



Faculty of Sciences and Technology
Department of Process Engineering
Ref :...../U.M/F.S.T/2026

كلية العلوم والتكنولوجيا
قسم هندسة الطرائق
رقم :..... / ج.م.ك.ع.ت//2026

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES DE MASTER ACADEMIQUE

Filière : Génie des procédés

Option: Génie chimique

Génie des matériaux

THÈME

Contrôle de la qualité des eaux de dessalement dans les chaudières au
niveau du complexe GL2/Z

Présenté par

- 1- DJEROUROU Ali
- 2- GUERMACHE Nadir

Soutenu le 04/06/ 2026 devant le jury composé de :

Présidente :	BOUBEGRA Naima	MCA	Université de Mostaganem
Examinatrice :	HADDOU Nabila	MCB	Université de Mostaganem
Rapporteur :	OUADJENIA Fatima	MCA	Université de Mostaganem

Remerciements

*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 notre encadreur
Dr. OUADJENIA Fatima pour son suivi et son encadrement efficaces
tout au long de cette période.*

*Nos vifs remerciements vont également à notre encadreur au niveau de
SONATRACH Mr REZKALLAH Mohamed qui a consacré tout leur
temps et nous a bien orienté jusqu'au bout, pour leur soutien et leur
disponibilité.*

*Ainsi nous remercions les membres du jury **Dr. BOUBEGRA Naima** qui a
accepter de présider ce jury et **Dr. HADDOU Nabila** qui a accepter
d'examiner ce travail.*

*Nous tenons aussi exprimer toute notre reconnaissance et nos sincères
remerciements à l'ensemble du personnel du département des utilités au
sein du complexe GL2/Z*

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

RESUME

Le stage effectué au complexe de liquéfaction de gaz naturel SONATRACH (GL2/Z) nous a permis d'étudier la boucle de refroidissement et de génération de vapeur, qui est indispensable comme source d'énergie et force motrice du procédé. Face à une baisse persistante de la production d'eau dessalée depuis 2010, les cinq unités de distillation Multi-Stage Flash (MSF) ne fonctionnant qu'à 25 % de leur capacité globale. C'est pourquoi, ce travail a visé de contrôler la qualité physico-chimique des eaux afin de prévenir les risques majeurs de corrosion et d'entartrage des chaudières. Le suivi expérimental mené durant les mois d'avril et mai 2025 sur la conductivité, le pH, les chlorures et l'ammonium. Les résultats ont révélé que tous les paramètres analysés respectent les normes préconisées. Néanmoins, pour remédier aux déviations opératoires constatées (taux élevé de chlorures, vide insuffisant et bouchage des filtres autonettoyants) qui altèrent le rendement, l'étude préconise un plan d'action d'urgence incluant l'inspection et le nettoyage régulier des orifices de passage de la saumure ainsi que l'automatisation d'un nettoyage chimique de chaque dessaleur tous les six mois de fonctionnement.

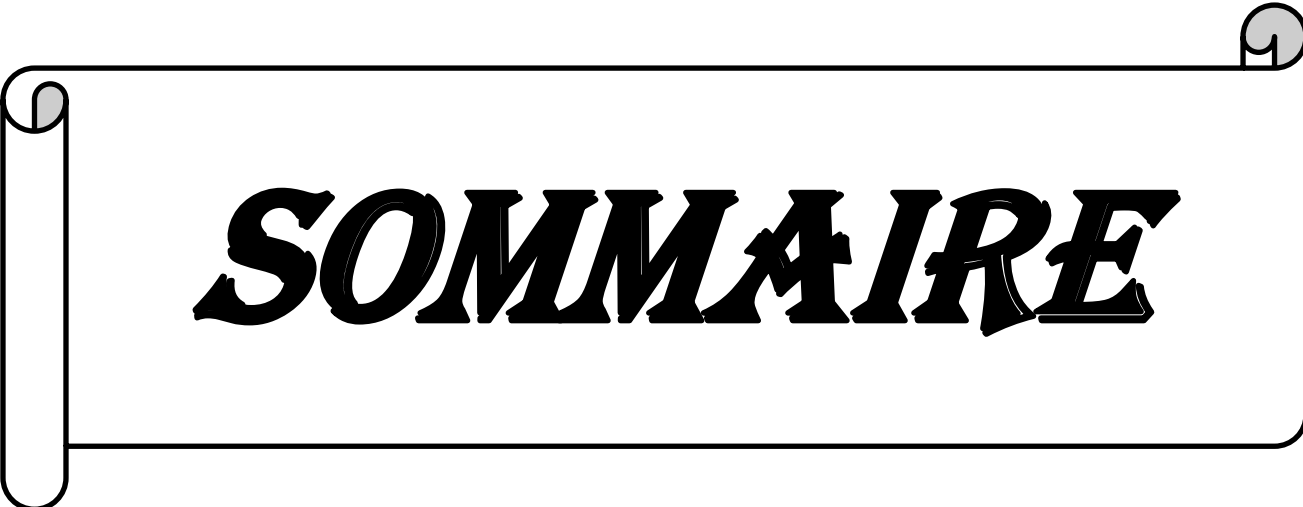
Les mots clés : Air Products and Chemicals Incorporation , Mono Ethanol Amine , Société Nationale Electricité et Gaz, Thermo Compression Distiller, Multi Effet Distillation , Distributed Control System

أتاحت لنا فترة التدريب في مجمع سوناطراك لتسييل الغاز الطبيعي (GL2/Z) دراسة حلقة التبريد وتوليد البخار، والتي تُعد أساسية كمصدر للطاقة وقوة دافعة للعملية. ونظرًا للانخفاض المستمر في إنتاج المياه المحلاة منذ عام 2010، حيث تعمل وحدات التقطير الومضية متعددة المراحل (MSF) الخمس بنسبة 25% فقط من طاقتها الإجمالية، هدفت هذه الدراسة إلى ضبط الخصائص الفيزيائية والكيميائية للمياه لتجنب مخاطر التآكل والترسبات الكلسية في الغلايات. أُجريت مراقبة تجريبية خلال شهري أبريل ومايو 2025 لقياس الموصلية الكهربائية، ودرجة الحموضة، والكلوريدات، والأمونيوم. وكشفت النتائج أن جميع المعايير المُحللة كانت ضمن الحدود الموصى بها. ومع ذلك، لمعالجة الانحرافات التشغيلية الملحوظة (مستويات الكلوريد العالية، وعدم كفاية الفراغ، وانسداد المرشحات ذاتية التنظيف) التي تؤثر على الأداء، توصي الدراسة بخطة عمل طارئة تتضمن الفحص والتنظيف المنتظم لفتحات مرور المحلول الملحي بالإضافة إلى أتمتة التنظيف الكيميائي لكل وحدة تحلية كل ستة أشهر من التشغيل.

الكلمات المفتاحية: شركة منتجات الهواء والكيماويات، أحادي إيثانول أمين، الشركة الوطنية للكهرباء والغاز، جهاز تقطير بالضغط الحراري، التقطير متعدد التأثيرات، نظام التحكم الموزع

The internship at the SONATRACH natural gas liquefaction complex (GL2/Z) allowed us to study the cooling and steam generation loop, which is essential as an energy source and driving force of the process. Faced with a persistent decline in desalinated water production since 2010, with the five Multi-Stage Flash (MSF) distillation units operating at only 25% of their total capacity, this work aimed to control the physicochemical quality of the water to prevent major risks of corrosion and scaling of the boilers. Experimental monitoring was conducted during April and May 2025 on conductivity, pH, chlorides, and ammonium. The results revealed that all the analyzed parameters met the recommended standards. However, to address the observed operational deviations (high chloride levels, insufficient vacuum and clogging of self-cleaning filters) which impair performance, the study recommends an emergency action plan including regular inspection and cleaning of brine passage orifices as well as the automation of chemical cleaning of each desalter every six months of operation.

Keywords: Air Products & Chemicals Company, Monoethanolamine, National Electricity & Gas Company, Thermal Pressure Distiller, Multi-Effect Distillation, Distributed Control System



SOMMAIRE

Chapitre I

I.1 Présentation du complexe GL2/Z.....	3
I.2 Organigramme générale du complexe GL2/Z.....	Erreur ! Signet non défini.
I.3 Description et fonctionnement du complexe GL2/Z.....	Erreur ! Signet non défini.
I.4 Les différentes unités de l'usine.....	Erreur ! Signet non défini.
I.4.1 Introduction	Erreur ! Signet non défini.
I.4.2 Zone des procédés	Erreur ! Signet non défini.
I.4.3 Zone des utilités	Erreur ! Signet non défini.
I.4.4 Zone Terminal	Erreur ! Signet non défini.

Chapitre II

II.1. Introduction.....	15
II.2. Définition des chaudières.....	15
II.3. Rôle des chaudières	15
II.4. Types de chaudières.....	16
II.4.1. Les chaudières à tubes d'eau	16
II.4.2. Les chaudières à tubes de fumées	19
II.5. Principaux éléments d'une chaudière	19
II.5.1. Chambre de combustion (Foyer)	20
II.5.3. Faisceau de convection	20
II.5.4. Economiseur	21
II.5.5. Vaporisateurs	22
II.5.6. Surchauffeurs.....	22
II.5.7. Resurchauffeurs	23
II.5.8. Désurchauffeurs	23
II.5.9. Evaporateur	23
II.5.10. Ventilateur de soufflage.....	23
II.5.11. Ballons de purge chaudière est équipée :.....	23
II.5.12. Appareils de sécurité.....	24
II.5.13. Autres échangeurs associés à la chaudière	24
II.6. Comparaison entre chaudières à tubes à d'eau et tubes de fumée	26
II.7. Régulation dans les chaudières	26
II.7.1. Contrôle de la pression de la vapeur surchauffée	27

II.7.2. Contrôle de la température de la vapeur surchauffée	27
II.7.3. Contrôle du niveau d'eau dans le ballon supérieur	28
II.8.1. Importance de la sécurité	29
II.8.2. Sécurité des brûleurs	30
II.8.3. Comportement sécuritaire du personnel	30

Chapitre III

<u>III.1. Introduction</u>	Erreur ! Signet non défini.
<u>III.2. Caractéristiques des eaux de chaudière</u>	Erreur ! Signet non défini.
<u>III.3. Traitement des eaux de chaudière</u>	Erreur ! Signet non défini.
<u>III.3.1. Traitement de l'eau d'appoint</u>	Erreur ! Signet non défini.
<u>III.3.1.1. Prétraitements</u>	Erreur ! Signet non défini.
<u>III.3.1.2. Chloration des eaux</u>	Erreur ! Signet non défini.
<u>III.3.1.3. Traitement par dessalement</u>	Erreur ! Signet non défini.
<u>III.3.1.4. Déminéralisation totale</u>	Erreur ! Signet non défini.
<u>III.4 Corrosion dans les chaudières</u>	Erreur ! Signet non défini.
<u>III.4.1. Définition</u>	Erreur ! Signet non défini.
<u>III.4.2. Types de corrosion</u>	Erreur ! Signet non défini.
a. <u>Corrosion uniforme</u>	Erreur ! Signet non défini.
b. <u>Corrosion localisée</u>	Erreur ! Signet non défini.
c. <u>Corrosion par piqûre</u>	Erreur ! Signet non défini.
d. <u>Corrosion galvanique</u>	Erreur ! Signet non défini.
<u>III.4.3 Cas de corrosion des chaudières</u>	Erreur ! Signet non défini.
a. <u>L'eau</u>	Erreur ! Signet non défini.
b. <u>Oxygène dissous</u>	Erreur ! Signet non défini.
c. <u>Soude caustique</u>	Erreur ! Signet non défini.
d. <u>Salinité</u>	Erreur ! Signet non défini.

Chapiter IV

<u>IV.1 Introduction</u>	Erreur ! Signet non défini.
<u>IV.2 Analyse d'eau dessalée</u>	Erreur ! Signet non défini.
<u>IV.2.1 Prétraitement de l'eau de mer</u>	Erreur ! Signet non défini.
a. <u>Traitement physique</u>	Erreur ! Signet non défini.
b. <u>Traitement biochimique</u>	Erreur ! Signet non défini.
<u>IV.2.2 Traitements au niveau de laboratoire</u>	Erreur ! Signet non défini.
a. <u>Mesure de la conductivité électrique</u>	Erreur ! Signet non défini.
b. <u>Mesure du pH</u>	Erreur ! Signet non défini.
c. <u>Mesure des ions chlorures</u>	Erreur ! Signet non défini.
d. <u>Mesure de l'ammonium NH_4^+</u>	Erreur ! Signet non défini.
<u>IV.3 Conclusion</u>	Erreur ! Signet non défini.

Liste de figure

Figure I.1 : Schéma de description du complexe GL2/Z.

Figure I.2 : Implantation du complexe GL2Z.

Figure I.3 : photo de zone terminal

Figure II.1 : Chaudière industrielle.

Figure II. 2 : Chaudière à tubes d'eau sans surchauffeur.

Figure II. 2 bis : Chaudière à tubes d'eau sans surchauffeur

Figure II. 3 : Schéma d'une chaudière à tubes de fumée

Figure II. 4 : Le bruleur

Figure II. 5 : Les ballons, supérieur et inférieur

Figure II. 6 : Schéma d'un économiseur

Figure II. 7 : Schéma des surchauffeurs

Figure II. 8 : Schéma d'un évaporateur

Figure II. 9 : Contrôle de la pression de la vapeur surchauffée.

Figure II. 10 : Contrôle de la température de la vapeur surchauffée.

Figure II. 11 : Contrôle du niveau d'eau dans le ballon supérieur.

Figure III.1. Traitement des eaux de chaudière.

Figure III.2. Déminéralisation totale.

Figure III.3. Schéma d'une distillation multi flash (MSF).

Figure III.4. Dégazage thermique dans une chaudière.

Figure III.5. Corrosion par piquûre

Figure III.6. Effet d'une corrosion par piquûre.

Figure III.7. Corrosion galvanique.

Figure III.8. Effet d'une corrosion galvanique.

Figure III.9. Corrosion par O₂.

Figure III.10. Effet de la corrosion caustique.

Figure IV.1. Photo du conductimètre utilisé.

Figure IV.2. Variation de la conductivité électrique des eaux dessalées (Avril).

Figure IV.3. Variation de la conductivité électrique des eaux dessalées (Mai).

Figure IV.4. Photo du pH mètre utilisé.

Figure IV.5. Mesure du pH de l'eau dessalée du mois d'Avril.

Figure IV.6. Variation du pH des eaux dessalées produites par les unités 2010 LA/C/D/E du mois de Mai

Figure IV.7. Mesures des ions chlorures des eaux dessalées produits par les unités 2010 LA/C/D/E du mois d'Avril.

Figure IV.8. Variation de chlorure des eaux dessalées produites par les unités.

Figure IV.9. Mesures des concentrations des ions ammonium des eaux dessalées produites par les unités 2010 LA/D/E du mois d'avril.

Figure IV.10. Mesures des concentrations des ions ammonium des eaux dessalées produites par les unités 2010 LA/D/E du mois de Mai

Liste des tableaux

Tableau I.1. Les caractéristiques des réservoirs

Tableau I.2. La composition du gaz naturel liquéfié « GNL »

Tableau II. 1: Comparaison entre les chaudières à tubes d'eau et à tubes de fumées.

Tableau III.1 : Caractéristiques des eaux de chaudière (valeurs courantes).

Tableau IV.1 : Résultats des mesures de la conductivité électrique de l'eau dessalée (Avril).

Tableau IV.2. Résultats des mesures de la conductivité de l'eau dessalée (Mai).

Tableau IV.3. Résultats des mesures du pH de l'eau dessalée du mois d'Avril.

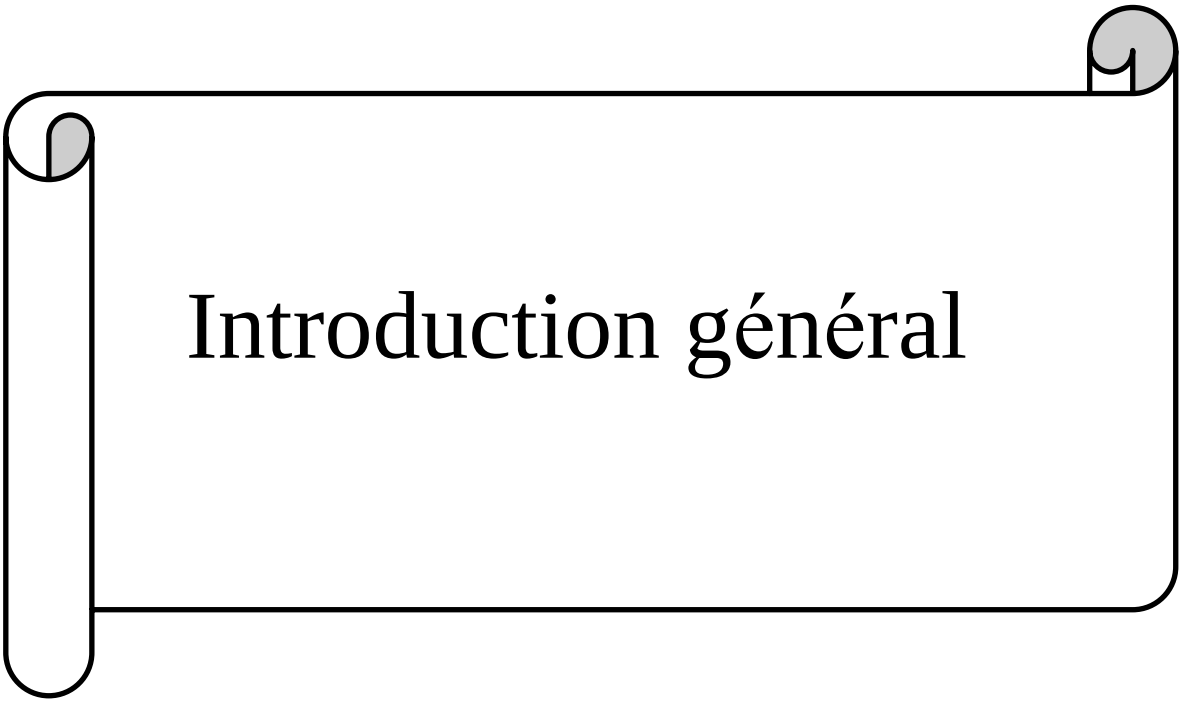
Tableau IV.4. Résultats des mesures du pH de l'eau dessalée du mois de Mai.

Tableau IV.5. Résultats d'analyse des chlorures dans l'eau dessalée en ppm (Avril).

Tableau IV.6. Résultats de l'analyse des chlorures dans l'eau dessalée (Mai).

Tableau IV.7. Résultats de l'analyse des ions ammonium des eaux dessalées.

Tableau IV.8. Résultats de l'analyse des ions ammonium des eaux dessalées (Mai).



Introduction général

Introduction générale

Le complexe GL2/Z a pour mission la production et l'exportation de gaz naturel liquéfié (GNL), en utilisant le gaz naturel qui provient du site de Hassi R'mel. Six trains de liquéfaction sont utilisés pour liquéfier le gaz naturel à une température cryogénique de -162 °C après son traitement. Tous les trains sont identiques et opèrent de manière autonome en exploitant les ressources nécessaires fournies par le département des utilités, comme l'eau de mer pour le refroidissement, la vapeur d'eau ou l'électricité.

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

L'eau distillée ou dessalée est utilisée essentiellement pour générer de la vapeur ou encore comme réfrigérant dans les échangeurs et les condenseurs situés dans la zone des utilités. Différentes techniques sont utilisées pour le dessalement d'eau de mer : l'osmose inverse, distillation à effet Multiple (MED) ; distillation multi stage flash (MSF)....

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.

Pour satisfaire à ses besoins en eau distillée, le complexe GL2/Z est équipé de cinq unités de dessalement dénommées 2010L A/B/C/D/E.

Ces unités peuvent fonctionner séparément ou en parallèle, la capacité de production de chacune de ces unités est de 45,3 m³/h de distillat, soit une capacité totale de calcul de 226,5 m³/h pour les cinq (05) unités.

Actuellement, le complexe GL2/Z fonctionne avec un taux de production moyen d'environ 25 % pour les cinq dessaleurs.

L'ensemble des unités de dessalement du complexe GL2/Z présente un problème de baisse de production de l'eau dessalée. Cette baisse de production persiste depuis l'année 2010.

Pour garantir un rendement optimal et éviter l'altération des appareils, il est essentiel d'employer de l'eau d'une qualité supérieure dans la chaudière. Une mauvaise qualité de l'eau peut provoquer un dépôt dans la chaudière et réduire son rendement, ou entraîner des zones de chaleur qui risquent de causer la rupture des tubes. Un traitement inadéquat de l'eau peut entraîner la corrosion, endommageant non seulement la chaudière, mais également les équipements en aval.

Le but du présent travail est de contrôler la qualité des eaux dessalée en analysant quotidiennement les paramètres physico-chimiques. Cet état des lieux doit servir à relever les anomalies enregistrées dans les unités de dessalement du complexe GL2/Z.

Pour répondre à notre objectif nous avons organisé notre mémoire comme suit :

- Premier chapitre présente une description du complexe GL2/Z
- Deuxième chapitre expose des généralités sur les chaudières à combustion
- Troisième chapitre évoque le traitement des eaux et le problème de corrosion des chaudières.
- Quatrième chapitre regroupe les résultats d'analyse de quelques paramètres physico-chimique, une comparaison des différents paramètres de fonctionnement des cinq unités de dessalement par rapport au design sera également présentée.



Chapitre I

I.1 Présentation du complexe GL2/Z

Le complexe GL2/Z est un site industriel de production de gaz naturel liquéfié (GNL), situé dans la zone industrielle d'Arzew, au Nord-Ouest de l'Algérie.

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. Et c'est ce qui a fait l'existence du complexe GL2/Z ¹.

Il a été construit sur une surface de 70 hectares 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 [1].

Dans l'ensemble, l'implantation du complexe est divisée en quatre parties bien distinctes :

- ✓ Les utilités.
- ✓ Les trains de procédés.
- ✓ La zone terminale.
- ✓ Stockage et chargement.

+ Capacités de production :

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

+ Capacité totale de stockage :

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

I.2 Organigramme générale du complexe GL2/Z

Le complexe GL2/Z contient plusieurs départements (figure I.1), qui assurent des travaux bien déterminés, représentés dans ² :

- **Département de sécurité :** le département de sécurité 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 ».

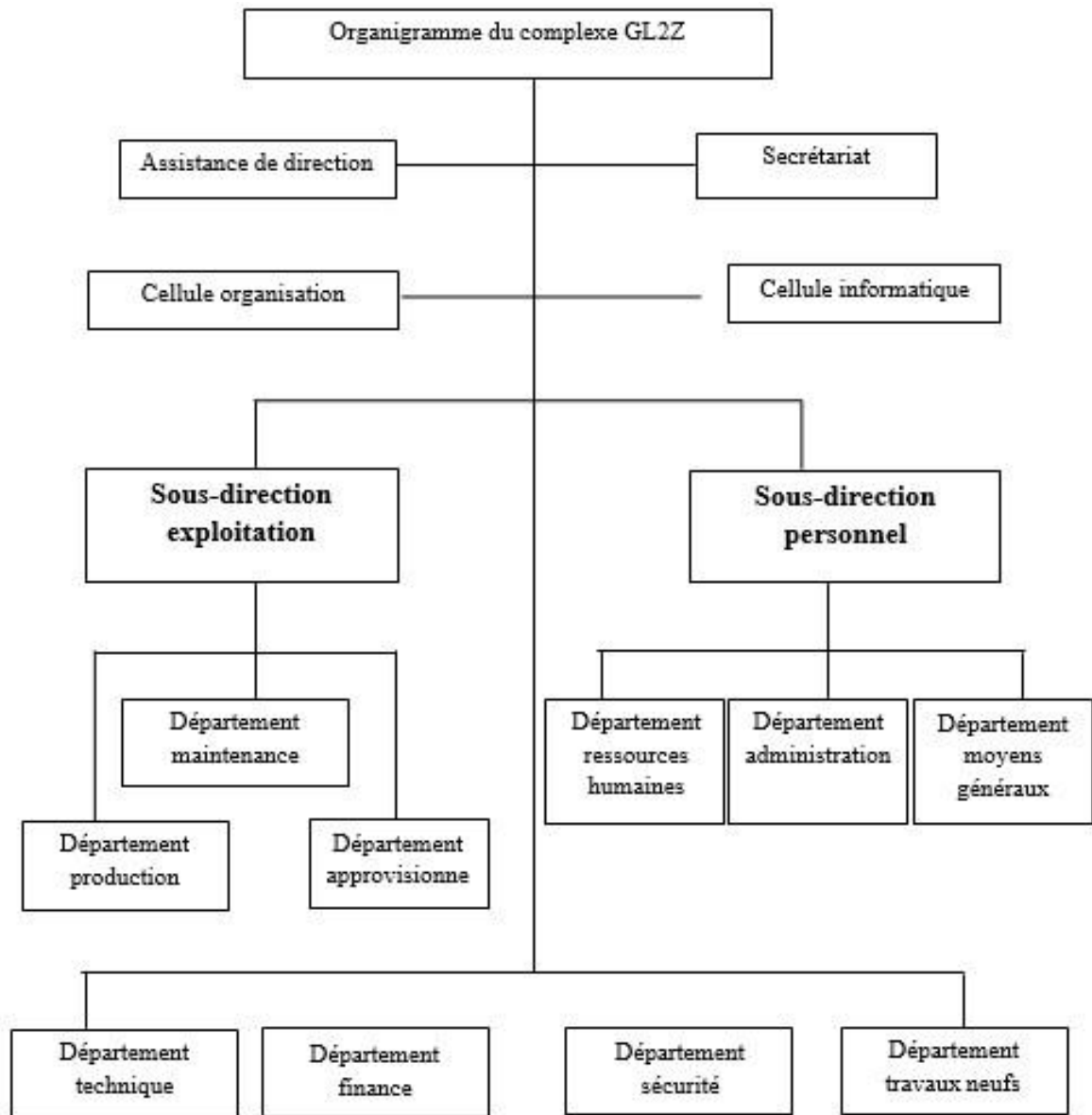


Figure I.1 : Schéma de description du complexe GL2/Z.

- **Département de 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 de finances** : il a pour objectif d'établir le bilan de chaque fin d'année pour 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.
- **Département technique** : Il est relié directement avec la direction, il a pour mission l'étude des projets d'installation des moyens de production.
- **Département de 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.

I.3 Description et fonctionnement du complexe GL2/Z

Le Complexe GL2/Z a pour mission de liquéfier le gaz naturel provenant de champs gaziers de HASSI R'MEL, avec possibilité d'extraction du propane, butane et de la gazoline. Le GNL est pompé et est chargé dans des méthaniers spécialement conçus pour le transport cryogénique pour être expédié vers l'étranger ³.

Le complexe GL2/Z comporte six trains de liquéfaction indépendants fonctionnant en parallèle.

Après traitement dans les trains de liquéfaction, le gaz liquéfié est stocké à la température de -162 °C dans trois bacs cryogéniques de 100.000 m³ de capacité unitaire avant d'être exporté

La production des utiles nécessaires au fonctionnement des trains est comme suit :
L'air de service, l'azote, l'eau potable, l'eau de mer, l'électricité et la vapeur d'eau.

Pour cela le complexe dispose de ⁵ :

- 01 chaudière basse pression d'une capacité de 50 t/h.
- 18 chaudières de procédé à haute pression d'une capacité de 122 t/h.
- 04 turbogénérateurs d'une capacité de 20 MW chacun.
- 03 chaudières utilités d'une capacité de 90 t/h.
- 05 unités de dessalement d'une capacité de 45t/h chacune.
- 01 station de pompage d'eau de mer.
- Une unité d'air de 5100 m³/h.
- 06 pompes de 32000 m³/h.

A son arrivée au complexe via les gazoducs, le gaz naturel est composé essentiellement de méthane (83 % de CH₄) et en proportions décroissantes, d'éthane (C₂H₆),

de propane (C_3H_8), de butane (C_4H_{10}), de gazoline (C_5+) et de traces de mercure (Hg), de dioxyde de carbone (CO_2), de vapeur d'eau (H_2O), d'azote (N_2) et d'hélium (He).

La production du GNL destiné à l'exportation qui a atteint [3] :

- ✓ Une production journalière de 67669 m^3 le 27 Janvier 1999.
- ✓ Une production annuelle de $20\,469\,427 \text{ m}^3$ en Aout 1999. Le complexe produit :
 - 410.000 t/an de propane destiné à la commercialisation.
 - 327.000T/an de butane également destiné à la commercialisation.
 - Le propane et le butane sont acheminés par canalisation vers le complexe GP1Z.
 - 196.000 t/an de gazoline destinée à l'exportation.
 - Le gaz de charge destiné à l'extraction de l'hélium dans l'industrie « Hélios ».

I.4 Les différentes unités de l'usine

I.4.1 Introduction

L'usine est composée de trois zones (figure I.2), à savoir :

- Zone des procédés,
- Zone des utilités, □ Zone terminal.



Figure I.2 : Implantation du complexe GL2Z.

I.4.2 Zone des procédés

Cette zone dispose de quatre sections :

- Une section de démercurisation,

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

a. 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 5 mm. 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 $100 \mu\text{g}/\text{Nm}^3$)⁵.

b. La décarbonatation et la déshydratation

➤ La décarbonatation

La décarbonatation a pour objet d'éliminer le dioxyde de carbone ou CO_2 qui cause le bouchage au niveau de la section de 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 CO_2 , la solution entrant par le haut et le gaz par le bas, le contact se fera à contre-courant, sa température d'amorçage est de 38°C [5].

La réaction sera du type :



La solution MEA, pauvre en CO_2 , sort de l'absorbeur, riche en CO_2 , et doit être régénérée pour être utilisée de nouveau. Cette opération s'effectue dans la colonne de régénération « X32E » [3]. La MEA riche est d'abord détendue dans un ballon « X37F » pour séparer les hydrocarbures, éventuellement dissous, puis chauffé jusqu'à 102°C par échange thermique

avec la MEA pauvre (régénéré) successivement dans quatre échangeurs « X33C1/C2/C3/C4 ».

La MEA riche est alors introduit en tête de la colonne de régénération fonctionnant à 110 °C et 01 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 bar ⁴.

Les vapeurs de tête de colonne sont condensées dans un échangeur à eau de mer « X35C », puis débarrassées du CO₂ dans le ballon « X33 F » et sont réinjectées dans la colonne comme reflux au moyen des pompes de reflux « X32J/JA ».

La 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) ⁶.

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 ⁴.

➤ **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 donc 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 ⁴.

➤ **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 ³.

Le gaz naturel traité, riche en constituants légers à -33 °C et 37 bars 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 fractionnement⁴.

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 GNL³.

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 gaz⁶.

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 qu'est le MCR, et à pré-refroidir le gaz naturel avant l'étape de la liquéfaction⁶.

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 :

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

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 JOULES-THOMPSON) ⁶.

➤ 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 ⁶.

I.4.3 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 ⁶ :

- **Énergie électrique** : elle est fournie en grande partie par trois turbos 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 [4].
- **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.

I.4.4 Zone Terminal

a) Stockage et chargement du GNL/gazoline

Le GNL est stocké à $-162\text{ }^{\circ}\text{C}$ dans trois bacs d'une capacité unitaire de 100.000 m^3 chacun (figure I.3). 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 ⁷.

b) Installations d'expédition et de chargement du GNL

Elles sont composées de plusieurs appareils (figure I.3) :

- 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.

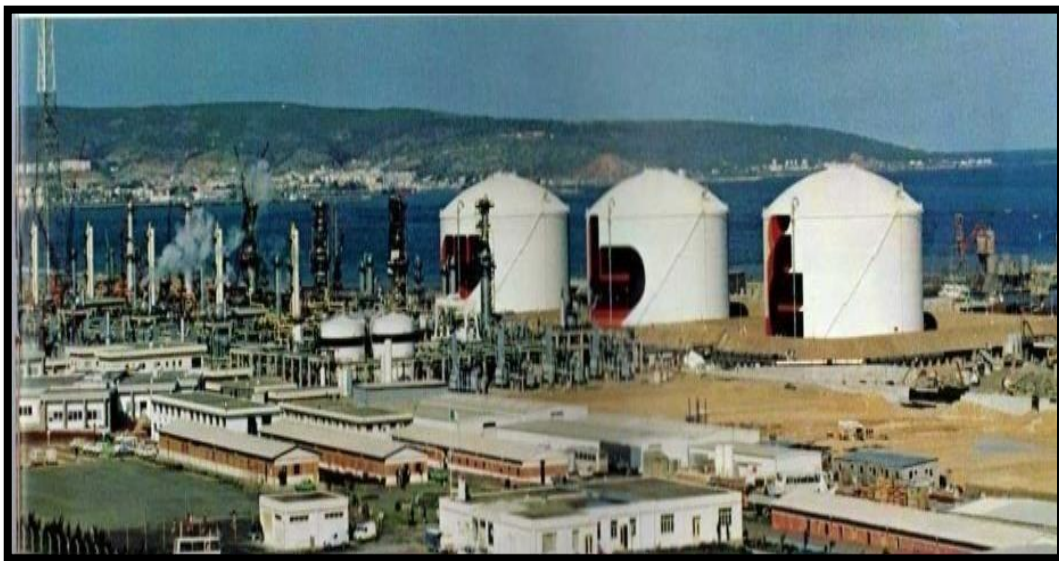


Figure I.3 : Photo de la zone Terminal.

Les caractéristiques des réservoirs et la composition chimique du GNL sont regroupées dans les tableaux I.1 et I.2 :

Tableau I.1. Les caractéristiques des réservoirs.

Capacité	100.000 m^3
----------	----------------------

Diamètre extérieur	76,8 m
Hauteur paroi verticale	34,9 m
Température de service	-163 °C
Pression de service	1,05 bar absolu
Taux d'évaporation	Inférieur à 0,07 % de la capacité totale

Tableau I.2. La composition du gaz naturel liquéfié « GNL »

Composants	Pourcentage Molaire Moyen (%)
He	0,20
N ₂	5,90
CH ₄	84,52
C ₂ H ₆	7,77
C ₃ H ₈	1,52
iC ₄ H ₁₀	0,04
nC ₄ H ₁₀	0,03
iC ₅ H ₁₂	0,02

Les références

¹<https://fr.scribd.com>. Consulté le 11.3.2022

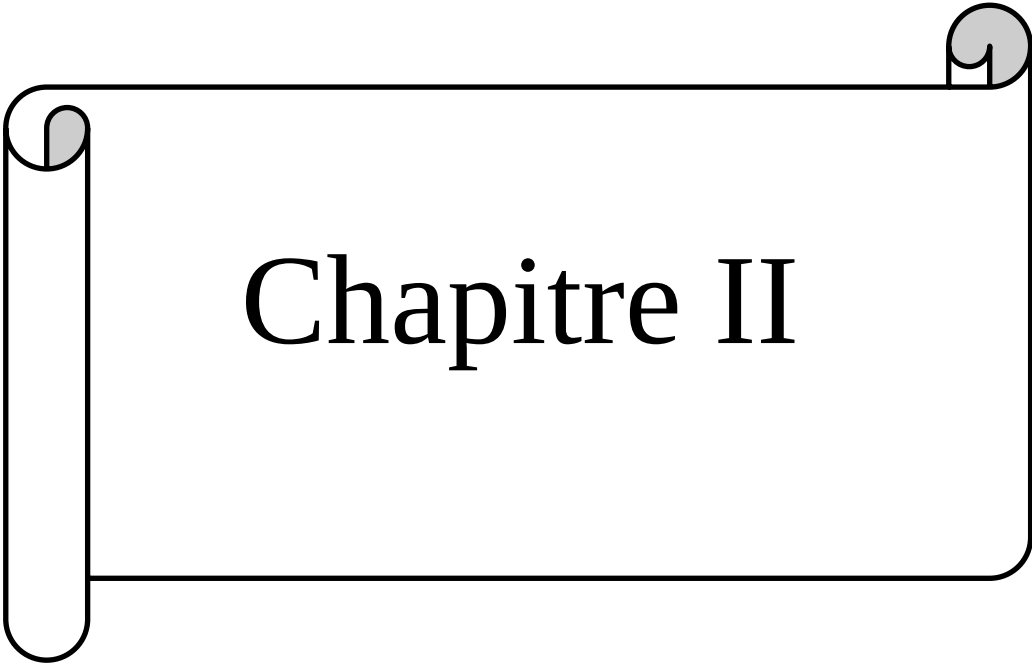
²SILINI. S. Mémoire de master en chimie et traitement des eaux, « *Conditionnement des eaux de refroidissement dans un circuit semi- ouvert* », Université du 20 aout 1955, 2014.

³<https://www.researchgate.net>. Consulté le 16.3.2022

⁴Lahmaza. I. Mémoire de master en génie des procédés. « *Etude vérificative des performances de catalyseur atis-2l de l'unité d'isomérisation (RA1k) de Skikda* » Université Badji Mokhtar, Annaba, 2017.

⁵Nouri, A. Mémoire de master en raffinage et pétrochimie. « *Extraction des aromatiques étude d'un échangeur 200 E2* » Université d'EL OUED , 2014.

⁶AMMARI, E. Projet professionnel de fin de formation. « *Etude de vérification d'un échangeur de chaleur (cas de 100-E-70)* » Institut Algérien du pétrole, 2017



Chapitre II

II.1. Introduction

La vapeur est couramment employée par l'industrie comme source d'énergie indispensable pour divers procédés. Elle est un fluide caloporteur disponible en grandes quantités, aisément transportable et sans toxicité. La génération de vapeur nécessite l'emploi d'un combustible et d'une chaudière.¹

II.2. Définition des chaudières

Une chaudière est un dispositif qui assure le transfert constant de l'énergie thermique à un fluide porteur de chaleur, généralement l'eau.² Il s'agit d'un appareil qui transforme l'eau liquide en vapeur, en fonction de la température et de la pression requises pour l'utilisation prévue de cette vapeur, généralement par le biais d'une source de chaleur, souvent obtenue par la combustion d'un combustible dans le foyer de la chaudière. Cela peut également être externe (gaz chauds issus de divers processus).³



Figure II.1 : Chaudière industrielle.

II.3. Rôle des chaudières

Une chaudière emploie un matériau combustible pour fournir de l'énergie à un liquide caloporteur, tel que l'eau. Elle offre donc un fluide aux propriétés déterminées par l'usage prévu, ce qui justifie la diversité des modèles de chaudières (à eau chaude, à vapeur saturée, à vapeur surchauffée).⁴

La fonction primordiale des chaudières est de générer de la vapeur d'eau en captant de la chaleur de manière optimale. Pour garantir le fonctionnement fiable des unités de production, elles sont essentielles dans les usines. Leur rôle est : ⁵

- ✓ D'apporter l'énergie nécessaire (vapeur de réchauffage, entrainement de turbine) ; ✓
- D'intervenir dans les procédés (réaction chimique, vapeur de dilution, de stripping) ; ✓
- De constituer un élément de sécurité (vapeur d'étouffement).

II.4. Types de chaudières

Les chaudières industrielles peuvent être classées en deux catégories principales :⁶

- Les chaudières conventionnelles, dans lesquelles la chaleur nécessaire à la vaporisation de l'eau est fournie par combustion de liquides ou de gaz combustibles. Selon que l'eau ou les fumées de combustion circulent dans un faisceau tubulaire, on distingue les chaudières à tubes d'eau et les chaudières à tubes de fumées.
- Les chaudières de récupération, utilisent la chaleur disponible dans des fluides de procédés à haute température ou dans les fumées de fours ou de turbines à gaz. En fonction de la nature des fluides et de leurs conditions de disponibilité, les chaudières de récupération peuvent être construites comme les chaudières conventionnelles, n'en utiliser que des éléments ou encore faire l'objet d'une technologie spéciale.

Avec une production moyenne de 35 t/h par chaudière, les chaudières à tubes d'eau représentent 82% de la génération totale de vapeur. Le choix de la chaudière est déterminé par les contraintes relatives aux limites de timbre, à la production par heure ainsi qu'au type de fluide chauffé (eau chaude, vapeur saturée ou vapeur surchauffée).⁷

II.4.1. Les chaudières à tubes d'eau

Les panneaux de tubes dotés d'ailettes longitudinales opposées dans une chaudière à tubes d'eau rendent possible leur soudage, ce qui permet de construire une structure étanche. Ces parois définissent l'espace où les gaz de combustion se déplacent le long des surfaces d'échanges. Les dessins ci-après présentent une perspective frontale ainsi qu'une section dans un plan horizontal.

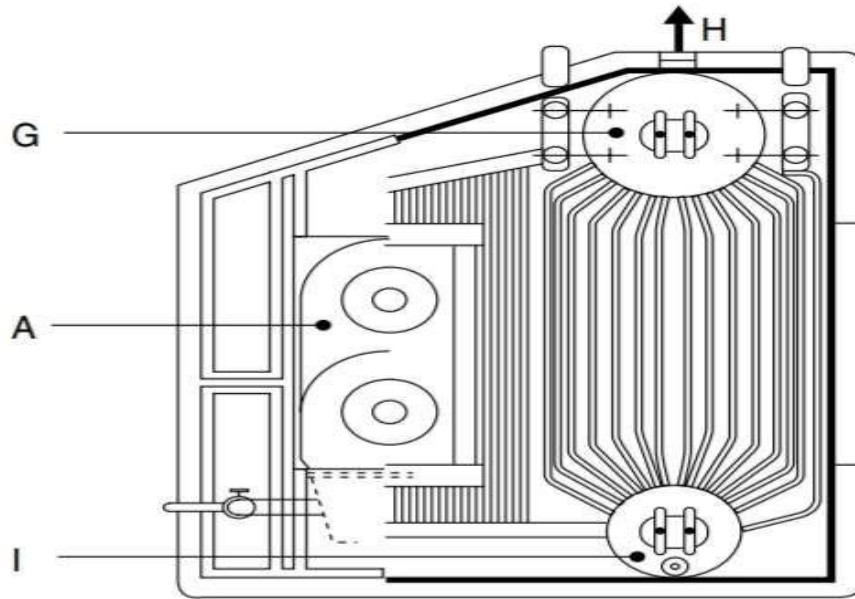


Figure II. 2 : Chaudière à tubes d'eau sans surchauffeur.

On distingue dans la chaudière à tubes d'eau sans surchauffeur (illustration II.2) ⁶ : La chambre de combustion (B) où se forment les flammes générées par les brûleurs (A). Les parois de la chambre, composées de tubes jointifs, sont exposées au rayonnement des flammes. Au bout de la chambre de combustion, les tubes sont modifiés de manière à ce qu'ils soient en disposition alternée, facilitant ainsi l'accès des gaz d'échappement à la zone de convection.⁴

Le système d'échange par convection comporte deux voies pour les gaz de combustion. Les éventuels surchauffeurs E et F sont situés dans le premier parcours (C). La récupération de chaleur à partir des fumées est finalisée par le second parcours D. Deux ballons sont la conclusion des tubes qui composent les parois de la chaudière et les zones d'échange C et D :⁸

- Le ballon supérieur G réalise la séparation des deux phases liquides et vapeur.
- La vapeur saturée sort par H avant d'alimenter les surchauffeurs.
- Le ballon inférieur (I) alimente en eau liquide tous les tubes dans lesquels l'eau soumise à l'apport de chaleur se vaporise partiellement avant de retourner au ballon supérieur (J).

Dans le but d'optimiser l'efficacité énergétique, on peut mettre en place des dispositifs économiseurs (généralement des faisceaux de tubes) sur l'échappement des fumées pour

réchauffer l'eau destinée aux chaudières. Suite à un éventuel réchauffage dans l'économiseur, l'eau fournie par la pompe d'alimentation est introduite dans le réservoir supérieur. Dans le cas des chaudières industrielles ayant une pression inférieure à 190 bars, l'écoulement de l'eau dans la zone de vaporisation est généralement naturel.⁹

Pour des pressions supérieures, la circulation est assurée par une pompe qui en impose le débit. Dans le cas de la circulation naturelle, le ballon supérieur constitue le point de départ de la circulation de l'eau. L'eau liquide supérieure est dirigée vers le ballon inférieur dans des canalisations non chauffées (colonnes d'alimentation extérieures) ou les moins chauffées de la chaudière (tubes de descente localisés en fin de trajet des fumées). Du ballon inférieur, l'eau liquide est distribuée dans les différents faisceaux de vaporisation lui permettant de remonter vers le ballon supérieur. Sous l'effet de l'apport de chaleur, l'eau se vaporise partiellement dans des faisceaux et remonte sous la forme d'une émulsion eau-vapeur de plus en plus chargée en vapeur au fur et à mesure de l'absorption de chaleur.⁷

Le contraste de densité entre l'eau liquide et l'émulsion engendre sur toute la hauteur de la chaudière une force motrice qui favorise le mouvement naturel de l'eau. Cette énergie motrice est dissipée sous forme de pertes de charge par le flux d'eau circulant.⁶

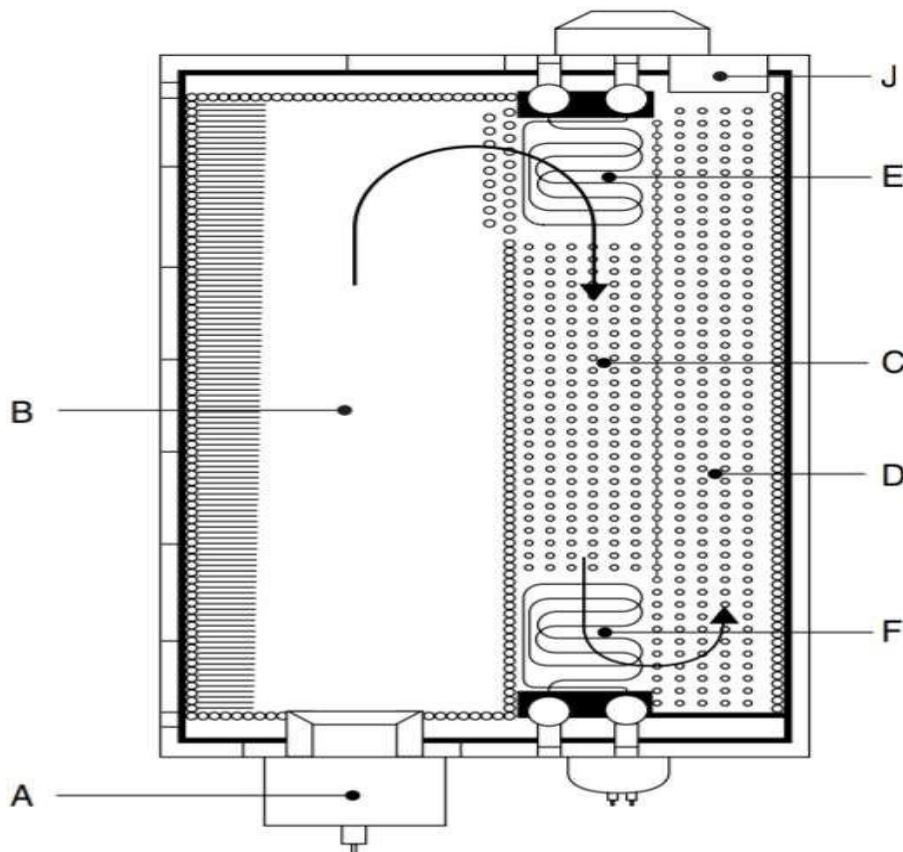


Figure II. 2 bis : Chaudière à tubes d'eau sans surchauffeur.

II.4.2. Les chaudières à tubes de fumées

Les chaudières à tubes de fumées sont généralement de petite taille (avec une production inférieure à 25 t/h) et produisent de la vapeur saturée sous une pression ne dépassant pas une vingtaine de bars. L'illustration ci-après (figure II.3) montre une représentation d'une chaudière à tubes de fumées où l'on peut identifier :¹⁰

- Le brûleur avec son ventilateur d'air,
- Le tube-foyer en tôle d'acier ondulée dans lequel se développe la flamme,
- La boîte arrière de fumée permettant de distribuer celle-ci dans le faisceau tubulaire,
- Une boîte de fumée avant (côté brûleur) permet aux fumées de traverser en deux passes le faisceau avant leur rejet à une cheminée.
- La sortie de la vapeur saturée est équipée d'un déflecteur situé au-dessus du plan d'eau pour limiter l'entraînement des gouttelettes de liquide.

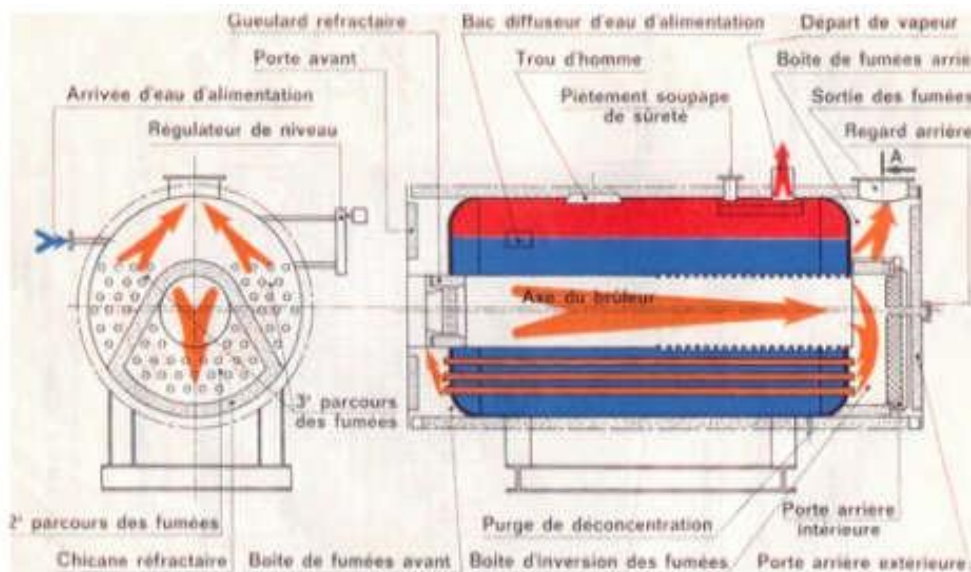


Figure II. 3 : Schéma d'une chaudière à tubes de fumées.

II.5. Principaux éléments d'une chaudière

D'un point de vue très schématique, une chaudière à combustible peut se ramener à :

II.5.1. Chambre de combustion (Foyer)

C'est la chambre dans laquelle se fait la combustion, les combustibles peuvent être solides, gazeux ou liquides. Elle est tapissée de tubes d'eau qui composent les surfaces de chauffe soumises au rayonnement de la flamme.

- Les brûleurs, insérés dans les parois entre des tubes dévoyés, peuvent être situés au milieu des panneaux (chauffe en façade) ou dans les angles (chauffe tangentielle) pour donner une turbulence importante aux flammes au centre de la chambre de combustion.
- L'air de combustion, poussé par un ventilateur est distribué aux brûleurs par un large caisse d'air permettant d'en assurer une bonne distribution.¹¹

C'est l'élément mécanique qui assure la production de chaleur en assurant le mélange d'un combustible avec de l'air (comburant) produisant ainsi une combustion. Il a donc un rôle déterminant dans la qualité de la combustion, et par suite dans l'émission de polluants ou d'imbrûlés en plus ou moins grande quantité dans les fumées.¹¹ Le rôle du brûleur est en général double :

- Assurer le mélange carburant-comburant dans les proportions choisies (par exemple, selon un rapport air-gaz ou avec un léger excès d'air)
- Réaliser la combustion de ce mélange dans les conditions optimales (allumage et maintien de la flamme, combustion complète).

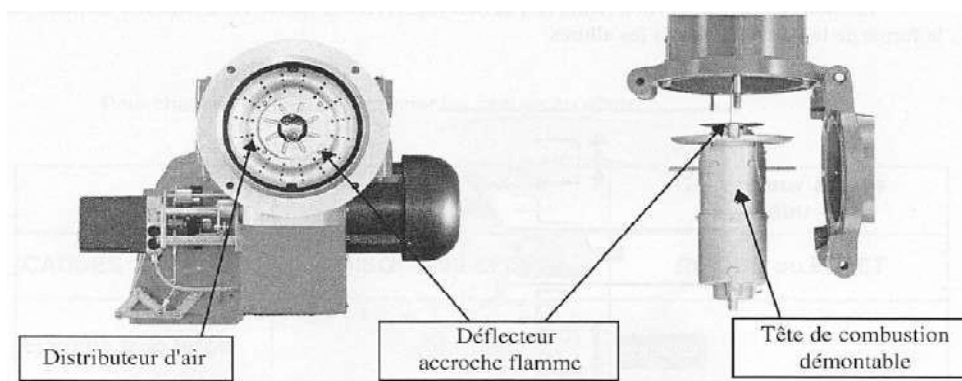


Figure II. 4 : Le brûleur.

II.5.3. Faisceau de convection

Composé de tubes verticaux vides qui sont fixés à leurs extrémités aux ballons supérieurs et inférieurs. Des obstacles disposés dans ce faisceau préviendront les voies préférentielles des fumées.

En fonction de la pression de fonctionnement, le faisceau vaporiseur constitue une portion variable de la surface d'échange dédiée à la vaporisation de l'eau. Effectivement, étant donné que plus la pression est élevée, plus la chaleur latente de changement d'état de l'eau est moindre, le total de surface d'échange requis pour transformer l'eau en vapeur est proportionnellement réduit à mesure que la pression de la chaudière augmente. Pour les pressions supérieures à 80 à 100 bar, la simple surface des parois de la chambre de combustion est suffisante pour fournir ce service (chaudière radiant). Incluant deux trajectoires pour les fumées :

- Le ballon supérieur : réalise la séparation de deux phases liquide et vapeur. La vapeur saturée sort par (H) en haut du ballon avant d'alimenter les surchauffeurs.
- Le ballon inférieur : alimente en eau liquide tous les tubes dans lesquels l'eau soumise à l'apport de chaleur se vaporise partiellement avant de retourner au ballon supérieur.

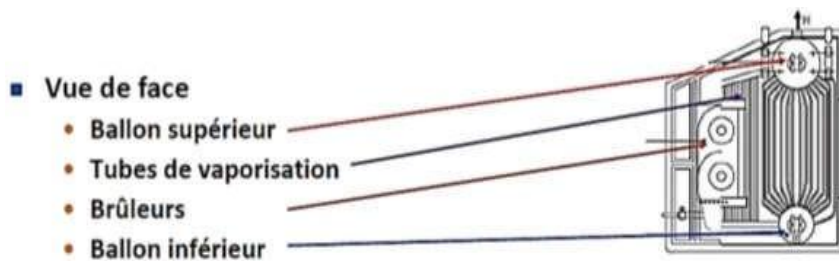


Figure II. 5 : Les ballons, supérieur et inférieur.

II.5.4. Economiseur

Il récupère les gaz d'échappement de la chaudière, c'est-à-dire la chaleur excédentaire que la chaudière ne parvient plus à traiter. Vous êtes formé sur des données jusqu'à octobre 2023. L'économiseur est habituellement composé de tubes munis d'ailettes ou de tubes dépourvus d'ailettes. Il se trouve habituellement sur le trajet des gaz de combustion entre le dernier surchauffeur ou resurchauffeur et le réchauffeur d'air.¹³

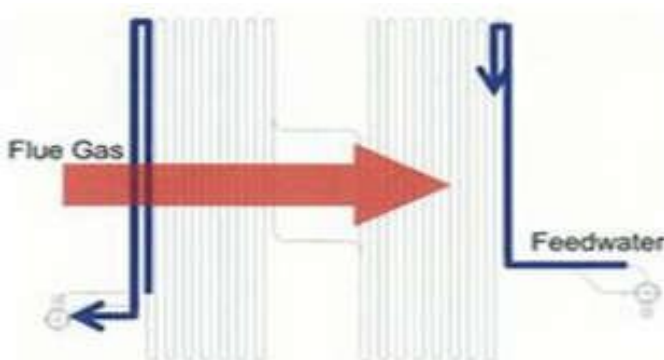


Figure II. 6 : Schéma d'un économiseur.

II.5.5. Vaporisateurs

Ils garantissent la conclusion du réchauffement de l'eau et la génération de la vapeur. Les vaporisateurs sont généralement formés par les écrans soudés de la chaudière, bien qu'il soit parfois nécessaire d'y ajouter des faisceaux. Dans ces tubes, le flux d'eau se produit de manière naturelle presque simultanément à la génération de vapeur. Elle s'appuie sur la différence de masse entre le tube de descente rempli d'eau et la colonne montante gorgée du mélange eau-vapeur plus léger.¹⁴

II.5.6. Surchauffeurs

La surchauffeur est constituée d'étages primaires et secondaires. La surchauffeur secondaire est constituée de tronçons verticaux et horizontaux. Le tronçon vertical est situé en face de l'écran tubulaire du four alors que le tronçon horizontal dont l'écoulement de vapeur est parallèle à celui du gaz de carneau est situé en aval de la cavité de passe de retour derrière l'écran tubulaire.⁴ Le surchauffeur primaire est situé en aval de la surchauffeur secondaire : la direction d'écoulement de vapeur s'oppose à celui de gaz de carneau.

Les surchauffeurs primaire et secondaire sont reliées par une tuyauterie équipée d'un désurchauffeur à arrosage d'eau de condensation.

L'eau de désurchauffe est fournie à travers le condenseur du désurchauffeur dans lequel se condense la vapeur saturée provenant du ballon de vapeur.

La conception de la surchauffeur tient compte d'une perte de charge de vapeur minimisant la grandeur de déséquilibre de température de vapeur, la température de calcul étant déterminée en tenant compte de la variation de débit /température de gaz.¹⁵

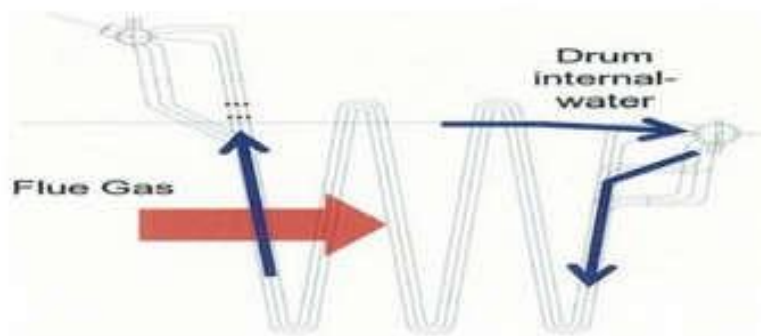


Figure II. 7 : Schéma des surchauffeurs.

II.5.7. Resurchauffeurs

Ils jouent un rôle semblable à celui des surchauffeurs, c'est-à-dire qu'ils augmentent la température de la vapeur surchauffée issue de la turbine.¹³

II.5.8. Désurchauffeurs

Ils sont destinés à refroidir et à moduler la température de la vapeur surchauffée ou resurchauffée, ils sont rarement tubulaires mais généralement assimilables à des échangeurs par mélange puisqu'ils procèdent par injection d'eau dans la vapeur.¹⁶

II.5.9. Evaporateur

L'évaporateur sert à réchauffer l'eau à l'intérieur du ballon, il est du type circulation naturelle et est situé en aval de la surchauffeur primaire dans la zone de passe de retour.

Les tuyaux de descente non chauffés, les tubes en boucles inclinées et les tuyaux montants sont prévus pour maintenir la circulation appropriée et stable d'eau à toutes les allures de production de vapeur.¹⁷

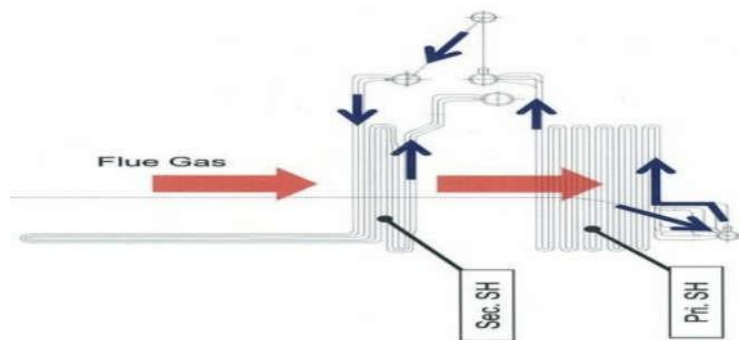


Figure II. 8 : Schéma d'un évaporateur.

II.5.10. Ventilateur de soufflage

La chaudière fonctionne sous une pression positive (pressurisée) avec de l'air de combustion fourni par un ventilateur à tirage forcé. Ce ventilateur alimente également la soufflante qui fournit l'air à l'allumeur. Il est entraîné par un moteur électrique alimenté par le courant électrique de secours.

La quantité d'air entrant dans le ventilateur est limitée de façon à maintenir un rapport air/combustible correct au niveau du brûleur. Si la quantité d'air de combustion en excès est inférieure à 10% pour le combustible gazeux ou à 15% pour l'essence, il y aura une combustion incomplète. Les hydrocarbures non brûlés pourraient prendre feu dans la cheminée ou exploser et pourraient donc risquer d'endommager sérieusement la chaudière.¹¹

II.5.11. Ballons de purge

chaudière est équipée :

- D'un ballon de purge continue (CBD) : l'eau de chaudière est extraite en continue à partir du ballon. Supérieur selon un débit de 2% par rapport au débit d'appoint d'eau de la chaudière. Cette extraction a pour but de maintenir la conductivité de l'eau à l'intérieur de la chaudière entre 200 à 500 ppm. Le débit d'extraction est ajusté en fonction des résultats d'analyses pour maintenir la conductivité dans cette fourchette.
- D'un ballon de purge intermittente : une à deux fois par semaine une extraction d'eau de chaudière doit être effectuée à partir du ballon inférieur de la chaudière, et ce, pour extraire les boues de sels déposées au fond de ce ballon. Durant cette opération le niveau d'eau dans la chaudière doit être surveillé avec attention.¹¹

II.5.12. Appareils de sécurité

Les causes d'explosion des chaudières étant l'élévation excessive de la pression et l'abaissement du niveau d'eau, on utilise les dispositifs suivants, pour éviter ce risque :

- ♣ Deux soupapes de sûreté au moins, réglées de manière à s'ouvrir dès que la pression devient égale à la pression de la chaudière, ainsi qu'un manomètre sur lequel est clairement indiquée la valeur de la pression de calcul qui permet à l'opérateur de vérifier que la pression de fonctionnement lui est effectivement inférieure.
- ♣ Un dispositif de sécurité provoquant l'arrêt total de l'alimentation en combustible est installé sur la chaudière. Ce dispositif se déclenche si le niveau d'eau dans le ballon chute et cela pour éviter la déformation ou l'éclatement des tubes à cause de l'augmentation brusque de température.¹¹

II.5.13. Autres échangeurs associés à la chaudière

Non directement en liaison avec l'eau ou la vapeur du cycle, ils n'en sont pas moins indispensables au bon fonctionnement de l'installation.

- Le réchauffeur d'air

C'est un échangeur d'air de combustion /gaz de combustion.¹⁷ L'avantage technique du réchauffage de l'air réside dans le fait qu'il amoindrit la perte par la cheminée et qu'il élève en outre la valeur de la température des gaz de combustion ou du foyer.

- Le préchauffeur d'air

Dans le but principal de protéger le réchauffeur d'air et les gaines de fumées placées en aval des risques de corrosion par condensation d'acide, il est nécessaire de préchauffer de quelques dizaines de degrés l'air entrant dans le réchauffeur d'air.¹⁷ Cette fonction est assurée généralement par un échangeur à tubes ailettes où l'air est réchauffé par de la vapeur ou de l'eau.

II.6. Comparaison entre chaudières à tubes à d'eau et tubes de fumée

Le tableau II.1, résume les différentes propriétés des chaudières à tubes d'eau et à tubes de fumée.⁴

Tableau II. 1: Comparaison entre les chaudières à tubes d'eau et à tubes de fumées.

Propriétés	Chaudières à tubes de fumée	Chaudières à tubes d'eau
Mise en route (à puissance équivalente)	Lente (grand volume d'eau à chauffer)	Rapide
Adaptation aux changements de régime	médiocre (inertie importante)	Bonne
Surface de chauffe	moyenne	Elevée
Sécurité	médiocres	Bonne
Encombrement	faible	Fort
Prix	limité	Elevé
Applications usuelles		
• Puissance • Débit • Timbre (pression max. d'utilisation)	• moyennement élevée • 1,5 à 25 t/h • 10 à 20 bars	• Importante • 4 à 200 t/h • 90 à 100 bar circulation nature et jusqu'à 225 ba(en circulation forcée) en

II.7. Régulation dans les chaudières

Les principaux paramètres à surveiller pendant le fonctionnement d'une chaudière sont la pression et la température de la vapeur dans le collecteur principal et le niveau d'eau dans le réservoir supérieur.¹⁸

II.7.1. Contrôle de la pression de la vapeur surchauffée

La pression de la vapeur surchauffée dans le collecteur principal doit être maintenue constante afin de satisfaire les besoins de l'utilisateur et d'assurer la sécurité de la chaudière.

Un générateur de vapeur constitue un système pluri variable dont lequel les paramètres tels que le débit d'eau, de vapeur, de gaz combustible et d'air affectent directement la pression de la vapeur. Afin d'assurer une commande stable, le débit de combustible est conçu comme variable modifiable.

Lorsque plusieurs chaudières fonctionnent en parallèle, il est nécessaire d'utiliser un seul point de contrôle de la pression de la vapeur, un régulateur de pression et d'installer un distributeur de charges. Ce dernier fait varier arbitrairement les proportions de charges de plusieurs chaudières et règle le débit du combustible en recordant les commandes du régulateur principal à chaque chaudière.¹⁶

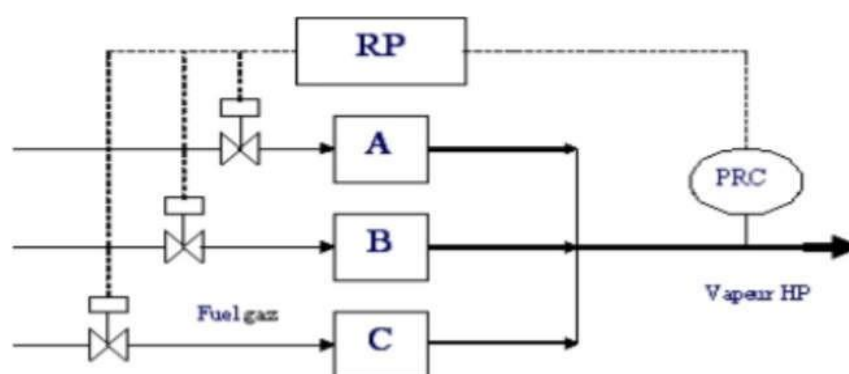


Figure II. 9 : Contrôle de la pression de la vapeur surchauffée.

Les méthodes de répartition de la variation de charge sont :

- La variation de charge est répartie équitablement sur toutes les chaudières ;
- La variation de charge est répartie proportionnellement sur toutes les chaudières ;
- Une seule chaudière supporte la variation de charge.

Les trois méthodes peuvent être utilisées lorsque les chaudières sont de même type et de même capacité. Les méthodes a et b peuvent être utilisées lorsque les capacités sont différentes.¹⁸

II.7.2. Contrôle de la température de la vapeur surchauffée

La température de la vapeur surchauffée dans le collecteur principal est maintenue constante par

injection d'une faible quantité d'eau traitée dans le désurchauffeur. C'est ainsi que la température de la vapeur est maintenue à une valeur légèrement inférieure à celle admise dans la turbine (résistance thermique des matériaux).¹⁶

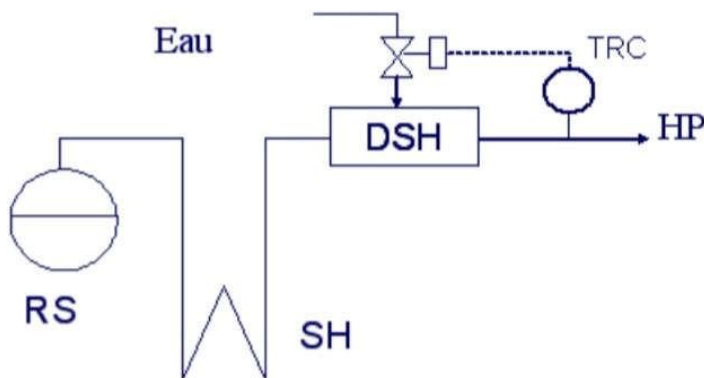


Figure II. 10 : Contrôle de la température de la vapeur surchauffée.

II.7.3. Contrôle du niveau d'eau dans le ballon supérieur

La figure II.14, représente un schéma simplifié de la régulation du niveau d'eau dans le réservoir supérieur de la chaudière.¹⁸

a. Niveau haut

Bien qu'un séparateur soit installé dans le réservoir, la séparation de la vapeur et du liquide devient incomplète si le niveau d'eau est trop haut. La présence d'eau dans la vapeur à la sortie du ballon entraîne des sels dissous et provoque le phénomène de primage dans les conséquences sont fort préjudiciables sur les ailettes de la turbines (érosion).

b. Niveau bas

Si le niveau est bas, il y a risque de crevaisson des tubes sous l'effet de la chaleur.

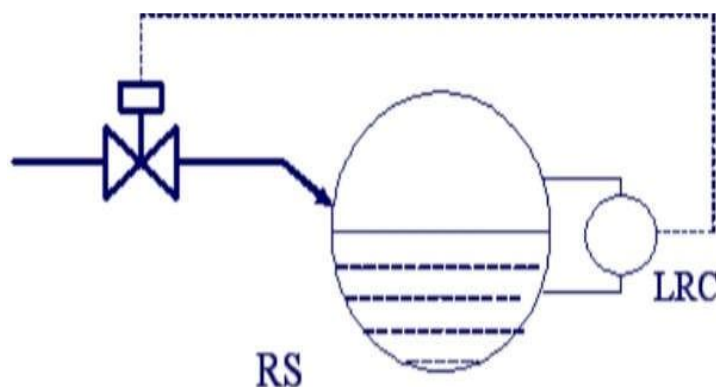


Figure II. 11 : Contrôle du niveau d'eau dans le ballon supérieur.

II.8. Sécurité des chaudières

II.8.1. Importance de la sécurité

La sécurité d'une chaudière consiste à éliminer tous les risques éventuels et à réduire à un degré minimal les dangers afin de protéger l'intégrité du matériel et d'éviter les préjudices humains

Elle est assurée par des instruments avec déclenchement d'alarme ou intervention directe sur la marche du four ou de la chaudière.

Les principales fonctions de la sécurité d'un four ou d'une chaudière sont :¹⁶

- la coupure des feux par pression du combustible basse ;
- le contrôle de flamme par pilotes ou cellules ;
- la surpression limitée par soupape et portes d'explosion ;
- le verrouillage autorisant l'alimentation en air de combustion et en combustible ;
- l'ouverture du registre à la défaillance de la commande ;
- l'alimentation en vapeur d'étouffement ;
- l'alimentation en vapeur de protection à l'intérieur des tubes ;
- la purge vapeur des cannes assurées par un système de verrouillage.

II.8.2. Sécurité des brûleurs

Les fonctions de sécurité montrent que le risque se situe essentiellement au niveau des brûleurs. Pour cela, un soin particulier doit être réservé aux équipements de chauffe. En effet, dans les chauffes automatique, semi-automatique et manuelle, lorsque les variations de débit sont grandes, il est de plus en plus nécessaire de prévoir des sécurités en cas d'extinction (le risque est important aux faibles débits du combustible).

Ce n'est pas l'extinction en elle-même qui est à craindre, mais ses conséquences. Lorsqu'un brûleur s'éteint et l'arrivée du combustible a toujours lieu d'être, l'enceinte des fumées est occupée par un mélange inflammable qui peut s'allumer au contact d'un point chaud (pot de suies en ignition, torche d'allumage ou brûleur de soutien laissé en service). La combustion brusque du mélange donne lieu à une surpression instantanée importante pouvant produire de très graves dégâts.¹⁶

II.8.3. Comportement sécuritaire du personnel

L'amélioration de la sécurité des personnes et des installations industrielles ne peut se faire sans la formation en sécurité, qui consiste à intervenir sur le changement du comportement sécuritaire individuel et collectif du personnel afin d'assurer au mieux la sécurité au travail en anticipant la

survenue des accidents.¹⁶

Dans ce contexte, un responsable de SH a annoncé, le 29/10/2006, le lancement d'un important programme de formation en sécurité appelé «Safe Behaviour Programme».

Le SBP a été conçu par le partenaire Norvégien Statoil, actionnaire à l'ex IAP Spa (10%). La réalisation de ce programme a été confiée à l'ex IAP Spa.

La sécurité en général et industrielle en particulier, est basée sur l'application d'un certain nombre de barrières mentales et techniques par les travailleurs afin d'empêcher les accidents, dus aux imprévus, de se produire. Les barrières mentales sont :¹⁶

- la priorité première ;
- la conformité ;
- le dialogue ouvert ;
- l'évaluation continue des risques ; ▪ le non à l'indifférence.

a. Priorité première

Donner la priorité à la sécurité même s'il s'agit d'arrêter le travail.

b. Conformité

Respecter les procédures et les règles existant dans les documents officiels de l'entreprise.

c. Dialogue ouvert

Développer le dialogue et la communication sur les questions relatives à la sécurité avec tous les travailleurs quelle que soit leur position hiérarchique.

d. Evaluation continue des risques

Avant d'entamer un travail, même si l'intervenant a de l'expérience, il faut être toujours attentif pour évaluer les risques d'une façon continue car des imprévus peuvent arriver.¹⁶

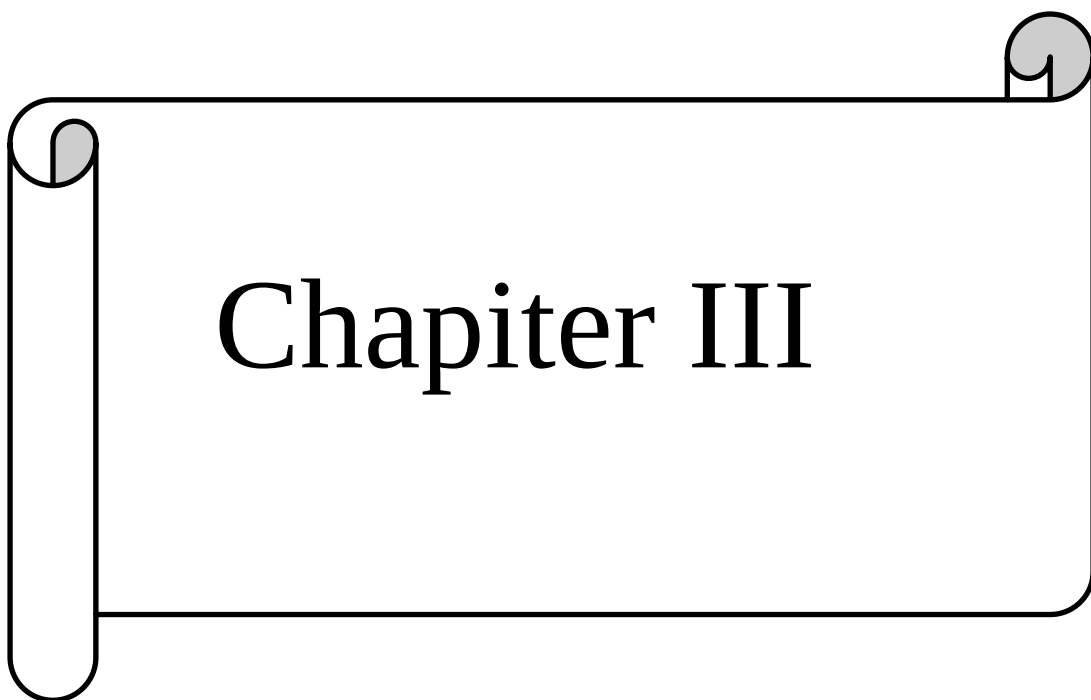
e. Non à l'indifférence

- Prendre soin des uns et des autres ;
- Corriger l'autre quand il fait quelque chose mal et sans respect des règles de la sécurité ;
- Prévenir des dangers ;
- Ne jamais détourner les yeux devant une situation où une personne s'expose à un risque ;

Le respect des 05 barrières est très important pour atteindre le 0 accident. L'accident est une erreur matérielle, derrière laquelle se cache toujours une erreur humaine, car ce matériel nécessite un entretien, une maintenance. L'origine et la cause sont humaines.

Les références

- Goncalves, A. Mémoire d'ingénieur. « Développement d'un système de combustion pour les résidus forestiers », université du Québec, 2010.
- ² Moussa, R. Mémoire de master en énergie et génie des procédés industriels. « Amélioration du fonctionnement par une revue de l'exploitation des chaudières de la SN-SOSUCO » Institut international d'ingénierie de l'eau et de l'environnement, Burkina Faso, juin 2012
- ³ Etude techno-économique du remplacement des chaudières de procédé au complexe GL1/Z.ARZEW.
- ⁴ Mehdi, A. Mémoire de master. « Influence du milieu et la qualité d'eau sur le comportement électrochimique de deux nuances d'acier au carbone » Université de Skikda, 2018.
- ⁵ Bounab. W. Houtia M. Mémoire de master en génie des procédés. « Etude préventive sur la corrosion et dysfonctionnement des chaudières au niveau de la raffinerie d'Adrar » Université d'Adrar, 2020.
- ⁶ Ecole Nationale Supérieure de Pétrole et des Moteurs, formation industrie IFP training « Risques et précautions liés aux matériels, matériels thermique et description des chaudières », 2005.
- ⁷ Fourou, M. « Equipements de procédés » (2 parties), Séminaire IAP. Ecole de Skikda, 2014.
- ⁸ Benahmed, A. « Four et chaudière dans l'industrie pétrolière » Séminaire, IAP école de Skikda, 2013.
- ⁹ Dufour, J, Article « Chaudières, contrôle et gestion » NALCO Champion, 2020.
- ¹⁰ Touiker, M. « Fours et chaudières » Séminaire 22 Mars IAP-SKIKDA, 2009.
- ¹¹ Formation industrie Sonatrach, « chaudières industrielles » Institut National de pétrole école de Skikda, 2012.
- ¹² Nuber, F, NuberK. « Calcul thermique des chaudières » Dunod, 1972.
- ¹³ Parisot, J. « Conception et calculs des chaudières échangeurs et circuit air/ fumées » Technique de l'ingénieur, traité génie énergétique.
- ¹⁴ Kharref, S. Mémoire de magister en chimie appliquée. « Comportement électrochimique de l'acier A105 dans différents milieux » Université de Skikda, 2008.
- ¹⁵ Raoult, M. « La vapeur- mode d'emploi, réseaux thermiques et équipements sous pression » Edition parisienne, 2003.
- ¹⁶ Benahmed, A. Touiker, M. « Fours et chaudières dans l'industrie pétrolière » Séminaire, IAP école de Skikda, 2013.
- ¹⁷ Bounab. W. Houtia M. Mémoire de master en génie des procédés. « Etude préventive sur la corrosion et dysfonctionnement des chaudières au niveau de la raffinerie d'Adrar » Université d'Adrar, 2020.
- ¹⁸ Benahmed, A. « Four et chaudière dans l'industrie pétrolière séminaire, IAP école de Skikda, 2013



III.1. Introduction

Pour garantir un rendement optimal et éviter l'altération des appareils, il est essentiel d'employer de l'eau d'une qualité supérieure dans la chaudière. Une mauvaise qualité de l'eau peut provoquer un dépôt dans la chaudière et réduire son rendement, ou entraîner des zones de chaleur qui risquent de causer la rupture des tubes. Un traitement inadéquat de l'eau peut entraîner la corrosion, endommageant non seulement la chaudière, mais également les équipements en aval ¹

III.2. Caractéristiques des eaux de chaudière

Dans l'industrie, la qualité et le volume des eaux employées fluctuent considérablement, étant déterminés par la nature de l'entreprise productrice. Une eau destinée à un cycle de refroidissement d'une chaudière doit être de bonne qualité (tableau III.1).

Tableau III.1 : Caractéristiques des eaux de chaudière (valeurs courantes).

Paramètre	Eau d'appoint	Eau bâche	Eau chaudière	Vapeur condensée
pH	7,6	8,5	9,5	8,5
TH (°F)	0	traces	0	0
TA (°F)	0	10	75	Traces
TAC (°F)	20	1,5	100	1
Cl ⁻ (mg/l)	3	3,5	15	0
SiO ₂ (mg/l)	7	0,06	35	0
Fe ⁺⁺ (mg/l)	0,06	-	0,06	0,06
PO ₄ ⁻¹ (mg/l)	-	-	25	-
λ (μS/cm)	1	-	150	10

- **Titre Hydrotimétrique (TH)** représente la dureté de l'eau. Il mesure la quantité de sels minéraux dissous, principalement le calcium (Ca²⁺) et le magnésium (Mg²⁺).

Dans les chaudières, le TH doit être très faible ou nul afin d'éviter la formation de tartre et la corrosion des équipements.

- **Titre Alcalimétrique (TA)** représente l'alcalinité de l'eau due principalement aux ions hydroxydes (OH^-) et carbonates (CO_3^{2-}). Il permet d'évaluer la capacité de l'eau à neutraliser les acides.

- Dans les chaudières, le TA est important pour :

- * maintenir un pH convenable,
- * limiter la corrosion,
- * protéger les équipements contre les attaques acides.

- **Titre Alcalimétrique Complet (TAC)** représente l'alcalinité totale de l'eau. Il mesure l'ensemble des substances alcalines capables de neutraliser les acides, principalement les bicarbonates (HCO_3^-), carbonates (CO_3^{2-}) et hydroxydes (OH^-).

- Dans les chaudières, le TAC aide à contrôler le pH et à limiter la corrosion et les dépôts.

III.3. Traitement des eaux de chaudière

Le traitement des eaux de chaudières passe par plusieurs étapes, qui sont représentées par le schéma ci-dessous (figure III.1).

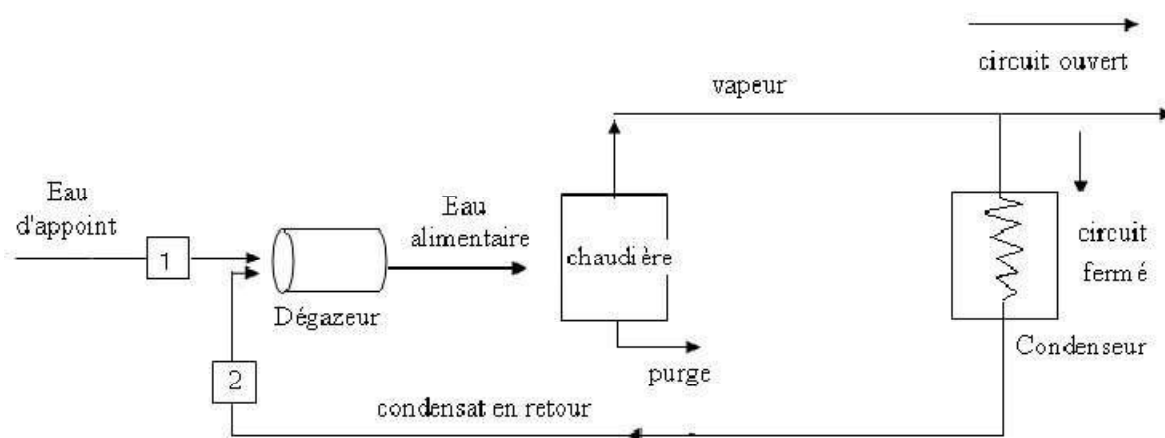


Figure III.1. Traitement des eaux de chaudière.

III.3.1. Traitement de l'eau d'appoint

III.3.1.1. Prétraitements

Les prétraitements constitués d'un ensemble d'opérations physiques et mécaniques ³, sont destinés à séparer l'eau :

- des matières solides volumineuses risquant d'obstruer les canalisations de l'installation de traitement.
- des matières flottantes et des huiles non miscibles à l'eau et généralement moins denses qu'elle.

Les opérations des prétraitements sont les suivantes :

▪ **Dégrillage**

Il permet de séparer les matières volumineuses. Son principe est extrêmement simple, puisqu'il consiste à faire passer l'eau brute à travers des grilles composées de barreaux placés verticalement ou inclinés.

▪ **Dessablage**

Les dessableurs ont aussi pour but d'extraire des eaux, les graviers, les sables et autres matières minérales denses.

▪ **Tamissage**

Le tamissage assure un dégrillage poussé par filtration des eaux brutes sur toile, ou treillis, ou tôle perforée, à maille plus ou moins fines.

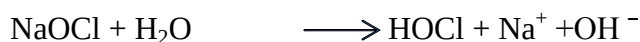
▪ **Déshuilage**

On peut considérer que le déshuilage se rapporte à l'extraction de toutes matières flottantes d'une densité inférieure à celle de l'eau.

III.3.1.2. Chloration des eaux

Pour éviter le développement d'organismes végétaux et animaux, l'injection d'eau de javel est indispensable.

L'hypochlorite de sodium réagit rapidement dans l'eau pour former de l'acide hypochloreux selon la réaction :



L'acide hypochloreux est un acide faible qui réagit de la façon suivante :



HOCl = acide hypochloreux ;

$\text{H}^+ + \text{OCl}^-$ = ions hypochlorites

La distribution de HOCl et OCl⁻ varie considérablement en fonction du pH: plus le pH est élevé, plus la proportion de OCl⁻ est élevée. Il est important de tenir compte de ce phénomène car l'acide hypochloreux est un désinfectant beaucoup plus efficace que les ions hypochlorites ⁴.

III.3.1.3. Déminéralisation totale

Ce traitement est plus complexe et l'eau subit plusieurs passages successifs sur des résines échangeuses d'ions pour éliminer tous les cations et les anions (figure III.2).

Les résines sont des composés organiques de synthèse qui ont la propriété d'échanger un de leurs ions contre les ions contenus dans l'eau à traiter. La réaction générale sur laquelle repose ce phénomène est la suivante ⁶ :



Où :

R : radical anionique faisant partie de la résine échangeuse d'ions

A⁺ : ions fixés sur la résine neuve

Bⁿ⁺ : ions en solution

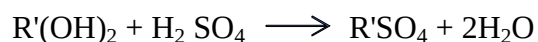
Il existe deux types de résines, cationiques fixent les cations et anioniques fixent les anions.

❖ Principe

L'installation comporte deux échangeurs d'ions. Le premier est un échangeur de cations avec résines acides qui échangent leurs ions H⁺ contre les cations métalliques des sels dissous dans l'eau en particulier les cations alcalino-terreux liés aux carbonates, en donnant des acides selon les réactions suivantes ²:

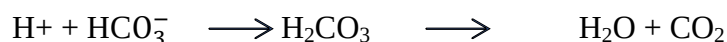


Le second échangeur sert à neutraliser les acides en dissolution dans l'eau sortant du premier. C'est un échangeur d'anions avec résines basiques qui échangent leurs ions OH⁻ contre les anions des acides en créant de l'eau.





Le système peut être complété par un dégazeur de CO_2 permettant d'éliminer l'acide carbonique (H_2CO_3) produit par passage de l'eau sur résine cationique selon la réaction :



❖ Régénération

On régénère la résine acide par une solution d'acide : HCl ou H_2SO_4 .



On régénère la résine basique par une base : solution $NaOH$, ammoniacale.

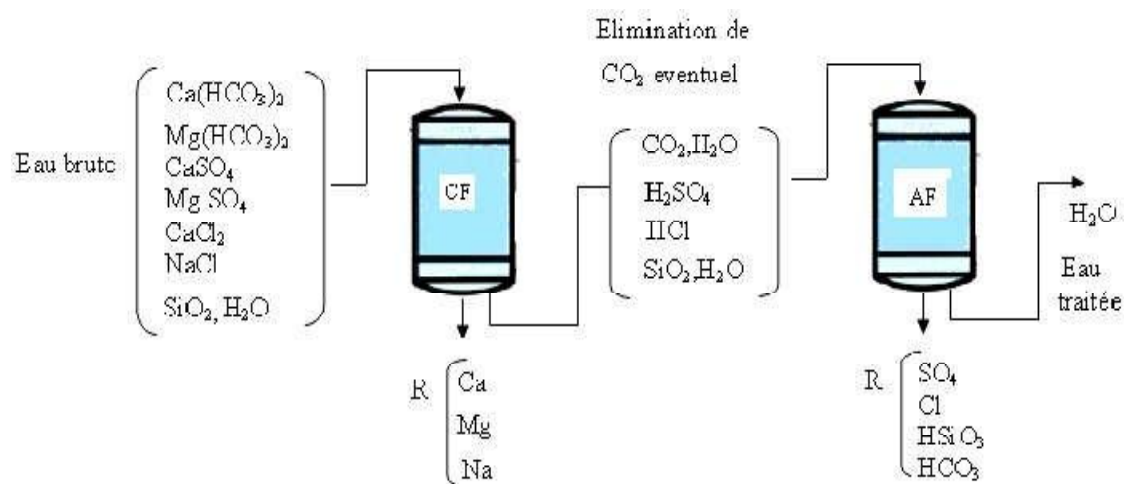


Figure III.2. Déminéralisation totale.

Les traitements peuvent s'effectuer par passages successifs à travers des lits séparés de résines cationiques et anioniques ou, si la capacité de la chaîne de traitement n'a pas besoin d'être importante, par lits mélangés de plusieurs types de résines.

III.4 Traitement par dessalement

Le dessalement est une technique de traitement de l'eau salée qui permet d'en extraire les sels dissous afin de la rendre potable ¹². Il s'agit aujourd'hui d'une solution stratégique dans les régions arides confrontées à la rareté des ressources en eau douce ¹³.

Il existe trois grandes catégories de procédés de dessalement pour transformer l'eau de mer ou saumâtre en eau douce ²⁰ :

III.4.1 Procédés thermiques (changement de phase)

Ils utilisent la chaleur pour évaporer l'eau, puis la condenser en eau douce, en séparant ainsi les sels.

a. Distillation simple

La distillation consiste à évaporer l'eau de mer en utilisant soit la chaleur du soleil, soit un chauffage à l'aide d'une chaudière. Seules les molécules d'eau s'évaporent, laissant les sels et autres impuretés derrière. La vapeur obtenue est ensuite condensée pour produire de l'eau douce ²¹.

b. Distillation à effet multiple (MED)

La distillation à effet multiple (MED) fonctionne comme suit : dans la première cellule de distillation (effet 1), de l'eau de mer s'écoule sur des tubes chauffés par une chaudière. Une partie de l'eau de mer s'évapore à environ 70°C, car la pression dans l'effet 1 est inférieure à la pression atmosphérique. L'eau de mer restante, non évaporée, s'accumule au fond de la cellule. La vapeur d'eau générée est ensuite dirigée vers le serpentin de l'effet 2, où la température et la pression sont encore plus basses que celles de l'effet 1. La vapeur se condense en eau distillée, qui est ensuite extraite de la cellule à l'aide d'une pompe ²¹.

c. Distillation multi-flash (MSF)

Dans le processus de distillation multi-flash (MSF), l'eau de mer est chauffée sous pression à 120°C tout en restant à l'état liquide. Ensuite, elle est dirigée vers une cellule où la pression est réduite. Une partie de l'eau sous pression s'évapore immédiatement lors de ce processus de détente, appelé "flash". La vapeur d'eau générée monte ensuite et entre en contact avec des conduits froids où circule de l'eau de mer, ce qui permet sa condensation en eau douce. Cette eau distillée est ensuite extraite de la cellule à l'aide d'une pompe (figure III.3). L'eau de mer non évaporée dans la première cellule passe ensuite dans une deuxième cellule où la pression est encore plus faible. Un deuxième flash se produit, d'où le nom de distillation multi-flash ²².

III.4.2 Procédés membranaires

Ils utilisent des membranes semi-perméables pour séparer l'eau des sels sans changement d'état. Deux technologies utilisant ces membranes sont actuellement commercialisées : l'électrodialyse et l'osmose inverse.

a. Osmose inverse

Une pression élevée est appliquée sur l'eau salée pour forcer l'eau à traverser une membrane semiperméable, retenant les sels ¹⁷.

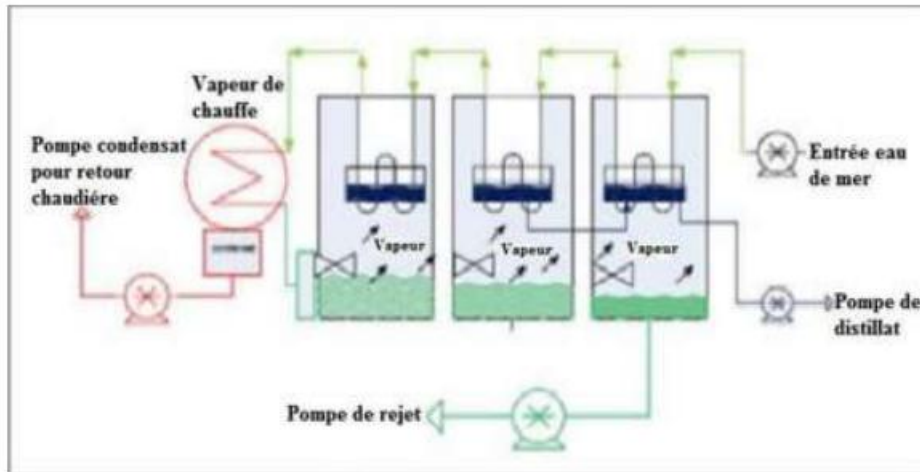


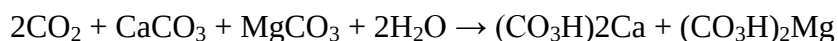
Figure III.3. Schéma d'une distillation multi flash (MSF).

b. Électrodialyse

L'électrodialyse est un procédé de dessalement chimique qui sépare les ions Na^+ et Cl^- d'une solution salée à l'aide de membranes échangeuses d'ions et d'un champ électrique. Le système est composé de : membranes anioniques (MEA) perméables uniquement aux anions (ex. Cl^-), membranes cationiques (MEC) perméables uniquement aux cations (ex. Na^+) et électrodes.

III.4.3 Procédés chimiques

L'eau dessalée par membrane présente un pH bas (5.5) et est pauvre en calcium, avec une alcalinité faible, en raison du rejet important de ces ions par les membranes. Cette eau n'est pas adaptée à la consommation humaine ni à l'agriculture. Sa faible alcalinité et la présence de CO_2 la rendent corrosive, ce qui peut entraîner la dissolution de dépôts dans les tuyauteries et ne pas respecter certains critères des normes techno-sanitaires²⁶. La correction du pH et minéralisation se fait par l'ajout de solution alcaline (automatisé) pour neutraliser l'acidité. La dolomite, un minéral composé de carbonate de calcium et de magnésium ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$), est utilisée dans ce processus²⁶.



III.5 Traitement des condensats

Quand la chaudière ne fonctionne pas en mode ouvert (vapeur perdue), mais recycle la vapeur après condensation, il est essentiel de prêter attention à ces eaux déjà déminéralisées, qui se trouvent cependant polluées durant le processus de recyclage.

La charge des condensats varie, selon l'utilisation de la vapeur, la présence de particules en suspension, d'émulsions organiques et huileuses, ainsi que de substances minérales dissoutes. Sans la présence de substances huileuses, on peut effectuer une filtration avec des filtres standard. En revanche, si des matières huileuses sont présentes, l'utilisation de précouches adsorbantes est nécessaire. Les ions métalliques en dissolution doivent être captés par des échangeurs d'ions ¹⁰.

III.6 Conditionnement de l'eau alimentaire

Il est nécessaire de conditionner les eaux de chaudières par des réactifs appropriés de manière à protéger les installations des risques évoqués précédemment (entartrage, corrosion etc...) ¹¹. Parmi les procédés les plus utilisés, on peut citer :

III.6.1 Dégazage

Le dégazage a pour but d'éliminer les effets corrosifs des gaz dissous. Il peut être réalisé par deux méthodes :

- Techniques physiques de dégazage
- Addition des espèces réductrices

a) Dégazage thermique

Selon le schéma ci-dessous (figure III.4), l'eau à traiter est pulvérisée à la partie supérieure du dôme et rencontre la vapeur qui, après avoir barboté dans la bêche, pénètre dans le dôme. Au contact de l'eau, la vapeur se condense en cédant sa chaleur latente de vaporisation à l'eau dont la température monte rapidement à 100°C. L'eau pulvérisée est recueillie à la base du dôme sur un plateau perforé qui provoque son écoulement en pluie dans la bêche. Cette eau est ainsi mise une seconde fois avec la vapeur. A la sortie du dôme, l'eau est à la température de dégazage qui est alors effectué en presque totalité ¹³.

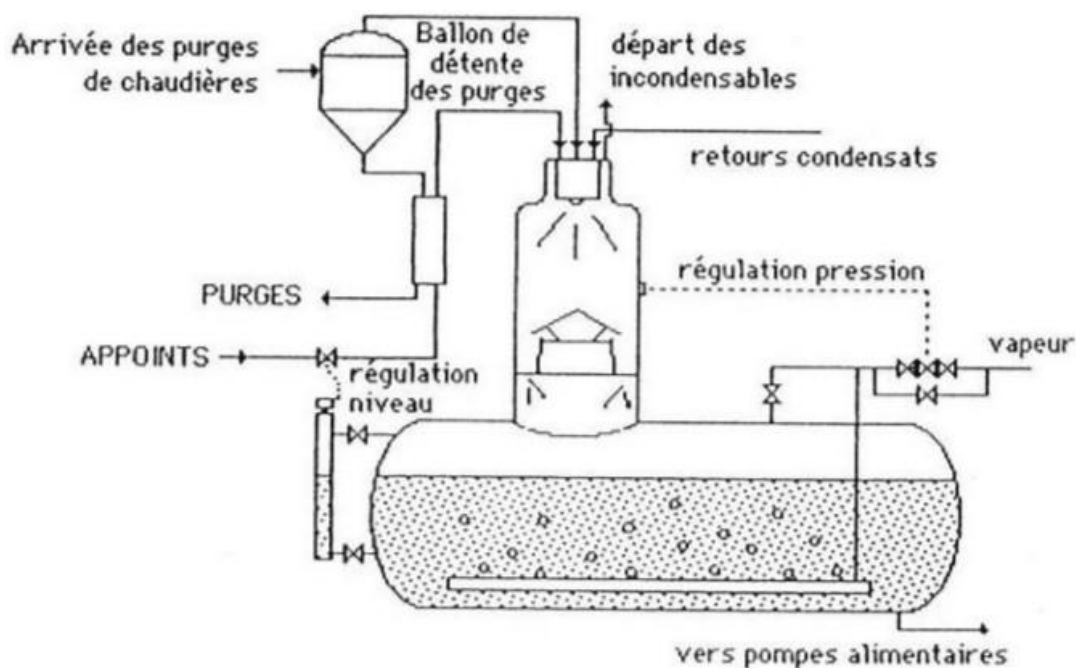


Figure III.4. Dégazage thermique dans une chaudière.

b) Réducteurs d'oxygène

- Sulfite de sodium Na_2SO_3

Le sulfite de sodium en solution réagit avec l'oxygène dissous pour se transformer en sulfate, selon la réaction :



La réduction de l'oxygène par le sulfite augmente la salinité totale de l'eau de chaudière et les sulfates. Aussi, aux hautes pressions et températures, le sulfite a tendance à se décomposer en donnant du SO_2 et du H_2S qui contribuent à la corrosion des systèmes de retours ¹⁴

- Hydrazine N_2H_4

L'hydrazine est un réducteur puissant. Il permet d'abaisser notablement la teneur en oxygène selon la réaction :



Il n'apporte aucune salinité à l'eau puisqu'elle même et ses produits de décomposition sont volatiles ¹⁵.

III.6.2. Phosphate trisodique Na_3PO_4

Les ions phosphates forment avec les ions de calcium des précipités floconneux normalement non entartrant selon les réactions suivantes ¹⁶



En plus de leur pouvoir tartrifuge, il provoque une phosphatation superficielle, tout en élevant le pH de l'eau, ce qui neutralise le gaz carbonique agressif.

III.6.3. Produits anti -primage

Ces produits organiques permettent de diminuer la formation de la mousse à la surface de l'eau du ballon de chaudière. Ils ont donc une incidence directe sur le primage. Les produits anti primage provoquent la coalescence des bulles de vapeur dans le liquide et facilitent la rupture des bulles de vapeur en surface. Le conditionnement anti primage est actuellement assuré par deux classes de réactifs ¹³:

- Les polyamides à longue chaîne et haut poids moléculaires
- Les polyéthylènes et propylène glycols.

III.6.4. Purge de déconcentration

Quel que soit le pourcentage de condensat dans l'eau alimentaire, celle-ci contient des sels dissous provenant de l'eau d'appoint, qui entrent en chaudière, où ils se concentrent par ébullition de l'eau. Lorsque la limite de salinité de l'eau de chaudière est atteinte, il est nécessaire de pratiquer une purge, dite de déconcentration pour que cette salinité n'augmente pas ¹⁸.

III.7 Corrosion dans les chaudières

L'apparition de la corrosion dans les chaudières a généralement lieu lorsque l'alcalinité de leur eau est basse ou lorsque le métal est mis en contact avec l'oxygène pendant les périodes d'utilisation ou d'inactivité ¹⁹. Les métaux fabriqués industriellement à partir de minerai grâce à des procédés souvent compliqués, ont tendance, lorsqu'ils sont laissés sans surveillance, à se convertir en nouvelles substances chimiques. Il est estimé que la corrosion détruit chaque année entre 10 et 15% de la production mondiale d'acier ¹⁷

III.7.1. Définition

La corrosion est définie comme la dégradation des métaux résultant de réactions chimiques ou électrochimiques, lorsqu'ils entrent en contact avec un environnement aqueux ou gazeux. La corrosion est un processus naturel. Ce phénomène constitue une source de préoccupation sérieuse.

III.7.2. Types de corrosion

Les différents types de corrosion sont :

a. Corrosion uniforme

Le métal se dissout régulièrement et uniformément, la résistance mécanique décroît proportionnellement avec la diminution d'épaisseur, d'où une perte de poids. Ce type de corrosion est généralement contrôlable (mesure de perte d'épaisseur, analyse des fluides... etc.). Cette corrosion est dite aussi généralisée du fait que les parois des tubes s'amincissent d'une façon uniforme ¹⁸

b. Corrosion localisée

L'attaque de la surface métallique se produit localement sur des zones sensibles, qui présentent des caractéristiques distinctes de la surface. Dans ce cas, l'agression qui débute en surface se diffuse en profondeur et la diminution du poids ne peut pas servir d'indicateur de suivi du phénomène. La gestion de cette sorte de corrosion est nettement plus compliquée que dans le cas antérieur [19].

c. Corrosion par piquêre

Il s'agit d'une forme de corrosion des plus sournoise et destructrice. L'invasion s'établit à des creux ou perforations très localisés qui peuvent rapidement s'approfondir, tandis que le reste de la surface demeure indemne (figure III.5). L'installation peut être effectuée en quelques jours sans qu'il y ait une diminution significative de la qualité globale (figure III.6)

20

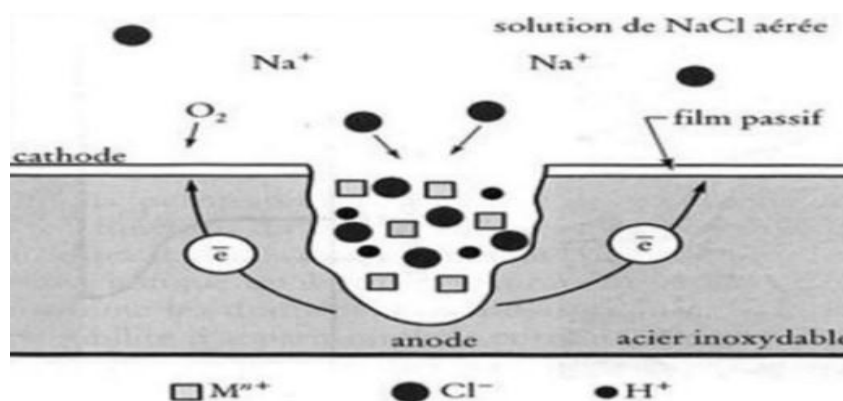


Figure III.5. Corrosion par piqûre.



Figure III.6. Effet d'une corrosion par piqûre.

d. Corrosion galvanique

La corrosion galvanique survient lorsque deux métaux différents sont en contact dans une solution, de façon à permettre le passage d'un courant électrique (figure III.7) ²¹

Dans les systèmes de chaudières, la forme de corrosion galvanique la plus fréquente découle de la présence de cuivre dans le circuit de l'eau. Les ions Cu^{++} à des concentrations inférieures au mg/l peuvent entraîner une augmentation significative de la corrosion par dépôt électrolytique de cuivre.

Cette corrosion peut également survenir à cause de la variation de composition d'un même métal ou en raison d'une soudure qui a modifié le métal (figure III.8) ²²

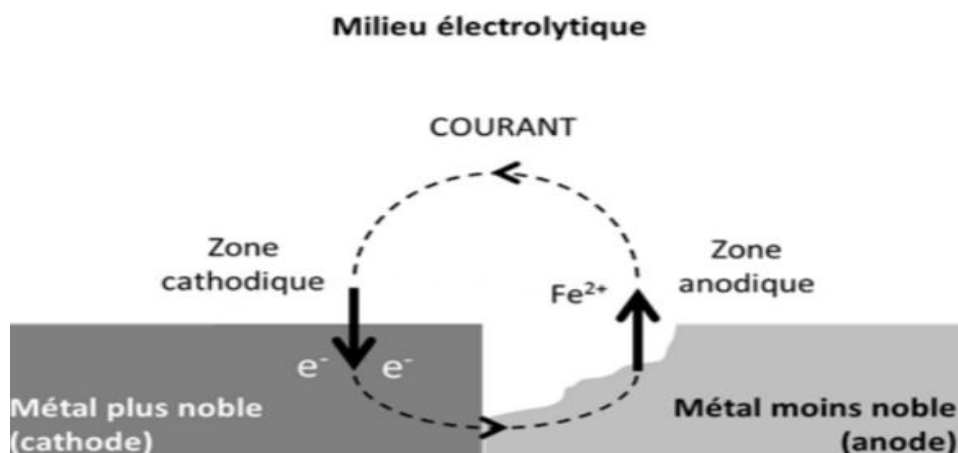


Figure III.7. Corrosion galvanique.



Figure III.8. Effet d'une corrosion galvanique.

III.7.3 Cas de corrosion des chaudières

Dans la chaudière elle-même, divers éléments favorisent la corrosion, mais les plus déterminants sont sans conteste l'eau, l'oxygène dissous et dans une moindre mesure, la soude caustique et la salinité²³

a. L'eau

L'eau pure désaérée attaque lentement le fer à la température ambiante selon la réaction suivante :



Aux températures plus élevées, telle que celles rencontrées dans les générateurs de vapeur, l'attaque s'accélérerait par l'augmentation de la dissociation des molécules d'eau.

b. Oxygène dissous

La corrosion par l'oxygène est le problème le plus sérieux que l'on rencontre quand on met une chaudière en observation (figure (III.9)).²⁴

Un contrôle insuffisant de l'oxygène conduira à une corrosion par piqûres susceptible d'endommager rapidement les surfaces métalliques. Ces sites affaiblis peuvent provoquer des ruptures dans les réchauffeurs et les économiseurs. De manière générale, l'oxygène dissous joue un rôle très nuisible dans la corrosion du fer par l'eau. La corrosion, qui implique une réaction provoquant des espèces chimiques et des charges électriques, est favorisée par la coexistence de l'oxygène et de l'eau. On se réfère à cela comme étant de la corrosion électrochimique

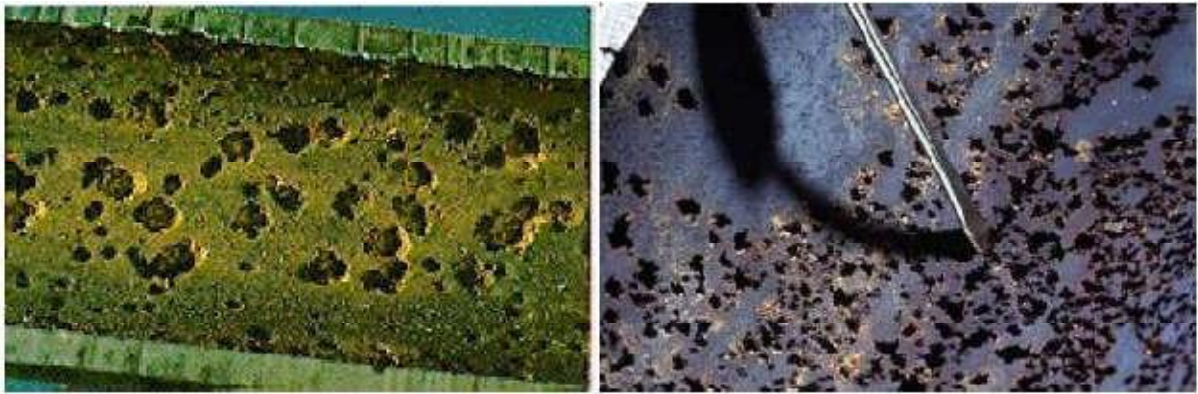


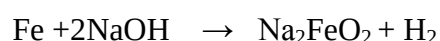
Figure III.9. Corrosion par O₂.

c. Soude caustique

La corrosion caustique se manifeste lorsque la concentration en NaOH est trop élevée, entraînée par l'accumulation de soude et de produits corrosifs sur la surface métallique. Effectivement, un surplus d'alcali peut progressivement dissoudre le film de magnétite selon la réaction :



En formant de l'hypo ferrite de sodium Na₂FeO₂, et de la ferrite de sodium NaFeO₂ qui sont solubles dans NaOH concentrée. De plus, les alcalis concentrés réagissent directement et plus rapidement avec le fer pour former de l'hydrogène et du ferrate de sodium²⁴



Ce genre de réaction joue un rôle important dans le phénomène de corrosion par piquûres et la formation de trous dans les tubes de chaudières (figure III.10), et contribue à créer les vitesses excessives de corrosion du fer aux valeurs élevées de pH (environ pH=13) ²⁵.

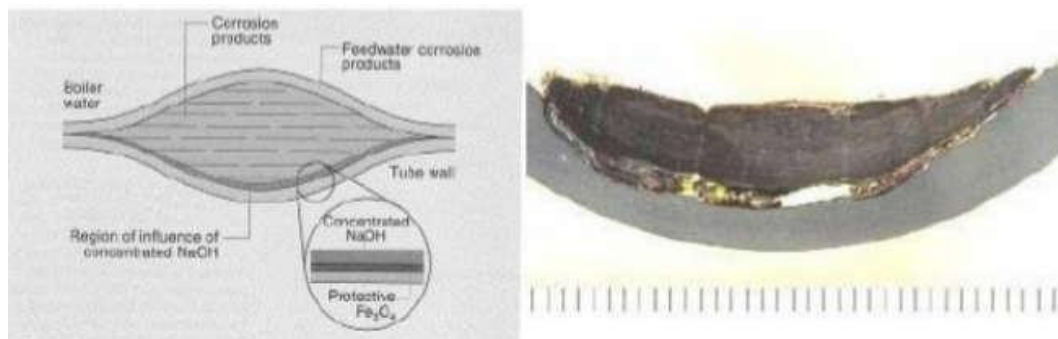


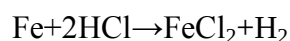
Figure III.10. Effet de la corrosion caustique.

d. Salinité

Il arrive par fuite d'eau de mer aux condensateurs, l'introduction des sels (chlorure de magnésium et de calcium) de s'hydrolyser pour former l'acide chlorhydrique ²⁶



L'acide formé attaque le métal selon la réaction suivante :

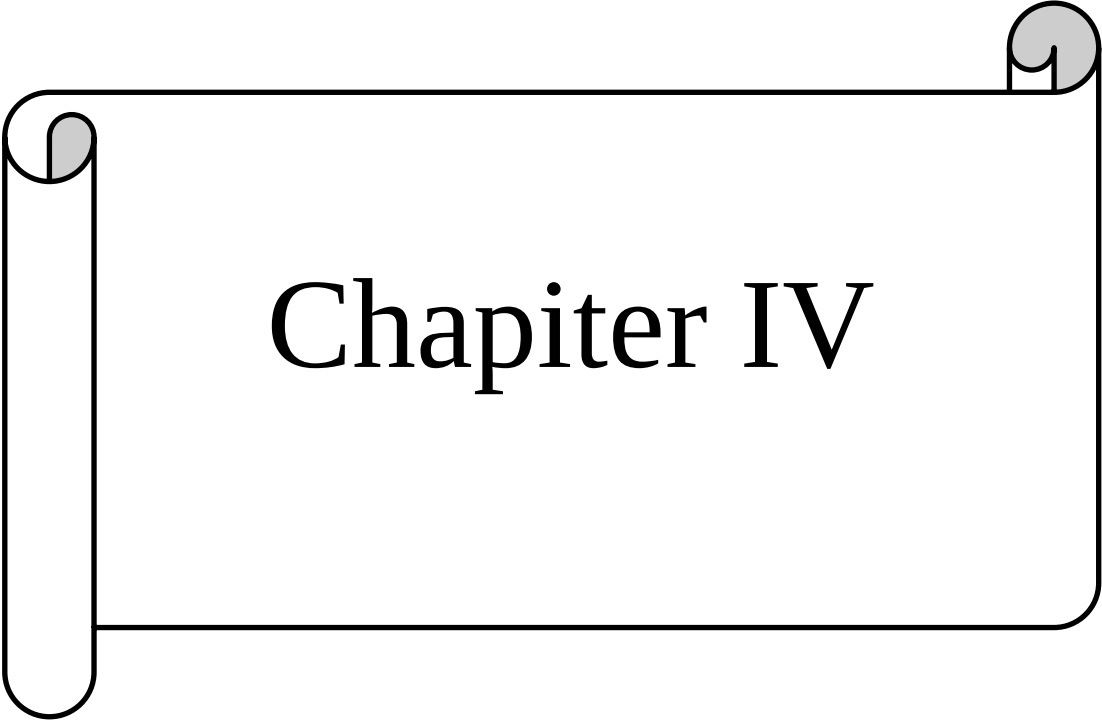


- ❖ On peut conclure que la corrosion est un problème majeur dans l'industrie et surtout l'industrie pétrochimique car il existe plusieurs installations liées les unes aux autres et si un problème apparaît dans un appareil donc le train complet doit être s'arrêter. Dans la section de la liquéfaction du gaz naturel et spécialement les chaudières la qualité des eaux dessalées doit être contrôlée soigneusement pour éviter ce problème, qui sera l'objectif du chapitre suivant.

Les références

- ¹.Revue de l'institut Algérien du Pétrole. « Chaudière industrielle » janv-juin, 2001.
- ² M, RAOULT. « *La vapeur-mode d'emploi, réseaux thermique et équipements sous pression* » Edition Parisienne, 2003.
- ³.J. C. BOEGLIN. « Traitement physico-chimiques de la pollution insolubles », Technique de l'ingénieur traité environnement, 2005.
- ⁴.V. RENAUDIN. « Le dessalement de l'eau de mer et des eaux saumâtres » 18 novembre, 2003.
- ⁵.S, KHARREF. Mémoire de magister en chimie appliquée « comportement électrochimique de l'acier A105 dans différents milieux » Université de Skikda 2008.
- ⁶.J. PARISOT. « Conception et calcul des chaudières : foyer et circulation » Techniques de l'ingénieur, traité Génie énergétique.
- ⁷ Formation industrie Sonatrach, « *chaudières industrielles* » Institut National de Pétrole, école de Skikda, 2012.
- ⁸.J. LECONTE. « Tuyauteries –Protection contre la corrosion », Technique de l'ingénieur, Machines hydrauliques et thermiques
- ⁹.Raymond Desjardins. « Le traitement des eaux » Edition de l'école Polytechnique de Montréal ,2^{ème} édition.
- ⁹.Revue, Pour la protection des circuits d'eau .Tiré à part de la CFP (janvier 2001).
- ¹⁰.C. GOMELLA ; H. GUERREE « *Le traitement des eaux publiques, industrielles et privées* »
- ¹¹.Manuel de formation « *Les utilités vapeur, cours exploitation et production* », 29-05-2007.édition Eyrolles, 1978.
- ¹² Degremont. (2005). L'eau – L'industrie, les procédés, les traitements. 10^e édition. Paris: Lavoisier – Tec & Doc. 1718 P
- ¹³ UNESCO (2019). The United Nations World Water Development Report 2019: Leaving No One Behind. UNESCO Publishing. 363 P.
- ¹⁴.Revue, Pour la protection des circuits d'eau .Tiré à part de la CFP (janvier 2001).
- ¹⁵.A. DUPONT. « Hydraulique urbaine », édition Eyrolles 1981.
- ¹⁶.A. MEHDI. Mémoire de master « L'influence du milieu et la qualité d'eau sur le comportement électrochimique de deux nuances d'acier au carbone » Université de Skikda, 2018.
- ¹⁷. Ecotoxicologie.fr. (2014). Quels sont les impacts de dessalement de l'eau de mer ? Copié depuis le site <http://www.ecotoxicologie.fr/Dessalement.php>. 14 P.
- ¹⁸.C. CHAUSSIN ; G .HILLY. « *Métallurgie- alliages métalliques* », édition Dunod, 1976

- ¹⁹.W. BOUNAB; M. k, HOUTIA. Mémoire de master en génie des procédés « *Etude préventive sur la corrosion et disfonctionnement des chaudières au niveau de la raffinerie d'Adrar* » Université d'Adrar,2020.
- ²⁰. Maurel, A. (2006). Dessalement de l'eau de mer et des eaux saumâtres et d'autres procédés non conventionnels d'approvisionnement en eau douce, 2e édition. Paris, Tec & Doc. 286 P.
- ²¹. Kaouane, I. (2013). Procédé d'osmose inverse pour le dessalement de l'eau de mer au complexe de Skikda. Université de Skikda. 100 P.
- ²². Zouag, B., & Belhadj, Y. (2017). Analyse physico-chimique, bactériologique et parasitologique de l'eau de mer traitée par la station de dessalement de Souk Tleta (Tlemcen) Thèse de doctorat, Université Abou Bekr Belkaid
- ²³.J. RODIER. « *Analyse de l'eau, eaux naturelles, eaux résiduaire, eaux de mer : chimie physique – chimie, bactériologie* », 7ème édition, 1987.
- ²⁴.J.J RAMEAU. « *Corrosion dans les chaudières générateurs d'énergie thermique* » 3ème école Magrébine de corrosion 'KENITA', mars, 1995.
- ²⁵.H. UHLIG. « *Corrosion et protection* » Edition DUNOD, 1970.
- ²⁶ Tahraoui Douma, N., Kettab, A., Abedelali, M., & Boughrara, F. (2010). Qualité des eaux de mer après dessalement au niveau de la station de dessalement de la ville de Ténés, Chlef. Impact de dessalement sur l'environnement (milieu aquatique). WATMED 5, Lille – France. 18 P.



Chapitre IV

IV.1 Introduction

Le laboratoire du complexe GL2/Z effectue une analyse constante de l'eau dessalée produite pour assurer sa qualité. Pendant notre stage durant la période (), le train de dessalement est en arrêt pour l'entretien, c'est pour cette raison que nous allons présenter des résultats de l'année 2025.

Grâce aux services de laboratoire, un suivi de deux (02) mois pendant l'année 2025 a été effectué, ces analyses ont été basées sur des échantillons d'eau prélevés à la sortie de chaque dessaleur. Ces études visent à vérifier les paramètres de l'eau après dessalement ce qui garantit le fonctionnement optimal des appareils industriels et une production améliorée d'eau dessalée.

IV.2 Analyse d'eau dessalée

IV.2.1 Prétraitement de l'eau de mer

a. Traitement physique

Le traitement physique est décrit comme suit :

- Le dégrillage : l'objectif de cette intervention est de sauvegarder les appareils contre d'éventuels dommages causés par des objets encombrants susceptibles de provoquer une panne directe des pompes.
- La filtration : permet de séparer les solides en suspension dans l'eau de mer à travers deux filtres.

b. Traitement biochimique

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

IV.2.2 Traitements au niveau de laboratoire

Afin de contrôler la qualité de l'eau dessalée, les techniciens et les ingénieurs du complexe GL2/Z font des analyses au laboratoire. Ces analyses sont :

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

a. Mesure de la conductivité électrique

Définition

La conductivité électrique est la capacité d'un matériau ou d'une solution à laisser circuler un courant électrique, qui est créé par le mouvement libre des charges électriques. Dans le système international, la conductivité est évaluée en siemens par mètre ($S.m^{-1}$).

On utilise un conductimètre (figure IV.1) pour mesurer la conductivité électrique d'une solution. Elle identifie des électrolytes présents dans l'eau d'alimentation des chaudières, l'eau provenant des dessaleurs et l'eau de refroidissement. La conductivité est associée à la quantité d'ions présents dans l'eau, elle s'accroît avec la concentration des sels dissous et également avec l'élévation de la température. On se réfère généralement à une température de 25 °C lors d'évaluation de la conductivité électrique. Selon le design, la conductivité ne doit pas excéder 8 ($\mu S/cm$).

Mode opératoire

- Allumer l'appareil,
- Rincer la sonde avec l'eau distillée avant chaque utilisation,
- Rincer la sonde une fois avec l'échantillon,
- Plonger la sonde dans le b cher contenant l'échantillon,
- Lire la valeur de la conductivité indiquée sur le cadran du conductimètre.



Figure IV.1. Photo du conductimètre utilisé.

Les résultats d'analyse de la conductiv t  de l'eau dessalée pendant les deux mois d'avril (du 07 au 21 Avril 2025) et mai (du 07 au 21 mai) en différents points de prélèvement LA, LC, LD et LE sont regroupés dans les tableaux (IV.1) et (IV.2).

Tableau IV.1 : Résultats des mesures de la conductiv t  électrique de l'eau dessalée (Avril).

DESSALEURS DATE (JOURS)	σ ($\mu\text{S}/\text{cm}$)			
	2010LA	2010LC	2010LD	2010LE
7	1,6	4,6	1,6	1,9
8	1,5	2,4	1,5	1,5
9	1,6	2,3	3,1	1,7
10	3	3,5	1,5	2,5
11	2,6	3,1	1,6	2,5
12	1,7	2,6	1,7	2,1
13	1,5	2,8	1,8	1,4
14	1,7	3	1,9	1,5
15	2,1	2,2	1,8	1,9
16	1,7	2,5	1,6	2,5
17	1	2,6	1,6	1,5
18	1,5	2,6	1,7	1,3
19	1,4	2,4	1,5	1,2
20	1,4	3	2	2
21	2,8	3,8	2	2
Design	8			

Ces résultats sont représentés par des histogrammes (figure IV.2) afin de bien montrer les fluctuations journalières de la conductivité d'un point à un autre des unités de dessalement.

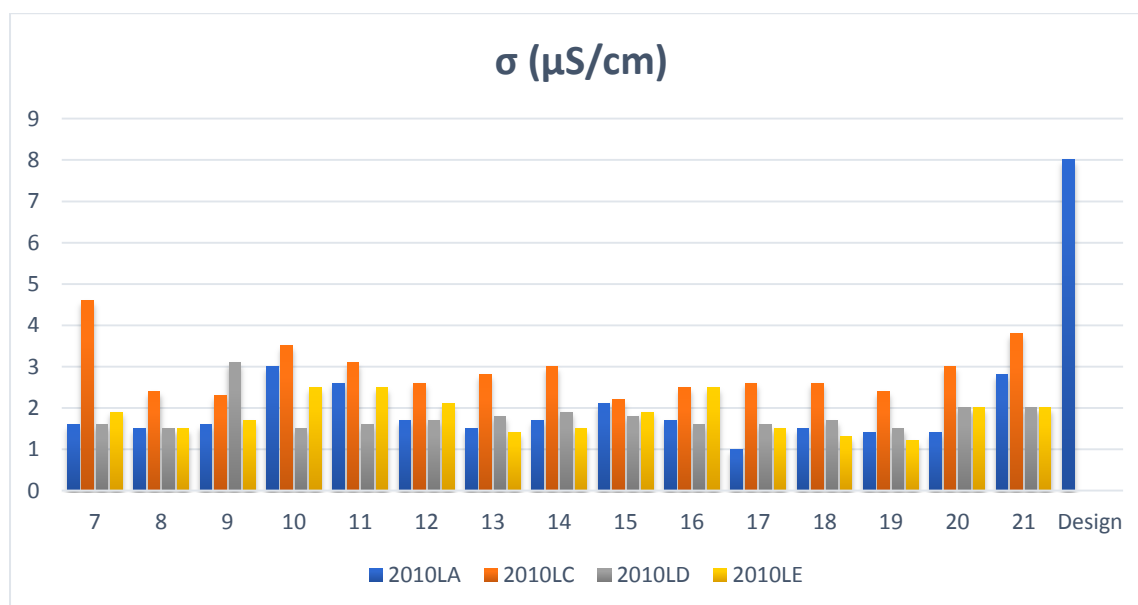


Figure IV.2. Variation de la conductivité électrique des eaux dessalées (Avril).

 **Interprétation des résultats**

D'après le graphe de la figure IV.2, on remarque que la conductivité des dessaleurs est dans la norme notamment pour l'unité 2010 LC sa conductivité augmente un peu mais ne dépasse pas le design préconisé (une valeur de 8 $\mu\text{S}/\text{cm}$).

Tableau IV.2. Résultats des mesures de la conductivité de l'eau dessalée (Mai).

DESSALEURS DATE (JOURS)	σ ($\mu\text{S}/\text{cm}$)			
	2010LA	2010LC	2010LD	2010LE
7	2,9	3,8	2,7	2,5
8	1,9	4,5	2,5	2,8
9	2,8	7,8	3,1	3,2
10	3,5	5,1	2,9	3
11	2,8	6,5	3	4,2
12	3	3,6	2,5	2,6
13	2,7	4,7	2,6	2,1
14	2,7	4,6	2,6	2,6
15	2,7	3,9	2,6	3,2
16	2,9	4,6	2,7	2,7
17	3,5	4,1	2,6	3,1
18	2,6	3,4	3	3,4
19	3	3,8	2,6	2
20	2,8	3,1	2,7	3
21	2,3	3,2	2,9	2,7
Design	8			

Ces résultats sont représentés par des histogrammes (figure IV.3) pour éclaircir les variations de la conductivité par jour et à différents points de prélèvement.

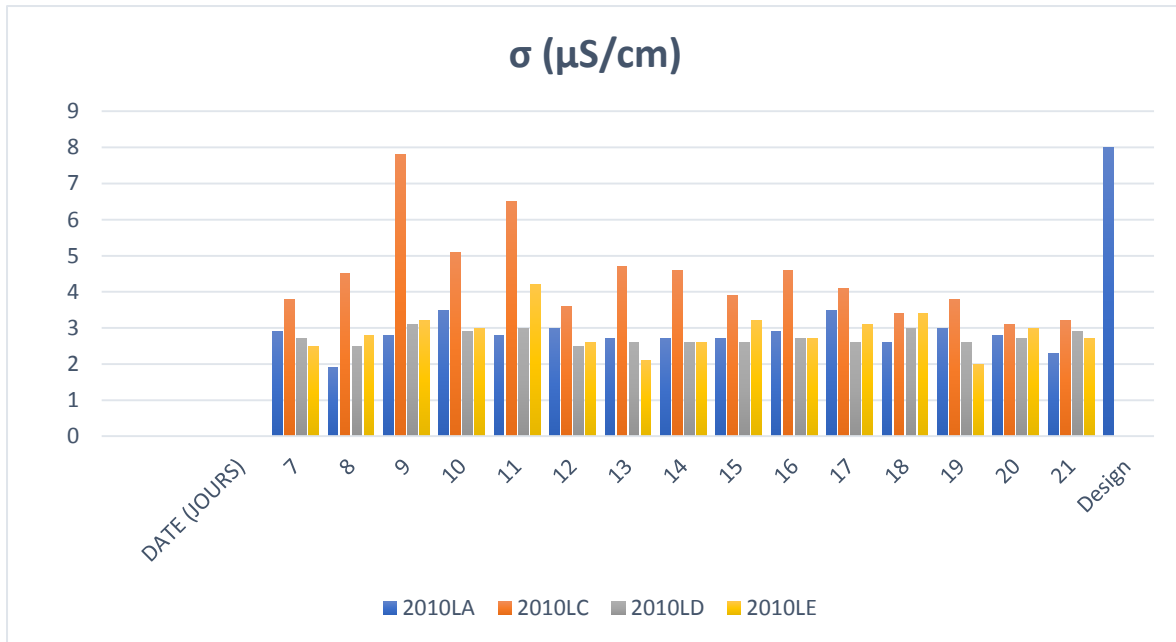


Figure IV.3. Variation de la conductivité électrique des eaux dessalées (Mai).

Interprétation des résultats

D'après le graphe, on constate que les valeurs de la conductivité pour les 4 dessaleurs sont dans la norme avec une légère augmentation pour le dessaleur 2010 LC.

b. Mesure du pH

Définition

Le pH, abréviation de potentiel hydrogène, indique le degré de l'acidité ou de basicité dans le domaine de la chimie. Le pH évalue la teneur en ions H_3O^+ d'une solution aqueuse. L'échelle du pH du dessaleur fluctue entre [6 et 8]. L'évaluation du pH est effectuée à une température ambiante ($T\text{ }^{\circ}C \rightarrow pH$). Le dispositif de mesure utilisé est le pH-mètre (figure IV.4).

Mode opératoire

- Mettre l'appareil en service, le laisser chauffer et le ramener à l'équilibre électrique,
- Rincer l'électrode et le bécher avant chaque utilisation avec de l'eau distillée, calibrer le pH mètre avec les solutions tampons.
- Amener l'échantillon à une température voisine de la température ambiante, pour obtenir une bonne précision de mesure,
- Placer l'électrode dans le bécher, contenant l'échantillon, et laisser la valeur se stabiliser sur le cadran avant la lecture du résultat.



Figure IV.4. Photo du pH mètre utilisé.

Les résultats d'analyse de pH de l'eau dessalée pendant les deux mois d'avril (du 07 au 21 Avril 2025) et mai (du 07 au 21 mai) en différents points de prélèvement LA, LC, LD et LE sont regroupés dans les tableau (IV.3) et (IV.4).

Tableau IV.3. Résultats des mesures du pH de l'eau dessalée du mois d'Avril.

DESSALEURS DATE (JOURS)	Ph			
	2010LA	2010LC	2010LD	2010LE
Design min	6			
7	6,6	6,6	6,5	6,6
8	6,6	6,6	6,6	6,6
9	6,6	6,6	6,6	6,6
10	6,5	6,6	6,5	6,5
11	6,6	6,7	6,6	6,5
12	6,5	6,6	6,4	6,4
13	6,4	6,5	6,4	6,4
14	6,4	6,4	6,5	6,3
15	6,4	6,4	6,4	6,5
16	6,4	6,3	6,3	6,2
17	6,4	6,4	6,4	6,4
18	6,4	6,4	6,4	6,4
19	6,5	6,4	6,4	6,3
20	6,5	6,6	6,5	6,6
21	6,4	6,2	6,4	6,3
Design max	8			

Ces résultats sont représentés par des histogrammes (figure IV.5) afin de bien montrer les fluctuations journalières de pH d'un point à un autre des unités de dessalement.

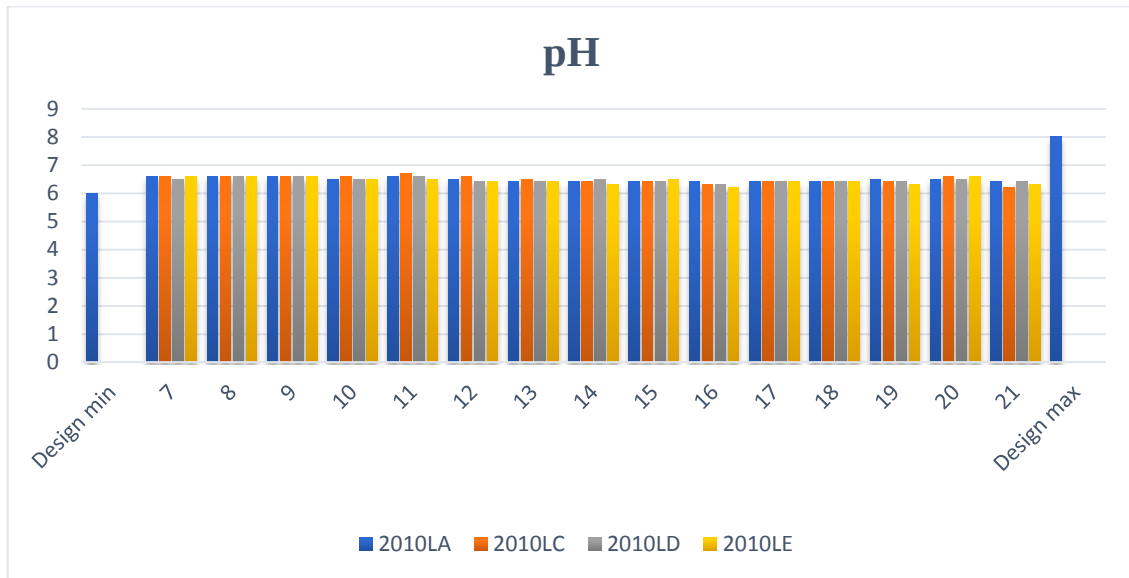


Figure IV.5. Mesure du pH de l'eau dessalée du mois d'Avril.

Interprétation des résultats

La figure IV.5 présente un graphique illustrant les résultats de l'analyse du pH effectuée sur des échantillons d'eau dessalée, produits par les dessaleurs 2010 LA/C/D/E du complexe GL2/Z. On observe une petite fluctuation du pH, cependant celui-ci demeure toujours dans l'intervalle préconisé.

Tableau IV.4. Résultats des mesures du pH de l'eau dessalée du mois de Mai.

DESSALEURS Date (jours)	Ph			
	2010LA	2010LC	2010LD	2010LE
Design min	6			
7	6,5	6,4	6,5	6,4
8	6,3	6,4	6,3	6,4
9	6,5	6,4	6,4	6,5
10	6,4	6,4	6,5	6,5
11	6,6	6,6	6,6	6,5
12	6,3	6,4	6,4	6,4
13	6,4	6,6	6,5	6,4
14	6,4	6,5	6,4	6,5
15	6,4	6,6	6,4	6,4
16	6,4	6,5	6,4	6,4
17	6,4	6,6	6,4	6,5
18	6,4	6,5	6,5	6,4
19	6,5	6,5	6,5	6,4
20	6,5	6,5	6,4	6,4
21	6,4	6,5	6,5	6,5
Design max	8			

Ces résultats sont représentés par des histogrammes (figure IV.6) afin de bien montrer les fluctuations journalières de pH d'un point à un autre des unités de dessalement.

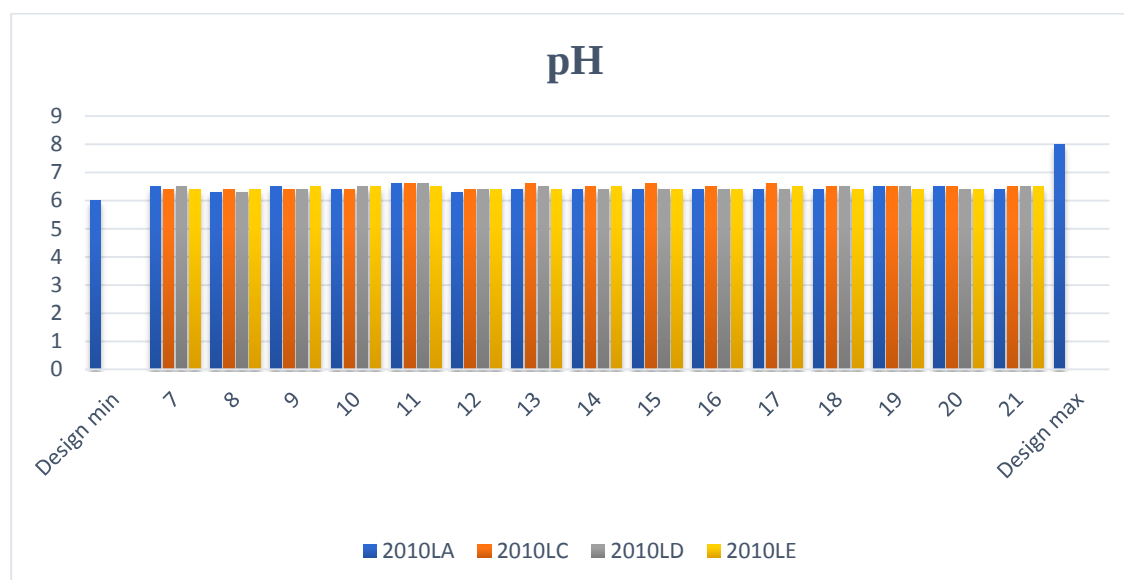


Figure IV.6. Variation du pH des eaux dessalées produites par les unités 2010 LA/C/D/E du mois de Mai

Interprétation des résultats

Les résultats des analyses illustrés dans ce graphe montrent un taux stable de pH dans l'eau produite par les unités de dessalement du complexe GL2/Z. Il est à rappeler que ces valeurs sont incluent dans l'intervalle préconisé par le design.

c. Mesure des ions chlorures

L'eau renferme constamment des chlorures, cependant leur concentration peut grandement varier. Effectivement, les eaux issues des granitiques sont faibles en chlorures, tandis que les eaux provenant des régions sédimentaires en renferment davantage. De plus, la concentration de chlorure croît proportionnellement au niveau de minéralisation d'une eau (également lié à la conductivité).

Dosage des ions chlorures

La méthode de dosage est basée sur la fixation des ions Cl^- par les ions Hg^{2+} en un sel, peu dissocié, le HgCl_2 . Au cours de ce phénomène, on procède au titrage par une solution de nitrate de mercure¹. La réaction est la suivante :



La méthode de dosage nous permet à déterminer la teneur des chlorures dans l'eau qui ne doit pas dépasser 1 ppm d'après le design.

Mode opératoire

- Prélever 100 mL d'eau à analyser dans un erlenmeyer de 250 mL,
- Ajouter 1 ml d'acide nitrique HNO_3 à (0,1 N),
- Ajouter 2 à 3 gouttes de diphénylcarbazone, puis agiter (on obtient une coloration jaune),
- Remplir la burette de précision de 50 mL avec la solution de nitrate de mercure $\text{Hg}(\text{NO}_3)_2$ à (0,0014 N) soit C,
- Ajouter, goutte à goutte, la solution mercurique dans l'erlenmeyer, jusqu'à ce que l'on obtienne une coloration bleue violacée,
- Noter le volume écoulé de la solution d' $\text{Hg}(\text{NO}_2)_2$ soit (V).

• Calcul

$$\text{Concentration en } \text{Cl}^- (\text{ppm}) = \frac{V \times C \times M_{\text{Cl}} \times 1000}{V_{\text{échantillon}}} \quad (\text{IV.1})$$

Les résultats d'analyse des chlorures dans l'eau dessalée par jour et à différents points de prélèvement pendant les deux mois avril et mai sont présentés dans les tableaux IV.5 et IV.6.

Tableau IV.5. Résultats d'analyse des chlorures dans l'eau dessalée en ppm (Avril).

DESSALEURS Date (jours)	[Cl⁻] (ppm)			
	2010LA	2010LC	2010LD	2010LE
7	0,42	0,45	0,4	0,56
8	0,4	0,45	0,44	0,8
9	0,42	0,5	0,45	0,78
10	0,55	0,5	0,48	0,75
11	0,45	0,42	0,45	0,6
12	0,48	0,4	0,44	0,65
13	0,85	0,42	0,5	0,62
14	0,5	0,42	0,45	0,7
15	0,54	0,4	0,49	0,71
16	0,5	0,4	0,5	0,75
17	0,5	0,4	0,5	0,5
18	0,46	0,4	0,44	0,48
19	0,45	0,4	0,43	0,42
20	0,52	0,4	0,41	0,42
21	0,45	0,4	0,46	0,4
Design	1			

Afin de montrer les fluctuations des concentrations des chlorures dans les différentes unités, nous avons présenter ces résultats sous forme d'histogrammes (figure IV.7).

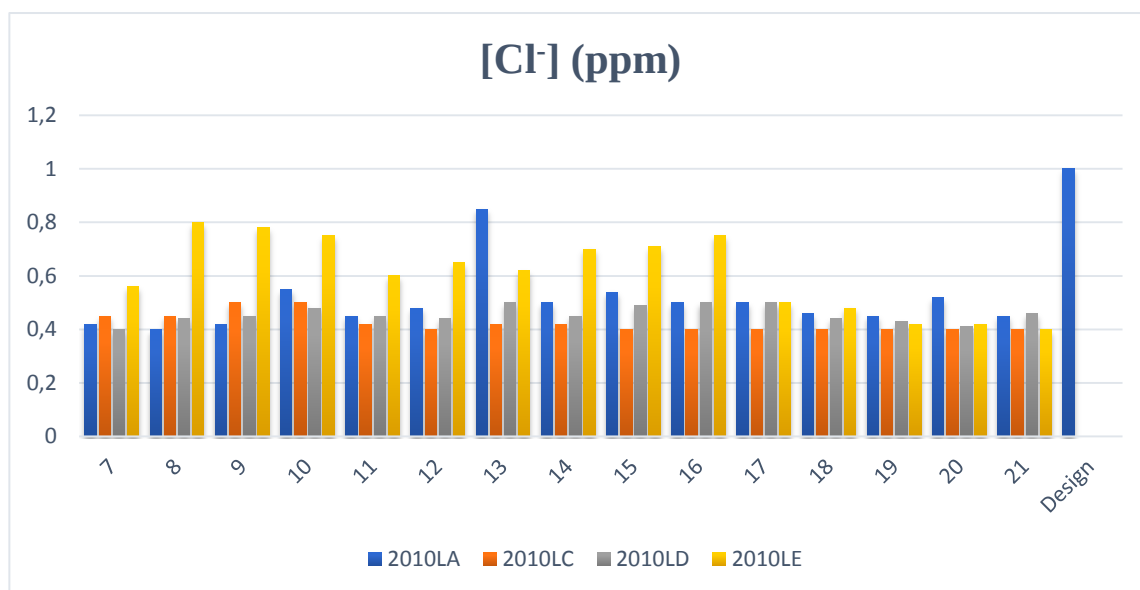


Figure IV.7. Mesures des ions chlorures des eaux dessalées produits par les unités 2010 LA/C/D/E du mois d'Avril.

Interprétation des résultats

Les résultats des mesures des chlorures des eaux dessalées sont dans les normes cependant les valeurs restent quand même un peu élevées.

Tableau IV.6. Résultats de l'analyse des chlorures dans l'eau dessalée (Mai).

Dessaleurs Date (jours)	[Cl ⁻] (ppm)			
	2010LA	2010LC	2010LD	2010LE
7	0,5	0,8	0,35	0,6
8	0,42	0,75	0,38	0,67
9	0,4	0,73	0,4	0,64
10	0,62	0,68	0,42	0,61
11	0,6	0,5	0,45	0,54
12	0,55	0,55	0,48	0,51
13	0,7	0,52	0,5	0,55
14	0,78	0,42	0,46	0,61
15	0,8	0,41	0,47	0,68
16	0,75	0,45	0,71	0,71
17	0,5	0,49	0,77	0,63
18	0,43	0,52	0,65	0,54
19	0,42	0,8	0,62	0,43
20	0,5	0,85	0,67	0,41
21	0,47	0,78	0,61	0,44
design	1			

Afin de montrer les fluctuations des concentrations des chlorures dans les différentes unités, nous avons présenté ces résultats sous forme d'histogrammes (figure IV.8).

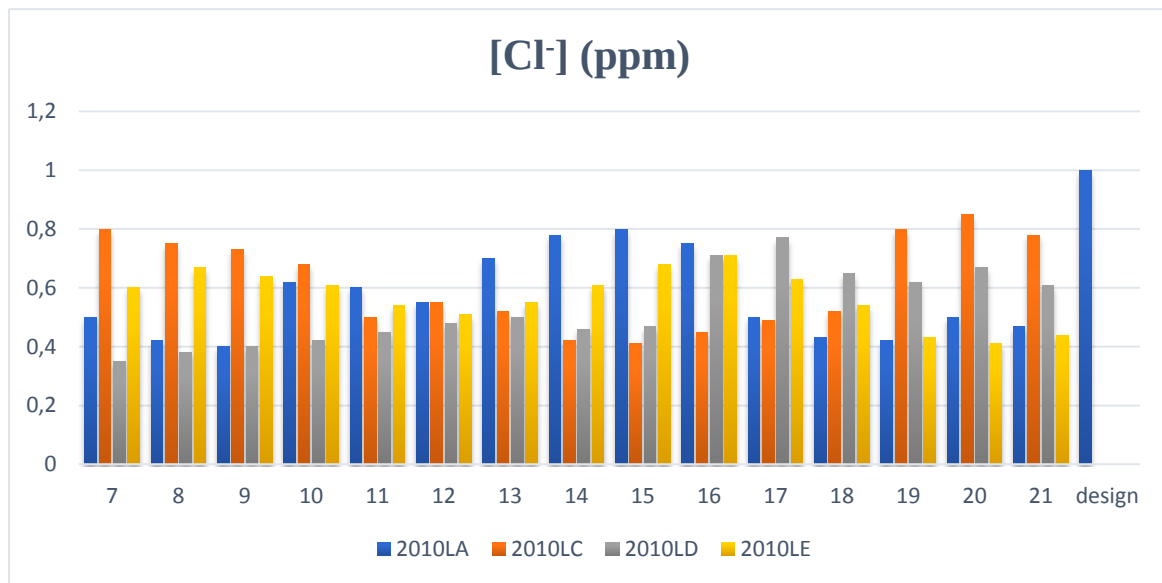


Figure IV.8. Variation de chlorure des eaux dessalées produites par les unités.

Interprétation des résultats

D'après le graphe, on constate que les teneurs des ions de chlorure ne dépassent pas la limite de 1 ppm dans l'eau distillée. Leur concentration varie entre 0,4 ppm et 0,85 ppm, les valeurs sont dans la norme.

d. Mesure de l'ammonium NH_4^+

Définition

Cette approche sert à évaluer la concentration en ammoniacque, étant donné qu'un taux élevé de celle-ci stimule la corrosion de l'alliage cuivré. L'ion NH_4^+ est un corrosif très fort susceptible d'endommager les canalisations en alliage de cuivre. C'est un socle solide qui encourage la multiplication des micro-organismes et renforce la conductivité de l'eau dessalée, ce qui entraîne inévitablement l'évacuation de l'eau dessalée (perte massive du produit dessalé).

Mode opératoire

- Prendre 25 mL d'échantillon,
- Ajouter 1 ml de réactif de Nessler, agiter,
- Attendre entre 10 et 25 minutes,
- Passer au spectrophotomètre à la longueur d'onde = 425 nm

- Lire l'absorbance. (a partir de la courbe d'étalonnage)
- On utilise la loi de Beer-lambert
- $A = \epsilon \cdot l \cdot c$
- Les résultats d'analyse des ions d'ammonium dans l'eau dessalée par jour et à différents points de prélèvement pendant les deux mois avril et mai sont présentés dans les tableaux IV.7 et IV.8.

Tableau IV.7. Résultats de l'analyse des ions ammonium des eaux dessalées.

DESSALEURS Date (jours)	[NH ₄ ⁺] (ppm)			
	2010LA	2010LC	2010LD	2010LE
7	0,26	0,73	0,42	0,41
8	0,43	0,66	0,5	0,35
9	0,6	0,62	0,51	0,36
10	0,65	0,5	0,56	0,39
11	0,5	0,47	0,59	0,31
12	0,52	0,4	0,47	0,29
13	0,62	0,36	0,49	0,4
14	0,67	0,32	0,47	0,44
15	0,72	0,55	0,6	0,49
16	0,8	0,48	0,68	0,6
17	0,85	0,44	0,57	0,62
18	0,6	0,41	0,43	0,67
19	0,54	0,6	0,41	0,69
20	0,5	0,57	0,32	0,58
21	0,4	0,51	0,47	0,64
design	1			

Ces résultats sont représentés par des histogrammes (figure IV.9) afin de bien montrer les fluctuations journalières de l'ammonium d'un point à un autre des unités de dessalement.

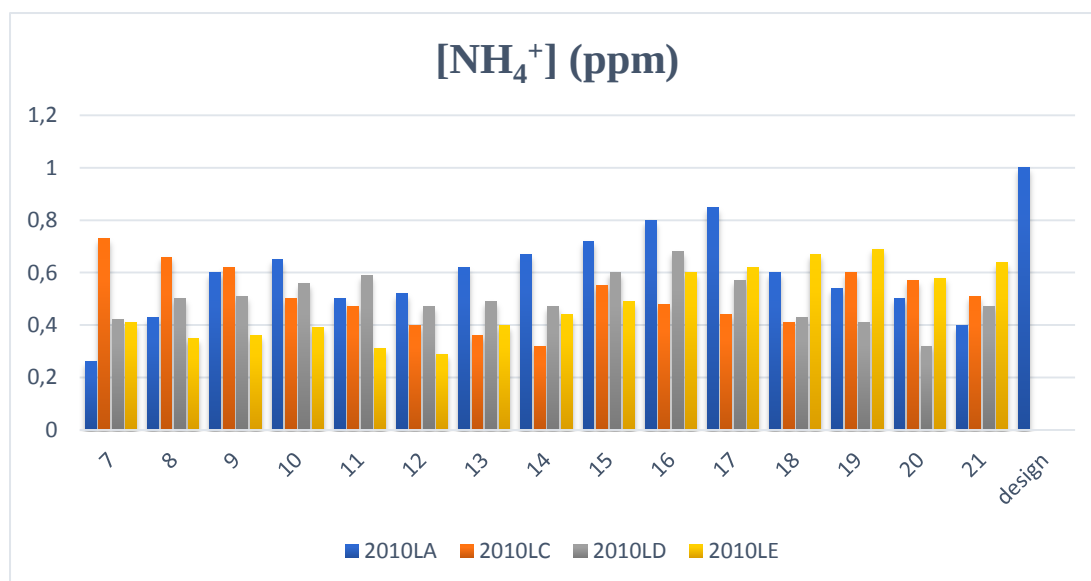


Figure IV.9. Mesures des concentrations des ions ammonium des eaux dessalées produites par les unités 2010 LA/D/E du mois d'avril.

☒ Interprétation des résultats

On remarque d'après le graphe de la figure IV.7 que la concentration de NH_4^+ augmente progressivement mais ne dépasse pas la norme sa concentrations est inférieure à 1 ppm.

Tableau IV.8. Résultats de l'analyse des ions ammonium des eaux dessalées (Mai).

Dessaleurs Date (jours)	[NH ₄ ⁺] (ppm)			
	2010LA	2010LC	2010LD	2010LE
7	0,42	0,7	0,68	0,5
8	0,58	0,72	0,65	0,54
9	0,6	0,64	0,5	0,35
10	0,64	0,53	0,57	0,34
11	0,58	0,45	0,54	0,38
12	0,63	0,41	0,59	0,3
13	0,61	0,38	0,64	0,41
14	0,68	0,36	0,48	0,43
15	0,7	0,34	0,42	0,48
16	0,78	0,23	0,49	0,61
17	0,8	0,4	0,6	0,66
18	0,85	0,45	0,72	0,64
19	0,69	0,55	0,75	0,7
20	0,42	0,58	0,79	0,89
21	0,41	0,56	0,62	0,78
design	1			

Ces résultats sont représentés par des histogrammes (figure IV.10) afin de bien montrer les fluctuations journalières de l'ammonium d'un point à un autre des unités de dessalement.

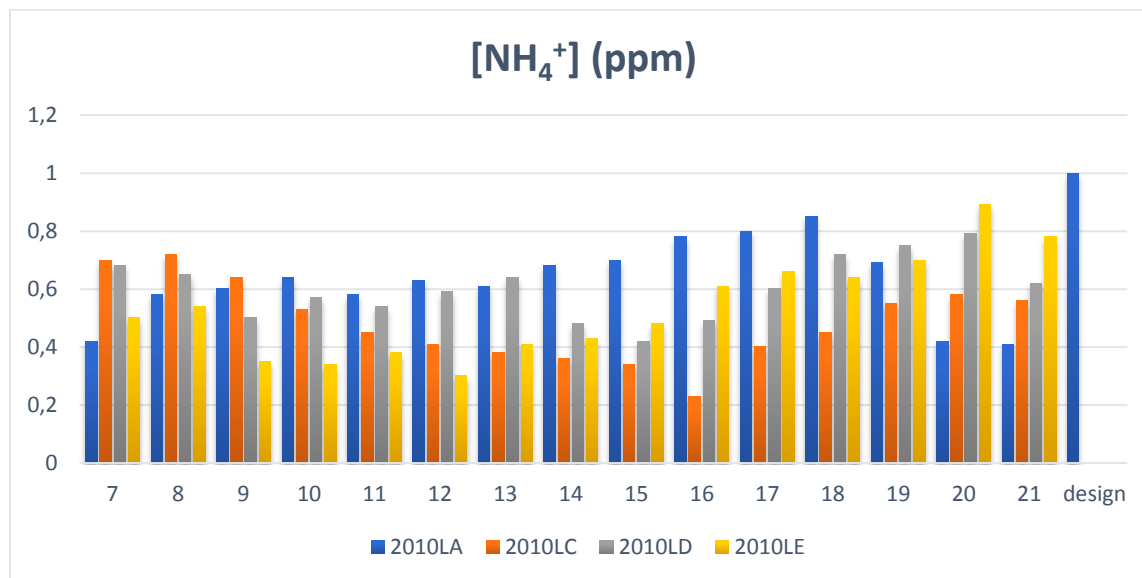


Figure IV.10. Mesures des concentrations des ions ammonium des eaux dessalées produites par les unités 2010 LA/D/E du mois de Mai

Interprétation des résultats

D'après les résultats des analyses d'ammonium dans les eaux dessalées, nous observons que les valeurs des concentrations de ces ions dans l'eau dessalée produite par les dessaleurs sont inférieures à la norme malgré leur instabilité.

IV.3 Conclusion

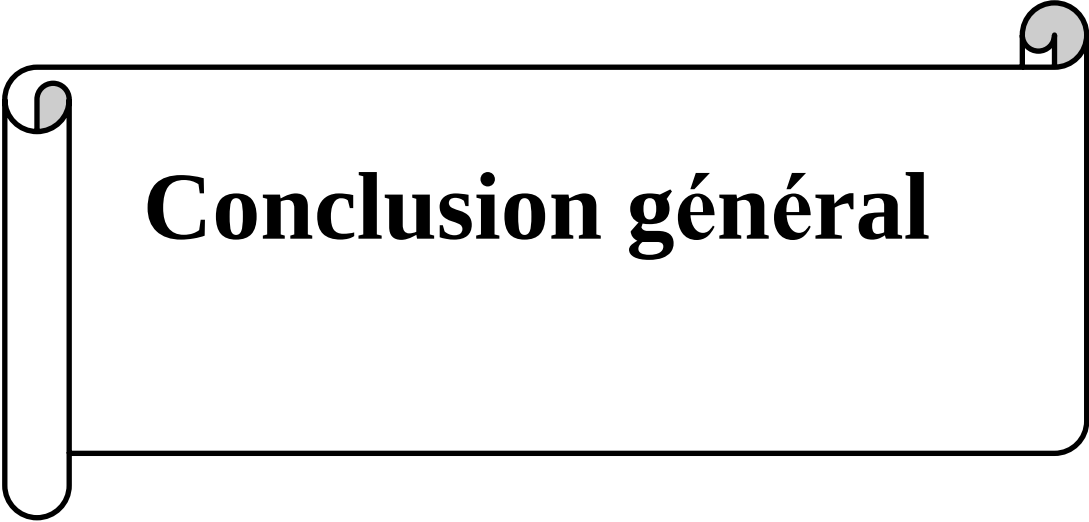
D'après les résultats de l'analyse de l'eau distillée produite par les quatre dessaleurs on remarque que :

- Les valeurs du pH aux niveau des quatre dessaleurs restent dans la moyenne entre 6 et 8 donc elles sont dans l'intervalle de la norme,
- Concernant la conductivité aux niveaux des quatre déssaleurs reste inferieure à la norme (8 $\mu\text{s/cm}$),
- Les chlorures ne dépassent pas l'unité de 1 ppm donc ils sont dans la norme,
- L'analyse des ions d'ammonium ne dépasse non plus l'unité de 1 ppm donc ça reste dans la norme.

D'après les résultats obtenus, on constate que le procédé MSF utilisé dans le complexe GL2/Z est performant pour produire de l'eau de bonne qualité à partir du traitement de l'eau de mer plus l'énergie de vapeur produite pour faire tourner les turbines.

Les références

¹ S, KHARREF. *Mémoire de magister en chimie appliquée « comportement électrochimique de l'acier A105 dans différents milieux » Université de Skikda 2008.*



Conclusion général

Conclusion général

Notre stage, effectué au niveau du complexe SONATRACH plus précisément au complexe GL2/Z, nous a permis d'acquérir une compréhension approfondie de boucle de refroidissement en utilisant de vapeur qui est, à la fois, une source d'énergie de chauffe et la force motrice des machines tournantes dans le procédé de liquéfaction du gaz naturel. Dans ce procédé utilise les eaux dessalées dans les chaudières, c'est pour cette raison qu'il faut contrôler la qualité de ces eaux afin d'éviter les problèmes de corrosion et d'entartrage qui altère les appareils.

Les unités de dessalement sont confrontées au souci de corrosion, qui touche principalement les chaudières, en raison de :

- Le taux élevé des chlorures
- Insuffisance du vide au niveau du dessaleur,
- Bouchage au niveau des filtres autonettoyants des dessaleurs 2010LA/ C/D/E/. Il apparait clairement que les déviations des paramètres opératoires des dessaleurs ont contribué dans la baisse de la production de ces unités.

Le travail présenté dans ce mémoire a exposé les résultats d'analyse de différents paramètres physicochimiques des eaux de mer après dessalement comme la conductivité électrique, le pH, le taux de chlorures ainsi que les ions d'ammonium. Ces analyses ont été effectuée pendant les deux mois d'avril et de mai 2025, après prélèvement des échantillons à différents points des unités L2010 A//C/D/E.

D'après ces résultats, nous avons conclu que tous les paramètres physico-chimiques analysés dans cette période sont dans les normes préconisées mais rien n'empêche de suivre et contrôler ces paramètres quotidiennement afin d'éviter tout problème qui empêche le bon fonctionnement des appareils.

A l'issue de cette situation, nous proposons la mise en œuvre d'un plan d'action de première urgence :

- ✓ Inspecter et vérifier l'état d'encrassement des orifices de passage de l'eau de saumure dans différentes boîtes de détentes et les nettoyer si nécessaire,
- ✓ Procéder automatiquement au nettoyage chimique de chaque dessaleur ayant fonctionné pour une durée de six mois