



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 : GENIE DES PROCEDES

Option: GENIE CHIMIQUE

Thème

**Proposition de nouvelles solutions aux problèmes rencontrés lors
du dessalement d'eau par la technique MSF au niveau du
complexe GNL2/Z**

Présenté par

1-SEHIL Halima

2-SELLA Khadidja

Soutenu le 24 /06 / 2024 devant le jury composé de :

Présidente :	CHERID Samira	Pr	Université de Mostaganem
Examinatrice :	BOUCIF Fatima	MCA	Université de Mostaganem
Rapporteure :	BESBES Anissa	MCA	Université de Mostaganem

Année Universitaire 2023/2024

Remerciement

Après avoir rendu grâce à Dieu, le tout puissant et miséricordieux, de nous avoir donné la force et la patience d'accomplir ce modeste travail.

*Nous désirons exprimer toute notre gratitude à nos encadreurs **M^{me} BESBES Anissa** Maitre de conférences « A » à l'université de Mostaganem et **M^{me} SADOUKI Hanane** ingénieure à SONATRACH pour leur soutien et leur disponibilité. Elles nous ont consacré tout leur temps et nous ont bien orienté jusqu'au bout.*

*Ainsi nous remercions les membres du jury **Pr CHERID Samira** et **Dr BOUCIF Fatima**, qui ont bien voulu accepter d'examiner ce travail.*

Nous tenons aussi à exprimer toute notre reconnaissance et nos sincères remerciements à l'ensemble du personnel du département des utilités au sein du complexe GL2/Z qui nous ont accordé très généreusement leur temps et leur assistance ; aussi pour leur aide inestimable et leur gentillesse.

Enfin nos remerciements vont à nos chers parents, familles et à toutes les personnes ayant contribué à la réalisation de ce travail.

إهداء

الحمد لله حبا وشكرا وإمتنانا على البدء والختام

أهدي نجاحي وتخرجي إلي:

-إلى من أحمل إسمه بكل فخر إلى مأمني الوحيد وفرحتي الدائمة أبي (عبد
القادر) أدامك الله لنا

-إلى أبي الثاني (أبي الحاج) الذي لم تغفل عينه يوما عني أطل الله في عمرك
بالصحة والعافية

-إلى جدي الذي لم يفارقني بدعائه ألبسه الله لباس الصحة والعافية والى من كانت دائما في قلبي
جدتي حبيبتي رحمك الله

- إلى من كانت الداعمة الأولى والأبدية أمي (رفيقة) أدام الله رفقتك لي في
دربي

-إلى من يبهجها نجاحي أختي ابنة أمي (حميدة)

-إلى الشموع التي تنير لي الطريق إلى قرة عيني إخوتي (عبد الهادي، عبد
الرحمان، محي الدين ومحمد)

-إلى الذين شجعوني دائما للوصول إلى طموحاتي أعمامي، خالاتي وعماتي
حفظكم الله لي

- إلى من دعمتني بلا حدود وأعطيتني بلا مقابل شريكتي في هذا العمل
وصديقاتي على رأسهن (حياة)

- إلى صاحبة الفضل في أول وأخر خطواتنا إلى من كانت الرائعة في إشرافها
علميا ومعنويا السيدة الفاضلة (بسباس أنيسة)

- ثم أخيرا إلى نفسي غيمة الدراسة التي تحمل غيث النجاح

SEHIL HALIMA

Dédicace

Empreinte de respect et de reconnaissance, je dédie ma remise de diplôme.

À mes chers parents

Source éternelle de mon amour et de ma gratitude. Leurs sacrifices inestimables pour mon éducation et mon bien-être sont gravés dans mon cœur avec une profonde reconnaissance.

Je vous remercie infiniment pour votre soutien indéfectible et l'amour inconditionnel dont vous m'avez comblé depuis mon enfance.

Que vos bénédictions accompagnent toujours mes pas, que ce modeste travail soit l'accomplissement de vos vœux les plus chers et le fruit de vos innombrables sacrifices.

Que Dieu vous accorde santé, bonheur et une longue vie.

À mon merveilleux frère Djilali

Chaque mot d'encouragement a nourri mes rêves.

À travers ce travail, je célèbre notre lien indéfectible. Merci d'avoir été mon ange gardien. Cette réussite est aussi la vôtre.

À mes chères sœurs

Pour leur soutien moral et leurs précieux conseils tout au long de mes études.

À ma chère cousine et à mon binôme bien-aimé

Pour leur compréhension et leur sympathie.

À toute ma famille, à tous mes amis, à tous ceux que j'aime et ceux qui m'aiment, je vous adresse ma plus profonde reconnaissance et mes vœux de bonheur et de prospérité.

Sella Khadidja.

ملخص

مجمع GL2/Z مسؤول عن إنتاج وتصدير الغاز الطبيعي المسال (GNL) من الغاز الطبيعي المستخرج من حقل حاسي الرمل. تُعد مجمعات الغاز الطبيعي المسال مستهلكين كبار للبخار، حيث يُستخدم كوسيلة لتوليد الطاقة الحرارية وكقوة محركة للآلات الدوارة. يضم مجمع GL2/Z ست وحدات لتحلية مياه البحر، بما في ذلك ثلاث وحدات (البنود LA/B/C/E/D2010). من بين التقنيات المختلفة للتحلية، اعتمد مجمع GL2/Z تقنية التقطير الومضي متعدد المراحل (MSF) نظرًا لفوائدها التي تشمل: إنتاج مياه عالية الجودة، قدرة إنتاجية كبيرة، موثوقية واستقلالية عن مصدر الطاقة. ومع ذلك، على مر الوقت، انخفض معدل إنتاج المياه المحلاة بسبب مشكلات متنوعة مثل الانسداد، الترسبات الكلسية، التآكل، والنمو البيولوجي. ولكل مشكلة، تم تحديد وتنفيذ الحلول المناسبة.

Résumé

Le complexe GL2/Z est responsable de la production et de l'exportation de gaz naturel liquéfié (GNL) à partir du gaz naturel provenant du champ de Hassi R'Mel. Les complexes de GNL sont de grands consommateurs de vapeur, utilisée à la fois comme source d'énergie de chauffage et comme force motrice pour les machines tournantes. Le complexe GL2/Z dispose de six unités de dessalement d'eau de mer, dont trois (items 2010LA/B/C/E/D). Parmi les différentes techniques de dessalement, le complexe GL2/Z a adopté la technique MSF (Multi-Stage Flash distillation), en raison de ses avantages : production d'eau de haute qualité, grande capacité de production, fiabilité et indépendance de la source d'énergie.

Cependant, au fil du temps, le taux de production de dessalement de l'eau a diminué en raison de divers problèmes tels que le colmatage, l'entartrage, la corrosion et le développement biologique. Pour chaque problème, des solutions appropriées ont été identifiées et mises en œuvre.

Summary

The GL2/Z complex is responsible for the production and export of liquefied natural gas (LNG) from natural gas extracted from the Hassi R'Mel field. LNG complexes are significant consumers of steam, which is used both as a source of heating energy and as the driving force for rotating machinery. The GL2/Z complex has six seawater desalination units, including three (items 2010LA/B/C/E/D). Among various desalination techniques, the GL2/Z complex has adopted the Multi-Stage Flash (MSF) distillation technique due to its advantages: high-quality water production, large production capacity, reliability, and independence from the energy source.

However, over time, the rate of desalinated water production has decreased due to various issues such as fouling, scaling, corrosion, and biological growth. For each problem, appropriate solutions have been identified and implemented.

SOMMAIRE

Remerciements	I
Dédicaces.....	II
Résumé.....	III
Sommaire.....	IV
Liste des figures.....	V
Liste des tableaux.....	VI
Introduction générale.....	01

CHAPITRE I PRESENTATION DU COMPLEXE DE LIQUEFACTION DE GAZ NATUREL

I-1 Introduction	02
I-2 Gaz naturel.....	02
I-2-1 Définition	02
I-2-2 Composition de gaz naturel.....	02
I-2-3 Propriétés physicochimiques de gaz naturel.....	03
I-3 Présentation du complexe GL₂/Z.....	04
I-4 Organigramme Générale du complexe GL₂/Z.....	05
I-5 Description générale de l'activité du complexe GL₂/Z.....	06
I-5-1 Capacité de production.....	07
I-5-2 Composition du complexe GNL ₂ /Z.....	07

CHAPITRE II LES TECHNIQUES DE DESSALEMENT

II-1 Introduction	15
II-2 Eaux de mer.....	15
II-2-1 Composition des eaux de mer.....	15
II-2-2 Caractéristiques des eaux de mer.....	17
II-3 Dessalement de l'eau de mer.....	20
II-4 Etapes de dessalement de l'eau de mer	20

II-5 Procédés de dessalement.....	21
II-5-1 Procédés membranaires.....	22
II-5-2 Procédés par distillation	23
II-5-3 Autres procédés de dessalement.....	31
II-6 Domaines d’application des eaux dessalées.....	32

**CHAPITRE III ANALYSES DES PARAMETRES PHYSICO-CHIMIQUES
DE L’EAU DESSALEE**

III-1 Introduction	35
III-2 Eau dessalée.....	35
III-2- 1 Traitement physique.....	35
III-2-2 Traitement biochimique.....	35
III -2-3 Analyse des paramètres physico-chimiques.....	35
III-3 Taux de production.....	46
III-4 Les problèmes techniques rencontrés en dessalement d’eau de mer.....	49
III-4-1 Introduction.....	49
III-4 -2 L’entartrage	49
III-4-3 La corrosion.....	52
III-4-4 Le colmatage.....	55
III-4-5 Problème de développement biologique	57
Conclusion générale.....	59
Références bibliographiques.....	61
Annexe.....	64

Listes des figures

Figure	Titre	Page
I-1	Présentation du complexe GL2/Z	4
I-2	Organigramme du complexe GL2/Z	6
I-3	Implantation du complexe GL2 /Z	7
I-4	Zone de procédé	8
I-5	Procédé de décarbonatation et de régénération de MEA riche	10
I-6	Zone des utilités.	13
I-7	Zone de stockage et Installation d'Expédition	14
II-1	Composition des sels minéraux dans l'eau de mer	18
II-2	Schéma d'une station de dessalement	20
II-3	Organigramme des procédés de dessalement	21
II-4	Principe de l'osmose et de l'osmose inverse	22
II-5	Unité d'électrodialyse alimentée en parallèle	23
II-6	Schéma de la distillation à simple effet.	24
II-7	Schéma de principe d'un système de Distillation par détente successives (MSF)	25
II-8	Procédé de dessalement par compression de vapeur	26
II-9	Schéma de l'acheminement d'eau de mer vers les dessaleurs	28
III-1	Conductimètre	36
III-2	Variation de la conductivité électrique des eaux dessalées produites par les unités 2010 LB/D/E du mois de janvier	39
III-3	Variation de la conductivité électrique des eaux dessalées produites par les unités 2010 LB/D/E du mois de février.	39
III-4	pH-mètre	40
III-5	Variation du pH de l'eau dessalée pendant le mois de Janvier	43
III-6	Variation du pH de l'eau dessalée pendant le mois de Février	43
III-7	Appareil de mesure de chlorure	44
III-8	Mesure du chlorure de l'eau dessalée de 4 jours du mois janvier.	45
III-9	Mesure du chlorure de l'eau dessalée du mois février	46
III-10	Entartrage au niveau du réchauffeur	49
III-11	Corrosion des installations	52
III-12	Différents types de corrosion	53
III-13	Colmatage des installations	56

Liste des tableaux

Figure	Titre	Page
I-1	Composition du gaz naturel destiné à la liquéfaction au niveau de l'unité GL1/Z	4
I-2	Propriétés physiques du gaz naturel	3
II-1	Concentration des éléments principaux pour une eau de mer contenant 35g de sels par Kg d'eau de mer	15
II-2	Concentration des différents éléments mineurs en µg/l.	16
II-3	Composition standard de l'eau de mer	17
II-4	Les composants de la dureté de l'eau	19
III-1	Conductivité de l'eau dessalée σ exprimée en (µS/cm) du mois de Janvier	37
III-2	Conductivité de l'eau dessalée σ exprimée en (µS/cm) du mois de Février	38
III-3	pH de l'eau dessalée du mois de Janvier	41
III-4	pH de l'eau dessalée du mois de Février	42
III-5	Résultats de l'analyse des chlorures dans l'eau dessalée en ppm de 4 jours du mois de Janvier	45
III-6	Résultats de l'analyse des chlorures dans l'eau dessalée en ppm de 3 jours du mois Février	45
III-7	La production globale et le taux correspondant aux dessaleurs en eau Dessalée, mois de janvier 2024	47
III-8	La production globale et le taux correspondant aux dessaleurs en eau Dessalée, mois de février 2024	48

Introduction générale

L'eau de mer est une ressource extrêmement abondante et infinie, elle représente 97 % de l'eau sur terre et couvre 73 % de la surface du globe terrestre. En raison de sa forte teneur en sel, qui varie d'un endroit à l'autre, l'eau de mer n'est pas potable et ne peut pas être utilisée ou consommée directement à l'état pur. Pour utiliser cette ressource vitale, que ce soit pour des besoins domestiques, industriels ou agricoles, l'eau de mer doit subir diverses transformations, communément appelées dessalement de l'eau de mer ou distillation.

C'est pourquoi de nombreux pays à travers le monde ont investi considérablement dans la technologie de dessalement de l'eau de mer pour répondre aux besoins croissants en eau, en particulier ceux de l'industrie, qui ne cessent de croître.

Différentes techniques sont utilisées pour le dessalement d'eau de mer : l'osmose inverse, distillation à effet Multiple (MED) ; distillation multi stage flash (MSF)....

L'eau dessalée joue un rôle crucial dans la production de gaz naturel liquéfié (GNL) ; elle est utilisée comme eau d'appoint, pour alimenter les chaudières de procédé et les utilités pour la production de vapeur. Dans le complexe GL2/Z, la technique utilisée pour la production d'eau dessalée est la distillation multi stage flash (MSF) ou flashage à effet Multiple.

À l'heure actuelle, le complexe GL2/Z opère avec un taux de production moyen d'environ 25 % pour les cinq unités de dessalement. Toutes les installations de dessalement du complexe GL2/Z rencontrent un problème de diminution de la production d'eau dessalée, un déclin qui persiste depuis 2010.

L'objectif de ce travail est de dresser un état des lieux de l'exploitation des installations des unités de dessalement du complexe GL2/Z, d'identifier les causes de la baisse de production et proposer un plan d'action visant à optimiser le rendement de ces unités en donnant des solutions adaptées à ces problèmes.

Pour aboutir à notre objectif, notre mémoire comporte trois chapitres :

- Dans **le premier chapitre**, nous présentons le complexe de liquéfaction du gaz naturel (GL2/Z).
- Des généralités sur l'eau dessalée et les différentes techniques de dessalement d'eau sont données au **deuxième chapitre**.
- Dans **le troisième chapitre** sont exposés les résultats d'analyses physico-chimiques de l'eau dessalée ainsi que les différents facteurs influençant la diminution le taux de production et quelques solutions proposées.

Chapitre I

Présentation du complexe de

liquéfaction de gaz naturel

(GL2/Z)

I-1 Introduction

Après la découverte d'énormes réserves de gaz naturel à Hassi R'mel, le pays a procédé aux installations des complexes de liquéfaction du gaz naturel, industrie induite par l'émergence du marché mondial du gaz [1]. L'appareil de production de GNL est composé de trois complexes dénommés par codification : GL1/Z, GL2/Z et GL3/Z. Leur implantation fait partie du pôle industriel pétrochimique et gazier de la région, l'une des plus importantes concentrations industrielles du pays. Comme toute création industrielle d'envergure, le complexe GL2/Z a franchi des étapes qui sont autant d'événements marquants de son histoire.

I-2 Gaz naturel

I-2-1 Définition : Le gaz naturel est un combustible fossile composé principalement de méthane, mais aussi d'autres hydrocarbures tels que l'éthane, le propane, le butane et le pentane. Il se forme naturellement dans les roches poreuses du sous-sol à partir de la décomposition de matière organique ancienne. Ce gaz est généralement extrait du sous-sol à l'aide de forages pétroliers et gaziers, puis transporté par gazoduc ou navires-méthaniers. Connu pour son efficacité énergétique, le gaz naturel est largement utilisé dans divers secteurs tels que la production de chaleur, d'électricité, le chauffage des habitations, le refroidissement, les transports et l'industrie. Il est moins polluant que d'autres énergies fossiles et émet environ un tiers de CO₂ par rapport au pétrole. Le gaz naturel peut être conventionnel ou non conventionnel en fonction de sa facilité d'extraction et des techniques utilisées.

I-2-2 Composition de gaz naturel

Le gaz naturel est un mélange du méthane, de l'éthane, du propane, des isomères du butane et des isomères du pentane. D'autres composés tels que le dioxyde de carbone, l'hélium, le sulfure d'hydrogène et l'azote peuvent également être trouvés. La composition du gaz naturel n'est jamais la même. Cependant, on peut dire que son composant principal est le méthane [2]. Le gaz naturel, dans sa forme commercialisable, est considéré comme un combustible propre. Il contient peu de soufre et il ne produit pratiquement pas le dioxyde de soufre (SO₂). Ses émissions d'oxydes d'azote sont moindres que celles du pétrole ou du charbon, tandis que ses émissions de dioxyde de carbone (CO₂) sont inférieures à celles des autres combustibles fossiles.

Tableau I-1 : Composition de gaz naturel destiné à la liquéfaction au niveau de l'unité GL1/Z [3]

Composant	% Molaire
Hélium	0,19
Azote	5,78
Méthane	82,49
Ethane	07,25
Propane	2,35
Isobutane	0,47
Normal-butane	0,68
Iso-pentane	0 ,15
Normal-pentane	0,19
Hexane	0,23
CO ₂	0,21
H ₂ O	0,01

I-2-3 Propriétés physicochimiques de gaz naturel

I-2-3-1 Propriétés physiques : Elles sont présentées dans le tableau ci- dessous.

Tableau I-2 : Propriétés physiques de gaz naturel [4].

Propriétés	Indications
Odeur et apparence	Incolore et inodore mais contenant un produit odorant (mercaptan pour la détection des fuites)
Masse molaire	16 ,7 g/mol
Densité de vapeur à 15 °C	0,58 (plus léger que l'air =1)
Masse volumique	0,72 g/cm ³
Point de liquéfaction	109 K
Point de solidification	88 K
Solubilité dans l'eau	0,00023 g/mol
Pourcentage de substances volatiles (%)	100 %

I-2-3-2 Propriétés chimiques

- Le gaz naturel est le combustible fossile le moins polluant, La forme gazeuse du gaz naturel, lors de la combustion, libère une importante quantité de chaleur.
- Il est hautement combustible, capable d'enflammer spontanément lors de l'application des étincelles et sans elles à une certaine température.
- Il a toutes les propriétés chimiques de son constituant principal (le méthane).
- Entre dans des réactions de substitution, la pyrolyse et la déshydrogénation.
- Il est comprimé et liquéfié à basse température et des pressions élevées.

I-3 Présentation du complexe GL2/Z

Le complexe industriel de liquéfaction du gaz naturel (GL2/Z) constitue l'une des plus importantes réalisations industrielles de la chaîne de transformation des hydrocarbures, exploitée par la société SONATRACH en Algérie pour la production de gaz naturel liquéfié (GNL). Il est situé au nord de Bethioua à 6 Km de la ville d'Arzew au Nord-Ouest de l'Algérie, au bord de la méditerranée, son emplacement lui permet d'utiliser l'eau de mer comme source d'alimentation pour le refroidissement, la production d'eau distillé et la lutte antiincendie. Le complexe couvre une superficie de 72 hectares et il a été construit par la société américaine PULLMAN KELLOG. Le contrat a été signé avec cette dernière le 09/02/1976, sa réalisation a été commencée en début 1978 pour être opérationnel en début 1981. La première production de GNL a été effectuée le 29/01/1981 et la première expédition était le 20/07/1981.



Figure I-1 : Présentation du complexe GL2/Z

I-4 Organigramme Générale du complexe GL2/Z

Le complexe GL2/Z contient plusieurs départements (**figure I-2**), qui assurent des tâches bien déterminées [5], représentés dans :

- **Département Sécurité** : Il a pour rôle d'intervenir sur les équipements et les installations, faire de la prévention et la sensibilisation auprès du personnel du complexe. Le département de sécurité est lié directement à la direction. Il a comme politique : « qu'aucun travail n'est urgent au point qu'il ne puisse être effectué de la manière la plus sûre possible ».
- **Département Maintenance** : La fonction principale du département de maintenance consiste à mettre en œuvre les moyens humains et matériels pour l'entretien et la répartition de l'appareil de production et de ses annexes.
- **Département finances** : Il a pour objectif d'établir le bilan de chaque fin d'année de gérer et justifier toutes les opérations financières, juridiques, budgétaires, trésoreries et leur comptabilisation.
- **Département travaux neufs** : Il s'occupe de la réalisation des investissements ainsi que la grande maintenance et assure le procurement.
- **Département technique** : Il est relié directement avec la direction, il a pour mission l'étude des projets d'installation des moyens de production.
- **Département production** : Sa mission est la liquéfaction du gaz naturel ainsi que le contrôle de la production du GNL, propane, butane et la gazoline et de leur stockage et chargement.

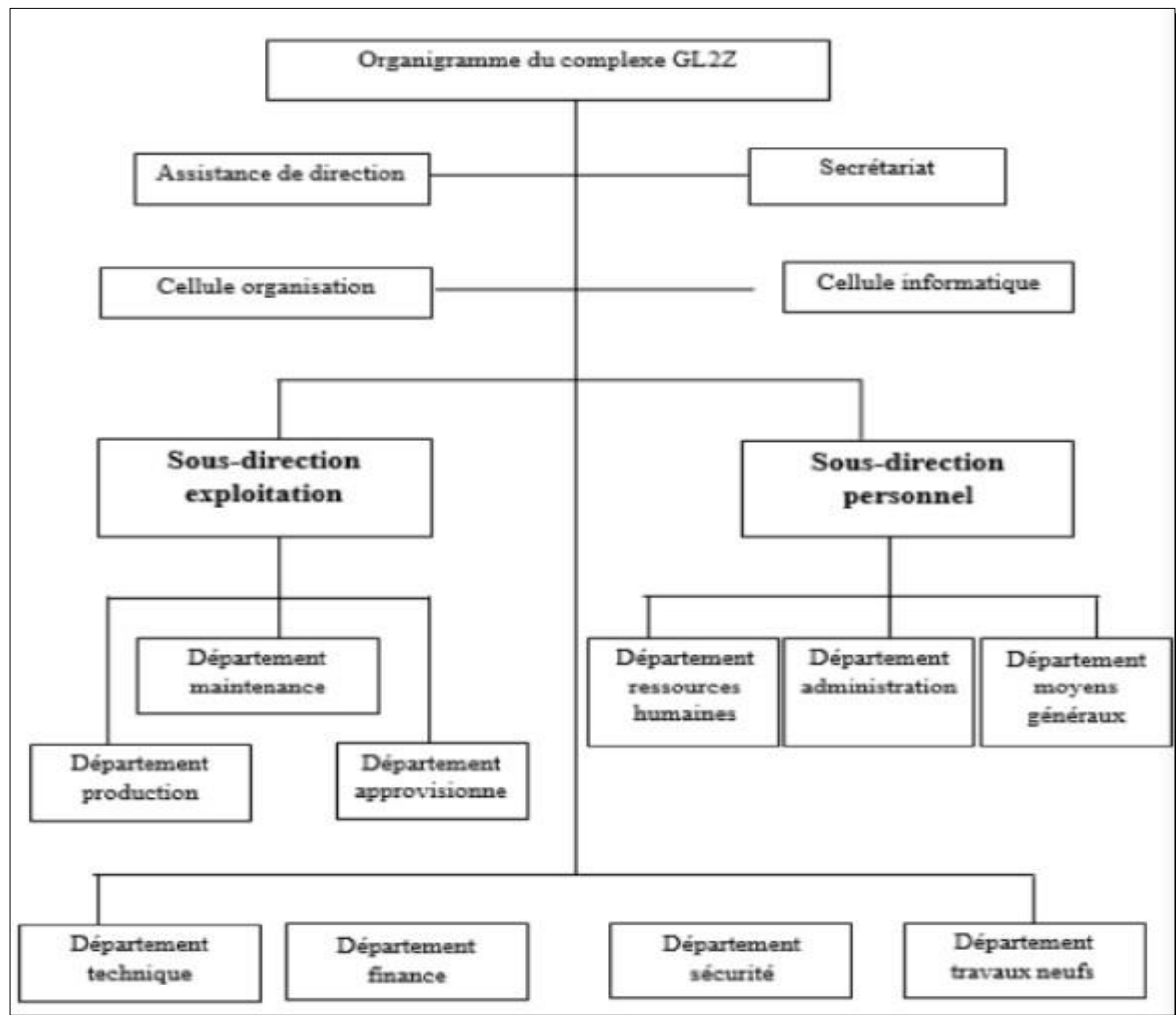


Figure I-2 : Organigramme du complexe GL2/Z.

I-5 Description générale de l'activité du complexe GL2/Z

Le Complexe comprend les installations de réception du gaz naturel produit par les champs gaziers d'Hassi Ramel situant à 550 km au Sud d'Alger. Après traitement dans les trains de liquéfaction, le gaz liquéfié est stocké à la température de -162°C dans trois bacs cryogéniques de 100000 m^3 de capacité unitaire avant d'être exporté. La capacité théorique totale de production du complexe est de l'ordre de 18 millions de m^3 par an de GNL à pendant 335 jours par ans. En parallèle du GNL

- Le propane et le butane destinés à la commercialisation expédiés par pipe vers le complexe GP 1Z
- La gazoline est destinée à l'exportation.
- Le gaz de charge alimentant l'unité HELIOS pour y extraire de l'hélium et de l'azote.

Le complexe GNL2/Z comprend principalement :

- 6 unités de liquéfaction.
- Les utilités.
- Le stockage et chargement de GNL et de gazoline.
- Une salle de contrôle DCS pour le contrôle des installations de l'usine

I-5-1 Capacité de production

Les données suivantes indiquent les capacités de production et de stockage au niveau du complexe :

- **Capacité de production annuelle :**

GNL : 17,8 Millions m³ / an.

Propane : 410 000 Tonnes / an

Butane : 327 000 Tonnes /an.

Gazoline : 196 000 Tonnes /an.

- **Capacité totale de stockage :**

3 bacs aériens de stockage GNL : 100 000 m³ chacun.

2 bacs aériens de stockage de gazoline : 14 000 m³ chacun.

I-5-2 Composition du complexe GNL2/Z

L'usine est composée de trois zones à savoir :

- Zone de procédé
- Zone d'utilités
- Zone de stockage et expédition.



Figure I-3 : Implantation du complexe GL2 /Z.

I-5-2-1 Zone de procédé

Cette zone est composée essentiellement de six (06) trains de liquéfaction identiques. Chaque train dispose de :

- Une section de démercurisation.
- Une section de décarbonatation et de déshydratation du gaz naturel.
- Une section de liquéfaction.
- Une section de fractionnement.



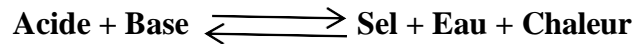
Figure I-4 : Zone de procédé.

La démercurisation

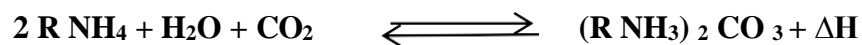
La démercurisation est réalisée par le phénomène d'adsorption moléculaire qui a pour objet d'éliminer le mercure qui provoque la corrosion des échangeurs en aluminium. Un lit de tamis moléculaire recouvert de sulfate de cuivre (CuSO_4) est contenu dans le ballon démercuriseur 142 D. Le diamètre des billes est de 5mm. Ce lit est maintenu par une couche de billes d'alumine (diamètre 20 mm) posée sur une grille métallique. Le gaz traverse le lit de haut en bas. La capacité d'adsorption et la faible quantité de mercure contenue dans le gaz naturel (GN) (moins de $1 \mu\text{g}/\text{Nm}^3$) exigent un temps de fonctionnement relativement long et permettent d'éviter une régénération des tamis du démercuriseur. Il est toutefois, prévu un séchage du tamis par gaz chaud, réalisé par une installation démontable. Celui-ci peut, en effet, se charger d'humidité lors du remplissage ou pendant un arrêt prolongé (maximum de mercure dans le GN $100 \mu\text{g}/\text{Nm}^3$) [6].

✚ La décarbonatation

La décarbonatation a pour objet d'éliminer le dioxyde de carbone ou CO₂ qui cause le bouchage au niveau de la section liquéfaction. Elle est basée sur le phénomène d'absorption (réaction chimique). Dans ce cas, il y a une réaction de neutralisation :



Une solution aqueuse de monoéthanolamine (MEA) entre 15 et 20 % est mise en contact, dans une colonne à plateaux, avec le gaz riche en CO₂. La solution entrant par le haut et le gaz par le bas, le contact se fera à contre-courant. La réaction par laquelle le CO₂ est absorbé par le MEA peut être représentée comme suit :



Avec **R** : C₂H₄OH . Sa température d'amorçage est de 38 °C.

✓ **Régénération de la solution de MEA**

La solution MEA, pauvre en CO₂, sort de l'absorbeur, riche en CO₂, et doit être régénérée pour être utilisée de nouveau . Cette opération s'effectue dans la colonne de régénération « X32E » [7]. Le MEA riche est d'abord détendu dans un ballon « X37F » pour séparer les hydrocarbures, éventuellement dissous, puis chauffé jusqu'à 102°C par échange thermique avec le MEA pauvre (régénéré) successivement dans quatre échangeurs « X33C1/C2/C3/C4 ». Le MEA riche est alors introduit en tête de la colonne de régénération fonctionnant à 110°C et 1 bar en fond de colonne. La solution descend dans la colonne pour y être épurée par les gaz ascendants provenant de l'évaporation du produit de fond grâce à un rebouilleur « X34C » utilisant de la vapeur à 4,5 bars. Les vapeurs de tête de colonne sont condensées dans un échangeur à eau de mer « X35C », puis débarrassées du CO₂ dans le ballon « X33F » et sont réinjectées dans la colonne comme reflux au moyen des pompes de reflux « X32J/JA ».

Le MEA pauvre en CO₂ sort par le fond de colonne, passe dans les échangeurs « X33C1/C2/C3/C4 » puis dans un autre échangeur à eau de mer « X32C », pour être refroidi à 38 °C, et sera refoulé vers la colonne d'absorption au moyen des pompes « X31J/JA » (une partie de cette solution MEA pauvre est filtrée dans un filtre à charbon « X32F » en continu). L'étape de régénération comporte également un vaporisateur « X36C » utilisant de la vapeur à 17 bars, pour épurer en continu des résidus décomposés une partie du MEA, pauvre à la sortie du régénérateur « X32E ». Le circuit MEA comporte également un réservoir « X35F » pour stockage, muni d'une pompe « X33J » pour le refoulement et un puisard « X34F » pour la préparation et les appoints de MEA dans le circuit.

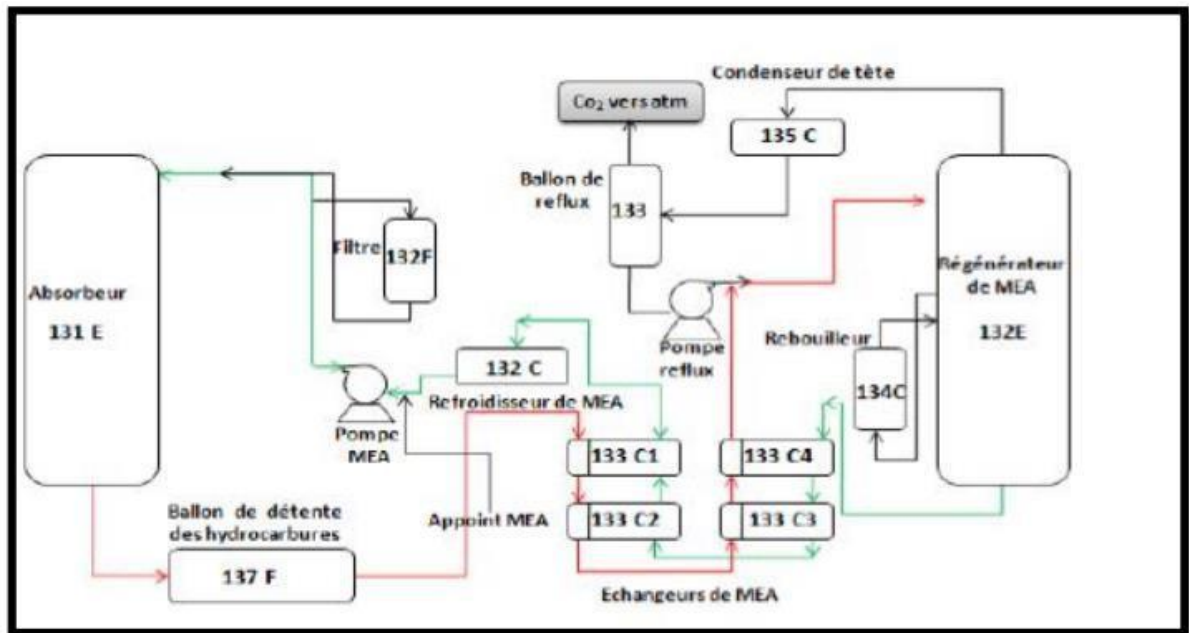


Figure I-5 : Procédé de décarbonatation et de régénération de MEA riche.

✚ La déshydratation

Le GN, à la sortie de la décarbonatation, est saturé en eau. La section sera chargée d'enlever complètement cette eau pour obtenir une concentration inférieure à 0.5 ppm. Cette déshydratation se fera en deux étapes :

- Refroidissement et condensation à 21 °C.
- Séchage par adsorption dans les sécheurs à tamis moléculaire, ce dernier se charge d'une certaine quantité d'eau et de CO₂. Sa régénération se fera simplement par augmentation de la température du lit qui libérera les molécules emprisonnées.

✚ La liquéfaction

La liquéfaction d'un gaz n'est possible que si le gaz est refroidi à une température inférieure à son point de rosée. Cette température est fonction de la pression. Pour un mélange gazeux tel que le gaz naturel, la condensation se fait dans un intervalle de température compris entre le point de rosée et le point de bulle [7]. Le gaz naturel traité, riche en constituants légers à -33 °C et 37 bar absolus, pénètre dans le faisceau central de l'échangeur principal X16C dans lequel il circule de bas en haut. La liquéfaction dans le faisceau central se fait en deux temps : Le gaz est réfrigéré à -110 °C par échange thermique avec le faisceau MCR liquide et vapeur, puis le gaz, partiellement condensé, sera liquéfié complètement par le MCR vapeur condensé. Le gaz naturel liquéfié (GNL), sortant en tête de l'échangeur principal sous forme de liquide à 24,3 bar absolus et -148 °C, passe dans l'échangeur de rejet et se combine à sa sortie avec la réinjection du propane et de l'éthane venant du fractionnement. Ce mélange à -151 °C sera détendu à 4,8 bar par flash dans le ballon de gaz combustible à haute pression. Ce flash a pour effet de libérer l'azote et l'hélium dissous dans la phase liquide du GNL [7]. Ce liquide sera refroidi à -156 °C avant de pénétrer en tête de la colonne du déazoteur X02E par échange avec le liquide de fond. La phase liquide GNL est récupérée au fond du déazoteur et sera acheminée par des pompes X10J/JA vers les bacs de stockage à -162 °C. Les vapeurs de tête passent dans l'échangeur de rejet où elles se réchauffent au contact du MCR du GN, avec des réinjections d'éthane, de propane et du gaz combustible venant de la tête du ballon flash et déchargent dans le circuit fuel gaz [5] (Voir le schéma attaché à l'annexe n°1)

□ Boucle propane :

La boucle de réfrigération au propane est utilisée dans les procédés de liquéfaction du gaz naturel comme pré-refroidissement visant à éliminer la chaleur d'un cycle de réfrigérant multi-composant qui est le MCR, et à pré-refroidir le gaz naturel avant l'étape de la liquéfaction. (Voir le schéma attaché à l'annexe n°2)

□ Boucle du MCR :

Cette boucle permet le refroidissement final du gaz de charge, le MCR (réfrigérant à composants multiples ou mixtes) se compose de quatre constituants :

$$\text{N}_2 = 3.2 \% ; \text{CH}_4 = 40,2 \% ; \text{C}_2\text{H}_6 = 54,4 \% ; \text{C}_3\text{H}_8 = 2.2 \%$$

Dans ce cycle, la réfrigération est assurée par la compression, le refroidissement, la détente et l'évaporation. Le refroidissement à des températures supérieures à 35 °C sera assuré par des refroidisseurs à eau de mer, entre 35 et -35 °C par le propane, entre -35 °C et -150 °C par le

MCR et enfin de -150 à -160 °C par la détente de l'azote (détente de Joules-Thompson) (**Voir le schéma attaché à l'annexe n°3**)

Le fractionnement

Au niveau de cette section, la charge lourde de la tour de lavage sera traitée dans trois colonnes de distillation pour en extraire successivement l'éthane, le propane, le butane et la gazoline.

I-5-2-2 Zone des utilités

Cette zone est essentiellement autonome et assure la fourniture de toutes les utilités, pendant le démarrage et la mise en marche des six trains de liquéfaction, et de toutes les installations de production. Elle consiste principalement à la production et la fourniture de ce qui suit :

- **Énergie électrique** : elle est fournie en grande partie par trois turbo générateurs d'une capacité de 20 MW chacun et un réseau SONELGAZ de 20 MW, soit un total de 80 MW.
- **Vapeur** : Elle est fournie par un ensemble de chaudières de différents tonnages répartis comme suit :
 - ✓ Quatre chaudières HP (62 bars) type ABB d'une capacité de 400 t/h chacune.
 - ✓ Douze chaudières process HP d'une capacité de 120 t/h chacune.
 - ✓ Deux chaudières HP type IHI d'une capacité de 400 t/h chacune.
 - ✓ Une chaudière BP (17,2 bars) d'une capacité de 59 t/h.
- **Eau dessalée** : elle est fournie par cinq unités de dessalement de type détente à plusieurs étages (MSF), produisant chacune 45,3 m³/h de distillat, et dessaleur de type thermo compression distiller (TCD), produisant 60 m³/h de distillat et 12 m³/h de condensat.
- **Air** : il est fourni par quatre compresseurs d'air permettant la production de l'air instrument, servant pour toutes les installations de production et de l'air service pour les autres besoins du complexe.
- **Eau de refroidissement** : elle est fournie par six pompes d'eau de mer d'une capacité de 37.000 m³/h chacune.



Figure I-6 : Zone des utilités.

I-5-2-3 Zone terminale

La zone terminale (stockage et expédition du GNL) est située au bord de la mer.

+ Stockage et chargement du GNL/gazoline

Le GNL est stocké à -162 °C dans trois bacs d'une capacité unitaire de 100.000 m^3 chacun (figure I.6). Le chargement du produit est assuré au niveau de deux quais de chargement pouvant recevoir des méthaniers d'une capacité de 40.000 à 145.000 m^3 GNL. Le stockage de la gazoline produite est assuré par deux bacs de 14.000 m^3 chacun [8].

+ Installations d'expédition et de chargement du GNL

Elles sont composées de :

- 1) Cinq pompes de chargement d'une capacité unitaire de $2500\text{ m}^3/\text{h}$.
- 2) Une pompe de transfert d'une capacité de $2500\text{ m}^3/\text{h}$.
- 3) Deux pompes de refroidissement d'une capacité unitaire de $60\text{ m}^3/\text{h}$.
- 4) Deux quais de chargement composés chacun de cinq bras de chargement dont un est destiné au retour de la vapeur en provenance des navires. Chacun des deux quais est conçu pour réceptionner des méthaniers d'une capacité située entre 50.000 et 130.000 m^3 de GNL.



Figure I-7 : Zone de stockage et Installation d'Expédition.

Chapitre II

Les techniques de dessalement

II-1 Introduction

La terre est recouverte de 72% d'eau, dont seulement 3% d'eau douce. Cette eau est inégalement répartie sur la planète : 10 pays se partagent 60% des réserves d'eau douce alors que 29 pays subissent de nombreuses sécheresses. Du fait de l'accroissement de la population mondiale, la pénurie en eau douce est devenue un problème majeur, en particulier dans les régions arides. Face à cette situation, le dessalement des eaux de mer ou des eaux saumâtres constitue ainsi une des réponses possibles pour s'adapter à cette pénurie croissante des ressources en eau. Le dessalement de l'eau (également appelé dessalage ou désalinisation) est un processus qui permet d'obtenir de l'eau douce à partir d'une eau saumâtre ou salée. Le présent chapitre a pour objet la description de quelques généralités sur les techniques de dessalement.

II-2 Eaux de mer

L'eau de mer ou l'eau salée contient des substances dissoutes et constituée principalement des ions halogénures comme l'ion chlorure et des ions alcalins comme l'ion sodium. L'eau de mer contient 1000 fois plus de sel que la limite fixée par l'OMS pour pouvoir être consommée, c'est-à-dire une teneur maximale de 500 mg/L.

II-2-1 Composition des eaux de mer

II-2-1-1 Eléments principaux

Les constituants primordiaux qui jouent un rôle significatif dans la quantité de sels dissous dans l'eau de mer, sont au nombre de 11 éléments distincts. Leurs concentrations sont données dans le **tableau II.1**

Tableau II-1 : Concentration des éléments principaux pour une eau de mer contenant 35g de sels par Kg d'eau de mer [9].

Anions	Chlorure <i>Cl⁻</i> 18.9799	Sulfate <i>SO₄²⁻</i> 2.6486	Bicarbonate <i>HCO₃⁻</i> 0.1397	Bromure <i>Br⁻</i> 0.0646	Fluorure <i>F⁻</i> 0.0013
Cations	Sodium <i>Na⁺</i> 10.5561	Magnésium <i>Mg⁺⁺</i> 1.2720	Calcium <i>Ca⁺⁺</i> 0.4001	Potassium <i>K⁺</i> 0.3800	Strontium <i>Sr⁺⁺</i> 0.0135

II-2-1-2 Autres éléments minéraux

L'eau de mer contient de nombreux autres éléments à des concentrations beaucoup plus faibles (**tableau II.2**). Ils peuvent se trouver sous différentes formes (dissous, colloïdaux ou en suspension).

Tableau II-2 : Concentration des différents éléments mineurs en µg/l.

Eléments	Concentrations	Eléments	Concentrations
Li	170	CU	3
AL	10	Zn	10
Si	3000	As	3
P	70	Rb	120
Ti	1	Mo	10
V	2	I	60
Mn	2	Ba	30
Fe	10	U	30
Ni	2		

II-2-1-3 Matières organiques

L'eau de mer contient de la matière organique particulaire (MOP) dont les constituants possèdent des tailles variées. Le phytoplancton, les levures, les bactéries et les petits organismes hétérotrophes comme le micro-zooplancton ont des tailles comprises entre 0,45 et 300 µm. La matière organique dissoute (MOD) de l'eau de mer a pour origine l'activité biologique planctonique (production primaire et secondaire), les apports continentaux par les fleuves et l'activité humaine (qui peuvent être importants en zones côtières) et les apports atmosphériques. Ils sont respectivement de 2 à 3 x 10¹⁴ mol de C par an pour les apports continentaux et environ 1,7 x 10¹⁴ mol de C par an pour les apports atmosphériques. La production primaire s'élève à 33 x 10¹⁴ mol de C par an dont 85 % est assuré par le phytoplancton. La concentration en COD est comprise entre 0,5 et 4 mg. L⁻¹ en eau de mer de surface mais peut atteindre 20 mg. L⁻¹ pour les eaux côtières. Pour les océans ouverts, la concentration est souvent voisine de 1 mg. L⁻¹ [10].

II-2-2 Caractéristiques des eaux de mer

Ce qui caractérise une eau de mer ou une eau saumâtre, c'est la salinité, la température et la teneur en matière en suspension (MES). Ces trois paramètres sont déterminants car ils influent sur le fonctionnement de l'unité de dessalement et sa rentabilité [11].

II-2-2-1 Salinité

C'est le caractère essentiel de l'eau de mer, elle est responsable sur la modification de ses propriétés telles que la densité, la compressibilité, le point de congélation, la température du maximum de densité, alors que d'autres comme la viscosité, l'absorption de la lumière ne sont pas influencées de manière significative.

La salinité est la mesure de la concentration des sels dissous (chlorures de sodium et de magnésium, sulfates, carbonates), elle s'exprime le plus souvent en [g/l]. Elle peut être différente d'une mer à une autre. Les salinités les plus basses se rencontrent au voisinage des pôles ou dans les zones de fort apport d'eau douce.

La salinité augmente au fur et à mesure que l'on se rapproche des tropiques. Dans certaines zones telles que l'Arabie Saoudite, elle peut dépasser 45g/l. Ceci est dû aux faits que les eaux sont peu profondes et que la chaleur est excessive, ce qui favorise l'évaporation, citons quelques valeurs moyennes de salinité : Océan Atlantique (**35g/l**), Mer Méditerranée (**38g/l**), Mer Rouge (**40g/l**) et Golfe Persique (**46g/l**). Dans le **tableau II.3**, nous mentionnons la composition moyenne d'une eau de mer de salinité totale de 36, 047g/L.

Tableau II-3 : Composition standard de l'eau de mer (Techniques de l'Ingénieur, 2010)

Cations	Quantité [mg/L]	Anions	Quantité [mg/L]
Sodium	11035	Chlorures	19841
Magnésium	1330	Sulfates	2769
Calcium	418	Bicarbonates	146
Potassium	397	Bromures	68
Strontium	14	Fluorures	1,4

Pour les eaux saumâtres, leurs salinités sont inférieures à celle de l'eau de mer. La plupart des eaux saumâtres contiennent entre 1 et 10 g de sels par litre. Ce sont parfois des eaux de surface

mais le plus souvent des eaux souterraines qui se sont chargées en sels en dissolvant certains sels présents dans les sols qu'elles ont traversés.

II-2-2-2 Sels minéraux

Les principaux constituants de l'eau de mer sont présents en quantité à peu près constante. On dénombre 11 éléments majeurs en solution (sels minéraux dissous) dans de l'eau pure (classés par ordre d'importance) : Le chlorure (Cl^-) ; ion sodium (Na^+) ; sulfate (SO_4^{2-}) ; ion magnésium (Mg^{2+}) ; ion calcium (Ca^{2+}) ; ion potassium (K^+) ; bicarbonate (HCO_3^-) ; bromure (Br^-) ; acide borique ($\text{B}(\text{OH})_3$) ; carbonate (CO_3^{2-}) ; fluorure (F^-). On trouve également sous forme de traces des ions strontium, lithium, rubidium, baryum, uranium, vanadium, des ions fers, du titane, des ions aluminium...

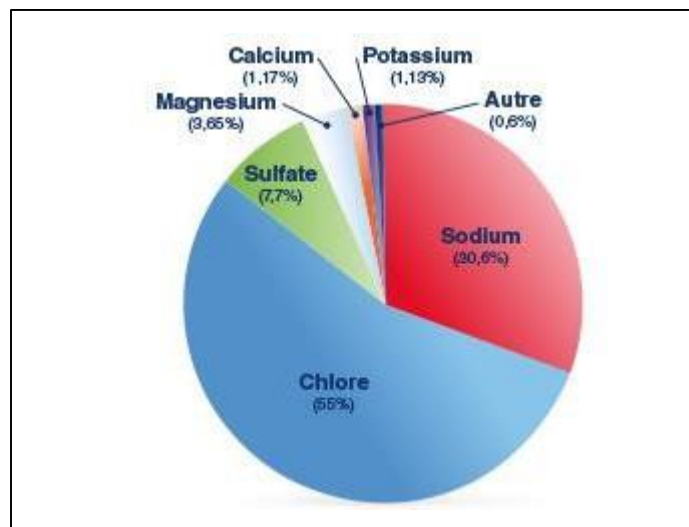


Figure II-1 : Composition des sels minéraux dans l'eau de mer

II-2-2-3 pH

Ce paramètre conditionne un grand nombre d'équilibres physico-chimiques, et dépend de facteurs multiples. Il mesure la concentration des protons H^+ contenus dans l'eau. Il résume la stabilité de l'équilibre établi entre les différentes formes de l'acide carbonique et il est lié au système tampon développé par les carbonates et les bicarbonates [12, 13, 14]. La variation du pH causée par certains rejets industriels ou les apports d'eaux de ruissellement est un indice de pollution [15]. Les valeurs du pH de l'eau de mer est de l'ordre de 8,3 avec des variations entre 7 et 8,4.

II-2-2-4 Masse volumique

La masse volumique de l'eau de mer en surface varie de 1 020 à 1 029 kg/m³, selon la température et la salinité. En profondeur, dans les océans, la haute pression peut augmenter la masse volumique jusqu'à des valeurs de l'ordre de 1 050 kg/m³.

II-2-2-5 Solubilité

On trouve 30 à 40 g de sels dissous pour 1 kg d'eau de mer à 20°C. La solubilité du sel dans l'eau augmente quand la température de la solution augmente.

II-2-2-6 Température

L'eau de mer est, en général, plus ou moins froide suivant la latitude. Chaude à l'Équateur (26°C en surface dans l'océan, plus de 30°C dans les mers intérieures), froide aux pôles (1 à 3°C) en surface. L'océan Indien à latitude égale est plus chaud que l'Atlantique. A la même latitude dans un même océan les températures sont différentes.

II-2-2-7 Dureté

L'eau de mer est l'eau la plus dure avec un TH=750°F. Elle est riche en sels dissous dont les plus importants sont le calcium et le magnésium et composant de sulfate de magnésium, chlorure de magnésium, et sulfate de calcium ...

Tableau II-4 : Les composants de la dureté de l'eau.

Composants	Teneur (g/l)
Chlorure de magnésium	12
Sulfate de magnésium	1.65
Sulfate de calcium	1.26
Carbonate de calcium	0.12
Bromure de magnésium	0.076

II-2-2-8 Matières en suspension

Les matières en suspension, représentent l'ensemble des particules minérales et organiques contenues dans les eaux. Elles sont fonction de la nature des terrains traversés, de la saison, de la pluviométrie, du régime d'écoulement des eaux, de la nature des rejets, etc. Les teneurs élevées en matières en suspension peuvent être considérées comme une forme de pollution [16].

II-3 Dessalement de l'eau de mer

Le dessalement est un procédé destiné à éliminer les minéraux dissous (CaCO_3 , MgSO_4 , NaCl , MgCl_2 etc) dans l'eau de mer ou dans l'eau saumâtre) y compris les matières en suspension. Les procédés qui peuvent être utilisés pour obtenir de l'eau pure à partir d'une eau salée sont nombreux et basés sur différents principes [17]. Le choix du procédé particulier et approprié est basé sur des facteurs dépendants des caractéristiques de l'eau salée à dessaler à savoir sa salinité, sa température et les matières en suspension mais aussi des besoins de la région d'im- plantation de l'unité de dessalement [18-19].

II-4 Etapes de dessalement de l'eau de mer

Quel que soit le procédé de séparation du sel et de l'eau envisagé, toutes les installations de dessalement comportent 4 étapes [20] :

1. Une prise d'eau de mer avec une pompe et une filtration grossière,
2. Un prétraitement avec une filtration plus fine, l'addition de composés biocides et de produits anti-tarte,
3. Le procédé de dessalement lui-même,
4. Le post-traitement avec une éventuelle reminéralisation de l'eau produite.

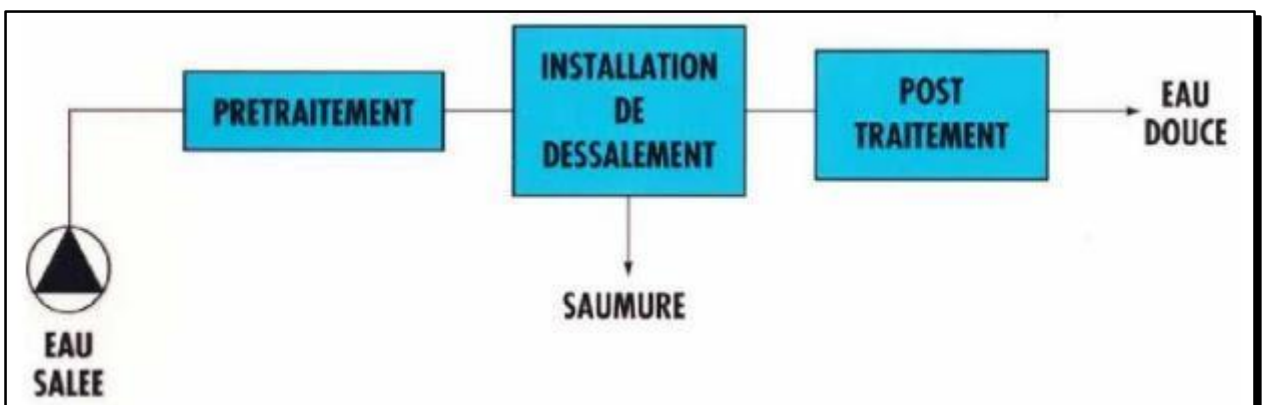


Figure II-2 : Schéma d'une station de dessalement [21].

II-5 Procédés de dessalement

Il a été recensé 27 procédés différents de dessalement. Parmi ces procédés, on cite :

- Les procédés de distillation.
- Les procédés membranaires.
- Autre procédés.

Parmi les procédés précités, la distillation et l'osmose inverse sont des technologies dont les performances ont été prouvées pour le dessalement d'eau de mer. En effet, ces deux procédés sont les plus commercialisés dans le marché mondial du dessalement. Les autres techniques n'ont pas connu un essor important dans le domaine à cause de problèmes liés, généralement à la consommation d'énergie et/ou à l'importance des investissements qu'ils requièrent. On peut classer les méthodes de dessalement de l'eau de mer et des eaux saumâtres comme suit :

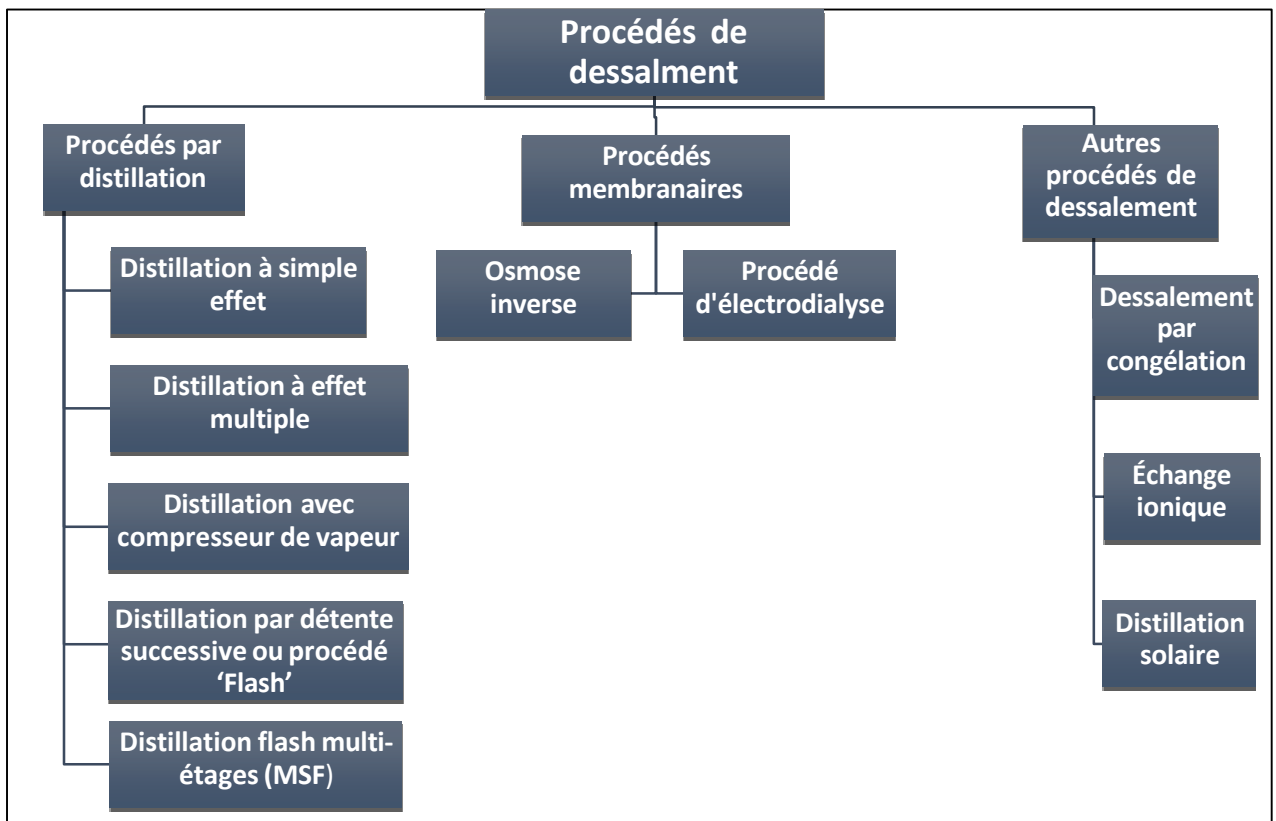


Figure II-3 : Organigramme des procédés de dessalement

II-5-1 Procédés membranaires

Les techniques de séparation par membranes constituent une révolution dans le domaine du traitement de l'eau. Leur principe consiste non plus à éliminer chimiquement les microorganismes mais à les extraire physiquement. Elles n'utilisent aucun réactif chimique, sauf pour leur entretien. Très fiables, elles permettent de produire une eau très pure et de qualité constante [21].

II-5-1-1 Osmose inverse

Les membranes osmotiques sont perméables à l'eau pure, mais elles constituent des barrières infranchissables pour tous les corps dissous à l'état moléculaire ou colloïdal ; c'est pour cela que ces membranes sont dites semi-perméables. Dans ce procédé, un réservoir est séparé en deux compartiments à l'aide d'une membrane semi-perméable, chaque compartiment étant ouvert à l'air libre (**figure II.4**). On remplit d'eau douce dans le premier compartiment, cette eau traverse la membrane, vers la solution salée, et la pression augmente du côté de cette dernière. Ce passage à travers la membrane se poursuit tant qu'existe une différence de concentration. Ce phénomène est appelé « **osmose** » et la force motrice est dite « **pression osmotique** ». Si l'on exerce une pression suffisante pour surmonter la pression osmotique, le passage à travers la membrane s'effectue en sens inverse. Ce phénomène est appelé « **osmose inverse** » [22].

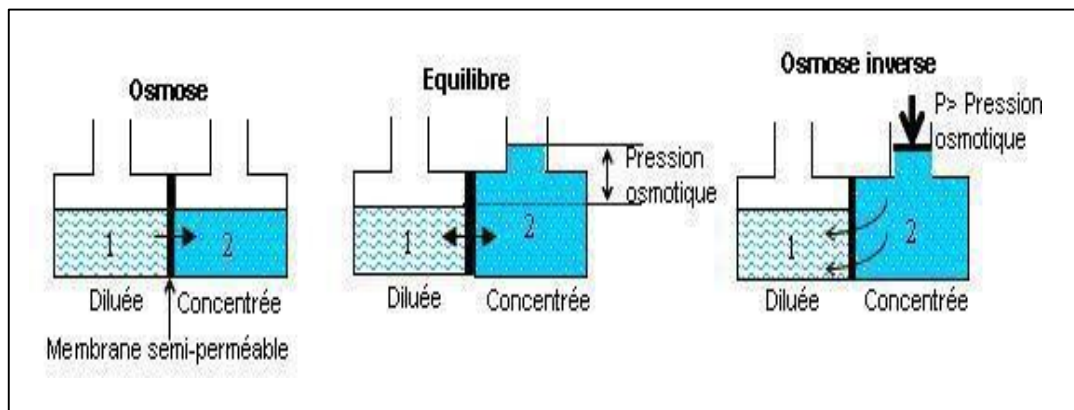


Figure II- 4 : Principe de l'osmose et de l'osmose inverse

II-5-1-2 Procédé d'électrodialyse

L'électrodialyse est une technique électro-membranaire qui permet le transfert des ions à travers des membranes à perméabilité sélective. Le but de l'opération est d'extraire les sels d'une solution, d'où on obtient alors, d'un côté une solution saumure très concentrée et de l'autre une solution dessalée. Sous l'effet d'un courant appliqué dans les bacs externes, les ions Na^+ sont

attirés vers l'électrode négative et les ions Cl^- vers l'électrode positive. En raison de la sélectivité des membranes seuls les ions Na^+ peuvent uniquement traverser les membranes cathodiques et seuls les ions Cl^- peuvent traverser les membranes anioniques, on obtient de l'eau douce dans deux des quatre compartiments.

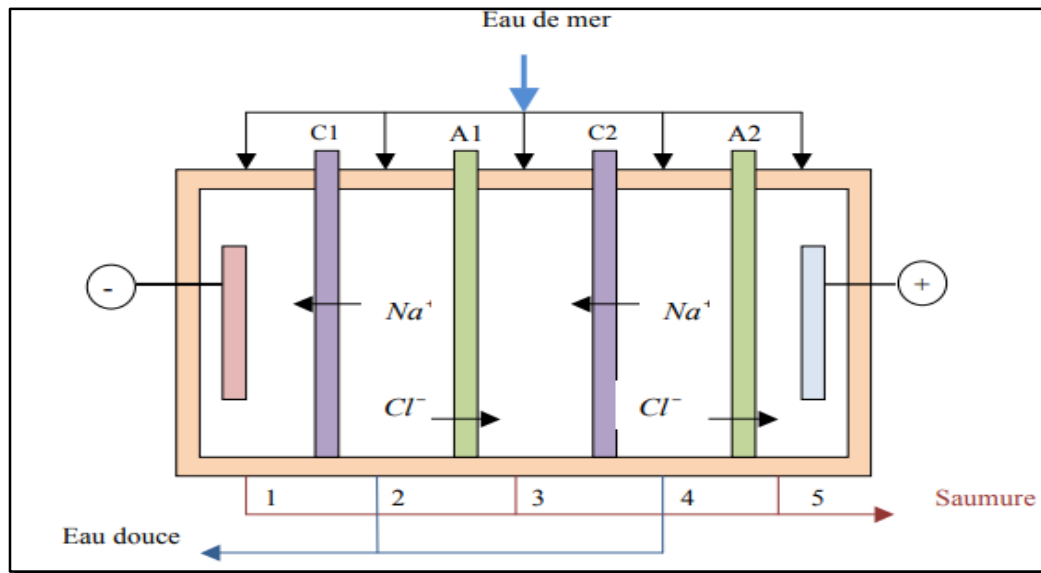


Figure II-5 : Unité d'électrodialyse alimentée en parallèle.

II-5-2 Procédés par distillation

Ces procédés de distillation se basent sur le chauffage de l'eau de mer pour en vaporiser une partie. La vapeur ainsi produite ne contient pas de sels, il suffit alors de la condenser pour obtenir de l'eau douce liquide. C'est le même principe du cycle naturel de l'eau ; l'eau s'évapore naturellement des océans, la vapeur s'accumule dans les nuages puis l'eau douce retombe sur terre par les précipitations. Ce principe de dessalement très simple a été utilisé dès l'antiquité pour produire de très faibles quantités d'eau douce sur les bateaux. L'inconvénient majeur des procédés de distillation est leur consommation énergétique importante liée à la chaleur latente de vaporisation de l'eau. En effet, pour transformer 1 kg d'eau liquide en 1 kg d'eau vapeur à température constante, il faut environ 2250 kilojoules. Afin de réduire la consommation d'énergie des procédés industriels, des procédés multiples effets qui permettent de réutiliser l'énergie libérée lors de la condensation ont été mis au point

II-5-2-1 Distillation à simple effet

C'est un principe qui reproduit le cycle naturel de l'eau. Dans un premier temps, l'eau de mer est portée à ébullition au contact d'un premier serpentin dans lequel circule un fluide

caloporteur. Par le biais d'un second serpentin dans lequel circule de l'eau de mer froide, la vapeur ainsi produite se condense. Les sels dissouts n'étant pas vaporisables dans les mêmes conditions que l'eau, la vapeur ainsi obtenue constitue l'eau pure.

Pour limiter au mieux l'entartrage en n'utilisant qu'un traitement antitartre simple, les constructeurs fixent la température maximale de ce procédé entre 60 et 65 °C. De plus, de telles températures limitent considérablement la corrosion. Par cette méthode, on peut même obtenir une eau condensée très pure (jusqu'à 1 mg/L de sels) à l'aide de dispositifs spéciaux (filtres à gouttelettes) installés au-dessus de la zone de vaporisation.

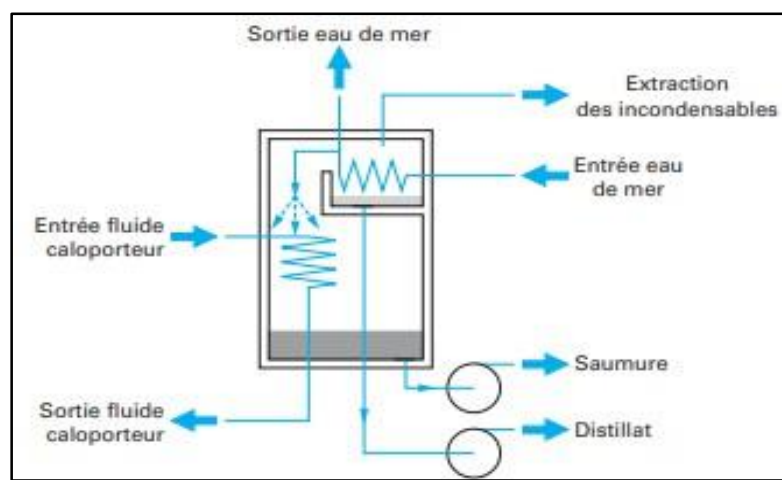


Figure II-6 : Schéma de la distillation à simple effet.

II-5-2-2 Distillation à effet multiple

C'est un dispositif constitué par la juxtaposition de n cellules fonctionnant selon le principe de l'effet simple. Le fluide caloporteur porte à ébullition l'eau de mer admise dans la première cellule, qui est la cellule où règnent la plus haute température et donc la plus haute pression. La vapeur émise par l'ébullition de l'eau de mer est transférée dans la cellule voisine où le condenseur maintient une pression légèrement inférieure. La température d'ébullition diminue avec la pression, on vaporise une fraction de l'eau de mer présente dans cette deuxième cellule : c'est le deuxième effet.

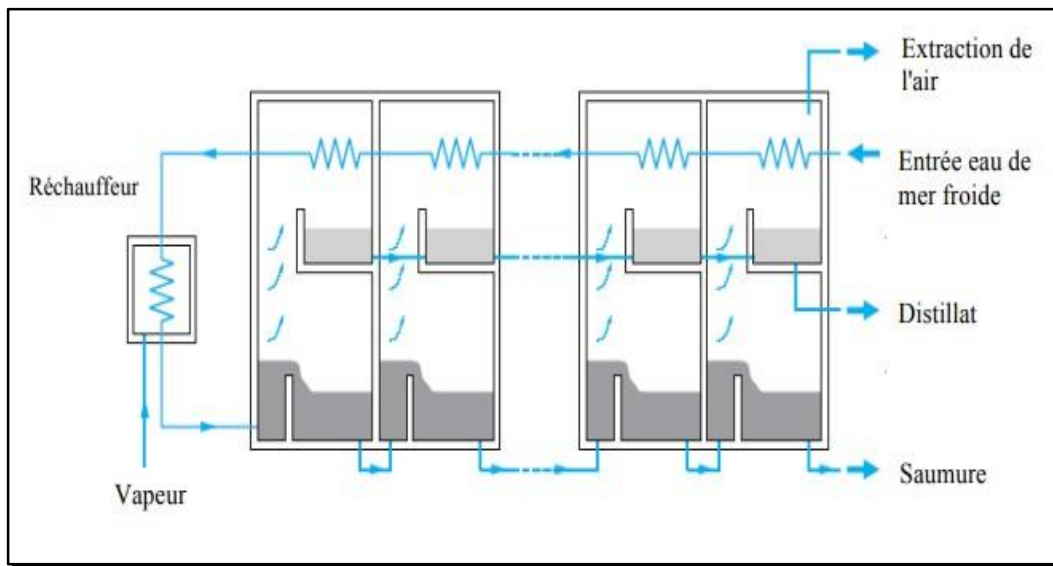


Figure II-7 : Schéma de principe d'un système de Distillation par détente successive (MSF)

II-5-2-3 Distillation avec compresseur de vapeur

Elle consiste à une revalorisation de la vapeur d'eau du dernier effet par compression grâce à un compresseur mécanique ou via un éjecteur, on parle alors de thermocompression qui nécessite une vapeur motrice . Le principe de dessalement d'eau salée par compression de vapeur est celui d'une pompe à chaleur ; où l'eau salée est évaporée après avoir été préchauffée des gouttelettes entraînées par un séparateur. Sa pression ayant été élevée, grâce à la chaleur latente de condensation qui est transférée. Le cycle d'évaporation et de condensation peuvent ainsi fonctionner. La vapeur condensée de l'eau douce est extraite, ainsi que la saumure concentrée contenant du sel. A cause des problèmes de corrosion et d'entartrage des composants, un tel dispositif fonctionne généralement à une température limitée à environ 60°C avec un facteur de concentration égal à deux : 1m³ d'eau salée (35 g/l de sel) donnera 500 litres d'eau douce et 500 litres de saumure à 70 g/l de sel seront rejetés à la mer. Ce dispositif permet de ne consommer qu'une dizaine de kilowattheures électriques [23]. Dans ce procédé la vapeur produite par la cellule la plus froide est comprimée par un éjecteur à vapeur dont plus la pression de la vapeur motrice est élevée, plus l'enthalpie du mélange sortant est importante [24].

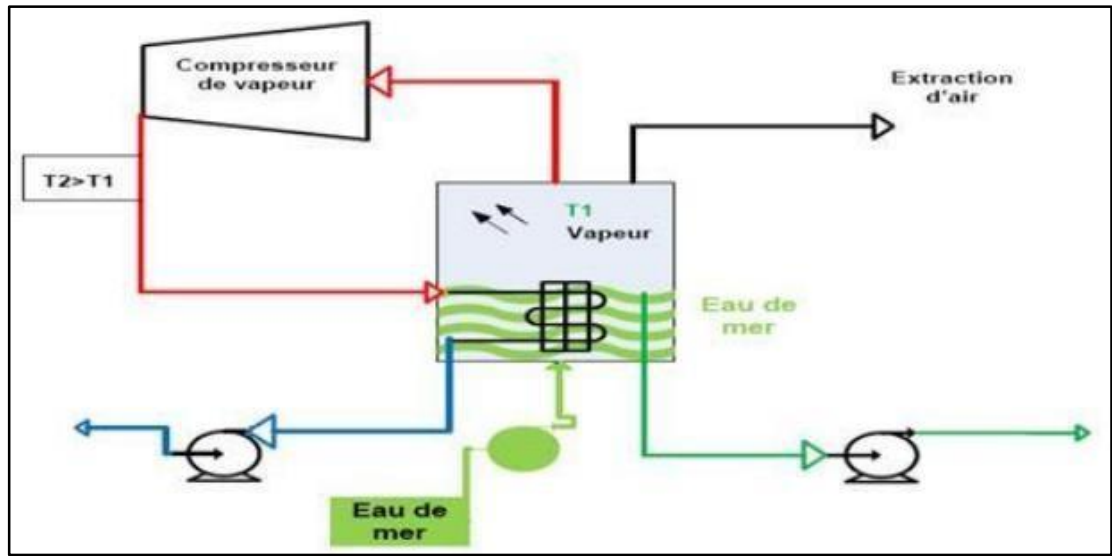


Figure II-8 : Procédé de dessalement par compression de vapeur.

II-5-2-4 Distillation par détente successive ou procédé 'Flash'

Ce procédé dit Flash consiste à maintenir l'eau sous pression pendant toute la durée du chauffage ; lorsqu'elle atteint une température de l'ordre de 120°C, elle est introduite dans une enceinte (ou étage) où règne une pression réduite. Il en résulte une vaporisation instantanée par détente appelée « **Flash** ». Une fraction de l'eau s'évapore puis va se condenser sur les tubes condenseurs placés en haut de l'enceinte, et l'eau liquide est recueillie en dessous des tubes. C'est l'eau de mer chaude qui se refroidit pour fournir la chaleur de vaporisation, l'ébullition s'arrête quand l'eau de mer a atteint la température d'ébullition correspondant à la pression régnant dans l'étage considéré. Le phénomène de flash est reproduit ensuite dans un deuxième étage où règne une pression encore plus faible. La vaporisation de l'eau est ainsi réalisée par détentes successives dans une série d'étages où règnent des pressions de plus en plus réduites. On peut trouver jusqu'à 40 étages successifs dans une unité MSF industrielle.

II-5-2-4-1 Unité de dessalement d'eau de mer

Cette unité a pour fonction la fabrication de l'eau distillée à partir de l'eau de mer qui servira comme source d'énergie et eau de refroidissement pour divers équipements de toutes les unités du complexe dont une partie va servir comme eau d'appoint pour la fabrication de l'eau déminéralisée.

II-5-2-4-2 Unité de dessalement du complexe GL2/Z

Étant les complexes de GNL sont de grands consommateurs de vapeur qui est, à la fois, une source d'énergie de chauffage et la force motrice des machines tournantes, Le complexe GL2/Z

dispose de six unités de dessalement d'eau de mer, dont trois (items 2010LA/B/C) sont de fabrication SASAKURA (japon 1978), et deux autres (items 2010LE/D) de fabrication AQUACHEM (usa 1994) ainsi qu'une sixième unité (item 2010 LF) de fabrication WEIR ENTROPIE installée par le complexe en 2004. Chaque dessaleur a une capacité de production de 45,3 m³ /h d'eau distillée ayant moins de 2 ppm de solides dissous, ces unités peuvent fonctionner séparément ou en parallèle (**voir le schéma attaché à l'annexe n° 4**).

L'eau distillée produite est dirigée vers un bac de stockage (2041 F) et la saumure vers le canal de rejet. Le rôle principal de l'unité de dessalement est de fournir l'eau d'appoint nécessaire à l'alimentation des chaudières (procès et utilités). Les unités GNL/Z et GL2/Z sont interconnectées de façon à pouvoir subvenir aux besoins d'un complexe. L'eau distillée ou dessalée est utilisée essentiellement pour générer de la vapeur ou encore comme réfrigérant dans les échangeurs et les condenseurs situés dans la zone utilités. Il est à signaler que le procédé de distillation des cinq dessaleurs, en l'occurrence les 2010LA/B/C/D/E, est de type détente à plusieurs étages (MSF) à simple effet. La capacité de production de chacune de ces unités est de 45,3 m³/h de distillat, soit une capacité totale de calcul de 226,5 m³/h pour ces cinq unités. Par ailleurs, le dessaleur 2010 LF est de type TCD (Thermo Compression Distiller) évaporation condensation sous vide avec une capacité de production de 60 m³/h de distillat et 12 m³/h de condensât de la vapeur 17 bars.

II-5-2-4-3 Description de l'unité de dessalement de type « MSF »

L'unité de dessalement constituée de 5 évaporateurs produisant l'eau distillée dans des chaudières de GL2 avec une teneur en sel dissous inférieur à 2 ppm, constituée de 8 étages (cellules) allongées dans une configuration à 2 passes chacune à écoulement transversal et sans recyclage. Chaque unité débite 45,3 m³ /h. Les équipements, composant une unité de dessalement, sont les suivants :

- a) Filtre d'eau de mer : 2011 L A, B, C, D, E.
- b) Évaporateur : 2010 LI A, B, C, D, E.
- c) Réchauffeur de saumure : 2010 C A, B, C, D, E.
- d) Éjecteur et condenseur : 2010 J5 A, B, C, D, E.
- e) Pompe de surpression d'eau de mer : 2010 J1 A, B, C, D, E.
- f) Pompe de purge de saumure : 2010 J2 A, B, C, D, E.
- g) Pompe à eau distillée : 2010 J3 A, B, C, D, E.
- h) Pompe à condensât : 2010 J4 A, B, C, D, E.

- i) Pompe d'injection de produits chimiques : 2010 J/JA A, B, C, D, E.
- j) Désurchauffeur : 2010 M A, B, C, D, E.
- k) Bac de produits chimiques de nettoyage : 2010 JJF A, B, C, D, E.
- l) Pompe à produits chimiques de nettoyage : 2010 JJ/JJA A, B, C, D, E

a) Les filtres d'eau de mer

L'eau de mer d'alimentation est filtrée par les filtres (2011 L A, B, C, D, E) qui ont une capacité de 45,3 m³/h, ils sont en fonctionnement continu et possèdent l'équipement nécessaire pour un lavage à contre-courant de façon cyclique prédéterminée (30 mn à 24 h). Les filtres à eau de mer retiennent les grosses particules ou les solides contenus dans l'eau de mer (**voir le schéma attaché à l'annexe n° 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.

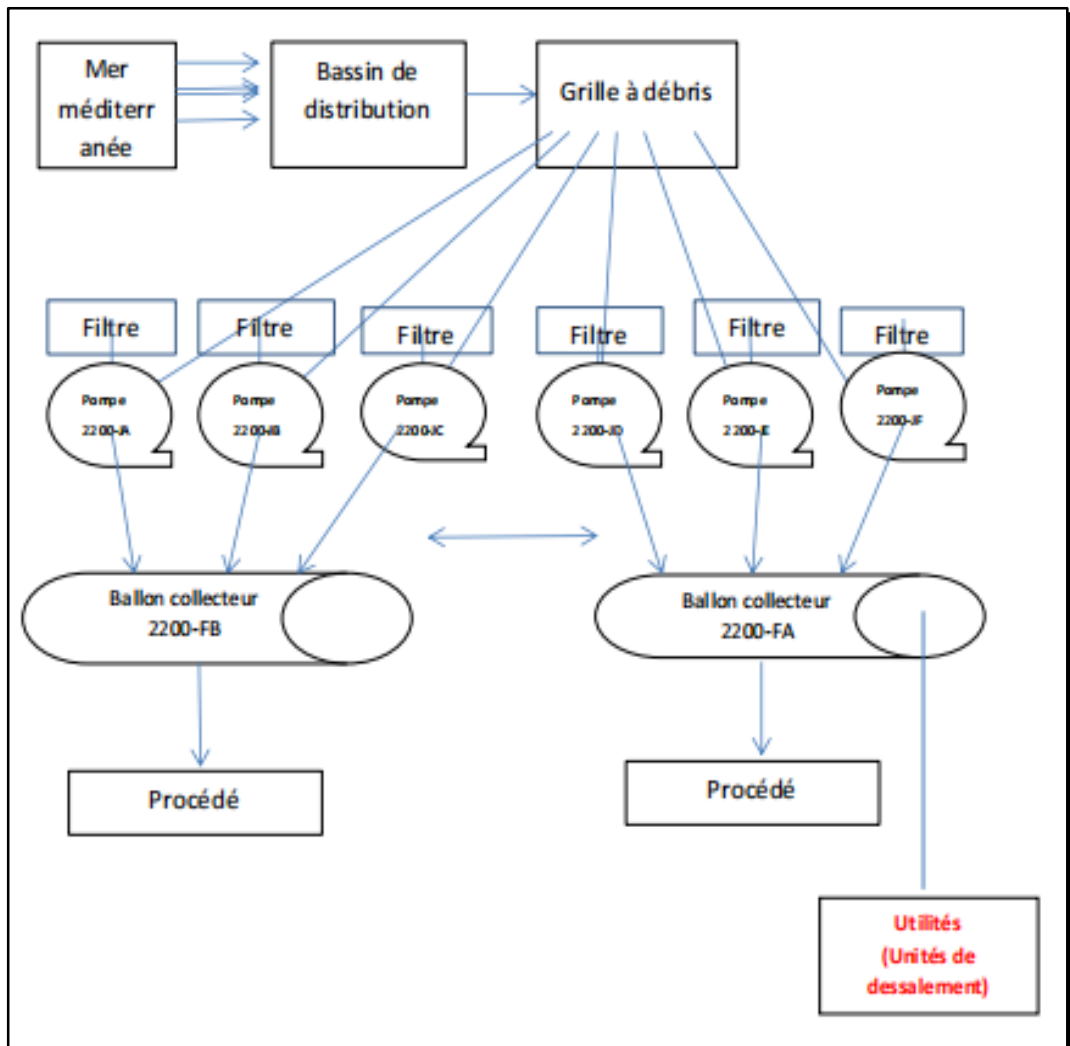


Figure II-9 : Schéma de l'acheminement d'eau de mer vers les dessaleurs.

b) L'évaporateur

Il est considéré comme le corps de l'unité de dessalement, il se compose d'étages de récupération de chaleur et d'étages de rejet de chaleur limité par trois étages. Dans les étages de récupération de chaleur, la chaleur des vapeurs condensées est récupérée par recirculation de la saumure, tandis que dans les étages de rejet de chaleur, elle est éliminée par refroidissement de l'eau de mer sous forme de chaleur perdue. Chaque étage est composé de deux sections, une section supérieure et une inférieure qui sont séparés par des démisters. La section inférieure est une grande pièce appelée chambre de détente où l'eau de saumure passe à travers des démisters vers la partie supérieure. La vapeur pénètre dans la partie supérieure de la chambre de détente qui se compose de tubes de condensation sur lesquels elle se condense et tombe sous forme de gouttelettes d'eau distillée. Les gouttelettes sont collectées dans des plateaux de distillat. Les étages sont séparés par un mur, ayant cinq portes de sortie de saumure qui est son chemin vers l'étage suivant. Le dernier étage contient un bassin de purge de la saumure à la sortie des filtres, l'eau est reprise par une pompe de surpression d'eau de mer (2010 J1 A/B/C/D/E) qui refoule vers l'évaporateur et vers l'éjecteur condenseur. L'eau de mer (saumure), dirigée vers l'évaporateur, est distribuée à l'intérieur des huit (08) compartiments par un faisceau tubulaire qui fait office de condenseur au contact de la vapeur de l'eau évaporée. L'eau de mer est ensuite réchauffée par un réchauffeur de saumure (2010 L A/B/C/D/E).

La saumure, portée à une température de 90 °C, revient au vaporisateur et circule à contre-courant des faisceaux tubulaires. La saumure chaude et le vide, créé par les éjecteurs de vapeur, permettent une évaporation. Dans chaque compartiment, la vapeur traverse un tamis débrumeur, qui retient les gouttelettes de saumure, elle est ensuite condensée au contact du condenseur (faisceau), L'eau douce, ainsi recueillie, s'écoule dans le bac d'eau distillée au travers de chaque compartiment (du premier jusqu'au huitième). L'eau est ensuite refoulée par la pompe à eau distillée (2010 J3 A, B, C, D, E) vers le bac de stockage (2041 F). Un niveau de saumure est maintenu au dernier étage et elle est renvoyée au canal de rejet par la pompe de purge de saumure (2010 J2 A, B, C, D, E). Les incondensables sont évacués à partir du système du vide vers l'éjecteur (**voir le schéma attaché à l'annexe n° 6**).

c) Le réchauffeur de saumure

C'est un échangeur de chaleur horizontal à calandre et à faisceau tubulaire en une seule passe, où la vapeur se condensant au côté calandre et la saumure circule à l'intérieur du faisceau tubulaire. La vapeur condensée est collectée dans des réservoirs d'extraction situés sous le réchauffeur, le choix de matériau de construction dépend du système (réchauffeur de saumure,

récupération de chaleur et rejet de chaleur). L'eau de mer entre du côté tube du réchauffeur a une température de 78,6 °C, où elle est réchauffée par la vapeur désurchauffée, jusqu'à ce que la température de service atteigne une température de 90 °C. Une citerne au fond de la calandre permet de recueillir la vapeur condensée, le niveau est maintenu constant au moyen d'un régulateur de niveau de condensât. Une pompe de condensât (2010 J4 A, B, C, D, E) renvoie les condensates vers le désurchauffeur (2010 M A, B, C, D, E) et/ou vers le retour de condensât. Les incondensables sont évacués par l'éjecteur (**voir le schéma attaché à l'annexe n° 7**).

d) Le désurchauffeur

La vapeur alimentant le réchauffeur de saumure passe par un désurchauffeur (2010 C A, B, C, D, E) de façon à avoir de la vapeur saturée à 100 °C, le désurchauffeur est alimenté en vapeur, l'eau de désurchauffage provient du circuit condensat de la pompe de condensat (2010 J4 A, B, C, D, E).

e) L'éjecteur et le condenseur

Le vide à l'intérieur de l'évaporateur est obtenue grâce à deux (02) éjecteurs, à deux (02) étages chacun, et un condenseur qui est divisé en deux (02) étages (condenseur intermédiaire et condenseur secondaire). Les incondensables de l'évaporateur et du réchauffeur de saumure se déchargent par les lignes d'évent dans le système éjecteur condenseur et sont ensuite rejetés vers l'atmosphère. La vapeur, alimentant les éjecteurs, provient du réseau 17 bars et se décharge dans le condenseur, le premier éjecteur (vide à l'évaporateur) décharge à l'intérieur du condensateur intermédiaire. Les incondensables du condenseur intermédiaire sont repris par le second éjecteur et passent dans le condenseur secondaire d'où ils sont mis à l'atmosphère, le fluide réfrigérant des condenseurs est de l'eau de mer qui provient de la pompe de surpression d'eau de mer.

f) Système d'injection des produits chimiques

Pour éviter tout dépôt de tartre dans la conduite de l'évaporateur, l'eau de mer est traitée par injection de poly phosphate et de solution anti-mousse. Le bac à produits chimiques (2010 F-A, B, C, D, E) est muni d'un agitateur (2010 LL/A/B/C/D/E), Sur le circuit d'injection, 2 pompes (2010 J/JA A, B, C, D, E) une seule en service et l'autre en stand-by aspirent dans le bac à travers d'un filtre et refoulent dans la conduite eau de mer de l'évaporateur, le débit d'injection est réglé par la course de la pompe. Cette injection de produits chimiques a pour but de retarder la formation de tartre sur les tubes de transfert de l'évaporateur et de ce fait, réduire la fréquence de nettoyage par produits chimiques.

g) Les pompes

L'installation de dessalement comprend les pompes citées ci-dessous qui jouent un rôle majeur dans l'usine :

- Pompes de recyclage de saumure : elles prélèvent l'eau du dernier étage, du dégazeur, et alimente le condenseur de dernier étage de récupération de chaleur.
- Pompes de distillat : elles extraient l'eau distillée du dernier étage vers le bac de stockage du distillat.
- Pompes d'évacuation de saumure : elles évacuent la saumure vers la mer.
- Pompes de condensat : elles retirent la vapeur condensée de l'appareil de chauffage et la pomper vers la centrale électrique.

h) Le bac de stockage

Bac de stockage (2041 F) d'eau distillée, d'une capacité de 8710 m³, est continuellement pressurisé à l'azote, pour éviter tout contact entre l'eau et l'air. Les pompes d'appoint (2010 J A, B, C, D, E) envoient l'eau distillée dans le collecteur d'eau d'appoint (alimentation chaudières). Le réseau de GL2/Z peut servir d'appoint ou être alimenté partiellement par GL1/Z.

II-5-2-4-4 Principe de dessalement MSF

La Distillation Multi-Flash s'appuie sur une évaporation instantanée (flash) d'une partie de l'eau salée chauffée à haute température (80°C à 120°C), sous une pression, $P_0 \approx 2\text{bars}$, lors d'une détente à l'entrée de la chambre de distillation qui est à la pression P_1 . La vapeur est condensée au niveau d'un échangeur, où elle rétrocede sa chaleur latente de vaporisation à l'eau salée « source liquide » qui se réchauffe, la saumure déjà peu concentrée, s'écoule sous l'effet de la pression vers la chambre de distillation de la cellule suivante, où une nouvelle vaporisation s'effectue à la pression $P_2 < P_1$, et ainsi de suite jusqu'à la pression « P_n » de 0.05 bar, vers 30°C. C'est le principe des détentes successives ; il peut avoir ainsi jusqu'à 50 cellules [25]

II-5-3 Autres procédés de dessalement**II-5-3-1 Échange ionique**

Le phénomène d'échange d'ions se produit quand on met en contact une eau saumâtre avec certaines substances insolubles ayant la propriété d'échanger certains de leurs ions avec les sels de l'eau, les produits employés actuellement sont des produits insolubles dénommés échangeurs d'ions (résines synthétiques sous la forme de graines d'environ 0,3 à 1,5 mm). Cette méthode est applicable seulement pour les eaux contenant jusqu'à 8 et même 10 g/L [26].

II-5-3-2 Dessalement par congélation

Le refroidissement de l'eau salée pour former des cristaux de glace sous des conditions bien définies est un moyen de dessaler l'eau de mer. Le procédé par congélation exige la mise en œuvre des moyens mécaniques complexes pour trier les glaçons de l'eau de mer, est, de ce fait, presque complètement abandonné. On distingue les procédés par congélation sous vide et les procédés par congélation basés sur un réfrigérant [27].

II-5-3-3 Distillation solaire

Les distillateurs solaires simples sont utilisés aujourd'hui pour la production d'eau potable à partir d'eau salée dans plusieurs pays du tiers-monde. C'est la méthode la plus économique pour la production d'eau douce en petites quantités [25]. Les alchimistes arabes étaient les premiers à utiliser la distillation solaire. Les premiers travaux détaillés publiés sur le sujet remontent à Harding (1883) où il présente le distillateur en bois recouvert de verre que l'ingénieur suédois Carlos Wilson utilisait au Chili. Cet appareil pouvait produire en moyenne 4,9 litres d'eau distillée par jour pour une journée d'été [28].

II-6 Domaines d'application des eaux dessalées

L'eau douce a de nombreuses applications dans différents domaines :

- **Approvisionnement en eau Potable** : L'eau dessalée est essentielle pour la consommation humaine, que ce soit pour boire, cuisiner, se laver ou assurer l'hygiène personnelle.
- **Agriculture** : L'irrigation agricole est l'un des plus grands utilisateurs d'eau dessalée, permettant de cultiver des cultures alimentaires et industrielles.
- **Industrie** : De nombreuses industries, telles que l'industrie manufacturière, l'industrie chimique, l'industrie pétrolière et gazière, utilisent de grandes quantités d'eau dessalée dans leurs processus de production.
- **Production d'énergie** : L'eau dessalée est utilisée dans la production d'électricité, que ce soit pour le refroidissement des centrales thermiques ou pour la production d'énergie hydroélectrique.
- **Usage domestique et commercial** : L'eau dessalée est utilisée dans les bâtiments résidentiels, commerciaux et institutionnels pour divers besoins tels que le chauffage, la climatisation, etc.

- **Conservation de l'environnement :** Les écosystèmes naturels dépendent également de l'eau dessalée pour maintenir la biodiversité, préserver les habitats aquatiques et soutenir les processus écologiques.
- Au sein du complexe GNL2Z où nous avons effectué notre stage, nous avons observé un processus sophistiqué de transformation de l'eau dessalée en trois types de vapeurs distincts par les chaudières. Ces vapeurs sont ensuite utilisées de manière stratégique dans différents aspects du processus. Par exemple, une partie du premier type de vapeur, caractérisée par une pression de 4,5 bars, est acheminée vers le réchauffeur de dessalement, contribuant ainsi au fonctionnement efficace de cette étape cruciale du processus de dessalement. En parallèle, une partie du deuxième type de vapeur, dont la pression est élevée à 17,2 bars, est dirigée vers les éjecteurs, jouant un rôle essentiel dans diverses opérations de l'installation. Enfin, une partie du troisième type de vapeur, atteignant une pression de 62 bars, est acheminée vers le turbogénérateur, où il est converti en électricité pour alimenter l'ensemble de la zone de procédé. Cette organisation précise et l'utilisation optimale des différentes pressions de vapeur démontrent l'efficacité et la sophistication du système mis en place pour répondre aux besoins variés du complexe GNL2Z.

Ces domaines d'application mettent en évidence l'importance cruciale de l'eau dessalée dans la vie quotidienne, l'économie et la préservation de l'environnement.

Chapitre III

Analyses des paramètres
physico-chimiques de l'eau
dessalée

III-1 Introduction

Le service laboratoire du complexe GL2/Z analyse en permanence l'eau dessalée produite afin de garantir sa qualité. Pour assurer le bon fonctionnement des équipements industriels et une production meilleure de l'eau dessalée, les analyses des paramètres physico-chimiques ne doivent pas avoir des changements.

Avec l'aide des services de laboratoire, nous avons suivi pendant notre stage qui a duré (02) mois les prélèvements d'eau à la sortie des trois dessaleurs 2010L B /D /E et leurs analyses, nous avons constaté quelques problèmes engendrés et nous avons essayé avec l'équipe du service de trouver quelques solutions.

III-2 Eau dessalée

III-2- 1 Traitement physique

Le traitement physique est décrit comme suit :

➤ **Le dégrillage** : Cette opération a pour but de protéger les équipements contre les éventuels endommagements contre les objets volumineux qui peuvent causer une défaillance directe des pompes.

➤ **La filtration** : elle permet de séparer les solides en suspension dans l'eau de mer à travers deux filtres.

III-2-2 Traitement biochimique

Electrochloration : L'injection du chlore est normalement réalisée au niveau du bassin pour éliminer les organismes marins à savoir les moules et les algues afin d'éviter le bouchage des conduites des installations.

III -2-3 Analyse des paramètres physico-chimiques

Afin de contrôler la qualité de l'eau dessalée, le complexe GL2/Z fait les analyses citées ci -dessous au niveau du laboratoire :

- a) Des analyses systématiques planifiées (quotidiennes).
- b) Des analyses courantes non planifiées (à la demande de la production).

III-2-3-1 La conductivité

III-2-3-1-1 Définition

La capacité de conduction électrique est la capacité d'un matériau ou d'une solution à permettre le déplacement libre des charges électriques, facilitant ainsi le passage d'un courant électrique. La conductivité est exprimée en $S.m^{-1}$ (siemens par mètre) dans le système international. La capacité

de conduction électrique d'une solution est évaluée à l'aide d'un conductimètre. Elle identifie la présence d'électrolytes dissous dans les eaux utilisées pour les chaudières, les dessaleurs et les systèmes de refroidissement. La conductivité est directement liée à la concentration des ions présents dans l'eau ; elle augmente à mesure que la concentration des sels ioniques dissous augmente, tout comme avec la température. Ainsi, la valeur de la capacité de conduction électrique est généralement mesurée à une température standard de 25 °C. La capacité de conduction ne doit pas dépasser 8 $\mu\text{s}/\text{cm}$ selon les spécifications de conception.

III-2-3-1-2 Mode opératoire

- ♣ Mettre en marche l'appareil,
- ♣ Nettoyer la sonde avec de l'eau distillée avant chaque utilisation,
- ♣ Effectuer un rinçage de la sonde une fois avec l'échantillon,
- ♣ Immerger la sonde dans le bêcher contenant l'échantillon,
- ♣ Consulter la valeur de la capacité de conduction affichée sur le cadran du conductimètre.



Figure III-1 Conductimètre

Nous présentons les mesures de la conductivité de l'eau dessalée pendant le mois de janvier 2024 (Du 01 au 31) (**Tableau III-1**) et pendant le mois de Février 2024 (Du 01 au 29)(**Tableau III-2**).

III-2-3-1-3 Résultat

Tableau III-1 Conductivité de l'eau dessalée σ exprimée en ($\mu\text{S}/\text{cm}$) du mois de Janvier

Jours	Dessaleur		
	2010LB	2010LD	2010LE
1	2,9	/	2,9
2	2,5	/	2,8
3	2,6	/	2,8
4	2,6	2,9	/
5	3,2	/	3,1
6	3,8	/	3,2
7	3,6	/	3,9
8	8,2	/	2,8
9	/	/	2,5
10	/	2,4	2,8
11	5,7	2,1	2,5
12	4,3	2,2	2,8
13	3,7	2,4	2,9
14	3,1	3,6	2,7
15	3,9	2,6	2,8
16	2,5	2,6	2,4
17	3,5	3,4	3,5
18	/	2,4	3,1
19	/	3,2	2,9
20	/	3,2	4
21	/	2,8	3,2
22	/	2,4	2,6
23	/	/	2,7
24	/	2,7	2,8
25	/	2,6	2,8
26	/	2,8	2,6
27	/	3,3	3,4
28	/	3,1	3,5
29	/	3,1	3,1
30	/	3,4	3,5
31	/	2,2	2,4
Design [29]	8		

Tableau III -2 Conductivité de l'eau dessalée σ exprimée en ($\mu\text{S/cm}$) du mois de Février

Jour	Dessaleur		
	2010LB	2010LD	2010LE
1	/	2,6	2,8
2	/	2,4	2,7
3	2,8	2,4	3,6
4	2,4	2,7	2,2
5	2,5	2,6	2,9
6	2,3	2	2,4
7	1,5	2,2	2,2
8	/	/	2,8
9	2,4	/	3,2
10	3,3	2,3	4,9
11	4,1	2,1	3,1
12	3,8	/	2,1
13	3,6	/	6
14	2,6	/	3,9
15	2,1	/	3,1
16	1,8	/	2,9
17	2,5	/	3,2
18	2,5	/	3,5
19	1,7	/	2,8
20	2,3	/	2,7
21	2,1	3	3,4
22	2,9	2,5	3,4
23	1,9	3	2,1
24	2,4	4,1	3,4
25	2,6	2,1	3,4
26	2,5	3,1	3,8
27	2,7	2,5	3,5
28	2,5	2,4	3,7
29	2,3	2,5	3,6
Design[29]	8		

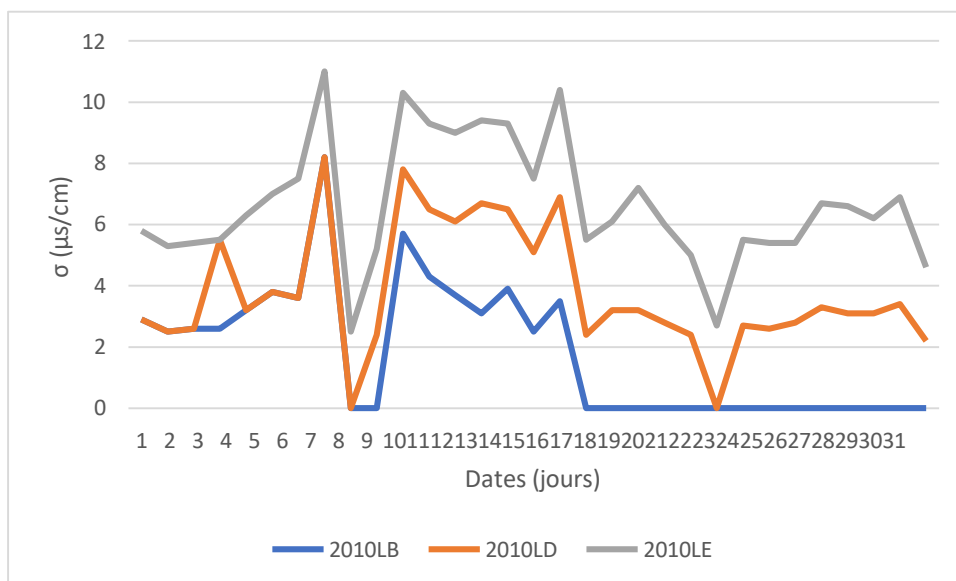


Figure III-2 Variation de la conductivité électrique des eaux dessalées produites par les unités 2010 LB/D/E du mois de janvier.

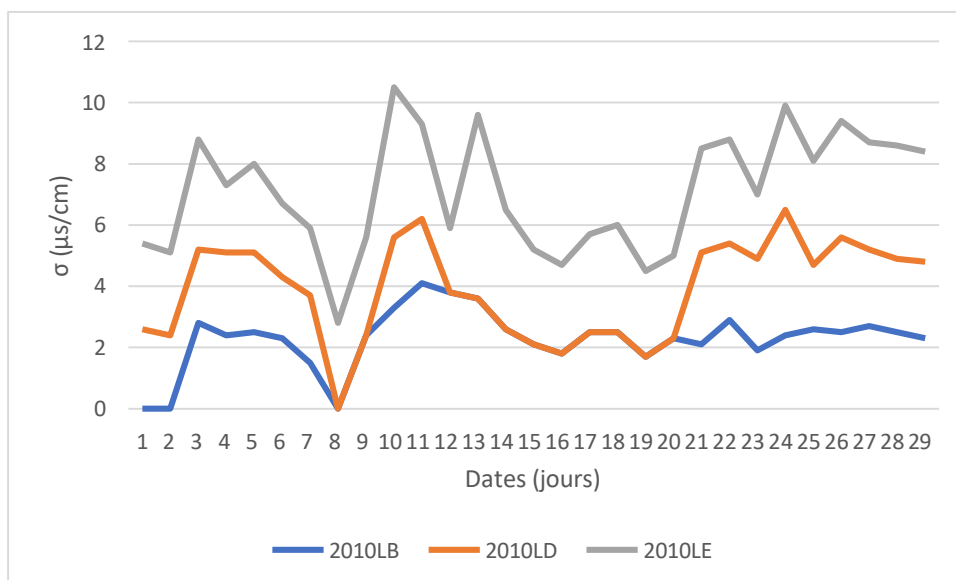


Figure III-3 Variation de la conductivité électrique des eaux dessalées produites par les unités 2010 LB/D/E du mois de février.

- **Interprétation des résultats**

D'après la **fig III-2**, on constate que les valeurs de la conductivité pour les 3 dessaleurs sont dans les normes même s'il y'a une légère augmentation pour le dessaleur 2010 LB et d'après la **fig III-3**, on constate que les conductivités électriques des 3 dessaleurs ne dépassent pas la limite de 8 (valeur approprié pour l'eau distillée). Elles varient entre 1,5 $\mu\text{s}/\text{cm}$ et 6 $\mu\text{s}/\text{cm}$ qui sont des valeurs dans la norme.

III- 2-3-2 pH

III-2-3-2-1 Définition

Le potentiel hydrogène (pH) est une abréviation désignant le potentiel hydrogène et qui reflète la mesure de la basicité en chimie. Le pH évalue la concentration d'une solution aqueuse en ions hydronium H_3O^+ et le niveau d'acidité ou d'alcalinité d'une solution. Le pH de l'eau dessalée varie dans une plage de [6 – 8].

III-2-3-2-2 Mode opératoire

L'analyse du pH est effectuée à température ambiante ($T\text{ }^\circ\text{C} \nearrow \rightarrow \text{pH} \nearrow$). L'instrument utilisé pour la mesure est le pH-mètre suivant les étapes citées ci-dessous :

- ♣ Activer l'appareil, le laisser se réchauffer et atteindre l'équilibre électrique.
- ♣ Rincer l'électrode et le récipient avant chaque utilisation avec de l'eau distillée, étalonner le pH mètre avec les solutions tampons.
- ♣ Ajuster la température de l'échantillon pour qu'elle soit proche de la température ambiante, afin d'assurer une bonne précision de mesure.
- ♣ Plonger l'électrode dans le récipient contenant l'échantillon, et attendre que la valeur se stabilise sur le cadran avant de lire le résultat.



Figure III-4 : pH-mètre

III-2-3-2-3 Résultat

Nous présentons les mesures du pH de l'eau dessalée pendant le mois de janvier 2024 (Du 01 au 31) (**Tableau III-3**) et pendant le mois de Février 2024 (Du 01 au 29) (**Tableau III-4**).

Tableau III-3 pH de l'eau dessalée du mois de Janvier

Jour	Dessaleur		
	2010LB	2010LD	2010LE
1	6,5	/	6,5
2	6,6	/	6,5
3	6,5	/	6,6
4	6,6	6,6	/
5	6,5	/	6,5
6	6,6	/	6,5
7	6,6	/	6,5
8	6,7	/	6,5
9	/	/	6,5
10	/	6,5	6,5
11	6,5	6,4	6,5
12	6,6	6,5	6,5
13	6,6	6,5	6,5
14	6,5	6,5	6,4
15	6,6	6,5	6,5
16	6,5	6,5	6,5
17	6,6	6,5	6,6
18	/	6,8	6,4
19	/	6,7	6,5
20	/	6,5	6,5
21	/	6,5	6,5
22	/	6,3	6,4
23	/	/	6,5
24	/	6,4	6,4
25	/	6,5	6,5
26	/	6,4	6,5
27	/	6,5	6,6
28	/	6,5	6,5
29	/	6,5	6,5
30	/	6,6	6,6
31	/	6,5	6,6
Design[29]	06 - 08		

Tableau III-4 pH de l'eau dessalée du mois de Février

jour	Dessaleur		
	2010LB	2010LD	2010LE
1	/	6,4	6,5
2	/	6,6	6,6
3	6,6	6,4	6,5
4	6,4	6,5	6,5
5	6,6	6,5	6,6
6	6,6	6,5	6,6
7	6,5	6,4	6,4
8	/	/	6,5
9	6,5	/	6,6
10	6,6	6,5	6,6
11	6,4	6,5	6,5
12	6,7	/	6,6
13	6,6	/	6,6
14	6,6	/	6,7
15	6,5	/	6,6
16	6,5	/	6,6
17	6,5	/	6,6
18	6,5	/	6,7
19	6,6	/	6,6
20	6,5	/	6,5
21	6,6	6,6	6,6
22	6,5	6,6	6,5
23	6,5	6,5	6,6
24	6,6	6,4	6,5
25	6,5	6,4	6,6
26	6,4	6,5	6,6
27	6,5	6,4	6,4
28	6,5	6,4	6,6
29	6,5	6,6	6,6
Design[29]	06 - 08		

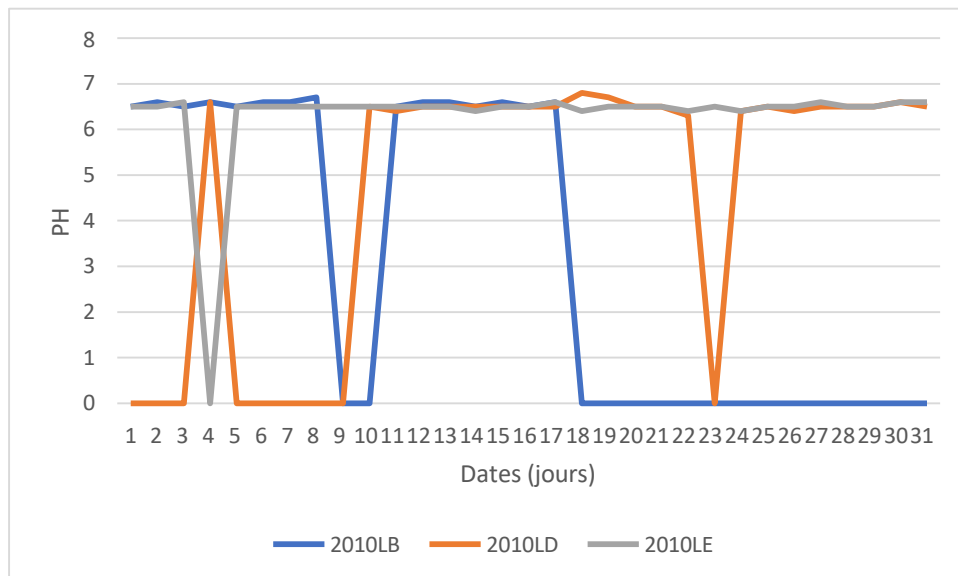


Figure III-5 Variation du pH de l'eau dessalée pendant le mois de Janvier

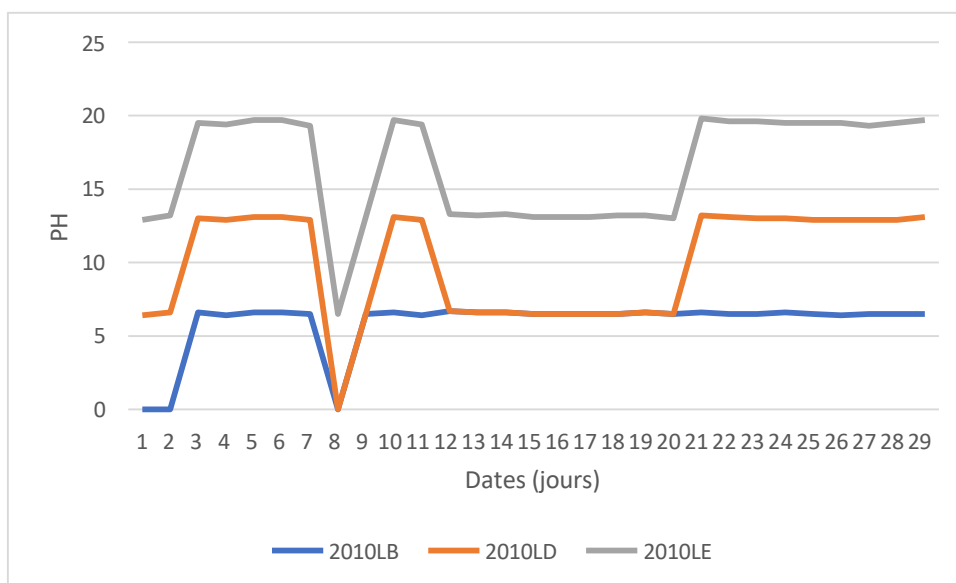


Figure III-6 Variation du pH de l'eau dessalée pendant le mois de Février

• **Interprétation des résultats :**

Les figures III.5 et III.6 illustrent les résultats de mesure du pH réalisée sur des échantillons d'eau dessalée produite par les dessaleurs 2010 L B/D/E du complexe GL2/Z. On remarque une légère variation du pH, mais ce dernier reste toujours dans les normes.

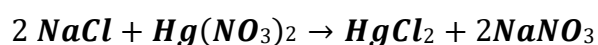
III-2-3-3 Les chlorure

III-2-3-3-1 Définition

Les ions Cl^- participent dans la formation moléculaire de certains sels qui ont la priorité de se déposer sur les parois des tuyauteries en provoquant des bouchages.

Principe

Cette méthode est basée sur la fixation des ions Cl^- par les ions Hg en un sel soluble. Au cours de ce phénomène ; on procède au titrage par une solution de $Hg(NO_3)_2$. La réaction a lieu d'après l'équation suivante :



On titre en présence du diphenyle carbazone la solution $Hg(NO_3)_2$; les ions Cl^- réagissent avec les ions Hg pour former un complexe stable qui empêchent les ions mercuriques de réagir avec l'indicateur de fin de réaction. Après la réaction complexométrique, les ions mercuriques en excès réagissent avec l'indicateur de fin de réaction pour donner un complexe bleu violet.

III-2-3-3-2 Mode opératoire

- Prendre 100ml d'échantillon, le mettre dans un erlen meyer
- Ajouter 2 ml HNO_3 (0,1 N).
- Ajouter 3 gouttes du réactif S-diphényl carbazone (La solution devient jaune claire)
- Titrer avec $Hg(NO_3)_2$ à 0,00141N jusqu'à l'obtention d'une couleur violette stable.
- Noter le volume écoulé : V en ml
- Faire un blanc avec l'eau distillée dans les mêmes conditions, noter le volume écoulé.

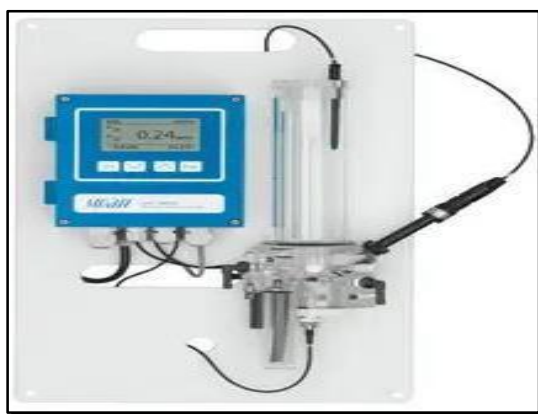


Figure III.7 Appareil de mesure de chlorure

III-2-3-3-3 Résultat

Les tests des ions chlorures ont été faits seulement pour les jours dont la conductivité de l'eau était supérieure à 8 $\mu\text{S}/\text{cm}$

Tableau III-5 Résultats de l'analyse des chlorures dans l'eau dessalée en ppm de 4 jours du mois de Janvier

Jour	Dessaleur		
	2010LB	2010LD	2010LE
8	0,78	/	/
11	0,6	/	/
12	0,45	/	/
20	/	/	0,4
Design [30]	1		

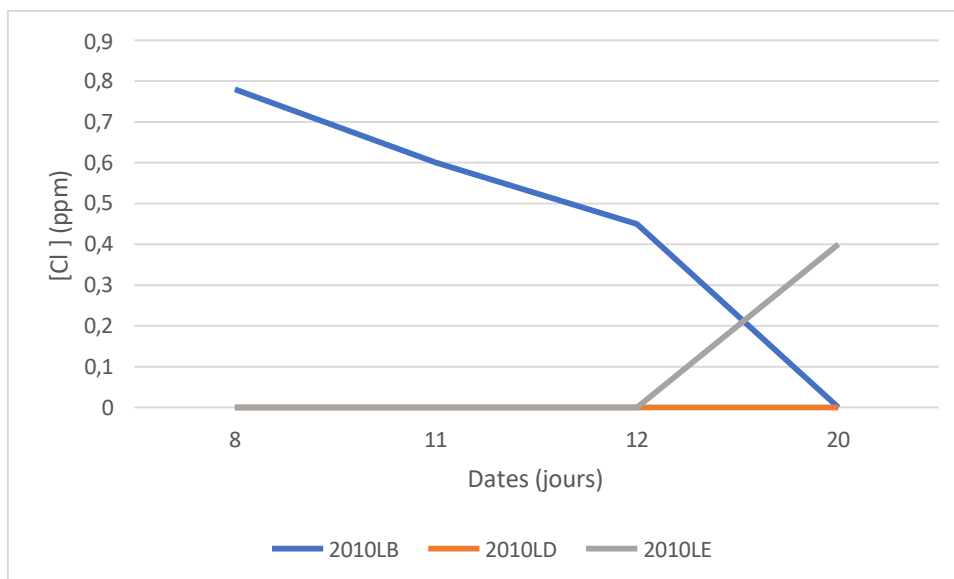


Figure III-8 : Mesure du chlorure de l'eau dessalée de 4 jours du mois janvier.

Tableau III- 6 Résultats de l'analyse des chlorures dans l'eau dessalée en ppm de 3 jours du mois Février

Jour	Dessaleur		
	2010LB	2010LD	2010LE
11	/	/	0.55
12	0,4	/	/
13	/	/	0.58
Design [30]	1		

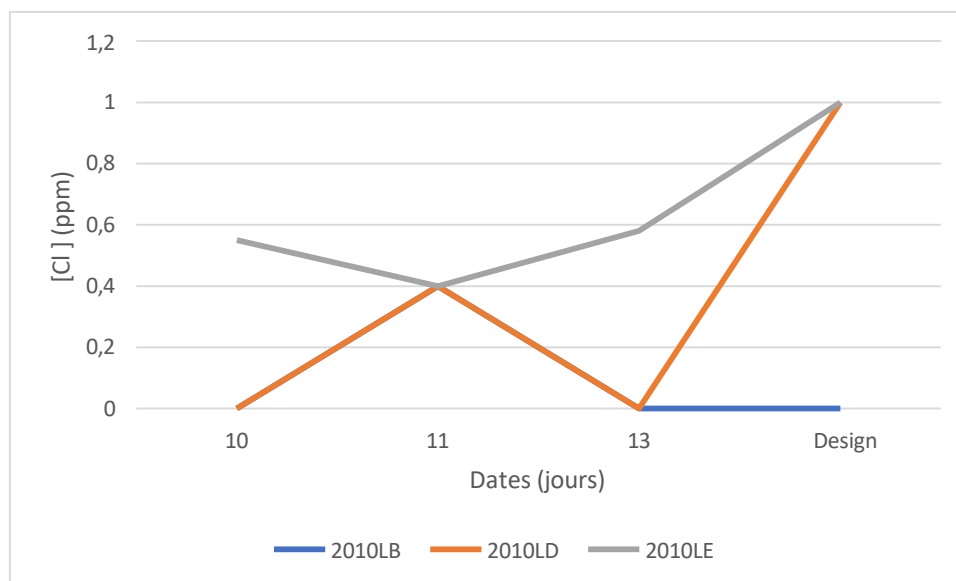


Figure III-9 Mesure du chlorure de l'eau dessalée du mois février.

- **Interprétation des résultats :**

Les résultats des mesures des ions chlorures des eaux dessalées pendant la période de stage sont dans les normes.

III-3 Taux de production

Les unités de dessalement du complexe GL2/Z présentent un problème de baisse de la production de l'eau dessalée. Cette baisse de production persiste, compte tenu de l'absence d'un plan de maintenance approprié.

Les tableaux III.7 et III.8 présentent la production globale et le taux correspondant aux dessaleurs en eau dessalée du complexe de type MSF sur une période d'étude qui s'étale sur deux mois, janvier et février 2024.

Méthode de calcul :

1 dessalure \rightarrow 45 T/h (production d'eau dessalée)

45 T \rightarrow 1h Pour 24h : $(24 \times 45) = 1080$

Taux de production pour 1 dessalure $1080 \rightarrow 100\%$

Production Global $\rightarrow ?$

Taux de production pour 2 dessalures $(1080 \times 2) = 2160 \rightarrow 100\%$

Production Global $\rightarrow ?$

Taux de production pour 3 dessalures $(1080 \times 3) = 3240 \rightarrow 100\%$

Production Global $\rightarrow ?$

Tableau III-7 La production globale et le taux correspondant aux dessaleurs en eau
Dessalée, mois de janvier 2024

Jour	Dessalures			Production Global	Taux de production
	2010LB	2010LD	2010LE		
1	660	0	600	1260	58,33333333
2	653	0	603	1256	58,14814815
3	653	0	590	1243	57,54629630
4	645	0	600	1245	57,63888889
5	629	0	610	1239	57,36111111
6	633	0	600	1233	57,08333333
7	566	0	620	1186	54,90740741
8	0	0	588	588	54,44444444
9	0	99	600	699	32,36111111
10	0	600	615	1215	56,25000000
11	669	610	600	1879	57,99382716
12	652	615	510	1777	54,84567901
13	644	590	650	1884	58,14814815
14	712	585	674	1971	60,83333333
15	793	600	504	1897	58,54938272
16	781	516	616	1913	59,04320988
17	617	490	600	1707	52,68518519
18	0	480	610	1090	50,46296296
19	0	500	590	1090	50,46296296
20	0	600	615	1215	56,25000000
21	0	480	610	1090	50,46296296
22	0	398	607	1005	46,52777778
23	0	162	630	792	36,66666667
24	0	589	650	1239	57,36111111
25	0	580	600	1180	54,62962963
26	0	574	615	1189	55,0462963
27	0	590	585	1175	54,39814815
28	0	600	600	1200	55,55555556
29	0	585	640	1225	56,71296296
30	0	615	599	1214	56,2037037
31	0	600	600	1200	55,55555556
Somme					1682,469136
Moyenne					54,27319793

Tableau III-8 La production globale et le taux correspondant aux dessaleurs en eau
Dessalée, mois de février 2024

Jour	Dessalures			Production Global	Taux de production
	2010LB	2010LD	2010LE		
1	0	600	600	1200	55,55555556
2	0	600	600	1200	55,55555556
3	587	600	515	1702	52,53086420
4	594	600	612	1806	55,74074074
5	611	600	545	1756	54,19753086
6	626	600	600	1826	56,35802469
7	603	600	600	1803	55,64814815
8	624	0	600	1224	56,66666667
9	516	94	607	1217	37,56172840
10	480	502	600	1582	48,82716049
11	480	480	510	1470	45,37037037
12	480	80	500	1060	32,71604938
13	480	0	490	970	44,90740741
14	485	0	485	970	44,90740741
15	480	0	517	997	46,15740741
16	480	0	594	1074	49,72222222
17	480	0	480	960	44,44444444
18	480	0	516	996	46,11111111
19	516	0	516	1032	47,77777778
20	480	176	481	1137	35,09259259
21	480	511	489	1480	45,67901235
22	480	528	600	1608	49,62962963
23	574	526	490	1590	49,07407407
24	480	525	601	1606	49,56790123
25	480	494	615	1589	49,04320988
26	480	480	480	1440	44,44444444
27	500	480	600	1580	48,76543210
28	480	480	476	1436	44,32098765
29	480	503	600	1583	48,85802469
Somme					1395,231481
Moyenne					48,11143040

On remarque clairement que la production de l'eau dessalée pour l'ensemble des dessaleurs du complexe GL2/Z est en diminution progressive pour atteindre le taux 48,11% en mois de février 2024, production très faible par rapport au design mais reste acceptable. La diminution est dûe fortement aux arrêts des dessaleurs 2010 L A/C/F et aussi aux dessaleurs qui ne fonctionnaient pas correctement à cause des problèmes comme le tartre et le percement sur les parois de la tuyauterie des dessaleurs, détectés lors de la vérification des paramètres de fonctionnement.

III-4 Les problèmes techniques rencontrés en dessalement d'eau de mer

III-4-1 Introduction :

Les défis majeurs dans le processus de dessalement de l'eau de mer comprennent des difficultés liées à l'accumulation de tartre, à la corrosion, le colmatage et à la croissance biologique. Ces problèmes peuvent entraîner une détérioration des équipements et une diminution de l'efficacité du processus de dessalement, nécessitant ainsi une surveillance et des mesures préventives rigoureuses pour garantir un fonctionnement optimal des installations de dessalement.

III-4 -2 L'entartrage

L'entartrage est un phénomène redouté dans les installations de dessalement, se caractérise par l'accumulation de dépôts de sels minéraux sur les surfaces d'échanges. Ces dépôts, composés principalement de carbonate de calcium (CaCO_3), d'hydroxyde de magnésium ($\text{Mg}(\text{OH})_2$) et de sulfate de calcium (CaSO_4), ces sels sont d'origine des ions présents dans les eaux salines, tels que le calcium, le magnésium, les bicarbonates et les sulfates. La diversité de leurs origines et leur nature adhérente confèrent à ces dépôts de tartre des impacts considérables sur le bon fonctionnement des installations de dessalement.



Figure III.10 Entartrage au niveau du réchauffeur

III-4-2-1 Classification du tartre :

- **Le tartre alcalin** : CaCO_3 et $\text{Mg}(\text{OH})_2$,
- **Le tartre non alcalin** : CaSO_4 .
- **Phosphate de calcium** : Il peut se former si l'alimentation de l'eau provient d'un estuaire, où le phosphate est présent, ou à cause de la chute thermique de polyphosphate et du phosphate ajoutés à l'eau de mer pour se prémunir contre l'entartrage alcalin.
- **Oxyde de fer et de cuivre** : Ils constituent rarement un problème dans les installations qui comportent les additifs. Cependant l'acide est utilisé pour le contrôle du tartre, la corrosion des composants, en cuivrés et en ferreux de l'installation, amènent souvent des oxydes de fer et de cuivre dans les tubes du distillateur.
- **Tartre de silicate** : Il n'est pas fréquent que l'eau de mer contienne de petites quantités de silicate. L'amalgame de silicate, de magnésium (Mg), de calcium (Ca) et de fer peut se former sous l'effet de concentration, de température ou d'augmentation du pH de la saumure en circulation.

III-4-2-2 Les conséquences d'entartrage

L'entartrage a des conséquences néfastes, on peut citer :

- **Diminution de l'efficacité des transferts thermiques (Couche isolante)** : La présence de tartre sur les surfaces d'échange thermique entrave la conduction de la chaleur, réduisant ainsi l'efficacité des procédés de dessalement. Cela se traduit par une augmentation de la consommation d'énergie et une diminution de la production d'eau dessalée.
- **Obstruction des canalisations et des membranes** : L'accumulation de tartre peut conduire à l'obstruction progressive des canalisations et des membranes, perturbant le flux d'eau et réduisant le débit. Dans les cas extrêmes, une obstruction totale peut survenir, entraînant des arrêts de production coûteux.
- **Corrosion et dégradation des matériaux** : Les dépôts de tartre peuvent créer un environnement favorable à la corrosion des matériaux, fragilisant les structures et réduisant leur durée de vie. Cela peut engendrer des réparations fréquentes et des coûts de maintenance importants.
- **Détérioration de la qualité de l'eau produite** : La présence de tartre peut affecter la qualité de l'eau dessalée en augmentant sa teneur en sels minéraux et en altérant ses propriétés organoleptiques.

- **Possibilités corrosion sous tartre** : c'est un problème majeur qui existe dans les installations de dessalement, survient lorsque des dépôts de tartre se forment sur les surfaces métalliques, créant un environnement corrosif.

III-4-2-3 Les causes de l'entartrage

La principale source de formation de tartre réside dans le faible débit d'eau de mer utilisée pour le rinçage et la haute température de la vapeur entrant dans les tubes, tandis que des erreurs de dosage ou d'injection des produits chimiques comme les agents antitartre et l'antimousse peuvent également contribuer à ce problème. Un autre phénomène observé est la pénétration d'air dans les cellules sous vide de l'unité, souvent causée par des fissures ou des perforations dans les conduites du système de vide.

III-4-2-4 Différents moyens de lutte contre l'entartrage

- ✓ **Les inhibiteurs d'entartrage** : Ce sont des composés chimiques utilisés à des concentrations très faibles (quelques parties par million) et injectés dans l'eau d'appoint. Leur fonction principale est de prévenir ou de réduire la formation de dépôts sur les surfaces d'échange.

- ✓ **Le lessivage acide** : Cette opération se déroule selon le schéma suivant :

Une quantité de 150 Kg d'acide sulfamique inhibé (BS12) a été préparée dans le bac destiné à cet effet et injectée dans le circuit. Cette quantité est maintenue sur 2 étapes [31] :

10h45 : Une quantité de 75kg d'acide était mélangée avec condensat dans le bac de préparation.

11h15 : Ajout une autre quantité de 75kg dans le bac jusqu'à la dissolution totale du produit

Cette solution est maintenue en circulation par les pompes d'injection du bac acide et les analyses sont effectuées à des intervalles réguliers.

11h45 : Début de l'opération de lessivage chimique de réchauffeur

15h30 : Arrêt du lessivage chimique

15h35 : Début rinçage de l'unité avec de l'eau de mer

Le 22/02/2023 à 09h30 : Arrêt du rinçage.

Le 23/02/2023 à 11h00 : Lessivage des tamis.

Après l'arrêt de l'opération de lessivage de réchauffeur de saumure, il a été procédé un rinçage jusqu'à pH égale à celui de l'eau d'appoint. L'opération de lessivage des tamis débrouseurs est effectuée en date 23/02/2023 à **11h00** .

III-4-3 La corrosion

La corrosion est un processus de la dégradation d'une substance, qui affecte principalement les métaux et les alliages, résultant de réactions chimiques avec des liquides ou des gaz. Ce phénomène est souvent associé à l'action progressive d'agents naturels tels que l'air ou l'eau salée sur les surfaces métalliques.



Figure III-11 Corrosion des installations

III-4-3-1 Les type de corrosion

Les principaux types de corrosion que l'on peut rencontrer en milieu marin sont les suivants :

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

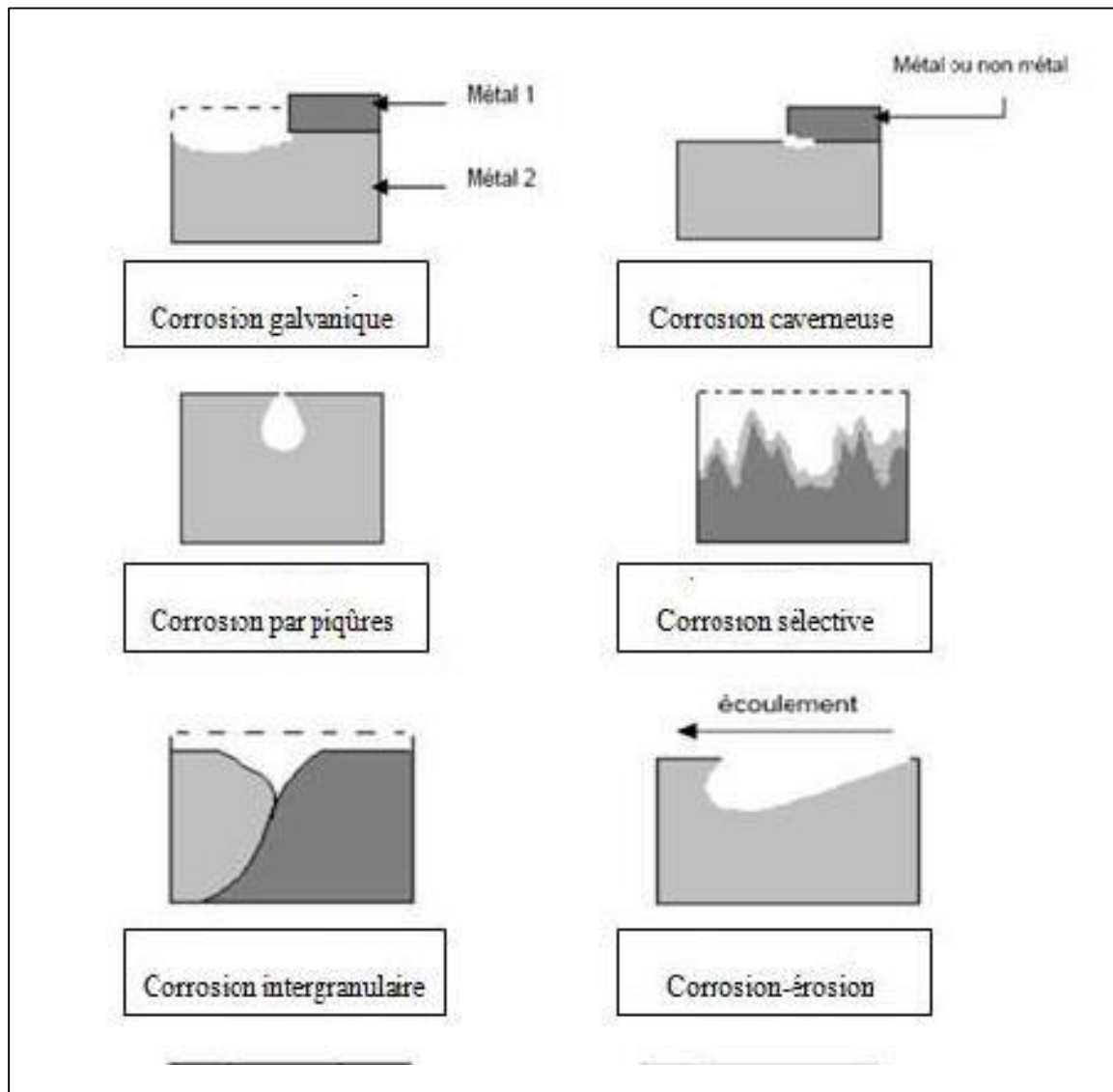


Figure III-12 : Différents types de corrosion [32]

III-4-3-2 Les conséquences corrosion

La corrosion a deux conséquences importantes :

Amincissement qui peut causer :

- Percement métal
- Fuites.
- corrosion sous dépôt.
- Sur consommation d'inhibiteurs.
- Echange thermique perturbé.

Dépôt d'oxydes qui cause le bouchage.

III-4-3-3 Les causes de corrosion

La salinité : l'eau de mer est un milieu complexe du point de vue chimique et biologique, son pH est relativement uniforme (env. 8,2) En général, ses constituants ont un effet néfaste sur la résistance à la corrosion des métaux en faisant un milieu particulièrement agressif, elle se caractérise par une forte salinité, d'où une conductivité élevée, ce qui favorise les couples galvaniques, ainsi que les attaques localisées, car la résistance de l'électrolyte ne joue plus qu'un rôle mineur dans le contrôle des courants de corrosion.

Par ailleurs les chlorures, comme les autres halogénures présents dans l'eau de mer, ont pour effet de provoquer la rupture des films d'oxydes responsables de la passivité et de la bonne tenue à la corrosion de nombreux alliages. C'est la première étape de la corrosion par effet de crevasse ou par piqûres. Ce sont donc des ions très actifs pour ces types de corrosion. De plus, les chlorures forment des produits de corrosion acides, acidité qui empêche souvent la restauration des films passifs. En ce qui concerne la corrosion généralisée, les vitesses de corrosion augmentent en général avec la teneur en sels.

L'oxygène : l'oxygène est le facteur important de la corrosion. Dans l'eau de mer, la réaction cathodique est la réduction de l'oxygène dissous donnant des ions OH^- , l'augmentation de la concentration en oxygène favorise cette réaction et peut conduire à une augmentation de la corrosion par dépolarisation cathodique ; de plus, les variations de la concentration en oxygène à la surface d'un même matériau (variations dues à des gradients de vitesse, à la présence de crevasses ou de dépôts...) sont à l'origine de la corrosion par aération différentielle : les surfaces ayant la concentration en oxygène la plus faible subissent une corrosion accélérée en devenant anodes, alors que la réduction de l'oxygène a lieu sur les surfaces où la concentration est la plus forte. Si l'oxygène favorise la formation des films passifs des matériaux passivables, comme les aciers inoxydables ou les alliages d'aluminium, par contre la présence de chlorures rend ces films imparfaits. Il en résulte une augmentation des risques de corrosion par piqûres avec la teneur en oxygène.

La désaération de l'eau de mer est donc un moyen souvent utilisé pour diminuer la corrosion dans les circuits.

Les bactéries : Les essais de corrosion menés en eau de mer synthétique sont en général moins sévères que ceux utilisant l'eau de mer naturelle. Cette différence est attribuée aux micro-organismes présents dans l'eau de mer qui modifient localement les conditions corrosives par la formation d'un bio film. Les bactéries sulfate-réductrices sont citées à titre d'exemple ; elles se développent en milieu anaérobie et se trouvent le plus souvent sous des dépôts ou des produits de

corrosion ou encore dans les circuits en eau de mer même aérée. Elles sont dangereuses pour la plupart des matériaux métalliques (aciers au carbone, aciers inoxydables...)

Les mécanismes de ces attaques sont encore discutés (attaque chimique par les sulfures, corrosion sous dépôt, aération différentielle, dépolarisation cathodique), pour l'instant on se contente de lutter contre cette forme de corrosion en essayant de supprimer les dépôts et/ou de détruire les bactéries par des bactéricides.

Température et vitesse de circulation : En générale, la corrosion croît avec la température et la vitesse de circulation (tant qu'il n'y a pas de modification de milieu) , elle peut devenir catastrophique si ces paramètres dépassent certaines limites qui seront données plus loin pour les principaux matériaux utilisés en circuits eau de mer. En effet, la plus parts de ceux-ci résistent à la corrosion grâce à un film protecteur recouvrant leur surface. Ces films, bien que solidement fixés à la surface, peuvent être détruits, localement ou même totalement, selon la vitesse de circulation de l'eau de mer. D'un autre côté, il ne faut pas que la vitesse d'écoulement soit trop faible afin d'éviter la formation de dépôts dans les tubes : en effet ceux-ci peuvent entraîner des corrosions sous dépôt qui sont produites par un effet d'aération différentielle. C'est le cas des aciers inoxydables qui sont très sensibles à la corrosion par crevasse dans l'eau de mer

Il existe d'autres facteurs qu'il ne faut pas sous-estimer tels que : la pollution, la salissure, matières en suspension...

III-4-3-4 La protection contre la corrosion

Pour prévenir la détérioration des métaux, on peut intervenir en agissant soit sur le milieu, comme l'eau, soit sur le type de métal utilisé. Cela peut impliquer :

- ✓ L'application de revêtements ou de matériaux protecteurs tels que la graisse, l'huile, la peinture ou la fibre de carbone.
- ✓ L'utilisation de métaux résistant à la corrosion, comme l'acier inoxydable ou l'aluminium.
- ✓ L'utilisation d'inhibiteurs de corrosion peut être une solution efficace pour modifier les conditions chimiques et prévenir la dégradation des métaux.

III-4-4 Le colmatage

Les eaux de mer ou eaux saumâtres contiennent la plupart du temps des matières organiques en suspension qui vont avoir tendance à se déposer sur les surfaces d'échange et à les colmater. Il va en résulter une augmentation de la résistance de transfert et une diminution de la capacité de production de l'installation. Le développement de microorganismes, dans les parties des

installations ou les conditions physico-chimiques le permettent, peut accentuer le phénomène par suite de la formation de films biologiques sur les surfaces de transfert (biofouling).



Figure III-13 Colmatage des installations

III-4-4-1 Les conséquences corrosion colmatage :

- Une augmentation de la perte de charge.
- Une augmentation du passage de sels, le colmatage empêche la retro diffusion des sels rejetés par la membrane
- Une perte de flux.

III-4-4-2 Les causes de colmatage

Présence de particules en suspension : L'eau brute utilisée dans les installations de dessalement peut contenir des particules en suspension, telles que du sable, du limon, des algues ou des micro-organismes. Ces particules peuvent se déposer et s'accumuler dans les canalisations et sur les membranes, provoquant leur colmatage.

Croissance biologique : Le développement de micro-organismes, tels que des bactéries ou des algues, sur les surfaces des canalisations et des membranes peut contribuer au colmatage. Ces organismes biologiques forment des biofilms, des couches visqueuses qui obstruent le passage de l'eau et réduisent l'efficacité du système.

Précipitation de sels minéraux : Dans certaines conditions, des sels minéraux présents dans l'eau brute peuvent précipiter et se déposer sur les surfaces des canalisations et des membranes. Cette précipitation de sels, également appelée tartre, est un phénomène fréquent dans les installations de dessalement, car l'eau de mer est riche en sels minéraux.

Incompatibilité chimique : L'utilisation de produits chimiques inadaptés peut entraîner la formation de floccs ou de gels qui peuvent colmater les canalisations et les membranes.

Réactions chimiques : Certaines réactions chimiques peuvent produire des dépôts solides qui contribuent au colmatage.

Dégradation des matériaux : La dégradation des matériaux des canalisations et des membranes, due à la corrosion ou à l'érosion, peut libérer des particules qui peuvent s'accumuler et provoquer le colmatage.

III-4-4-3 La limitation de colmatage

Nettoyage des membranes a pour but de limiter le colmatage irréversible de perméabilité, et par le fait même, à prolonger la durée de vie des membranes. Les différentes techniques de nettoyage sont :

- **Le nettoyage mécanique :** partiel mais rapides, son principe consiste à décoller et retirer la matière accumulée sur la membrane par des forces mécaniques.
- **Le nettoyage chimique :** nécessite un arrêt de production périodique, génère des couts en solution de lavages et en traitement des effluents. Il se compose d'une séquence de lavage acide et basique, ainsi que de phase de rinçage.
- **Le nettoyage enzymatique :** constitue une alternative aux traitements chimiques. Il peut être appliqué dans le cas de membranes sensibles aux réactifs chimiques, au pH ou à la température élevée, ainsi que dans les cas de colmatage avancé.

III-4-5 Problème de développement biologique

La contamination biologique de l'eau signifie la présence de certains types de microorganismes comme les bactéries et les virus ou par l'action d'organismes aquatiques et animaux aquatiques qui sont présents dans l'eau. et causent la pollution et de nombreuses maladies. Par conséquent, cette eau ne doit pas être utilisée pour se laver ou boire, sauf après avoir été soumise à un traitement avec différents désinfectants, tels que le chlore, les rayons UV et autres.

III-4-5-1 Solutions pour lutter contre le développement biologique dans les installations de dessalement

- **Pré-traitement de l'eau brute** : Un pré-traitement rigoureux de l'eau brute pour éliminer les nutriments, les matières organiques et les micro-organismes est essentiel pour limiter le développement biologique en aval. Cela peut inclure une filtration, une chloration, une désaération ou une combinaison de ces techniques.
- **Choix judicieux des matériaux** : La sélection de matériaux résistants à la biodégradation, tels que l'acier inoxydable ou les plastiques spéciaux, peut aider à minimiser la colonisation par les micro-organismes.
- **Conception optimisée du système** : Une conception optimisée du système de dessalement, en limitant les zones de stagnation d'eau et en favorisant une circulation fluide, peut réduire les opportunités de développement biologique.
- **Biocides** : L'utilisation de biocides, tels que le chlore, le brome ou des produits chimiques non oxydants, peut être efficace pour éliminer ou contrôler les populations de micro-organismes. Cependant, il est important de choisir des biocides compatibles avec les autres produits chimiques utilisés et de respecter les réglementations environnementales.
- **Nettoyage régulier** : Un nettoyage régulier des canalisations et des membranes, à l'aide de produits chimiques ou de méthodes mécaniques, permet d'éliminer les biofilms et de prévenir leur accumulation.
- **Surveillance et suivi** : Une surveillance régulière de la qualité de l'eau et des surfaces du système permet de détecter précocement les signes de développement biologique et de prendre des mesures correctives appropriées.

Conclusion générale

Le travail présenté dans ce mémoire était consacré à l'étude des propriétés physico-chimiques de l'eau dessalée par la technique MSF au niveau du complexe GL2/Z durant la période de deux mois (Janvier et Février 2024).

Les analyses au laboratoire nous ont permis de constater que :

- Les valeurs du pH de l'eau dessalée étaient dans les normes.
- Les valeurs de la conductivité électrique des 3 dessaleurs ne dépassent pas la limite de 8.
- La présence de chlore provoque une augmentation de la conductivité, ce qui donne une mauvaise qualité à l'eau dessalée.
- La diminution du taux de production est dûe principalement aux problèmes d'entartrage, corrosion, colmatage et le développement biologique ayant touché principalement les réchauffeurs de saumure et les condenseurs des évaporateurs au niveau des unités de dessalement.

Les conséquences principales de ces phénomènes sont :

- Présence d'un dépôt résiduel de tarte sur les faisceaux tubulaires suite au dysfonctionnement des systèmes d'injection des produits chimiques en raison de l'indisponibilité de plusieurs équipements.
- Une augmentation du passage de sels provoque le colmatage qui empêche la retro diffusion des sels rejetés par la membrane
- Les équipements possédant des fuites en raison de la corrosion.

Parmi les solutions de ces problèmes, on peut :

- S'assurer que la quantité d'acide nécessaire est disponible avant de lancer l'opération de lessivage
- Utiliser de métaux résistant à la corrosion, comme l'acier inoxydable ou l'aluminium.
- Inspecter et vérifier l'état d'encrassement des orifices de passage de l'eau dans différentes boîtes de détentés et les nettoyer si nécessaire.
- Lors du prochain arrêt général, vérifier l'état des boues du bassin d'eau de mer et effectuer une opération de dragage du fond,
- Réhabiliter les grilles fixes et les filtres rotatifs des baies de la section pomperie,
- Remettre en service le système automatique des filtres autonettoyants des dessaleurs.

- Fiabiliser les pompes des produits chimiques et les moteurs des agitateurs et les remplacer si nécessaire.
- Rénover le système de préparation de la solution chimique.
- Procéder automatiquement au nettoyage chimique de chaque dessaleur ayant fonctionné pour une durée de six (06) mois.
- S'assurer que la quantité d'acide nécessaire est disponible avant de lancer l'opération de lessivage.

Références bibliographiques

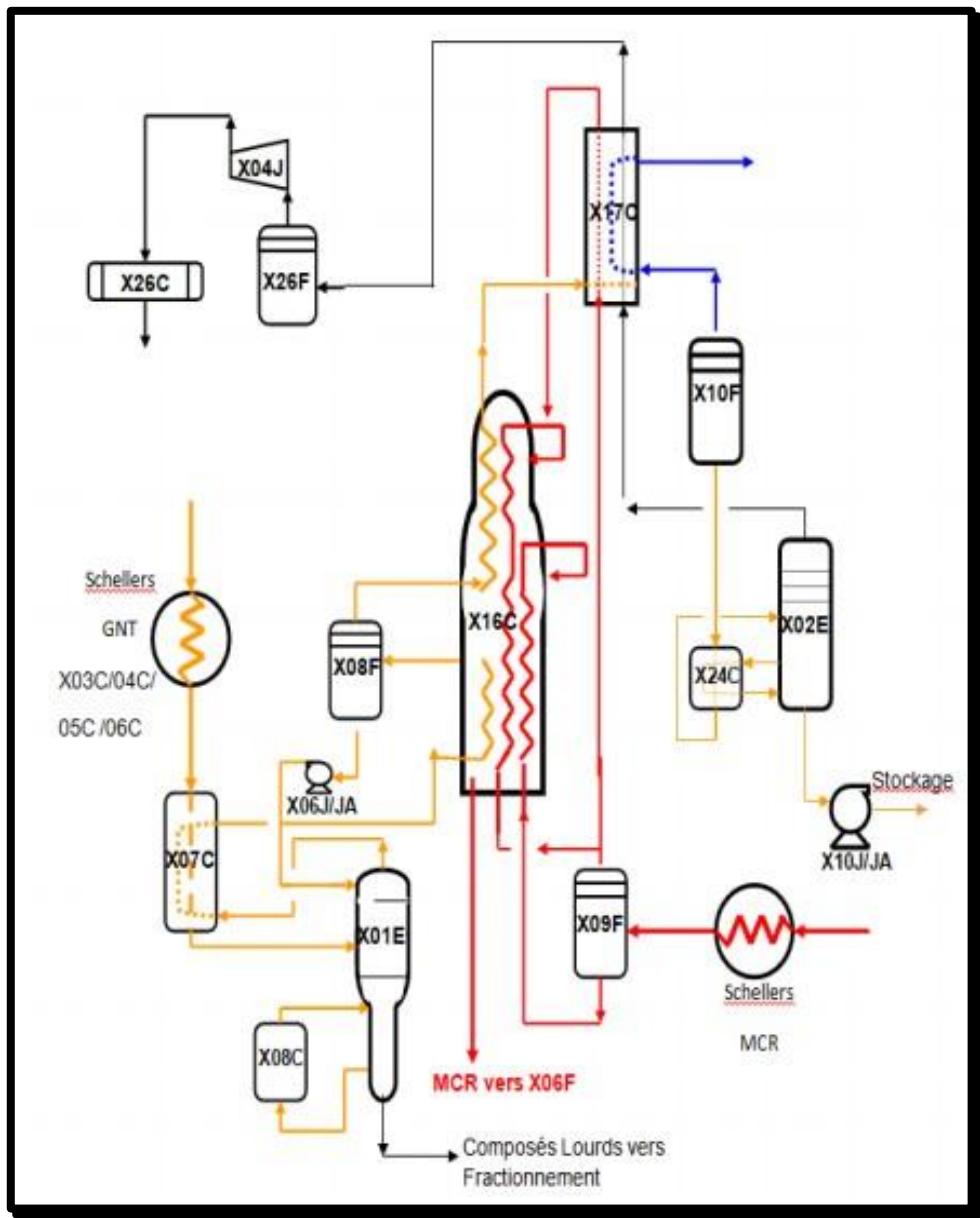
- [1] : Manuel de service formation GL2/Z « Soft tableau Process » (2010).
- [2] : GNL101 Initiation au Gaz Naturel Liquéfié, SNC. Lavalin(2016).
- [3] : Présentation du complexe de liquéfaction GL1K, manuel de formation.
- [4] : S. Bassam « Etude des propriétés Thermodynamique, Structurales et de transport du méthane liquide et du mélange d'hydrocarbures par dynamique moléculaire de corps flexible », mémoire de magister, université d'Oran 1(2008).
- [5] : Manuel opératoire du complexe GL2/Z(1993).
- [6] : Benaouli Hayet Sabria « Etude d'efficacité du démercuriseur au niveau du complexe GL1/Z », mémoire de master, université de Mostaganem(2020).
- [7] : Arbaoui Iliase « Etude acoustique du bruit généré par l'unité industrielle d'Arzew » thèse de doctorat, université d'Oran 1(2018).
- [8] : Saker Ikram et Smahi Rym Assila « Etude de problème de baisse de production d'eau dessalé au niveau du Complexe GL2/Z » mémoire de master, université de Mostaganem(2023).
- [9] :M. Moureau, J . Boghossian, M..C.Debackere , A.Girard , M.Montouchet , L.Sigler. Chambre syndicale de la recherche et de la production du pétrole et de gaz naturel –comité des technique, « circuits eau de mer (traitement et matériaux) », édition technique, Paris(1993)
- [10] :Maafa Aida, « Dessalement de l'eau de mer, » mémoire de master en Génie Civil & Hydraulique,Univesité de Guelma(2020)
- [11] : Moudjeber Djamel-Eddine « Utilisation des énergies renouvelables dans le dessalement : Cas de l'Algérie » thèse de doctorat, Génie Mécanique, Université de Mostaganem(2015).
- [12] : M.Ezzaouaq « Caractérisation hydrodynamique, physicochimique et bactériologique des eaux superficielles de l'estuaire du Bouregreg (Maroc) soumis aux rejets des villes de Rabat-Salé, Thèse de doctorat, Univ Mohammed V, Maroc (1991)
- [13] : S.El Blidi et M. Fekhaoui « Hydrologie et dynamique marégraphique de l'estuaire du Sebou (Gharb, Maroc) », *Bull. Inst. Sci. Rabat, section Sciences de la Vie*, 25 : 57-65(2003).
- [14]: N. Himmi ,M. Fekhaoui ,A.Foutlane, H. Bourchich, M. El Maroufy, T. Benazzou et M. Hasnaoui . *Riv. Idrobiol. Perugia* 42 (2003).
- [15] : A.Aminot , M. Chaussepied., Manuel des analyses chimiques en milieu marin. Paris (1983).
- [16] : A.Atallah « Procédé de dessalement et qualité physico-chimique de l'eau dessalée de la station Honaine » Mémoire de master, Université de Tlemcen (2014).

- [17] : H. Rayah « Etude comparative entre les techniques thermiques et membranaires de dessalement de l'eau de mer », thèse de doctorat en Génie des procédés, Université de Mostaganem(2023)
- [18]: V. U. John, H. Gibbon « Using desalination technologies for water treatment, U.S. Congress. Office of Technology Assessment, OTA-BP- O-46 (Washington, DC: U.S. Government Printing Office) (1988).
- [19] :P. Danis. Dessalement d'eau de mer. Edition technique de l'ingénieur, traité de génie des procédés
- [20]: Belaribi Fatima Zohra « Utilisation des méthodes d'aide multicritère à la décision dans la gestion des ressources en eau : Application de la méthode PROMETHEE à la sélection d'un procédé de dessalement de l'eau de mer », thèse de doctorat en sciences économiques université de Tlemcen (2021).
- [21] : A. Maurel « Dessalement de l'eau de mer et des eaux saumâtres. 2nd ed. Lavoisier(2006).
- [22] : Raymond Des jardins, Le traitement des eaux, Montréal, Canada, 250-251(1990)
- [23] : H.Boye « Eau, énergie dessalement et changement climatique en méditerrané » Plan bleu centre d'activité régional, conseil général du l'environnement et du développement durable, (2008).
- [24] : Brans. « How to discriminate hard and soft multicriteria problems in the discrete case: the PROMETHEE VI procedure »(1992).
- [25] : Malik. M.A.S, Tiwari. G. N, Kumar. A, and Sodha M. S. Solar Distillation Oxford. UK. Pergamon Press(1982)
- [26] : Bechki « Etude comparative et optimisation des procédés de distillation solaire en vue de la production d'eau potable dans les zones arides sahariennes. » Doctorat en sciences en génie mécanique. Université de Batna(2011).
- [27] : Anouar Rich, « « Dessalement de l'eau de mer par congélation sur parois froides : aspect thermodynamique et influence des conditions opératoires, thèse de doctorat en génie des procédés, université de Lyon(2011)
- [28] : Julie Beauséjour. « Conception d'un distillateur solaire pour le traitement des effluents d'une tannerie Mexicaine » Thèse de M. Sc. A de Génie Civil. Université de Montréal, Canada, (2003).
- [29] Registre d'analyses pour dessaleurs, zone utilités, complexe GL2/Z, Département de production
- [30] :H. Sadoki, Analyse des chlorures dans l'eau ASTM, D512-81(2011)

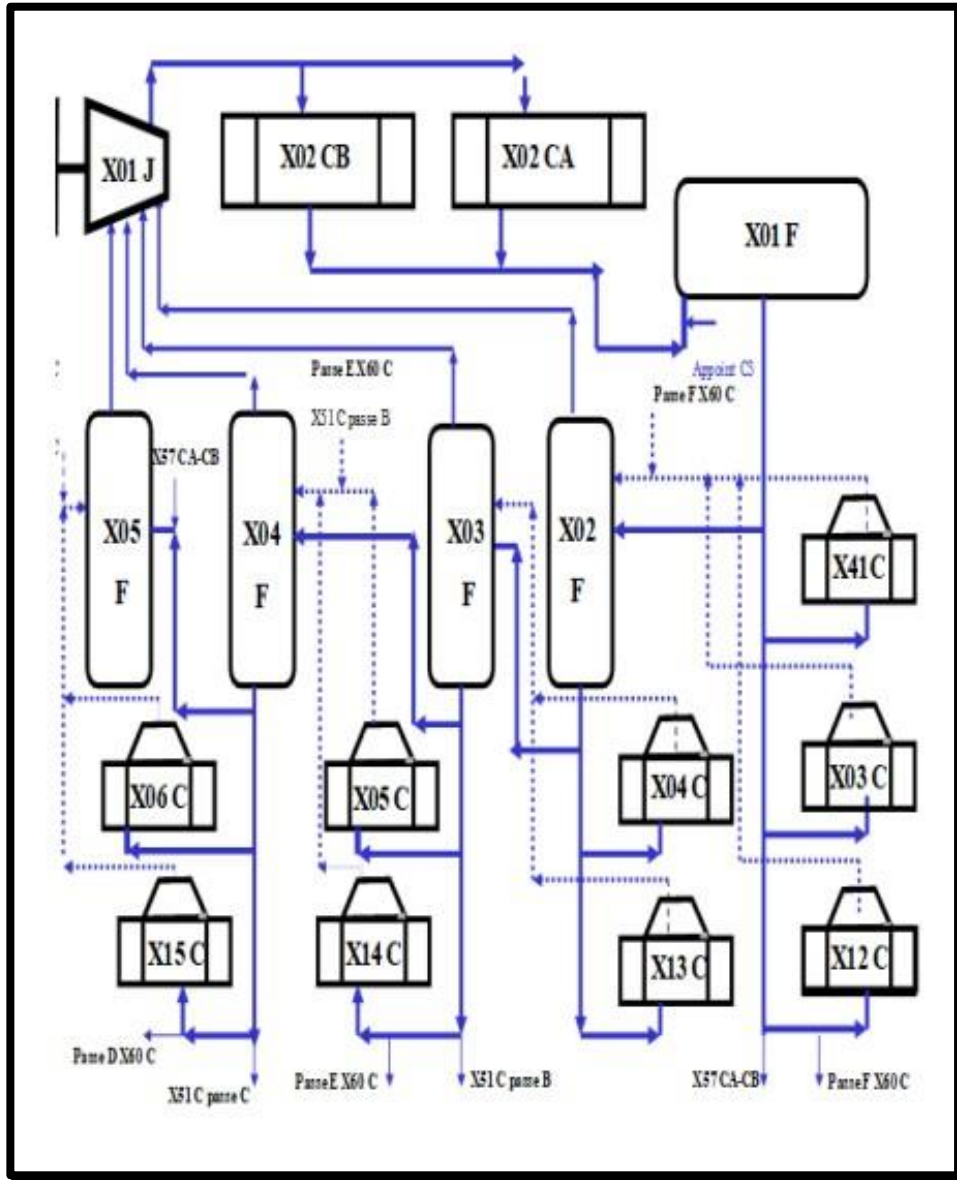
[31] :H. Sadoki, Rapport sur lessivage chimique du rechauffeur de saumure du dessaleur, 2010D(2023)

[32] : El Bacouri Hicham « Etude de l'inhibition de corrosion de l'acier doux au carbone en milieu acide orthophosphorique par un antibiotique organique ». Mémoire de DESA, Université Mohammed premier, faculté des sciences Ouajda (2008)

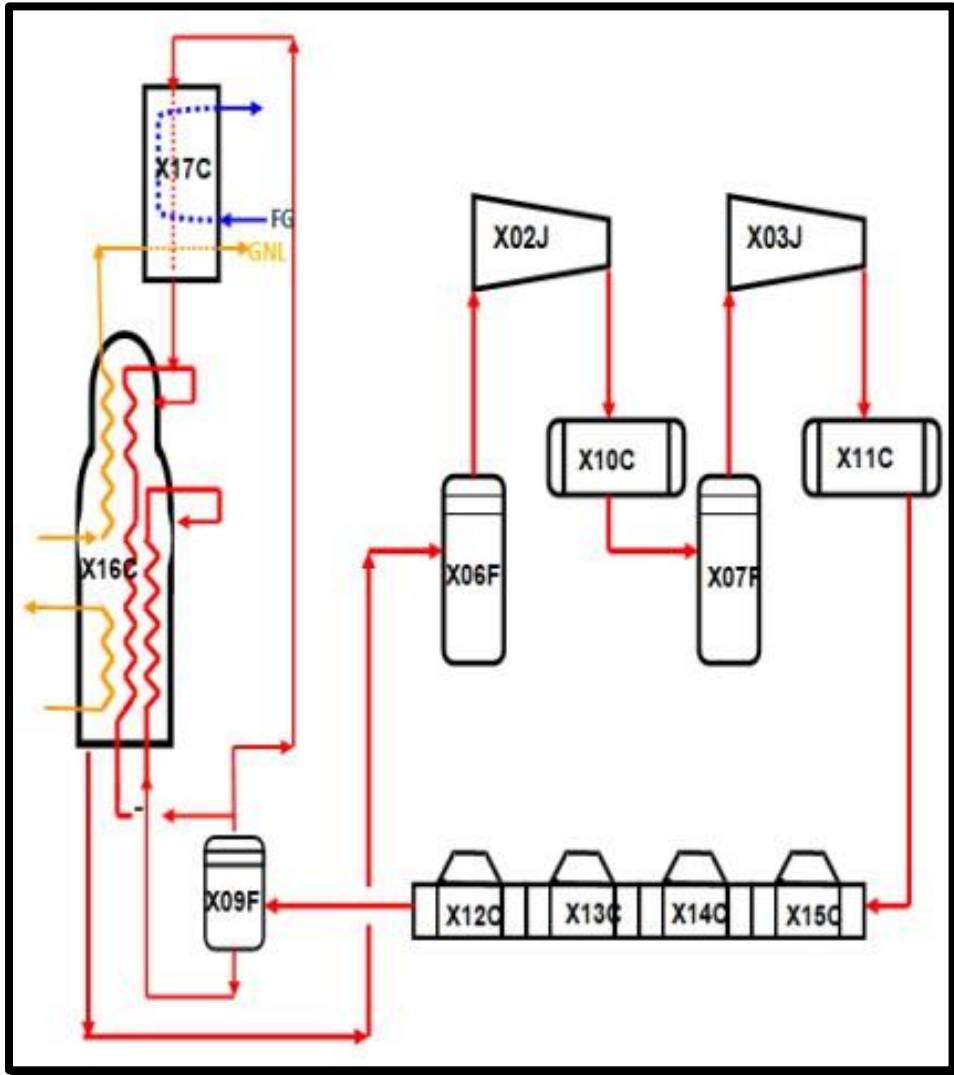
Annexes



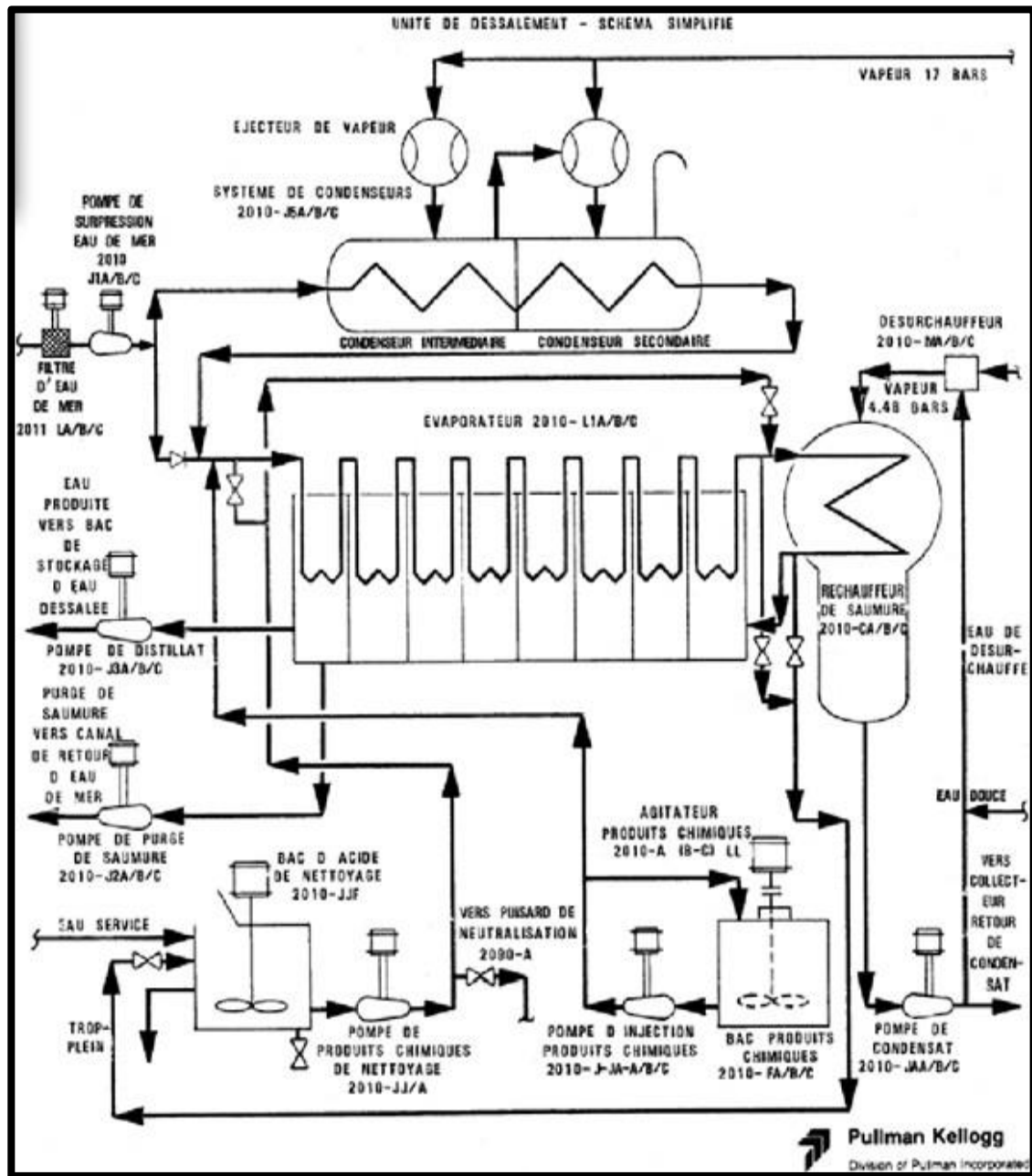
Annexe 1 : Schéma de procédé de Liquéfaction.



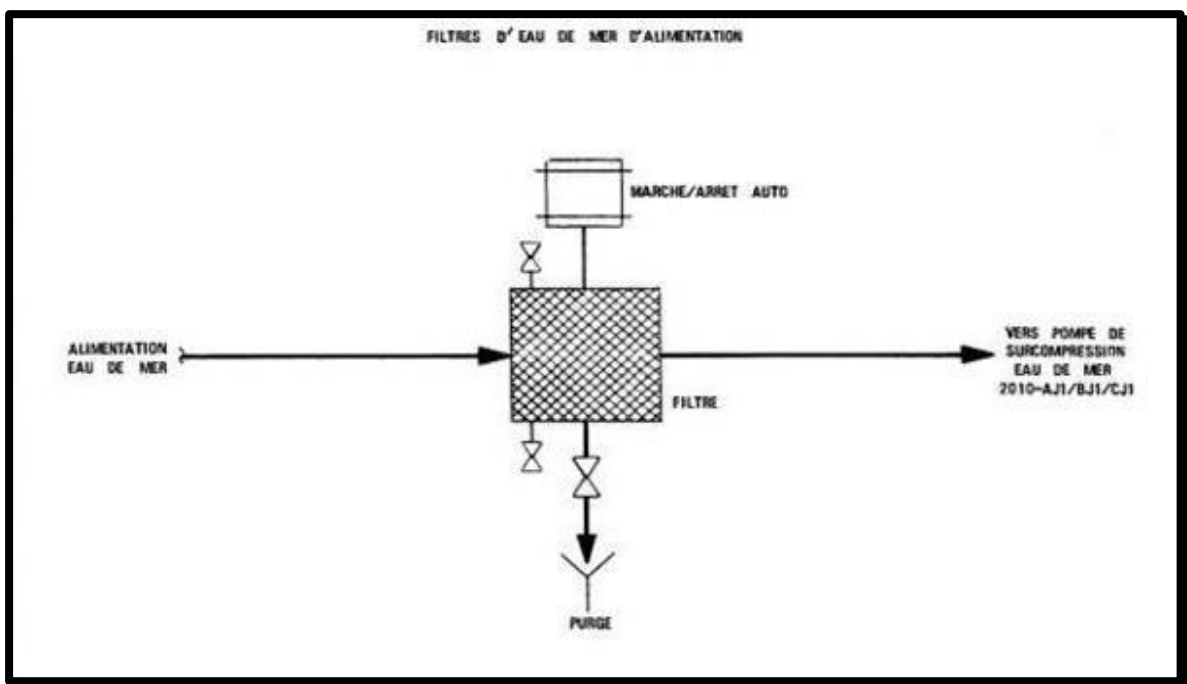
Annexe 2 : Boucle de propane.



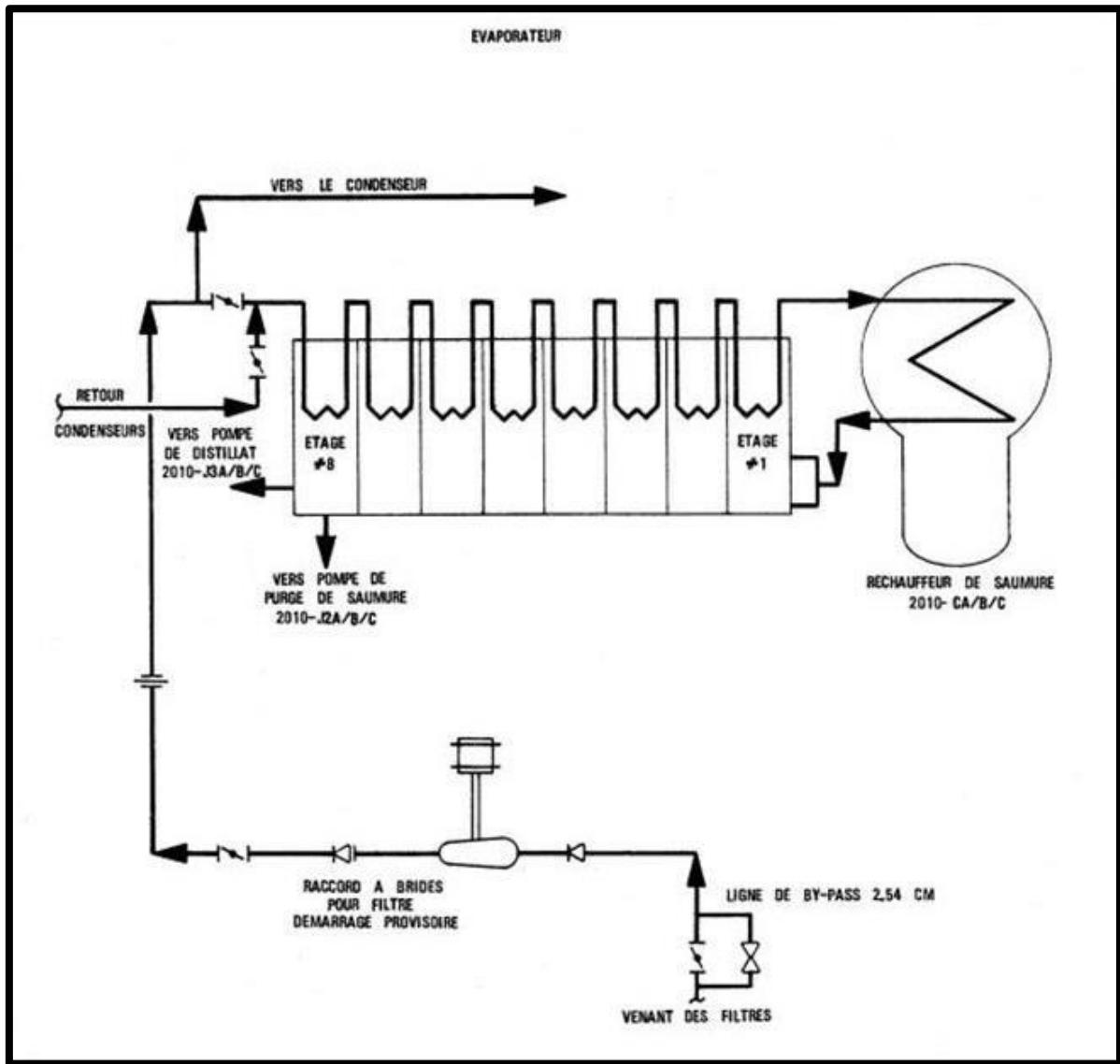
Annexe 3 : Boucle de MCR.



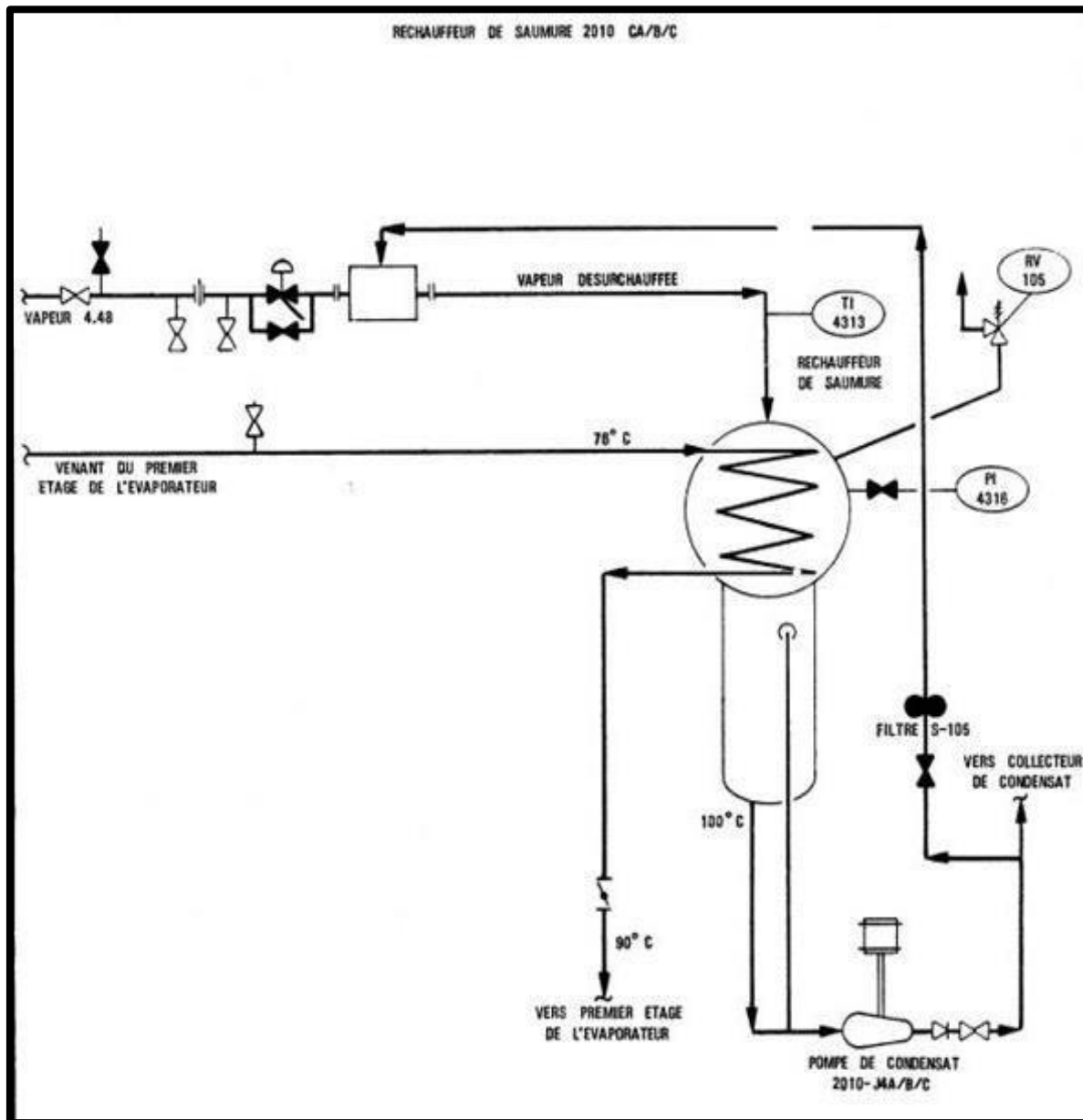
Annexe 4 : Schéma simplifié de l'unité de dessalement.



Annexe 5 : Schéma simplifié d'un filtre d'eau de mer.



Annexe 6 : Schéma simplifié d'un évaporateur.



Annexe 7 : Schéma simplifié d'un réchauffeur de saumure.