



Department of Process Engineering

قسم هندسة

الطرائق

Ref :...../U.M/F.S.T/2024

رقم :..... / ج.م.ك.ع.ت//2024

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES DE MASTER ACADEMIQUE

Filière : **GÉNIE DES PROCÉDÉS**

Option : **GÉNIE CHIMIQUE**

THÈME

**Évaluation de Productivité de L'Eau Dessalée et Mise en Place
de Recommandations pour Améliorer Les Performances
du Complexe GL2/Z**

Présenté par

LATROCH Abdelmalik

Soutenu le 25/06/ 2024 devant le jury composé de :

Président(e) :	SEFIR Yamina	Maitre de Conférences "A"	Université de Mostaganem
Examineur :	MERAD-DIB Hanaa	Maitre de Conférences "B"	Université de Mostaganem
Encadrant (e) :	BENDENIA Chahrazed	Maitre de Conférences "A"	Université de Mostaganem
Co-Encadrant(e) :	MERABET Sarra	Doctorante	Université de Mostaganem

Année Universitaire 2023/2024

Remerciements

Je tiens à remercier en premier lieu DIEU le tout puissant pour nous avoir donné : le courage, la patience et la bonne santé afin de mener ce projet à terme.

Un grand merci tout particulier à Madame **Chahrazed BENDENIA**, Maître de conférences A, à l'Université de Mostaganem, qui a accepté de m'encadrer. Je la remercie aussi pour sa gentillesse, ses conseils, ses encouragements, ses remarques et surtout son aide précieuse.

Je tiens à exprimer toute mes reconnaissances à Madame **Yamina SEFIR**, Maître de conférences A, à l'Université de Mostaganem, d'avoir accepté de présider le jury, c'est un grand honneur pour moi.

Mes vifs remerciements vont, également, à Madame **Hanaa MERAD DIB**, Maître de conférences B, à l'université de Mostaganem, d'avoir accepté d'examiner ce travail et pour sa disponibilité.

J'adresse aussi mes remerciements à Madame **Sarra MERABET**, doctorante en génie électrique, à l'Université de Mostaganem, d'avoir généreusement consacré son temps à me co-superviser et à me guider étroitement tout au long de la réalisation de ce projet. Son expertise et ses conseils ont été déterminants pour ma réussite.

Mes sincères remerciements sont dédiés également à toutes personnes ayant contribué, de près ou de loin, à l'aboutissement de ce travail trouvent ici le témoignage de mon profond respect.

Dédicace

Je dédie humblement ce travail à mes chers parents, qui ont été mes piliers, mon inspiration et ma motivation tout au long de ce parcours.

À mon père, pour son soutien inébranlable, et à ma mère, pour sa lumière, son amour inconditionnel et sa patience infinie. Que Dieu les protège et les bénisse.

À Mme BENDENIA Chahrazad mon encadrante, dont les conseils avisés, les orientations précieuses et le soutien constant ont été d'une aide inestimable dans l'élaboration de ce mémoire.

À mon frère et ma sœur, qui ont été mes complices, mes confidents et mes meilleurs supporters. Votre présence a été un réconfort constant.

À ma famille élargie, à mes tantes, oncles, cousins et cousines, dont le soutien et les encouragements ont été une source de force et de courage.

À mes amis(es), qui ont partagé mes joies, mes peines et mes succès. Votre amitié est un trésor que je chérirai toujours.

À toute la section, pour l'esprit d'entraide et de solidarité qui nous a unis.

Enfin, je dédie ce travail à toutes les personnes qui m'ont aimé et soutenu, qui ont cru en moi et m'ont encouragé. Votre confiance en moi a été ma plus grande motivation et je vous en suis infiniment reconnaissant.

LATROCH ABDELMALIK

ملخص

يتم ضمان إنتاج وتصدير الغاز الطبيعي المسال (GNL) من حقل حاسي الرمل بفضل ستة وحدات تسييل في مجمع GL2/Z. يتم معالجة الغاز الطبيعي مسبقاً وتبريده إلى درجة حرارة منخفضة جداً تصل إلى -162 درجة مئوية قبل تسييله. كل وحدة مستقلة ويتم تزويدها بمياه البحر للتبريد، بالبخار، بالكهرباء، بالهواء للأدوات، وبالمياه البحرية المحلاة من قسم الخدمات. بالإضافة إلى ذلك، يحتوي المجمع على خمس وحدات تحلية من نوع MSF، وهي 2010LA/B/C/D/E، تعمل بنظام التأثير الواحد لتلبية احتياجاته من المياه المقطرة. كل وحدة يمكنها إنتاج 45.3 م³/ساعة من الماء المقطر، مما يمثل سعة إجمالية تبلغ 226.5 م³/ساعة لهذه الوحدات الخمس. ومع ذلك، تواجه هذه الوحدات مشاكل في إنتاج المياه المحلاة منذ عام 2010. في هذا السياق، يهدف عملنا الحالي إلى تحديد الأسباب المرتبطة بتحلية مياه البحر بواسطة وحدات التحلية MSF في مجمع GL2/Z واقتراح حلول لتحسين أداء هذه الوحدات وتقييم فهم شامل لهذه المشكلة.

الكلمات الدالة: الغاز الطبيعي المسال، مياه البحر، وحدات التحلية MSF، مجمع GL2/Z، الأداء.

Abstract

The production and transportation of liquefied natural gas (LNG) from the Hassi R'mel well site is ensured by six liquefaction trains at the GL2/Z complex. The natural gas is pretreated and cooled to a cryogenic temperature of -162°C before being liquefied. Each self-contained train is supplied with seawater for cooling, steam, electricity, instrumented air and desalinated seawater by the utilities section. In addition, the complex has five MSF-type desalination units, in particular the 2010 LA/B/C/D/E single-effect units, to meet its distilled water requirements. Each unit can produce 45.3 m³/h of distillate, giving a total design capacity of 226.5 m³/h for these five units. However, these units have been experiencing desalinated water production problems since 2010. In this optic, our present work is dedicated to 'identify the causes related to the desalination of seawater by the MSF desalters of the GL2/Z complex and propose solutions to optimize the performance of these units and assess a comprehensive understanding of this problem,

Key words: liquefied natural gas, seawater, MSF desalters, GL2/Z complex, performance.

Résumé

La production et l'exportation du gaz naturel liquéfié (GNL) provenant à partir du champ de Hassi R'mel sont assurées grâce aux six trains de liquéfaction du complexe GL2/Z. le gaz naturel est préalablement traité et refroidi à une température cryogénique de -162 °C avant d'être liquéfié. Chaque train, autonome, est approvisionné en eau de mer pour le refroidissement, en vapeur, en électricité, en air instrument et en eau de mer dessalée par la section utilités. De plus, le complexe dispose de cinq unités de dessalement de type MSF, en particulier les 2010 LA/B/C/D/E, à simple effet pour répondre à ses besoins en eau distillée. Chaque unité peut produire 45,3 m³/h de distillat, ce qui représente une capacité totale de calcul de 226,5 m³/h pour ces cinq unités. Cependant, ces unités rencontrent des problèmes de production d'eau dessalée qui perdure depuis 2010. Dans cette optique, notre présent travail est consacré à 'identifier les causes liés au dessalement de l'eau de mer par les dessaleurs MSF du complexe GL2/Z et de proposer des solutions pour optimiser la performance de ces unités et évaluer une compréhension exhaustive de cette problématique,

Mots clefs : gaz naturel liquéfié, eau de mer, dessaleurs MSF, complexe GL2/Z, performance.

LISTE DES ABREVIATIONS

SONATRACH : Société nationale pour le transport, la transformation et la commercialisation des hydrocarbures.

GL2/Z : Complexe de liquéfaction du gaz naturel n°2 ARZEW.

GN : Gaz naturel.

GNL : Gaz naturel liquéfié.

GPL : Gaz pétroliers liquéfié.

MCR : Multi composant réfrigérant.

MEA : Mono éthanol Amin.

GNT : Gaz naturel traité.

P : Mression.

T : Température.

V : Volume.

MSF : Multi Stage Flash.

MED : Multi Effet Distillation.

PH : Potentiel Hydrogène.

Ppm : partie par million.

MEA : Monoéthanolamine.

Hg : Mercure.

NH₂SO₃H : L'acide sulfamique .

H₂S :Sulfure d'hydrogène.

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I.1. Description des Départements.....	4
Tableau I.2. Conditions de stockage du GNL	7
Tableau I.3. Composition du MCR.....	11
Tableau I.4. Les caractéristiques des bacs de stockage.....	12
Tableau I.5. Compositions du GNL	13
Tableau II.1. La composition standard de l'eau de mer.....	14
Tableau II.2. Les composants de la dureté de l'eau.....	15
Tableau III.1. Représentatif de la température de précipitation des différents tartres	31
Tableau IV.1. Production globale et production de chaque dessaleur en eau dessalée des cinq (05) dessaleurs pour 2023.....	41
Tableau IV.2. Représentant les paramètres de fonctionnement des dessaleurs MSF pour Mars 2024	44
Tableau IV.3. Représentant les paramètres d'exploitation actuelle des réchauffeurs de saumure des dessaleurs MSF pour Mars 2024	46
Tableau IV.4. Résultats des mesures du PH de l'eau dessalée du 1er Mars 2023 au 31 Mars 2024.....	48
Tableau IV.5. Résultats des mesures du conductivité de l'eau dessalée du 1er Mars 2024 au 31 Mars 2024	51
Tableau IV.6. Résultats des mesures du chlorure de l'eau dessalée du 1er Mars 2023 au 31 Mars 2024	55

LISTE DES FIGURES

Figure I.1. Organisation du complexe GL2/Z 4

Figure I.2. Structure du complexe GL2/Z..... 5

Figure I.3. Zone de procédé 5

Figure I.4. Zone utilités 6

Figure I.5. Schéma du procédé de liquéfaction du gaz naturel..... 7

Figure II.1. Schéma général d’une installation de dessalement 16

Figure II.2. Schéma représentatif des principaux procédés de dessalement de l’eau de mer .. 17

Figure II.3. Image représentative d’un dessaleur de type « MSF » 18

Figure II.4. Principe de la distillation à simple effet..... 19

Figure II.5. Principe d’un système d’évaporateurs multiples Effets..... 19

Figure II.6. Dessaleur type distillation à simple effet par Compression..... 20

Figure II.7. L’osmose et osmose inverse 21

Figure II.8. Image explicatif du fonctionnement d’un électro dialyseur 21

Figure II.9. L’acheminement d’eau de mer vers les dessaleurs..... 24

Figure II.10. Schéma simplifié de l’unité de dessalement..... 25

Figure II.11. Schéma simplifié d’un filtre d’eau de mer..... 26

Figure II.12. Schéma simplifié d’un évaporateur 27

Figure II.13 : Principe et paramètres de fonctionnement de l’unité de dessalement de type MSF 29

Figure III.1. Entartrage au niveau du réchauffeur 30

Figure III.2. Entartrage des chaudières 33

Figure III.3. Phénomène de corrosion 34

Figure III.4. Types de corrosion 34

Figure III.5. Les méfaits de la corrosion 35

Figure III.6. Colmatage des métaux 36

Figure V.1. Evolution de la production en eau dessalée des cinq dessaleurs de type MSF 42

Figure V.2. Mesure du PH de l’eau dessalée du mois de mars 2024..... 47

Figure V.3. Mesure de conductivité de l’eau dessalée du mois de mars 2024 50

Figure V.4. Mesure de conductivité de l’eau dessalée du mois de novembre 2019 52

Figure V.5. Mesure du chlorure de l’eau dessalée du mois de mars 2024 54

Figure V.6. Influence de la température de la vapeur sur la température de l’eau de mer sortie

du réchauffeur de saumure..... 57

Figure V.7. Influence de la baisse de la température à la sortie réchauffeur de saumure sur l'eau
dessalée produite 57

SOMMAIRE

Remercîment

Dédicaces

Listes des abréviations

Listes des tableaux

Listes des figures

Introduction générale..... 1

Chapitre I : Description du complexe GNL2/Z

I.1. Description du complexe industriel GL2/Z.....	3
I.2. Organisation du complexe GL2/Z	3
I.3. Composition du complexe GL2/Z	5
I.3.1. Zone de procédés.....	5
I.3.1. Zone utilités	6
I.3.3. Zone de stockage et chargement	7
I.4. Procède de liquéfaction du gaz naturel du GL2/Z.....	7
I.4.1. Décarbonatation	9
I.4.2. Déshydratation	9
I.4.3. Démercurisation	9
I.4.4. Séparation et liquéfaction	10
I.4.4. a. Réfrigération propane	10
I.4.4. b. Sous refroidissement du GN	10
I.4.4. c. Séparation des hydrocarbures lourds	10
I.4.4. d. System réfrigérant mixte MCR	10
I.4.5. Fractionnement.....	11
I.4.6. Stockage et chargement du GNL	12
I.5. Conclusion.....	13

Chapitre II : Dessalement de l'eau de mer dans le complexe GNL2/Z

II.1. Introduction.....	14
II.2. Composition des eaux de mer	14
II.3. Caractéristiques des eaux de mer	15
II.3.1. La salinité	15
II.3.2. La dureté.....	15
II.3.3. La conductivité	15
II.3.4. Le PH	16
II.3.5. La solubilité	16
II.4. Dessalement de l'eau de mer	16
II.4.1. Procédé de dessalement de l'eau de mer	16
II.4.2. Techniques de dessalement de l'eau de mer.....	17
II.5. Operations de distillation ou de changement de phases	17
II.5.1. Principe de distillation.....	17
II.5.2. Distillation multi-flash (multi stage flash « MSF »).....	18
II.5.3. Distillation à simple effet	19
II.5.4. Distillation à multiples effets (multi effet distillation « MED »)	19
II.5.2.e. Distillation par compression de vapeur	20
II.6. Procède membranaires	20
II.6.1. Procédés d'osmose inverse.....	20
II.6.2. Procédé d'électrodialyse	21
II.5.4 Critères de choix du procédé	22
II.6. Unité de dessalement du complexe GL2/Z.....	22
II.7. Description de l'unité de dessalement de type « MSF »	23
II.7.1. La section pomperie	23
II.7.2. L'unité de dessalement type « MSF »	24
II.8. Principe de fonctionnement de l'unité de dessalement « MSF »	28
II.9. Conclusion	29

Chapitre III : Problèmes techniques rencontrés en dessalement d'eau de mer

III.1. Introduction	30
III.2. Phénomène d'entartrage.....	30
III.2.1. Définition du tartre	30
III.2.2. Composition du tartre	31
III.2.3. Classification du tartre	31
III.2.4. Formation du tartre	31
III.2.5. Formation des tartres au niveau de l'unité de dessalement GNL2Z.....	32
III.2.5.a. Impact sur les évaporateurs	32
III.2.5.b. Impact sur la partie de récupération de la chaleur	33
III.3. Problèmes d'entartrage.....	33
III.3.1. Problème de corrosion	33
III.3.1. Causes de corrosion	35
III.3.3. Facteurs principaux de la corrosion par l'eau de mer.....	35
III.3.3.a. La salinité	35
III.3.3.b. L'oxygène.....	35
III.3.3.c. Les bactéries	36
III.3.3.d. La température et la vitesse de circulation	36
III.3.4. Problème de colmatage	36
III.4. Moyens de lutte et de prévention contre l'entartrage.....	36
III.4.1. Inhibiteurs d'entartrage.....	37
III.4.2. Lessivage acide.....	37
III.4.3. Revêtements	37
III.4.4. Choix des matériaux	37
III.5. Conclusion.....	37

Chapitre V : Vérification des paramètres de fonctionnement des unités de dessalement

IV.1. Introduction.....	40
IV.2. Problématique	40
IV.3. Production de l'eau dessalée dans le complexe GL2/Z.....	41
IV.4. Situation actuelle des dessaleurs comparée au design.....	43
IV.4.1. Paramètres de fonctionnement des cinq dessaleurs de type MSF.....	43
IV.4.2. Paramètres de fonctionnement des réchauffeurs de saumures des dessaleurs	45
IV.5. Traitement des eaux dessalées dans le complexe GNL2 /Z	47
IV.5.1. Mesure du PH.....	47
IV.5.2. Mesure de la conductivité	48
IV.5.3. Mesure des ions chlorures.....	53
IV.6. Anomalies relevées.....	56
IV.7. Conclusion	58
Conclusion générale	59



INTRODUCTION GENERALE



INTRODUCTION GENERALE

Le complexe GL2/Z de la société SONATRACH est un site essentiel pour la production et l'exportation de gaz naturel liquéfié (GNL), grâce à un processus complexe qui transforme le gaz naturel en GNL à -162°C au moyen de six trains de liquéfaction indépendants impliquant divers systèmes de refroidissement par l'eau de mer, la vapeur et l'électricité fournie par la section des utilités.

Le fonctionnement de ces trains est fortement conditionné par la vapeur, utilisée non seulement comme source de chaleur mais aussi comme force motrice pour les machines tournantes. La vapeur est produite à partir d'eau distillée ou dessalée, élément indispensable pour refroidir les échangeurs de chaleur et les condenseurs. Pour répondre à ses besoins en eau distillée, le complexe GL2/Z est équipé de cinq unités de dessalement de type détente à plusieurs étages (MSF), ayant une capacité de production totale de $226,5 \text{ m}^3/\text{h}$.

Cependant, depuis 2010, le complexe fait face à une baisse significative de la production d'eau dessalée, avec un taux de production moyen actuel d'environ 27 % pour l'ensemble des cinq unités de dessalement. Cette diminution de la production représente un défi majeur, car l'eau distillée est un élément essentiel pour le fonctionnement optimal des processus de liquéfaction du GNL.

Les unités de dessalement de type MSF, utilisées dans le complexe GL2/Z, sont des systèmes complexes qui nécessitent un entretien rigoureux et une gestion optimale des paramètres de fonctionnement pour maintenir leur efficacité. La baisse de performance observée peut être attribuée à divers facteurs, tels que l'encrassement des équipements, l'usure des matériaux, les variations de qualité de l'eau de mer, et les dysfonctionnements techniques.

Cette étude vise à identifier les causes de cette baisse de production et à élaborer un plan d'actions pour optimiser la performance de ces unités. Pour une compréhension exhaustive de cette problématique, notre étude se structure comme suit:

- Présentation du lieu de préparation de notre travail : Le complexe de liquéfaction du gaz naturel (GL2/Z)
- Généralité sur les techniques de dessalement d'eau de mer et description de l'unité de dessalement du complexe GL2/Z
- Les problèmes techniques du dessalement en MSF
- Vérification des paramètres de fonctionnement des unités de dessalement
- Conclusion et recommandations



Chapitre I

DESCRIPTION DU COMPLEXE

GNL2/Z



CHAPITRE I : DESCRIPTION DU COMPLEXE INDUSTRIEL GL2/Z

I.1. DESCRIPTION DU COMPLEXE INDUSTRIEL GL2/Z

Le complexe industriel **GL2/Z** est la dernière usine de liquéfaction gaz naturel (GN) provenant de HASSI R'MEL où l'engineering a été assuré par la société américaine d'engineering « PULLMAN KELLOG ». Ainsi, il occupe une place prépondérante dans la filière de traitement des hydrocarbures développée par SONATRACH.

Il s'étend sur une superficie de 72 hectares au sein de la zone industrielle d'Arzew, au Nord-Ouest de l'Algérie. Son emplacement au bord de la mer lui permet d'utiliser son eau comme source d'approvisionnement pour le refroidissement des équipements, la production d'eau distillée et la lutte anti-incendie, et facilite le transport du GNL à partir des méthaniers [1].

Il dispose de capacités de production et de stockage indiquées ci-dessous:

Capacités de production :

- GNL : 17,8 Millions m³/ an.
- Propane : 410.000 t / an.
- Butane : 327.000 t / an.
- Gazoline : 196.000 t / an.

Capacité totale de stockage :

- 03 bacs aériens de stockage GNL : 100.000 m³ chacun.
- 02 bacs de gazoline : 14000 m³ chacun.

I.2. ORGANISATION DU COMPLEXE GL2/Z

Le complexe GL2/Z recouvre deux sous-directions et différents départements (voir figure I.1) à savoir [2] :

- La sous-direction de l'exploitation : qui comprend trois départements, de production, de maintenance et d'approvisionnements.
- La sous-direction du personnel : qui comprend également trois départements : du personnel, des ressources humaines et des moyens généraux.

- Les départements, décrits dans le tableau I.1, directement liés à la direction dites structure de contrôle sont :
- Le département technique.
- Le département finance.
- Le département sécurité.
- Le département travaux neufs.

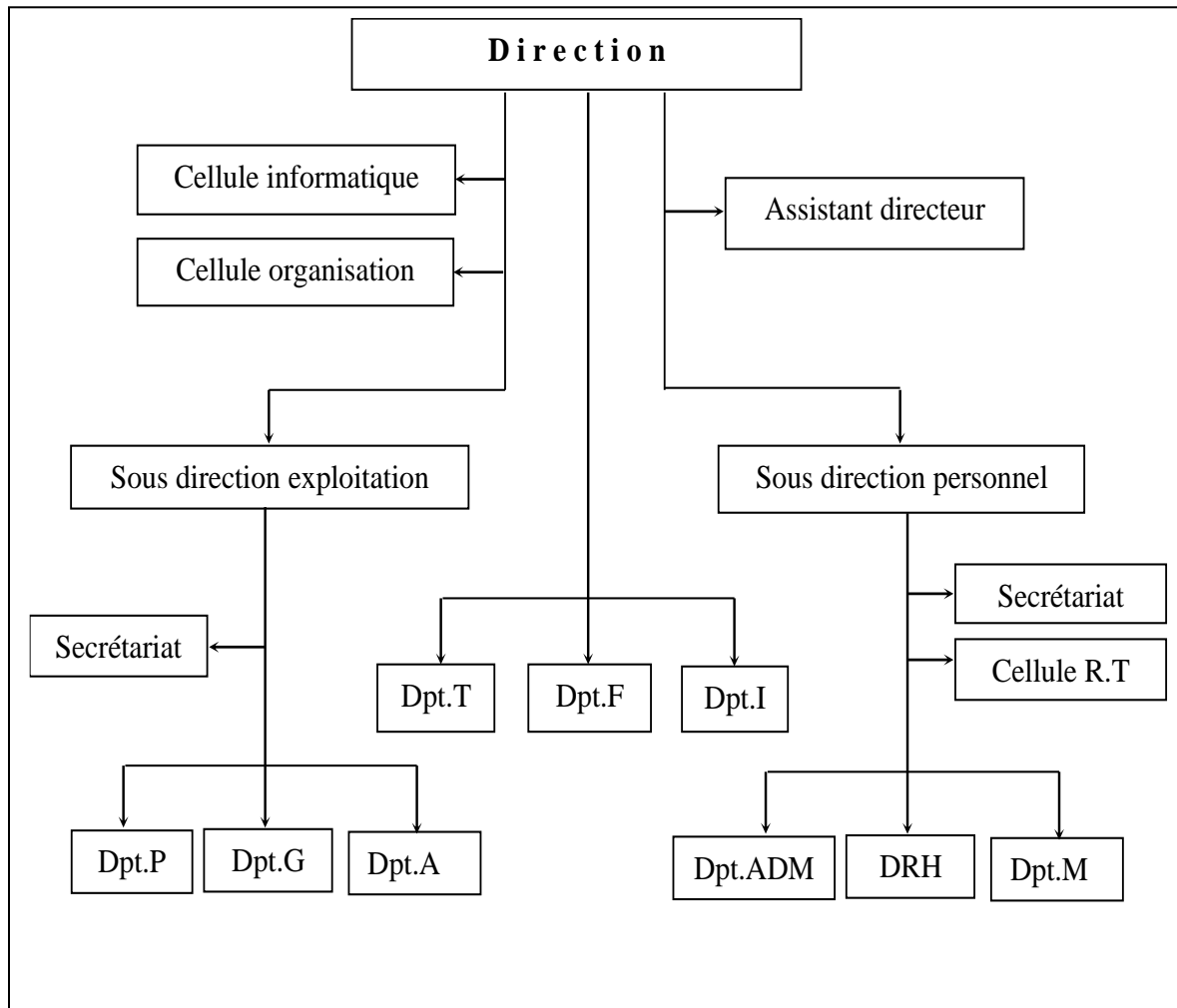


Figure I.1. Organisation du complexe GL2/Z [2].

Tableau I.1. Description des Départements.

Code	Désignation	Code	Désignation
T	Technique	G	Maintenance
F	Finance	A	Approvisionnement
I	Sécurité	ADM	Administration
R. T	Relation de Travail	DRH	Ressource Humain
P	Production	M	Moyen Généraux

I.3. COMPOSITION DU COMPLEXE GL2/Z

Le complexe GL2/Z comprend trois zones essentielles à savoir (voir figure I.2) :

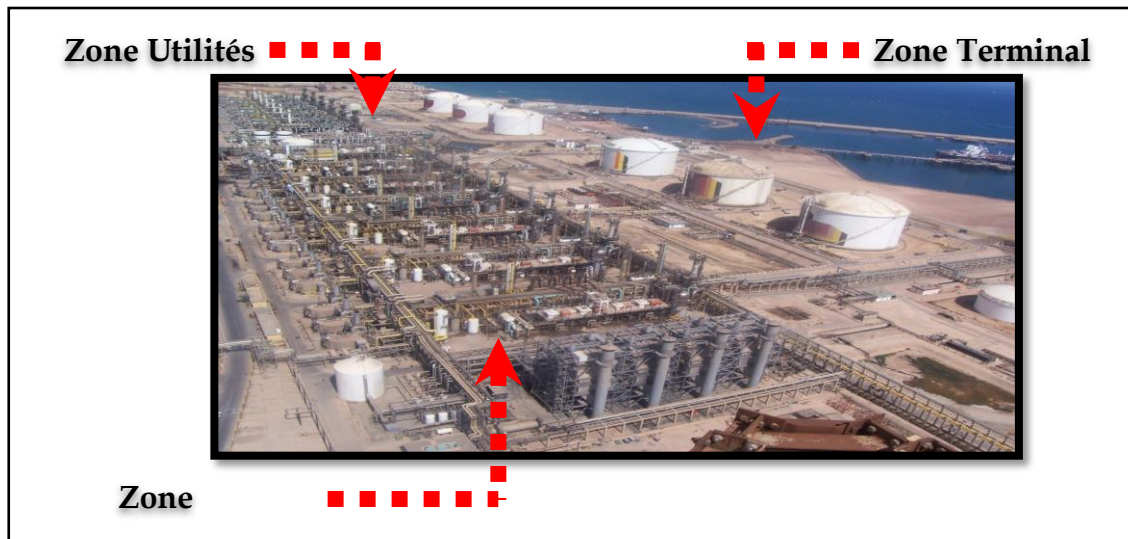


Figure I.2. Structure du complexe GL2/Z.

I.3.1. Zone de procédés

Cette zone comme illustrée à la figure I.2 est composée de six trains de liquéfaction indépendants qui produisent $9000 \text{ m}^3/\text{jour}/\text{train}$ du GNL. Dans chaque train, le gaz naturel est traité, ensuite réfrigéré, distillé et après liquéfié à $-162 \text{ }^\circ\text{C}$.



Figure I.3. Zone de procédé

Chaque train de liquéfaction regroupe les unités d'exploitation suivantes :

- **Section traitement de gaz** qui assure la démercurisation, la décarbonatation et la déshydratation.
- **Section séparation et liquéfaction** pour séparation et liquéfaction.
- **Section fractionnement** permettant la déméthanisation, la dépropanisation et la débutanisation.

I.3.2. Zone utilités

Les utilités constituent une zone importante au sein du complexe GL2/Z (voir figure I.4). Elles fournissent tous les éléments nécessaires au démarrage et au fonctionnement normal des trains de liquéfaction, en particulier la production de vapeur, d'énergie électrique d'air, d'eau de refroidissement et l'évacuation des effluents [3].



Figure I.4. Zone utilités

- **Source d'énergie :** la vapeur d'eau est la source d'énergie pour le complexe (trois chaudières haute pression 62 bars et une chaudière basse pression 4,5 plus deux chaudières IHI à 400 t).
- **Source de refroidissement :** l'eau est la source de refroidissement transportée par un ensemble de six pompes de grande puissance de 37 000 m³/h.
- **Production d'électricité :** Trois alternateurs, entraînés par des turbines à vapeur, produisent de l'électricité. La puissance des turboalternateurs est de 36 MW par générateur.

- **Production d'air comprimé** : La production d'air comprimé est une grande partie de l'instrumentation du complexe, avec quatre compresseurs d'air secours.
- **Eau dessalée** : la production d'eau dessalée est assurée par cinq unités de dessalement d'eau de mer ayant chacune un débit continu de 45,3 m³/h. L'eau dessalée sert à alimenter les chaudières de 225 m³/h.

I.3.3. Zone de stockage et chargement

Cette zone rassemble trois réservoirs de GNL d'une capacité de 100 000 m³, deux réservoirs de gazoline d'une capacité de 14 500 m³ et une station de pompage de GNL d'une capacité de 10 000 m³/h.

I.4. PROCÉDE DE LIQUEFACTION DU GAZ NATUREL DU GL2/Z

L'usine de liquéfaction du gaz naturel d'ARZEW GL2/Z se charge du transport du GNL sous forme liquide dont les propriétés et la composition chimique sont regroupées dans les deux tableaux I.1 et I.2 et le procédé de liquéfaction s'établi comme indiqué à la figure I.5.

Tableau I.2. Conditions de stockage du GNL

Masse moléculaire	18.2 g /mole
Pression	1.03 bars absolue
Température	-162°C

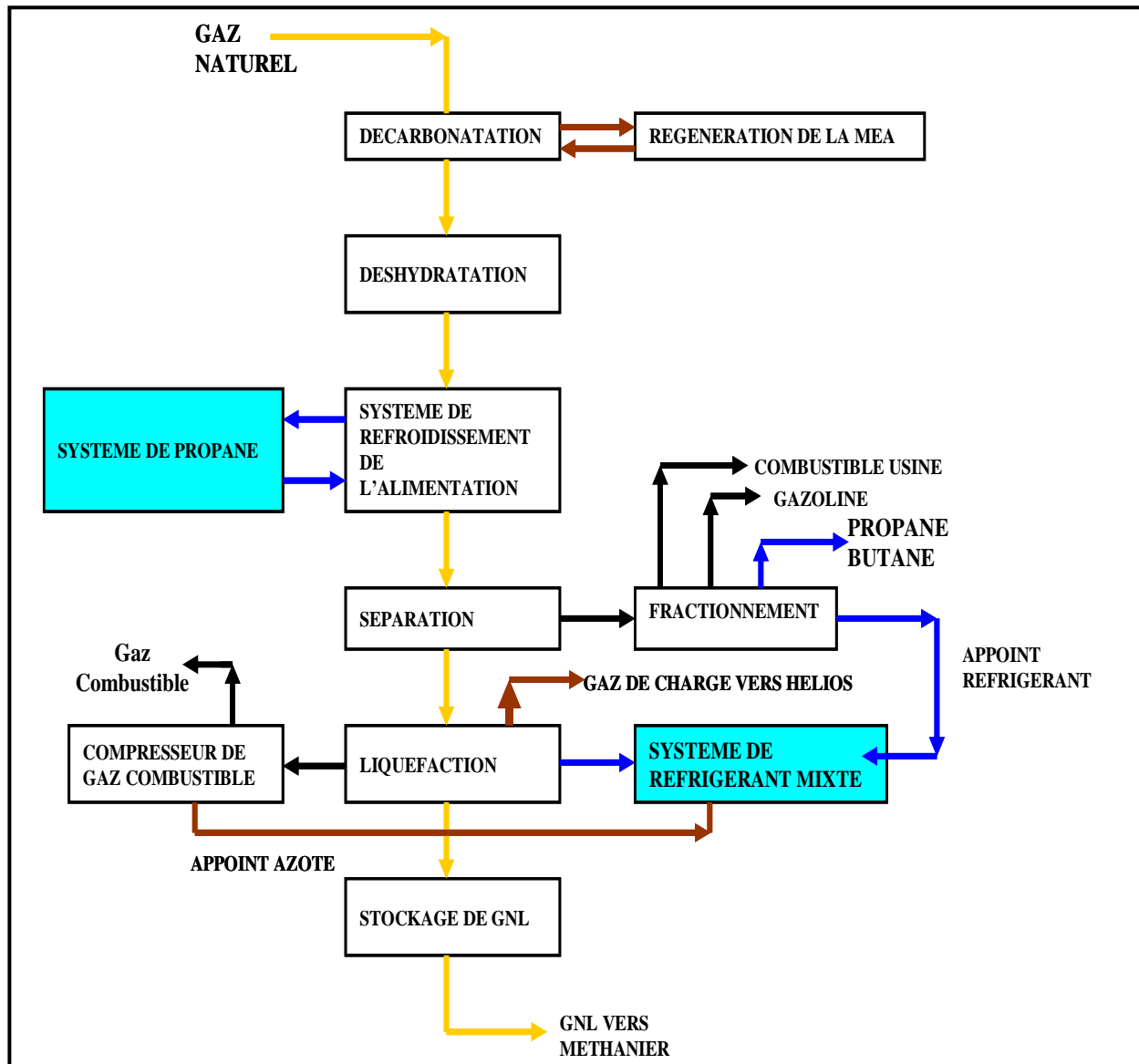


Figure I.5. Schéma du procédé de liquéfaction du gaz naturel

L'usine comprend six trains de liquéfaction indépendants qui fonctionnent en parallèle avec une capacité de production du GNL de 8400 m³/h. Dans chaque train, le gaz d'alimentation passe par différentes étapes de traitement ci-dessous :

I.4.1. Décarbonatation

Le GN traverse la base de la colonne d'absorption X31E où l'on extrait le CO₂ par absorption au contact d'une solution de MEA (Mono Ethanol Amin) circulant à contre-courant. Ensuite, il est lavé en tête de colonne par une eau déminéralisée qui est injectée au moyen des pompes X31J/JA.

La régénération de la MEA chargée en teneur de CO₂ inférieure à 70 ppm se fait à la sortie de l'absorbeur. Cette opération s'effectue dans ce qu'on appelle la boucle de régénération de la MEA [3].

I.4.2. Déshydratation

Sortit de l'absorbeur et très hydraté, le GN subit une déshydratation pour obtenir une teneur en eau inférieure à 0,5 ppm. A cet effet, il pénètre un échangeur de propane X41C où il sort à une température d'environ 21°C pour condenser le maximum d'humidité et éviter la formation d'hydrates dont la présence perturberait les sections suivantes dans le procédé. Ainsi, l'eau partiellement condensée est séparée et évacuée du ballon séparateur X41 F.

Le GN descend du haut des secteurs à gaz X41DA/DB/DC (deux en service et le troisième étant en régénération) à travers des lits d'alumine et des tamis moléculaires superposés qui fixent les molécules d'eau par adsorption. Ensuite, il parvient un filtre X41LA/LB/LC (filtre par sécheur) pour retenir les poussières entraînées puis vers la section suivante du processus de liquéfaction [4].

I.4.3. Démercurisation

Le GN, à son entrée dans le train, parcourt une vanne pour réguler sa pression à 42 bars, puis un ballon séparateur X31F où tous les hydrocarbures liquides en suspension sont séparés et éliminés afin d'éviter l'encrassement du circuit. Il est ensuite chauffé à 38 °C dans le préchauffeur X31C, utilisant la vapeur à 4,5 bars, avant d'entrer dans le démercuriseur X42D à billes d'aluminium pour retenir le mercure [6].

I.4.4. Séparation et liquéfaction

Cette étape consiste à séparer les composants lourds du GNT (gaz naturel traité) afin qu'ils puissent être traités parallèlement au processus de liquéfaction. Dans la section de fractionnement, le propane, le butane et l'essence sont extraits. Les composés légers (essentiellement le méthane) vont, quant à eux, continuer dans le procédé de liquéfaction s'opère via les étapes suivantes [3] :

I.4.4. a. Réfrigération propane

Le GNT traverse quatre échangeurs à propane X03C, X04C, X05C et X06C pour être refroidi à une température de $-30,5$ °C et se trouve dès lors sous forme biphasée avec une phase condensée renfermant les composés lourds (éthane, propane, butane et C^{5+}). Le gaz d'alimentation venant de l'unité de déshydratations est refroidi à $-30,5$ °C par paliers successifs à travers les quatre échangeurs à propane 103C,104C,105C,106C [3].

I.4.4. b. Sous refroidissement du GN

Le mélange condensat lourd/GN allégé pénètre l'échangeur à faisceau de tubes et de calandre où, par échange thermique à contre-courant avec les vapeurs de tête de la tour de lavage, il est refroidi à $-47,3$ °C sous une pression de 37 bars effective et où davantage de produits lourds se condensent [3].

I.4.4. c. Séparation des hydrocarbures lourds

Le mélange est ensuite injecté au niveau du 10^{ème} plateau de la tour de lavage (échangeur principal) où les produits lourds (éthane, propane, butane, gazoline) sont séparés par distillation du GN. Le liquide s'écoule vers le plateau du fond de la tour et passe dans le rebouilleur à vapeur d'eau où il est réchauffé à $29,2$ °C. Les composants légers (méthane, azote en faible quantité) sont extraits par vaporisation et se purifient au contact du liquide de reflux, le liquide du fond se dirige vers le fractionnement [3].

I.4.4. d. System réfrigérant mixte MCR

Le MCR 1 est un mélange réfrigérant d'azote, de méthane, d'éthane et de propane en circuit fermé avec deux compresseurs utilisés pour liquéfier le GN dans l'échangeur principal et pour réfrigérer le condenseur de tête de la tour de lavage (faisceau chaud de l'échangeur principal).

Le MCR1 basse pression (1,9 bars effectives et 35 °C) est comprimé à 12,3 bars effectives puis chauffé à 37 °C. Le réfrigérant mixte est refroidi à 32,2 °C dans un échangeur à eau de mer ensuite comprimé une nouvelle fois dans le compresseur MCR2 haute pression à 44,7 bars effectives où il sort à une température de 132,1° C. Ce dernier est ensuite refroidi à 32,2 °C dans un échangeur à eau de mer, puis à -30,5 °C dans les échangeurs à propane à quatre niveaux, d'où il sort à une pression de 4,8 bars effective. Ce refroidissement condense les composants lourds du réfrigérant mixte, principalement l'éthane et le propane. Les deux phases sont réparties dans le ballon séparateur MCR2. Les vapeurs et le liquide traversent l'échangeur principal à 42,7 bars effectifs et -30,5°C. Le liquide est détendu à 36,3 bars, vaporisé et injecté dans la calandre à -117,4°C, réfrigérant le GN à environ -110°C.

En tête du faisceau froid, les vapeurs condensées de MCR sont à nouveau détendues à 29,3 bars, vaporisées et réinjectées dans la calandre à -149°C, entraînant une liquéfaction complète du GN, abaissant ainsi sa température à -148°C. Les MCR rejoignent le fond de la calandre et retournent dans le ballon d'aspiration du MCR 1 à une pression de 1,9 bar effectif et à -35°C [3].

Tableau I.3. Composition du MCR.

Constituant	Pourcentage Moléculaire %
Azote	3.2
Méthane	40.2
Ethane	54.4
Propane	2.2

I.4.5. Fractionnement

L'unité de fractionnement est alimentée par les produits du fond de la tour de lavage située en amont de l'échangeur principal. Cette unité comprend trois systèmes de distillation en cascade à savoir ; le dééthaniseur, le dépropaniseur et le débutaniseur qui permettent de à séparer les composants des produits suivants :

- Éthane d'appoint pour le réfrigérant mixte MCR et le GNL.
- Propane d'appoint pour le système propane, le MCR et le GNL.
- Butane d'appoint du GN d'alimentation de l'échangeur principal.
- Gazoline comme produit commercialisable.
- Butane et propane destinés à la commercialisation GPL.
- Gaz combustible du procédé des chaudières.

I.4.6. Stockage et chargement du GNL

Trois bacs d'une capacité unitaire de 100 000 m³ assurent le stockage du GNL à la pression de 1,03 bar à une température de -162 °C. Lors du remplissage des bacs, une quantité des composants du GNL (produit), tels rassemblés dans le tableau I.4, se vaporise.

Tableau I.4. Compositions du GNL.

COMPOSANTS		Pourcentage molaire moyen %	COMPOSANTS		Pourcentage molaire moyen %
Hélium	Hé	0.20	Propane	C ₃ H ₈	1.52
Azote	N ₂	5.90	Isobutane	iC ₄ H ₁₀	0.04
Méthane	CH ₄	84.52	Butane	C ₄ H ₁₀	0.03
Ethane	C ₂ H ₆	7.77	Isopentane	C ₅ H ₁₂	0.02

Le GNL peut être transféré d'un bac à un autre lorsque l'on ne charge pas, en utilisant la pompe de transfert. Il est également possible de transférer la production du GNL de GL1/Z vers les bacs de stockage de GL2/Z en utilisant également la pompe de transfert de GL2/Z. Le débit maximum est de 12 000 m³/h.

Les caractéristiques des bacs de stockage sont regroupées dans le tableau I.5.

Tableau I.5. Les caractéristiques des bacs de stockage.

Constructeur	TTK (Japon)
Capacité	100 000 m ³
Diamètre extérieur	66 m
Hauteur paroi vertical	47.5 m
Température de service	-162°C
Pression de service	1.05 bar absolu
Taux d'évaporation	Inférieur à 0.07% de la capacité

Le GNL est chargé dans un méthanier de capacité variable (30 000-160 000 m³) à un débit de 10 000 m³/h au moyen de 5 pompes. Le produit est refroidi préalablement au chargement, et les vapeurs de retour sont stockées et introduites dans le réseau de gaz combustible. Le méthanier peut être chargé avec du GNL provenant de GL1/Z ou GL2/Z, mais pas avec les deux. Un certificat de qualité est imposé pour le méthanier [4].

I.5. CONCLUSION

Pour conclure ce chapitre sur le complexe GL2/Z, il est clair que cette installation représente une pièce maîtresse remarquable d'ingénierie et d'expertise dans le domaine du génie chimique, contribuant significativement à l'économie nationale et à la position de SONATRACH sur la scène mondiale de l'industrie pétrolière et gazière. Ce complexe occupe un rôle essentiel dans la liquéfaction du gaz naturel issu de Hassi R'Mel, permettant ainsi son transport et son stockage facilités. La description détaillée du processus de liquéfaction du gaz naturel met en avant les étapes complexes nécessaires pour produire du GNL de haute qualité répondant aux normes internationales.



Chapitre II

*DESSALEMENT DE L'EAU DE
MER DANS LE COMPLEXE*

GNL2/Z



DESSALEMENT DE L'EAU DE MER DANS LE COMPLEXE GNL2/Z

II.1. INTRODUCTION

La planète dépend de l'eau, mais plus de 97,5 % de cette ressource est salée, générant ainsi une forte pénurie d'eau douce. Pour relever ce défi, le dessalement de l'eau de mer est perçu aujourd'hui comme une alternative incontournable pour accroître les ressources en eau et répondre aux besoins. Ce chapitre explore les différents procédés de dessalement utilisés pour l'eau de mer à travers sa composition, sa constitution et ses caractéristiques physico-chimiques, ainsi que les étapes du prétraitement à la production et les principales méthodes de dessalement, telles que la distillation et les membranes. Une étude d'un exemple concret de dessalement, à savoir le complexe GL2/Z, et une démonstration de son application pratique à grande échelle permettront d'avoir une vue d'ensemble du dessalement de l'eau de mer et de son rôle crucial pour garantir l'accès à l'eau à l'échelle mondiale.

II.2. COMPOSITION DES EAUX DE MER

L'eau de mer se compose de carbone, d'azote, de phosphore, d'oxygène soluble et de nutriments, formant ainsi la base des chaînes alimentaires marines. On y trouve également des éléments tels que le calcium, le magnésium et le strontium (voir tableau II.1), qui reflètent la dynamique des échanges atmosphériques océaniques. L'eau de mer comprend 96,5 % d'eau pure et 3,5 % de substances solubles, avec des gaz dissous tels que 64 % d'azote, 34 % d'oxygène et 1,8 % de dioxyde de carbone, soit une proportion 60 fois supérieure à celle de l'atmosphère terrestre [5,6].

Tableau II.1. Composition standard des eaux de mer.

Constituants	Composition en %	Composant	Composition en %
Sodium (Na)	30,64%	Bicarbonate (HCO₃)	0,41%
Chlore (Cl)	55,08%	Sulfate (SO₄²⁻)	7,69%
Calcium (Ca)	1,16%	Potassium (K)	1,10%
Magnésium (Mg)	3,69%	Bromure (Br⁻)	0,19%

II.3. CARACTERISTIQUES DES EAUX DE MER

L'eau de mer possède de nombreuses caractéristiques la distinguant de l'eau douce. Ci-dessous figurent quelques-unes :

II.3.1. La salinité

La salinité est un paramètre essentiel de l'eau de mer, représentant la teneur en sels dissous. Elle varie légèrement en moyenne, avec 35 grammes de sel par litre, tout en étant soumise à des fluctuations régionales : 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, en raison de la fonte des glaces dans les régions plus froides [7].

II.3.2. La dureté

L'eau de mer est la forme d'eau la plus salée, avec une température de saturation de 750°F (TH). Elle contient une forte concentration de sels dissous, notamment le calcium et le magnésium, sous forme de sulfate de magnésium, de chlorure de magnésium et de sulfate de calcium comme indiqué dans le tableau ci-dessous [8].

Tableau II.2. Les composants de la dureté de l'eau

Composants	Teneur (g/l)
Chlorure de magnésium	3.8
Sulfate de magnésium	1.65
Sulfate de calcium	1.26
Carbonate de calcium	0.12
Bromure de magnésium	0.076

II.3.3. 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.

II.3.4. Le PH

Le pH de l'eau de mer est d'environ 8,2, il peut cependant varier entre 7,5 et 8,5 en fonction de la salinité locale. Le pH croît avec la salinité jusqu'à saturation en carbonates. Ainsi, l'eau a une teneur plus élevée en carbonates et une plus grande capacité à tamponner les ions d'hydrogène libres [8].

II.3.5. La solubilité

Il y a entre 30 à 40 g de sel dissous dans 1 kg d'eau de mer à 20°C. En effet, la solubilité du sel dans l'eau progresse à la température de la solution [8].

II.4. DESSALEMENT DE L'EAU DE MER

Le dessalement de l'eau de mer (Dessalage) consiste à éliminer les impuretés en sels présents dans l'eau salée ou saumâtre afin de produire de l'eau de salinité proche de celle des eaux douces naturelles à partir de l'eau de mer ou de l'eau saumâtre ce qui permet de la rendre propre à la consommation humaine et utilisation industrielle.

II.4.1. Procédé de dessalement de l'eau de mer

Le dessalement de l'eau de mer se procède en quatre étapes (voir figure II.1) à savoir ; captation de l'eau de mer, prétraitement, différents procédés de dessalement et post traitement ou minéralisation.

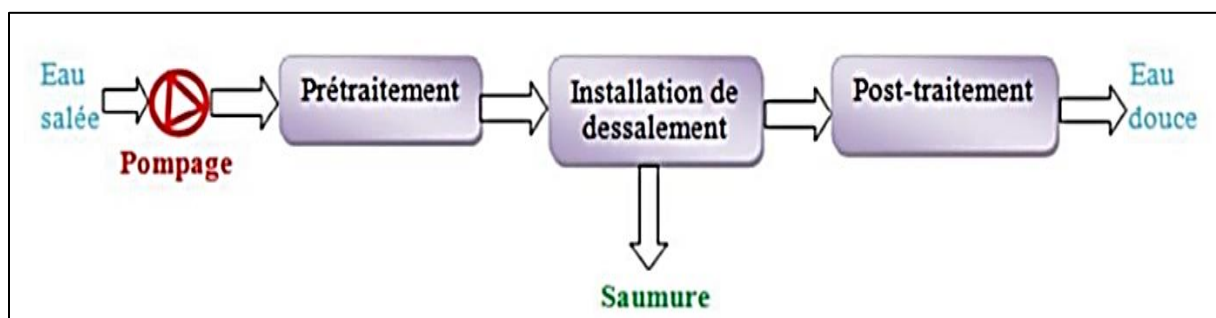


Figure II.1. Schéma général d'une installation de dessalement.

II.4.2. Techniques de dessalement de l'eau de mer

Pour rendre l'eau de mer potable, deux types de procédés principaux sont utilisés :

- Procédé de distillation: c'est évaporer puis condenser l'eau de mer comme dans la technique "Multi-Stage Flash" (MSF) ou "Multi-Effet Distillation" (MED).
- Procédés membranaires : c'est l'osmose inverse, une technique qui utilise la pression pour séparer le sel de l'eau [7].

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

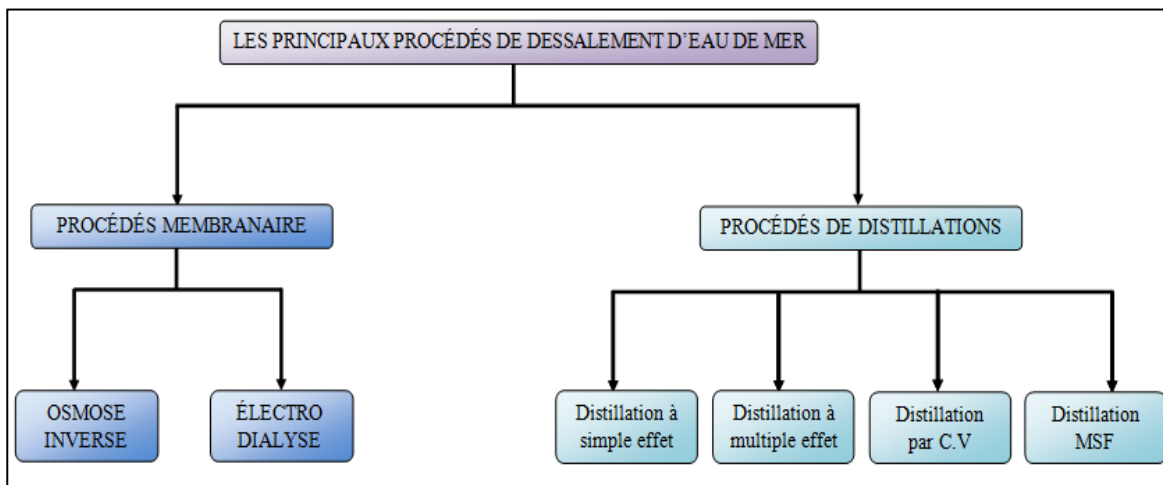


Figure II.2. Schéma représentatif des principaux procédés de dessalement de l'eau de mer.

Les deux techniques, distillation et osmose inverse, dominent le marché international du dessalement de l'eau de mer grâce à leurs performances prouvées. Les autres techniques, moins prometteuses en termes d'énergie et d'investissement, n'ont pas encore percé [9]. Indépendamment du procédé utilisé, toutes les usines de dessalement suivent les mêmes étapes indiquées à la figure II.1.

II.5. OPERATIONS DE DISTILLATION OU DE CHANGEMENT DE PHASES

II.5.1. Principe de distillation

La distillation est une méthode éprouvée pour dessaler l'eau de mer. Elle consiste à chauffer l'eau de mer jusqu'à ébullition, ce qui crée une vapeur d'eau (l'eau douce) qui est ensuite condensée. L'eau restante, très concentrée en sel (la saumure), est rejetée.

Ce procédé simple et efficace est utilisé depuis longtemps et se décline en plusieurs catégories. Il permet d'obtenir de l'eau douce en éliminant graduellement les sels au cours de plusieurs étapes de séparation [6].

II.5.2. Distillation multi-flash (multi stage flash « MSF »)

La distillation multi-flash (MDF) est une technique remarquable exploitant l'interaction de la pression et de la vapeur pour dessaler l'eau de mer comme illustré à la figure II.3.

Une fois sous pression constante, l'eau de mer est chauffée à 120°C. Elle est ensuite introduite dans un "étage" à basse pression, où une partie est instantanément évaporée ("flash") et condensée sur des tubes refroidisseurs. L'eau de mer restante est refroidie et le processus se répète dans des étages successifs (jusqu'à 40) à pression décroissante. A noter que l'énergie nécessaire provient principalement de la chaleur d'une chaudière. Le système est protégé par des produits chimiques (antitartre et antimousse) et des pompes assurent la circulation de l'eau [6].

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 [9].

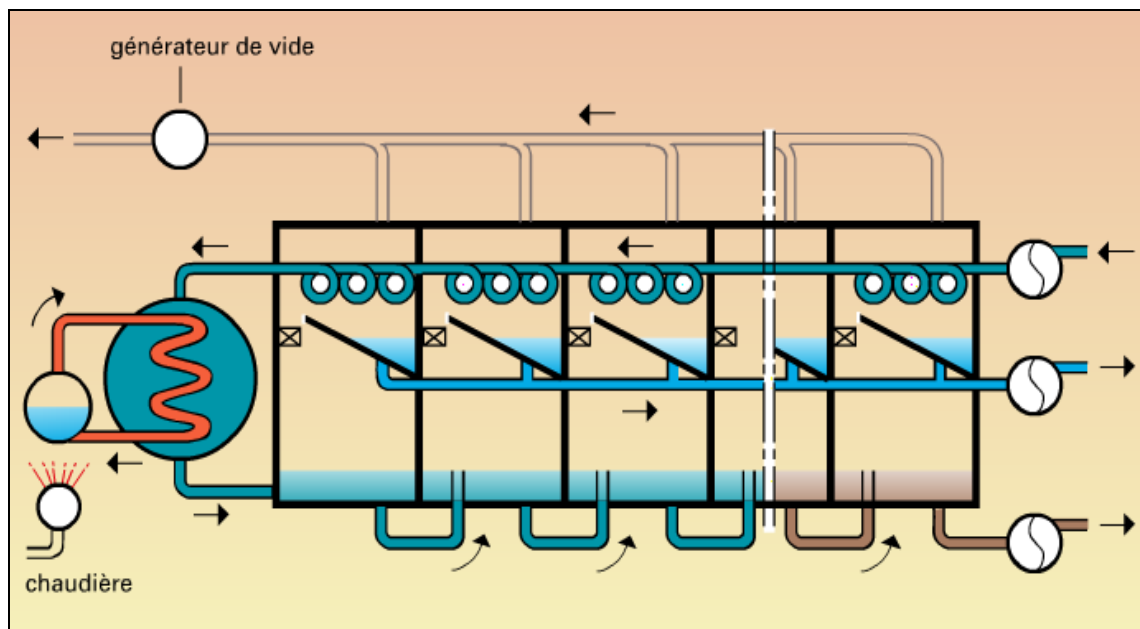


Figure II.3. Dessaleur de type « MSF ».

II.5.3. Distillation à simple effet

La distillation à simple effet est un procédé économique simple et efficace pour dessaler l'eau de mer ou saumâtre à l'échelle industrielle. Son principe repose sur la différence de volatilité entre l'eau et le sel ; lorsqu'elle est chauffée, l'eau salée s'évapore, et le sel reste dans l'eau. La vapeur d'eau pure est ensuite condensée pour produire de l'eau douce [6].

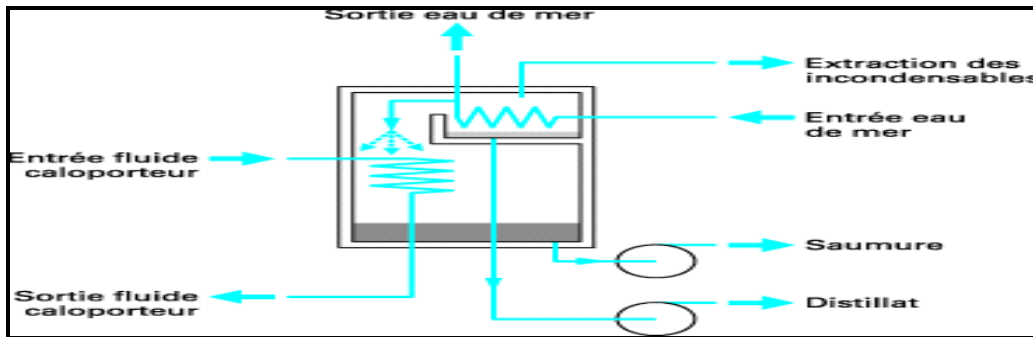


Figure II.4. Principe de la distillation à simple effet.

II.5.4. Distillation à multiples effets (multi effet distillation « MED »)

Ce procédé, tel présenté à la figure II.5, est une technique de pointe qui réutilise la vapeur pour réduire la consommation d'énergie et produire ainsi de l'eau douce à moindre coût. L'eau de mer préchauffée (70-80°C) s'évapore dans un premier "effet" à pression réduite. Une fois produite, la vapeur se condense dans un second "effet" à pression plus basse, chauffant en même temps l'eau de mer dans cet effet. Ce processus en cascade est répété sur plusieurs effets (jusqu'à 12), ce qui réduit la quantité d'énergie externe nécessaire. Seul le premier effet reçoit de la chaleur externe (vapeur ou eau chaude). Les effets suivants fonctionnent grâce à la chaleur dégagée par la condensation de la vapeur de l'effet précédent [9].

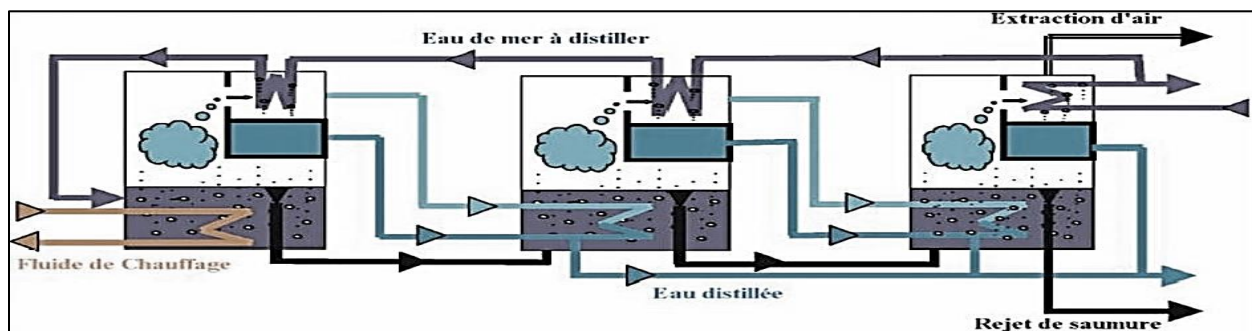


Figure II.5. Principe d'un système d'évaporateurs multiples Effets.

II.5.2.e. Distillation par compression de vapeur

Cette méthode, représentée sur la figure II.6, utilise la vapeur comme moyen de chauffage et l'énergie électrique pour la compression. Au cours de ce processus, le circuit récupère sa chaleur et la retire par le biais d'un compresseur. Cette vapeur provient généralement du dernier effet, ou de l'unique effet pour les installations de petite taille.

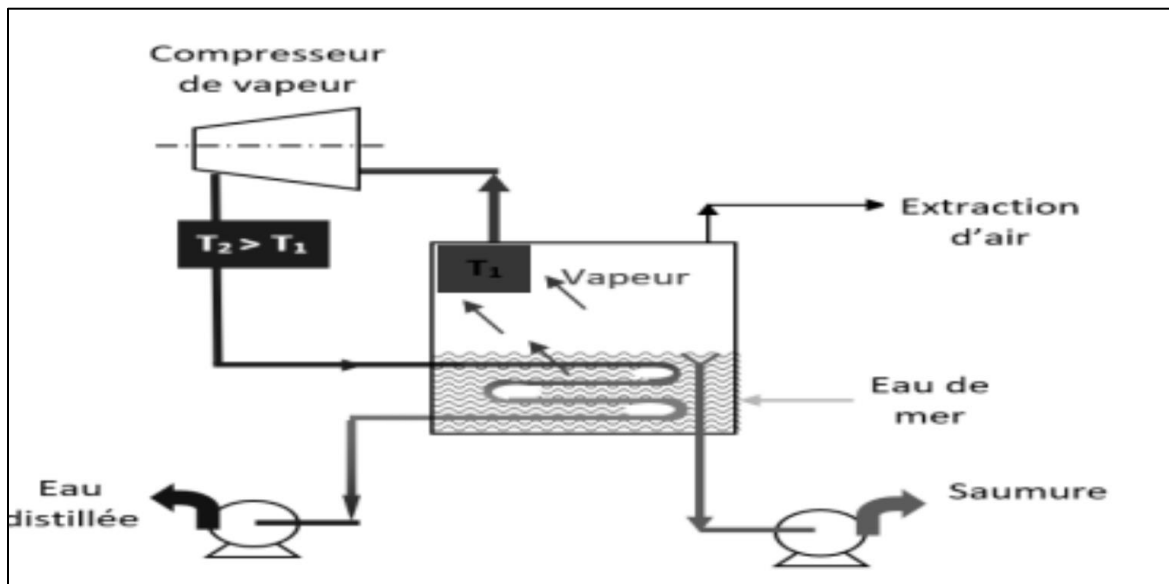


Figure II.6. Dessaleur type distillation à simple effet par Compression.

II.6. PROCÉDES MEMBRANAIRES

II.6.1. Procédés d'osmose inverse

L'osmose inverse est une technologie fascinante qui utilise des membranes semi-perméables pour séparer l'eau des sels sous pression, sans changement de phase ni chaleur (voir figure II.7). Elle consiste à pousser de l'eau de mer sous haute pression contre une membrane. Cette eau franchit la membrane, laissant le sel de l'autre côté. L'eau pure est ainsi recueillie, tandis que l'eau salée concentrée est rejetée. Ce procédé, réalisé à température ambiante, réduit la consommation d'énergie (principalement électrique pour les pompes) et produit une eau douce à très faible teneur en sel (environ 0,5 g/L) [4].

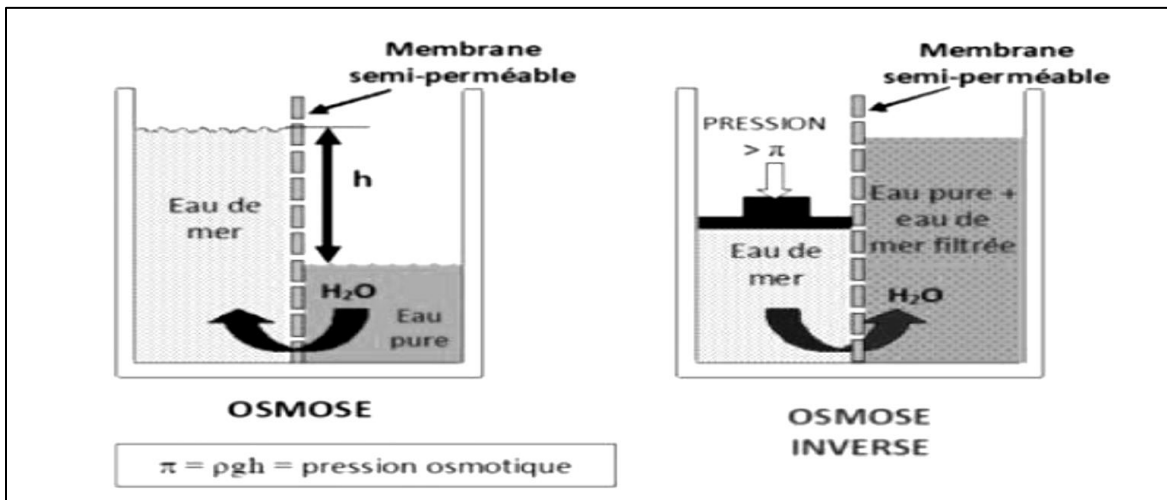


Figure II.7. Osmose et osmose inverse.

II.6.2. Procédé d'électrodialyse

L'électrodialyse repose sur la mise au point et l'utilisation des membranes semi perméables à l'eau sélective pour les ions (voir figure II.8). Ainsi, seuls les anions peuvent traverser une membrane anionique et seuls les cations peuvent traverser une membrane cationique.

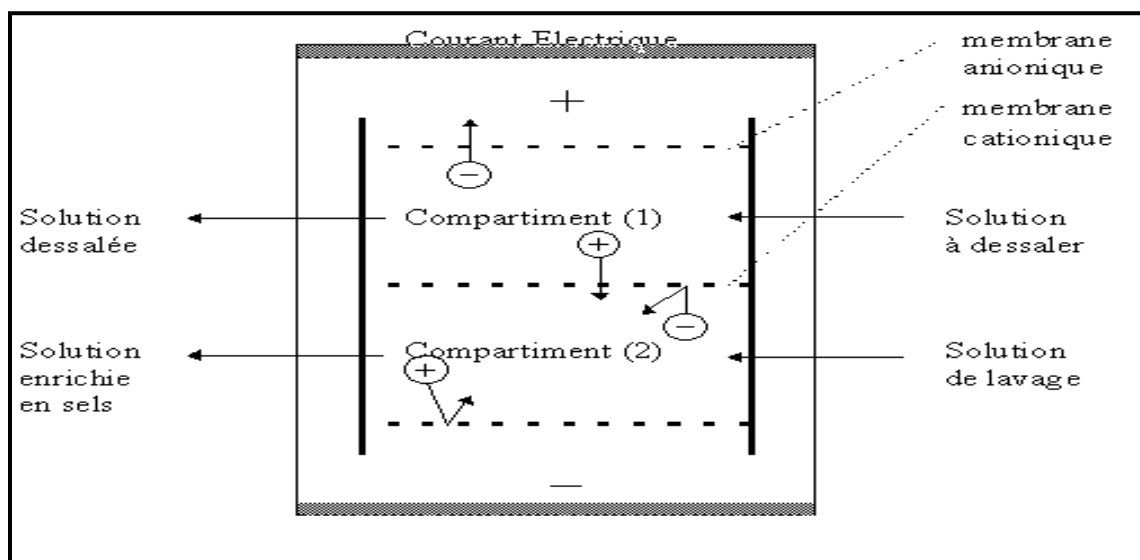


Figure II.8. Fonctionnement d'un électro dialyseur.

II.5.4 Critères de choix du procédé

Le choix du procédé dépend de la combinaison optimale des critères économiques et techniques pour chaque cas spécifique.

Les éléments à considérer lors de la sélection d'un processus de dessalement sont de deux natures :

- **Economiques** : prix de l'énergie, prix des produits chimiques, fluctuation des monnaies, modalités de financement, coût de la main d'œuvre.
- **Techniques** : salinité de l'eau, propriétés physico- chimiques de l'eau, teneur en sel de l'eau produite, Sources d'énergie disponibles [10].

II.6. UNITE DE DESSALEMENT DU COMPLEXE GL2/Z

L'unité de dessalement du complexe GL2/Z joue un rôle crucial en fournissant l'eau d'appoint (eau distillée) nécessaire aux chaudières du complexe à partir d'eau de mer. Cette eau précieuse alimente ensuite divers équipements du complexe, servant à la fois de source d'énergie et de réfrigérant.

Six unités de dessalement sont présentes sur le site ; trois unités SASAKURA (2010 LA/B/C) datant de 1978, deux unités AQUA-CHEM (2010 LE/D) plus récentes (1994) et une unité plus moderne (2010 LF) installée en 2004. Chacune de ces unités peut produire 45,3 m³/h d'eau distillée, avec une teneur en sel extrêmement faible (inférieure à 2 ppm). L'eau distillée est stockée dans un bac dédié (2041 F), tandis que la saumure résiduelle est rejetée dans le canal de rejet.

Notons que le complexe GL2/Z est relié au complexe GNL/Z, permettant une gestion optimisée de la production d'eau distillée pour répondre aux besoins des deux sites [6,9]. Enfin, il est important de souligner que cinq des unités de dessalement (2010 LA/B/C/D/E) utilisent un procédé de distillation à détente multiple à simple effet (MSF). La sixième unité (2010 LF) fonctionne quant à elle selon un procédé TCD (Thermo Compression Distiller) par évaporation et condensation sous vide [11].

II.7. DESCRIPTION DE L'UNITE 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.7.1. La section pomperie

La section pomperie joue un rôle crucial dans le processus global de traitement et de distribution de l'eau de mer pour les différentes applications dans les installations GNL. Dans cette section, l'eau de mer est acheminée vers les différents systèmes de traitement et d'utilisation à travers plusieurs étapes.

Premièrement, elle rejoint un bassin de distribution commun à LNG1 et LNG2, puis elle traverse un filtre EDM afin d'éliminer les moules et les algues. Cette eau est ensuite dirigée vers un filtre grossier à grille fixe où sont retenues les plus grosses particules. Les particules fines contenues dans l'eau sont ensuite filtrées via un filtre rotatif, pour ne laisser que les impuretés restantes. Après avoir été pompée, l'eau est régulée et à stockée dans deux réservoirs de collecte (tambours), avant d'être distribuée aux différents utilisateurs. Les collecteurs d'utilité sont installés dans chaque train de traitement afin de collecter l'eau traitée et de l'acheminer vers l'unité de dessalement ou vers d'autres destinations, telles que les turbogénérateurs [5].

Le schéma ci-dessous présente l'acheminement de l'eau de mer vers les dessaleurs 6 tubes à filtre grossier + système d'injection du chlore.

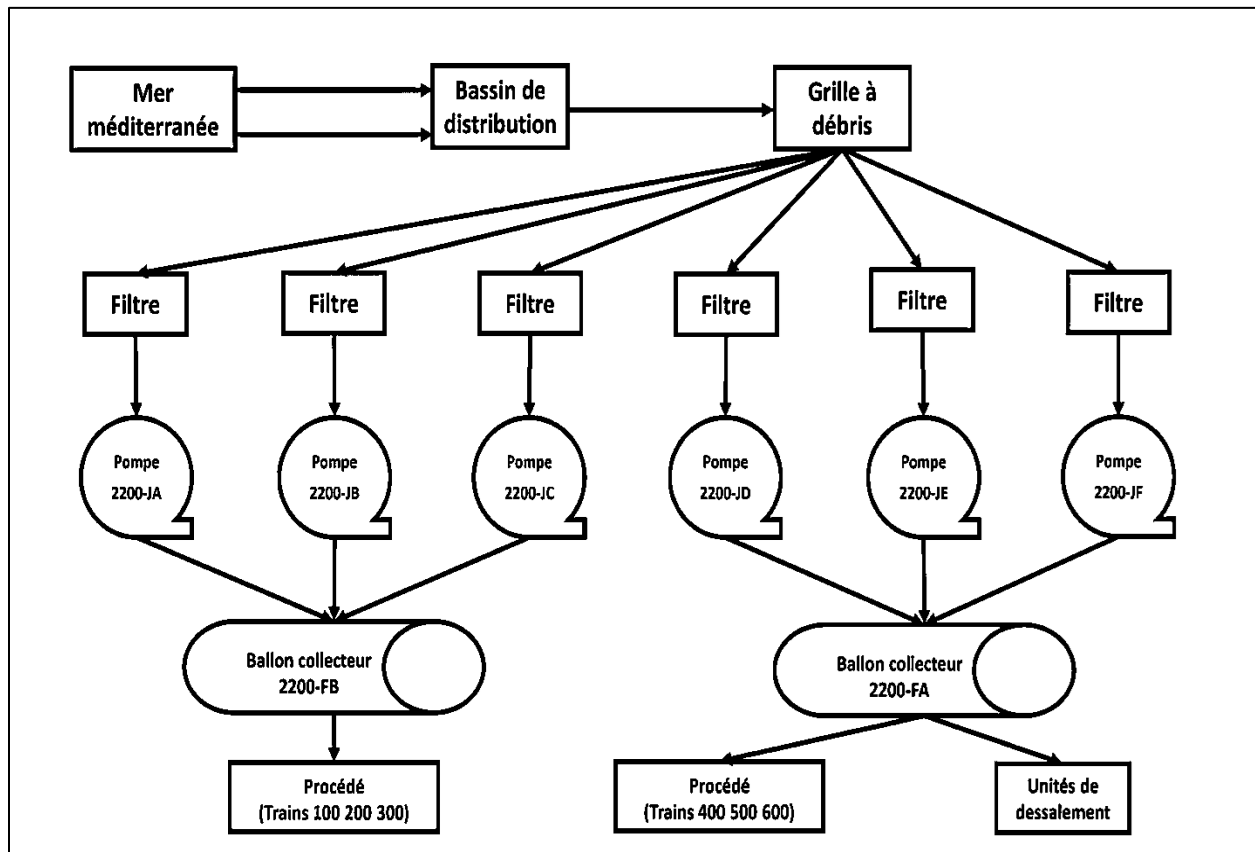


Figure II.9. Acheminement d'eau de mer vers les dessaleurs.

II.7.2. L'unité de dessalement type « MSF »

Cette unité comprend cinq (05) unités de dessalement identiques produisant de l'eau distillée, avec une teneur en sel dissous inférieure à 2 ppm (Voir le schéma de la figure II.10). Ces unités sont constituées de huit (08) étages (cellules) allongés dans une configuration à deux passes, chacune à écoulement transversal et sans recyclage. Chacune d'elles ayant un débit est de 45,3 m³/h.

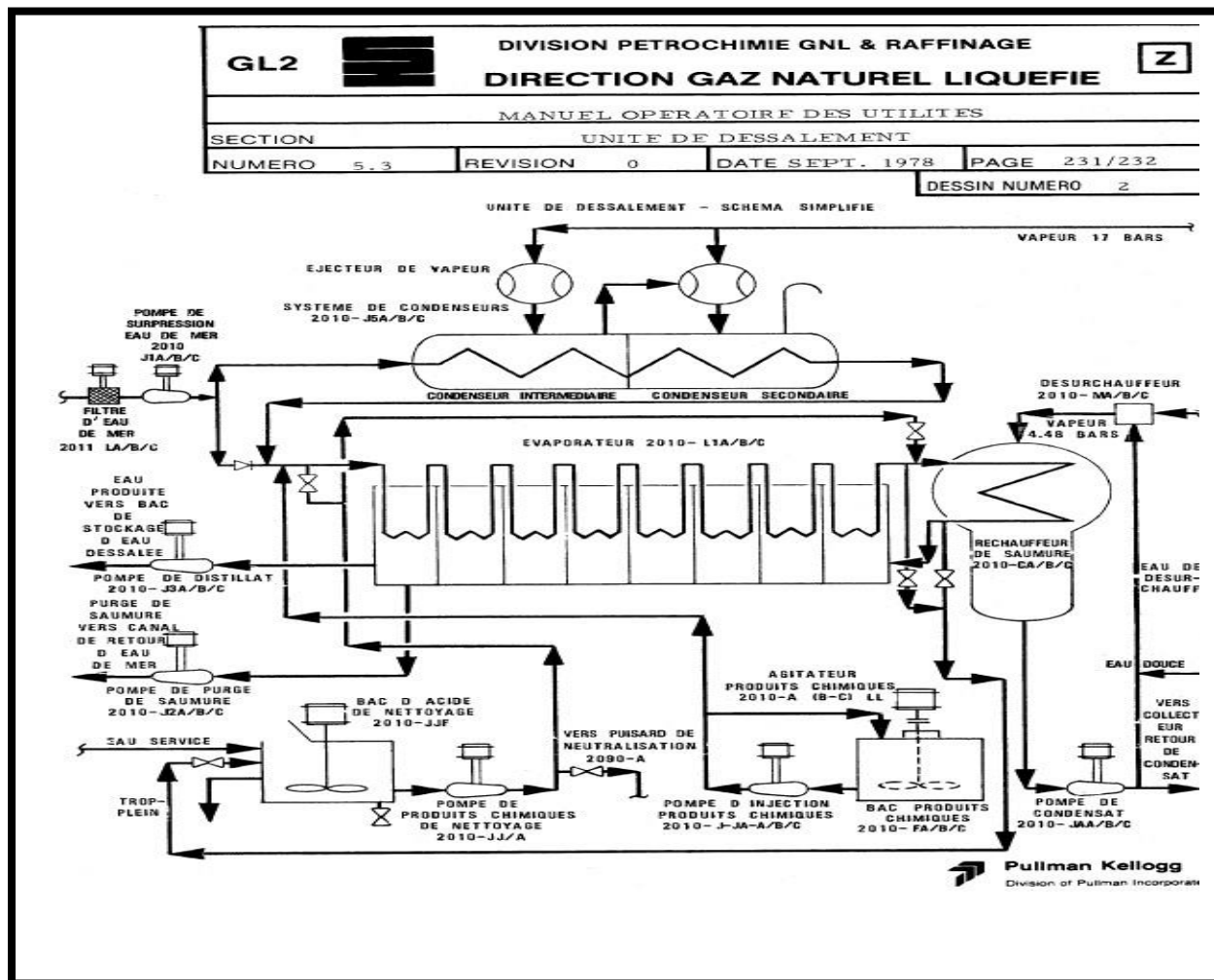


Figure II.10. Schéma simplifié de l'unité de dessalement.

Les équipements composant une unité de dessalement sont les suivants [4] :

- Les filtres à eau de mer (2011 L A, B, C, D, E): Ils éliminent en continu les impuretés solides de l'eau de mer via un lavage à contre-courant cyclique (voir figure II.11).

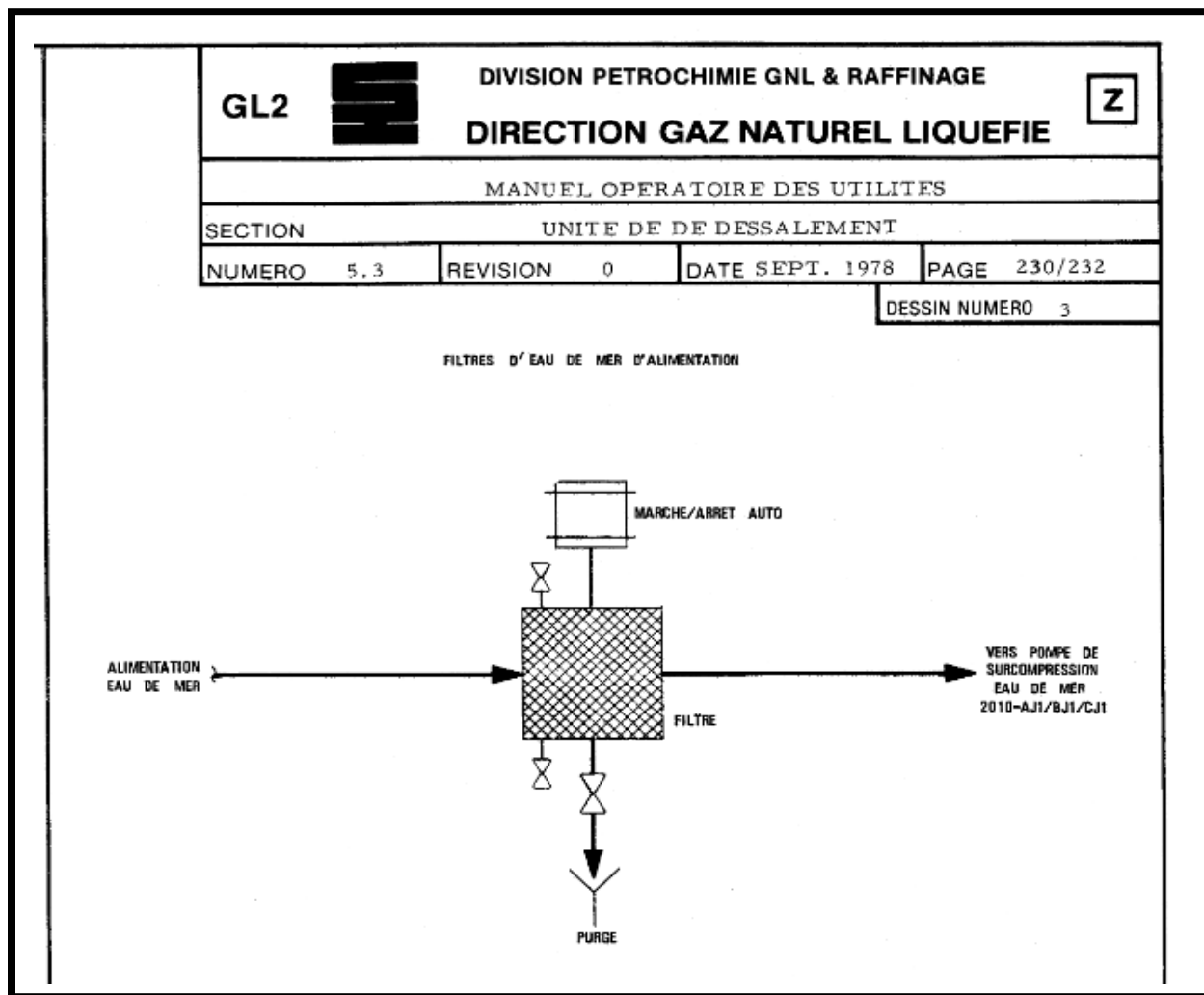


Figure II.11. Schéma simplifié d'un filtre d'eau de mer.

- **Pompe de surpression d'eau de mer : 2010 J1 A, B, C, D, E :** Elle est chargée d'augmenter la pression de l'eau de mer en refoulant l'eau récupérer par filtration vers l'évaporateur et l'éjecteur condenseur [15].
- **Éjecteur et condenseur : 2010 J5 A, B, C, D, E :** L'éjecteur utilise l'énergie de la vapeur d'eau pour créer un vide dans l'évaporateur via deux (02) éjecteurs présentant chacun deux (02) étages et un condenseur divisé en deux (02) étages [15].
- **Réchauffeur de saumure : 2010 C A, B, C, D, E :** Est un échangeur à calandre qui augmente la température de la saumure pour favoriser son évaporation dans le processus de dessalement [12].

- **Désurchauffeur : 2010 M A, B, C, D, E** : Le réchauffeur de saumure est alimenté en vapeur saturée à 100 °C par le désurchauffeur (2010 C A, B, C, D, E). En utilisant le condensât comme agent désurchauffant, il diminue la température de la vapeur [12].
- **Évaporateur : 2010 LI A, B, C, D, E** : Il est basé sur le chauffage de la saumure à 90°C, qui se déplace indépendamment des faisceaux tubulaires et produit une évaporation grâce au vide généré par les éjecteurs de vapeur (voir figure II.12). La vapeur passe par un tamis débromeur, se condense au contact du condenseur et est collectée pour former de l'eau douce qui s'écoule dans le bac d'eau distillée. L'eau est ensuite rejetée vers le réservoir de stockage et le niveau de saumure est maintenu en évacuant la saumure inutile vers le canal de rejet, tout en éliminant les gaz incondensables du système de vide.

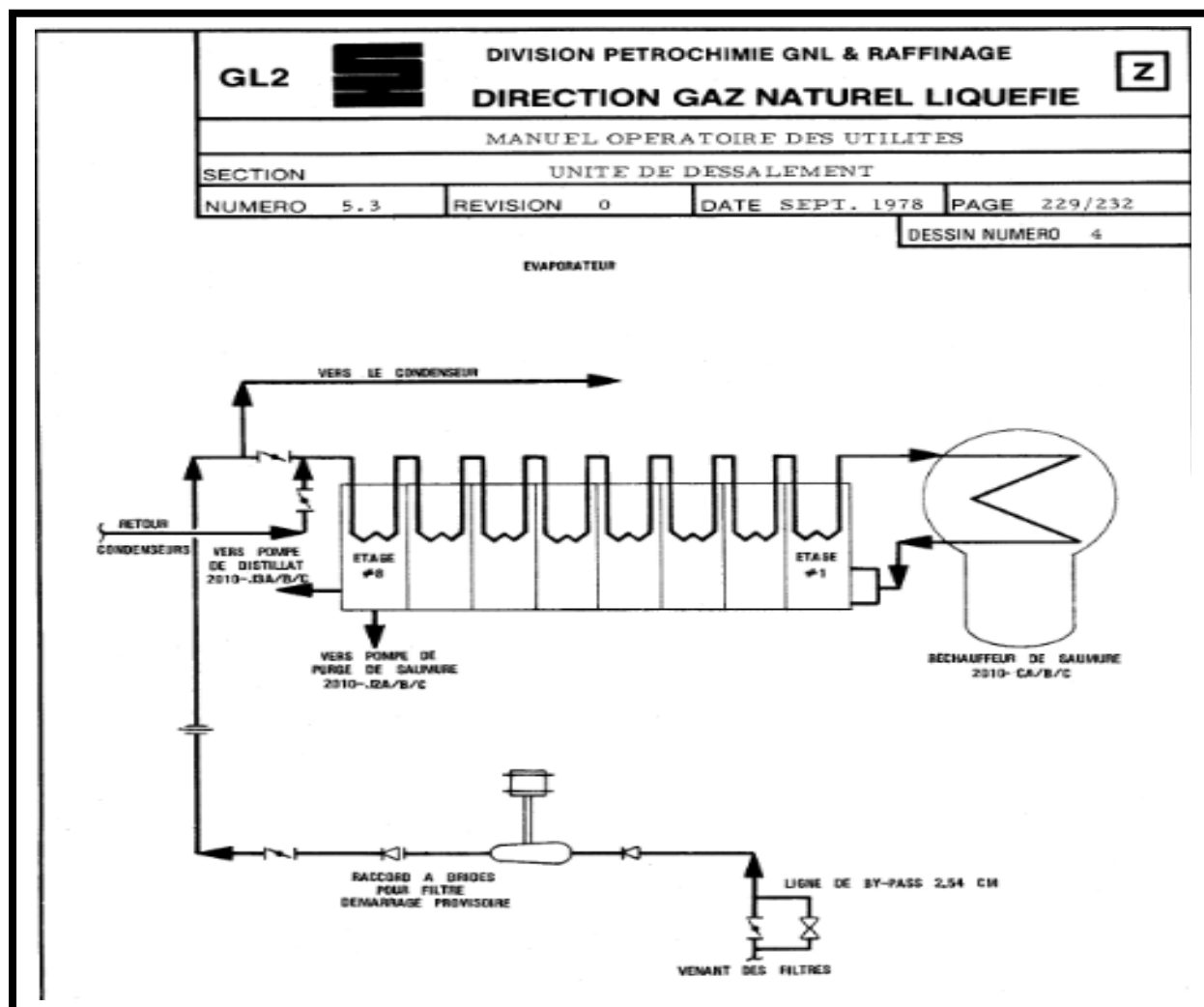


Figure II.12. Schéma simplifié d'un évaporateur.

- **Système d'injection des produits chimiques :** Il est conçu pour retarder la formation de tartre et de mousse dans l'unité de dessalement. Il fonctionne en injectant de l'eau de mer avec du polyphosphate et de la solution anti-mousse, grâce à un ensemble de composants incluant un récipient contenant les produits chimiques (2010 F A, B, C, D, E), des pompes doseuses (2010 J/JA A, B, C, D, E), un indicateur de débit (FI-4304), un régulateur de pression (PCV-4301), un agitateur et des pompes supplémentaires pour le traitement et la purification de l'eau [12].
- **Le bac de stockage :** Ce dernier, d'une capacité de 8710 m³, est maintenu sous pression d'azote pour éviter tout contact avec l'air et est alimenté par les pompes d'appoint (2010 J A, B, C, D, E) en eau distillée pour les chaudières via le collecteur d'eau d'appoint [3]. **Voir le schéma attaché à l'annexe 13.**
- **Les compartiments :** L'eau de mer (saumure), dirigée vers l'évaporateur, est répartie à l'intérieur des huit compartiments par un faisceau tubulaire agissant également comme condenseur en contact de la vapeur à eau évaporée. Son parcours passe à travers du bas au premier compartiment, pour remonter, revenir au deuxième compartiment et en ressortir, avec une hausse de la température lors de sa progression, en raison du préchauffage.

II.8. PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT DE L'UNITE DE DESSALEMENT « MSF »

La production d'eau distillée à partir d'eau de mer est réalisée à l'aide de l'évaporateur multi-flash MSF(voir figure II.13), avec lequel l'eau est chauffée jusqu'à ce qu'elle soit prête pour la distillation. La vapeur produite est ensuite dirigée vers le condenseur, où elle est transformée en distillat. Le mécanisme de distillation fonctionne grâce à un vide progressif dans les étages, créé par un système de vide installé au-dessus du dessaleur, ce qui élimine les gaz non condensables libérés pendant le fonctionnement. L'eau de mer est préchauffée à environ 73°C, puis réchauffée à 91°C avant d'être envoyée dans la première cellule d'évaporation. La vapeur de condensation est collectée dans un bac à condensats et envoyée au stockage si elle est conforme aux spécifications, avec un dispositif de contrôle par conductimètre pour séparer les systèmes de condensats et de produits en cas de mauvaise qualité [13,14].

-

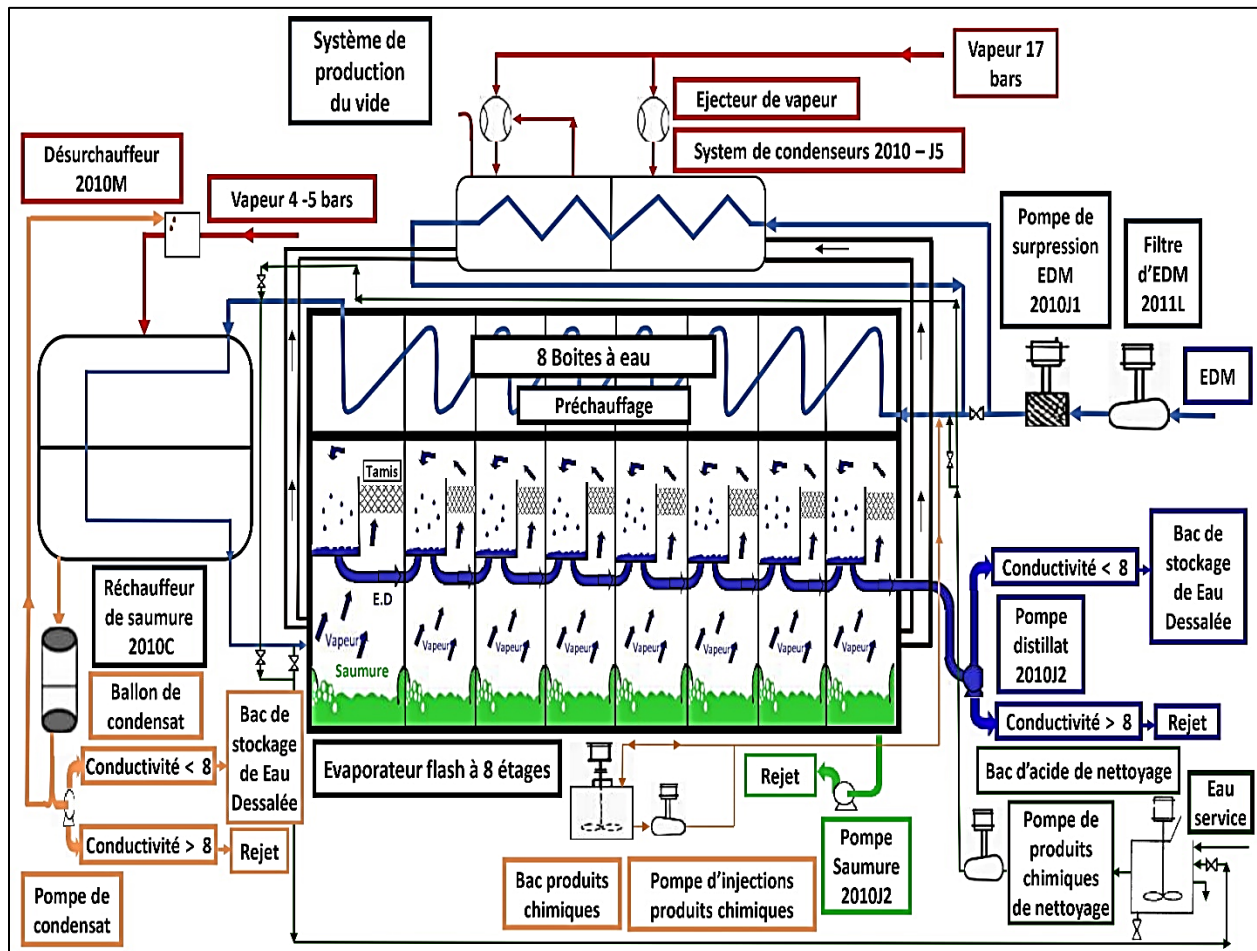


Figure II.13. Principe et paramètres de fonctionnement de l'unité de dessalement de type MSF.

II.9. CONCLUSION

Le dessalement de l'eau de mer est une solution indispensable à la pénurie mondiale d'eau douce, en particulier dans les régions arides et les régions à forte croissance démographique. Les processus de dessalement des eaux de mer, tels que la distillation et l'osmose inverse, ont été décrits en détail, en démontrant l'efficacité et la fiabilité de ces technologies. Le complexe GL2/Z, fonctionnant par distillation multi-flash et par compression de vapeur, témoigne de l'application à grande échelle de ces technologies, démontrant la viabilité industrielle et l'importance stratégique du dessalement dans la gestion durable des ressources en eau.



Chapitre III

PROBLEMES TECHNIQUES
RENCONTRES EN
DESSALEMENT D'EAU DE MER



PROBLEMES TECHNIQUES RENCONTRES EN DESSALEMENT D'EAU DE MER

III.1. INTRODUCTION

Le phénomène d'entartrage représente un problème majeur au niveau de l'unité de dessalement d'eau de mer du complexe GL2/Z causant des problèmes techniques et affectant l'efficacité des installations. Ces problèmes comprennent la formation de mousse, la corrosion, la prolifération des plantes et l'extraction des gaz non condensables, le colmatage des surfaces d'échange et les problèmes de développement biologique. En effet, ce sont les sels, les gaz dissous, les matières en suspension et les organismes présents dans l'eau de mer qui sont à l'origine de l'entartrage et qui nécessitent un traitement rigoureux avant leur utilisation [13].

III.2. PHENOMENE D'ENTARTRAGE

III.2.1. Définition du tartre

Le tartre, formé principalement du carbonate de calcium (CaCO_3), se caractérise par une couche calcaire déposée sur les parois des installations telles que les chaudières, les canalisations et les échangeurs de chaleur (Voir figure III.1). Cette formation calcaire dure et insoluble résulte de la précipitation de minéraux dans l'eau sous l'effet de la chaleur. Ainsi, la présence de sel, de gaz dissous et de matières en suspension dans l'eau de mer a des conséquences importantes sur le fonctionnement des usines de dessalement [6].



Figure III.1. Entartrage au niveau du réchauffeur.

III.2.2. Composition du tartre

Lors de l'évaporation de l'eau de mer dans un évaporateur, une hausse de température produit une précipitation de certains sels au-delà de leur limite de solubilité. Il en résulte une formation de tartre sur les surfaces d'échange de chaleur, altérant considérablement leurs performances. Le tartre produit par ces installations présente une composition variée, comprenant principalement du carbonate de calcium (CaCO_3), de l'hydroxyde de magnésium (Mg(OH)_2) et du sulfate de calcium (CaSO_4) (voir tableau III.1). La présence de ces dépôts sur les surfaces d'échange thermique entrave considérablement le transfert de chaleur, affectant ainsi l'efficacité du processus de dessalement [13].

Tableau III.1. Représentatif de la température de précipitation des différents tartres

Nature du tartre	Températures de précipitation °C
CaCO_3	60-70
Mg(OH)_2	90-95
CaSO_4	115

III.2.3. Classification du tartre

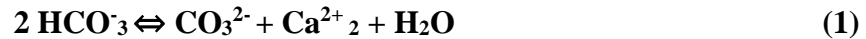
Il est généralement possible de distinguer deux types de tartre :

- ✓ Le tartre alcalin : CaCO_3 et Mg(OH)_2 .
- ✓ Le tartre non alcalin : CaSO_4 .

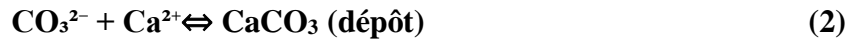
Il existe d'autres types de tartre comme : phosphate de calcium, oxyde de fer et de cuivre, tartre de silicate [14].

III.2.4. Formation du tartre

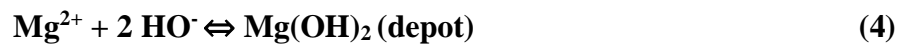
Les eaux contiennent des gaz dissous, notamment du CO_2 et de l'oxygène, ainsi que divers minéraux dont le bicarbonate de calcium ($\text{Ca(HCO}_3)_2$). La présence de CO_2 libre empêche la décomposition du bicarbonate de calcium. Cependant, lorsque l'eau est chauffée au-dessus de 50°C , ce CO_2 , également appelé anhydride carbonique, s'élimine, favorisant ainsi la décomposition du $\text{Ca(HCO}_3)_2$ selon la réaction suivante :



La combinaison des ions CO_3^{2-} et Ca^{2+} entraîne la formation de carbonate de calcium (CaCO_3) sous forme de dépôt :



L'hydrolyse de l'ion carbonate, à pH élevé, est à l'origine du dépôt d'hydroxyde de magnésium:



Les réactions 2, 3 et 4 sont endothermiques. Ce qui induit que leurs vitesses de réaction dépendent directement de la température. Ainsi :

- A ($T^\circ\text{C}$) < 82 °C, le carbonate de calcium est prédominant;
- A ($T^\circ\text{C}$) 93 °C, l'hydroxyde magnésium est le principal constituant du tartre.
- La précipitation de sulfate de calcium (CaSO_4) peut également se produire, mais uniquement à des températures supérieures à 121°C.

III.2.5. Formation des tartres au niveau de l'unité de dessalement GNL2Z

Le tartre, formé par précipitation de sels minéraux dans l'eau de mer, affecte négativement les différentes composantes des unités de dessalement tels que les réchauffeurs de saumure, les condenseurs et les évaporateurs, réduisant considérablement leur efficacité (voir figure III.2).

III.2.5.a. Impact sur les évaporateurs

La formation du tartre sur les surfaces d'échange thermique des évaporateurs nécessite une vapeur plus chaude pour maintenir la température de saumure, en raison de la résistance opposée de l'encrassement. Cela réduit l'efficacité de l'évaporation et entraîne une baisse de la production d'eau douce.

III.2.5.b. Impact sur la partie de récupération de la chaleur

La présence de tartre dans les échangeurs thermiques de la partie récupération de chaleur diminue l'efficacité du transfert de chaleur. Pour maintenir la température de sortie de la saumure, il est nécessaire d'augmenter le débit de vapeur, ce qui accroît la consommation d'énergie et a un impact négatif sur le rendement global de l'unité de dessalement.

Cela se traduit par une augmentation des coûts d'exploitation et une diminution de la production d'eau douce.

Le tartre peut être éliminé par le lessivage acide, mais il est nécessaire de mettre en place un traitement antitartre continu pour réduire sa formation, même si des nettoyages périodiques par le lessivage acide restent indispensables pour maintenir l'efficacité de l'unité de dessalement.



Figure III.2. Entartrage des chaudières

III.3. PROBLEMES D'ENTARTRAGE

III.3.1. Problème de corrosion

La corrosion correspond à la détérioration d'un matériau, notamment un métal ou un alliage, causée par l'action chimique d'un liquide ou d'un gaz sur celui-ci (voir figure III.3). Cette notion fait principalement référence à l'impact progressif d'agents naturels, tels que l'air ou l'eau salée, sur les métaux.



Figure III.3. Phénomène de corrosion

Parmi les principaux types de corrosion en milieu marin, figurent : la corrosion galvanique, la corrosion généralisée, la corrosion par piqûres, la corrosion caverneuse, la corrosion intergranulaire et la corrosion par érosion (voir figure III.4).

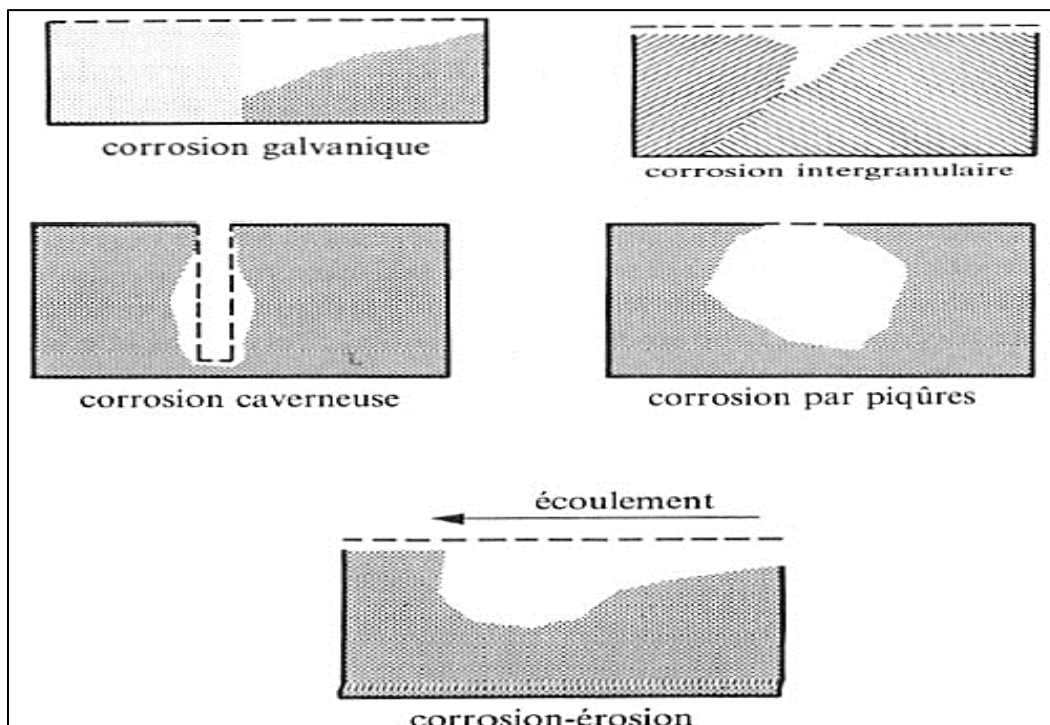


Figure III.4. Types de corrosion

Les effets néfastes provoqués par la corrosion sont représentés sur la figure suivante :

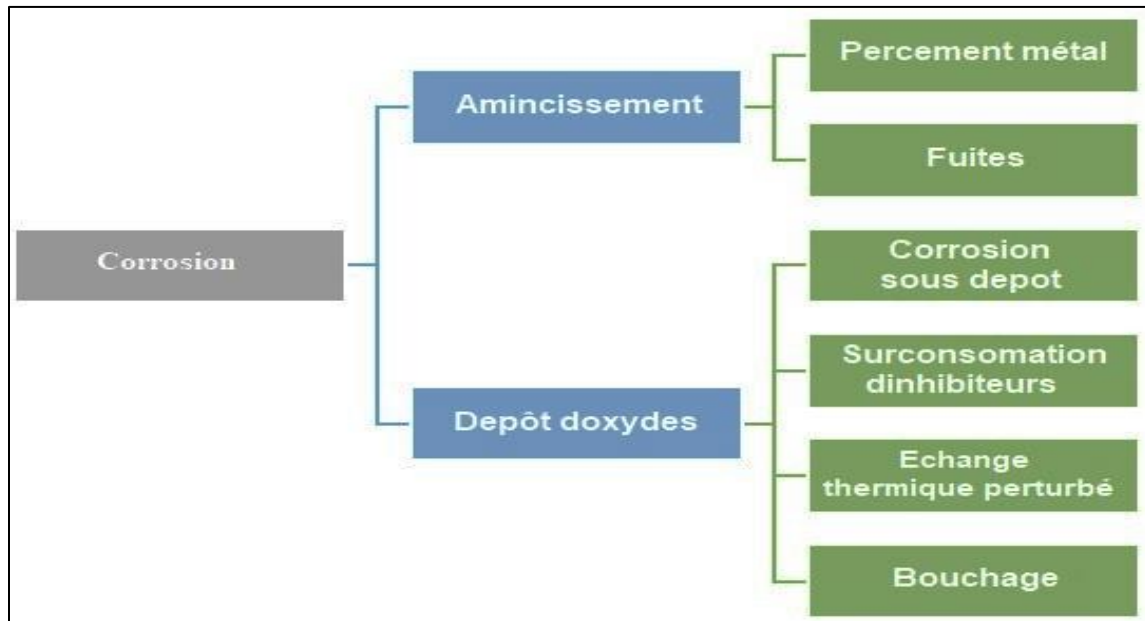


Figure III.5. Les méfaits de la corrosion

III.3.2. Causes de corrosion

Le phénomène de corrosion est favorisé par la composition chimique du matériau, sa conductivité, la présence d'oxygène dissous et de polluants tels que les ions chlorures, les bactéries, les organismes marins et l'H₂S. Ces facteurs créent un environnement propice aux réactions chimiques qui détériorent le matériau.

III.3.3. Facteurs principaux de la corrosion par l'eau de mer

III.3.3.a. La salinité : L'eau de mer, par sa composition chimique et biologique complexe et sa conductivité élevée, crée un environnement corrosif pour les métaux. Son pH stable d'environ 8,2 a peu d'effet sur la corrosion, tandis que Sa forte teneur en sel favorise les attaques localisées et les courants galvaniques. De plus, la résistance de l'électrolyte est un élément secondaire au contrôle de ces courants [14].

III.3.3.b. L'oxygène : L'oxygène joue un rôle crucial dans l'eau de mer, les réactions cathodiques réduisent les ions de disodium OH⁻ et accélèrent le processus de dégradation. L'augmentation de la concentration d'oxygène peut augmenter la corrosion par dépolarisation cathodique [13].

III.3.3.c. Les bactéries : En général, les tests de corrosion réalisés avec de l'eau de mer synthétique sont moins rigoureux que ceux réalisés avec de l'eau de mer naturelle.

III.3.3.d. La température et la vitesse de circulation : La corrosion varie de manière croissante avec la température et la vitesse de circulation, ce qui peut entraîner des effets catastrophiques si ces paramètres outrepassent certaines limites, du fait que l'on diverge souvent des principaux matériaux utilisés dans les circuits d'eau de mer [11].

III.3.4. Problème de colmatage

Des substances organiques et des microorganismes peuvent également être présents dans les eaux brutes naturelles (Figure III.6). En osmose inverse, ces organismes que les membranes retiennent peuvent les encrasser et créer des conditions propices à leur croissance. Ils génèrent ainsi un biofilm susceptible d'entraîner la rupture des filtres autonettoyants. La capacité de production des installations et le coût du processus sont directement affectés par ce phénomène [15].

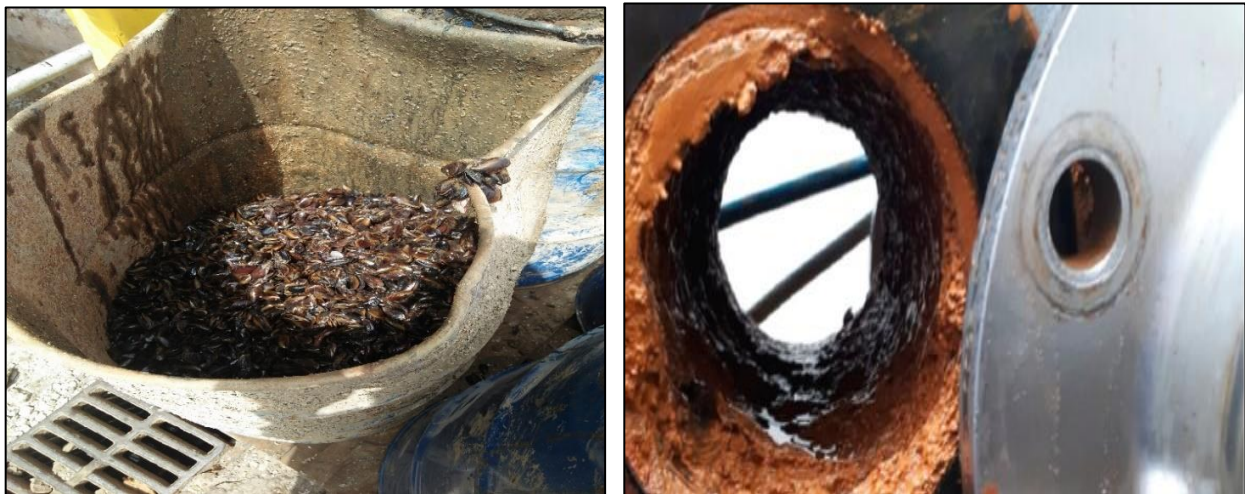


Figure III.6. Colmatage des métaux

III.4. MOYENS DE LUTTE ET DE PREVENTION CONTRE L'ENTARTRAGE

Il est important de combiner plusieurs méthodes de lutte contre l'entartrage pour obtenir une protection optimale. Parmi ces méthodes, nous pouvons citer :

III.4.1. Inhibiteurs d'entartrage : Il s'agit de produits tartriques injectés à une dose très faible (environ quelques ppm) dans l'eau d'appoint, ce qui leur permet d'éviter ou de réduire les dépôts sur les parois d'échange et ralentir la vitesse de la corrosion.

III.4.2. Lessivage acide : Le nettoyage complet des dépôts de tartre implique une opération de lixiviation (lessivage) à l'acide qui consiste à faire circuler une solution concentrée d'acide inhibé (acide sulfamique + Rhodine 141) et à dissoudre les dépôts de tartre pour éviter qu'ils n'attaquent les faisceaux de tubes. La lixiviation acide intervient par pulvérisation des faisceaux tubulaires sur une durée adaptée à la quantité de tartre à éliminer. Cette quantité ainsi que le temps de lessivage, les variations de **PH** et la température de l'eau de dilution doivent être soigneusement notés lors du lessivage.

III.4.3. Revêtements : Il est important d'appliquer des revêtements protecteurs adaptés à l'environnement et à l'usage du métal, tels que des peintures, des vernis ou des revêtements métalliques (galvanisation, zingage).

III.4.4. Choix des matériaux : Privilégier des matériaux appropriés aux conditions d'utilisation spécifiques (température, salinité, etc.) de sorte qu'ils soient naturellement résistants à la corrosion, tels que l'acier inoxydable, l'aluminium ou le titane.

III.5. CONCLUSION

La présence de sel, de gaz dissous et de matières en suspension dans l'eau de mer engendre le phénomène d'entartrage qui affecte négativement le fonctionnement des différentes composantes des unités de dessalement du complexe GL2/Z réduisant ainsi leur efficacité ce qui nécessite un traitement rigoureux avant leur utilisation.

Dans ce chapitre, les différents problèmes causés par le phénomène d'entartrage ont été abordés en premier lieu tout en spécifiant leurs impacts. Par la suite, quelques méthodes employées pour lutter contre ce phénomène ont été déterminées.



Chapitre IV

***VERIFICATION DES PARAMETRES
DE FONCTIONNEMENT DES
UNITES DE DESSALEMENT***



VERIFICATION DES PARAMETRES DE FONCTIONNEMENT DES UNITES DE DESSALEMENT

IV.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. Celle-ci constitue un élément essentiel qui permet de fournir la vapeur nécessaire au chauffage et au fonctionnement des équipements rotatifs, ainsi qu'au refroidissement des échangeurs et des condenseurs dans la zone Utilities. Cependant, les défis rencontrés par les cinq unités de dessalement équipées du procédé de flash multi-étapes (MSF) sont préoccupants, avec une baisse significative de leur production d'eau dessalée depuis 2010, ce qui a un impact sur l'efficacité globale du complexe. Dans ce chapitre, nous nous intéressons à évaluer les performances actuelles des unités de dessalement tout en déterminant les Paramètres de fonctionnement des dessaleurs de type MSF, les mesures de traitement des eaux dessalées et les contraintes rencontrées lors des opérations du complexe.

IV.2. PROBLEMATIQUE

La production de gaz naturel liquéfié (GNL) est un processus incontournable au niveau du complexe GL2/Z. Il repose principalement sur l'utilisation de vapeur, nécessaire au chauffage et au fonctionnement des machines tournantes. L'eau distillée ou dessalée joue un rôle essentiel, servant à produire de la vapeur et à refroidir les échangeurs et condenseurs de la zone Utilités. Les cinq unités de dessalement (2010 L A/B/C/D/E) fonctionnent à l'aide d'un procédé de détente à plusieurs étages (MSF) à simple effet, avec une capacité de production de distillat de 45,3 m³/h chacune. Cependant, toutes les unités du complexe font face à un défi important lié à la diminution de la production d'eau dessalée, qui affecte l'efficacité globale des opérations depuis 2010. Cette étude vise à évaluer la performance des unités de dessalement, identifier les éléments contribuant à la diminution de la production et proposer des suggestions pour améliorer les performances, en identifiant les problèmes rencontrés, en formulant un plan d'action pour

DE DESSALEMENT

améliorer la fiabilité et la rentabilité, et en proposant des mesures correctives et des recommandations pour rétablir et accroître la productivité et l'efficacité opérationnelle du complexe.

IV.3. PRODUCTION DE L'EAU DESSALEE DANS LE COMPLEXE GL2/Z

Les données de la valeur moyenne mensuelle de la production en eau dessalée des cinq dessaleurs de type MSF, couvrant la période de l'année 2023, ainsi que les résultats obtenus sont tabulés dans le tableau ci-dessous et leur évolution pour chaque mois sont représentés sur la figure IV.1.

Tableau IV.1. Production globale et production de chaque dessaleur en eau dessalée des cinq (05) dessaleurs pour 2023

	2010LA	2010LB	2010LC	2010LD	2010LE	Production E.D
Janvier	22004	18867	0	0	18980	59851
Février	19477	18733	0	0	17080	55290
Mars	14194	14779	0	0	12995	41968
Avril	16439	18626	0	0	17108	52173
Mai	15671	20105	0	0	15185	50961
Juin	17477	18995	0	0	17995	54467
Juillet	14231	18797	0	0	18600	51628
Aout	12744	18332	0	0	17626	48702
Septembre	9951	16640	0	0	15544	42134
Octobre	6979	6169	0	4070	14272	31490
Novembre	0	14079	0	14683	14364	43126
Décembre	0	14295	0	9579	14854	38728
2023	149168	198418	0	28332	194602	570519

DE DESSALEMENT

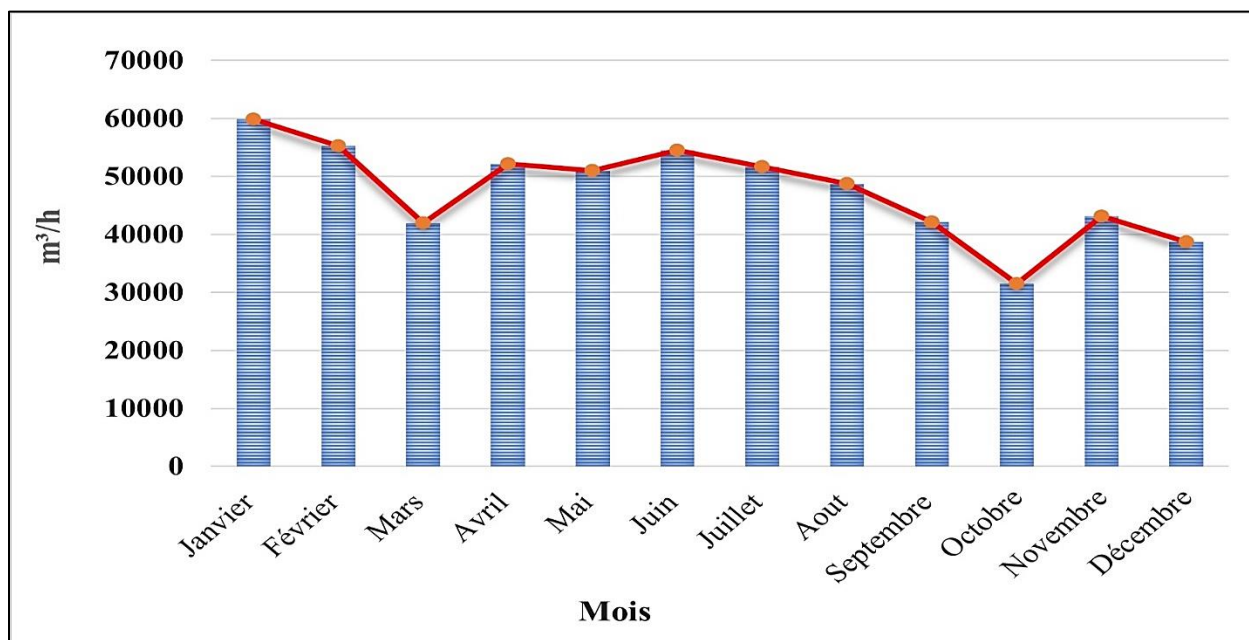


Figure IV.1. Evolution de la production en eau dessalée des cinq dessaleurs de type MSF

Les données relatives à la production d'eau dessalée pour l'année 2023 dans le complexe GL2/Z donnent des résultats variables. En effet, la production totale d'eau dessalée a atteint 570 519 m³/h, ce qui est notable, mais reste en deçà des objectifs de production fixés par la conception. Cependant, cette production est compromise par des problèmes opérationnels majeurs rencontrés par les équipes de dessalement.

L'analyse de la production d'eau dessalée par mois révèle des fluctuations importantes. En outre, en début d'année, la production atteint un pic en janvier avec 59 851 m³/h, pour ensuite diminuer progressivement vers un minimum de 31 490 m³/h en octobre. Ces variations sont attribuées à des pannes d'équipement, à des problèmes d'exploitation tels que l'entartrage et le percement, ainsi qu'au colmatage des grilles [16]. Par rapport aux valeurs prévues par la conception, la production mensuelle moyenne est bien inférieure aux 226 500 m³/h prévus. Ces écarts indiquent des problèmes potentiels dans le fonctionnement des dessaleurs et dans le processus de production d'eau dessalée. Il est donc essentiel d'étudier ces variations afin d'identifier les problèmes techniques ou opérationnels réels qui entravent les performances des dessaleurs, et d'améliorer de cette manière la capacité de production d'eau dessalée du complexe GL2/Z.

IV.4. SITUATION ACTUELLE DES DESSALEURS COMPAREE AU DESIGN

Les paramètres de fonctionnement des systèmes de dessalement en service ont été étudiés, en particulier les unités 2010 L B/D/E à partir de mars 2024 pour les comparer à leur conception, afin d'identifier les principaux facteurs responsables des dysfonctionnements observés.

IV.4.1. Paramètres de fonctionnement des cinq dessaleurs de type MSF

Le tableau ci-dessous regroupe les paramètres de fonctionnement des cinq dessaleurs de type MSF (Multi-Stage Flash) à savoir ; la pression différentielle des filtres, les pressions d'aspiration et de refoulement des pompes booster, ainsi que les débits d'eau de mer et d'eau dessalée.

DE DESSALEMENT

Tableau IV.2. Paramètres de fonctionnement des cinq dessaleurs de type MSF pour Mars 2024

Paramètres	Dessaleurs					Design
	2010 LA	2010 LB	2010 LC	2010 LD	2010 LE	
Pression différentielle filtre 2011 L entrée EDM (mbar)	Sous travaux	80.4	Sous travaux	43.9	112	280-500
Pression d'aspiration de la pompe booster (EDM) 2010 L J1 (bar)	Sous travaux	1.2	Sous travaux	1.7	1.9	1,379 à 2,21 bar
Pression de refoulement 2010 L J1 (bar)	Sous travaux	5.9	Sous travaux	5	6.3	4,7 bar
Débit eau de mer en m³/h	Sous travaux	342.4	Sous travaux	318.3	355.6	515 m ³ /h
Débit eau dessalée en m³/h	Sous travaux	29	Sous travaux	24	22	45.3 m ³ /h
Temps de fonctionnement (Jours) après le dernier lessivage	Sous travaux (1252 Jours)	1355 Jours	Sous travaux (2638 Jours)	389 Jours	1585 Jours	Lessivage après 06 mois (180 Jours) de fonctionnement

D'après le tableau, en mars 2024, les dessaleurs MSF ont montré plusieurs écarts importants par rapport aux spécifications de conception. Les pressions différentielles mesurées étaient nettement inférieures à la plage recommandée (280-500 mbar), indiquant une possible sous-utilisation des filtres ou des conditions de fonctionnement anormales nécessitant une vérification.

Les débits d'eau de mer et d'eau dessalée étaient également en dessous des niveaux de conception (515 m³/h). Cela est dû probablement en raison de problèmes de filtration ou d'encrassement. De plus, les temps écoulés depuis le dernier lessivage dépassaient largement les recommandations, ce qui pourrait contribuer à des inefficacités dues à l'encrassement et à une performance réduite des dessaleurs [16]. Ces observations soulignent la nécessité d'une attention immédiate pour résoudre ces problèmes et restaurer les performances optimales du système de dessalement.

IV.4.2. Paramètres de fonctionnement des réchauffeurs de saumures des dessaleurs

Le tableau ci-dessous expose les paramètres d'exploitation des réchauffeurs de saumure des dessaleurs MSF. Les données incluent le débit de condensat et les températures d'entrée et de sortie de la vapeur et de l'eau de mer, comparées aux spécifications de conception pour évaluer les performances.

DE DESSALEMENT

Tableau IV.3. Paramètres d'exploitation actuelle des réchauffeurs de saumure des dessaleurs MSF pour Mars 2024

Paramètres	Réchauffeurs de saumure					
	2010LCA	2010LCB	2010LCC	2010LCD	2010LCE	Design
Débit condensât (m³/h)	Sous travaux	5.8	Sous travaux	8	12	9.8
Température entrée vapeur 4.5 bars dans le réchauffeur de saumure en °C	Sous travaux	176	Sous travaux	156	145	100
Température sortie condensât en °C	Sous travaux	118	Sous travaux	115	100	100
Température entrée eau de mer du réchauffeur de saumure en °C	Sous travaux	52	Sous travaux	55	60	78
Température sortie eau de mer du réchauffeur de saumure en °C	Sous travaux	77	Sous travaux	77	76	90

Conformément au tableau, les réchauffeurs de saumure présentent des écarts notables par rapport aux paramètres de conception dans plusieurs aspects clés.

Les débits de condensat varient entre 5,8 et 12 m³/h, contre une valeur recommandée de 9,8 m³/h, indiquant une variation par rapport aux prévisions initiales. Les températures d'entrée de vapeur oscillent entre 145 °C et 176 °C, bien au-dessus de la valeur recommandée de 100 °C, ce qui nécessite une vigilance accrue pour éviter toute surchauffe potentielle.

DE DESSALEMENT

Bien que les températures de sortie du condensat soient principalement autour de 100 °C, un réchauffeur affiche 115 °C, nécessitant des ajustements pour maintenir une température optimale. Les températures d'entrée d'eau de mer sont également inférieures à la norme recommandée de 78 °C, signalant des possibles inefficacités dans le processus de chauffage [16]. Enfin, bien que les températures de sortie d'eau de mer soient généralement conformes, une unité montre une température de 90 °C, nécessitant une cohérence dans les ajustements. Ces différences soulignent la nécessité d'identifier les causes sous-jacentes et de mettre en œuvre des mesures correctives afin d'optimiser les performances des réchauffeurs de saumure.

IV.5. TRAITEMENT DES EAUX DESSALEES DANS LE COMPLEXE GNL2 /Z

IV.5.1. 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. Pour analyser le pH, il est essentiel de laisser le pH-mètre chauffer et atteindre l'équilibre électrique, puis de le calibrer avec des solutions tampons et d'utiliser un échantillon à température ambiante, en plaçant l'électrode dans le bécher et en attendant que la valeur se stabilise avant de lire le résultat [17].

Les mesures du PH de l'eau dessalée du mois Mars 2024 sont démontrées sur les graphes de la figure IV.2 et celles extraites des dessaleurs entre le 1^{er} Mars 2023 et le 31 Mars 2024 sont rassemblées dans le tableau IV.4.

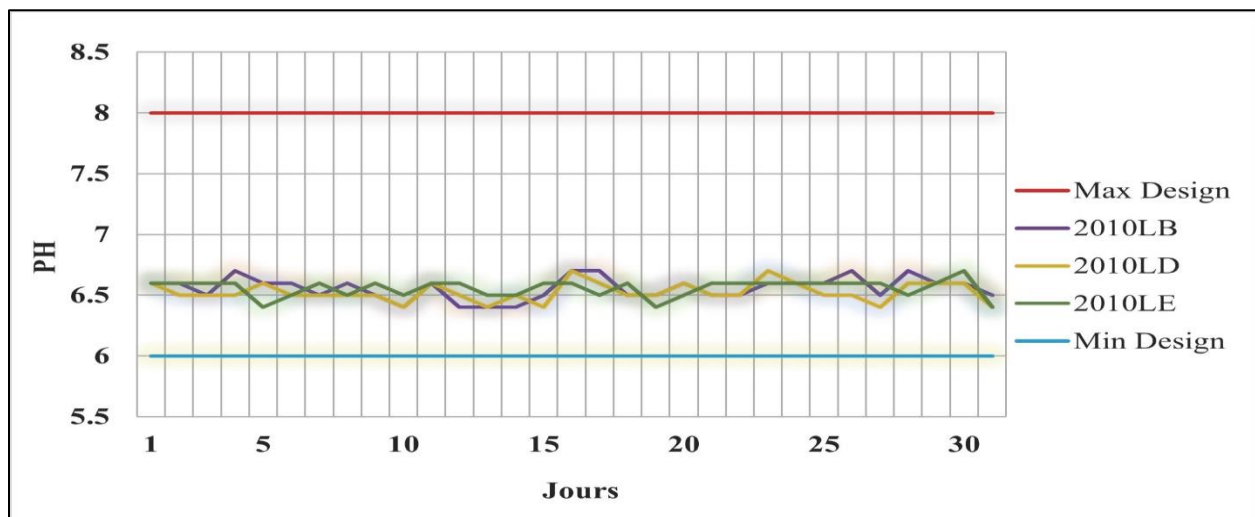


Figure IV.2. Mesure du PH de l'eau dessalée du mois de mars 2024

DE DESSALEMENT

Tableau IV.4. Résultats des mesures du PH de l'eau dessalée du 1er Mars 2023 au 31 Mars 2024

	Dessaleurs		
	2010LB	2010LD	2010LE
Jours	PH		
1	6.6	6.6	6.6
2	6.6	6.5	6.6
3	6.5	6.5	6.6
4	6.7	6.5	6.6
5	6.6	6.6	6.4
6	6.6	6.5	6.5
7	6.5	6.5	6.6
8	6.6	6.5	6.5
9	6.5	6.5	6.6
10	6.4	6.4	6.5
11	6.6	6.6	6.6
12	6.4	6.5	6.6
13	6.4	6.4	6.5
14	6.4	6.5	6.5
15	6.5	6.4	6.6
16	6.7	6.7	6.6
17	6.7	6.6	6.5
18	6.5	6.5	6.6
19	6.5	6.5	6.4
20	6.6	6.6	6.5
21	6.5	6.5	6.6
22	6.5	6.5	6.6
23	6.6	6.7	6.6
24	6.6	6.6	6.6
25	6.6	6.5	6.6
26	6.7	6.5	6.6
27	6.5	6.4	6.6
28	6.7	6.6	6.5
29	6.6	6.6	6.6
30	6.6	6.6	6.7
31	6.5	6.4	6.4
Design	6-8		

Nos récentes observations ont concerné le pH de l'eau dessalée produite par les dessaleurs 2010LB, 2010LD et 2010LE au cours du mois de mars dernier et ont permis de mettre en

évidence des variations légères mais régulières du pH au cours de cette période. Malgré ces écarts, les valeurs globales de pH se maintiennent dans des limites compatibles, ce qui confirme que la qualité du produit dessalé est conforme aux normes en vigueur [18]. La stabilité des résultats reflète également la fiabilité des installations de dessalement témoignant ainsi leur efficacité opérationnelle. En somme, ces résultats rassurants mettent en évidence la cohérence et la conformité aux normes du processus de dessalement, ce qui est essentiel pour garantir la qualité de cette production d'eau dessalée.

IV.5.2. Mesure de la conductivité

La conductivité électrique désigne la capacité d'un matériau ou d'une solution à assurer le mouvement des charges électriques, évaluée en $S.m^{-1}$ (siemens par mètre). Cette mesure est en effet réalisée à l'aide d'un conductimètre, utilisé comme analyseur des électrolytes dissous dans l'eau des chaudières, des dessaleurs et des systèmes de refroidissement. Par ailleurs, la conductivité varie en fonction de la concentration en sels ioniques dissous et de la température, et est généralement évaluée à 25°C, avec un seuil maximal de 8 $\mu S/cm$ [17].

La présente démarche vise à évaluer la qualité de l'eau en mesurant la conductivité électrique d'échantillons prélevés à la sortie de chaque dessaleur, pendant une période de 30 jours, avec l'assistance du service des laboratoires.

La procédure consiste notamment à mettre le système en marche, à rincer la sonde avec de l'eau distillée, puis à insérer la sonde dans le récipient d'échantillonnage et à examiner les données de conductivité affichées sur le cadran du conductimètre.

Les mesures de la conductivité de l'eau dessalée du mois Mars 2024 sont démontrées sur les graphes de la figure IV.3 et celles extraites des dessaleurs entre le 1^{er} Mars 2023 et le 31 Mars 2024 sont rassemblées dans le tableau IV.5.

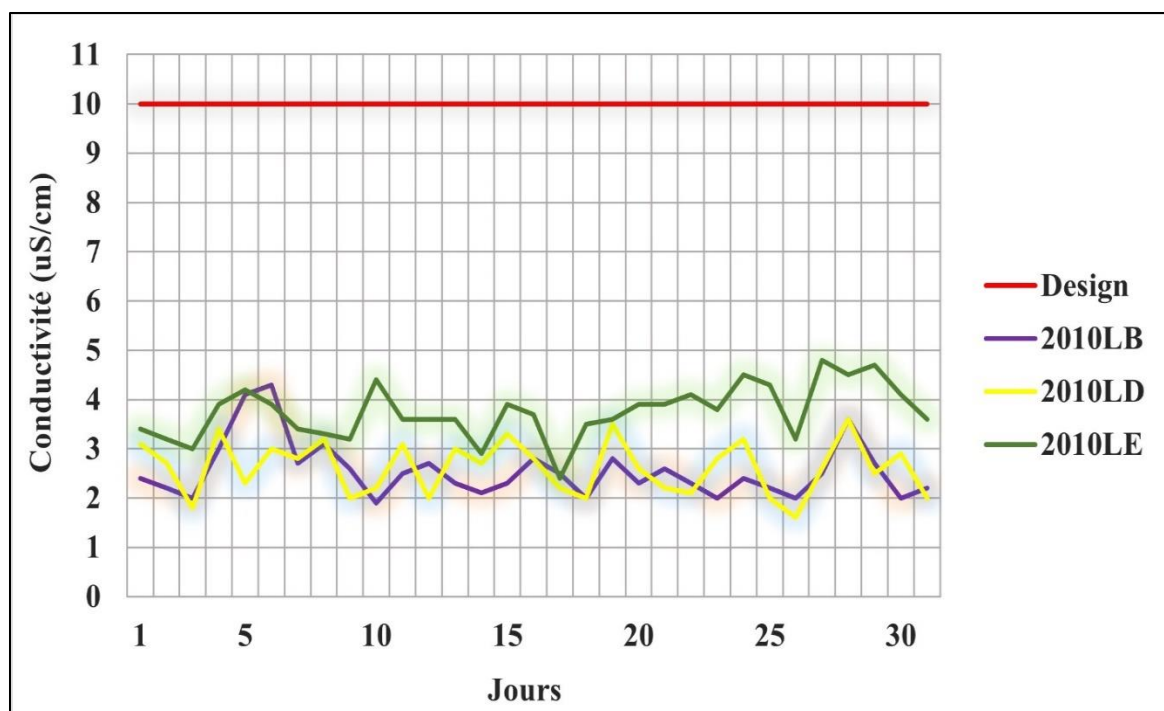


Figure IV.3. Mesure de conductivité de l'eau dessalée du mois de mars 2024

DE DESSALEMENT

Tableau IV.5. Résultats des mesures de conductivité de l'eau dessalée du 1^{er} Mars 2024
au 31 Mars 2024

	Dessaleurs		
	2010LB	2010LD	2010LE
Jours	σ ($\mu\text{S/cm}$)		
1	2.4	3.1	3.4
2	2.2	2.7	3.2
3	2	1.8	3
4	3	3.4	3.9
5	4.1	2.3	4.2
6	4.3	3	3.9
7	2.7	2.8	3.4
8	3.1	3.2	3.3
9	2.6	2	3.2
10	1.9	2.2	4.4
11	2.5	3.1	3.6
12	2.7	2	3.6
13	2.3	3	3.6
14	2.1	2.7	2.9
15	2.3	3.3	3.9
16	2.8	2.8	3.7
17	2.5	2.2	2.4
18	2	2	3.5
19	2.8	3.5	3.6
20	2.3	2.6	3.9
21	2.6	2.2	3.9
22	2.3	2.1	4.1
23	2	2.8	3.8
24	2.4	3.2	4.5
25	2.2	2	4.3
26	2	1.6	3.2
27	2.5	2.6	4.8
28	3.6	3.6	4.5
29	2.7	2.5	4.7
30	2	2.9	4.1
31	2.2	2	3.6
Design	<10		

En mars 2024, les mesures de conductivité de l'eau dessalée produite par les dessaleurs 2010LB, 2010LD et 2010LE, ont montré des variations au sein de chaque unité mais globalement stables,

DE DESSALEMENT

confirmant la cohérence du processus de dessalement et le respect des normes de qualité. Cela souligne la fiabilité continue des installations dans le complexe GL2/Z. Ces données témoignent de l'engagement à fournir une eau dessalée de haut niveau, répondant efficacement aux besoins des utilisateurs. L'analyse graphique a révélé que la présence d'ammoniaque et de chlore entraîne une augmentation de la conductivité, indiquant une mauvaise qualité de l'eau. En 2019, une augmentation significative de la conductivité a été constatée sur la figure IV.4, principalement due à des incidents rares tels que des problèmes de tubes de réchauffage, de déplacement ou de saturation des tamis, affectant la qualité en augmentant la teneur en sel de l'eau dessalée et donc de la conductivité. Il est nécessaire de maintenir une vigilance constante pour prévenir de tels problèmes et assurer une production continue d'eau dessalée de haute qualité.

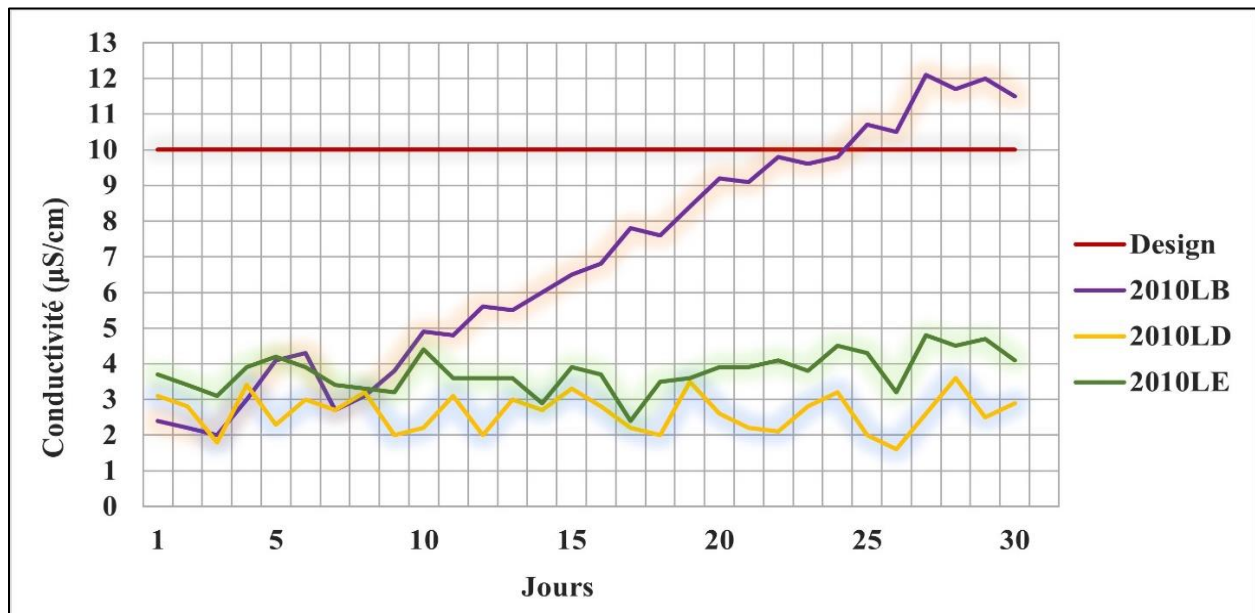
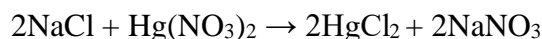


Figure IV.4. Mesure de conductivité de l'eau dessalée du mois de novembre 2019

IV.5.3. Mesure des ions chlorures

La mesure des ions chlorures dans l'eau varie en fonction des régions géologiques, avec les eaux des régions granitiques contenant moins de chlorures que celles des régions sédimentaires. La teneur en chlorures augmente avec le niveau de minéralisation et la conductivité de l'eau. L'évaluation repose sur la fixation des ions chlorure (Cl^-) par les ions mercure (Hg^{2+}) dans le chlorure de mercure (HgCl_2). Selon le design, cette méthode de dosage nous permet de mesurer la quantité de chlorures dans l'eau, qui ne doit pas dépasser 1 ppm. Ce processus implique un titrage avec une solution de nitrate de mercure, où la réaction produit du chlorure de mercure.



Un mode opératoire est suivi, impliquant la collecte d'eau à analyser (100 ml), l'ajout d'acide nitrique HNO_3 (1 ml à 0,1 N) et de diphénylcarbazon (2 à 3 gouttes) pour former une teinte jaune, puis l'ajout progressif de la solution de nitrate de mercure jusqu'à obtention d'une teinte bleu violacé pour mesurer la quantité de solution utilisée ($\text{Hg}(\text{NO}_3)_2$).

Les mesures du chlorure de l'eau dessalée du mois Mars 2024 sont indiquées sur les graphes de la figure IV.5 et celles extraites des dessaleurs entre le 1^{er} Mars 2023 et le 31 Mars 2024 sont rassemblées dans le tableau IV.6.

DE DESSALEMENT

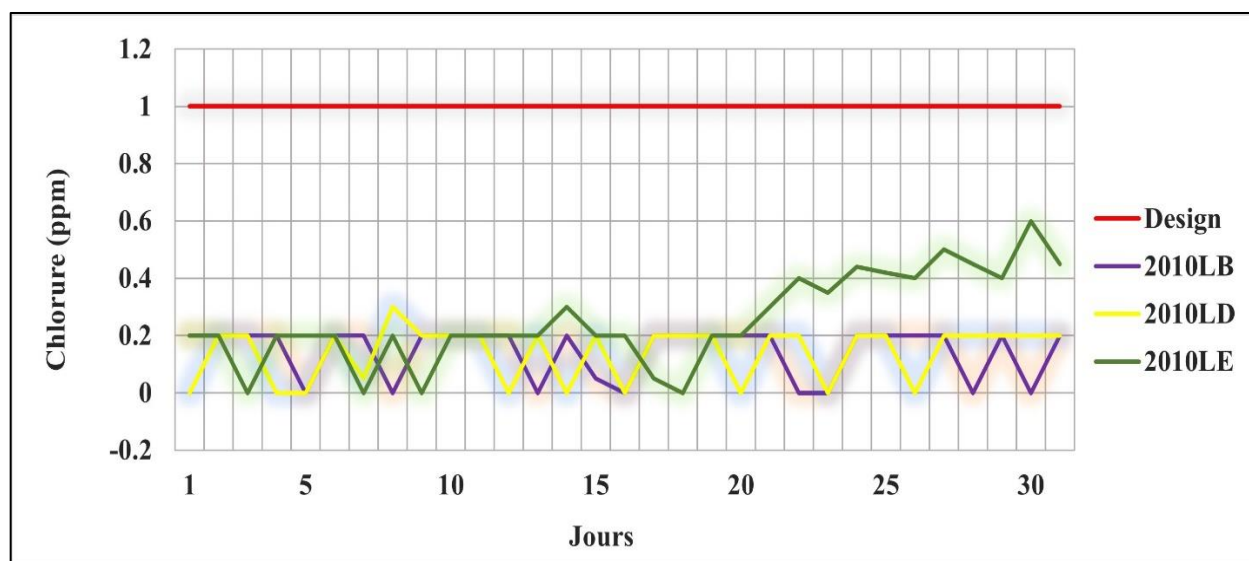


Figure IV.5. Mesure du chlorure de l'eau dessalée du mois de mars 2024

DE DESSALEMENT

Tableau IV.6. Résultats des mesures du chlorure de l'eau dessalée du 1er Mars 2023 au 31 Mars 2024

	Dessaleurs		
	2010LB	2010LD	2010LE
Jours	Chlorure (ppm)		
1	0.2	0	0.2
2	0.2	0.2	0.2
3	0.2	0.2	0
4	0.2	0	0.2
5	0	0	0.2
6	0.2	0.2	0.2
7	0.2	0.05	0
8	0	0.3	0.2
9	0.2	0.2	0
10	0.2	0.2	0.2
11	0.2	0.2	0.2
12	0.2	0	0.2
13	0	0.2	0.2
14	0.2	0	0.3
15	0.05	0.2	0.2
16	0	0	0.2
17	0.2	0.2	0.05
18	0.2	0.2	0
19	0.2	0.2	0.2
20	0.2	0	0.2
21	0.2	0.2	0.3
22	0	0.2	0.4
23	0	0	0.35
24	0.2	0.2	0.44
25	0.2	0.2	0.42
26	0.2	0	0.4
27	0.2	0.2	0.5
28	0	0.2	0.45
29	0.2	0.2	0.4
30	0	0.2	0.6
31	0.2	0.2	0.45
Design	<1		

En mars dernier, les analyses de la concentration en chlorure dans l'eau dessalée produite par les dessaleurs 2010LB, 2010LD et 2010LE ont révélé des variations, mais globalement, les niveaux de chlorure sont restés faibles et en dessous de la limite recommandée de 1 ppm. Cette conformité aux normes établies confirme la sécurité de l'eau dessalée pour une utilisation. La stabilité des valeurs de chlorure indique une cohérence dans ce processus de dessalement, renforçant ainsi la fiabilité des installations. En résumé, nos résultats démontrent une conformité constante aux normes, garantissant la qualité du produit tout au long de la période analysée.

IV.6. ANOMALIES RELEVÉES

Après vérification de l'unité de dessalement dans la zone Utilités du complexe GL2/Z, plusieurs problèmes affectant la production d'eau dessalée ont été identifiés. Ces problèmes sont liés aux paramètres de fonctionnement des dessaleurs et des réchauffeurs de saumure, ainsi qu'au traitement des eaux dessalées dans le complexe. Les facteurs susceptibles à ces contraintes sont décrits ci-dessous :

- **Injection des chlorures** : l'absence de cette opération dans le processus de dessalement de type MSF rend difficile la préservation de la qualité de l'eau.
- **Les dessaleurs multi stage flash (MSF)** : leur problème est l'entartrage des passages d'eau de mer, notamment les tubes des évaporateurs et des réchauffeurs de saumures. ce qui réduit l'efficacité de l'échange thermique durant le processus de dessalement et entraîne une baisse importante de la production d'eau dessalée.
- **Les filtres du circuit eau de mer (dessalement)** : ceux utilisés pour les dessaleurs 2010 L A/B/C/D/E, sont dégradés par la corrosion. et Les moteurs des filtres, qui assurent normalement le décolmatage automatique, sont absents. Ainsi, les dessaleurs sont exposés à un risque d'entartrage lors de leur fonctionnement.
- **Les réchauffeurs de saumures** : Les températures d'entrée/sortie de leur dessaleur LD 2010, comprises entre 55°C et 77°C, sont inférieures aux normes de conception. Dû à l'encrassement des tubes, cela nuit à l'efficacité de chaque boîte de détente de l'évaporateur, réduisant la surface d'échange entre l'eau de mer (EDM) et la vapeur, et entraînant un mauvais échange de chaleur et

DE DESSALEMENT

une production d'eau dessalée partiellement réduite, telle qu'illustrée dans la figure IV.6 montrant l'impact d'une faible température de sortie du réchauffeur de saumure sur la production d'eau dessalée.

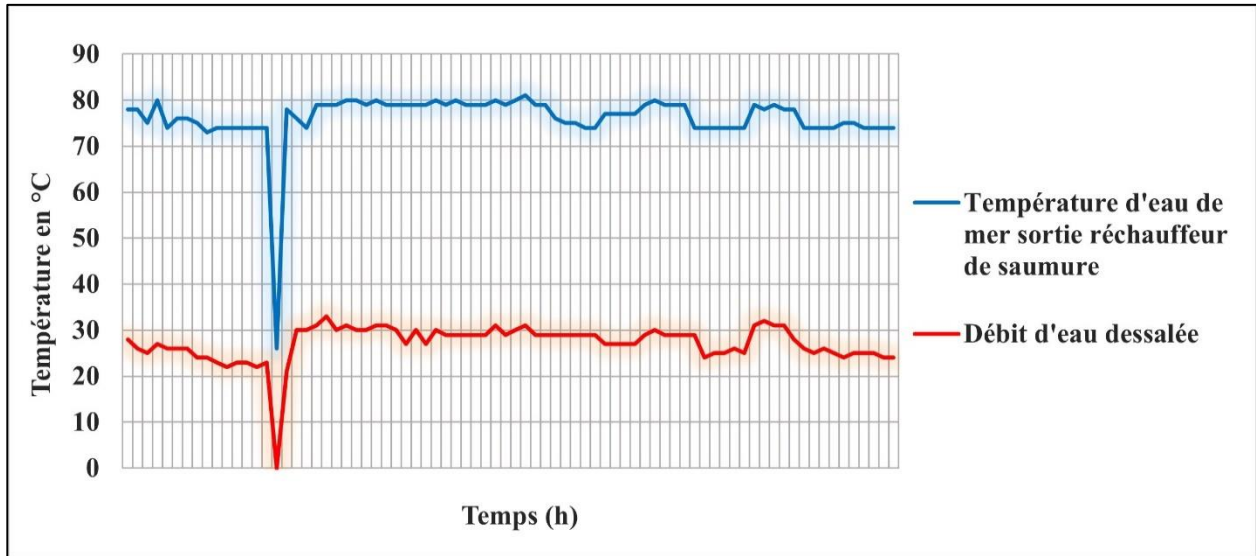


Figure IV.6. Influence de la température de la vapeur sur la température de l'eau de mer sortie du réchauffeur de saumure.

Les données de la figure IV.6 montrent clairement que la température de la vapeur a une influence négative sur la température de l'eau de mer à la sortie du réchauffeur de saumure, et par conséquent sur la production d'eau distillée.

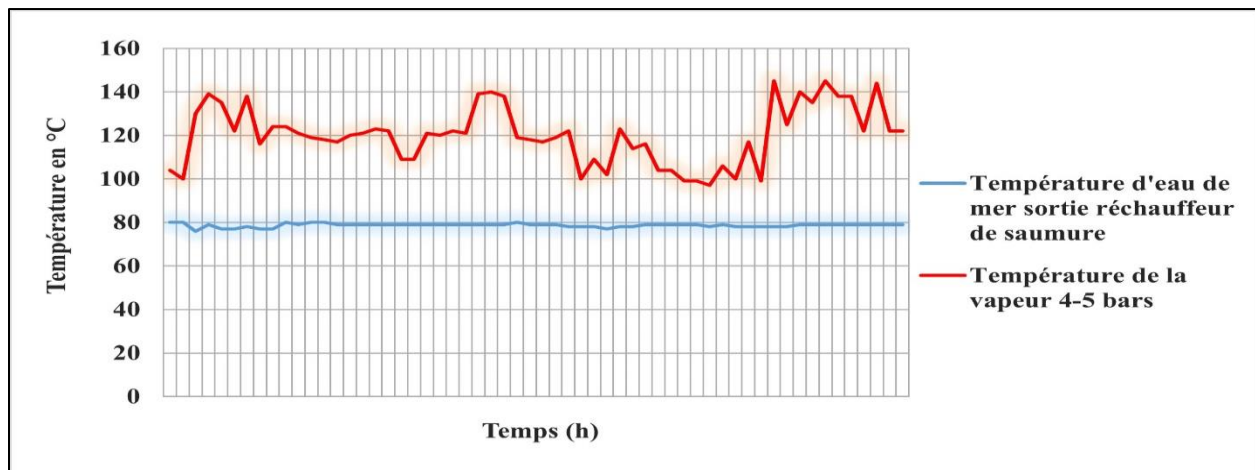


Figure IV.7. Influence de la baisse de la température à la sortie réchauffeur de saumure sur l'eau dessalée produite

DE DESSALEMENT

Selon l'analyse de la Figure IV.7, il est évident que la température de la vapeur a dépassé 140 °C, mais malgré cela, le transfert de chaleur n'a pas été correctement effectué en raison d'un entartrage dans les différentes parois du réchauffeur de saumure.

- **Les produits chimiques :** La baisse de la production d'eau dessalée est due à un dosage incorrect des produits chimiques anti-tartre et anti-mousse, affecté par les dysfonctionnements des pompes doseuses 2010 J/JA A/B/C/D/E. En outre, l'absence de moteurs pour les agitateurs des bacs de préparation des produits chimiques 2010LXF, normalement actionnés par un instrument à air, aggrave cette problématique. Maintenir un débit constant de ces produits chimiques est essentiel pour assurer un fonctionnement conforme aux spécifications du design. Cependant, les pompes d'injection actuelles ne sont pas conformes et leur débit est entravé par des problèmes de bouchage, compromettant ainsi l'efficacité du processus de dessalement.

IV.7. 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.

Selon les résultats obtenus lors de l'analyse de l'eau dessalée produite par les dessaleurs MSF pour le mois de Mars 2024, il est observé que les dessaleurs MSF ainsi que les réchauffeurs de saumure ont révélé des écarts notables par rapport aux normes de conception. Les pressions et les débits d'eau varient, les températures d'entrée de la vapeur sont trop élevées et les températures de l'eau de mer sont inférieures à la norme, probablement dus à des problèmes de filtration ou d'encrassement, ce qui nécessite une vérification immédiate afin de rétablir des performances optimales. Par ailleurs, Les valeurs du pH et de la conductivité de l'eau dessalée produite par les dessaleurs 2010LB, 2010LD et 2010LE restent dans des limites compatibles. Cependant, Les concentrations de chlorure dans le produit sont faibles et en dessous de la limite recommandée de 1 ppm, confirmant la sécurité de l'eau pour une utilisation. Les résultats montrent une conformité constante aux normes, garantissant la qualité du produit tout au long de la période analysée. Alors, il en conclut que le processus MSF utilisé dans le complexe GL2/Z est efficace pour produire de l'eau de qualité supérieure en utilisant l'eau de mer et l'énergie de vapeur pour faire fonctionner les turbines.



CONCLUSION GENERALE



CONCLUSION GENERALE

Le traitement du gaz naturel liquéfié (GNL) au niveau des différentes unités de dessalement du complexe GL2/Z nécessite un approvisionnement continu en eau dessalée. Malheureusement, la production de cette dernière a diminué en raison de problèmes techniques, ce qui affecte la performance des opérations du complexe.

La diminution de la production de l'eau dessalée est attribuée à de nombreux facteurs, tels que l'encrassement des systèmes, la détérioration des matériaux, les variations de la qualité de l'eau de mer et les défaillances techniques.

Dans ce contexte, nous avons cerné notre travail sur l'identification des procédés et des problèmes liés au dessalement de l'eau de mer par MSF du complexe GL2/Z ainsi qu'un plan d'actions pour optimiser la performance de ces unités et évaluer une compréhension exhaustive de cette problématique.

Les mesures menées dans les installations du complexe ont révélé des écarts notables par rapport aux normes de conception des dessaleurs MSF. Ces derniers sont sujettes au phénomène d'entartrage dû à un vide insuffisant, qui a principalement affecté les réchauffeurs de saumure et les condenseurs d'évaporateurs, en raison d'un réchauffement important de l'eau de mer pendant le fonctionnement, entraînant la formation de dépôts de sel.

En outre, il y a des résidus de tartre sur les faisceaux tubulaires en raison du mauvais fonctionnement des systèmes d'injection de produits chimiques dû à l'indisponibilité de plusieurs équipements.

Les filtres autonettoyants des unités de dessalement 2010LA/B/E sont clairement colmatés, ce qui indique que des écarts par rapport aux paramètres de fonctionnement des unités de dessalement ont contribué à la baisse de production, notamment au niveau des réchauffeurs de saumure, qui n'échangent pas correctement la chaleur par suite d'une baisse d'efficacité.

Les débits d'eau et les pressions varient, tandis que les températures d'entrée de vapeur sont excessives et celles de l'eau de mer en deçà de la norme, certainement liées à des problèmes de filtration ou d'encrassement, requérant un contrôle immédiat afin de restituer des performances optimales.

Les valeurs de pH et de conductivité de l'eau dessalée produite par les dessaleurs 2010LB, 2010LD et 2010LE sont compatibles. Néanmoins, les concentrations de chlorure dans le produit restent faibles pour atteindre la quantité recommandée de 1 ppm, ce qui confirme la sécurité d'utilisation de l'eau. La présence d'ammoniac et de chlore entraîne une augmentation de la conductivité, traduisant une mauvaise qualité de l'eau dessalée.

Par ailleurs, afin d'améliorer la qualité de l'eau et préserver les unités de dessalement, il est recommandé de remédier les problèmes identifiés en prenant en considération et/ou de mettre en œuvre les actions suivantes :

- Actualiser les méthodes de traitement de l'eau de mer, par la progression de la chloration et la régénération des grilles fixes et des filtres rotatifs.
- Adopter un prétraitement ultrafiltrant à cartouche fine avec préservation des unités de dessalement et nettoyer le fond du bassin d'eau de mer par dragage.
- Nettoyer chimiquement et automatiquement les dessaleurs mis en service depuis six mois, en vérifiant la présence d'acide et en surveillant attentivement les opérations de lixiviation et de rinçage.
- Contrôler les paramètres de fonctionnement des dessaleurs pour évaluer les résultats et assurer une préparation optimale du mélange de liquéfaction par le renouvellement des produits chimiques et les équipements pour garantir leur bon fonctionnement.
- Vérifier l'état des orifices de passage de l'eau de saumure, les nettoyer si nécessaire et établir un plan de maintenance préventive pour les dessaleurs.
- Lors du prochain arrêt général, vérifier l'état des boues du bassin d'eau de mer et effectuer une opération de dragage du fond.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] Manuel de service formation GL2/Z « Soft tableau Process », 2010.
- [2] Manuel opératoire du Complexe GL2 /Z, 1993.
- [3] BENALI A « Etude comparative de la qualité d'eau produite par le dessaleur de type MSF et le Nouveau dessaleur de type éjecto compression au complexe GL2/Z », 2005/2006.
- [4] DJEBLI S. « Performance des évaporateurs d'eau de mer pour la production d'eau dessalée au Niveau du complexe GL2/Z », mémoire fin d'étude Octobre 2010.
- [5] Manuel opératoire des utilités volume 5.
- [6] ZIANE, « étude de baisse de production de l'eau dessalée au niveau du complexe GL2/Z », projet de fin de formation [IAP]
- [7] <https://culturescience.chimie.ens.fr/thermatiques/chimiephysique/thermodynamique-chimique/le-dessalement>
- [8] R.A. HORNE, « Marine chemistry the structure of water and the chemistry of the hydrosphere », Wiley-Interscience, 1969.
- [9] Mondri, « Étude paramétrique du procédé de dessalement de l'eau de mer>>
- [10] : LARBI Nour El Houda et SAADAOUI Souade, Impact environnemental de la station de Dessalement de l'eau de mer de Son Achter (wilaya de Mostaganem), Mémoire de fin d'études, université Abdelhamid ibn BADIS de Mostaganem, 2019.
- [11] « Contribution à l'étude des problèmes de mal fonctionnement du système de dessalement », université Ahmed Ben Bella, Oran, Mémoire de fin d'études, 2018.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

[12] Benguezella, « Procédé de dessalement de l'eau de mer au niveau du complexe GL2/Z

Par MSF et les problèmes rencontrés”, Mémoire de fin d'études, 2020.

[13] Procédure de lessivage chimique des unités de dessalement du complexe GL2/Z par l'acide sulfamique.

[14] « Contrôle de la qualité de l'eau dessalée et étude des paramètres liés à sa production au niveau du complexe GL2/Z », Mémoire de fin d'études, 2010.

[15] chambre syndicale de la recherche et de la production du pétrole et de gaz naturel –comité des technique, « circuitseau de mer (traitement et matériaux) », édition Technique, pages (50-51), paris -1993.

[16] Ziane Imen, « Étude de la baisse de production d'eau dessalée au niveau du complexe GL2/Z », Mémoire de fin de la période d'induction, 2019.

[17] Rapport d'application « Ph calculé à partir de la conductivité ».

[18] Saker Ikra, Smahi Rym Assila, « Étude de problème de baisse de production d'eau dessalé au niveau du Complexe GL2/Z », Mémoire de fin d'études, université de mostaganem, 2023.