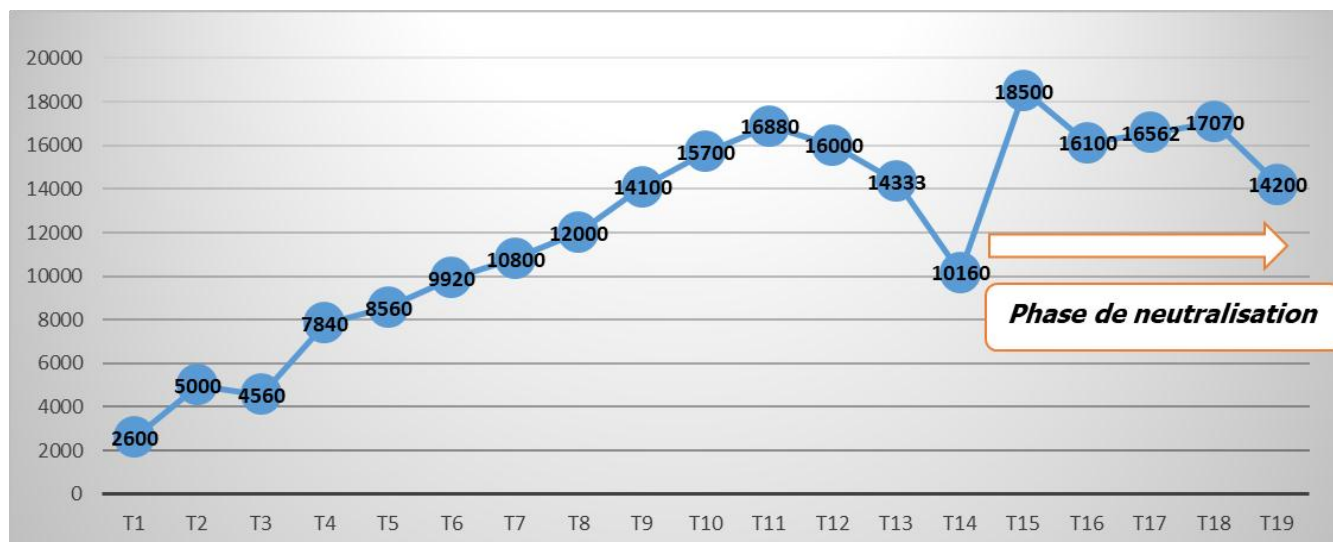


Figure 31 : Suivi de la teneur en ion Ca^{2+} (ppm) lors du lessivage chimique du dessaleur D juillet 12/07/2023

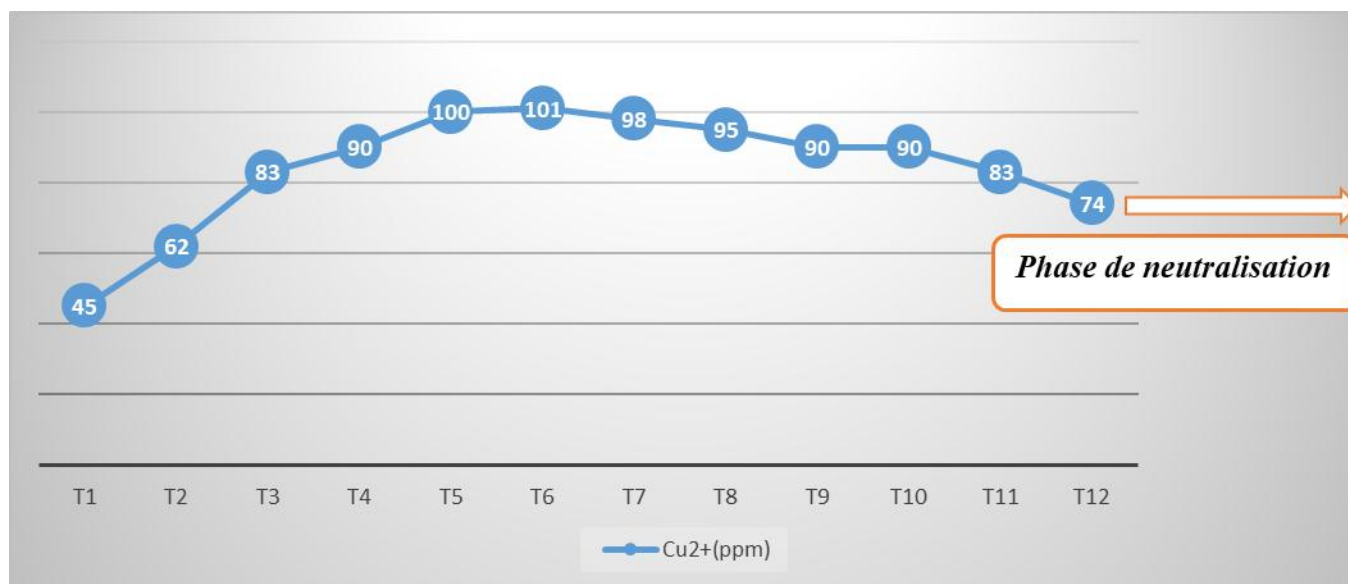


Figure 32 : Taux de l'ion Cu^{2+} lors du lessivage chimique du dessaleur D 12/07/ 2023

La nécessité d'effectuer un lessivage chimique découle d'une inspection approfondie du dessaleur. Après avoir ouvert les trappes d'accès et démonté les démisters, une décision a été prise pour poursuivre les travaux de lessivage, étayée par les constatations suivantes :

- Les tubes de la cellule n°1 sont quasiment entièrement recouverts d'une épaisse couche de tartre, en particulier entre eux.
- Plusieurs cadres de soutien des démisters présentent des déformations.
- Une grande quantité de fragments de tartre s'est accumulée du côté inférieur de la cellule n°1.
- Dans la cellule n°2, on observe une couche de tartre dispersée sur la partie externe de ses tubes, en particulier entre eux.
- La présence de tartre sur l'un des démisters de la cellule n°2

Conclusion générale

Conclusion générale

Le détartrage dans les dessaleurs est souvent réalisé à l'aide du lessivage chimique, une méthode largement adoptée et efficace. Cette approche implique l'utilisation de produits chimiques spécialisés comme l'acide sulfamique pour éliminer les dépôts de tartre qui se forment progressivement dans les équipements de dessalement. Le lessivage chimique présente divers avantages, tels que sa facilité d'application, sa rapidité d'action et son efficacité de nettoyage.

Dans le processus de lessivage chimique, l'acide sulfamique entre en réaction avec les dépôts de tartre, les dissolvant et les éliminant des surfaces internes des équipements. Cette action permet de restaurer les performances optimales du dessaleur en éliminant les obstructions qui compromettent son efficacité de dessalement. De plus, le lessivage chimique peut prolonger la durée de vie des équipements en prévenant l'accumulation excessive de tartre et les problèmes de corrosion associés.

Après avoir examiné les résultats du test de détartrage et réalisé plusieurs manipulations, nous avons décidé d'opter pour une concentration d'acide sulfamique de 5 % lors du lessivage chimique des unités de dessalement, pour les raisons suivantes :

- ❖ Sécurité et facilité de manipulation : Les faibles concentrations présentent généralement moins de dangers et sont moins nocives que les concentrations élevées. Cela réduit les risques pour la santé et facilite la manipulation ainsi que l'élimination sûre des produits chimiques utilisés lors du détartrage.
- ❖ Préservation des matériaux : Certains matériaux utilisés dans la construction du dessaleur, comme le cuivre, peuvent être sensibles à l'attaque chimique de l'acide sulfamique. En optant pour une faible concentration, nous préservons l'intégrité des matériaux et évitons les dommages ou la corrosion prématurée.
- ❖ Réduction des risques de corrosion : Les fortes concentrations d'acide sulfamique peuvent être corrosives et endommager les surfaces internes du dessaleur. En choisissant une concentration plus faible, nous minimisons ces risques de corrosion excessive.

En se basant sur les résultats et les études antérieures, il est crucial d'aborder le processus de lessivage chimique avec prudence, en respectant les directives suivantes :

Conclusion générale

- ❖ Adaptez les concentrations des produits chimiques en fonction de la nature et de l'épaisseur des dépôts de tartre, ainsi que des matériaux des équipements.
- ❖ Optez de préférence pour un acide moins corrosif comme l'acide citrique en remplacement de l'acide sulfamique.
- ❖ Programmez le lessivage acide lorsque la production diminue en raison de l'accumulation excessive de tartre sur les faisceaux tubulaires.
- ❖ La fréquence du lessivage doit être déterminée en tenant compte de divers paramètres et ajustée en fonction de chaque situation.
- ❖ Si les tubes de l'évaporateur ou du condenseur sont en alliage cuivreux, prélevez régulièrement des échantillons de la solution acide en circulation toutes les 10 minutes. Si ces échantillons prennent une teinte bleue ou verte, cela indique une corrosion des alliages, nécessitant l'arrêt immédiat du processus de nettoyage chimique suivi d'un rinçage à l'eau.

Références bibliographiques

- [1] HADAD.S, « Etude de l'endommagement des clapets de la colonne d'absorption de CO₂ F-502 au niveau de la section de décarbonatation des trains 300 500 et 600 du Complexe GL1Z » mémoire de magister. Université des Sciences et de la Technologie d'Oran.
- [2] Culture Sciences Chimie, ENS. (2024-03-30). Le dessalement de l'eau de mer et des eaux saumâtres.
- [3] Aquaportail.com. (2024-05-31). Eau de mer : définition et explications.
- [4] Futura-Sciences. (2024-05-12). L'eau salée : mers et océans. <https://www.futura-sciences.com/planete/dossiers/developpement-durable-eau-elle-encore-bleue-618/page/11/>
- [5] Lerm.fr. (2024-03-29). Salinité de l'eau de mer. <http://doc.lerm.fr/salinite-leau-mer/>
- [6] DORSEY, E. (2015). Salinité moyenne de l'eau de mer en surface exprimée en gramme de sel par kilogramme. ResearchGate.
- [7] Le dessalement d'eau de mer et des eaux saumâtres - Encyclopédie de l'énergie 2024-03-30 <https://www.encyclopedie-energie.org/le-dessalement-deau-de-mer-et-des-eaux-saumatres/>
- [8] Science et Vie sur l'eau, N°211, Juin 2000. Le dessalement de l'eau de mer et des eaux saumâtres.
- [9] TAHAR.M A et CHEBKIM , 2019 – 2020. «Etude des performances de fonctionnement d'un ouvrage hydraulique: cas de la station de dessalement d'eau de Chatt El Hilal de Beni Saf». Université Aboubakr Belkaïd– Tlemcen –. Mémoire de Master en Hydraulique. Algérie. p. 11-18.
- [10] Disponible sur <https://www.polymem.fr/produits/membranes/oi-les-fondamentaux/>
- [11] Gaz naturel liquéfié : processus de production et réutilisation de l'énergie froide 2024-03-30 <https://iifir.org/fr/encyclopedie-du-froid/gaz-naturel-liquefie-processus-de-production-et-reutilisation-de-l-energie-froide>

[12] SONATRACH ,l'énergie du Changement 2024-04-25 disponible sur <https://sonatrach.com/>

[13] Rapport sur la description de la zone d'étude au niveau du complexe GL1/Z.

[14] BACHIR.M, BENGANA.A , Soutenu le (23/08/ 2020) ; « Etude de La corrosion dans les chaudières au complexe GNL1 »; Mémoire de Master .Université Mostaganem.

[15] TABELAIDET.B, Senior Ingénieur Process, Récupération de la monoethanolamine et préservation des sécheurs, document réaliser à SONATRACH, Activité AVAL, Division GNL, Complexe GL1/Z, 2003.

[16] BESSEGHIR H (2017) :« Etude de la pollution ammoniacale d'eau de mer causée par le rejet industriel dans la zone côtière de Bethioua complexe GL1/Z ». Mémoire de fin d'étude en analyses spectrales en chimie. Université Abdelhamid Ibn Badis, Mostaganem.

[17] ABDALLAH BEN SALLOUA B. HAMDANE A (2021) :« Étude de dégradation du refroidisseur MEA/EDM de la section de décarbonatation du complexe GL1/Z », mémoire de fin d'études de master académique. Université Mostaganem

[18] PSC S.p.A. Engineering & Contracting avec son personnel hautement spécialisé possède une vaste expérience dans le traitement de l'eau de mer.

[19] 23/10/2020 - Réalisation OCENE d'une installation d'équipements de filtration et désinfection pour sécuriser les process dédiés aux besoins expérimentaux d'un centre de recherche et à la production d'huitres (conchyliculture).

[20] Disponible sur <https://www.pinterest.com/pin/684687949575917614/>

[21] Dessalement de l'eau de mer 2024-04-03 disponible sur <https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/archives-th12/archives-operations-unitaires-genie-de-la-reaction-chimique-tiajb/archive-1/dessalement-de-l-eau-de-mer-j2700/>

[22] Etude d'exploitation des unités de dessalement eaux de mer et dessalement Ejectocompresseur au niveau du complexe GL1/Z (2018).

[23] Mr BENSABA.A, Melle DERKAOU R, (2011/2012) :« Etude et contrôle des deux dessaleurs « MSF » et « THA » au niveau du complexe GL1/Z », Présentée en vue de l'obtention du grade Master II en génie des procédés Spécialité : contrôle qualité. Université d'oran

[24] Acide Sulfamique 5kg 2023-09-27 disponible sur <https://www.droguerie-jary.com/fr/solide/acide-sulfamique-5kg.html>

[25] MAAFA.A, (septembre 2020) : « Dessalement de L'eau de mer ». Mémoire de projet de fin d'étude pour l'obtention du master. Université 08 Mai 1945, Guelma.

[26] HAMDI C, HIDOUR H (25/06/ 2020) : « Étude de la baisse de production d'eau dessalée au niveau du complexe GL2/Z ». Mémoire de fin d'études de master. Université Abdelhamid Ibn Badis, Mostaganem.

[27] Disponible sur <https://desembouage-circuit-de-chauffage.fr/symptome>

[28] Dossier thématique - La Cité de la Mer - Technopole Cherbourg-Normandie / Avril (2012):« La mer à boire ». La cité de la mer Cherbourg.

<http://mediatheque.citedelamer.com/fr/dossiers-thematiques/recherche-et-technologie/la-mer>

[29] Détartrage de canalisations : causes et solutions à adopter. :« Pourquoi le détartrage des tuyaux ?». 4 MARS 2022

[30] Manuel de formation ingénieur du GL1/Z, module 4: traitement de l'eau

[31] Disponible sur <https://www.hydreva.fr/canalisation-Hydreva>

[32] maintenance et efficacité énergétique. : «La corrosion». 2019 <https://www.nouvennergie.fr/e-formation/traitement-de-l-eau/corrosion>

[33] HAMITLO, (2010) : « L'influence des paramètres physico-chimique sur la performance de la station de dessalement de GHAZAOUET ». Mémoire de projet de fin d'étude pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en hydraulique. Université Aboubakr Belkaid, Tlemcen.

[34] J. JAIME SADHWANI, JOSE M. VEZA, S. CARMELO;(2005) ; « Case studies on environmental impact of seawater Desalination » ; Desalination Vol.185.

[35] BENAÏSSA.F Z, (2013) : « Etude sur le procédé d'osmose inverse pour le dessalement des eaux faiblement saumâtres », Mémoire de projet de fin d'Études Pour l'obtention du Diplôme de master en Hydraulique Option : Technologies de Traitement des Eaux. Université aboubakr belkaid, Tlemcen. Page28-36.

[36] François de Dardel, directeur technique, Rohm and Haas : « Les résines échangeuses d'ions en traitement d'eau potable ».

[37] DAHMANI F Z. (2017). « Etude computationnelle de la déminéralisation des eaux par osmose inverse». Université Abou Bekr Belkaid, Tlemcen . Mémoire de Master en Chimie physique et analytique ;2017. p. 3-4