


	الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية	
	People's Democratic Republic of Algeria	
	وزارة التعليم العالي والبحث العلمي	
	Ministry of Higher Education and Scientific Research	
	جامعة عبد الحميد بن باديس - مستغانم	
	Abdel Hamid Ibn Badis University - Mostaganem	
	كلية العلوم والتكنولوجيا	
	Faculty of Sciences and Technology	
	قسم هندسة الطرائق	
	Department of Process Engineering	

N° d'ordre : M2...../GP/2025

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES DE MASTER ACADEMIQUE

Filière : Génie de procédé

Spécialité : Génie chimique

Thème

**Transformer l'eau de mer en ressource industrielle : application
du procédé MSF au complexe GNL2/Z**

Présenté par :

- Kridech Dikra

Soutenu le 30/06/ 2025 devant le jury composé de :

Président(e) :	Boudjeltia Mohammed Amine	MCB	Université de Mostaganem
Examinatrice :	Belarbi Ilham	MCB	Université de Mostaganem
Encadrant (e) :	Benosmane Sarra	MCB	Université de Mostaganem

Année universitaire 2024 / 2025

Dédicaces

J'exprime ma gratitude et ma fidélité les plus sincères à ma chère mère, une femme exceptionnelle qui a porté seule le poids de mon éducation dans des conditions dures et accablantes. Elle a été à la fois ma mère, mon père, mon soutien et mon refuge.

Avec une patience inégalable et un cœur immense, elle a supporté le fardeau des jours sans jamais faiblir ni se lasser.

Sans ses sacrifices, je n'aurais jamais pu atteindre cette étape.

Chaque mot de ce travail porte l'empreinte de sa fatigue silencieuse et chaque pas en reflète ses prières, son amour et ses larmes invisibles.

Remerciements

Avant tout, nous adressons nos plus sincères remerciements et notre profonde gratitude à Allah, Le Tout-Puissant, qui a illuminé notre chemin vers la connaissance, et nous a accordé la force et la patience nécessaires pour mener à bien ce travail.

Je souhaite adresser une reconnaissance particulière à Madame Benosmane Sarra, encadrante de ce mémoire, pour son accompagnement constant, ses conseils pertinents et son investissement précieux. Sa rigueur et sa bienveillance ont été essentielles à la qualité de ce travail.

J'exprime également ma profonde gratitude à Madame Belarbi Ilham, examinatrice, pour l'intérêt qu'elle porte à ce mémoire et pour ses observations, qui enrichiront sans aucun doute la qualité de ce travail.

Je tiens à adresser mes remerciements les plus sincères à Monsieur Boudjeltia Mohammed Amine, président du jury, pour avoir accepté de présider cette soutenance, et pour la valeur scientifique et morale que représente sa présence.

Je tiens aussi à remercier l'ensemble des enseignants de l'Université Abdelhamid Ibn Badis – Mostaganem pour les efforts qu'ils ont déployés tout au long de notre parcours académique et scientifique.

Je n'oublie pas d'exprimer ma gratitude à tous les employés du complexe Sonatrach GNL2/Z pour leur soutien, leur collaboration et les moyens mis à notre disposition, qui ont grandement contribué à la réalisation de ce travail dans des conditions professionnelles optimales.

Toute ma reconnaissance va à ma mère... À celle qui a tracé ce chemin avec une infinie patience, en offrant de sa vie et de son repos sans jamais rien attendre en retour. Tout ce que j'ai accompli, je le dois à ses prières.

Liste des figures

- Figure I-1** La répartition de l'eau sur Terre.
- Figure II-1** Schéma général d'une installation de dessalement.
- Figure II-2** Schéma représentatif des principaux procédés de dessalement de l'eau de mer.
- Figure II-3** Dessaleur de type « MSF ».
- Figure II-4** Principe de la distillation à simple effet.
- Figure II-5** Principe de procédés de distillation a multiple effet.
- Figure II-6** Un dessaleur type distillation à simple effet par compression.
- Figure II-7** Unité de dessalement d'eau de mer par la technique d'osmose inverse.
- Figure II-8** Un dessaleur fonctionnant par osmose inverse.
- Figure II-9** Fonctionnement d'un électro dialyseur.
- Figure II-10** Schéma simplifié de l'unité de dessalement.
- Figure II-11** Principe et paramètres de fonctionnement de l'unité de dessalement de type MSF.
- Figure III-1** Evolution de la production en eau dessalée des deux dessaleurs de type MSF.
- Figure III-2** Mesure du pH de l'eau dessalée pendant 20 jours.
- Figure III-3** Mesure de conductivité de l'eau dessalée pendant 20 jours.
- Figure III-4** Mesure du chlorure de l'eau dessalée pendent 20 jours.
- Figure III-5** Image représentative du tartre.
- Figure III-6** Schéma représentatif des problèmes engendrés par la formation du tartre
- Figure III-7** Corrosion des métaux.

Liste des tableaux

Tableau I-1	Ordres de grandeur des quantités d'eau utilisées dans certaines industries.
Tableau I-2	Salinité des types des ressources en eau.
Tableau I-3	Représentatif des proportions standards de l'eau.
Tableau III-1	Production des deux dessaleurs de type MSF.
Tableau III-2	Résultats des mesures de pH pendant 20 jours.
Tableau III-3	Résultats des mesures de la conductivité pendant 20 jours.
Tableau III-4	Résultats des mesures de la concentration en ions chlorure (Cl^-) pendant 20 jours.

Liste des abréviations

SH	Sonatrach Hydrocarbures
GL2/Z	Complexe de liquéfaction GNL 2/Z
GNL	Gaz Naturel Liquéfié
MSF	Multi-Stage Flash (Vaporisation instantanée multi-étagée)
MED	Multi Effect Distillation (Distillation à effets multiples)
SED	Simple Effect Distillation (Distillation à effet simple)
ED	Électrodialyse
RO	Reverse Osmosis (Osmose inverse)
TDS	Total Dissolved Solids (Solides Dissous Totaux)
pH	Potentiel Hydrogène
ppm	Partie par million

المخلص

يعتمد المجمع GL2/2 المتخصص في إنتاج وتصدير الغاز الطبيعي المسال (GNL) من الغاز المستخرج من حقل حاسي الرمل على استخدام المياه المحلاة لتلبية احتياجاته الصناعية الأساسية. من يحلل هذا البحث طريقة تحلية المياه من نوع التبخير متعدد المراحل (MSF) ، التي تُنفذ من خلال خمس وحدات تحلية قادرة -على إنتاج 45.3 م³/ ساعة. الماء المقطر لكل وحدة، أي بسعة إجمالية تبلغ 226.5 م³/ ساعة. على الرغم من كفاءتها الأولية تواجه هذه الوحدات منذ عام 2010 مشكلات تقنية متكررة، مثل الترسبات الكلسية والتآكل، مما يؤدي إلى تقليل فعاليتها ويؤثر على توفير المياه. يقترح هذا البحث حلولاً تقنية لمعالجة هذه الأعطال وتحسين أداء الوحدات، بهدف ضمان إنتاج مستقر ومثالي للمياه المحلاة، لتلبية متطلبات المجمع GL2/2 ضمان موثوقية العمليات الصناعية الحيوية. الكلمات المفتاحية: تحلية المياه، عملية MSF مجمع، GL/Z، مياه البحر.

Abstract

The GL2/Z complex, specializing in the production and export of liquefied natural gas (LNG) from gas extracted from the Hassi R'mel field, relies on desalinated water to meet its essential industrial needs.

This study analyzes a desalination method of the Multi-Stage Flash (MSF) type, implemented through five desalination units, each capable of producing 45.3 m³/h of distilled water, with a total capacity of 226.5 m³/h. Although initially efficient, these units have faced recurring technical issues since 2010, such as scaling and corrosion, reducing their efficiency and compromising water supply. This study proposes technical solutions to address these malfunctions and improve their performance, aiming to ensure stable and optimal production of desalinated water, thereby meeting the requirements of the GL2/Z complex and guaranteeing the reliability of critical industrial processes.

Keywords: Desalination, MSF process, GL2/Z complex, seawater.

Résumé

Le complexe GL2/Z, spécialisé dans la production et l'exportation de gaz naturel liquéfié (GNL) à partir du gaz extrait du champ de Hassi R'mel, repose sur l'utilisation d'eau dessalée pour répondre à ses besoins industriels essentiels.

Ce mémoire analyse une méthode de dessalement de type MSF (Multi-Stage Flash), mise en œuvre par cinq unités de dessalement capables de produire chacune 45,3 m³/h d'eau distillée, soit une capacité totale de 226,5 m³/h. Bien que performantes à l'origine, ces unités rencontrent depuis 2010 des problèmes techniques récurrents, tels que l'entartrage et la corrosion, réduisant leur efficacité et compromettant l'approvisionnement en eau. Ce mémoire propose des solutions techniques pour remédier à ces dysfonctionnements et améliorer leur fonctionnement, afin d'assurer une production stable et optimale d'eau dessalée, répondant ainsi aux exigences du complexe GL2/Z et garantissant la fiabilité des processus industriels critiques.

Mots-clés : Dessalement, procédé MSF, complexe GL2/Z, eau de mer.

Table des matières

Dédicaces	i
Remerciements	ii
Liste des figures	iii
Liste des tableaux	iv
Liste des abréviations m	v
Résumé	vi
Introduction Générale	1
Chapitre I : Ressources en eau et leurs usages	3
I.1 Introduction	3
I.2 Définition de l'eau	3
I.3 Importance de l'eau dans l'industrie	3
I.4 Utilisation de l'eau	4
I.4.1 Dans la vie quotidienne	4
I.4.2 Dans l'industrie	4
I.5 Répartition de l'eau sur terre	5
I.6 Catégorie de l'eau	6
I.6.1 Les eaux douces	6
I.6.1.1 Eau potable	6
I.6.1.2 Eau minérale naturelle	6
I.6.1.3 Eau de source	7
I.6.2 Eau salin	7
I.6.2.1 Eau saumâtre	7
I.6.2.2 Eau de mer	7
I.7 Composition standard de l'eau de mer	8

I.8	Caractéristiques des eaux de mer	9
I.8.1	Salinité	9
I.8.2	Densité	9
I.8.3	La conductivité	10
I.8.4	Le pH	10
I.8.5	La dureté	10
I.8.6	Propriétés thermiques	10
I.9	Conclusion	10
	Chapitre II : Dessalement de l'eau de mer dans le complexe GL2/Z	11
II.1	Introduction	11
II.2	Le dessalement de l'eau de mer	11
II.3	Salinité requise des eaux dessalées pour les usages industriels	12
II.4	Procédé de dessalement de l'eau de mer	12
II.5	Techniques de dessalement de l'eau de mer	13
II.5.1	Les procédés de distillation ou de changement de phases	14
	a-Distillation multi-flash (multi stage flash MSF)	14
	b-Distillation à simple effet	15
	c-Distillation à multiples effets (multi effet distillation « MED »)	16
	d-Distillation par compression de vapeur	17
II.5.2	Procédé membranaire :	18
	a-Procédés d'osmose inverse	18
	b-Procédé d'électrodialyse	19
II.6	Les critères de sélection du procédé de dessalement	20
II.7	Unité de dessalement du complexe GL2/Z	21
II.8	Description de l'unité de dessalement de type MSF	22
II.8.1	La section pomperie	22

II.8.2 L'unité de dessalement de type « MSF »	22
a-Filtres à eau de mer	24
b-L'évaporateur	24
c-Réchauffeur de saumure	24
d-Injecteur et condenseur	25
e-Pompe de surpression d'eau de mer	25
f-Système d'injection de produits chimiques	25
g-Désurchauffeur	25
h-Bac de stockage	25
II.9 Principe de fonctionnement de l'unité de dessalement « MSF »	25
II.10 Conclusion	27
Chapitre III : Fonctionnement et Gestion des Unités de Dessalement	28
III.1 Introduction	28
III.2 productions de l'eau dessalée dans le complexe GL2/Z	28
III.3 Traitements des eaux dessalées dans le complexe GNL2 /Z	31
III.3.1 Mesure du pH	31
III.3.2 Mesure de la conductivité	34
III.3.3 Mesure des ions chlorure	36
III.4 Problèmes techniques en dessalement d'eau de mer	39
III.4.1 Problème d'entartrage	39
a- Détection du tartre	40
b- La lutte contre l'entartrage	41
III.4.2 Problème de corrosion	42
a- Les causes de la corrosion	43
<i>b-La lutte contre la corrosion</i>	43
III.5 Conclusion	44
Conclusion Générale et recommandations	45

Introduction Générale

Le complexe GL2/Z est spécialisé dans la production et l'exportation de gaz naturel liquéfié (GNL), à partir du gaz extrait du champ de Hassi R'mel. Ce gaz est préalablement traité avant d'être liquéfié à une température cryogénique de -162 °C dans six unités de liquéfaction. Chacune de ces unités, conçue de manière identique, fonctionne de manière autonome en utilisant des ressources essentielles fournies par la section utilités, telles que l'eau de mer pour le refroidissement, la vapeur d'eau, l'électricité, l'air comprimé pour les instruments, ainsi que l'eau dessalée.

L'eau de mer, qui constitue environ 97 % de l'eau présente sur la planète et recouvre près de 73 % de la surface terrestre, est une ressource abondante et renouvelable. Cependant, sa forte salinité, variable selon les régions, rend son utilisation directe impossible, tant pour la consommation humaine que pour les usages industriels ou agricoles. Il est donc nécessaire de la transformer par des procédés de dessalement ou de distillation pour répondre aux différents besoins.

Le recours à l'exploitation de l'eau de mer n'est pas un choix volontaire mais plutôt une solution à la raréfaction de l'eau douce qui ne représente que 1 % de l'eau sur terre, auquel s'ajoutent 2 % qui sont constitués de blocs de glaces. Une quantité qui est loin de répondre aux besoins des activités humaines et ceux des écosystèmes. Le présent mémoire est articulé en trois chapitres distincts mais complémentaires.

Dans le cadre de la production de GNL, l'eau dessalée occupe un rôle crucial : elle est utilisée comme eau d'appoint pour alimenter les chaudières des processus et les utilités destinées à la production de vapeur.

Les **premier** et **deuxième chapitres** constituent la partie théorique et abordent les points suivants

- L'exploration des différentes catégories d'eau et leur répartition sur la planète.
- L'analyse de l'importance de l'eau dans l'industrie.

- L'étude des caractéristiques spécifiques de l'eau de mer.
- La présentation des techniques modernes de dessalement, incluant les procédés de distillation et les méthodes membranaires.
- Un focus sur l'unité de dessalement du complexe GL2/Z, avec une description détaillée de son fonctionnement et de sa contribution au processus de production de GNL.

Le **troisième chapitre** est consacré à la partie pratique, qui comprend :

- L'analyse des méthodes de gestion des eaux dessalées au sein du complexe GL2/Z.
- L'examen des solutions mises en œuvre pour optimiser la qualité et l'efficacité des installations.
- L'étude des défis techniques tels que l'entartrage et la corrosion.

Ce travail vise à fournir une compréhension globale des enjeux liés à l'utilisation de l'eau de mer dans un contexte industriel, tout en mettant en lumière l'importance d'une gestion optimisée de cette ressource essentielle pour garantir une production durable et efficace.

Chapitre I :

Ressources en eau et leurs usages

I.1 Introduction

Les océans et les mers couvrent 71 % de la surface de la terre et sont essentiels pour maintenir l'équilibre climatique. L'eau douce ne représente seulement 2,5 % de toute l'eau disponible sur la planète. Dans les régions situées au sud du bassin méditerranéen, les ressources en eau potable sont très limitées, et une grande partie des réserves est composée d'eau saumâtre.

I.2 Définition de l'eau

L'eau est un liquide pur, transparent, incolore et inodore, considéré comme un élément essentiel à la vie et indispensable dans divers processus environnementaux et industriels. Sa molécule est composée de deux atomes d'hydrogène et d'un atome d'oxygène (H_2O) [1], liés par des liaisons covalentes qui lui confèrent des propriétés particulières.

Une eau pure de qualité supérieure est indispensable à la santé. Elle doit impérativement satisfaire aux normes de potabilité, aussi bien sur le plan bactériologique que physico-chimique [2]. Parmi ses principales caractéristiques physiques figurent une température d'ébullition de 100 °C et une température de congélation de 0 °C à la pression atmosphérique normale, elle présente également une tension superficielle élevée et une capacité calorifique spécifique importante, ce qui en fait un excellent solvant ainsi qu'un régulateur thermique efficace, dans les systèmes écologiques et dans les procédés industriels [3].

I.3 Importance de l'eau dans l'industrie

L'eau est une ressource essentielle dans de nombreux secteurs industriels en raison de ses propriétés uniques et de sa disponibilité. Elle est utilisée comme matière première, solvant, agent

de refroidissement, moyen de transport ou encore source d'énergie dans des processus variés. Dans l'industrie chimique, elle sert à dissoudre et mélanger des composés, tandis que dans la production d'énergie, notamment dans les centrales thermiques et hydroélectriques, elle est indispensable pour générer et transférer la chaleur [4].

Dans l'industrie agroalimentaire, l'eau joue un rôle clé dans la préparation, la transformation et la conservation des produits. Elle est également nécessaire pour le nettoyage et la stérilisation, garantissant ainsi des normes d'hygiène élevées. Dans le secteur manufacturier, comme la production de métaux, de textiles et de papier, l'eau est utilisée pour refroidir les machines, traiter les matériaux, et éliminer les déchets industriels.

I.4 Utilisation de l'eau

I.4.1 Dans la vie quotidienne

La consommation domestique de l'eau constitue une part essentielle de la demande mondiale en eau, représentant environ 8 % à 10 % de la consommation totale. Les quantités utilisées varient largement d'une région à l'autre, allant de 100 à 200 litres par jour et par personne dans les pays développés, tandis qu'elles peuvent être inférieures à 50 litres dans les pays en développement. Ces écarts soulignent la nécessité d'adopter des pratiques plus rationnelles pour préserver les ressources en eau face aux défis environnementaux [5-7].

En Algérie, la consommation moyenne d'eau par habitant est d'environ 180 litres par jour, un chiffre considéré comme élevé au regard des normes mondiales recommandées. [8]

I.4.2 Dans l'industrie

L'industrie est l'un des plus grands consommateurs d'eau douce, représentant environ 20 % de la consommation mondiale, avec des taux pouvant dépasser 50 % dans les pays fortement industrialisés. L'eau joue un rôle fondamental dans ce secteur, étant utilisée pour le refroidissement, les réactions chimiques, le nettoyage, le transport de chaleur et de matières, ainsi que comme réfrigérant, solvant, diluant ou vecteur de dispersion des polluants. Les industries de transformation sont de grosses consommatrices d'eau comme le montre le tableau

01 [9]. Ces utilisations multiples soulignent l'importance de mieux gérer et optimiser les ressources en eau dans le domaine industriel.

En Algérie, le volume d'eau attribué au secteur industriel est estimé à environ 1,2 milliard de mètres cubes par an, soit près de 10 % des ressources en eau renouvelables du pays. Cette eau est principalement utilisée dans les industries agroalimentaires, de transformation et pétrochimiques [10].

Tableau I-1 : Ordres de grandeur des quantités d'eau utilisées dans certaines industries.

Industrie	Eau nécessaire
Raffinage d'1t de pétrole	10 t d'eau
Distillation d'1t d'alcool	100 t d'eau
Fabrication d'1t de pâte à papier	250 t d'eau
Fabrication d'1t d'acier	270 t d'eau
Fabrication d'1t de fibres synthétiques	5000 t d'eau

I.5 Répartition de l'eau sur terre

La majeure partie de l'eau présente sur Terre, soit environ 97,5 %, est composée d'eau salée, principalement stockée dans les océans et les mers. En comparaison, l'eau douce ne constitue que 2,5 % des réserves mondiales, dont à peine 0,3 % est accessible dans les rivières, les lacs et les nappes phréatiques. Le reste est immobilisé sous forme de glaciers et de neige. Cette répartition inégale fait de l'eau douce une ressource limitée et précieuse, d'autant plus face à la hausse constante de la demande provoquée par la croissance démographique et l'industrialisation. Dans ce contexte, les technologies de dessalement jouent un rôle clé pour répondre aux besoins en eau dans les zones confrontées à des pénuries. Il est donc primordial de mieux comprendre les propriétés de l'eau salée ainsi que les techniques permettant de la convertir en eau douce pour divers usages. [11].

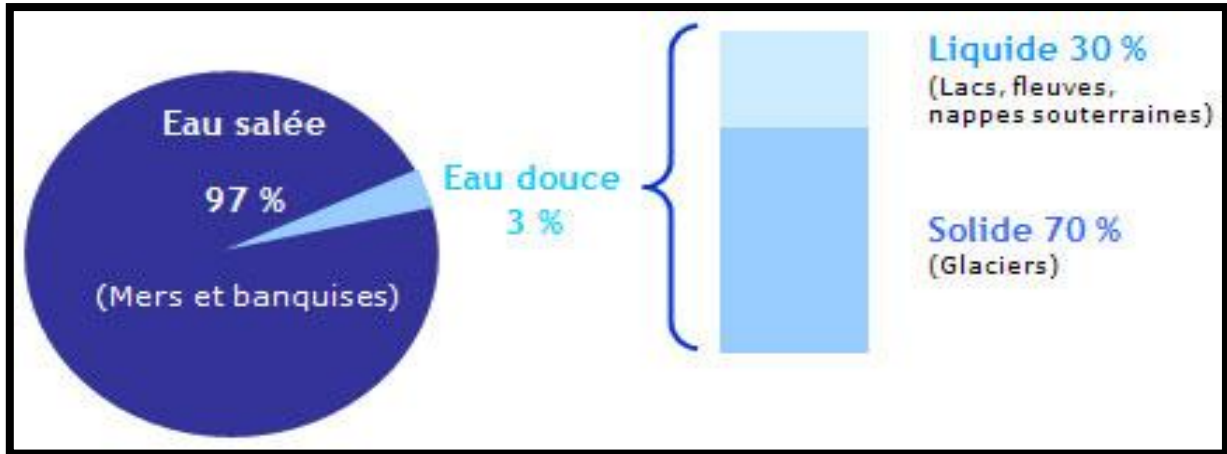


Figure I-1 : La répartition de l'eau sur Terre.

I.6 Catégorie de l'eau

I.6.1 Les eaux douces

Définies comme des eaux contenant une faible concentration de sels dissous (moins de 0,5 gramme par litre), jouent un rôle crucial pour la vie. Elles se subdivisent en plusieurs types, notamment l'eau potable, l'eau de source et l'eau minérale naturelle. Ces ressources proviennent de milieux naturels tels que les rivières, les lacs, les nappes souterraines et les neiges, elles sont indispensables à la consommation humaine, à l'irrigation et aux activités industrielles [12].

I.6.1.1 Eau potable

L'eau potable est une eau qui respecte les normes de qualité sanitaire établies, en termes de sécurité microbiologique, chimique et physique, garantissant qu'elle ne cause aucun dommage à la santé humaine lorsqu'elle est consommée régulièrement. Elle prend également en compte les aspects sensoriels tels que le goût, l'odeur et la couleur, ce qui la rend appropriée pour la consommation et l'utilisation domestique [13].

I.6.1.2 Eau minérale naturelle

L'eau minérale naturelle est une eau souterraine issue de formations géologiques spécifiques, caractérisée par une composition minérale stable et définie. Elle est exempte de tout

traitement chimique ou additif, ce qui permet de conserver ses propriétés originelles. Collectée directement à la source, elle est embouteillée dans des conditions strictes pour garantir sa pureté et préserver ses qualités uniques [13].

I.6.1.3 Eau de source

L'eau de source est une eau provenant d'une source naturelle souterraine, reconnue pour sa composition minérale naturelle. Elle est collectée directement à la source, sans subir de traitement excessif, et est embouteillée afin de préserver sa pureté et ses propriétés originales [13].

I.6.2 Eau saline

L'eau saline est une eau caractérisée par une teneur élevée en sels dissous, principalement du chlorure de sodium, avec une concentration généralement supérieure à 0,5 gramme par litre. Elle possède des propriétés distinctes de celles de l'eau douce, notamment une densité et une conductivité électrique plus élevées. Présente naturellement dans les océans, les mers et certaines nappes souterraines, l'eau saline n'est pas adaptée à la consommation humaine sans traitement préalable, mais elle joue un rôle essentiel dans des domaines variés comme l'aquaculture, l'industrie et la recherche scientifique [14].

I.6.2.1 Eau saumâtre

L'eau saumâtre est une eau dont la salinité est supérieure à celle de l'eau douce mais inférieure à celle de l'eau de mer, avec une concentration en sels dissous variant généralement entre 0,5 et 30 grammes par litre. Elle se forme souvent dans les zones de transition, comme les estuaires et les deltas, où l'eau douce des rivières se mélange à l'eau salée des océans. En raison de sa teneur en sels, l'eau saumâtre n'est pas directement potable [15,16].

I.6.2.2 Eau de mer

Eau de mer est l'eau qui contient une concentration élevée de sels et couvre une grande partie de la surface terrestre. Ce type d'eau se distingue par la présence de nombreux éléments chimiques tels que le sodium, le magnésium, le calcium, le potassium et le soufre. Ces éléments

jouent un rôle essentiel dans le maintien de l'équilibre écologique du système marin et soutiennent la vie marine [17].

La salinité moyenne de l'eau de mer est d'environ 35 grammes par litre. Toutefois, cette valeur peut varier selon les mers, en fonction de facteurs géographiques et climatiques [18]. En raison de sa forte teneur en sels, l'eau de mer n'est pas potable sans passer par un processus de dessalement.

Tableau I-2 : Salinité des types des ressources en eau [15,16]

Type d'eau	Salinité (g/litre)
Eau douce	< 0.500
Eau légèrement saumâtre	1,00 - 5,00
Eau modérément saumâtre	5,00 - 15,0
Eau très saumâtre	15,0 - 35,0
Eau de mer	35,0 - 42,0

I.7 Composition standard de l'eau de mer

La composition de l'eau de mer est dominée par les ions sodium (Na^+) et chlorure (Cl^-), ce qui fait du chlorure de sodium (NaCl) son principal composant, responsable de son goût salé et de ses propriétés électrolytiques. Les autres constituants, bien que présents en quantités moindres, jouent des rôles essentiels dans les processus chimiques et biologiques des écosystèmes marins. Le tableau 03 illustre les proportions standards des principaux constituants de l'eau de mer.

Tableau I-3 : Représentatif des proportions standards de l'eau

Constituants	Proportion (%)	Composant	Proportion (%)
Sodium (Na)	30,64%	Bicarbonate (HCO ₃)	0,41%
Chlore (Cl)	55,08%	Sulfate (SO ₄ ²⁻)	7,69%
Calcium (Ca)	1,16%	Potassium (K)	1,10%
Magnésium (Mg)	3,69%	Bromure (Br ⁻)	0,19%

I.8 Caractéristiques des eaux de mer

L'eau de mer se distingue de l'eau douce par plusieurs caractéristiques spécifiques qui reflètent sa composition chimique et son rôle dans les écosystèmes marins. En voici quelques-unes :

I.8.1 Salinité

La salinité est un paramètre fondamental de l'eau de mer, reflétant sa concentration en sels dissous. En moyenne, elle se situe autour de 35 grammes par litre, mais elle varie selon les régions en fonction de facteurs environnementaux. Par exemple, elle atteint 34,7 grammes dans l'océan Antarctique, 36,5 grammes dans les océans Pacifique, Atlantique et Indien, 38,5 grammes dans la mer Méditerranée et 39,7 grammes dans la mer Rouge. Ces variations sont principalement influencées par des phénomènes tels que la fonte des glaces dans les zones froides ou l'évaporation accrue dans les régions plus chaudes [17].

I.8.2 Densité

En raison de sa forte concentration en sels, l'eau de mer est plus dense que l'eau douce, avec une densité moyenne de 1,025 g/cm³ à 20 °C.

I.8.3 La conductivité

La conductivité est directement proportionnelle à la quantité des sels dissous dans l'eau. Ainsi, plus la concentration en sels sera importante, plus la conductivité sera élevée.

I.8.4 Le pH

Le pH de l'eau de mer est légèrement alcalin, généralement compris entre 7,5 et 8,4, en raison de la présence d'ions bicarbonates (HCO_3^-), qui stabilisent son acidité. Cette caractéristique aide à maintenir un environnement stable pour la vie marine et à prévenir les problèmes de corrosion dans les systèmes de dessalement [19].

I.8.5 La dureté

La dureté de l'eau fait référence à sa concentration en ions de calcium (Ca^{2+}) et de magnésium (Mg^{2+}), qui sont les principaux responsables de ce paramètre. Dans le cas de l'eau de mer, la dureté est nettement plus élevée que celle de l'eau douce, en raison des fortes concentrations de ces ions [20].

I.8.6 Propriétés thermiques

L'eau de mer a une capacité thermique élevée et un point de congélation légèrement plus bas (environ $-1,9\text{ °C}$) en raison de la salinité.

Ces caractéristiques font de l'eau de mer un milieu complexe, essentiel à la régulation climatique et au maintien de la vie marine.

I.9 Conclusion

Le manque d'eau en Algérie, aggravé par des conditions climatiques irrégulières, pose un défi majeur. Grâce à son littoral de 1200 km, le dessalement de l'eau de mer offre une solution prometteuse pour pallier cette pénurie et assurer une gestion durable des ressources hydriques.

Chapitre II :

Dessalement de l'eau de mer dans le complexe GL2/Z

II.1 Introduction

La planète repose sur l'eau, mais plus de 97,5 % de cette ressource est salée, ce qui engendre une importante pénurie d'eau douce. Face à ce défi, le dessalement de l'eau de mer s'impose aujourd'hui comme une solution essentielle pour augmenter les réserves d'eau et satisfaire les besoins croissants. Ce chapitre examine les différents procédés de dessalement appliqués à l'eau de mer, en tenant compte de sa composition, de sa structure et de ses caractéristiques physico-chimiques. Il détaille les étapes clés, du prétraitement à la production, ainsi que les principales techniques de dessalement, telles que la distillation et les technologies membranaires. Une étude d'un cas concret, le complexe GL2/Z, et l'illustration de son application à grande échelle fourniront une perspective globale sur le dessalement de l'eau de mer et son importance cruciale pour assurer l'accès à l'eau au niveau mondial.

Ce chapitre vise à présenter un aperçu des principales techniques de dessalement utilisées, avec un accent particulier sur la distillation multi-étages (MSF) et son application dans l'unité de dessalement du complexe GL2/Z.

II.2 Le dessalement de l'eau de mer

Le dessalement de l'eau de mer, également appelé dessalage, est un processus visant à éliminer le sel et d'autres impuretés présentes dans l'eau salée afin de produire une eau d'une salinité proche de celle des eaux douces naturelles. Ce procédé permet de rendre l'eau propre à la consommation humaine, à l'utilisation industrielle ou à des fins agricoles. Représentant une solution cruciale dans les régions confrontées à une pénurie d'eau douce, le dessalement répond

aux besoins croissants en eau potable et constitue une alternative essentielle face au stress hydrique mondial.

II.3 Salinité requise des eaux dessalées pour les usages industriels

L'eau de mer contient environ 35 g de substances chimiques inorganiques par litre, soit approximativement 35 000 ppm. Pour être considérée comme potable, l'eau doit respecter un certain nombre de normes strictes.

Dans certains cas industriels, une teneur en sels dissous pouvant atteindre 1 g/L est tolérée dans l'eau dessalée, et parfois même davantage. Cependant, les chaudières modernes, notamment celles fonctionnant sous une pression supérieure à 50 bars, nécessitent une eau extrêmement pure, exempte de tout sel. Cela implique presque toujours un traitement de déminéralisation totale.

Certains secteurs industriels, en revanche, n'exigent pas une qualité aussi élevée d'eau déminéralisée. Par exemple, le complexe GL2/Z impose une limite stricte, avec une teneur en impuretés (solides dissous) dans l'eau dessalée produite par ses propres unités de dessalement inférieure à 2 ppm.

II.4 Procédé de dessalement de l'eau de mer

La conversion de l'eau de mer en eau douce repose généralement sur une série d'étapes essentielles (voir figure II-1), notamment : la captation de l'eau en mer, un traitement préliminaire pour éliminer les impuretés, l'application d'une méthode de dessalement adaptée, suivie d'un traitement final visant à ajuster la composition minérale de l'eau produite.

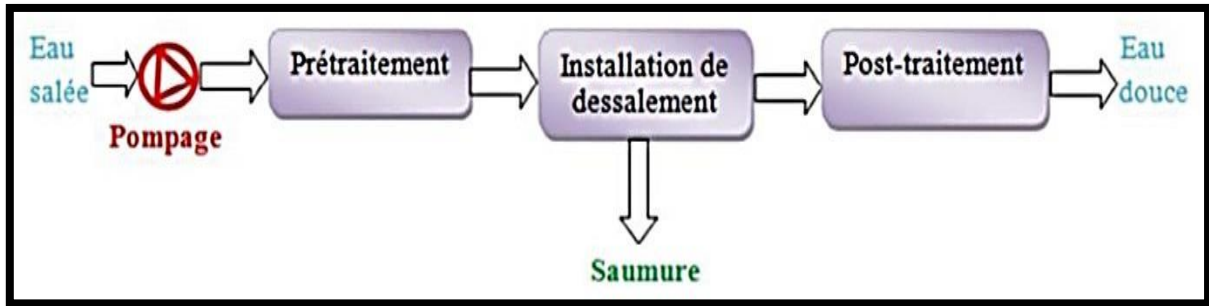


Figure II-1 : Schéma général d'une installation de dessalement.

II.5 Techniques de dessalement de l'eau de mer

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

- Les procédés qui font intervenir un changement de phase : la distillation, « Distillation Multi-stage flash (MSF) », « distillation Multi-effet distillation (MED) » ; où l'eau de mer est évaporée, puis condensée afin d'obtenir de l'eau distillée.
- Le procédé utilisant des membranes, à l'exemple de l'électrolyse et l'osmose inverse [21].

Le schéma suivant présente les procédés de dessalement de l'eau de mer.

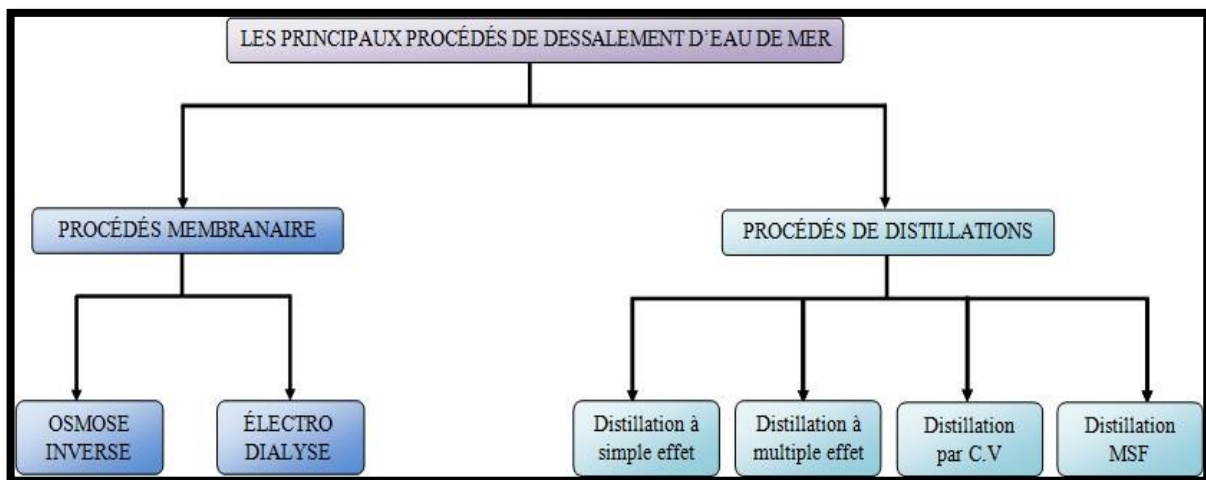


Figure II-2 : Schéma représentatif des principaux procédés de dessalement de l'eau de mer

La distillation et l'osmose inverse se distinguent parmi les procédés existants par leurs performances éprouvées dans le dessalement de l'eau de mer. Ces deux technologies dominent le marché mondial, tandis que les autres techniques peinent à s'imposer en raison de leur forte consommation énergétique et des investissements conséquents qu'elles exigent. Indépendamment du procédé choisi ou du type d'eau à traiter, les installations de dessalement suivent trois étapes principales : une prise d'eau de mer accompagnée d'une filtration grossière, Un prétraitement avec une filtration fine, et enfin le processus de dessalement proprement dit.

II.5.1 Les procédés de distillation ou de changement de phases

La distillation, une méthode éprouvée pour le dessalement de l'eau de mer, repose sur le principe de l'évaporation et de la condensation. L'eau de mer est chauffée jusqu'à ébullition, produisant une vapeur d'eau douce qui est ensuite condensée, tandis que la saumure, riche en sel, est rejetée. Ce procédé, simple et efficace, est utilisé depuis longtemps et se décline en plusieurs variantes. Il permet de produire de l'eau douce en éliminant progressivement les sels au cours de différentes étapes de séparation.

a- Distillation multi-flash (multi stage flash MSF):

L'unité de dessalement d'eau de mer repose sur la technique de distillation multi-flash (MSF), un procédé avancé qui utilise un évaporateur à flash multiple. Ce système fonctionne en combinant la chaleur et une réduction progressive de la pression pour provoquer une évaporation rapide (flash) de l'eau. L'eau de mer, préalablement chauffée à une température de 120°C par une chaudière, est introduite dans une série de cellules, où elle s'évapore instantanément sous l'effet du vide créé par des éjecteurs. La vapeur produite est ensuite condensée sur des tubes refroidis, tandis que le liquide restant passe par des étapes successives, pouvant atteindre jusqu'à 40 niveaux de pression décroissante.

Chaque unité MSF est équipée d'un évaporateur à flash multiple configuré en deux passes, un condenseur intégré pour le préchauffage et la condensation de l'eau distillée, et un réchauffeur de saumure pour ajuster la température. Des pompes assurent la circulation des fluides, et des produits chimiques, tels que des antitartres et des antimousses, protègent le

système. Ce procédé moderne permet d'obtenir de l'eau douce avec une salinité inférieure à 100 mg/L, à des températures de travail comprises entre 85°C et 95°C [22].

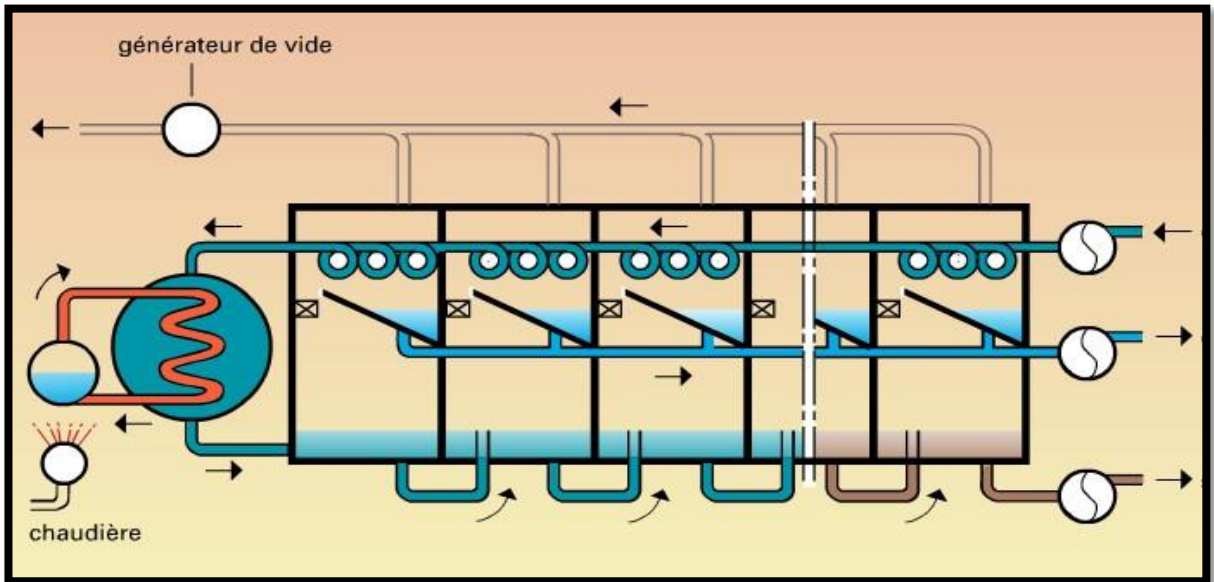


Figure II-3 : Dessaleur de type « MSF ».

b- Distillation à simple effet

La distillation à simple effet est une méthode économique et efficace utilisée à l'échelle industrielle pour dessaler l'eau de mer ou saumâtre. Ce procédé repose sur la différence de volatilité entre l'eau et le sel : lorsque l'eau salée est chauffée, seule l'eau s'évapore, tandis que le sel demeure dans la solution. La vapeur obtenue est ensuite condensée pour produire de l'eau douce [23].

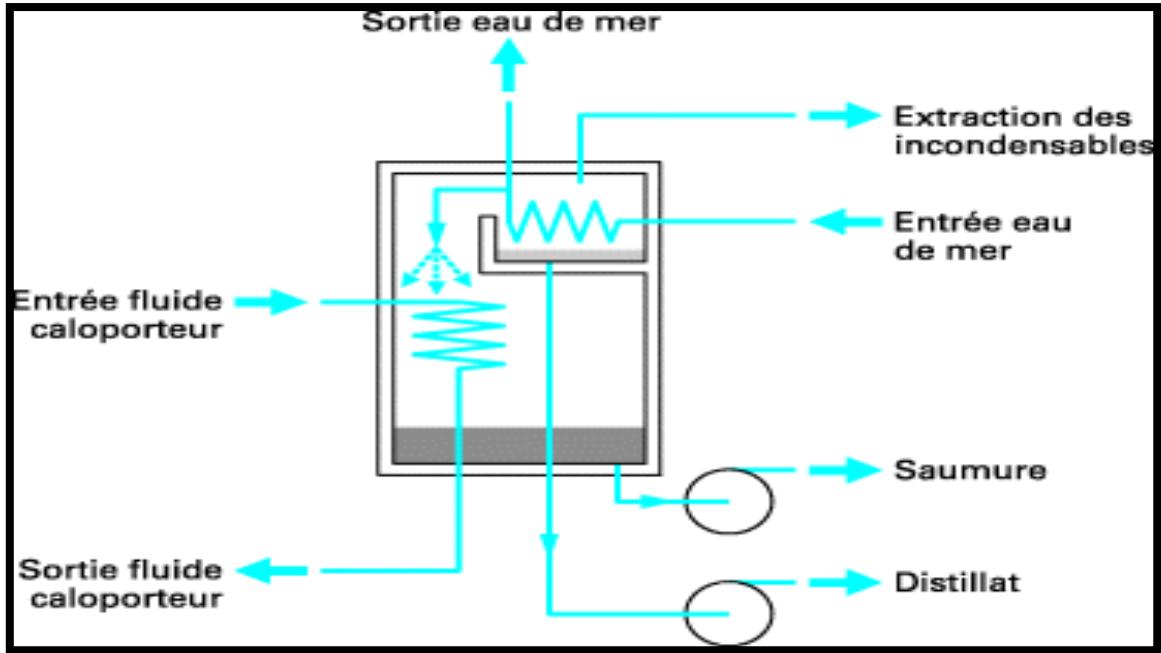


Figure II-4 : Principe de la distillation à simple effet.

c- Distillation à multiples effets (multi effet distillation « MED »)

La distillation à multiples effets (MED), illustrée à la figure II-5, est une technologie avancée qui optimise l'utilisation de la vapeur pour réduire la consommation énergétique et produire de l'eau douce de manière économique. L'eau de mer, préchauffée à une température de 70 à 80°C, s'évapore dans un premier effet sous pression réduite. La vapeur générée se condense dans un second effet, où elle transfère sa chaleur à l'eau de mer, provoquant son évaporation. Ce processus se répète en cascade à travers plusieurs effets (jusqu'à 12), minimisant ainsi l'énergie externe nécessaire. Seul le premier effet est alimenté en chaleur externe, généralement sous forme de vapeur ou d'eau chaude, tandis que les effets suivants exploitent la chaleur issue de la condensation de la vapeur produite dans l'effet précédent [9].

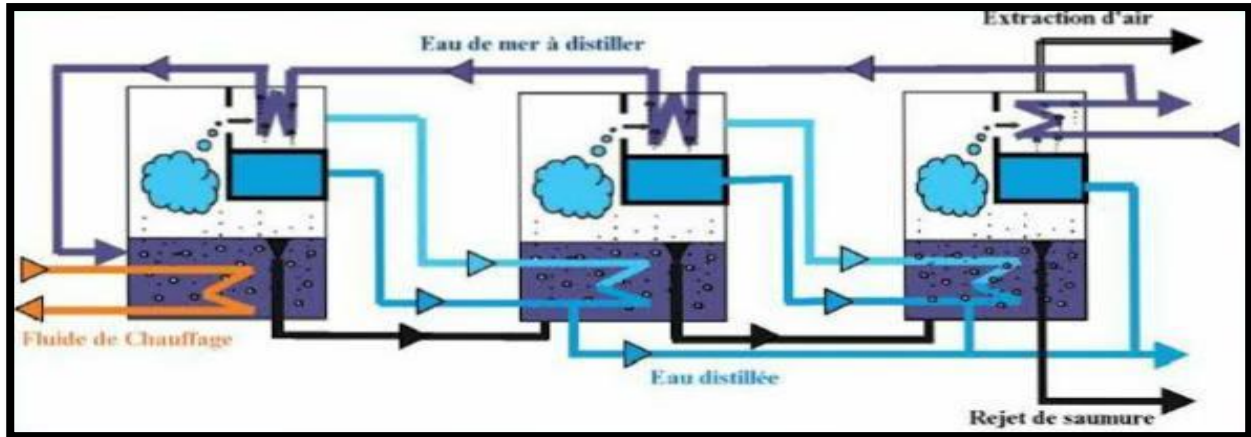


Figure II-5 : Principe de procédés de distillation a multiple effet

d- Distillation par compression de vapeur

Cette méthode, illustrée par la figure II-6, emploie la vapeur comme source de chaleur et l'énergie électrique pour assurer la compression. Pendant ce processus, le système récupère la chaleur produite et l'évacue à l'aide d'un compresseur. La vapeur utilisée provient généralement du dernier effet dans les installations de grande taille, ou de l'effet unique pour les petites installations.

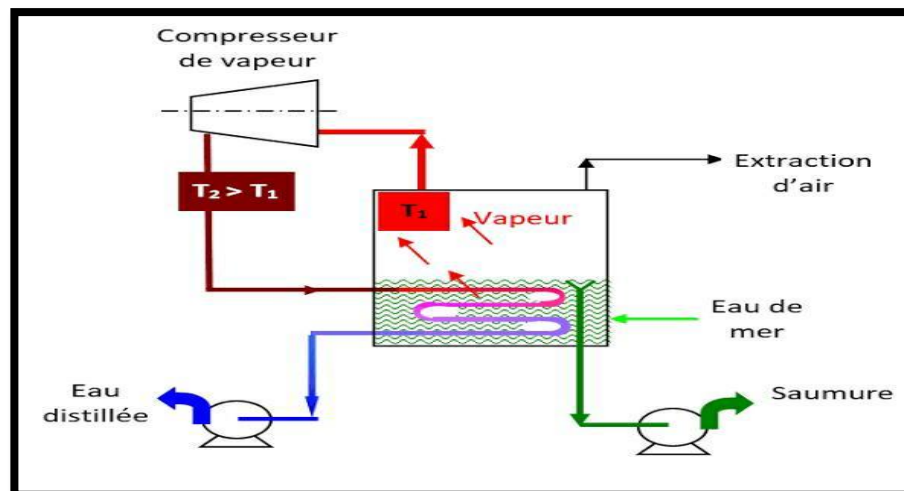


Figure II-6 : Un dessaleur type distillation à simple effet par compression

II.5.2 Procédé membranaire :

a- Procédés d'osmose inverse

Une unité de dessalement d'eau de mer par la technique d'osmose inverse fonctionne comme indiqué dans le schéma ci-dessous :

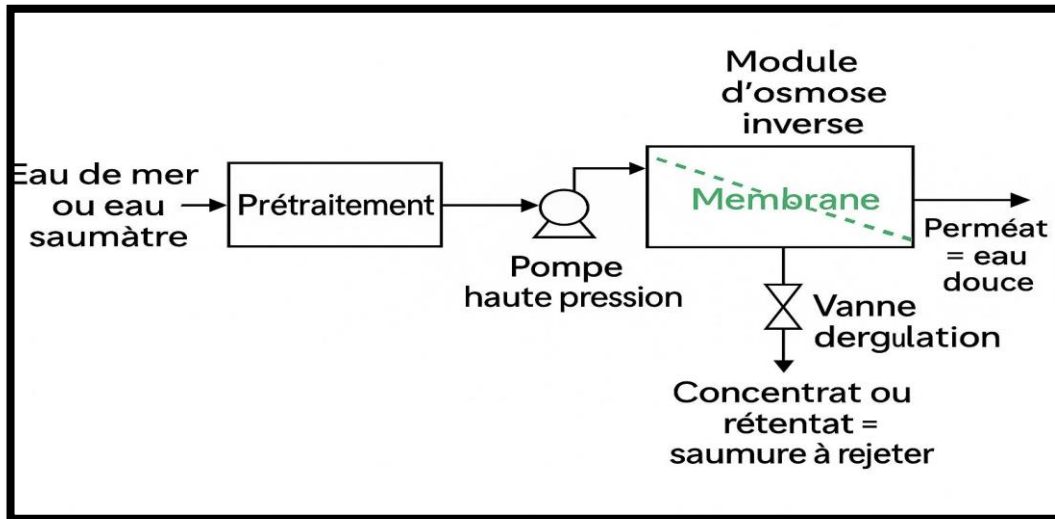


Figure II-7 : Unité de dessalement d'eau de mer par la technique d'osmose inverse

L'osmose inverse est une technologie innovante utilisant des membranes semi-perméables pour séparer l'eau des sels sous l'effet de la pression, sans changement de phase ni apport de chaleur (voir figure II-8). Ce procédé consiste à appliquer une forte pression sur l'eau de mer, la forçant à traverser une membrane qui retient les sels. L'eau douce obtenue est ainsi collectée, tandis que la saumure concentrée est évacuée. Réalisée à température ambiante, cette technique réduit la consommation énergétique, principalement électrique pour alimenter les pompes, et permet de produire une eau faiblement salée (environ 0,5 g/L) [24].

Le dessalement par osmose inverse nécessite au préalable un prétraitement rigoureux de l'eau de mer afin d'éviter l'accumulation de matières en suspension sur les membranes, ce qui pourrait entraîner une diminution des débits produits.

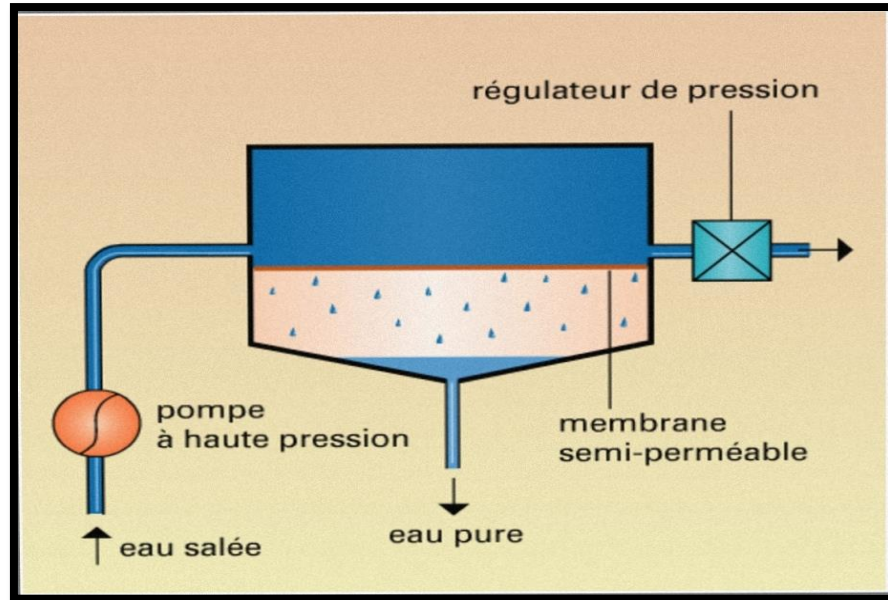


Figure II-8 : Un dessaleur fonctionnant par osmose inverse

b- Procédé d'électrodialyse

L'électrodialyse est une technique électrochimique qui utilise des membranes imperméables à l'eau mais sélectives aux ions pour séparer les composants d'une solution (voir figure II-9). Les membranes anioniques ne laissent passer que les anions, tandis que les membranes cationiques permettent uniquement le passage des cations. Ce procédé permet d'extraire partiellement ou totalement les ions d'une solution, tout en conservant les substances peu ou non ionisées, offrant ainsi une méthode efficace de désalinisation et de purification.

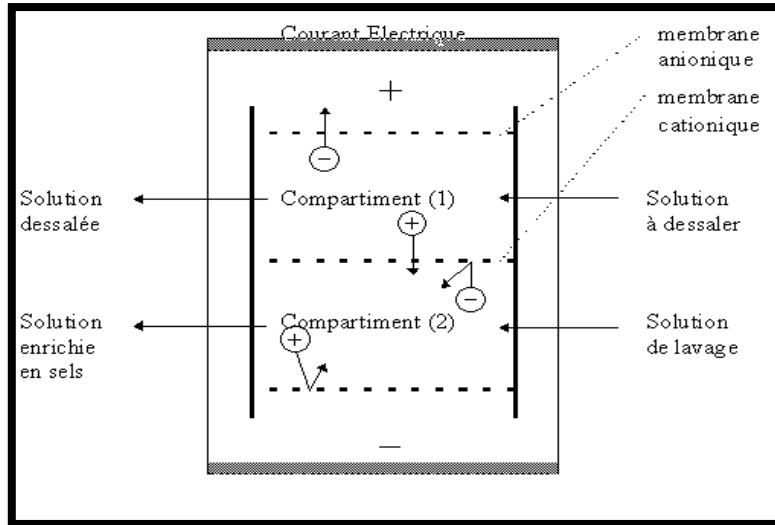


Figure II-9 : Fonctionnement d'un électro dialyseur.

II.6 Les critères de sélection du procédé de dessalement

Le choix d'un procédé de dessalement parmi les différentes technologies disponibles doit prendre en compte plusieurs critères essentiels :

- **Composition en sels dissous** : Il est crucial de considérer le degré de salinité des eaux à traiter pour garantir une qualité conforme aux normes.
- **Ressources énergétiques** : L'accès à l'énergie et son coût local sont des facteurs déterminants.
- **Aspect économique** : L'objectif est de produire de l'eau dessalée avec une consommation énergétique et des coûts réduits.
- **Gestion des déchets** : La facilité d'évacuation des résidus est primordiale.
- **Ressources humaines et techniques** : La disponibilité de personnel qualifié pour l'exploitation et la maintenance, ainsi que l'accès aux pièces de rechange et produits chimiques nécessaires, sont essentiels.

- **Capacité de production :** La technologie choisie doit répondre aux besoins en production horaire ou journalière.
- **Qualité hygiénique :** La qualité de l'eau produite, notamment pour un usage potable, est un critère majeur.
- **Coût de revient :** Il est important d'optimiser le coût global de production.

Parmi les options disponibles, le procédé de distillation par vaporisation instantanée à détente successive (MSF), reconnue pour sa fiabilité et sa simplicité d'exploitation. Bien qu'il n'existe pas de dimension standard pour une unité de dessalement, la taille idéale dépend des besoins spécifiques de la communauté ou du complexe à alimenter

II.7 Unité de dessalement du complexe GL2/Z

Les complexes de GNL consomment de grandes quantités de vapeur, utilisée à la fois comme source d'énergie pour le chauffage et comme force motrice pour les machines tournantes.

L'unité de dessalement du complexe GL2/Z fournit l'eau distillée indispensable au fonctionnement des chaudières et des équipements du site, en exploitant l'eau de mer. Grâce à sa très faible teneur en sel (moins de 2 ppm), cette eau est utilisée comme fluide thermique et réfrigérant.

Le complexe GL2/Z est équipé de six unités de dessalement. Trois d'entre elles (2010 LA/B/C), de fabrication SASAKURA, ont été installées lors de la construction du site en 1978. Deux autres unités (2010 LE/D), produites par AQUA-CHEM, ont été mises en service lors de la rénovation du complexe en 1994, tandis que la dernière (2010 LF), de conception WEIR ENTROPIE, a été installée en 2004.

Les cinq premières unités (2010 LA/B/C/D/E) utilisent un procédé de distillation multi-étage à simple effet (MSF), chacune ayant une capacité de production de 45,3 m³/h, soit un total de 226,5 m³/h. La sixième unité (2010 LF) fonctionne selon le procédé TCD (Thermo

Compression Distiller), basé sur l'évaporation et la condensation sous vide, avec une capacité de 60 m³/h d'eau distillée et 12 m³/h de condensât à partir de vapeur à 17 bars.

L'eau produite est principalement destinée à l'appoint des chaudières. Chaque unité peut fonctionner indépendamment ou en parallèle avec les autres. Par ailleurs, une interconnexion avec le complexe GL1/Z garantit un approvisionnement en eau distillée en cas de besoin [25,26]

II.8 Description de l'unité de dessalement de type MSF

L'eau de mer méditerranéenne, transportée vers un bassin de distribution, subit une chaîne de prétraitement avant d'être répartie sur le réseau de refroidissement de l'eau de mer, les réseaux d'eau distillée et de dessalement de l'eau de mer, ainsi que le réseau de lutte contre l'incendie [5].

II.8.1 La section pomperie

La section pomperie joue un rôle essentiel dans le traitement et la distribution de l'eau de mer destinée aux diverses applications des installations GNL. L'eau de mer passe par plusieurs étapes avant d'atteindre ses destinations finales.

Tout d'abord, elle est acheminée vers un bassin de distribution commun à LNG1 et LNG2, où un filtre EDM élimine les moules et les algues. Elle traverse ensuite un filtre grossier à grille fixe, qui retient les plus grosses particules, suivi d'un filtre rotatif pour capturer les particules fines résiduelles.

Après cette filtration, l'eau est pompée, régulée et stockée dans deux réservoirs de collecte (tambours), avant d'être distribuée. Les collecteurs d'utilité, situés dans chaque train de traitement, acheminent l'eau traitée vers l'unité de dessalement ou d'autres équipements, tels que les turbogénérateurs [5].

II.8.2 L'unité de dessalement de type « MSF »

L'unité de dessalement de type « MSF » du complexe GL2/Z comprend cinq (05) unités de dessalement identiques produisant de l'eau distillée, avec une teneur en sel dissous inférieure à 2 ppm. Ces unités sont constituées de huit (08) étages (cellules) allongés dans une

configuration à deux passes, chacune à écoulement transversal et sans recyclage. Chaque unité débite 45,3 m³/h.

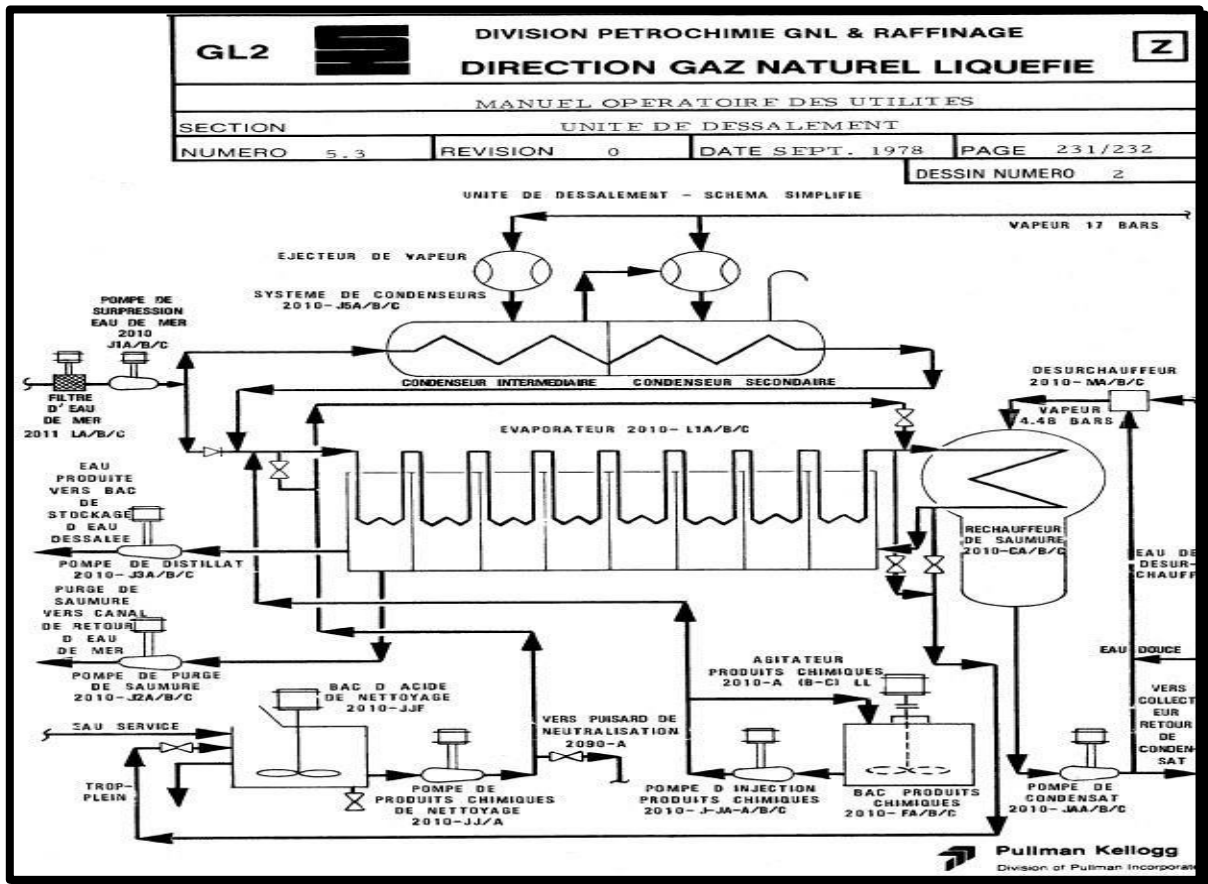


Figure II-10 : Schéma simplifié de l'unité de dessalement.

Les équipements composant 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.

a- Filtres à eau de mer

Les filtres à eau de mer (2011 L A, B, C, D, E) assurent une filtration continue en retenant les particules volumineuses, comme les algues, le sable, les sédiments, et les fragments de coquilles. Dotés d'un système de lavage à contre-courant activé toutes les 30 minutes, ils garantissent un fonctionnement ininterrompu de l'unité.

b- L'évaporateur

L'eau de mer filtrée est acheminée par les pompes de surpression (2010 J1 A, B, C, D, E) vers l'évaporateur et l'éjecteur-condenseur. Chauffée à 90 °C par le réchauffeur de saumure (2010 C A, B, C, D, E), elle circule en contre-courant à travers les faisceaux tubulaires. La chaleur et le vide généré par les éjecteurs provoquent son évaporation.

La vapeur obtenue passe par un pare-gouttelettes, se condense au contact des tubes et est collectée comme eau distillée. Après les huit étapes du procédé, l'eau distillée est stockée dans un réservoir grâce à la pompe de distillat (2010 J3 A, B, C, D, E). Le surplus de saumure est rejeté par la pompe de rejet (2010 J2 A, B, C, D, E), tandis que les gaz non condensables sont évacués par le système de vide.

c- Réchauffeur de saumure

Ce réchauffeur élève la température de l'eau de mer de 78,6 °C à 90 °C à l'aide de vapeur basse pression. Les condensats produits sont recueillis dans un réservoir, régulés, puis renvoyés via des pompes (2010 J4 A, B, C, D, E) vers le refroidisseur de surchauffe ou la ligne de retour des condensats.

d- Injecteur et condenseur

Le vide dans l'unité est maintenu par deux éjecteurs à deux étages et un condenseur en deux parties. Les gaz incondensables sont évacués via des événements, tandis que la vapeur à 17 bars permet une détente à basse température, réduisant les risques de tartre et de moussage.

e- Pompe de surpression d'eau de mer

Cette pompe augmente la pression de l'eau filtrée pour l'acheminer vers l'évaporateur et l'éjecteur-condenseur.

f- Système d'injection de produits chimiques

Un système dédié empêche la formation de tartre et de mousse dans l'unité. Il comprend un bac de préparation (2010 F A, B, C, D, E), des pompes doseuses (2010 J/JA A, B, C, D, E), un régulateur de pression (PCV-4301), un indicateur de débit (FI-4304), et un agitateur pour homogénéiser les produits injectés.

g- Désurchauffeur

Le désurchauffeur alimente le réchauffeur de saumure avec de la vapeur saturée à 100 °C en abaissant la température de la vapeur à l'aide de condensât comme agent de désurchauffe.

h- Bac de stockage

Le bac de stockage d'eau distillée (2041 F), d'une capacité de 8710 m³, est pressurisé à l'azote pour éviter tout contact avec l'air. Les pompes d'appoint (2010 J A, B, C, D, E) transfèrent cette eau vers le collecteur d'eau d'appoint destiné aux chaudières.

II.9 Principe de fonctionnement de l'unité de dessalement « MSF »

Le procédé d'évaporation multi-étage (MSF) désalinise l'eau de mer en la chauffant jusqu'à atteindre une température permettant la formation de flashes (évaporation rapide) à une pression inférieure à la pression atmosphérique. La vapeur pure ainsi produite est débarrassée

des gouttelettes de solution saline à l'aide de dispositifs éliminateurs de gouttes (démisters), puis elle se condense sur des tubes de condenseur pour devenir de l'eau distillée.

Le processus se déroule en plusieurs étapes successives, où la pression diminue progressivement de la première à la dernière étape. Cette différence de pression est le moteur principal des flashes répétés. Le vide dans les étapes est créé par un système de vide comprenant des jets d'aspiration et des condenseurs barométriques pour éliminer les gaz non condensables.

L'eau de mer brute est pompée par une pompe de relève, filtrée puis chauffée progressivement à l'intérieur des tubes du condenseur par la vapeur de solution saline condensée, jusqu'à atteindre environ 73 °C, puis elle subit un chauffage supplémentaire dans un chauffe-eau jusqu'à environ 91 °C avant d'entrer dans la première étape.

La vapeur formée est progressivement collectée dans les dernières cellules et pompée vers le réservoir de produit, où la qualité de l'eau est contrôlée à l'aide de dispositifs de mesure de conductivité. L'eau ne répondant pas aux normes est rejetée [27].

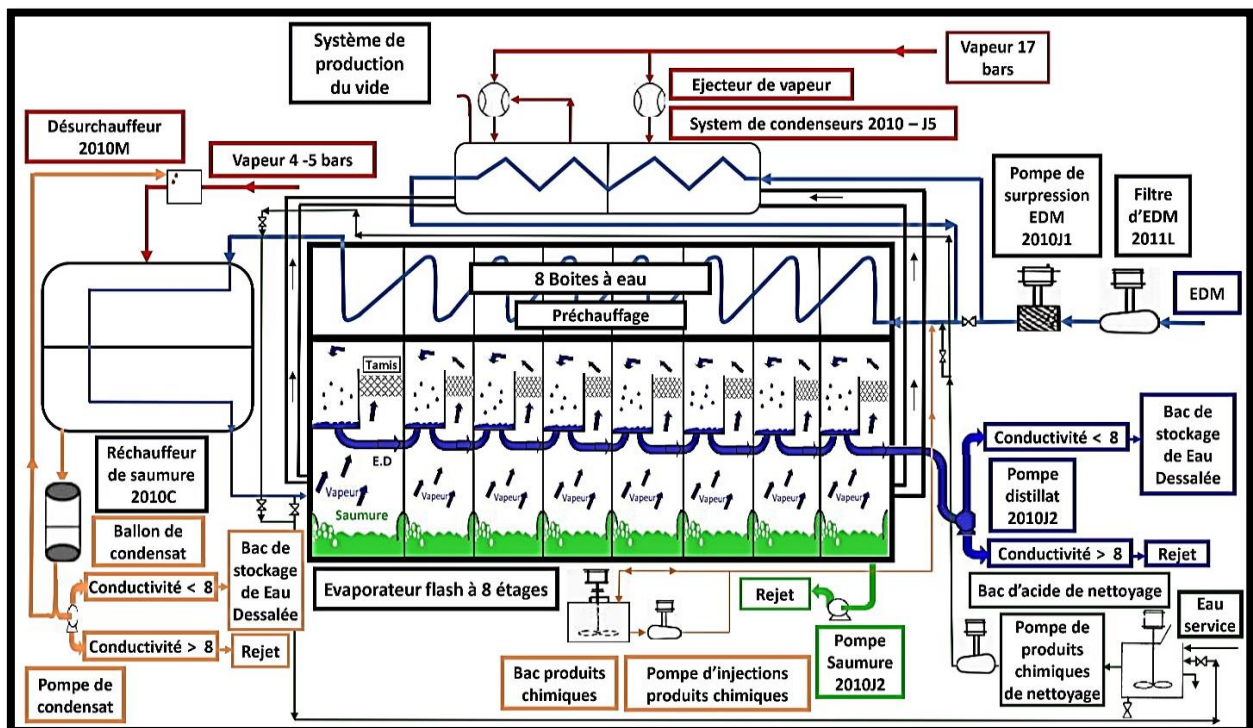


Figure II-11 : Principe et paramètres de fonctionnement de l'unité de dessalement de type MSF.

II.10 Conclusion

Le dessalement de l'eau de mer constitue une solution essentielle pour répondre à la pénurie mondiale d'eau douce, particulièrement dans les régions qui souffrent de la rareté des ressources, comme c'est le cas de l'Algérie. Des technologies comme la distillation et l'osmose inverse ont prouvé leur efficacité et leur fiabilité. L'exemple du complexe GL2/Z, utilisant des procédés de distillation multi-flash et de compression de vapeur, illustre l'applicabilité industrielle et l'importance stratégique du dessalement pour une gestion durable des ressources hydriques.

Chapitre III :

Fonctionnement et Gestion des Unités de Dessalement

III.1 Introduction

La forte production de gaz naturel liquéfié (GNL) au sein du complexe GL2/Z repose sur un processus complexe qui dépend fortement de la disponibilité de l'eau distillée ou dessalée. Cette ressource essentielle est indispensable pour générer la vapeur utilisée dans le chauffage, le fonctionnement des équipements rotatifs, ainsi que le refroidissement des échangeurs et des condenseurs dans la zone Utilities. Cependant, les cinq unités de Dessalement utilisant la technologie de flash multi-étapes (MSF) rencontrent des difficultés notables, marquées par une diminution significative de leur production d'eau dessalée depuis 2010. Cette baisse affecte directement l'efficacité globale du complexe. Ce chapitre vise à analyser les performances actuelles des unités de Dessalement, identifier les paramètres clés de fonctionnement des dessaleurs MSF, examiner les méthodes de traitement des eaux dessalées, et mettre en lumière les contraintes opérationnelles rencontrées au sein du complexe.

III.2 Production de l'eau dessalée dans le complexe GL2/Z

Les données ci-dessous présentent la valeur moyenne mensuelle de la production des deux dessaleurs de type MSF en fonctionnement, couvrant la période de notre stage (mois de février). Les résultats obtenus sont représentés dans le tableau ci-après.

Tableau III-1 : Production des deux dessaleurs de type MSF

	2010LA	2010LB	2010LC	2010LD	2010LE	Production E. D
02/02/25	0	0	795,04	432	0	1227,04
03/02/25	0	0	794,97	432	0	1226,97
04/02/25	0	0	794,51	432	0	1226,51
05/02/25	0	0	796,96	432	0	1228,96
06/02/25	0	0	792,24	432	0	1224,24
07/02/25	0	0	794,91	432	0	1226,91
08/02/25	0	0	807,05	432	0	1239,05
09/02/25	0	0	798,45	432	0	1230,45
10/02/25	0	0	793,21	432	0	1225,21
11/02/25	0	0	784,46	432	0	1216,46
12/02/25	0	0	792,87	432	0	1224,87
13/02/25	0	0	791,22	432	0	1223,22
14/02/25	0	0	784,29	432	0	1216,29
15/02/25	0	0	779,28	432	0	1211,28
16/02/25	0	0	786,04	432	0	1218,04
17/02/25	0	0	780,23	432	0	1212,23
18/02/25	0	0	743,98	432	0	1175,98
19/02/25	0	0	769,61	432	0	1201,61
20/02/25	0	0	743,38	432	0	1175,38
21/02/25	0	0	765,93	432	0	1197,93
22/02/25	0	0	771,14	432	0	1203,14

Les valeurs de production des deux dessaleurs de type MSF, contenues dans le tableau III-1, sont représentées dans le graphe qui suit :

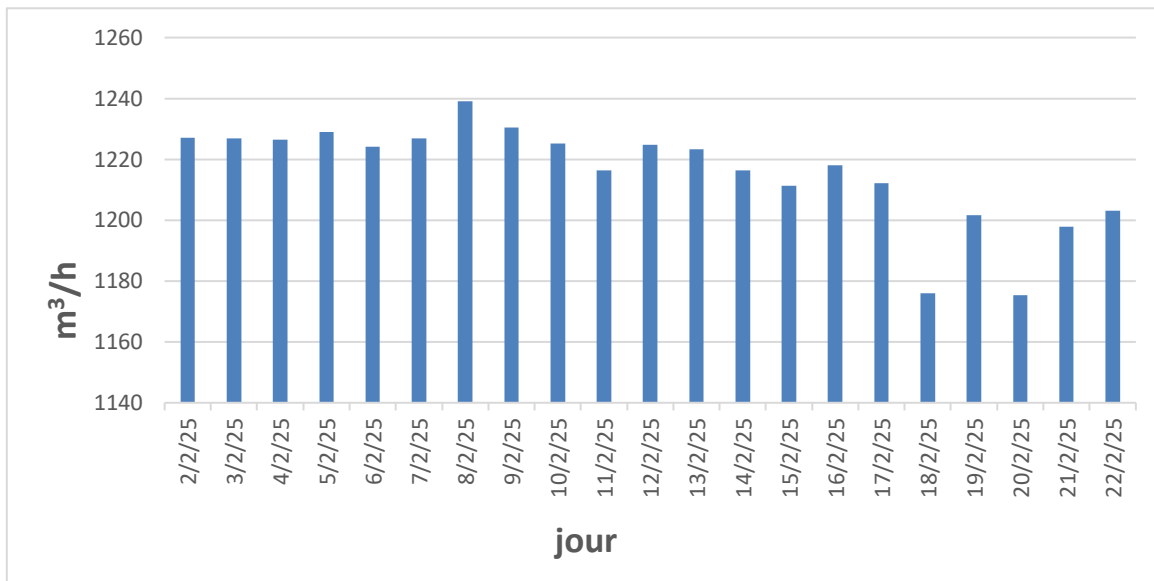


Figure III-1 : Evolution de la production en eau dessalée des deux dessaleurs de type MSF

Les données présentées dans le graphe ci-dessus illustrent l'évolution de la production journalière d'eau, mesurée en m³/h, sur une période couvrant 20 jours. Ces résultats reflètent les performances des systèmes de production sur une base quotidienne.

On observe une certaine stabilité de la production d'eau au début de la période étudiée, atteignant un pic notable de **1 240 m³/h** le 8/2/25. Toutefois, à partir de cette date, une diminution progressive est perceptible, aboutissant à un minimum significatif aux alentours des **1 160 m³/h** les 18/2/25 et 19/2/25. La production remonte légèrement vers la fin de la période, sans toutefois retrouver les niveaux maximaux observés en début de mois.

La production moyenne journalière calculée pour cette période est estimée à environ **1 200 m³/h**, ce qui peut être en deçà des objectifs prévus par le système. Ces fluctuations pourraient être associées à divers facteurs opérationnels, tels que des perturbations dans les équipements, des problèmes liés à l'entretien, ou encore des variations dans les conditions d'alimentation des dessaleurs.

Ces écarts par rapport aux niveaux attendus soulignent l'importance d'une analyse approfondie des causes techniques ou organisationnelles de ces variations. Une telle démarche

permettrait d'identifier et de résoudre les problèmes, améliorant ainsi la capacité et la régularité de la production.

III.3 Traitement des eaux dessalées dans le complexe GNL2 /Z

Le laboratoire du complexe GL2/Z effectue des analyses pour contrôler la qualité de l'eau dessalée, produite par le complexe, et en assurer une bonne qualité. Ces analyses sont :

III.3.1 Mesure du pH

Le pH mesure la concentration d'ions oxonium (H_3O^+) et le degré d'acidité ou de basicité d'une solution aqueuse, avec un intervalle de 6 à 8 pour l'eau du dessaleur.

Les récipients, contenant les prélèvements, doivent être fermés de façon à éviter toute contamination du produit échantillonné et conservés à l'abri de toute contamination par le milieu externe.

L'analyse du pH nécessite de préchauffer le pH-mètre pour qu'il atteigne son équilibre électrique, de le calibrer avec des solutions tampons, puis de mesurer un échantillon à température ambiante. Pour effectuer la mesure, l'électrode est immergée dans le bécher contenant l'échantillon, et la lecture est réalisée une fois que la valeur affichée s'est stabilisée [28].

➤ Importances de mesurer le pH

La mesure du pH est un indicateur clé pour assurer le contrôle de la qualité de l'eau dans les stations de dessalement. Le niveau d'acidité ou de basicité a un impact direct sur les performances des équipements et l'efficacité des traitements. Un pH inférieur à 6 rend le milieu acide, favorisant la corrosion des conduites métalliques et des réservoirs. Cette corrosion peut libérer des métaux tels que le fer et le cuivre dans l'eau, altérant sa couleur, son goût et augmentant le risque de contamination métallique. Par exemple, une eau acide qui circule continuellement dans des canalisations agit de manière similaire au jus de citron sur le fer, provoquant une dissolution progressive de la surface métallique. Ce processus affaiblit les structures mécaniques et réduit la durée de vie des équipements.

À l'inverse, un pH supérieur à 8 augmente le risque de formation de dépôts de sels alcalins, comme le carbonate de calcium (calcaire, CaCO_3) ou le carbonate de magnésium. Ces dépôts créent des couches isolantes sur les surfaces thermiques, réduisant le transfert de chaleur et diminuant l'efficacité des unités d'évaporation MSF.

Ainsi, maintenir le pH dans une plage optimale, généralement comprise entre 6 et 8, est crucial pour préserver l'intégrité des équipements, prévenir la corrosion et l'entartrage, et garantir une qualité d'eau conforme aux exigences sanitaires et industrielles.

Les mesures du PH de l'eau dessalée pendant la période de stage sont démontrées sur les graphes de la figure III-2 et celles extraites des dessaleurs entre le 1 février 2025 et le 22 février 2025 sont rassemblées dans le tableau III-2

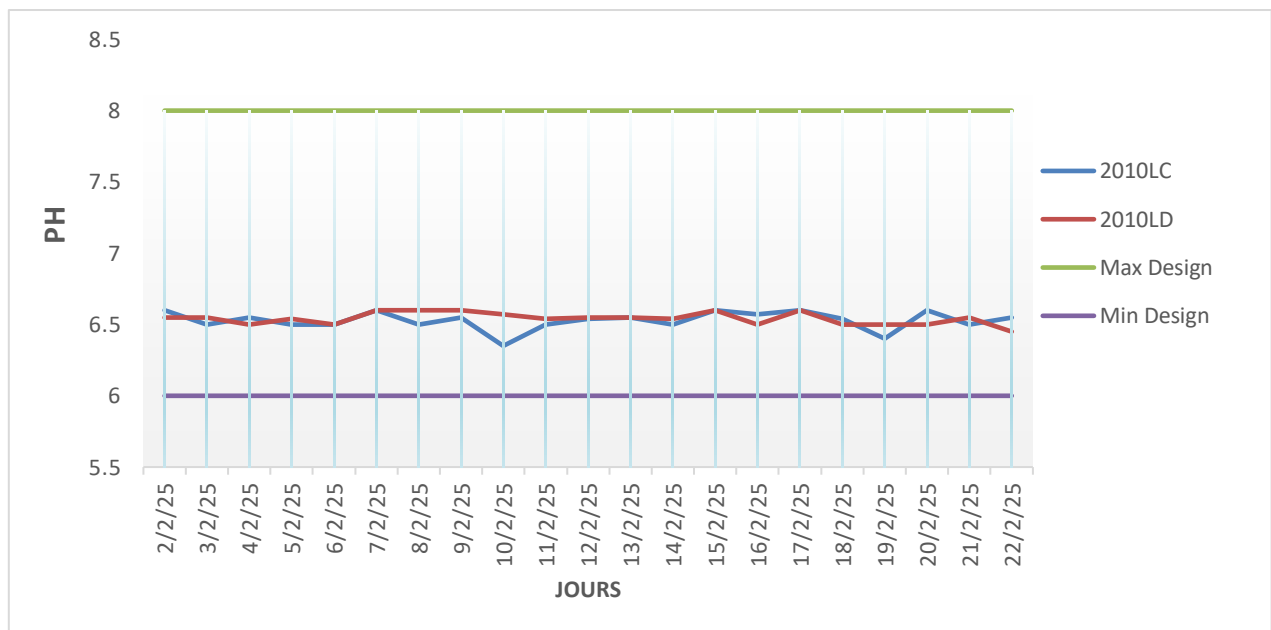


Figure III-2 : Mesure du pH de l'eau dessalée pendant 20 jours

Tableau III-2 : Résultats des mesures de pH pendant 20 jours

	Dessaleurs	
	2010LC	2010LD
Jours	pH	
02/02/25	6,6	6,55
03/02/25	6,5	6,55
04/02/25	6, 55	6,5
05/02/25	6,5	6,54
06/02/25	6, 5	6,5
07/02/25	6,6	6,6
08/02/25	6,5	6,6
09/02/25	6, 55	6,6
10/02/25	6,35	6,57
11/02/25	6,5	6,54
12/02/25	6,54	6,55
13/02/25	6,55	6,55
14/02/25	6,5	6,54
15/02/25	6,6	6,6
16/02/25	6,57	6,5
17/02/25	6,6	6,6
18/02/25	6,54	6,5
19/02/25	6,4	6,5
20/02/25	6,6	6,5
21/02/25	6,5	6,55
22/02/25	6,55	6,45
Design	6-8	

Au cours du période de stage, des observations ont été menées sur le pH de l'eau dessalée produite par les dessaleurs 2010LC et 2010LD. Ces analyses ont révélé de légères variations régulières du pH tout au long de la période. Cependant, les valeurs mesurées restent globalement

dans des limites compatibles avec les normes en vigueur, garantissant ainsi la qualité du produit dessalé.

La stabilité des résultats témoigne de la fiabilité et de l'efficacité opérationnelle des installations de dessalement. En somme, ces résultats rassurants soulignent la cohérence du processus de dessalement et son respect des exigences normatives, un élément clé pour assurer la qualité de l'eau produite.

III.3.2 Mesure de la conductivité

La conductivité électrique représente la capacité d'un matériau ou d'une solution à permettre le déplacement des charges électriques. Elle est mesurée en siemens par mètre ($S.m^{-1}$) à l'aide d'un conductimètre, utilisé comme analyseur des électrolytes dissous dans l'eau des chaudières, des dessaleurs et des systèmes de refroidissement. Cette propriété dépend de la concentration en sels ioniques dissous ainsi que de la température et est généralement évaluée à 25°C, avec une limite maximale fixée à $8\mu S/cm$.

L'objectif de cette étude est d'évaluer la qualité de l'eau en mesurant la conductivité électrique de prélèvements effectués à la sortie de chaque dessaleur, pendant la période de notre stage, en collaboration avec le service des laboratoires.

La méthode consiste à démarrer le système, rincer la sonde avec de l'eau distillée, immerger la sonde dans le récipient contenant l'échantillon et relever les données de conductivité affichées sur l'écran du conductimètre.

Les mesures de la conductivité de l'eau dessalée sont démontrées sur les graphes de la figure III-3 et celles extraites des dessaleurs pendant 20 jours sont rassemblées dans le tableau III-3.

➤ Importance de mesurer la conductivité

La conductivité électrique est un indicateur essentiel de la pureté de l'eau. Une conductivité élevée reflète une concentration importante en sels dissous, ce qui accroît le risque de formation de tartre et de corrosion. Le suivi de la conductivité permet de maintenir un

équilibre réduisant ces phénomènes, contribuant ainsi à prolonger la durée de vie des équipements.

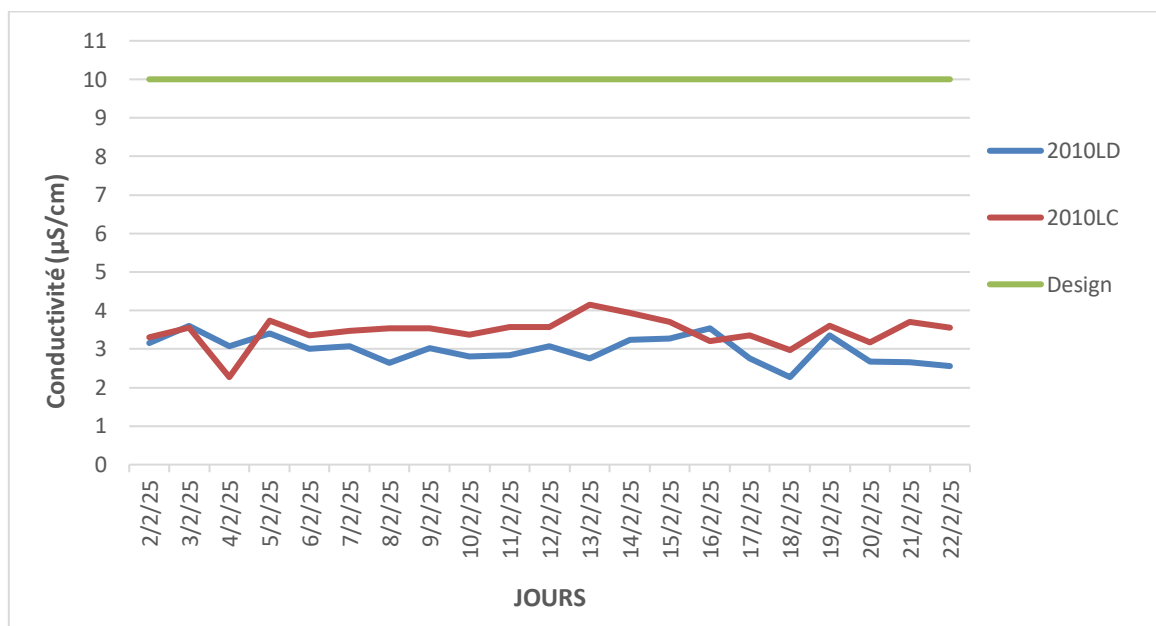


Figure III-3 : Mesure de conductivité de l'eau dessalée pendant 20 jours

Tableau III-3 : Résultats des mesures de la conductivité pendant 20 jours

Jours	Dessaleurs	
	2010LC	2010LD
	σ (µS/cm)	
02/02/25	3,15	3,30
03/02/25	3,60	3,55
04/02/25	3,07	2,27
05/02/25	3,40	3,73
06/02/25	3	3,35
07/02/25	3,07	3,47
08/02/25	2,64	3,53
09/02/25	3,03	3,53
10/02/25	2,80	3,37
11/02/25	2,84	3,57

12/02/25	3,07	3,57
13/02/25	2,75	4,15
14/02/25	3,24	3,94
15/02/25	3,27	3,70
16/02/25	3,54	3,20
17/02/25	2,75	3,35
18/02/25	2,27	2,97
19/02/25	3,35	3,60
20/02/25	2,67	3,17
21/02/25	2,65	3,70
22/02/25	2,55	3,55
Design	<10	

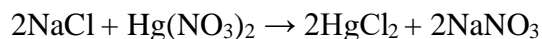
En février 2025, les mesures de conductivité de l'eau dessalée produite par les unités de dessalement 2010LC et 2010LD ont révélé des variations internes à chaque unité, tout en restant globalement stables. Ces résultats confirment la cohérence du processus de dessalement et le respect des normes de qualité, soulignant ainsi la fiabilité continue des installations du complexe GL2/Z. Ils illustrent l'engagement à fournir une eau dessalée de haute qualité, répondant aux besoins des utilisateurs.

III.3.3 Mesure des ions chlorure

La teneur en ions chlorure dans l'eau varie selon les régions géologiques : les eaux des zones granitiques présentent une concentration plus faible que celles des régions sédimentaires. Cette teneur augmente avec le niveau de minéralisation et la conductivité de l'eau.

➤ Principe de la manipulation

L'analyse repose sur la fixation des ions chlorure (Cl^-) par les ions mercure (Hg^{2+}) sous forme de chlorure de mercure (HgCl_2). Cette méthode de dosage permet de déterminer la concentration en chlorures, qui doit rester inférieure à 1 ppm. Le procédé implique un titrage utilisant une solution de nitrate de mercure, où la réaction chimique s'exprime par l'équation :



Le protocole opérationnel comprend les étapes suivantes : prélever 100 ml d'eau à analyser, ajouter 1 ml d'acide nitrique (HNO_3 à 0,1 N) et 2 à 3 gouttes de diphénylcarbazone pour obtenir une teinte jaune. Ensuite, la solution de nitrate de mercure est ajoutée progressivement jusqu'à l'apparition d'une teinte bleu violacé. Le volume de nitrate de mercure utilisé est alors mesuré pour déterminer la concentration en chlorures.

Les mesures du chlorure de l'eau dessalée pendant 20 jours sont indiquées sur les graphes de la figure III-4 et celles extraites des dessaleurs durant cette période sont rassemblées dans le tableau III-4.

➤ **Importances de mesurer les ions chlorure**

Le suivi de la concentration en ions chlorure (Cl^-) est essentiel pour garantir l'efficacité et la durabilité des systèmes de traitement de l'eau. Une augmentation de ces ions peut indiquer une fuite d'eau de mer dans l'eau traitée, souvent due à une défaillance des membranes ou des échangeurs thermiques. Les chlorures, en tant qu'agents corrosifs, présentent également un risque important pour les surfaces métalliques, provoquant une corrosion localisée, notamment à l'intérieur des échangeurs thermiques. Par ailleurs, cette surveillance régulière constitue un outil de maintenance préventive, permettant de détecter rapidement les dysfonctionnements, de limiter les dommages potentiels et de réduire les coûts d'entretien grâce à des interventions précoces.

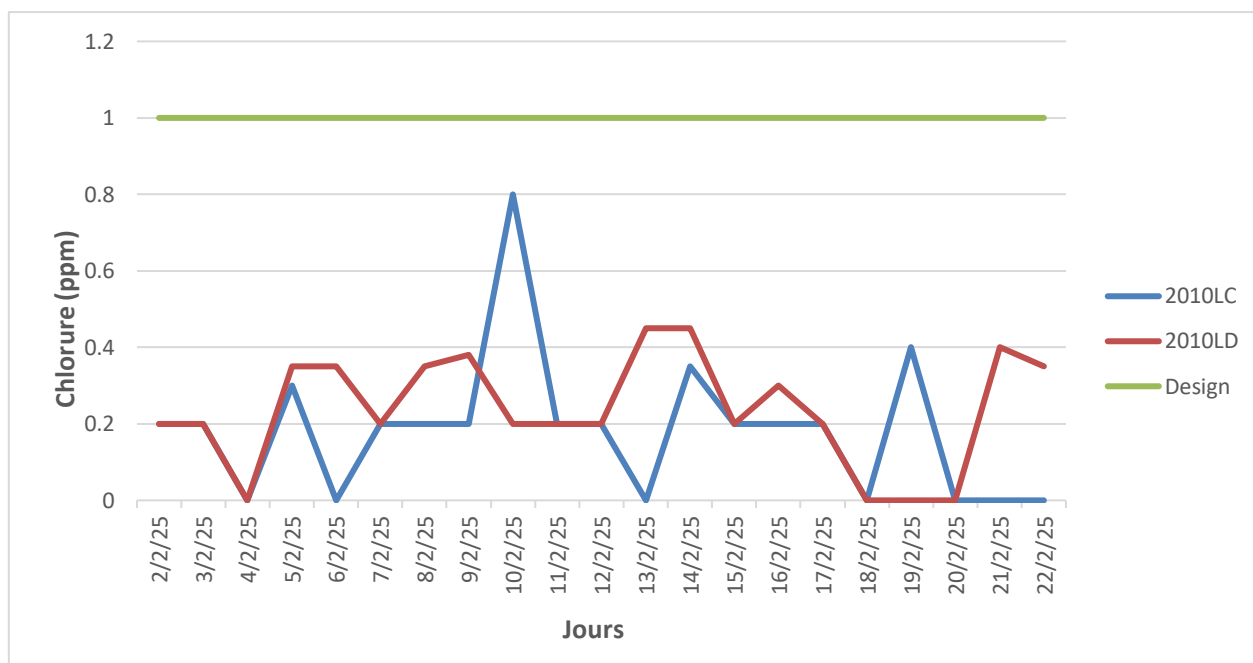


Figure III-4 : Mesure du chlorure de l'eau dessalée pendant 20 jours.

Tableau III-4 : Résultats des mesures de la concentration en ions chlorure (Cl⁻).

Jours	Dessaleurs	
	2010LC	2010LD
	Chlorure (ppm)	
02/02/25	0,2	0,2
03/02/25	0,2	0,2
04/02/25	0	0
05/02/25	0,3	0,35
06/02/25	0	0,35
07/02/25	0,2	0,2
08/02/25	0,2	0,35
09/02/25	0,2	0,38
10/02/25	0.8	0,2
11/02/25	0,2	0,2
12/02/25	0,2	0,2
13/02/25	0	0,45
14/02/25	0,35	0,45

15/02/25	0,2	0,2
16/02/25	0,2	0,3
17/02/25	0,2	0,2
18/02/25	0	0
19/02/25	0,4	0
20/02/25	0	0
21/02/25	0	0,4
22/02/25	0	0,35
Design	<1	

En février dernier, les analyses de la concentration en chlorure dans l'eau dessalée produite par les dessaleurs 2010LC et 2010LD ont montré de faibles variations, avec des niveaux restant inférieurs à la limite recommandée de 1 ppm. Cette stabilité confirme la conformité aux normes, la sécurité de l'eau pour une utilisation, et la fiabilité des installations, garantissant une qualité constante tout au long de la période analysée.

III.4 Problèmes techniques en dessalement d'eau de mer

L'inspection de l'unité de dessalement dans la zone des utilités du complexe GL2/Z a permis d'identifier plusieurs problèmes affectant la production d'eau dessalée. Parmi les principaux problèmes rencontrés figurent l'entartrage des équipements et la corrosion, qui compromettent l'efficacité du processus.

III.4.1 Problème d'entartrage

Le tartre est un dépôt calcaire, issu de la précipitation des minéraux contenus dans l'eau sous l'effet de la chaleur. Ce phénomène, appelé entartrage, se produit lorsque les ions calcium (Ca^{2+}) et magnésium (Mg^{2+}) réagissent avec les ions carbonate (CO_3^{2-}) et phosphate (PO_4^{3-}), formant des dépôts solides tels que le carbonate de calcium (CaCO_3) et le phosphate de calcium ($\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$). Ces dépôts s'accumulent fréquemment sur les surfaces métalliques, notamment à l'intérieur des chaudières, des canalisations d'eau ou de vapeur, et autres équipements similaires.



Figure III-5 : Image représentative du tartre

a- Détection du tartre

Dans une unité de dessalement d'eau de mer, la formation de tartre est un phénomène qui entraîne une diminution de l'efficacité des échanges thermiques, nécessitant une surveillance régulière. Le réchauffeur de saumure constitue l'élément le plus critique et sensible du processus. En effet, c'est à ce stade que l'eau atteint sa température maximale, augmentant ainsi fortement le risque de formation de tartre.

L'entartrage de ce système perturbe directement le rendement des unités de distillation flash à multiples étages et peut même entraîner leur arrêt complet. Les signes de tartre au niveau des échangeurs de chaleur incluent :

- Une élévation de la pression de vapeur dans la calandre ;
- Une baisse de la température de la saumure à pression constante de vapeur ;
- Une diminution de la production d'eau distillée ;
- Une augmentation de la pression et de la température à la pompe de recirculation de saumure ;
- Une réduction du débit de recirculation.

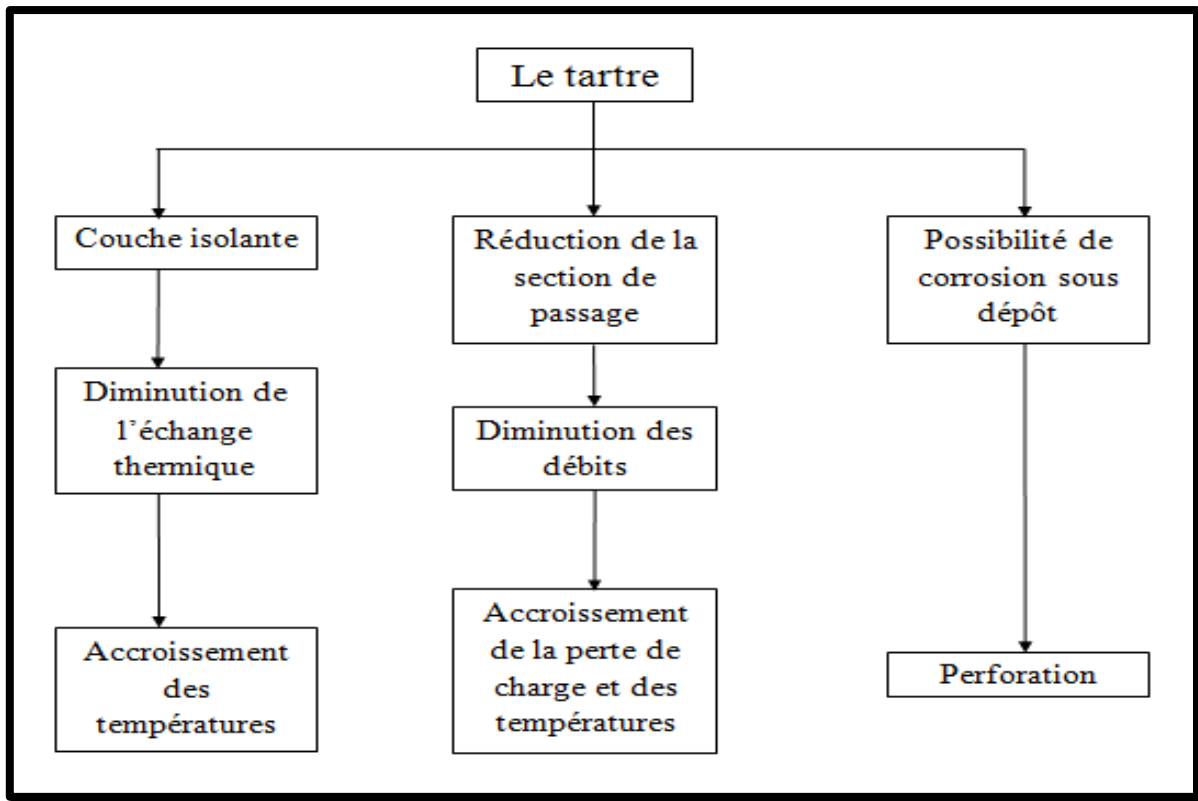


Figure III-6 : Schéma représentatif des problèmes engendrés par la formation du tartre.

b- La lutte contre l'entartrage

Plusieurs techniques de protection existent que l'on peut classer comme ci-après :

➤ Inhibiteurs d'entartrage

Ce sont des produits chimiques injectés à faible dose (quelques ppm) dans l'eau d'appoint pour prévenir ou réduire la formation de dépôts sur les surfaces d'échange. Ces traitements chimiques jouent un rôle essentiel dans la prévention de l'encrassement, contribuant ainsi à améliorer significativement les performances des équipements. En complément, divers nettoyants chimiques sont disponibles pour éliminer les dépôts déjà formés et assurer le nettoyage des surfaces internes des installations.

➤ **Lessivage acide**

Le nettoyage complet des dépôts de tartre nécessite une opération de lessivage à l'acide. Cette procédure consiste à faire circuler une solution d'acide inhibé, composée d'acide sulfamique et de Rhodine 141, pour dissoudre les dépôts tout en protégeant les faisceaux tubulaires contre la corrosion. La méthode implique une pulvérisation ciblée sur les faisceaux tubulaires, avec une durée adaptée à la quantité de tartre à éliminer.

Pendant le processus, il est essentiel de surveiller et d'enregistrer plusieurs paramètres : la quantité de tartre, le temps de nettoyage, les variations du pH et la température de l'eau de dilution. Ces données assurent un suivi rigoureux et une efficacité optimale du lessivage.

➤ **Revêtements**

L'application de revêtements protecteurs adaptés à l'environnement et à l'utilisation du métal est essentielle. Ces revêtements peuvent inclure des peintures, des vernis ou des protections métalliques telles que la galvanisation ou le zingage.

➤ **Choix des matériaux**

Il est essentiel de sélectionner des matériaux adaptés aux conditions spécifiques d'utilisation, telles que la température et la salinité. Des matériaux naturellement résistants à la corrosion, comme l'acier inoxydable, l'aluminium ou le titane, doivent être privilégiés.

III.4.2 Problème de corrosion

La corrosion est la dégradation des matériaux causée par des réactions chimiques ou électrochimiques avec leur environnement. Elle touche principalement les métaux et représente une cause majeure de défaillances dans les équipements industriels.



Figure III-7 : Corrosion des métaux.

a- Les causes de la corrosion

La corrosion résulte de divers facteurs environnementaux et intrinsèques aux matériaux.

Parmi les principales causes :

- **Structure chimique et physique des métaux** : La présence d'impuretés, qu'elles soient métalliques ou non métalliques, accélère le processus de corrosion.
- **Milieus acides** : Une diminution du pH dans l'environnement favorise une corrosion rapide des métaux.
- **Température** : Le taux de corrosion augmente proportionnellement à l'élévation de la température.
- **Concentration en sels** : Une forte concentration de sels dissous accroît la conductivité électrique de l'eau, ce qui intensifie la corrosion.

b- La lutte contre la corrosion

La protection contre la corrosion des métaux peut être assurée en agissant soit sur les caractéristiques du milieu, comme l'eau, soit sur la nature du métal lui-même. Plusieurs techniques de protection peuvent être classées ainsi :

- Utilisation de revêtements ou de matériaux protecteurs tels que la graisse, l'huile, la peinture ou la fibre de carbone.
- Emploi de métaux résistants à la corrosion, comme l'acier inoxydable ou l'aluminium.
- Application d'inhibiteurs de corrosion pour ralentir ou empêcher les réactions corrosives.

III.5 Conclusion

Le complexe GL2/Z est en besoin continu d'eau dessalée pour les unités de traitement du gaz naturel liquéfié (GNL). En revanche, la production de cette eau diminue suite à des problèmes réduisant ainsi les performances des opérations du complexe. Dans ce contexte, nous avons examiné les problèmes des procédés de dessalement de l'eau de mer par MSF du complexe.

Les résultats de l'analyse de l'eau dessalée produite par les unités MSF en février 2025 montrent que les valeurs de pH et de conductivité des dessaleurs 2010LC et 2010LD restent dans des limites acceptables. Par ailleurs, les concentrations de chlorures sont faibles, nettement inférieures à la limite recommandée de 1 ppm, attestant de la sécurité de l'eau pour une utilisation. Ces observations confirment une conformité constante aux normes, garantissant une qualité optimale du produit tout au long de la période étudiée.

En conclusion, le processus MSF mis en œuvre au complexe GL2/Z s'avère efficace pour produire de l'eau dessalée de haute qualité, grâce à l'utilisation de l'eau de mer et de l'énergie de la vapeur pour alimenter les turbines.

Conclusion générale et recommandations

Le dessalement de l'eau de mer s'impose comme une solution incontournable pour faire face à la raréfaction des ressources en eau douce, particulièrement dans des pays comme l'Algérie, où les défis climatiques et hydriques sont particulièrement prononcés. Ce mémoire a permis d'étudier en détail l'application du procédé MSF (Multi-Stage Flash) au complexe GL2/Z, en mettant en lumière son rôle stratégique dans la production de gaz naturel liquéfié (GNL), grâce à un approvisionnement continu en eau dessalée.

L'étude a souligné l'importance cruciale de l'eau dessalée pour les opérations industrielles, notamment en tant qu'eau d'appoint pour les chaudières et les utilités, garantissant ainsi la continuité et l'efficacité des processus de production. Les analyses des unités de dessalement MSF ont révélé des performances globalement satisfaisantes, avec des paramètres comme le pH, la conductivité et la concentration en ions chlorure conformes aux normes industrielles.

Cependant, des défis techniques récurrents, tels que l'entartrage et la corrosion, ont été identifiés comme des obstacles majeurs limitant la durabilité des équipements et la stabilité de la production. Ces problèmes ont été abordés à travers des solutions techniques spécifiques, notamment l'utilisation d'inhibiteurs chimiques, des procédures de nettoyage acide, et le recours à des matériaux résistants à la corrosion.

Les résultats obtenus confirment la fiabilité du procédé MSF pour produire une eau dessalée de haute qualité, répondant aux besoins du complexe GL2/Z. Néanmoins, pour maximiser les performances et garantir la pérennité des installations, il est essentiel de renforcer les efforts en matière de maintenance préventive, d'innovation technologique et de formation continue du personnel. Une attention particulière devrait également être portée à l'amélioration des systèmes de surveillance et à l'intégration de technologies plus durables afin de réduire l'impact environnemental.

En conclusion, une gestion optimisée, combinant des procédés avancés et des pratiques exemplaires, est essentielle pour maximiser l'efficacité et la durabilité des systèmes de dessalement dans les infrastructures industrielles. Ce travail espère contribuer à une meilleure gestion des ressources hydriques dans des environnements complexes et à la promotion de modèles industriels durables.

Recommandations

Afin de renforcer les conclusions de cette étude, les recommandations suivantes sont proposées :

1. **Maintenance préventive** : Mettre en œuvre des programmes de maintenance rigoureux pour limiter l'entartrage et la corrosion des équipements.
2. **Innovation technologique** : Explorer l'utilisation de matériaux plus résistants et de technologies émergentes, en vue d'améliorer l'efficacité énergétique et de réduire les coûts opérationnels.
3. **Formation continue** : Développer des programmes de formation réguliers pour le personnel technique, afin de garantir une gestion optimale des équipements et des processus.
4. **Surveillance avancée** : Installer des systèmes de surveillance en temps réel pour détecter rapidement les anomalies et anticiper les défaillances.
5. **Durabilité environnementale** : Investir dans des solutions visant à réduire la consommation énergétique et l'empreinte écologique des unités de dessalement.

Ces mesures permettront d'optimiser les performances des unités de dessalement tout en assurant leur durabilité dans un environnement industriel exigeant.

Bibliographie

- [1] Clément. Larousse agricole. Éditions Larousse, 1979, p. 48.
- [2] Moll. « Circulations in the Western Mediterranean Sea. » *Oceanologica Acta*, vol. 2, 1990, pp. 134–149.
- [3] Chang, Raymond, and Kenneth A. Goldsby. *Chemistry*. 12th ed., McGraw-Hill Education, 2016.
- [4] Chapagain, A. K., & Hoekstra, A. Y. (2004). *Water Footprints of Nations : Volume 1 – Main Report*. UNESCO-IHE Institute for Water Education. Disponible à l'adresse : <https://www.waterfootprint.org/resources/Report16Vol1.pdf>
- [5] Organisation mondiale de la santé (OMS). *Water, Sanitation and Health*. Organisation mondiale de la santé, 2024. Disponible sur : <https://www.who.int/teams/environment-climate-change-and-health/water-sanitation-and-hygiene>
- [6] UN-Water. *World Water Development Report*. UNESCO Publishing. Disponible sur : <https://www.unwater.org/publications/un-world-water-development-report>
- [7] World Bank. *Water Scarcity and the Global Water Crisis*. World Bank Publications, 2020. Disponible sur : <https://www.worldbank.org/en/topic/waterscarcity>
- [8] "La consommation de l'eau en Algérie" *AlgerieMaintenant.dz*, 2 mars 2016. Disponible sur : <https://www.algeriemaintenant.dz/actualite/consommation-eau-algerie>
- [9] Maurel, Philippe. *Gestion de l'eau et développement durable*. Éditions Tec & Doc, 2006.
- [10] Ministère des Ressources en Eau et de la Sécurité Hydrique. *Rapport annuel sur la gestion des ressources en eau en Algérie*, 2022.

- [11] UNESCO. Water for People, Water for Life: The United Nations World Water Development Report. UNESCO Publishing, 2003.
- [12] D.F.I. Classification des eaux douces. Ministère de l'Environnement et des Ressources Naturelles, 2005.
- [13] Organisation Mondiale de la Santé. « Qualité de l'eau potable et directives. » Organisation Mondiale de la Santé, 2023.
- [14] Dupont, Pierre. « Caractéristiques et applications de l'eau saline. » Les Ressources en Eau : Types et Usages, Éditions HydroTech, 2021, pp. 78-90.
- [15] Smith, John. Salinity and Water Systems: A Comprehensive Guide. 3rd ed., Marine Science Press, 2015, pp. 78-84
- [16] National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). "What Is Brackish Water?" 2023, Disponible sur: <https://oceanservice.noaa.gov/facts/brackish.html>
- [17] Millero, Frank J. Chemical Oceanography. 4th ed., CRC Press, 2013.
- [18] National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). « Salinity in the Oceans. » 2023. Disponible sur : https://oceanservice.noaa.gov/education/tutorial_corals/coral04_zooxanthellae.html
- [19] Benjamin, Mark M. Water Chemistry. 2nd ed., McGraw-Hill, 2002.
- [20] Sawyer, Clair N., Perry L. McCarty, and Gene F. Parkin. Chemistry for Environmental Engineering and Science. 5th ed., McGraw-Hill, 2003.
- [21] CultureSciences-Chimie. Le dessalement. École Normale Supérieure. Disponible sur : <https://culturesciences.chimie.ens.fr/thematiques/eau/le-dessalement>
- [22] Mandri, Y. (2011). Étude paramétrique du procédé de dessalement de l'eau de mer par congélation sur paroi froide (Thèse de doctorat, Université Claude Bernard – Lyon I / Université Mohammed V – Agdal). HAL-TEL.
- [23] Danis, P. « Distillation à simple effet. » Techniques de l'Ingénieur, 10 juin 2003.

BIBLIOGRAPHIE

- [24] Greenlee, Lauren F., et al. « Reverse Osmosis Desalination: Water Sources, Technology, and Today's Challenges. » *Water Research*, vol. 43, no. 9, 2009, pp. 2317–2348.
- [25] Mondri. Étude paramétrique du procédé de dessalement de l'eau de mer. Mémoire de Master, Université des Sciences et Technologies Houari Boumediene (USTHB), 2019.
- [26] Société Nationale de Dessalement. Rapport sur l'utilisation de l'eau distillée dans les complexes industriels. Département de Recherche, 2023.
- [27] Dupont, Pierre. "Optimisation des procédés MSF dans le dessalement de l'eau de mer." *Revue des Sciences Hydriques*, vol. 12, no. 4, 2016, pp. 112–129.
- [28] Rapport d'application. *pH calculé à partir de la conductivité*. Livre blanc, p. 12.