



MEMOIRE DE MASTER

Pour l'obtention du diplôme de Master en Hydraulique

Option: ALIMENTATION EN EAU POTABLE

THEME :

**OPTIMISATION DES PERFORMANCES DE LA TECHNIQUE
DE DESSALEMENT PAR MULTI STAGE FLASH « MSF »**

Présenté par :

HAMIDI Housseem Eddine Rachid.

Devant les membres du jury

| Nom et Prénoms | Grade | Qualité |
|-----------------------|--------------|----------------|
| SALAH BOUALEM | PROFESSEUR | Président |
| KAHEL RASS MALIKA | M.C.B | Examineur |
| BENCHIHEB NADJOUA | M.C.B | Examineur |
| TOUAHIR SABAH | M.A.A | Promoteur |

Septembre 2023

REMERCIEMENTS

tout d'abord, je tiens à exprimer ma gratitude envers dieu, le tout-puissant et miséricordieux, de m'avoir donné la force, le courage, la volonté, et l'amour du savoir, ainsi que la patience nécessaires pour accomplir ce modeste travail.

Je souhaite adresser un sincère remerciement à ma précieuse encadrante,

MME. TOUAHIR SABAH, pour sa générosité et sa persévérance. Recevez toute ma gratitude.

je suis reconnaissant envers l'ensemble de mes enseignants pour leur aide inestimable, leur savoir, leur patience et leur générosité tout au long de mon cycle d'études.

j'exprime mon respect envers les membres du jury qui auront l'honneur d'évaluer mon travail.

enfin, je tiens à remercier chaleureusement toutes les personnes qui m'ont apporté leur aide, que ce soit de près ou de loin, dans la réalisation de ce travail.

je vous remercie de votre attention et de votre soutien.

Dédicaces

À Dieu tout-puissant, je suis profondément reconnaissant de m'avoir accordé la force et le courage nécessaires pour achever ce modeste travail, qui représente le fruit de nombreuses années de quête de savoir.

Je dédie ce travail humble à plusieurs personnes précieuses :

À mes chers parents, aucune dédicace ne saurait véritablement exprimer la profondeur de mes sentiments envers eux. Leur patience inépuisable, leur encouragement constant, et leur soutien inestimable sont des témoignages de mon amour profond et de mon respect pour les sacrifices considérables qu'ils ont consentis.

À mes chers frères, Abderrahmane et Badr Eddine pour leur appui et leur encouragement, et leur soutien moral.

À mes amis, surtout groupe KHEWALI qui ont toujours été là.

À tous mes enseignants qui ont contribué à ma formation et à mon développement personnel.

Enfin, une dédicace très spéciale à ma partenaire de vie, à qui je souhaite tout le bonheur du monde.

HAMIDI Houssem Eddine Rachid

ملخص

تعتبر عملية التحلية اساسية للحصول على مياه عذبة ناتجة من المياه المالحة وبشكل اساسي من مياه البحر. يعتبر التبخير متعدد المراحل واحدة من التقنيات الأكثر استخدامًا اذ يعتمد على طريقة التبخير و التكثيف لإزالة الملح و تحويله لماء عذب .

من اجل التعرف على هذه التقنية قمنا باخذ مجمع **GL2/Z** كمثال لشرح طريقة عمل هذه التقنية مع عرض جميع المشاكل التي يمكنها ان تؤثر على مردود هذه التقنية مع تحديد أسباب هذا الانخفاض

و في الاخير قنا بوضع خطة عمل من اجل حل تلك المشاكل في حال مواجهتها

Résumé

Le processus de dessalement est essentiel pour obtenir de l'eau douce à partir d'eau salée, principalement de l'eau de mer. La distillation multi stage flash est l'une des techniques les plus couramment utilisées, reposant sur la méthode de l'évaporation et de la condensation pour éliminer le sel et le transformer en eau douce.

Pour comprendre cette technique, nous avons pris l'exemple du collecteur **GL2/Z** pour expliquer son fonctionnement, en exposant tous les problèmes qui peuvent affecter son rendement, tout en identifiant les raisons de cette diminution.

Enfin, nous avons élaboré un plan d'action pour résoudre ces problèmes en cas de leur survenue.

Abstract

The desalination process is essential for obtaining fresh water from saltwater, primarily seawater. Multi-stage flash distillation is one of the most commonly used techniques, relying on the method of evaporation and condensation to remove salt and transform it into fresh water.

To understand this technique, we used the **GL2/Z** collector as an example to explain its operation, outlining all the problems that can affect its efficiency, while identifying the reasons for this decrease.

Finally, we have developed an action plan to address these issues if they arise.

CHAPITRE I : LE DESSALEMENT DE L'EAU DE MER

| | |
|--|----|
| INTRODUCTION GENERALE..... | 1 |
| I INTRODUCTION :..... | 3 |
| I.1 PRINCIPE GENERAL DU DESSALEMENT DES EAUX | 3 |
| I.1.1 ALIMENTATION EN EAU DE MER :..... | 3 |
| I.1.2 PRETRAITEMENTS : | 3 |
| I.1.3 INSTALLATIONS DE DESSALEMENT :..... | 4 |
| I.1.4 POST-TRAITEMENTS :..... | 4 |
| I.2 CARACTERISTIQUES DES EAUX MARINES ET SAUMATRES :..... | 5 |
| I.2.1 LES EAUX MARINES | 5 |
| I.2.2 LES EAUX SAUMATRES | 6 |
| I.3 EXIGENCES EN MATIERE DE SALINITE POUR LES EAUX DESSALEES A USAGE INDUSTRIEL :..... | 6 |
| I.4 PRINCIPAUX PROCEDES DE DESSALEMENT D'EAU DE MER :..... | 7 |
| I.4.1 PRELEVEMENT DE L'EAU DE MER AVEC UNE POMPE ET UNE FILTRATION GROSSIERE :..... | 8 |
| I.4.2 PRETRAITEMENT AVEC UNE FILTRATION PLUS FINE : | 8 |
| I.4.3 LE PROCEDE DE DESSALEMENT: | 8 |
| I.5 LES PROCEDES DE DISTILLATION OU DE CHANGEMENT DE PHASES :..... | 8 |
| I.5.1 DISTILLATION MULTI-FLASH (MULTI STAGE FLASH « MSF » :..... | 8 |
| I.5.1.1 AVANTAGES DU MULTI-FLASH : | 9 |
| I.5.1.2 INCONVENIENTS DU MULTI-FLASH : | 9 |
| I.5.2 DISTILLATION A SIMPLE EFFET : | 10 |
| I.5.3 DISTILLATION A MULTIPLES EFFETS (MULTI EFFECT DISTILLATION, « MED » : .11 | |
| I.5.3.1 AVANTAGES DU MULTIPLE EFFET : | 12 |
| I.5.3.2 INCONVENIENTS DU MULTIPLE EFFET :..... | 12 |
| I.5.4 DISTILLATION PAR COMPRESSION DE VAPEUR..... | 13 |
| I.5.4.1 AVANTAGES DE LA COMPRESSION DE VAPEUR :..... | 14 |
| I.5.4.2 INCONVENIENTS DE LA COMPRESSION DE VAPEUR :..... | 14 |
| I.5.5 DESSALEMENT MEMBRANAIRES | 15 |
| I.5.5.1 DESSALEMENT AVEC D'OSMOSE INVERSE | 15 |
| I.5.5.2 LES AVANTAGES DU DESSALEMENT D'OSMOSE INVERSE SONT NOMBREUX :..... | 16 |
| I.5.5.3 LES INCONVENIENTS ASSOCIES AU DESSALEMENT D'OSMOSE INVERSE :..... | 16 |
| I.5.6 DESSALEMENT D'ELECTRODIALYSE | 17 |
| I.6 PRINCIPAUX AVANTAGES ET INCONVENIENTS DE DESSALEMENT | 19 |
| I.6.1 CONSIDERATIONS ECONOMIQUES..... | 19 |
| I.6.2 CONSIDERATIONS TECHNIQUES | 19 |

CHAPITRE II : Utilisation de dessalement MSF Dans les productions industrielles

| | | |
|--------|--|----|
| II | INTRODUCTION : | 21 |
| II.1 | DESCRIPTION DE L'UNITE DE DESSALEMENT DE TYPE « MSF » : | 21 |
| II.1.1 | LES DISPOSITIFS DE FILTRATION DE L'EAU DE MER : | 23 |
| II.1.2 | LE SYSTEME D'EVAPORATION | 23 |
| II.1.3 | LE RECHAUFFEUR DE SAUMURE | 24 |
| II.1.4 | L'EQUIPEMENT DE DESURCHAUFFAGE | 24 |
| II.1.5 | LES EJECTEURS ET LE CONDENSEUR | 24 |
| II.2 | PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT DE L'UNITE DE DESSALEMENT « MSF » : | 25 |

CHAPITRE III : LES PROBLÈMES TECHNIQUES EN DESSALEMENT D'EAU DE MER

| | | |
|-----------|--|----|
| III | INTRODUCTION | 27 |
| III.1 | DEVELOPPEMENT BIOLOGIQUE | 27 |
| III.2 | PROBLEME D'ENTARTRAGE | 27 |
| III.2.1 | GENERALITES SUR LA THEORIE DE L'ENTARTRAGE | 27 |
| III.2.2 | PROBLEMES ENGENDRES PAR LE TARTRE : | 28 |
| III.2.3 | DIFFERENTS MOYENS DE LUTTE CONTRE L'ENTARTRAGE : | 28 |
| III.2.3.1 | INHIBITEURS D'ENTARTRAGE | 28 |
| III.2.4 | LE LESSIVAGE ACIDE | 28 |
| III.3 | PROBLEME DE CORROSION | 29 |
| III.3.1 | DEFINITION DE LA CORROSION | 29 |
| III.3.2 | TYPE DE CORRESSION : | 30 |
| III.3.3 | PROBLEMES ENGENDRES PAR LA CORROSION : | 30 |
| III.4 | LES PRINCIPAUX FACTEURS INFLUENÇANT LA CORROSION : | 31 |
| III.4.1 | LA SALINITE : | 31 |
| III.4.2 | L'OXYGENE : | 31 |
| III.4.3 | LES BACTERIES : | 31 |
| III.4.4 | TEMPERATURE ET VITESSE DE CIRCULATION : | 32 |
| III.5 | LA PROTECTION CONTRE LA CORROSION : | 33 |
| III.6 | PROBLEME DE COLMATAGE : | 33 |

CHAPITRE IV : VÉRIFICATION DES PARAMÈTRES DE FONCTIONNEMENT DES UNITÉS DE DESSALEMENT

| | | |
|--------|---|----|
| IV | INTRODUCTION : | 37 |
| IV.1 | LA PRODUCTION D'EAU DESSALEE DANS LE COMPLEXE GL2/Z : | 38 |
| IV.1.1 | ANALYSE DES RESULTATS | 39 |
| IV.2 | ÉTAT ACTUEL DES DESSALEURS PAR RAPPORT A LA CONCEPTION : | 39 |
| IV.2.1 | DONNEES RELATIVES AU FONCTIONNEMENT DES CINQ DESSALEURS DE TYPE MSF | 40 |
| IV.2.2 | INTERPRETATION DES PARAMETRES OBSERVES | 41 |
| IV.3 | PARAMETRES DE FONCTIONNEMENT DES RECHAUFFEURS DE SAUMURE DES DESSALEURS | 42 |

| | |
|--|----|
| IV.3.1 INTERPRETATION DES PARAMETRES RELEVES DES RECHAUFFEURS DE SAUMURE | 42 |
| IV.4 ANOMALIES IDENTIFIEES..... | 44 |
| IV.4.1 LES DESSALEURS | 44 |
| IV.4.2 LES FILTRES DU CIRCUIT D'EAU DE MER | 44 |
| IV.4.3 LES RECHAUFFEURS DE SAUMURES | 45 |
| IV.4.4 LES PRODUITS CHIMIQUES..... | 45 |
| BIBLIOGRAPHIE | 48 |

LISTE DES FIGURES

| | |
|---|----|
| Figure I. 1 : Illustration schématique des principales méthodes de désalinisation de l'eau de mer. | 4 |
| Figure I. 2 : schéma visuel décrivant les méthodes clés de désalinisation de l'eau de mer..... | 7 |
| Figure I. 3 : Une illustration d'un dessaleur de type "MSF". | 9 |
| Figure I. 4 : Une illustration du principe de la distillation à simple effet. | 10 |
| Figure I. 5 : Une image qui illustre le principe d'un système à évaporateurs à effets multiples. | 11 |
| Figure I. 6 : Une illustration d'un dessaleur fonctionnant selon le principe de la distillation à simple effet par compression. | 13 |
| Figure I. 7 Une illustration d'un dessaleur fonctionnant selon le principe d'osmose inverse | 15 |
| Figure I. 8 : Une illustration d'un dessaleur fonctionnant selon le principe d'electro-dialyse | 17 |
| | |
| Figure III. 1 : schéma qui représente les problèmes engendres par la corrosion | 30 |
| | |
| Figure IV. 1 : Un graphique illustrant l'évolution de la production d'eau dessalée au fil du temps pour les cinq dessaleurs de type MSF. | 38 |

LISTE DES TABLEAUX

| | |
|---|----|
| Tableau I. 1 : Illustration des ratios typiques des composants de l'eau de mer..... | 5 |
| Tableau I. 2 : La catégorisation des eaux en fonction de leurs niveaux de salinité. | 6 |
| | |
| Tableau III. 1 : Vitesse limite de circulation de l'eau de mer | 32 |
| | |
| Tableau IV. 1 : Un graphique montrant la production totale d'eau dessalée des cinq dessaleurs, avec les taux correspondants. | 38 |
| Tableau IV. 2 : Présentation des paramètres de fonctionnement des dessaleurs MSF pour le mois d'août 2023 | 40 |
| Tableau IV. 3 : Paramètres de fonctionnement actuels des réchauffeurs de saumure des dessaleurs MSF..... | 42 |

INTRODUCTION GENERALE

L'eau de mer est une ressource extrêmement abondante et inépuisable, constituant 97 % de l'eau sur Terre et recouvrant 73 % de la surface de notre planète. Cependant, en raison de sa forte salinité, qui varie d'une région à l'autre, elle n'est pas adaptée à la consommation humaine et ne peut être utilisée en l'état.

Afin de rendre cette ressource vitale utilisable pour des besoins domestiques, industriels et agricoles, il est nécessaire de la traiter par un processus couramment appelé "dessalement de l'eau de mer" ou "distillation". De ce fait, de nombreux pays dans le monde ont investi massivement dans la technologie du dessalement de l'eau de mer pour répondre à la demande croissante en eau, en particulier dans l'industrie.

L'exploitation de l'eau de mer n'est pas un choix volontaire, mais plutôt une réponse à la rareté de l'eau douce, qui ne représente que 1 % de l'eau sur Terre, avec un ajout de seulement 2 % sous forme de glace. Cette quantité est nettement insuffisante pour satisfaire les besoins humains et les besoins des écosystèmes.

L'eau dessalée joue également un rôle essentiel dans la production de gaz naturel liquéfié (GNL), où elle est utilisée comme complément d'eau, pour l'alimentation des chaudières de processus et des services publics nécessitant de la vapeur.

Ce mémoire est structuré en plusieurs sections, chacune abordant des aspects spécifiques :

- ✓ Introduction générale au dessalement de l'eau de mer.
- ✓ Description détaillée des unités de dessalement de type multi stage flash (MSF) utilisées dans le complexe GL2/Z.
- ✓ Analyse des problèmes techniques couramment rencontrés dans le processus de dessalement en utilisant la technologie MSF.
- ✓ Exploration du phénomène de l'entartrage et présentation des différentes méthodes chimiques utilisées pour le combattre.
- ✓ Étude spécifique de la lutte contre l'entartrage au sein du complexe GL2/Z, en se penchant sur le procédé de lessivage.
- ✓ Comparaison des paramètres de fonctionnement des cinq (05) unités de dessalement par rapport à leur conception initiale.
- ✓ Identification et relevé des anomalies présentes dans l'installation.
- ✓ Conclusions générales et synthèse des principales découvertes et recommandations.

CHAPITRE I :

LE DESSALEMENT DE

L'EAU DE MER

I INTRODUCTION :

Les besoins croissants en eau douce représentent un défi majeur à l'échelle mondiale, avec plus d'un milliard de personnes privées d'accès à l'eau potable. Pour résoudre cette pénurie en eau de plus en plus préoccupante, il est impératif de développer de nouvelles techniques de production d'eau potable afin de répondre aux exigences de la population en constante croissance. Une méthode particulièrement prometteuse dans certaines régions est le dessalement de l'eau de mer.

Le dessalement de l'eau est un processus visant à obtenir de l'eau douce à partir d'une source d'eau saumâtre ou salée. En d'autres termes, il ne s'agit pas tant d'éliminer le sel de l'eau que d'extraire de l'eau douce. L'efficacité des systèmes de dessalement est généralement mesurée en termes de rendement et de taux de salinité résiduelle.

Cependant, il convient de noter que le dessalement génère également une saumure, dont il faut gérer l'élimination. Cette question ne pose généralement pas de problème près des côtes, où les courants marins sont forts, mais elle peut devenir préoccupante dans les zones continentales et dans des écosystèmes spécifiques tels que les lagons et les lagunes.[11]

I.1 PRINCIPE GENERAL DU DESSALEMENT DES EAUX

Une installation de dessalement peut être divisée en quatre principaux postes de traitement :

I.1.1 ALIMENTATION EN EAU DE MER :

L'alimentation en eau de mer peut être réalisée de deux manières principales : par prise directe depuis la mer ou par le biais de puits côtiers. L'utilisation de puits côtiers présente l'avantage de fournir une eau moins trouble, ce qui réduit les besoins en prétraitements.

I.1.2 PRETRAITEMENTS :

Avant le processus principal de dessalement, plusieurs étapes de prétraitement sont mises en place.

Ces étapes comprennent :

- ✓ La chloration, qui vise à inhiber la croissance d'organismes vivants. Elle sert également à prévenir l'obstruction des canalisations.
- ✓ La filtration, qui a pour rôle de protéger les pompes et d'assurer le bon fonctionnement des pulvérisateurs.
- ✓ L'utilisation d'antitartres, visant à prévenir la précipitation du carbonate de calcium, qui a tendance à se déposer sur les parois des échangeurs et à réduire le transfert de chaleur.

I.2 CARACTERISTIQUES DES EAUX MARINES ET SAUMATRES :

I.2.1 LES EAUX MARINES

Les eaux marines se distinguent principalement par leur salinité, qui représente la concentration totale de sels dissous, notamment les chlorures de sodium et de magnésium, les sulfates et les carbonates. En moyenne, la salinité des eaux des mers et des océans s'établit à 35 (g/L), comprenant [8] :

- 27.2 g/L de NaCl,
- 3.8 g/L de MgCl₂,
- 1.7 g/L de MgSO₄,
- 1.26 g/L de CaSO₄,
- 0.86 g/L de K₂SO₄.

Toutefois, cette salinité peut varier dans le cas de mers fermées, avec des exemples tels que [8] :

- Mer Méditerranée : de 36 à 39 g/L
- Mer Morte : 270 g/L
- Océan Atlantique : 35 g/L
- Mer Rouge : 40 g/L

Le pH moyen des eaux de mer se situe généralement entre 7,5 et 8,4, ce qui les classe comme légèrement basiques. Voici une représentation standard de la composition de l'eau de mer :

Tableau I. 1 : Illustration des ratios typiques des composants de l'eau de mer [1].

| Constituants | Composition en ppm | Composition en g/L | Proportion (%) |
|----------------------------------|--------------------|--------------------|----------------|
| Sodium (Na) | 11035 | 11.035 | 30.64 |
| Chlorure (cl) | 19841 | 19.841 | 55.08 |
| Calcium (Ca) | 418 | 0.418 | 1.16 |
| Magnésium (Mg) | 1330 | 1.330 | 3.69 |
| Bicarbonates (HCO ₃) | 146 | 0.146 | 0.41 |
| Sulfates (SO ₄ - 2) | 2769 | 2.769 | 7.69 |
| Potassium (K) | 397 | 0.397 | 1.10 |
| Bromures (Br -) | 68 | 0.068 | 0.19 |
| Fluorures (F -) | 1 | 0.001 | 0.00 |
| Strontium (Sr) | 14 | 0.014 | 0.04 |
| Total | 3602 | 36.02 | 100 |

I.2.2 LES EAUX SAUMATRES

Les eaux saumâtres sont définies comme des eaux salées qui ne sont pas adaptées à la consommation humaine en raison de leur salinité inférieure à celle de l'eau de mer. La plupart des eaux saumâtres présentent une concentration en sel comprise entre 1 et 10 grammes par litre.

Ces eaux saumâtres proviennent généralement de sources diverses. Elles peuvent être des eaux de surface, mais le plus souvent, ce sont des eaux souterraines qui ont accumulé des sels en dissolvant les minéraux présents dans les sols à travers lesquels elles ont circulé. La composition spécifique des eaux saumâtres dépend donc des types de sols qu'elles ont traversés et de la vitesse à laquelle elles ont circulé à travers ces sols. Les principaux sels dissous que l'on trouve dans ces eaux comprennent le carbonate de calcium (CaCO_3), le sulfate de calcium (CaSO_4), le carbonate de magnésium (MgCO_3), et le chlorure de sodium (NaCl). Voici une classification des eaux en fonction de leur salinité :

Tableau I. 2 : La catégorisation des eaux en fonction de leurs niveaux de salinité [1].

| Type d'eau | Salinités (mg/l) |
|---------------------------|------------------|
| Eau douce | < 500 |
| L'eau légèrement saumâtre | 1000 – 5000 |
| L'eau modérément saumâtre | 5000 – 15000 |
| L'eau très saumâtre | 15000 – 35000 |
| L'eau de mer | 35000 – 42000 |

I.3 EXIGENCES EN MATIERE DE SALINITE POUR LES EAUX DESSALEES A USAGE INDUSTRIEL :

L'eau de mer contient environ 35 grammes de substances chimiques inorganiques par litre, ce qui équivaut à environ 35 000 parties par million (ppm), où une ppm représente 1 milligramme par 1000 grammes d'eau saline.

Pour être considérée comme potable, l'eau doit respecter un ensemble de normes de qualité bien définies. Cependant, pour répondre aux besoins industriels spécifiques, certaines usines peuvent tolérer une teneur en sels dissous allant jusqu'à 1 gramme par litre, et parfois même au-delà, dans l'eau dessalée.

Les chaudières modernes, en particulier celles fonctionnant à des pressions supérieures à 50 bars, requièrent une eau d'une pureté extrême, exempte de tous les sels. Dans de tels cas, un traitement de déminéralisation totale est souvent nécessaire pour garantir la qualité de l'eau. Il est cependant

important de noter que tous les secteurs industriels n'exigent pas une qualité d'eau déminéralisée aussi élevée, et les spécifications varient en fonction des besoins spécifiques de chaque application.[12]

I.4 PRINCIPAUX PROCÉDES DE DESSALEMENT D'EAU DE MER :

Les principales méthodes de désalinisation de l'eau de mer se divisent en deux catégories en fonction du principe appliqué :

- ✓ **Les procédés basés sur un changement de phase**, tels que la distillation (notamment MSF - Multi Stage Flash et MED - Multi Effect Distillation), où l'eau de mer est chauffée pour évaporer l'eau douce, puis condensée pour obtenir de l'eau distillée.
- ✓ **Les méthodes utilisant des membranes**, comme l'électrolyse et l'osmose inverse.

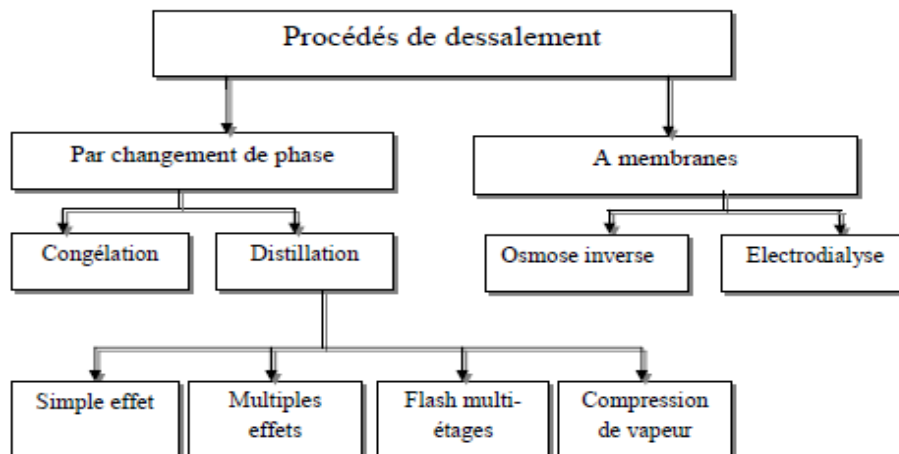


Figure I. 2 : schéma visuel décrivant les méthodes clés de désalinisation de l'eau de mer.

Parmi les techniques mentionnées précédemment, la distillation et l'osmose inverse se distinguent en tant que technologies dont l'efficacité a été solidement démontrée pour le dessalement de l'eau de mer.

En réalité, ces deux méthodes sont les plus répandues sur le marché mondial du dessalement. Les autres approches n'ont pas réussi à s'imposer dans ce domaine en raison de défis liés principalement à la consommation énergétique élevée et aux investissements substantiels nécessaires pour leur mise en place.

Quel que soit le processus de dessalement choisi et la source d'eau traitée, toutes les installations de dessalement suivent généralement trois étapes clés :

I.4.1 PRELEVEMENT DE L'EAU DE MER AVEC UNE POMPE ET UNE FILTRATION GROSSIERE :

Dans cette première étape, de grandes quantités d'eau de mer sont aspirées à l'aide de pompes puis soumises à une filtration initiale pour éliminer les particules et les impuretés de grande taille. Cela permet de protéger les équipements de dessalement contre les dommages potentiels causés par les débris.

I.4.2 PRETRAITEMENT AVEC UNE FILTRATION PLUS FINE :

Après la filtration grossière, l'eau de mer passe par une étape de prétraitement où elle est soumise à une filtration plus fine. Cette étape vise à éliminer les particules plus petites, les bactéries et d'autres contaminants qui pourraient interférer avec le processus de dessalement. L'eau est ainsi préparée pour le traitement ultérieur

I.4.3 LE PROCEDE DE DESSALEMENT:

Cette dernière étape constitue le cœur du processus de dessalement. Elle implique l'application de la technologie spécifique choisie, que ce soit la distillation ou l'osmose inverse, pour éliminer le sel et les autres solutés de l'eau de mer, produisant ainsi de l'eau douce potable ou de l'eau douce pour d'autres usages.

Ces trois étapes sont essentielles pour garantir l'efficacité et la fiabilité des installations de dessalement, en permettant la production d'eau douce de qualité à partir de sources d'eau salée. Chaque étape est conçue pour répondre à des besoins spécifiques en termes de préparation de l'eau brute pour le processus de dessalement et pour maintenir la performance à long terme des installations.

I.5 LES PROCEDES DE DISTILLATION OU DE CHANGEMENT DE PHASES :

I.5.1 DISTILLATION MULTI-FLASH (MULTI STAGE FLASH « MSF » :

L'installation de dessalement d'eau de mer se compose principalement d'un évaporateur à flash multiple (MSF) composé de N cellules allongées configurées en deux passes. Chaque passe comprend N/2 cellules où le processus principal est le flash, qui consiste en la séparation de la phase liquide et de la phase vapeur. Ce processus est favorisé par le vide généré par la batterie d'éjecteurs installée sur la partie supérieure de l'unité de dessalement.

En plus de cela, l'installation comprend un condenseur intégré qui sert à préchauffer l'eau d'alimentation et à condenser l'eau distillée produite à l'extérieur de l'unité. Il y a également un réchauffeur de saumure destiné à atteindre le gradient de température souhaité pour l'eau d'alimentation.

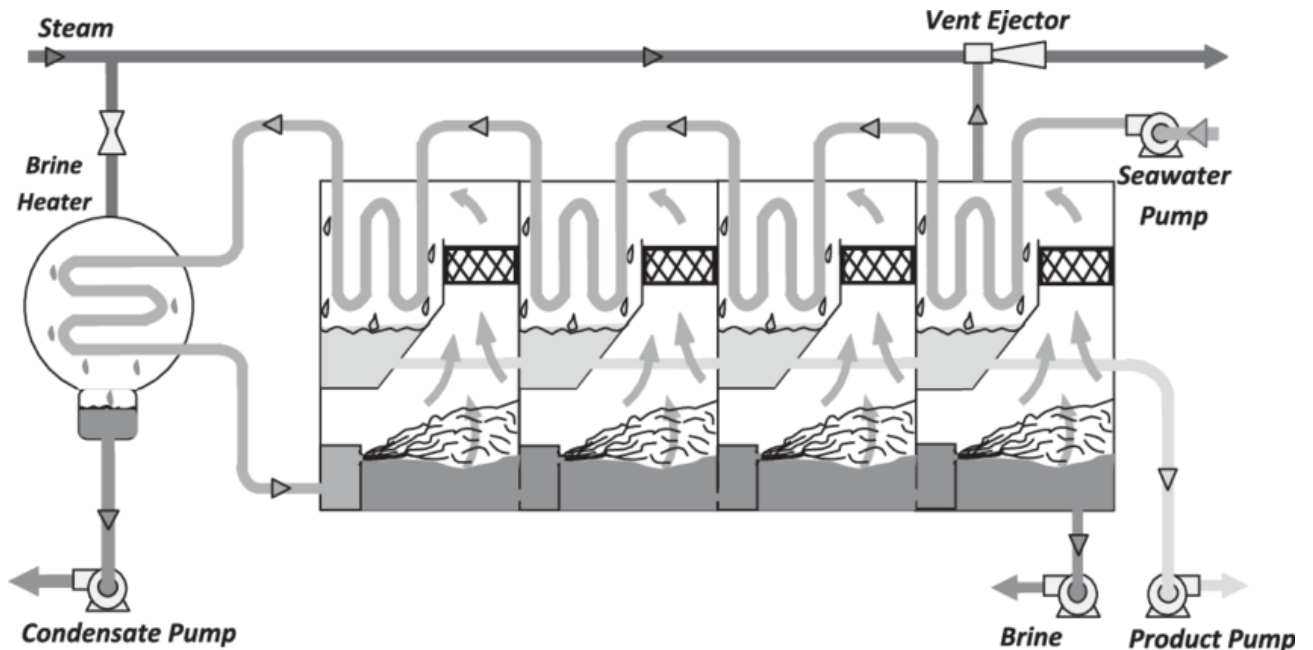


Figure I. 3 : Une illustration d'un dessaleur de type "MSF"

L'unité est également équipée d'un ensemble de pompes qui sont utilisées pour transporter les différents liquides à l'intérieur de l'installation. De plus, il y a des équipements auxiliaires destinés à l'injection de différents produits chimiques, notamment des agents anti-tarte et anti-mousse.

Le processus de dessalement implique la vaporisation des liquides en fournissant de la chaleur sous forme d'énergie. Dans les techniques de distillation modernes, la plage de température de travail se situe généralement entre 85°C et 95°C. Le résultat de ce processus est de l'eau douce dont la salinité est réduite à moins de 100 mg/l [2].

I.5.1.1 AVANTAGES DU MULTI-FLASH :

- ✓ Adaptabilité à la salinité de l'eau d'alimentation.
- ✓ Haute pureté de l'eau produite (moins de 30 ppm).
- ✓ Grande capacité de production d'eau.
- ✓ Large expérience et recherche dans ce domaine.

I.5.1.2 INCONVENIENTS DU MULTI-FLASH :

- ✓ Rendement de production jugé faible.
- ✓ Coûts d'exploitation et d'investissement élevés.
- ✓ Exigences élevées en termes de construction.
- ✓ Faible flexibilité en cas de débits d'eau d'alimentation élevés et faible rapport de production.

I.5.2 DISTILLATION A SIMPLE EFFET :

La distillation à simple effet est une méthode qui est utilisée depuis longtemps, notamment sur les navires, où les moteurs Diesel génèrent une quantité significative de chaleur récupérable.

Le principe de ce procédé est simple : il imite le cycle naturel de l'eau. Dans une enceinte fermée, un serpentin de chauffage fait bouillir l'eau de mer (comme illustré dans la figure ci-dessous). La vapeur ainsi produite se condense au contact d'un deuxième serpentin qui est alimenté en eau de mer froide.

L'eau pure résultante de la condensation est collectée dans un réceptacle situé sous le serpentin refroidi par l'eau de mer, et elle est ensuite pompée hors de là par un groupe électropompe.

Pour éliminer les gaz qui ne peuvent pas être condensés, un éjecteur (ou une pompe) est utilisé, tandis qu'une autre pompe est employée pour évacuer vers la mer l'eau de mer concentrée ou la saumure [2].

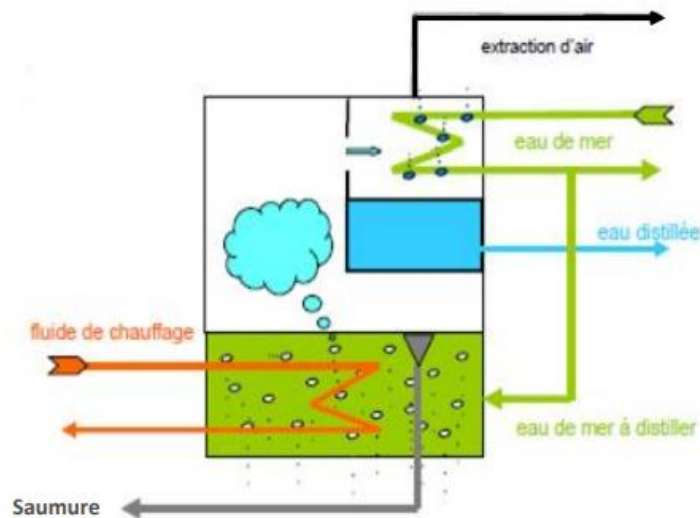


Figure I. 4 : Une illustration du principe de la distillation à simple effet [2].

I.5.3 DISTILLATION A MULTIPLES EFFETS (MULTI EFFECT DISTILLATION, « MED » :

Ce procédé repose sur le principe de l'évaporation, réalisée sous une pression réduite, d'une fraction de l'eau de mer préalablement chauffée à une température comprise entre 70 et 80°C. La chaleur nécessaire à cette évaporation est transférée à travers une surface, et elle est fournie soit par de la vapeur générée, soit par de l'eau chaude. La vapeur produite dans le premier stade est ensuite condensée pour obtenir de l'eau douce dans le deuxième stade, où la pression est plus basse. Cette chaleur de condensation est alors utilisée pour évaporer une partie de l'eau de mer présente dans le deuxième stade, et ainsi de suite.

La seule source d'énergie externe requise est celle nécessaire à l'évaporation dans le premier stade. En multipliant le nombre de stades, on parvient à réduire la consommation spécifique d'énergie par mètre cube d'eau douce produite. Cette énergie nécessaire provient principalement de la chaudière qui chauffe le fluide de chauffage pour le premier stade.

Pour que l'eau de mer devienne potable ou utilisable pour les besoins industriels, elle doit contenir moins de 0,5 gramme de sels par litre. [2].

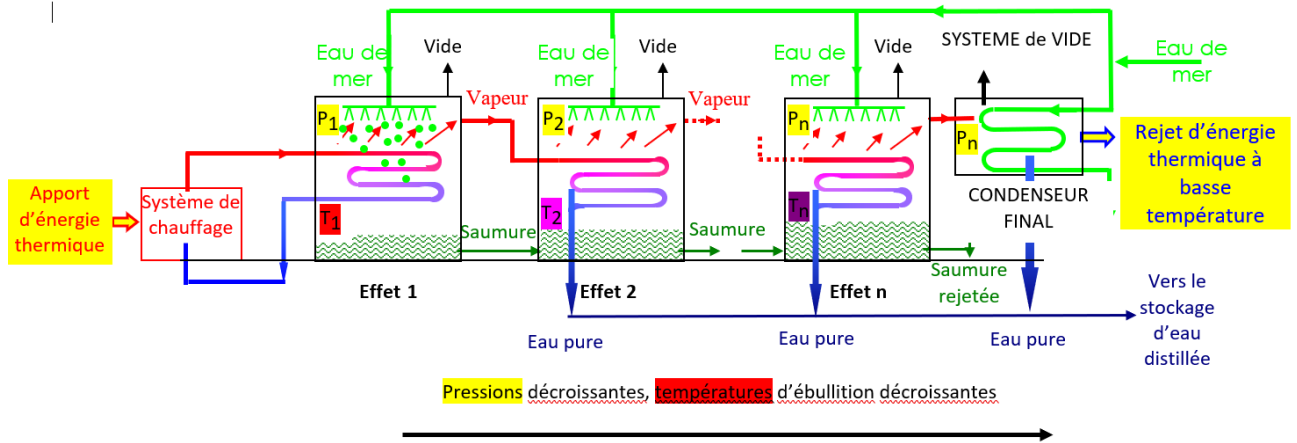


Figure I. 5 : Une image qui illustre le principe d'un système à évaporateurs à effets multiples [2].

I.5.3.1 AVANTAGES DU MULTIPLE EFFET :

- ✓ Souplesse de fonctionnement (15 à 100% du régime nominal).
- ✓ Qualité de l'eau potable (inférieure à 30 ppm).
- ✓ Consommation énergétique indépendante de la salinité.
- ✓ Démarrage rapide et faibles températures de fonctionnement.
- ✓ Utilisation de matériaux économiques et durables.

I.5.3.2 INCONVENIENTS DU MULTIPLE EFFET :

- ✓ Durée de construction prolongée.
- ✓ Dépendance à l'énergie thermique disponible.
- ✓ Rendement faible (30 à 40%).
- ✓ Encombrement.
- ✓ Sensibilité aux problèmes d'encrassement.

I.5.4 DISTILLATION PAR COMPRESSION DE VAPEUR

La distillation par compression de vapeur est un procédé qui se base sur le principe de récupérer la chaleur de condensation en utilisant une injection d'énergie sous forme mécanique. Ce procédé peut être appliqué dans un évaporateur simple ou dans un système à multiples effets.

Le fonctionnement de ce procédé commence par l'aspiration de la vapeur produite dans le dernier effet, ou dans l'unique effet si l'installation est de petite taille, par un compresseur. Après la compression, cette vapeur à haute pression atteint une température plus élevée que celle qui règne dans l'évaporateur. L'évaporateur peut alors servir de condenseur pour cette vapeur, laquelle traverse un réseau de tuyaux. Cette interaction réchauffe l'eau à dessaler en lui transférant la chaleur de condensation, amorçant ainsi un nouveau cycle. En fin de compte, cette eau est évacuée sous forme d'eau distillée.

Ce système, qui génère de l'eau pure, présente un coût énergétique moyen de 7 à 14 kWh/m³. Il est important de noter que ce système ne fonctionne qu'à l'aide de l'énergie électrique. [2].

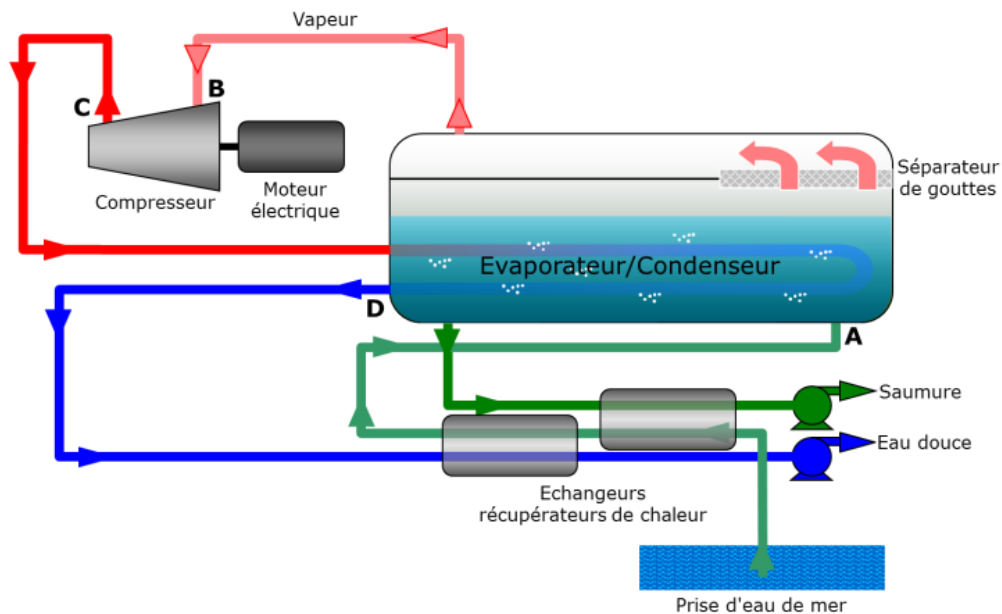


Figure I. 6 : Une illustration d'un dessaleur fonctionnant selon le principe de la distillation à simple effet par compression [2].

I.5.4.1 AVANTAGES DE LA COMPRESSION DE VAPEUR :

- ✓ Réduction significative de la consommation énergétique et de la surface de transfert, notamment lorsqu'elle est associée aux multiples effets.
- ✓ Obtention d'une eau distillée avec une faible salinité (environ 20 ppm).
- ✓ Amélioration des performances énergétiques et réduction notable de la surface d'échange lorsqu'intégrée aux multiples effets.

I.5.4.2 INCONVENIENTS DE LA COMPRESSION DE VAPEUR :

- ✓ Principalement adaptée aux faibles productions d'eau potable, ce qui limite son utilisation à grande échelle.
- ✓ Coûts d'exploitation élevés.
- ✓ Absence de contrôle de la qualité de l'eau, ce qui peut être un inconvénient en matière de gestion de la pureté de l'eau produite.
- ✓ Faible rendement de compression avec la compression par éjecteur, tandis que la compression mécanique est limitée par des coûts d'investissement élevés et une consommation énergétique du compresseur également élevée, malgré un rendement généralement supérieur à celui de l'éjecteur.

I.5.5 DESSALEMENT MEMBRANAIRES

I.5.5.1 DESSALEMENT AVEC L'OSMOSE INVERSE

✓ **Définition de membrane** : La membrane est composée d'une surface plane avec une perméabilité sélective comme caractéristique principale. Son objectif principal est de séparer le sel de l'eau. En outre, elle joue un rôle dans la rétention des éléments indésirables présents dans l'eau, tels que les micro-algues, les bactéries, certains virus, les micro-organismes et les micropolluants. Elle contribue à la réduction de la turbidité de l'eau trouble, limite la formation de sous-produits lors de la désinfection, et facilite ainsi la production d'eau de qualité.

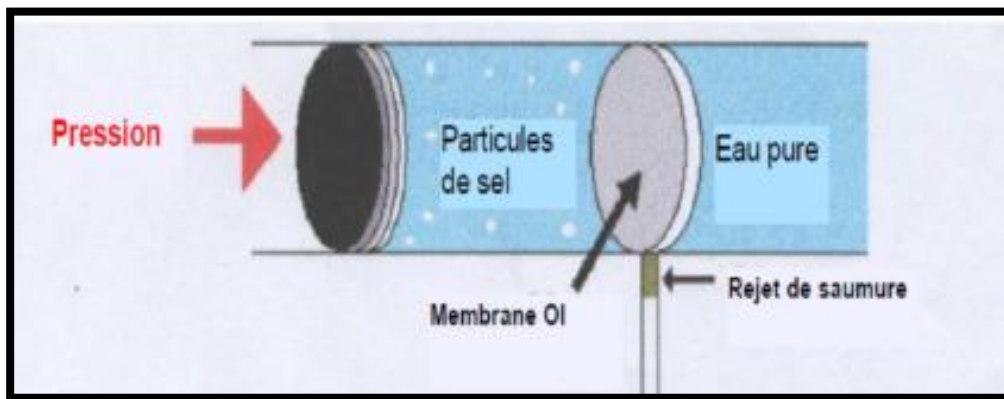
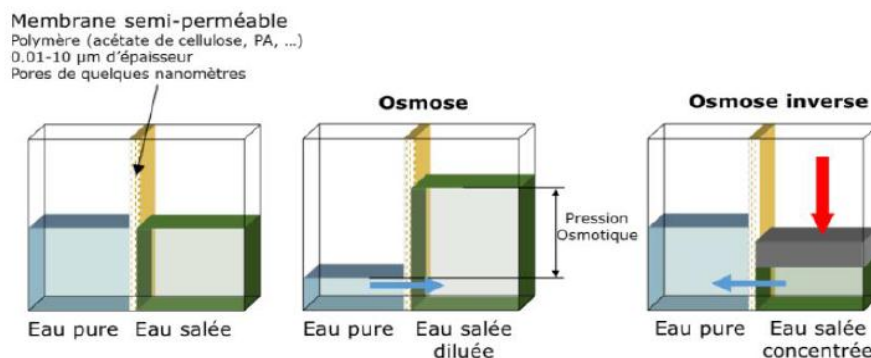


Figure I. 7 Une illustration d'un dessaleur fonctionnant selon le principe d'osmose inverse [2]

✓ L'osmose inverse :

L'osmose est un phénomène naturel qui se produit lorsque deux solutions de concentrations salines différentes sont séparées par une membrane. Dans ce processus, l'eau se déplace spontanément de la solution la moins concentrée vers la solution la plus concentrée. Cependant, si une pression supérieure à la pression osmotique est appliquée, le solvant se déplacera de la solution concentrée vers la solution diluée, ce qui est appelé osmose inverse. La pression osmotique est la pression requise pour stopper le flux de solvant à travers la membrane depuis la solution concentrée. La figure suivante illustre ces phénomènes d'osmose et d'osmose inverse.



I.5.5.2 LES AVANTAGES DU DESSALEMENT D'OSMOSE INVERSE:

- 1) **Faible consommation énergétique :** Il nécessite seulement 3 à 4 kWh/m³, ce qui le rend économe en énergie par rapport à d'autres méthodes.
- 2) **Investissements plus faibles :** Les coûts d'investissement initiaux sont généralement plus bas que ceux d'autres procédés de désalinisation ou de purification de l'eau.
- 3) **Large gamme de capacités :** Il peut être adapté à une large gamme de besoins, jusqu'à d'énormes quantités de 320 000 m³ par jour.
- 4) **Qualité de l'eau produite conforme aux normes de l'OMS :** L'eau produite par osmose inverse atteint généralement une salinité proche des normes de qualité de l'Organisation mondiale de la santé (OMS).
- 5) **Souplesse de fonctionnement :** Il peut être mis en service très rapidement, offrant une grande flexibilité opérationnelle.

I.5.5.3 LES INCONVENIENTS ASSOCIES AU DESSALEMENT D'OSMOSE INVERSE :

- 1) **Sensibilité des membranes au colmatage :** Les membranes utilisées dans le processus sont sensibles à l'encrassement, ce qui peut entraîner une réduction de l'efficacité du système.
- 2) **Prétraitement complexe et coûteux :** Avant de passer par le processus d'osmose inverse, l'eau nécessite souvent un prétraitement coûteux pour éliminer les impuretés, les particules et les agents de colmatage potentiels.
- 3) **Renouvellement périodique des membranes :** Les membranes ont une durée de vie limitée et doivent être remplacées périodiquement, ce qui peut entraîner des coûts opérationnels supplémentaires.
- 4) **Sensibilité aux variations de salinité :** La performance de l'osmose inverse peut être influencée par la salinité de l'eau de mer, ce qui peut nécessiter des ajustements ou des traitements supplémentaires.
- 5) **Nécessité de déminéralisation complémentaire :** Pour obtenir de l'eau de haute pureté, notamment pour des applications industrielles telles que l'industrie électronique, une déminéralisation complémentaire peut être nécessaire, ce qui ajoute à la complexité et aux coûts du processus.

I.5.6 DESSALEMENT AVEC D'ELECTRODIALYSE :

L'électrodialyse repose sur des membranes imperméables à l'eau sélectives aux ions. Ces membranes laissent passer uniquement les ions, avec les membranes anioniques pour les anions et les membranes cationiques pour les cations.

Ce processus électrochimique permet de retirer sélectivement les ions d'une solution tout en préservant les substances peu ou non ionisées. L'électro-dialyseur fonctionne avec deux compartiments, séparés par des membranes anioniques et cationiques, où les cations se déplacent vers la membrane cationique et les anions vers la membrane anionique.

Cela entraîne l'appauvrissement en ions dans le compartiment (1), le rendant dilutif, et l'enrichissement en ions dans le compartiment (2), le rendant concentré, sans altérer les substances non ionisées. L'électro-dialyseur est composé de nombreux compartiments alimentés électriquement, avec des électrodes aux extrémités, et des membranes alternées anioniques et cationiques.

L'électrodialyse trouve des applications majeures dans le dessalement de l'eau saumâtre (sel < 500 mg/l), le traitement des sous-produits de l'industrie laitière comme le lactosérum (lactose), et des utilisations innovantes en industrie chimique, notamment pour la purification des composés non ionisés en éliminant les électrolytes.. [2].

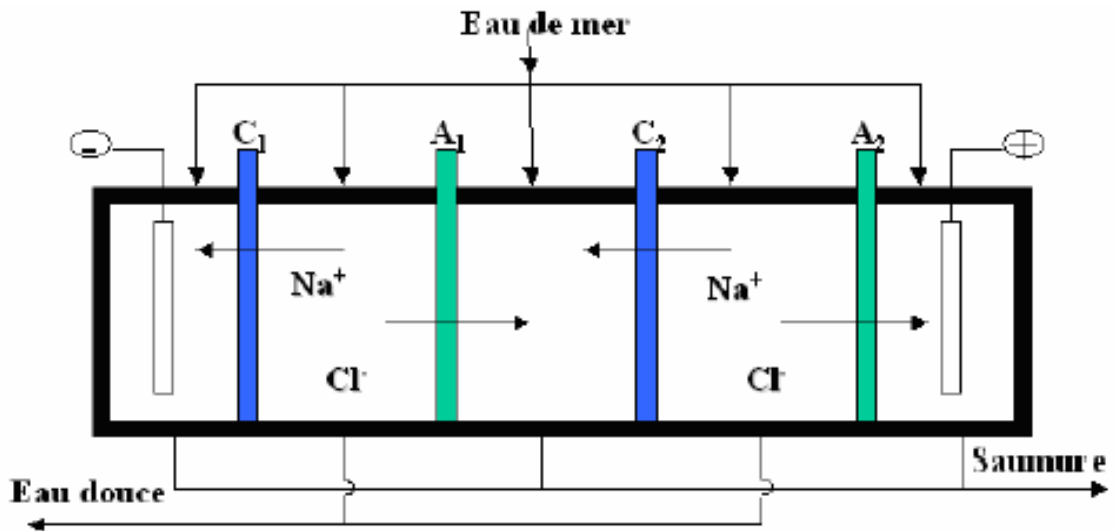


Figure I. 8 : Une illustration d'un dessaleur fonctionnant selon le principe d'électrodialyse [2]

| Méthode | Avantages | Inconvénients |
|------------------------------|---|---|
| Multiple effet | <ul style="list-style-type: none"> ✓ Une production importante avec un investissement initial peu élevé. ✓ Un niveau élevé de pureté, inférieur à 30 parties par million (ppm). ✓ L'approvisionnement en énergie est indépendant de la teneur en sel. ✓ Un besoin de maintenance minimal. | <ul style="list-style-type: none"> ✓ La dépendance au type d'énergie disponible. ✓ Un processus de construction de longue durée. ✓ Des défis liés au contrôle de la qualité de l'eau. ✓ Un rapport de production situé entre 30 % et 40 %. ✓ Requiert de la main-d'œuvre. ✓ Occupe un espace considérable. |
| Osmose inverse | <ul style="list-style-type: none"> ✓ Convient pour l'utilisation avec de l'eau de mer et de l'eau saumâtre. ✓ Offre une flexibilité en ce qui concerne la quantité et la qualité de l'eau. ✓ Une faible consommation d'énergie par rapport aux systèmes MED (Multi-Effect Distillation) et VC (Vapor Compression). ✓ Occupe peu d'espace. ✓ Possède une capacité d'arrêt et de démarrage du système flexible | <ul style="list-style-type: none"> ✓ La qualité de l'eau d'alimentation est faible, avec une concentration de 250 à 500 ppm. ✓ Il est nécessaire d'avoir une source d'eau d'alimentation de haute qualité. ✓ Les coûts d'investissement et d'exploitation sont relativement élevés. ✓ Une pression d'alimentation élevée est requise. ✓ La construction pour une production à grande échelle prend un certain temps. |
| Compression de vapeur | <ul style="list-style-type: none"> ✓ La qualité de l'eau est élevée, avec une concentration de seulement 20 ppm. ✓ Une charge opérationnelle élevée est nécessaire. ✓ La construction est rapide. ✓ Il y a de la flexibilité dans les opérations et la production. | <ul style="list-style-type: none"> ✓ Les coûts d'exploitation sont élevés. ✓ Il y a une consommation d'énergie élevée. ✓ Il n'y a pas de système de contrôle de la qualité de l'eau en place. |
| Electrodialyse | <ul style="list-style-type: none"> ✓ Fonctionne avec un investissement initial peu élevé et accepte diverses sources d'énergie. ✓ Atteint un taux de conversion élevé, atteignant jusqu'à 80 %. ✓ Réduit la consommation d'énergie de manière significative. ✓ Occupe peu d'espace et nécessite peu de matériaux. | <ul style="list-style-type: none"> ✓ Convient pour une plage de capacité allant de faible à moyenne en utilisant de l'eau saumâtre avec une concentration moyenne d'environ 3000 ppm. ✓ Exige un prétraitement minutieux de l'eau d'alimentation. ✓ Possède une capacité de production limitée. ✓ La pureté du produit final est influencée par la qualité de l'eau d'alimentation. |
| Multi-flash | <ul style="list-style-type: none"> ✓ Peut s'adapter à une gamme variée de niveaux de salinité de l'eau d'alimentation. ✓ Produit de l'eau de haute pureté, avec une concentration inférieure à 30 ppm. ✓ Possède une grande capacité de production. ✓ Nécessite peu de compétences techniques pour son exploitation. ✓ Permet la production simultanée d'eau et d'électricité. ✓ Demande une entrée énergétique élevée. | <ul style="list-style-type: none"> ✓ Un rapport de production relativement bas, oscillant entre 30% et 40%. ✓ Les coûts d'exploitation sont élevés. ✓ Les exigences de construction sont importantes. ✓ Il y a un potentiel limité pour apporter des améliorations. |

I.6 PRINCIPAUX AVANTAGES ET INCONVENIENTS DE DESSALEMENT

L'extraction de sel de l'eau offre indéniablement des avantages, mais il est important de noter que quel que soit le processus employé, elle comporte également des désavantages [3].

I.6.1 CONSIDERATIONS ECONOMIQUES

Dans le cadre des aspects économiques, les indicateurs suivants ont été pris en compte :

- ✓ Le coût de l'énergie, qui est tributaire de sa nature (énergie renouvelable, gaz, fioul) et de sa disponibilité au niveau local (qu'elle soit importée ou produite sur place).
- ✓ Les dépenses liées aux produits chimiques, variant en fonction de leur disponibilité locale ou de leur importation.
- ✓ Les fluctuations des taux de change, particulièrement pour les unités d'osmose inverse provenant des États-Unis, dont les coûts sont influencés par les variations du dollar.
- ✓ Les conditions de financement, incluant les détails et les taux d'intérêt.
- ✓ Les coûts relatifs à la main-d'œuvre.

I.6.2 CONSIDERATIONS TECHNIQUES

Parmi les critères techniques, on retrouve :

- ✓ La salinité de l'eau à traiter, où les procédés de distillation sont généralement adaptés pour les eaux fortement concentrées, tandis que les procédés à membrane sont couramment utilisés pour les eaux saumâtres.
- ✓ La composition chimique de l'eau à traiter, notamment dans le cas des eaux saumâtres, avec des paramètres tels que la dureté et la teneur en sulfates.
- ✓ Les caractéristiques physiques de l'eau, comme la turbidité et la présence de matières en suspension, qui influent sur le choix du prétraitement approprié.
- ✓ La salinité de l'eau produite, pouvant varier en fonction de l'usage envisagé, allant de 300 à 500 ppm pour l'approvisionnement en eau potable à 15-30 ppm pour les besoins en eau industrielle.
- ✓ La disponibilité des différentes sources d'énergie, telles que le gaz, le pétrole, l'électricité, les énergies renouvelables, le nucléaire et l'énergie récupérée.

CHAPITRE II:

Utilisation de dessalement

MSF

Dans les productions

industrielles

(Cas de complexe GL2/Z)

II INTRODUCTION :

Les installations de liquéfaction de gaz naturel (GNL) nécessitent une quantité significative de vapeur, qui sert à la fois de source de chaleur et de force motrice pour les équipements rotatifs. L'eau distillée ou dessalée joue un rôle crucial, notamment en tant que générateur de vapeur et agent de refroidissement dans les échangeurs et les condenseurs de la section Utilités.

Le complexe GL2/Z est équipé de six (06) unités de dessalement. Trois d'entre elles (2010LA/B/C) ont été fournies par SASAKURA lors de la construction initiale du complexe en 1978. Deux autres unités (2010 LE/D) de fabrication AQUA-CHEM ont été ajoutées lors d'une rénovation en 1994. Enfin, une sixième unité (2010 LF) fabriquée par WEIR ENTROPIE a été installée en 2004. [13]

Il est important de noter que les cinq premières unités de dessalement (2010LA/B/C/D/E) utilisent un procédé de distillation à plusieurs étages à simple effet (MSF). Chacune de ces unités a une capacité de production de 45,3 m³/h de distillat, ce qui totalise une capacité combinée de 226,5 m³/h pour ces cinq unités. En revanche, le dessaleur 2010 LF fonctionne selon le procédé de Thermo Compression Distiller (TCD) avec évaporation sous vide et condensation. Il a une capacité de production de 60 m³/h de distillat et 12 m³/h de condensât de la vapeur à 17 bars. [13]

L'eau distillée est principalement utilisée comme alimentation pour les chaudières. Chaque unité est conçue pour fonctionner de manière autonome ou en parallèle avec les autres unités du complexe.

II.1 DESCRIPTION DE L'UNITE DE DESSALEMENT DE TYPE « MSF » :

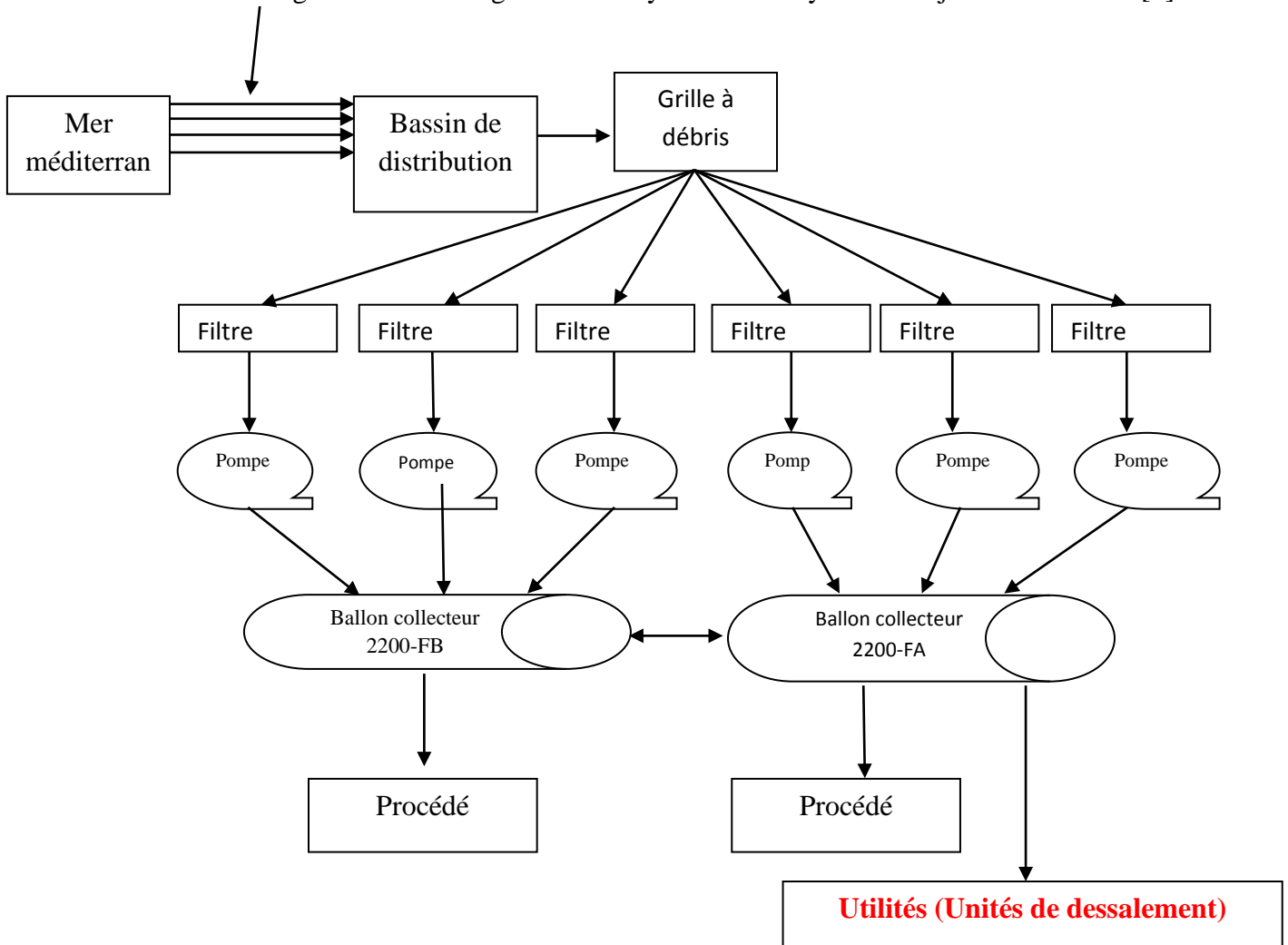
Tout d'abord, l'eau de mer de la Méditerranée est acheminée vers un bassin de distribution, à partir duquel elle passe par une série de prétraitements avant d'être répartie pour alimenter plusieurs réseaux, notamment le système de refroidissement à l'eau de mer, les réseaux d'eau distillée, le dessalement d'eau de mer et le réseau d'incendie. Le schéma ci-dessous illustre le cheminement de l'eau de mer vers les unités de dessalement.

L'unité de dessalement de type « MSF » du complexe GL2/Z est constituée de cinq (05) unités identiques qui produisent de l'eau distillée avec une concentration en sel dissous inférieure à 2 ppm. Chacune de ces unités est composée de huit (08) étages (cellules) disposés en configuration à deux passes, avec un écoulement transversal et sans recyclage. Chaque unité a une capacité de production de 45,3 m³/h.[13]

Les équipements qui composent une unité de dessalement sont les suivants :

- ✓ Filtre d'eau de mer : 2011 L A, B, C, D, E ;
- ✓ Évaporateur : 2010 LI A, B, C, D, E ;
- ✓ Réchauffeur de saumure : 2010 C A, B, C, D, E ;
- ✓ Éjecteur et condenseur : 2010 J5 A, B, C, D, E ;
- ✓ Pompe de surpression d'eau de mer : 2010 J1 A, B, C, D, E ;
- ✓ Pompe de purge de saumure : 2010 J2 A, B, C, D, E ;
- ✓ Pompe à eau distillée : 2010 J3 A, B, C, D, E ;
- ✓ Pompe à condensât : 2010 J4 A, B, C, D, E ;
- ✓ Pompe d'injection de produits chimiques : 2010 J/JA A, B, C, D, E ;
- ✓ Désurchauffeur : 2010 M A, B, C, D, E ;
- ✓ Bac de produits chimiques de nettoyage : 2010 JJF A, B, C, D, E ;
- ✓ Pompe à produits chimiques de nettoyage : 2010 JJ/JJA A, B, C, D, E.

6 tubes de filtre grossier sont intégrés dans le système + un système d'injection de chlore [4] .



II.1.1 LES DISPOSITIFS DE FILTRATION DE L'EAU DE MER :

L'eau de mer provenant de l'alimentation est soumise à un processus de filtration grâce à des filtres dénommés A, B, C, D, E (d'une capacité totale de 2011 litres) qui fonctionnent en continu. Ils sont équipés d'un mécanisme permettant un lavage à contre-courant cyclique préétabli, variant de 30 minutes à 24 heures.

Ces filtres à eau de mer sont conçus pour capturer les particules de plus grande taille et les matières solides présentes dans l'eau de mer.

II.1.2 LE SYSTEME D'EVAPORATION

À la sortie des filtres, un supprimeur d'eau de mer (pompe 2010 J1 A/B/C/D/E) redirige l'eau vers l'évaporateur et l'éjecteur condenseur. L'eau de mer, appelée saumure, est introduite dans l'évaporateur et répartie dans huit compartiments distincts par un faisceau tubulaire qui joue le rôle de condenseur lorsqu'il entre en contact avec la vapeur d'eau évaporée.

La saumure est ensuite chauffée par un réchauffeur de saumure (2010 C A/B/C/D/E) pour atteindre une température de 90 °C, puis elle est renvoyée vers l'évaporateur où elle circule en sens inverse des faisceaux tubulaires. Grâce à la saumure chaude et au vide généré par les éjecteurs de vapeur, l'évaporation a lieu. Chaque compartiment est équipé d'un tamis débrumeur qui capture les gouttelettes de saumure, puis la vapeur est condensée au contact d'un condenseur (faisceau).[7]

L'eau douce ainsi produite s'écoule dans le bac d'eau distillée à travers chaque compartiment, du premier au huitième. Ensuite, elle est pompée vers le bac de stockage par la pompe à eau distillée (2010 J3 A, B, C, D, E, 2041 F). Un niveau de saumure est maintenu au dernier étage, et celle-ci est évacuée vers le canal de rejet par la pompe de purge de saumure (2010 J2 A, B, C, D, E). Les gaz incondensables sont éliminés du système de vide grâce à l'éjecteur.[7]

II.1.3 LE RECHAUFFEUR DE SAUMURE

Le réchauffeur de saumure est un échangeur à calandre qui apporte une quantité supplémentaire de chaleur à la saumure pour faciliter son évaporation. L'eau de mer entre du côté du tube du réchauffeur à une température de 78,6 °C, où elle est chauffée par la vapeur désurchauffée jusqu'à atteindre une température de service de 90 °C. Un réservoir situé au fond de la calandre collecte la vapeur condensée, et son niveau est maintenu constant à l'aide d'un régulateur de niveau de condensat.

Une pompe de condensat (2010 J4 A, B, C, D, E) renvoie le condensat vers le désurchauffeur (2010 M A, B, C, D, E) et/ou vers le retour de condensat. Les gaz incondensables sont évacués par l'éjecteur.

II.1.4 L'EQUIPEMENT DE DESURCHAUFFAGE

Le désurchauffeur a pour fonction de fournir au réchauffeur de saumure de la vapeur saturée à 100 °C. Il accomplit cela en réduisant la température de la vapeur à l'aide du condensat en tant qu'agent de désurchauffée.

II.1.5 LES EJECTEURS ET LE CONDENSEUR

La création d'un vide à l'intérieur de l'évaporateur repose sur deux éjecteurs, chacun comportant deux étages, ainsi qu'un condenseur divisé en deux étages distincts, à savoir le condenseur intermédiaire et le condenseur secondaire. Les gaz incondensables provenant de l'évaporateur et du réchauffeur de saumure sont évacués via les lignes d'évent vers le système éjecteur-condenseur, puis rejetés dans l'atmosphère. La vapeur qui alimente les éjecteurs provient du réseau sous une pression de 17 bars et est ensuite évacuée vers le condenseur.

Le premier éjecteur, responsable de la création du vide dans l'évaporateur, décharge sa vapeur à l'intérieur du condenseur intermédiaire.

L'objectif principal de maintenir une basse pression dans les étages est de permettre la détente à une température réduite, afin d'éviter la formation de tartre dur et de réduire le phénomène de moussage.

II.2 PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT DE L'UNITE DE DESSALEMENT « MSF » :

Le principe de fonctionnement de l'unité de dessalement "MSF" (Multi-Stage Flash) est le suivant [14] :

1. L'eau de mer est chauffée jusqu'à ce qu'elle atteigne le point d'ébullition, où elle se transforme en vapeur.
2. Cette vapeur est dirigée vers un condenseur où elle est refroidie et redevient de l'eau distillée (distillat).
3. Le processus de "flash" se produit lorsque la saumure (l'eau de mer restante après l'évaporation) entre dans le premier étage de l'évaporateur, qui est maintenu à une pression inférieure à la pression atmosphérique.
4. Les gouttelettes de saumure emportées par la vapeur sont éliminées par des dispositifs appelés demi-stères, permettant à la vapeur de se condenser en distillat sur les tubes du condenseur.
5. Le processus de distillation fonctionne avec une variation de pression d'étage en étage, passant d'un vide bas dans le premier étage à un vide plus poussé dans le dernier étage. Cette différence de pression entre les étages est cruciale pour répéter le processus de flash.
6. Le vide dans les étages est créé par un système de vide situé en haut de l'unité de dessalement, composé d'éjecteurs et de condenseurs barométriques. Ce système élimine les gaz non condensables produits pendant le fonctionnement.
7. L'eau de mer d'alimentation est prélevée par une pompe booster, filtrée, puis acheminée vers la boîte de distribution et les tubes du condenseur. Pendant ce trajet, elle est progressivement réchauffée par la vapeur provenant de la saumure qui se condense à l'extérieur des tubes.
8. L'eau de mer préchauffée dans l'évaporateur est ensuite soumise à un réchauffement supplémentaire dans le réchauffeur de la saumure, portant sa température à environ 91°C. Elle est ensuite régulée en termes de débit et introduite dans la première cellule.
9. La vapeur résultant de la condensation due au réchauffement de l'eau d'alimentation est acheminée vers le ballon de condensât, puis vers un collecteur de condensât grâce à la pompe J3.
10. La vapeur, détendue progressivement à chaque cellule, est recueillie dans le réservoir du dernier étage (8ème) et ensuite dirigée vers la pompe produit J4. Si elle répond aux spécifications de qualité, elle est envoyée vers le stockage. Cependant, les systèmes de condensât et de produit sont équipés d'un dispositif de contrôle appelé conductimètre, qui déclenche leur rejet en cas de mauvaise qualité.

CHAPITRE III :
LES PROBLÈMES
TECHNIQUES
EN DESSALEMENT D'EAU
DE MER

III INTRODUCTION

Lorsqu'il s'agit de dessaler l'eau de mer pour la rendre potable ou utilisable à des fins industrielles, plusieurs défis majeurs se posent. Ces défis comprennent principalement les problèmes d'entartrage, de corrosion, de colmatage des surfaces d'échange, et de développement biologique. Ces enjeux sont au cœur des préoccupations lors de la mise en œuvre de processus de dessalement de l'eau de mer, et leur gestion efficace est essentielle pour garantir la qualité et la durabilité du processus de dessalement. Dans cette introduction, nous allons examiner de plus près chacun de ces problèmes clés et comprendre leur impact sur le dessalement de l'eau de mer.[15]

III.1 DEVELOPPEMENT BIOLOGIQUE

Le développement bactérien dans les circuits d'eau à vapeur est fréquent et dépend du type de bactéries présentes. Dans le cas des bactéries aérobies, il peut entraîner des phénomènes de corrosion en milieu aéré. Ces bactéries aérobies génèrent des métabolismes qui conduisent à la formation de dépôts organiques, parfois considérables, pouvant obstruer les tubes des échangeurs thermiques.

Quant aux corrosions en milieu non aéré dans les circuits d'eau à vapeur, elles se développent sous ces dépôts et sont provoquées par des bactéries aérobies, dont les Bactéries Sulfats-Réductrices (BSR) sont les plus courantes. Ces BSR produisent de l'hydrogène sulfuré, une substance extrêmement corrosive pour les matériaux tels que les cupronickels

III.2 PROBLEME D'ENTARTRAGE

Lorsque l'eau de mer est chauffée dans un évaporateur, elle atteint ou dépasse souvent ses limites de solubilité. En conséquence, des dépôts se forment sur les surfaces d'échange de chaleur en raison de la présence d'ions tels que le calcium (CaCO_3), l'hydroxyde de magnésium ($\text{Mg}(\text{OH})_2$) et le sulfate de calcium (CaSO_4) dans les eaux salines.

III.2.1 GENERALITES SUR LA THEORIE DE L'ENTARTRAGE

Pour qu'un dépôt de tartre se forme sur une surface d'échange, deux conditions principales doivent être satisfaites :

Il est nécessaire que la limite de solubilité soit dépassée, ce qui signifie qu'il doit y avoir une sursaturation. Cela relève de l'aspect thermodynamique du processus.

Ensuite, la vitesse de déposition doit être suffisamment rapide, ce qui concerne l'aspect cinétique de la formation du dépôt.

III.2.2 PROBLEMES ENGENDRES PAR LE TARTRE :

- ✓ Pellicules isolantes : réduction d'échange thermique
- ✓ Réduction section de tubes : réduction de débit.
- ✓ Possibilités corrosion sous tartre.

Lorsque des dépôts se forment, la circulation du liquide est perturbée, ce qui a plusieurs conséquences directes. Tout d'abord, la section de passage du liquide diminue, entraînant une augmentation de la vitesse de circulation du fluide. Cela a pour résultat une diminution du transfert de chaleur, ce qui, à son tour, peut entraîner une variation du rendement de l'appareil. De plus, il existe un risque d'apparition de points chauds, susceptibles de provoquer la surchauffe du matériau, ce qui peut entraîner des déformations et des ruptures des tubulures.

Même les dépôts non adhérents, tels que le sel de calcium ou la rouille (oxyde métallique), peuvent se déposer dans les zones à faible vitesse d'écoulement, obstruant partiellement ou complètement les tubes du condenseur ou du réchauffeur de la saumure, notamment. Tout cela se traduit par une diminution du rendement thermique de l'installation, ce qui se traduit par une consommation excessive de vapeur, entraînant ainsi des coûts élevés de production d'eau distillée par mètre cube [5].

III.2.3 DIFFERENTS MOYENS DE LUTTE CONTRE L'ENTARTRAGE :

Plusieurs méthodes sont disponibles pour prévenir efficacement la formation de tartre. Il s'agit notamment de la décarbonatation à la chaux, de la décarbonatation à l'acide, de la germination, de l'adoucissement à l'aide de résines et de l'utilisation d'inhibiteurs d'entartrage. Dans la plupart des installations de dessalement, la méthode des inhibiteurs d'entartrage est généralement privilégiée :

III.2.3.1 INHIBITEURS D'ENTARTRAGE

Les inhibiteurs d'entartrage sont des composés tartriques introduits en très petites quantités (quelques parties par million) dans l'eau d'appoint. Leur fonction principale est de prévenir ou de réduire au minimum l'accumulation de dépôts sur les surfaces d'échange thermique [9].

III.2.4 LE LESSIVAGE ACIDE

Le lessivage acide est une étape importante dans la maintenance des installations de dessalement. Même si un traitement antitartre continu ne peut pas totalement prévenir la formation de dépôts alcalins sur les zones soumises à des températures élevées, il est essentiel de les éliminer après un certain nombre d'heures de fonctionnement de l'unité, généralement tous les six mois.

Pour éliminer complètement ces dépôts de tartre, il est recommandé d'effectuer une opération de lessivage acide. Cette procédure implique la circulation d'une solution concentrée d'acide inhibé,

qui combine de l'acide sulfamique avec de la Rhodine 141, dans le but de dissoudre le tartre sans endommager les tubes des faisceaux.

Dans des conditions normales, deux lessivages acides par an suffisent pour une unité bien entretenue qui fonctionne conformément à ses spécifications thermiques de conception. La durée du lessivage acide dépend de la quantité de tartre à éliminer, et pendant cette opération, il est important de prendre des notes précises sur la quantité d'acide utilisée, la durée du lessivage, ainsi que les variations de pH et de température de la solution de dilution.

Une fois le lessivage chimique terminé, il est nécessaire de relever les paramètres de fonctionnement de l'unité afin d'évaluer ses performances. L'acide sulfamique est le produit recommandé pour le lessivage, généralement dilué à une concentration de 8 à 10 % en poids, avec une inhibition de 2 à 5 % en poids en utilisant la Rhodine 141M. [6]

III.3 PROBLEME DE CORROSION

III.3.1 DEFINITION DE LA CORROSION

La corrosion désigne le processus destructif subi par un métal lorsqu'il réagit chimiquement ou électro-chimiquement avec son environnement. C'est un phénomène inévitable qui se produit lorsque des métaux entrent en contact avec des réactifs liquides. La corrosion est une branche de la chimie car elle implique des réactions entre un métal et une substance liquide. Elle ne peut pas être entièrement expliquée par les lois classiques de la thermodynamique chimique, car elle dépend de nombreux facteurs qui interagissent souvent simultanément, notamment des aspects chimiques, électrochimiques, métallurgiques, structuraux et mécaniques.

L'eau de mer, en particulier à des températures élevées, est connue pour sa forte agressivité envers les métaux, en raison de plusieurs facteurs, notamment sa composition chimique avec une concentration élevée en ions chlorures, une conductivité élevée qui favorise les phénomènes galvaniques, la présence d'oxygène dissous qui contribue à la corrosion, ainsi que la présence de bactéries et d'organismes marins divers, ainsi que parfois d'hydrogène sulfuré (H₂S) en cas de pollution.[16]

III.3.2 TYPE DE CORRESSION :

Les différentes formes de corrosion dans un environnement marin se résument généralement aux types suivants :

- ✓ Corrosion généralisée
- ✓ Corrosion par érosion
- ✓ Corrosion galvanique
- ✓ Corrosion par piqûres
- ✓ Corrosion inter granulaire
- ✓ Corrosion par effet de crevasse

III.3.3 PROBLEMES ENGENDRES PAR LA CORROSION :

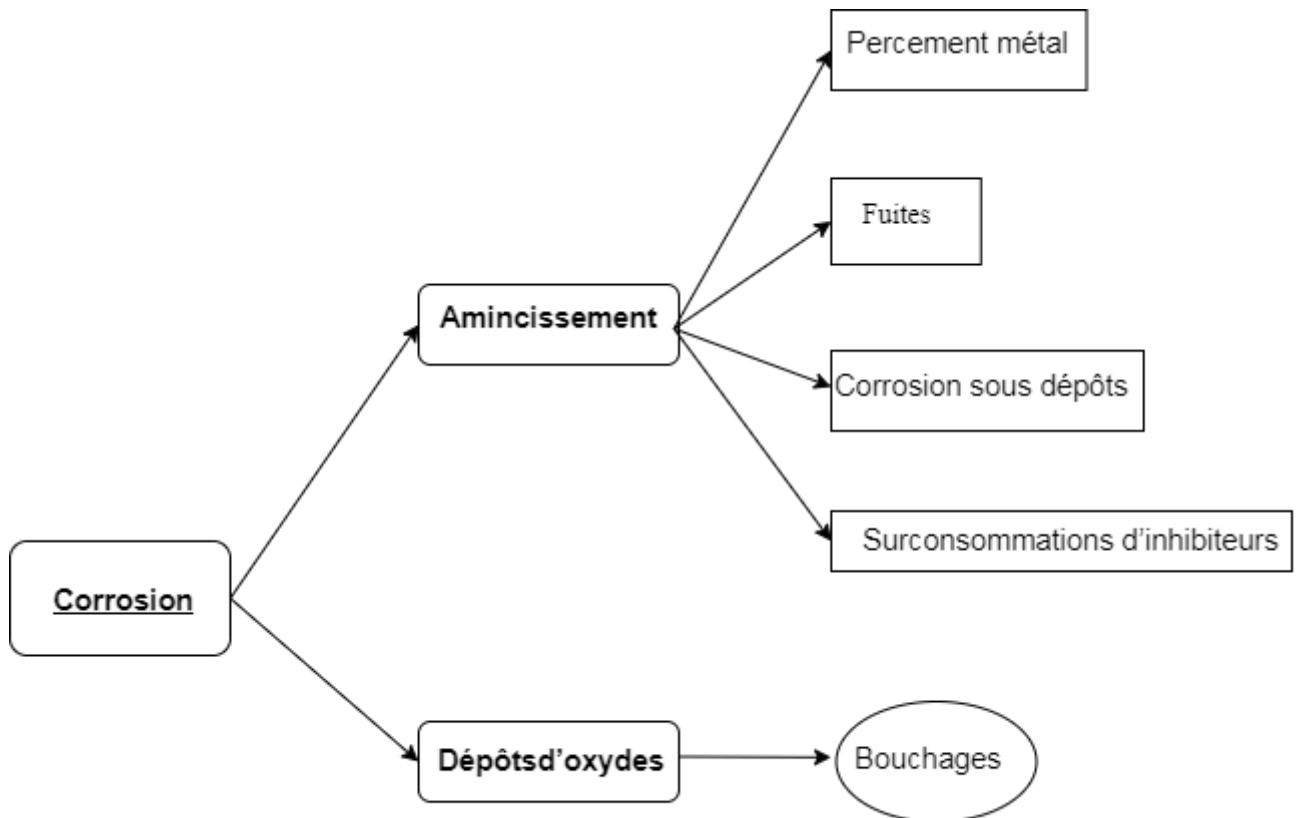


Figure III. 1 : schéma qui représente les problèmes engendrés par la corrosion

III.4 LES PRINCIPAUX FACTEURS INFLUENÇANT LA CORROSION :
III.4.1 LA SALINITE :

L'eau de mer est un environnement complexe sur le plan chimique et biologique. Son pH est généralement constant (environ 8,2), mais ses composants ont généralement un impact négatif sur la résistance à la corrosion des métaux. En fait, l'eau de mer est considérée comme un milieu particulièrement agressif en raison de sa forte salinité, ce qui entraîne une conductivité élevée. Cette conductivité élevée favorise la formation de couples galvaniques, ainsi que des attaques localisées. Dans de telles situations, la résistance de l'électrolyte devient négligeable dans la régulation des courants de corrosion. De plus, les chlorures, parmi les halogénures présents dans l'eau de mer, ont tendance à rompre les films d'oxydes qui sont responsables de la passivation et de la résistance à la corrosion de nombreux alliages. Cela constitue la première étape de la corrosion par effet de crevasse ou par piqûres. Les chlorures sont donc des ions très actifs dans ces types de corrosion. De plus, les chlorures produisent des produits de corrosion acides, ce qui rend difficile la restauration des films passifs. En ce qui concerne la corrosion généralisée, les taux de corrosion ont généralement tendance à augmenter avec la concentration en sels.[16]

III.4.2 L'OXYGENE :

L'oxygène joue un rôle essentiel dans la corrosion en milieu marin. Dans l'eau de mer, la réaction cathodique prédominante est généralement la réduction de l'oxygène dissous, produisant des ions OH⁻. Une augmentation de la concentration en oxygène favorise cette réaction et peut entraîner une augmentation de la corrosion par dépolarisation cathodique. De plus, les variations de la concentration en oxygène à la surface d'un matériau donné (causées par des gradients de vitesse, la présence de crevasses ou de dépôts, par exemple) sont à l'origine de la corrosion par aération différentielle. Dans ce processus, les surfaces présentant la concentration en oxygène la plus faible deviennent des anodes et subissent une corrosion accélérée, tandis que la réduction de l'oxygène a lieu sur les surfaces où la concentration en oxygène est la plus élevée. Bien que l'oxygène favorise la formation de films passifs sur des matériaux passivables tels que les aciers inoxydables ou les alliages d'aluminium, la présence de chlorures rend ces films imparfaits, augmentant ainsi le risque de corrosion par piqûres avec une teneur en oxygène élevée.

III.4.3 LES BACTERIES :

Les expériences de corrosion menées en utilisant de l'eau de mer synthétique sont généralement moins sévères que celles effectuées avec de l'eau de mer naturelle. Cette disparité s'explique par la présence de micro-organismes dans l'eau de mer qui altèrent localement les conditions de corrosion en formant un biofilm. Les bactéries sulfato-réductrices, à titre d'exemple, prospèrent dans un

environnement anaérobie et sont souvent présentes sous des dépôts, des produits de corrosion ou même dans les systèmes d'eau de mer, même lorsqu'ils sont aérés. Elles représentent un danger pour la plupart des matériaux métalliques, notamment les aciers au carbone et les aciers inoxydables. Les mécanismes sous-jacents de ces attaques font encore l'objet de débats (attaque chimique par les sulfures, corrosion sous dépôt, aération différentielle, dépolarisation cathodique). Actuellement, la lutte contre ce type de corrosion repose principalement sur l'élimination des dépôts et/ou la destruction des bactéries au moyen de bactéricides.

III.4.4 TEMPERATURE ET VITESSE DE CIRCULATION :

En général, la corrosion augmente avec l'élévation de la température et la vitesse de circulation (tant que le milieu reste inchangé). Elle peut devenir gravement préjudiciable lorsque ces paramètres dépassent certaines limites, qui seront précisées ultérieurement pour les principaux matériaux utilisés dans les circuits d'eau de mer. En effet, la plupart de ces matériaux résistent à la corrosion grâce à la présence d'un film protecteur qui recouvre leur surface. Bien que ces films soient solidement fixés à la surface, ils peuvent être localement ou totalement détruits en fonction de la vitesse de circulation de l'eau de mer. D'un autre côté, la vitesse d'écoulement ne doit pas être trop faible pour éviter la formation de dépôts dans les tuyaux. Ces dépôts peuvent entraîner des corrosions sous dépôt, qui résultent d'un effet d'aération différentielle. Cela revêt une importance particulière dans le cas des aciers inoxydables, qui sont très sensibles à la corrosion par crevasse en milieu marin. En règle générale, on estime qu'une vitesse supérieure à 1 ou 1,5 m/s est nécessaire pour éviter la formation de dépôts. D'autres facteurs, tels que la pollution, les salissures et les matières en suspension, ne doivent pas être sous-estimés.[16]

Tableau III. 1 : Vitesse limite de circulation de l'eau de mer

| Matériau | Vitesse limite (en m.s ⁻¹) |
|----------------------------|--|
| Acier au carbone | 0.5 |
| Cuivre | 0.6 |
| Laiton Amirauté | 1.5 |
| Laiton à l'aluminium | 2 |
| Cupronickel 90/10 avec Fer | 23.5 |
| Cupronickel 70/30 avec Fer | 3.0 |
| Titane | 20 |

III.5 LA PROTECTION CONTRE LA CORROSION :

- 1) **Protection par revêtement** : Cette méthode consiste à appliquer un revêtement protecteur sur la surface métallique, ce qui crée une barrière physique entre le métal et l'environnement corrosif. Les revêtements peuvent être des peintures, des vernis, des plaquages métalliques, ou d'autres matériaux conçus pour résister à la corrosion.
- 2) **Protection électrochimique** : La protection électrochimique repose sur le principe de l'électrolyse. Elle implique l'utilisation d'anodes sacrificielles (généralement en zinc ou en magnésium) qui se corrodent à la place du métal que l'on souhaite protéger. Cette méthode est couramment utilisée pour la protection des coques de bateaux et des structures métalliques immergées.
- 3) **Passivation des métaux et alliages** : La passivation est un processus qui consiste à former une couche protectrice d'oxydes sur la surface du métal. Cette couche passive empêche la corrosion ultérieure du métal. Les aciers inoxydables, par exemple, développent naturellement une couche d'oxydes protecteurs.
- 4) **Inhibiteurs de corrosion** : Les inhibiteurs de corrosion sont des produits chimiques ajoutés à l'environnement ou directement au métal pour réduire la vitesse de corrosion. Ils agissent en modifiant les réactions chimiques à la surface du métal, ce qui les rend moins réactives avec les agents corrosifs.

III.6 PROBLEME DE COLMATAGE :

- 1) **Dépôts de matières organiques en suspension** : Les eaux naturelles contiennent souvent des particules de matières organiques en suspension qui ont tendance à se déposer sur les surfaces d'échange des installations.
- 2) **Obstruction des surfaces d'échange** : L'accumulation de ces dépôts entraîne l'obstruction des surfaces d'échange, ce qui augmente la résistance au transfert de chaleur et diminue la capacité de production des installations.
- 3) **Développement de microorganismes** : Dans les parties des installations où les conditions physico-chimiques le permettent, des microorganismes peuvent se développer. Ils contribuent au problème en formant des films biologiques sur les surfaces d'échange, ce que l'on appelle le bio-encrassement.
- 4) **Nature mixte de l'encrassement** : Bien que la nature des dépôts dans le cas du colmatage par des matières organiques (fouling ou bio-encrassement) soit différente de celle observée dans le cas de l'entartrage (dépôts minéraux ou Scaling), dans la réalité industrielle, l'encrassement est souvent de nature mixte, résultant de la contribution des deux types de dépôts.

- 5) **Possibilité de dépôts provenant de la corrosion** : Dans certains cas, des dépôts issus des produits de corrosion peuvent également contribuer au phénomène de colmatage.

En résumé, le colmatage dans les eaux naturelles est un problème complexe causé par l'accumulation de dépôts de matières organiques et la croissance de microorganismes, souvent avec une combinaison de dépôts minéraux. Ce phénomène peut entraîner une réduction de l'efficacité des installations industrielles.

CHAPITRE IV :

VÉRIFICATION DES PARAMÈTRES DE FONCTIONNEMENT DES UNITÉS DE DESSALEMENT

Problématique

Les complexes de GNL sont de grands consommateurs de vapeur qui est, à la fois, une source d'énergie de chauffe et la force motrice des machines tournantes.

L'eau distillée ou dessalée est utilisée essentiellement pour générer de la vapeur ou encore comme réfrigérant dans les échangeurs et les condenseurs situés dans la zone Utilités.

Cette zone est essentiellement autonome et assure la fourniture de toutes les utilités (eau, vapeur, airEtc.), pendant le démarrage et la mise en marche des six (06) trains de liquéfaction, et de toutes les installations de production.

Le procédé de distillation des cinq (05) dessaleurs, en l'occurrence les unités 2010 L A/B/C/D/E, sont de type détente à plusieurs étages multi stage flash(MSF) à simple effet. Ces unités peuvent fonctionner séparément ou en parallèle, la capacité de production de chacune de ces unités est de 45,3 m³/h de distillat, soit une capacité totale de calcul de 226,5 m³/h pour les cinq (05) unités.

Actuellement, le complexe GL2/Z fonctionne avec un taux de production moyen d'environ **12%** pour les cinq (05) dessaleurs.

L'ensemble des unités de dessalement du complexe GL2/Z présente un problème de baisse de production de l'eau dessalée. Cette baisse de production persiste depuis l'année 2022, l'objectif de notre étude est de déceler les origines de cette baisse de la production d'eau dessalée, afin de dégager un plan d'actions pour une meilleure rentabilisation de ces unités.

Le but du présent travail est d'établir un point de situation sur l'exploitation des installations. Cet état des lieux doit servir à relever les anomalies enregistrées dans les unités de dessalement du Complexe GL2/Z.

IV INTRODUCTION :

L'ensemble des unités de dessalement au sein du complexe GL2/Z connaissent actuellement un déclin de leur production d'eau dessalée. L'objectif de ce chapitre est de réaliser une évaluation de l'exploitation des installations et de mettre en évidence les anomalies enregistrées dans ces unités de dessalement au sein du Complexe GL2/Z.

Les cinq unités de dessalement d'eau de mer, désignées sous les noms d'unités (2010 L A/B/C/D/E), sont localisées dans la Zone Utilités du complexe GL2/Z. Chacune de ces unités est capable de maintenir une production continue d'eau distillée atteignant un débit de 45,3 m³/h, présentant une concentration en solides dissous inférieure à 2 ppm. Ces unités peuvent fonctionner indépendamment ou en parallèle. L'eau distillée produite est dirigée vers le réservoir de stockage (2041 F), tandis que la saumure est évacuée par le canal de rejet.

La fonction principale de ces unités de dessalement est de fournir de l'eau d'appoint pour alimenter les chaudières, à la fois pour le processus et les besoins généraux. Il est également important de noter que les unités de dessalement des complexes GL1/Z et GL2/Z sont interconnectées pour répondre aux besoins des deux complexes en cas de besoin.

Il est crucial de souligner qu'un arrêt de production d'eau distillée entraînerait l'arrêt complet de l'ensemble de l'installation en raison du manque d'eau nécessaire à l'alimentation des chaudières. Cela met en évidence l'importance vitale de la production d'eau distillée pour le bon fonctionnement de l'ensemble du système.

Cependant, en fonction des réserves d'eau dans le réservoir de stockage (2041 F) et grâce à l'interconnexion avec le complexe GL1/Z, des arrêts de courte durée peuvent être gérés sans perturber la production globale.

Suite à une présentation de la problématique, des enquêtes et des essais ont été réalisés pour identifier les problèmes majeurs responsables de la diminution de la production d'eau dessalée. Des solutions appropriées ont été élaborées pour résoudre ces problèmes et mettre en place un plan d'action.

IV.1 LA PRODUCTION D'EAU DESSALEE DANS LE COMPLEXE GL2/Z :

Elle est examinée à travers les données suivantes, qui affichent la production mensuelle moyenne des cinq (05) dessaleurs de type MSF. Cette étude couvre la période de janvier 2023 à mai 2023, et les résultats sont présentés dans le tableau suivant :

Tableau IV. 1 : Un graphique montrant la production totale d'eau dessalée des cinq dessaleurs, avec les taux correspondants [10].

| Temps (mois) | Production E.D (m ³ / h) | Taux de production (%) |
|--------------|-------------------------------------|------------------------|
| Janvier 2023 | 24.25 | 10,7 |
| Février 2023 | 26.09 | 11,5 |
| Mars 2023 | 28.51 | 12,6 |
| Avril 2023 | 29.18 | 12,9 |
| Mai 2023 | 28.11 | 12,4 |
| Moyenne | 27.22 | 12,0 |

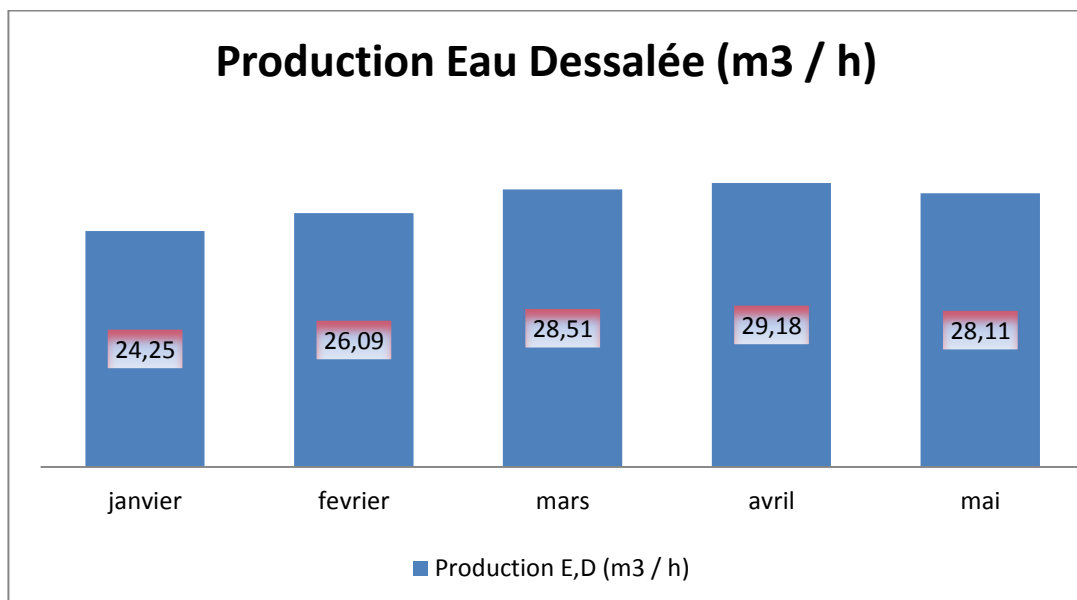


Figure IV. 1 : Un graphique illustrant l'évolution de la production d'eau dessalée au fil du temps pour les cinq dessaleurs de type MSF.

IV.1.1 ANALYSE DES RESULTATS

Les données présentées dans le graphique ci-dessus décrivent les variations de la production moyenne mensuelle des cinq (05) dessaleurs de type MSF sur une période de cinq (05) mois, de janvier 2023 à mars 2023.

Il est évident que la production d'eau dessalée est sujette à des fluctuations importantes, avec une moyenne de production bien en deçà de ce qui était prévu initialement par la conception.

Il est donc notable que la production moyenne des cinq (05) dessaleurs de type MSF s'élève à seulement 27,22 m³/h, en contraste avec la valeur de 226,5 m³/h recommandée par la conception. Cette diminution de la production concerne tous les dessaleurs de type "Multi Stage Flash" situés dans la zone Utilités du complexe GL2/Z.

À l'heure actuelle, le taux de production moyen d'eau dessalée avoisine environ 12 % pour les cinq (05) dessaleurs.

IV.2 ÉTAT ACTUEL DES DESSALEURS PAR RAPPORT A LA CONCEPTION :

Après notre visite sur le site du complexe (zone Utilités), nous avons entrepris la collecte des divers paramètres de fonctionnement des dessaleurs en cours d'exploitation, notamment les unités B/D du mois de juillet 2023. Cette démarche avait pour objectif de réaliser une comparaison de l'ensemble des paramètres de fonctionnement des dessaleurs par rapport à la conception initiale, afin d'identifier les principales causes des problèmes de performance observés.

IV.2.1 DONNEES RELATIVES AU FONCTIONNEMENT DES CINQ DESSALEURS DE TYPE MSF :

Tableau IV. 2 : Présentation des paramètres de fonctionnement des dessaleurs MSF pour le mois d'août 2023

| Paramètres | Dessaleurs | | | | | |
|---|--------------|---------|--------------|---------|--------------|---|
| | 2010 LA | 2010 LB | 2010 LC | 2010 LD | 2010 LE | Design (*) |
| Pression différentielle filtre 2011 L entrée EDM (mbar) | Sous travaux | 1.6 | Sous travaux | 0.5 | Sous travaux | 1.379 à 2.21 barg |
| Pression d'aspiration de la pompe booster (EDM) 2010 L J1 (bar) | Sous travaux | 1 | Sous travaux | 1.7 | Sous travaux | 1,379 à 2,21 barg |
| Pression de refoulement 2010 L J1 (bar) | Sous travaux | 4.5 | Sous travaux | 6 | Sous travaux | 4,7 barg |
| Débit eau de mer en m ³ /h | Sous travaux | 343 | Sous travaux | 392 | Sous travaux | 515 m ³ /h |
| Débit eau dessalée en m ³ /h | Sous travaux | 29 | Sous travaux | 25 | Sous travaux | 45.3 m ³ /h |
| Temps de fonctionnement (Jours) après le dernier lessivage | Sous travaux | 3 ans | Sous travaux | 3ans | Sous travaux | Lessivage après 06 mois (180 Jours) de fonctionnement |

(*) Design : Valeurs de conception recommandées.

Veillez noter que les valeurs "Sous travaux" indiquent que des travaux ou des ajustements étaient en cours pour ces paramètres à la date de l'observation en août 2023

IV.2.2 INTERPRETATION DES PARAMETRES OBSERVES

1) Les paramètres de fonctionnement des dessaleurs 2010 L B/D, tels qu'indiqués dans le tableau précédent, mettent en évidence une limitation de la charge d'alimentation en eau de mer (EDM) qui fluctue entre 343 et 392 m³/h, alors que la conception prévoyait un débit de 515 m³/h. Cette limitation de la charge est principalement due à l'accumulation de dépôts dans les divers orifices par lesquels l'eau de mer circule à l'intérieur des dessaleurs.

2) L'analyse des paramètres présentés dans le tableau N°6 révèle également une restriction de la production d'eau dessalée par les unités 2010 L B/D, avec un débit oscillant entre 24 et 28 m³/h, bien en deçà de la valeur de 45,3 m³/h prévue par la conception.

3) De plus, l'examen des données présentées dans le tableau met en évidence que le temps de fonctionnement des dessaleurs 2010 L B/D après leur dernier lessivage a dépassé la limite recommandée de 6 mois établie par les fabricants. Cette limite est généralement préconisée pour éviter l'accumulation de dépôts dans les passages de saumure à travers les différentes boîtes de détente, en particulier au niveau de la première boîte.

Ces conclusions suggèrent que l'encrassement des orifices de passage de l'eau de mer est l'une des causes principales des problèmes de performance et de production d'eau dessalée en deçà des valeurs de conception dans les unités 2010 L B/D. Il est impératif de prendre des mesures correctives pour résoudre ces problèmes et améliorer les performances des dessaleurs

IV.3 PARAMETRES DE FONCTIONNEMENT DES RECHAUFFEURS DE SAUMURE DES DESSALEURS

Le tableau présente les paramètres de fonctionnement actuels des réchauffeurs de saumure MSF.

Tableau IV. 3 : Paramètres de fonctionnement actuels des réchauffeurs de saumure des dessaleurs MSF

| Paramètres | Réchauffeurs de saumure | | | | | Design (*) |
|--|-------------------------|---------|--------------|---------|--------------|-----------------------|
| | 2010 LA | 2010 LB | 2010 LC | 2010 LD | 2010 LE | |
| Débit condensât (m³/h) | Sous travaux | 5 | Sous travaux | 7.5 | Sous travaux | 9.8 m ³ /h |
| Température entrée vapeur 4.5 bars dans le réchauffeur de saumure en °C | Sous travaux | 120 | Sous travaux | 110 | Sous travaux | 100 °C |
| Température sortie condensât en °C | Sous travaux | 90 | Sous travaux | 84.5 | Sous travaux | 100 °C |
| Température entrée eau de mer du réchauffeur de saumure en °C | Sous travaux | 64 | Sous travaux | 61 | Sous travaux | 78 °C |
| Température sortie eau de mer du réchauffeur de saumure en °C | Sous travaux | 80 | Sous travaux | 76 | Sous travaux | 90 °C |

IV.3.1 INTERPRETATION DES PARAMETRES RELEVES DES RECHAUFFEURS DE SAUMURE :

Les paramètres de fonctionnement des réchauffeurs de saumure, tels qu'indiqués dans le tableau, révèlent que l'exploitation actuelle des réchauffeurs de saumure des dessaleurs en fonctionnement ne correspond pas aux spécifications de conception. Voici les principales observations :

1) Nous avons enregistré une élévation de la température en aval de la désurchauffe pour tous les dessaleurs de type MSF. Cette température varie entre 110 et 120°C, alors que la conception recommandait une température de 100°C. Cette hausse de température peut avoir des répercussions sur le processus de dessalement.

2) Nous avons constaté une diminution de la température de l'eau de mer en amont du réchauffeur de saumure. Cette température varie entre 61 et 64°C pour les réchauffeurs de saumure en fonctionnement, au lieu de la température de l'eau de mer de 78°C préconisée par le design. Cette baisse de température peut résulter d'un échange thermique inefficace au niveau des évaporateurs, probablement en raison de la présence d'une couche saline sur les tubes des évaporateurs.

3°) Au niveau des réchauffeurs de saumure, nous avons également relevé une baisse de la température de l'eau de mer en aval du réchauffeur de saumure, atteignant 84°C et 76°C. Cette température est inférieure à la valeur recommandée de 90°C pour la sortie de l'eau de mer du réchauffeur de saumure par le constructeur. Cette diminution de température est probablement due à un échange thermique insuffisant entre l'eau de mer et la vapeur au sein du réchauffeur de saumure.

Remarque

Il est crucial de souligner que le respect des paramètres de fonctionnement du réchauffeur de saumure tels qu'indiqués par la conception est essentiel pour atteindre la production d'eau dessalée de 45,3 m³/h et le débit d'eau de mer de 515 m³/h. Par conséquent, il est impératif de prendre des mesures correctives pour ajuster les paramètres de fonctionnement des réchauffeurs de saumure et ainsi améliorer la performance globale du processus de dessalement.



Figure IV. 2 : les couches de salinité

IV.4 ANOMALIES IDENTIFIÉES

À la suite de l'inspection de l'unité de dessalement dans la zone Utilités du complexe GL2/Z, ainsi qu'au contrôle de tous les paramètres de fonctionnement des différents dessaleurs, les anomalies suivantes ont été relevées :

IV.4.1 LES DESSALEURS

L'examen des dessaleurs de la zone Utilités du complexe GL2/Z a mis en évidence le premier problème majeur, à savoir l'entartrage des divers orifices de passage de l'eau de mer, y compris les tubes des évaporateurs et des réchauffeurs de saumures. Ce problème fondamental entraîne initialement un échange thermique inefficace tout au long des différentes étapes du processus de dessalement de l'eau de mer, ce qui se traduit par une réduction significative de la production d'eau dessalée.

IV.4.2 LES FILTRES DU CIRCUIT D'EAU DE MER

L'inspection des filtres autonettoyants 2011 L A/B/C/D/E a révélé les problèmes suivants :

- ✓ Les filtres liés aux dessaleurs 2010 L A/B/C/D/E présentent une dégradation externe due à la corrosion.
- ✓ L'absence de moteurs pour les filtres qui devraient normalement être autonettoyants.

Dans de telles conditions, les dessaleurs sont exposés à l'entartrage pendant leur fonctionnement.



Figure IV. 3 : filtre rotatif de l'EDM

IV.4.3 LES RECHAUFFEURS DE SAUMURES

Les températures d'entrée/sortie des réchauffeurs de saumures sont également inférieures à celles recommandées par la conception, notamment pour le dessaleur 2010 LD (61°C - 76°C). Cette situation peut compromettre le rendement de chaque boîte de détente de l'évaporateur (cellule) en raison de l'encrassement des tubes, ce qui entraîne un échange thermique inefficace en raison de la diminution de la surface d'échange entre l'eau de mer (EDM) et la vapeur. Par conséquent, la production d'eau dessalée subit une réduction partielle.

Il est essentiel de noter que ces anomalies ont un impact direct sur les performances des dessaleurs, entraînant une production d'eau dessalée en deçà des spécifications de conception. Des mesures correctives doivent être prises pour résoudre ces problèmes, notamment le nettoyage des orifices de passage de l'eau de mer, la réparation ou le remplacement des filtres dégradés, ainsi que l'ajustement des paramètres de fonctionnement des réchauffeurs de saumures pour garantir un échange thermique efficace. Cela permettra de rétablir la production d'eau dessalée conformément aux normes de conception.

IV.4.4 LES PRODUITS CHIMIQUES

Un autre facteur pouvant contribué à la limitation de la production d'eau dessalée concerne le dosage des produits chimiques, notamment les agents anti-tarte et anti-mousse. Ce dosage n'est pas effectué correctement en raison des dysfonctionnements constatés sur les pompes doseuses 2010 J/JA A/B/C/D/E. De plus, l'indisponibilité des moteurs des agitateurs des bacs de préparation des produits chimiques 2010LXF, dont l'agitation est assurée par de l'air instrument, constitue également une des raisons de la baisse de production.

Il est crucial de noter qu'un débit régulier de produits chimiques (anti-tarte et anti-mousse) doit être maintenu pour garantir un fonctionnement conforme aux spécifications de conception.

De plus, les pompes d'injection de produits chimiques actuellement installées ne sont pas conformes. Leur débit est de 2,8 l/h avec une pression de refoulement de 8,2 bars, alors que les pompes d'origine devraient avoir un débit de 7,5 l/h avec une pression de refoulement de 2,4 bars.

Ces irrégularités dans le dosage des produits chimiques et les caractéristiques inadéquates des pompes d'injection peuvent contribuer à la détérioration des performances du processus de dessalement. Pour une production d'eau dessalée conforme au design, il est nécessaire de réparer ou de remplacer les équipements défectueux et d'utiliser des pompes d'injection de produits chimiques

conformes aux spécifications requises. Cela garantira un traitement chimique approprié de l'eau de mer, favorisant ainsi un fonctionnement optimal du système de dessalement.

Remarque importante

Dans les unités de distillation de type MSF, la phase la plus critique du cycle est celle du réchauffement de la saumure, où le processus d'absorption de la chaleur se déroule. À ce stade, la saumure atteint sa température maximale, ce qui la rend particulièrement susceptible de former des dépôts de tartre. Il est essentiel de noter que l'entartrage de ce mécanisme d'absorption de la chaleur ne nuit pas nécessairement à l'efficacité globale de l'unité de distillation, car il est généralement provoqué par des problèmes au sein de l'installation.

Les signes de tartre dans ce mécanisme d'absorption de la chaleur se manifestent par les éléments suivants :

- ✓ Une augmentation de la pression de la vapeur malgré une température finale constante.
- ✓ Une diminution de la température de la saumure malgré une pression de vapeur constante.
- ✓ Une perte de production d'eau dessalée.

Ces symptômes indiquent que le tartre peut obstruer les surfaces d'échange thermique, entraînant une inefficacité dans le transfert de chaleur. Par conséquent, il est essentiel de surveiller et de prévenir l'entartrage dans cette phase du processus de distillation pour maintenir des performances optimales et une production d'eau dessalée conforme aux normes de conception.

CONCLUSION GENERALE

En conclusion de ce mémoire, les investigations menées ont permis d'identifier les irrégularités et les problèmes qui ont conduit à la diminution de la production d'eau dessalée dans les unités de dessalement du complexe GL2Z. Ces unités ont été principalement affectées par le phénomène d'entartrage, notamment au niveau des réchauffeurs de saumure et des condenseurs des évaporateurs. Les causes de cet entartrage sont les suivantes :

- 1) Un chauffage excessif de l'eau de mer pendant l'exploitation, entraînant la formation de dépôts de sel suite à la conversion alcaline des bicarbonates en carbonate.
- 2) La présence de dépôts de tartre résiduels sur les faisceaux tubulaires en raison de dysfonctionnements et de pannes des systèmes d'injection de produits chimiques, en partie due à l'indisponibilité de plusieurs équipements.
- 3) L'absence d'injection de chlore dans le bassin d'eau de mer.
- 4) Un vide insuffisant au niveau du dessaleur.
- 5) Un débit d'eau de mer trop bas en raison de problèmes tels que le colmatage des filtres autonettoyants des dessaleurs 2010LA/B/C/D/E.

Il est évident que les déviations par rapport aux paramètres opérationnels des dessaleurs ont contribué à la baisse de la production, en particulier au niveau des réchauffeurs de saumure, dont l'échange thermique est compromis en raison de la réduction de leur efficacité.

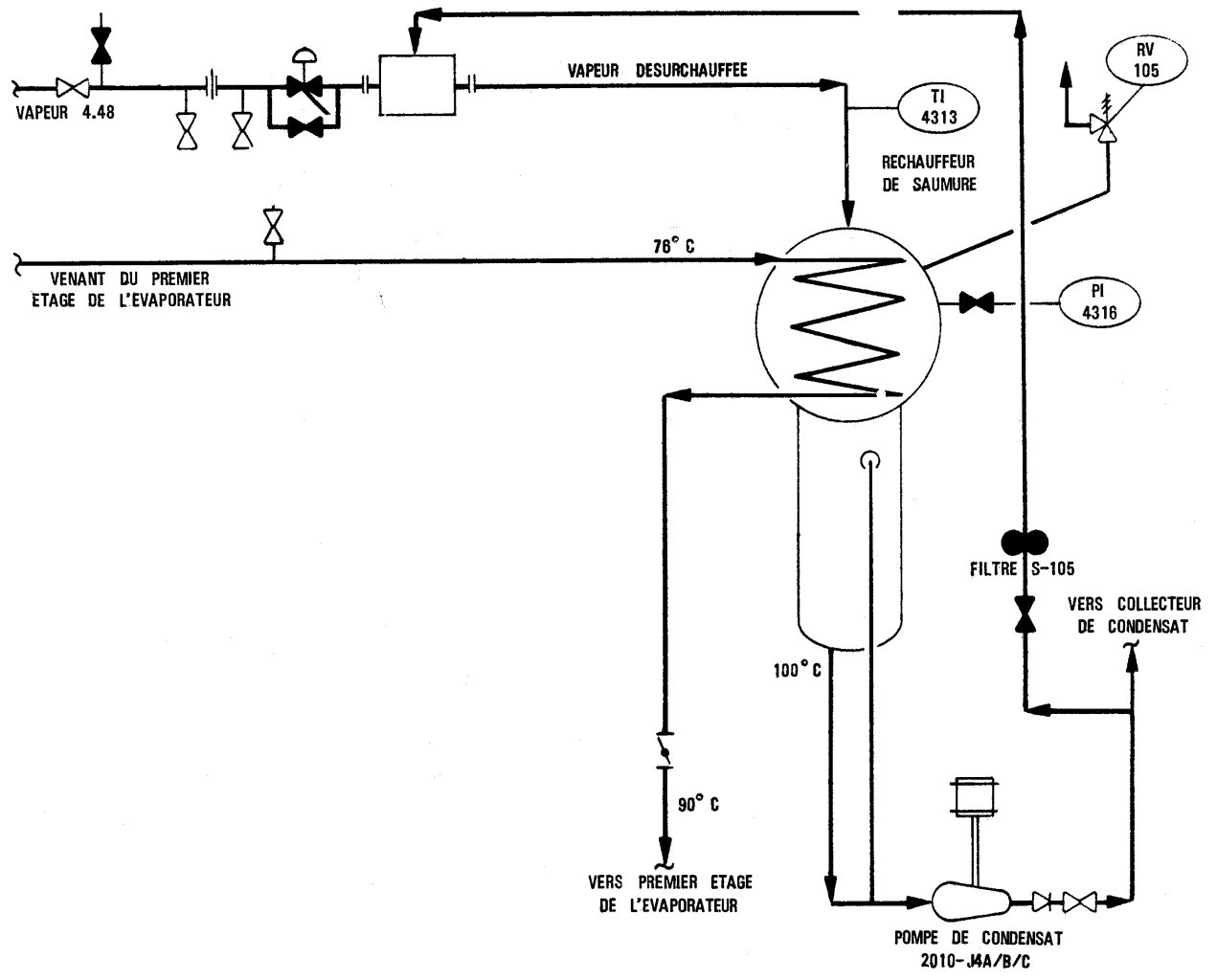
Dans le cadre de cette situation, nous recommandons la mise en œuvre d'un plan d'action immédiat comprenant les mesures suivantes :

- ✓ Lors du prochain arrêt général, procéder à une vérification de l'état des boues du bassin d'eau de mer et effectuer un dragage si nécessaire.
- ✓ Réhabiliter les grilles fixes et les filtres rotatifs des baies de la section pomperie.
- ✓ Réactiver le système automatique de nettoyage des filtres autonettoyants des dessaleurs.
- ✓ Inspecter et nettoyer au besoin les orifices de passage de l'eau de saumure dans les différentes boîtes de détente.
- ✓ Assurer la fiabilité des pompes de produits chimiques et des moteurs des agitateurs, les remplaçant si nécessaire.
- ✓ Rénover le système de préparation de la solution chimique en raison de son état vétuste.
- ✓ Mettre en place un nettoyage chimique automatique de chaque dessaleur après une période de six (06) mois d'exploitation.
- ✓ Veiller à disposer de la quantité d'acide nécessaire avant de lancer l'opération de lessivage.
- ✓ Commencer les opérations de lessivage tôt le matin en évitant les week-ends pour garantir un suivi rigoureux du processus, y compris le contrôle strict du pH.
- ✓ Établir un suivi des paramètres de fonctionnement du dessaleur avant et après chaque opération de lessivage pour évaluer les résultats de cette opération.
- ✓ Envisager l'ajout d'une unité d'ultrafiltration (cartouche) à la ligne de traitement.
- ✓ Ces mesures devraient contribuer à améliorer considérablement les performances des unités de dessalement et à remédier aux problèmes identifiés.

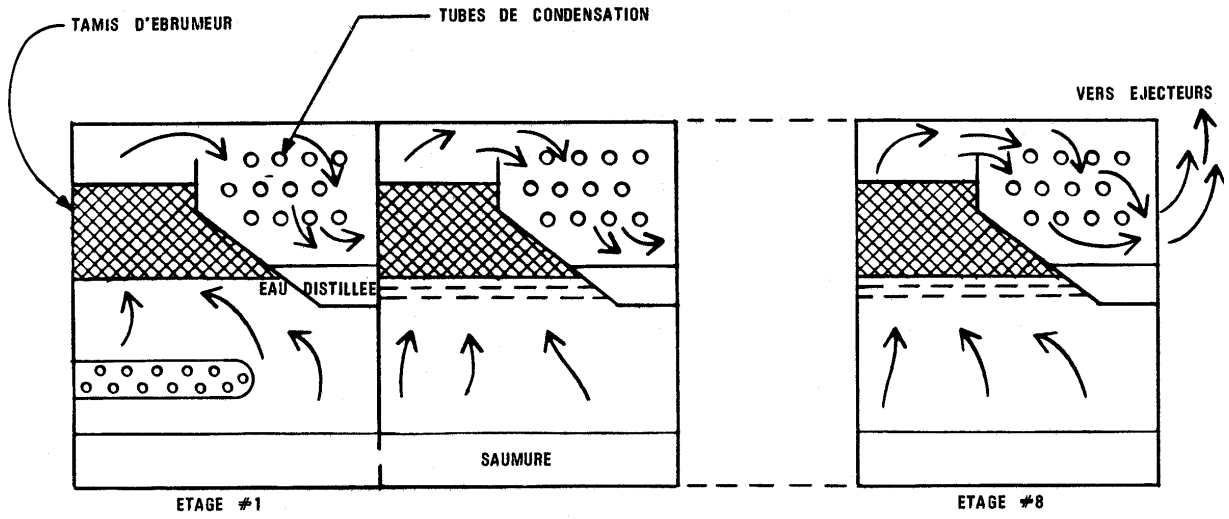
Bibliographie

- [1] Méthodes et techniques d'analyses de l'eau de mer dans le complexe GL2/Z (2002/2003)
- [2] Théorie et pratique du dessalement
- [3] Etude technico-économique comparative de deux méthodes de distillation de l'eau de mer (2010)
- [4] Manuel opératoire des unités de dessalement
- [5] Fonctionnement d'un dessaleur et opération de lessivage au niveau du complexe GL2/Z (2005/2006) ;
- [6] Procédure de lessivage chimique des unités de dessalement du complexe GL2/Z par l'acide sulfamique
- [7] Performance des évaporateurs d'eau de mer pour la production d'eau dessalée au niveau du complexe GL2/z (article d'étude année 2010)
- [8] L'analyse de l'eau (JEAN RODIER)
- [9] Contrôle de l'entartrage dans les unités de distillation d'eau de mer FLASH à étages multiples
- [10] Rapport sur la baisse de production d'eau dessalée produite par les unités de dessalement du complexe GL2/Z
- [11] Etude technico-économique comparative de deux méthodes de distillation de l'eau de mer
- [12] Méthodes et techniques d'analyses de l'eau de mer dans le complexe GL2/Z (2002/2003) ;
- [13] Manuel opératoire des utilités (Pullman Kellogg)
- [14] Contrôle de l'entartrage dans les unités de distillation d'eau de mer FLASH à étages multiples
- [15] Mémoire de fin d'étude : lessivage des dessaleurs par l'acide sulfamique (promotion 1999)

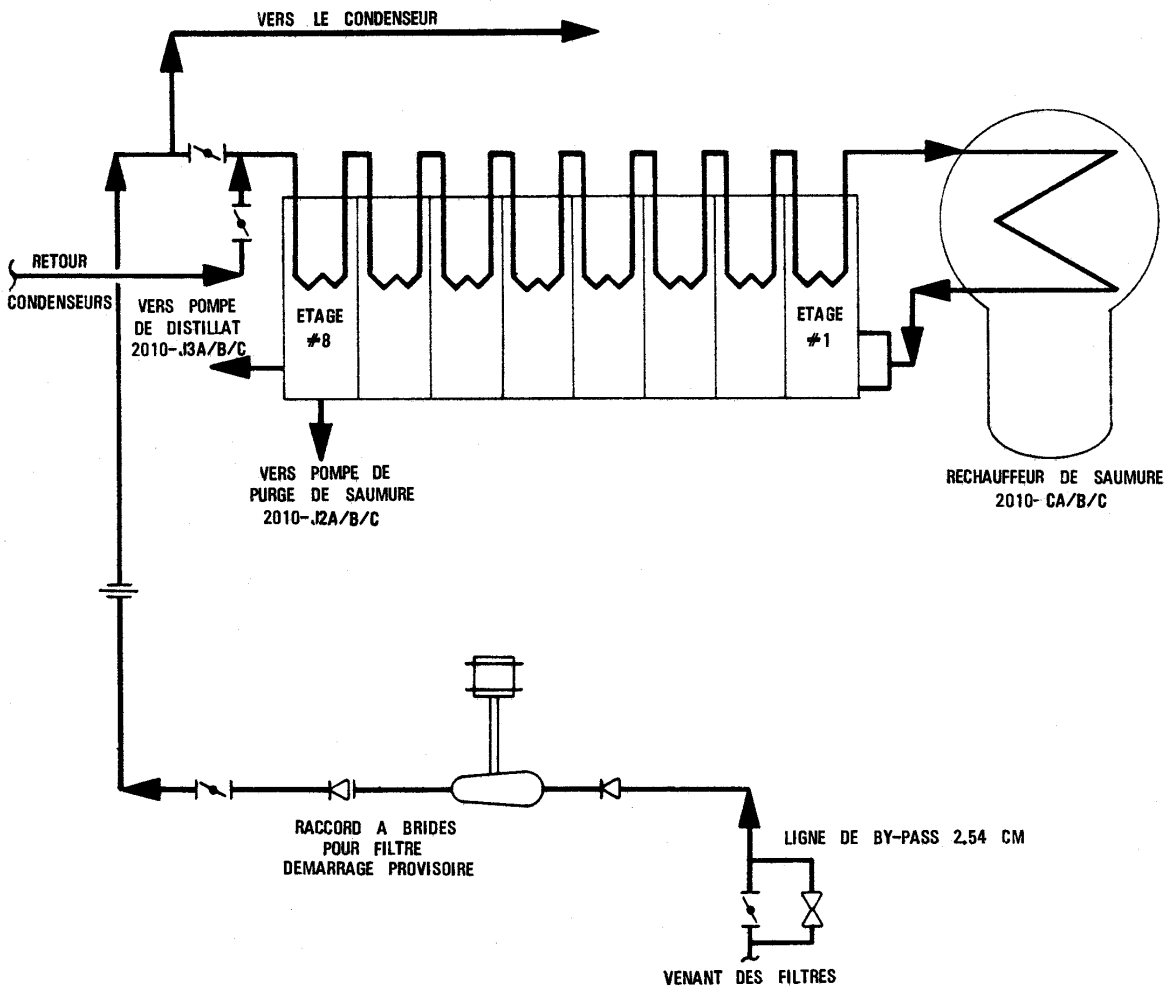
Annexes



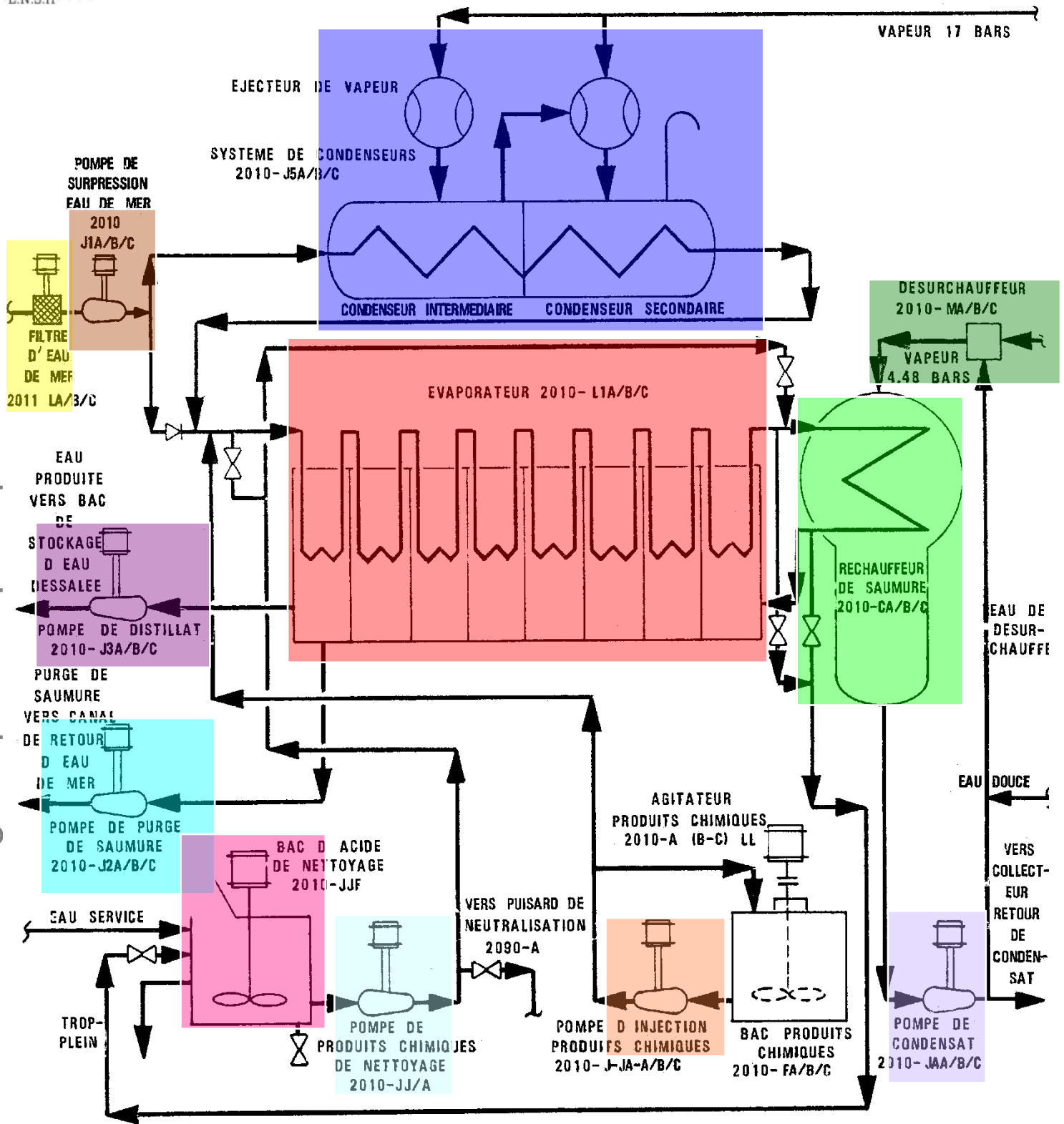
Annexe 1 : schéma du réchauffeur de saumure



Annexe 2: schéma de principe de l'évaporation



Annexe 3: schéma de l'évaporateur



Annexe 4: unité de dessalement