



Faculty of Sciences and Technology

Department of Process Engineering

Ref :...../U.M/F.S.T/2026

كلية العلوم والتكنولوجيا

قسم هندسة الطرائق

2026 رقم :..... / ج.م.ك.ع.ت/

MÉMOIRE DE FIN D'ÉTUDES DEMASTER ACADÉMIQUE

Filière : Génie des procédés

Option : Génie des procédés des matériaux

Thème

*Influence du nouveau dégazeur modifié sur le problème de
perçement des tubes dans la chaudière IHI 400T(770UE) au
niveau de GL2/Z*

Présenté par :

-Mlle . REZIGA Chaimaa

-Mlle . HENNI Imene

Soutenu le 03/06/ 2026 devant le jury composé de :

Présidente : BENDENIA Souhila

Pr

Université de Mostaganem

Examinatrice : BENALIOUA Bahia

MCA

Université de Mostaganem

Encadrante : BOUBEGRA Naima

MCA

Université de Mostaganem

Année Universitaire : 2025/2026

Remerciements

Nous remercions tout d'abord le Dieu de nous avoir donné la force, la volonté et la patience d'achever nos études.

Nous adressons nos sincères remerciements à Madame Boubegra Naima, notre encadrante, pour son soutien indéfectible, ses conseils précieux et sa disponibilité tout au long de notre travail. Son expertise et son encouragement ont été essentiels à la réussite de ce projet.

Nous exprimons également notre profonde gratitude envers Mme Bendenia Souhila pour son soutien et sa guidance dans la réalisation de ce travail, ainsi que pour son acceptation de présider notre jury et merci infiniment à Mme Benalioua Bahia d'avoir accepté d'examiner et d'évaluer ce travail en tant que membre de ce jury.

Nos plus profonds remerciements vont à nos parents, qui nous ont soutenus sans relâche, nous offrant amour, patience et encouragements durant toute la période de notre étude. Leur soutien moral et matériel a été une source constante de motivation.

Nous tenons aussi à remercier nos proches et notre grande famille pour leur présence, leur compréhension et leur encouragement. Leur soutien inconditionnel nous a permis de surmonter les moments difficiles et de persévérer dans notre travail.

On adresse nos profonds remerciements à tous ceux qui ont contribué à la réalisation de ce projet.

Enfin, en tant que binôme, nous nous remercions mutuellement pour la collaboration harmonieuse, le partage des responsabilités et le soutien réciproque qui ont été déterminants pour mener à bien ce projet.

Merci à tous du fond du cœur.

Abstract

The modification of the deaerator installed at the 770UE unit in the GL2Z plant significantly the quality of boiled feed water. By considerably reducing the dissolved oxygen content, this improvement decreased internal corrosion phenomena, which are the main cause of tube perforation. The results show optimized boiler reliability and better overall performance of the steam production unit.

Keywords: IHI-type boiler, deaerator, water analysis, corrosion, air removal, dissolved oxygen.

ملخص

لقد سمح تعديل جهاز نزع الغازات (Dégazeur) المثبت على مستوى الوحدة 770UE بمجمع GL2Z بتحسين جودة مياه تغذية الغلايات بشكل ملحوظ. ومن خلال التخفيض الكبير في نسبة الأكسجين المذاب في الماء، ساهم هذا التحسين في الحد من ظاهرة التآكل الداخلي التي تُعد من الأسباب الرئيسية لثقوب الغلايات، كما أدى إلى تحسين الأداء العام لوحدة إنتاج البخار.

الكلمات المفتاحية: الغلاية من نوع IHI ، نزع الغازات، تحليل المياه، التآكل، جهاز إزالة الهواء، الأكسجين المذاب.

Résumé

La modification du dégazeur installé au niveau de la 770UE dans l'usine GL2Z a permis d'améliorer significativement la qualité de l'eau d'alimentation des chaudières. En réduisant considérablement la teneur en oxygène dissous, cette amélioration a diminué les phénomènes de corrosion interne, principal responsable du percement de la chaudière et une meilleure performance globale de l'unité de production de vapeur.

Mots-clés : chaudière de type IHI, désaérateur, analyse de l'eau, corrosion, élimination de l'air, oxygène dissous.

Table des matières

Introduction générale.....	1
-----------------------------------	----------

Chapitre I : Présentation du complexe GL2/Z et sa chaudière

• I.1. Introduction -----	3
• I.2. Historique -----	3
• I.3. Description et fonctionnement général -----	4
• I.4. Chaudière IHI 400T -----	5
○ I.4.1. Définition d'une chaudière -----	5
○ I.4.2. Caractéristiques techniques de la chaudière IHI -----	6
○ I.4.3. Description des équipements -----	7
▪ I.4.3.1. Économiseur -----	7
▪ I.4.3.2. Évaporateur-----	8
▪ I.4.3.3. Ballon de vapeur-----	8
▪ I.4.3.4. Chambre de combustion et zone de récupération de chaleur --	9
▪ I.4.3.5. Brûleurs -----	10
▪ I.4.3.6. Surchauffeurs -----	10
▪ I.4.3.7. Porte d'air supérieur (OAP)-----	11

Chapitre II : Théorie des dégazeurs

• II.1. Rendement de dégazage -----	13
• II.2. Mesure de l'oxygène dissous (O₂) -----	13
• II.3. Mesure du pH et de la conductivité -----	13
• II.4. Fonctionnement thermique et pression -----	13
• II.5. Température de l'eau -----	14
• II.6. Pression du dégazeur -----	14
• II.7. Événement de vapeur -----	15
• II.8. Fonctionnement mécanique et hydraulique -----	15
• II.9. Description du réseau de condensat du complexe GL2/Z -----	16

Chapitre III : Analyse comparative entre le nouveau et l'ancien dégazeur

• III.1. Dégazeur à contre-courant horizontal (Grane Environnemental) -----	21
• III.2. Fonctionnement -----	21
• III.3. Dégazeur de tube T125 vertical à plateaux et à jet -----	22
• III.4. Fonction et principes de désaération -----	25

Chapitre IV : Influence de la modification du dégazeur sur la réduction des percements des tubes

• IV.1. Introduction -----	31
• IV.2. Contexte et problématique des percements historiques -----	31
• IV.3. Analyse des causes racines des percements -----	33
• IV.4. Mesure des paramètres de la modification -----	37
• IV.5. Opérations de modification sur site -----	38
• IV.6. Analyse comparative des deux dégazeurs -----	45
• IV.7. Résultats expérimentaux et validation -----	45
• IV.8. Validation technique et conformité -----	46
Calculs et résultats -----	48
• 1. Calculs de la performance moyenne pour chaque appareil -----	49
• 2. Calculs du taux d'amélioration -----	49
• 3. Analyse quantitative des performances -----	50
• 4. Recommandations et perspectives -----	51
Conclusion générale-----	52
Bibliographie -----	53

Liste des abréviations

GN : Gaz naturel.

ABB : ASEA Brown Boveri.

IHI : Ishikawajima-Harima Heavy Industries.

GNL : Gaz naturel liquéfié.

O₂ : Oxygène.

CO₂ : Dioxyde de carbone.

C gaz : Concentration de gaz.

P_{partielle} : Pression partielle.

P_{O₂} : Pression de l'oxygène dissous.

P_{tot} : Pression totale des ensembles des gaz dans l'eau.

770 UE/F : Chaudières IHI E/F du complexe GL2/Z.

P_{vapeur} : Pression de vapeur.

ppb : Partie par billion.

LQS : Division de liquéfaction et séparation.

PSH : Surchauffeur primaire.

ppm : Partie par million.

ECO : Économiseur.

OAP : Orifice d'air supérieur.

IHI : Ishikawajima-Harima Heavy Industries.

2041F : Bac de stockage d'eau dessalée.

772 UE/F : Dégazeurs de la chaudière IHI E/F du complexe GL2/Z.

770 UE/F : Chaudières IHI E/F du complexe GL2/Z.

TDS : Total de solides dissous.

X31C : Réchauffeur du gaz d'alimentation.

X34C : Réchauffeur du décarbonateur.

X08C : Rebouilleur de la tour de lavage.

X52C : Rebouilleur du dé-éthaniseur.

X54C : Rebouilleur du dé-propaniseur.

X56C :Rebouilleur du dé-butaniseur.

X42C1/C2 :Réchauffeur du gaz de régénération des sécheurs.

X44F :Ballon de détente des condensats.

X27J/JA : Pompe de transfert du retour condensat basse pression vers le réseau de retour condensat haute pression.

X01J :Condenseur du turbo compresseur de propane.

X02J :Condenseur du turbo compresseur de MCR 1.

X03J :Condenseur du turbo compresseur de MCR 2.

2005JCA/JCB/JCC :Condenseurs des turbogénérateurs.

774F :Bac de stockage de retour condensat.

775F :Bac de stockage d'eau dessalée de KAHRAMA.

Liste des tableaux

<i>Tableau I.1</i> : Spécification et description de la chaudière.....	6
<i>Tableau I.2</i> : Les paramètres thermo-hydraulique des économiseur.....	7
<i>Tableau I.3</i> : Les paramètres thermo-hydraulique des surchauffeurs.....	10
<i>Tableau II.1</i> : Résumé des signes de dysfonctionnement.....	16
<i>Tableau III.1</i> : Débit des différents fluides du dégazeur.....	19
<i>Tableau III.2</i> :Températures des fonctionnement du dégazeur.....	20
<i>Tableau III.3</i> :Paramètres de pression et d'énergie.....	20
<i>Tableau III.4</i> :Mâtereaux de construction.....	21
<i>Tableau III.5</i> : Poids 672U.....	22
<i>Tableau III.6</i> :Dépannage dégazeur.....	26
<i>Tableau IV.1</i> Présence d'oxygène de 2007 à 2023.....	30
<i>Tableau IV.2</i> :Caractéristiques techniques comparées.....	42
<i>Tableau IV.3</i> :Campagnes de mesures O ₂ après la modification de la ligne.....	42
<i>Tableau IV.4</i> :Synthétique des performance*par rapportà l'objectifs de 7 ppb.....	43

Liste des figures

Figure I.1: Schéma générale du complexe GL2/Z.....	4
Figure I.2: Composante de la chaudière.....	5
Figure I.3: Ballon de vapeur supérieur.....	8
Figure I.4: Chambre de combustion.....	9
Figure II.1: Schéma du fonctionnement thermique et pression.....	14
Figure III. : Schéma dégazeur thermique.....	19
Figure IV.1: Corrosion sous dépôt.....	23
Figure IV.2: Réaction chimique corrosion par O ₂	31
Figure IV.3: Corrosion par oxygène.....	31
Figure IV.4: Corrosion par CO ₂	32
Figure IV.5: Corrosion par érosion.....	33
Figure IV.6: Impact de surchauffe.....	34
Figure IV.7: Présentation de la modification.....	35
Figure IV.8: Sablage 672U.....	36
Figure IV.9: Inspection par ultrason et visuellement.....	37
Figure IV.10: Gicleurs.....	38
Figure IV.11: Assemblage des plateaux.....	38
Figure IV.12: Système fixation des plateaux.....	39

Figure IV.13: Trous d'hommes.....	39
Figure IV.14: Manutention et installation.....	40
Figure IV.15: Ligne SC -1011-10''	41
FigureIV.16: LigneLS-1004-24''	41

Introduction générale

Introduction générale

Dans le complexe GL2/Z, la production de vapeur est essentielle au processus de production du GNL. La fiabilité des chaudières dépend fortement de la qualité de l'eau d'alimentation, notamment de l'élimination des gaz dissous tels que l'oxygène et le dioxyde de carbone, responsables de la corrosion interne.

Le dégazeur joue un rôle fondamental dans la protection des chaudières et l'amélioration de leur rendement. Cependant, au niveau de la chaudière IHI 400T, des percements des tubes ont été observés, provoquant des coûts de maintenance élevés.

Cette situation soulève la problématique suivante : l'ancien système de dégazage assurait-il une élimination suffisante des gaz dissous ou son inefficacité a-t-elle contribué à l'apparition de la corrosion responsable du percement des tubes ? La modification du dégazeur a-t-elle permis d'améliorer cette situation .

La qualité du dégazage a été identifiée comme un facteur déterminant, car une élimination incomplète des gaz dissous accélère la corrosion. Une modification du système de dégazage a donc été réalisée afin d'améliorer l'efficacité de l'élimination des gaz et de réduire ce phénomène.

Ce mémoire vise à étudier l'influence du nouveau dégazeur modifié sur le problème de percement des tubes, en comparant les paramètres de fonctionnement et la qualité de l'eau avant et après la modification, et en évaluant son impact sur la performance, la fiabilité et la durabilité des installations.

Chapitre I :Présentation du complexe
GL2/Z et sa chaudière

1.1.Introduction

Dans le cadre de la valorisation des ressources nationales en gaz naturel, l'Algérie a lancé, dès les premières années de l'indépendance, un vaste programme de développement de l'industrie du Gaz Naturel Liquéfié (GNL).

L'objectif principal était d'assurer la transformation du gaz naturel et son exportation vers les marchés internationaux, notamment l'Europe par voie maritime. L'Algérie dispose de deux pôles stratégiques de production de GNL situés à Arzew et Skikda.

Grâce à des réserves estimées à environ 3000 milliards de dollars, le pays occupe une place importante à l'échelle mondiale. Parmi les réalisations majeures figure le complexe GL2/Z, exploité par SONATRACH, intégré au pôle industriel d'Arzew et composé des unités GL1/Z, GL2/Z et GL3/Z.

Lancé officiellement en 1973, le projet a été confié à la société Bechtel. Il a été mis en production cinq ans plus tard, marquant les premières exportations vers les États-Unis. En 1993, un programme de rénovation et de modernisation a été entrepris afin d'améliorer la fiabilité des installations, renforcer la sécurité et augmenter la capacité jusqu'à 115% de la capacité nominale initiale[1].

1.2. Historique

L'Algérie dispose d'importantes ressources en hydrocarbures, dont le principal gisement gazier est celui de Hassi RMel. Il alimente trois complexes de liquéfaction : deux à Arzew et un à Skikda.

La liquéfaction du gaz naturel (GN) permet sa commercialisation à grande échelle ; il est important de noter qu'environ 1 m³ de GNL correspond à environ 600 m³ de gaz naturel à l'état gazeux.

Le complexe GL2/Z, situé dans la zone industrielle d'Arzew, a démarré sa première production le 20 janvier 1981. Il comprend six trains de liquéfaction indépendants, chacun composé de quatre unités principales :

- Traitement.
- Refroidissement.
- Liquéfaction.

➤ Fractionnement.

Avant la liquéfaction, le gaz est traité pour éliminer le CO₂, la vapeur d'eau et les hydrocarbures lourds, afin d'éviter l'obturation des installations à cause des basses températures (phénomène de gel).

Le complexe a pour mission de liquéfier le gaz provenant de Hassi RMel, avec une extraction possible du propane, du butane et de la gasoline. Le GNL produit est ensuite pompé et chargé dans des méthaniers pour son transport maritime.

Le site s'étend sur 72 hectares en bord de mer, à environ 700 km de Hassi R'Mel, ce qui facilite l'exportation maritime ainsi que l'utilisation de l'eau de mer pour le refroidissement et la production de vapeur[1].

1.3. Description et fonctionnement général

Du fait que les six trains du complexe GL2/Z fonctionnent en autonomie presque totale, l'arrêt d'un train n'influe pas sur les autres. Ils sont disposés en parallèle, et la liquéfaction constitue la phase finale avant le stockage et l'expédition.

Le gaz naturel d'alimentation est acheminé vers chaque train par des réseaux de canalisations.

- Le débit total de GN pour l'ensemble du complexe est d'environ 1500000 m³/h.
- Le débit moyen par train est de 250000m³/h.



Figure I.1 :Schéma général du complexe GL2/Z

I.4.Chaudière IHI 400T

I.4.1. Définition d'une chaudière

Une chaudière, ou générateur de vapeur, est un appareil destiné à extraire l'énergie calorifique d'un combustible et à la céder à l'eau, dans le but de la transformer en vapeur à une pression et une température définies en fonction de l'usage voulu.

Les performances d'une chaudière sont définies par un certain nombre de caractéristiques essentielles :

- La Vaporisation ou Débit de vapeur : exprimé en [T/H].
- La Pression (timbre) : exprimée en [bar]. C'est la pression en fonction de laquelle est calculée la résistance mécanique des parties sous pression.
- La Température de surchauffe nominale : c'est le seuil qui conditionne le dimensionnement des surchauffeurs.
- Le Rendement thermique : c'est le rapport entre la chaleur utile transmise à l'eau (et à la vapeur) et la chaleur introduite dans le foyer .

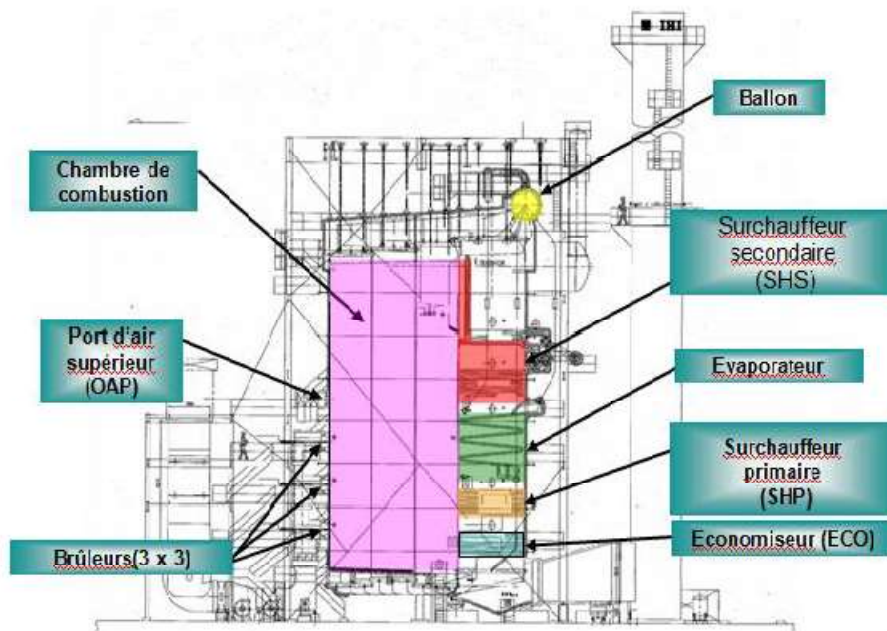


Figure I.2 :Composants de la chaudière

1.4.2.Caractéristique technique de lachaudière IHI

❖ Critères de conception

Les critères de conception des chaudières, pour un fonctionnement à charge nominale avec un temps maximal de service effectif, sont :

- Système à circulation naturelle contribue à réduire la maintenance ainsi que le besoin en énergie.
- La surface de chauffe est conçue pour permettre la vidange totale de l'eau.
- La chaudière sera entièrement étanche au gaz (construction soudée de tubes à ailettes).
- Le ventilateur à tirage forcé avec registre d'entrée, contribue à réduire le coût d'exploitation.
- Les performances des pièces internes du ballon de vapeur sont très fiables[1].

Tableau I.1: Spécification et description de la chaudière

<i>Caractéristique</i>	<i>Valeur correspondante</i>
<i>Capacité nominale (t/h)</i>	<i>400 (5jours de suite)</i>
<i>Pression de vapeur (bars)</i>	<i>65</i>
<i>Température de vapeur (°C)</i>	<i>441</i>
<i>Qualité de vapeur (%)</i>	<i>Sèche à 99.95</i>
<i>Teneur en sodium (ppm)</i>	<i>0,02 ou moins</i>
<i>Teneur en silice (ppm)</i>	<i>0,02 ou moins</i>
<i>Teneur en oxygène (ppm)</i>	<i>0,005 ou moins</i>
<i>Température calculée (°C)</i>	<i>20</i>
<i>Humidité relative (%)</i>	<i>76</i>
<i>Pression barométrique (mm Hg)</i>	<i>758</i>
<i>Emission des gaz de fumée</i> <i>CO : 50ppm ou moins (µg/Kcal)</i>	<i>NOX : 300 ou moins</i>
<i>PCS du gaz combustible (Kcal/Nm³)</i>	<i>7724</i>

I.4.3.Description des équipements

I.4.3.1.Économiseur

L'économiseur est un échangeur de chaleur à multi-passages placé dans l'écoulement des gaz d'échappement chauds sortant de la chaudière. Son but est de réchauffer l'eau d'alimentation par les fumées de combustion avant d'entrer dans le réservoir (ballon), afin de maximiser l'efficacité thermique et de réduire les émissions thermiques.

Les paramètres thermo-hydrauliques des économiseurs sont regroupés dans le tableau suivant :

TableauI.2 :Paramètres thermo-hydrauliques des économiseurs

<i>Paramètre</i>	<i>Unité</i>	<i>Valeurs</i>
<i>Température d'entréed'eau d'alimentation</i>	°C	109
<i>Température de sortie d'eau d'alimentation</i>	°C	200
<i>Température d'entrée des fumées</i>	°C	600
<i>Température de sortie des fumées</i>	°C	280
<i>Débit d'eau d'alimentation</i>	t/h	349
<i>Débit des fumées</i>	Nm3/h	3904499

I.4.3.2.Évaporateur

Les tubes de l'évaporateur constituent généralement les parois de la chambre de combustion. Dans la chambre de combustion, l'énergie chimique du combustible est libérée et transférée dans la chaudière circuit eau/vapeur.

L'eau chauffée est alors vaporisée dans l'évaporateur de la chaudière en, au minimum, une vapeur saturée pour les conditions de pression sous-critique du cycle eau/vapeur, ou en vapeur surchauffée pour des conditions supercritiques.

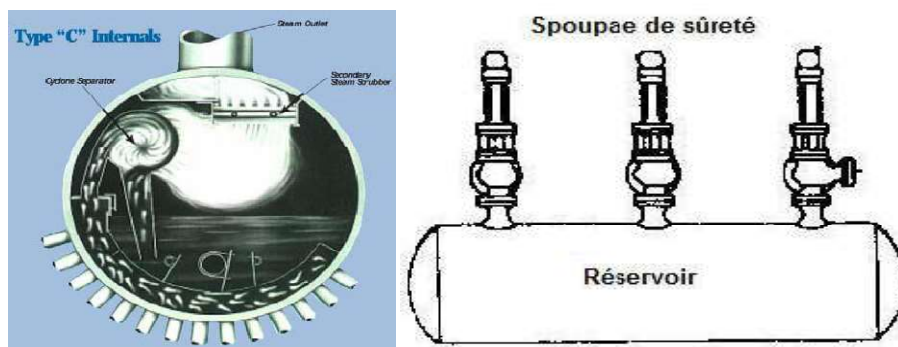
1.4.3.3.Ballon de vapeur

Les ballons ont pour fonction, dans une chaudière à circulation naturelle, de collecter l'eau et la vapeur et de les distribuer aux surchauffeurs et à l'évaporateur.

Les chaudières IHI ne possèdent qu'un seul ballon placé à leur partie supérieure ; les ballons inférieurs ont été remplacés par des collecteurs de sections beaucoup plus petites.

Dans un ballon eau-vapeur, il faut assurer la séparation des deux phases et éviter le primage (c'est-à-dire l'entraînement des gouttelettes d'eau par la vapeur lors de l'ébullition).

Le DCS (Digital Control System) se charge de maintenir le niveau d'eau dans le ballon entre un niveau très haut (80%) et un niveau très bas (40%). Ces valeurs sont des limites qui provoquent le déclenchement (sécurité) de la chaudière.



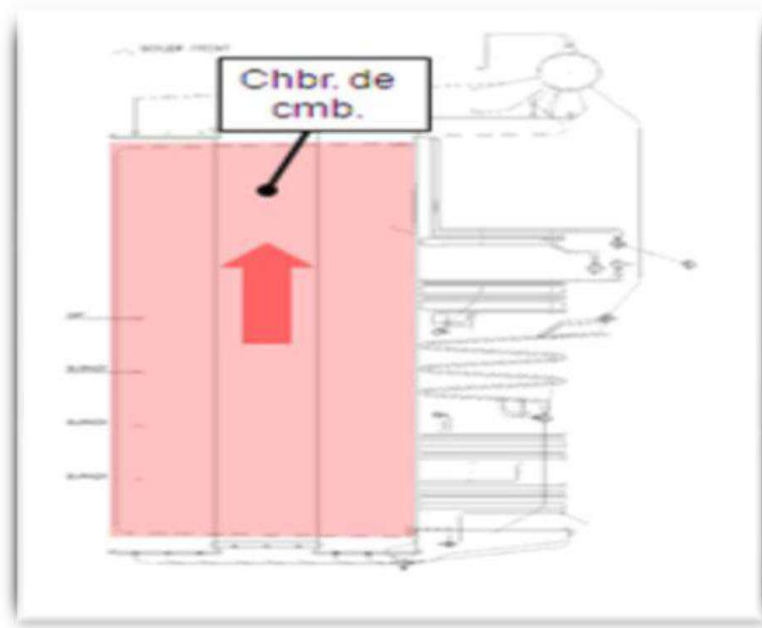
FigureI.3 : Ballon de vapeur supérieur

1.4.3.4.Chambre de combustion et zone de récupération de chaleur

❖Fonction de la chambre de combustion

La chambre de combustion offre un large volume avec des parois internes refroidies par l'eau, où la combustion a lieu, et guide les gaz de fumée vers la surface de convection.

La paroi tubulaire de la chambre de combustion fait bouillir l'eau provenant de la paroi arrière de la zone de récupération de chaleur. Les produits de la combustion sont refroidis par la paroi tubulaire de la chambre de combustion jusqu'à atteindre la température de gaz appropriée.



FigureI.4 :Chambre de combustion

1.4.3.5.Brûleurs

Les brûleurs ont pour rôle d'assurer le mélange intime fuel-gaz et de l'air, d'entretenir la combustion et d'assurer une forme de flamme correcte. Il existe un grand nombre de types de brûleurs : les uns pour combustible unique, les autres pour combustibles multiples, parmi lesquels on peut citer :

- Brûleurs à combustibles gazeux.
- Brûleurs à combustibles liquides.
- Brûleurs mixtes.
- ❖ La chaudière IHI est équipée de 9 brûleurs à combustibles gazeux.
- ✓ Fonction de la paroi de surface de récupération de chaleur : La passe de convection contenant les surchauffeurs, l'économiseur et l'évaporateur est incorporée dans les parois refroidies à l'eau de la zone de récupération de chaleur (ZRC). La paroi tubulaire de la ZRC permet également de faire bouillir l'eau et constitue le système de circulation vapeur-eau.

1.4.3.6.Surchauffeurs

Il y a deux surchauffeurs : un surchauffeur primaire travaillant à haute température (SHT) et un secondaire qui travaille à basse température (SBT). Ils sont connectés en série et placés dans la partie haute du puits arrière du générateur de vapeur.

Ils fonctionnent pour augmenter la température de la vapeur saturée sortant du réservoir (ballon) jusqu'à 441 °C (vapeur surchauffée). Les paramètres thermo-hydrauliques des surchauffeurs sont regroupés dans le tableau suivant (tableau I.3)

Tableau I.3:Paramètres thermo-hydrauliques des surchauffeurs

<i>Paramètres thermo-hydraulique</i>	<i>unité</i>	<i>valeurs</i>
Température d'entrée de la vapeur au SBT	°C	280
Température de sortie de la vapeur au SBT	°C	380
Température d'entrée de la vapeur au SHT	°C	380
Température de sortie de la vapeur au SHT	°C	441
Température d'entrée de fumée au SHT	°C	1147
Température de sortie de fumée au SHT	°C	853
Température de sortie de fumées au SBT	°C	653
Débit de vapeur surchauffée	t/h	400
Débit des fumées	Nm ³ /h	390499

La température de la vapeur surchauffée est contrôlée par une injection d'eau de désurchauffe pratiquée au niveau du collecteur inter-surchauffeurs. Deux vannes de désurchauffe aux caractéristiques identiques, avec un débit d'eau réglable de 0.5 t/h à 25 t/h et une différence de pression de 20 à 16 bars, travaillent en cascade.

Note : la variation des températures est en fonction de la charge d'alimentation de l'eau.

I.4.3.7.Porté d'air supérieur(OAP)

Les chaudières IHI sont équipées d'un mécanisme de réduction de la concentration de CO (monoxyde de carbone) et de NOx (oxydes d'azote) dans les gaz de combustion par le port d'air supérieur OAP.

La réduction se fait par injection d'air dans la zone de haute température pour refroidir et diminuer la concentration de CO et de NOx. C'est une injection d'air à la partie des neuf brûleurs, contrôlée par le FIC-750.611 commandé par la "Master Demand". La quantité d'air injecté ne doit pas dépasser 30% du débit à pleine capacité de la chaudière.

Chapitre II : Théorie des dégazeurs

II.1. Rendement de dégazage

L'objectif principal d'un dégazeur est de réduire les concentrations de gaz dissous, principalement l'oxygène (O₂) et le dioxyde de carbone (CO₂), pour prévenir la corrosion dans le système de vapeur ou d'eau d'alimentation[2].

II.2. Mesure de oxygène dissous(O₂)

C'est la vérification la plus cruciale.

Où mesurer : Prélevez un échantillon d'eau à la sortie du dégazeur (eau d'alimentation).

Limite Acceptable: Un dégazeur fonctionnant correctement doit réduire la concentration d'oxygène dissous à un niveau très bas, idéalement .

Moins de 7 ppb (parties par milliard) pour les chaudières à basse pression.

Souvent moins de 5 ppb pour les chaudières à plus haute pression.

Note : Si la concentration est supérieure à 20 ppb, c'est un signe certain de performance médiocre.

Outil: Utilisez un analyseur d'oxygène dissous portable (mètre DO) ou des kits de test chimiques appropriés. L'échantillon doit être prélevé et testé immédiatement pour des résultats précis[3].

II.3. Mesure du pH et de la conductivité

pH (Eau traitée) : Le dégazage efficace du (CO₂), (qui forme l'acide carbonique) devrait aider à maintenir un pH légèrement plus élevé dans l'eau d'alimentation, souvent autour de 8,5 à 9,5 (selon les directives spécifiques à la chaudière). Une présence excessive de (CO₂) peut indiquer un problème.

II.4. Fonctionnement thermique et pression

Le dégazage est un processus basé sur la loi de Henry, qui est grandement influencée par la température et la pression de l'eau[4] .



1. *Journal of the American Medical Association*, 2000; 284: 2689-2695.

1. *Journal of the American Medical Association*, 1997; 277: 1001-1005.

0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31 32 33 34 35 36 37 38 39 40 41 42 43 44 45 46 47 48 49 50 51 52 53 54 55 56 57 58 59 60 61 62 63 64 65 66 67 68 69 70 71 72 73 74 75 76 77 78 79 80 81 82 83 84 85 86 87 88 89 90 91 92 93 94 95 96 97 98 99

Importance : Cette pression garantit la température de saturation nécessaire et aide à "balayer" les gaz libérés vers l'évent (vent).

Problèmes : Une pression trop basse ou instable peut entraîner une mauvaise performance.

II.7 Événement de vapeur (vent)

Vérification : Le jet de vapeur de l'évent doit être visible mais minimal. C'est une légère purge continue nécessaire pour évacuer l'oxygène et le CO₂ libérés.

Problèmes : Pas de vapeur (ou très peu) : L'évent est peut-être bouché ou la pression de vapeur est insuffisante pour "balayer" les gaz. Les gaz s'accumulent.

Événement excessif (trop de vapeur) : C'est un gaspillage d'énergie et cela indique un débit de vapeur élevé inutilement. L'ouverture de la vanne d'évent est peut-être trop grande.

II.8 Fonctionnement mécanique et hydraulique

1-Débit et distribution de l'eau:

Vérification des Plateaux/Gicleurs :

Plateaux : Assurez-vous qu'ils sont propres et non obstrués. Des plateaux encrassés ou endommagés empêchent une bonne dispersion de l'eau en fines gouttelettes/films, réduisant le contact entre l'eau et la vapeur.

Gicleurs (Jet) : S'assurer que les buses ne sont pas bouchées et produisent un jet fin et bien réparti pour maximiser la surface d'échange de chaleur et de masse.

Problème : Un entartrage ou une corrosion excessive peuvent sérieusement nuire à la distribution de l'eau.

2-Stabilité de niveau:

Vérification : Le niveau d'eau dans le réservoir de stockage doit être stable et correctement contrôlé par la vanne de contrôle d'alimentation. Des fluctuations extrêmes peuvent affecter la stabilité thermique et la pression, perturbant le processus de dégazage.

Tableau II.1: Résumé des Signes de Dysfonctionnement

Symptôme	Cause Possible	Action Recommandée
O2 dissous élevé à sortie.	Température/pression trop basses, problème d'évent, plateaux/gicleurs encrassés, contamination du joint.	Augmenter la pression de vapeur, vérifier la propreté du dégazeur, ajuster l'évent.
Température bien inférieure au point d'ébullition.	Pression de vapeur d'entrée insuffisante, vanne de vapeur défectueuse.	Vérifier la ligne de vapeur vers le dégazeur.
Pression du dégaz instable.	Débit d'eau d'alimentation ou de vapeur d'entrée fluctuant, contrôle de pression défectueux.	Stabiliser les flux.
Vanne d'événement fermée/bouchée.	Accumulation de gaz-non-condensables.	Ouvrir/nettoyer l'évent (petit débit constant requis).

II.9 Description du réseau de condensat du complexe GL2 /Z

I. Introduction

On appelle condensât l'eau résultante de la condensation de la vapeur utilisée pour alimenter les turbines entraînant les équipements rotatifs tels que les compresseurs, les alternateurs, les pompes et les ventilateurs, elle est utilisée aussi dans les échangeurs de chaleur tels que les

rebouilleurs, et pour les boîtes des éjecteurs pour la création du vide dans les condenseurs sous vide et comme produit d'étanchéité aux joints des compresseurs.

II. Place du réseau eau condensat dans le procédé

Le réseau de retour condensat est parmi les réseaux primordiaux et vitaux pour la production du GNL dans le complexe GL2/Z du fait qu'il garantit l'alimentation des chaudières pour produire de la vapeur sèche afin d'assurer le bon fonctionnement des turbines à condensation de la zone de procédé (X01JT/02JT/03/JT) et de la zone des utilités (2070 JAT/JBT/JCT) et ceci à travers un système de récupération de vapeur sous vide, sachant que l'arrêt d'une des turbines X01JT/02JT/03JT/04JT entraînera l'arrêt du train de liquéfaction.

❖ Condensât de vapeur basse pression

Elle a pour sources dans un train de liquéfaction :

- Le réchauffeur du gaz d'alimentation : X31C.
- Le réchauffeur du décarbonater : X34C.
- Le rebouilleur de la tour de lavage : X08C.
- Le rebouilleur du déméthaniser: X52C.
- Le rebouilleur du dé-propaniseur: X54C.
- Le rebouilleur du dé-butaniser: X56C.
- Le réchauffeur du gaz de régénération des sécheurs : X42C1/C2.
- Les réchauffeurs à saumure.
- Les boîtes d'éjecteur à savoir : l'éjecteur de démarrage, l'éjecteur intermédiaire et complémentaire.

Le retour condensât de basse pression (BP) est réceptionné par le ballon de détente des condensats X44F puis transféré vers le réseau condensat HP via les pompes X27J/JA.

❖ Condensât de vapeur haute pression

Elle a pour sources dans un train de liquéfaction:

- Le condenseur du turbo compresseur de propane : X01J.
- Le condenseur du turbocompresseur de MCR1: X02J.

- Le condenseur du turbocompresseur de MCR2: X03J.
- Le condenseur du turbocompresseur fuel gaz : X04J.
- Le condenseur des turbogénérateurs: 2005JCA/JCB/JCC.

Le réseau condensat est composé d'un nombre d'équipement set des lignes tel que:

❖ *Bac de stockage d'eau dessalée 2041F*

Situé dans la zone des utilités, le bac 2041F d'une capacité de 8710 m³ stocke l'eau distillée produite par les six dessaleurs et qui assure l'eau d'appoint au réseau du retour condensat. Cette eau d'appoint est véhiculée via trois pompes (2010JA/B/C) vers le collecteur d'eau d'appoint (alimentation chaudières) par la ligne (DS 12'') d'eau dessalée.

Le bac de stockage (2041F) d'eau distillée, est continuellement pressurisé à l'azote pour éviter tout contact entre l'eau et l'air. La pression d'azote d'alimentation est réduite par les régulateurs de pression PCV-4303 et PCV-4304 de 8,62 bars à 1,38 bar. La pression de service de ce bac est de 5 mbar.

❖ *Adoucisseurs*

Le retour condensat est parfois sujet à des contaminations par les sels dues aux fuites d'eau de refroidissement (eau de mer) des condenseurs. Ceci peut conduire à la formation de dépôts de tartre ou de carbonate de sodium dans les chaudières et les turbines, et provoquer ainsi l'arrêt de l'usine.

Pour remédier à ce problème, un système de déminéralisation composé de deux adoucisseurs dans la zone des utilités (2004 U1/ 2004 U1A), et un autre constitué de six adoucisseurs (un adoucisseur par train) dans la zone Procédé ont été installées au moment de la construction de l'usine. Ces derniers ont été remplacés par une installation commune et centralisée implantée près des chaudières de grande capacité ABB(774U1/U2/U3/U4/U5/U6),avec possibilité d'ajout de quatre autre unités d'épuration.

❖ *Bac tampon 774F*

Ce bac est d'une capacité de 2000 m³, il sert de stocker le retour condensât adouci et permet d'alimenter en continu vers le collecteur d'eau d'alimentation des chaudières.

Le bac tampon 774F fonctionne à une température de service égale à 52°C et une pression de service égale à la pression atmosphérique.

Les vannes PCV-3050A/B sont des régulateurs qui constituent une détente en deux étapes de la pression d'azote dans les conditions atmosphériques du bac 774F. Ces vannes sont utilisées pour assurer l'étanchéité du réservoir.

❖ Bac de stockage d'eau dessalée 775F

Il sert de stocker l'eau dessalée provenant de KAHRAMA, d'une capacité de stockage de 1500 m³, l'étanchéité du bac est assurée par une pression d'azote de 1,5 bar régulée par la vanne PCV-3050C. Ce bac fonctionne à pression atmosphérique.

❖ Pompes d'alimentation de condensat épuré

Les quatre pompes 774JA/B/C et D sont placées en aval du bac tampon et assurent l'alimentation du collecteur principal du réseau épuré pour alimenter les dégazeurs des chaudières des trains et les dégazeurs des chaudières ABB et IHI. Un tronçon de 6'' est relié au réseau de distribution des épurateurs Utilités. Les pressions d'aspiration et de refoulement ainsi que le débit de refoulement des pompes de condensat épuré sont les suivants :

- ✓ Pression d'aspiration:- 0,07 bars effectifs.
- ✓ Pression de refoulement :5,14 bars effectifs.
- ✓ Débit : 1223,5 m³/h.

❖ Système d'eau d'appoint

Il existe toujours des pertes de condensât dans le réseau dû principalement à l'ouverture des purges des chaudières(purge continue et la purge intermittente),et aussi dû à la mise de la vapeur à l'atmosphère (ouverture des événements) dégagée par les ballons de détente et au déversement des pièges de vapeur dans les égouts au lieu du réseau de récupération.

C'est ainsi que l'eau dessalée sert d'appoint au réseau de retour condensat (de 8 à 10%) d'où l'appoint est fait dans les adoucisseurs [11].

ChapitreIII :Analyse comparative entre le
nouveau et l'ancien dégazeur

III.1. Dégazeur à contre courant horizontal craineeenvironnementale

Le dégazeur est un appareil de chauffage et d'élimination des gaz dissous dans l'eau. Ce modèle d'origine est installé au niveau des unités 770UE et 770UF dans les chaudières IHI GL2Z, où il reçoit l'eau d'alimentation du bac de stockage 774 à l'aide des pompes JA1T et JB1T[5].

Le dégazeur garantit, dans les meilleures conditions, un taux d'oxygène dissous de moins de 5 ppb ; sinon, le phénomène de percement de tubes se produit dans la chaudière.

III.2. Fonctionnement

Le dégazeur traite l'eau qui vient de 774F à 60°C en deux étapes principales : la section de vaporisation et la section de chauffage.

1) Section de vaporisation

L'eau d'alimentation est pulvérisée à travers des vannes de vaporisation, créant de fins filets qui favorisent un échange thermique rapide avec la vapeur. Cette eau est ensuite chauffée légèrement (de 2°F à 40°F au-dessus de la température de la vapeur), ce qui permet d'éliminer presque totalement les gaz dissous, principalement l'oxygène et le dioxyde de carbone (CO₂)[6].

Les vannes sont conçues pour assurer une vaporisation uniforme et stable, quelles que soient les conditions de charge. Dans cette zone, plus de 95 % des gaz non condensables sont retirés dès le premier passage.

2) Section de chauffage

L'eau, contenant encore une faible quantité de gaz résiduels, passe dans une chambre de chauffage où elle entre en contact avec de la vapeur à contre-courant. Ce mélange assure une élimination complète des gaz restants grâce à un échauffement progressif et contrôlé[7].

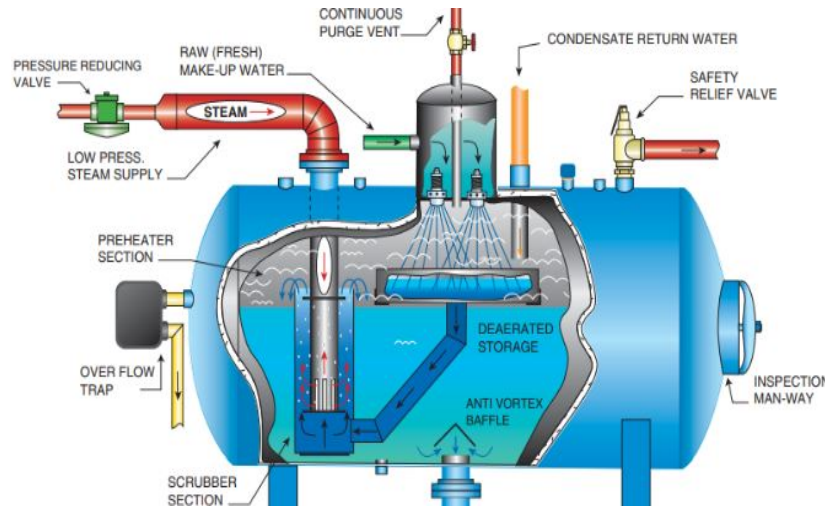


Figure III.1:Schéma dégazeur thermique

À la sortie de cette section, l'eau est totalement dégazée et portée à la température requise pour l'alimentation de la chaudière.

L'ensemble du système est conçu pour maintenir une température constante, une élimination maximale des gaz dissous et une stabilité de fonctionnement quelles que soient les variations de charge.

III.3 Dégazeur de tube T125 vertical à plateaux et à jet

1) Données de Fonctionnement (Operating Data)

Note : Toutes les valeurs sont basées sur une quantité de vapeur ventilée de 227 kg/h.

Tableau III .1:Débits des différents fluides du dégazeur.

<i>Paramètre</i>	<i>Normal</i>	<i>Cas 1</i>	<i>Cas 2</i>
<i>Capacité sortie</i>	<i>361,470</i>	<i>361,470</i>	<i>361,47</i>
<i>Eau de compensation</i>	<i>5,540</i>	<i>3,195</i>	<i>99,987</i>
<i>Quantité de vapeur</i>	<i>25,529</i>	<i>25,122</i>	<i>28,93</i>
<i>Condensat à 49,4°C</i>	<i>282,859</i>	<i>282,959</i>	<i>185,00</i>
<i>Condensat à 150,5°C</i>	<i>46,768</i>	<i>50,521</i>	<i>46,769</i>

Tableau III.2: Températures de fonctionnement du dégazeur

<i>Paramètre</i>	<i>Norm</i>	<i>Cas</i>	<i>Cas</i>
<i>Température de fonctionnement</i>	<i>109</i>	<i>109</i>	<i>109</i>
<i>Température de l'eau de compensation</i>	<i>84,4</i>	<i>84,4</i>	<i>29,4</i>
<i>Température vapeur</i>	<i>241,7</i>	<i>241</i>	<i>241</i>
<i>Température de conception</i>	<i>242</i>	<i>242</i>	<i>242</i>

Tableau III.3: paramètres de pression et d'énergie

<i>Paramètre</i>	<i>Valeur</i>	<i>Unité</i>
<i>Pression de fonctionnement</i>	<i>1,37</i>	<i>bar abs</i>
<i>Pression de conception</i>	<i>4,48</i>	<i>bar G</i>
<i>Pression hydrostatique de test</i>	<i>6,72</i>	<i>bar G</i>
<i>Enthalpie</i>	<i>703,1</i>	<i>kcal/kg</i>

- **Règles de conception** : ASME VIII Div I
- **Inspection** : Lloyd's (selon les règles ASME)

❖Caractéristiques Physiques du Désaérateur

1.Type d'équipement

- **Modèle** : T125 vertical à plateaux et jets.
- **Configuration** : vertical, équipé de plateaux et 4 gicleurs.

Tableau III.4: matériaux de construction du dégazeur

Composant	Matériau
<i>Calend्रे /coque (section chauffage/dégazage)</i>	<i>ASTM A285 Gr.C</i>
<i>Réservoir</i>	<i>ASTM A285 Gr.C</i>
<i>Plateaux</i>	<i>Acier inoxydable 430</i>
<i>Gicleurs</i>	<i>Acier inoxydable 316</i>
<i>Caisson plateaux / collecteur</i>	<i>ASTM A285 Gr.A</i>

3.Dimensions et caractéristiques physiques

Coque de section chauffage/dégazage

- **Diamètre extérieur** : 3200 mm.
- **Hauteur** : 3066 mm.
- **Épaisseur de dôme** : 12 mm (dont 1,5 mm de tolérance corrosion).
- **Épaisseur de coque** : 12 mm (dont 1,5 mm de tolérance corrosion).
- **Tolérance de corrosion** : 1,5 mm.

Réservoir

- **Diamètre extérieur** : 3000 mm.
- **Longueur de coque** : 13320 mm.
- **Épaisseur de dôme** : 12 mm (dont 1,5 mm de tolérance de corrosion).
- **Tolérance de corrosion** : 1,5 mm.
- **Capacité** : 72 m³ (réserve de 10 minutes sous le niveau de trop-plein).

Composants internes

- **Plateaux** : 640 unités, dimensions 6 x 36.

- **Gicleurs** : 10 unités, 7 chacun.
- **Pression d'égouttement des gicleurs** : 1,15 kg/cm².

Tableau III.5: comparaison des poids du dégazeur 672U

<i>Catégorie</i>	<i>Poids (kg)</i>
<i>Poids de transport</i>	<i>30 545</i>
<i>Poids vide</i>	<i>100 635</i>
<i>Poids en fonctionnement</i>	<i>149 199</i>

III.4.Fonction et principes de désaération

Le désaérateur à plateaux et à jet combine plusieurs fonctions :

- Chauffage de l'eau d'alimentation de la chaudière.
- Désaération de l'eau pour supprimer les gaz dissous (oxygène et dioxyde de carbone), responsables de la corrosion accélérée des chaudières et des échangeurs de chaleur.
- Réserve d'eau tampon.
- La fonction principale est de prévenir la corrosion en éliminant les gaz dissous avant que l'eau n'entre dans la chaudière[1].

1- Principes de chauffage et de désaération

- ✓ Le chauffage de l'eau est réalisé par contact direct avec la vapeur. La surface de contact et le temps de contact sont augmentés par les plateaux et les gicleurs.
- ✓ Pour éliminer les gaz non condensables, l'eau doit atteindre le point d'ébullition correspondant à la pression de fonctionnement.
- ✓ La solubilité des gaz diminue avec la température. Cependant, pour que le gaz s'échappe, il doit traverser la pellicule entourant chaque particule d'eau. L'agitation fournie par les gicleurs, les plateaux et la circulation de vapeur favorise une désaération rapide et efficace[8].

2.Principes de fonctionnement

Le désaérateur est constitué des parties principales suivantes :

- 1) Calendre/Coque du désaérateur.

- 2) Chambre d'eau et gicleurs.
- 3) Passage en descente et obturateur d'eau.
- 4) Plateaux.
- 5) Réservoir.
- 6) Arrivée d'eau et trop-plein.

3.Fonctionnement

- ✓ L'eau pénètre dans le compartiment de préchauffage via des gicleurs à ressort en acier inoxydable et est vaporisée en fines particules.
- ✓ Cette vaporisation chauffe l'eau et élimine la majorité des gaz dissous.
- ✓ L'eau partiellement désaérée passe ensuite à travers l'obturateur d'eau vers les plateaux, qui assurent une redistribution et une désaération finale.
- ✓ La vapeur circule de haut en bas à travers la pile de plateaux pour supprimer les dernières traces de gaz non condensables.
- ✓ L'eau chauffée et désaérée s'écoule dans le réservoir, recouverte de vapeur pour maintenir la température proche de la saturation.

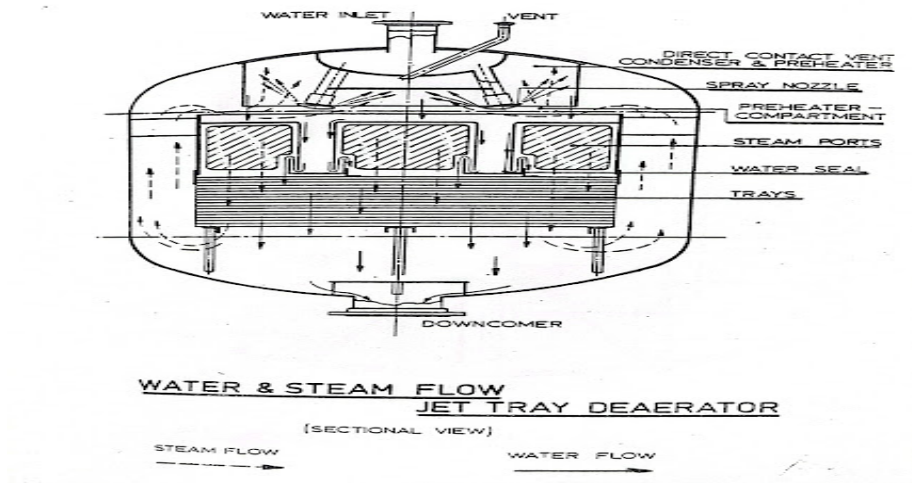


Figure III.2: schéma de 672U

1. Contrôle de l'eau de compensation

- ✓ Le niveau d'eau dans le réservoir est contrôlé par un transmetteur (article n°103).
- ✓ Une soupape de retenue est nécessaire sur le tuyau de condensat pour éviter le reflux d'eau froide.
- ✓ La soupape de contrôle de vapeur est pilotée par un transmetteur de pression (article n°129).

❖ Recommandations

Installer une soupape isolante sur le tuyau vapeur pour isolation et entretien.

2. Description des composants principaux

3. Coque

Cylindrique et vertical en acier, montée sur un réservoir horizontal.

4. Distributeur à gicleurs à ressort

- ✓ Projette l'eau en fines gouttelettes dans l'atmosphère de vapeur du désaérateur.
- ✓ Auto-nettoyants, ne nécessitent pas d'entretien si l'eau de compensation est de bonne qualité.

5. Obturateur d'eau

Répartit l'eau préchauffée sur les plateaux et empêche le passage de vapeur entre compartiments.

6. Plateaux

- ✓ En acier inoxydable, disposés en piles avec rotation alternée de 180° pour une bonne distribution d'eau.
- ✓ Manipuler avec des gants pour éviter les coupures.

7. Condenseur à contact direct et compartiment de préchauffage

- ✓ Maintien d'un flux de vapeur continu pour éviter la formation de couche d'air.
- ✓ La ventilation doit être suffisante pour une désaération complète.

8. Soupape de sécurité

- ✓ Protège contre les surtensions de pression lors des arrêts ou des retours haute pression.
- ✓ Type recommandé : Consolidâtes 1905, située au sommet du désaérateur.

9. Protection du trop-plein

- ✓ Le trop-plein est contrôlé par un transmetteur de niveau (article n°102).
- ✓ Une soupape isolante doit être installée en amont.
- ✓ L'évacuation doit être sécurisée pour éviter tout risque de flash steam.

10. Instruments

- ✓ Thermomètres : contrôle de la température vapeur et eau désaérée.
- ✓ Manomètres : type tube Bourdon pour indiquer la pression de vapeur.
- ✓ Commutateurs d'alarme : haut niveau, bas niveau et niveau extra-bas.

11. Fonctionnement normal

- ✓ La soupape d'échappement d'air doit laisser s'échapper un court jet de vapeur pour maintenir la ventilation.
- ✓ La température de l'eau désaérée doit être proche de celle de la vapeur (différence $\leq 1-2^{\circ}\text{C}$).
- ✓ Un air blanketing ou recouvrement d'air réduit l'efficacité de désaération.
- ✓ Ajuster la soupape de ventilation pour corriger une désaération incomplète.

12.Dépannage

Tableau III .6 :Analyse des panne et solutions du dégazeur

<i>Problème</i>	<i>Causes possibles</i>	<i>Solutions</i>
<i>Chauffage insuffisant</i>	<i>Ventilation insuffisante</i>	<i>Augmenter la ventilation manuellement</i>
<i>/</i>	<i>Soupape de vapeur Défectueuse</i>	<i>Vérifier et débloquer la Soupape</i>
<i>/</i>	<i>Mauvais fonctionnement Gicleurs</i>	<i>Nettoyer ou remplacer gicleurs</i>
<i>/</i>	<i>Air libre en amont</i>	<i>Réparer boîtes à étoupes ou installer siphon</i>
<i>Niveau. D'eau élevé/bas</i>	<i>Soupape de contrôle Défectueuse</i>	<i>Ajuster ou réparer</i>
<i>Pression trop haute/basse</i>	<i>Soupape de sécurité ou contrôle défectueux</i>	<i>Vérifier et remplacer si nécessaire</i>

***Chapitre IV : Influence de la
modification du dégazeur sur la réduction
des percements des tubes***

IV.1. Introduction

Dans les installations industrielles de production de vapeur, la qualité de l'eau d'alimentation est un facteur essentiel pour assurer la sécurité et la durabilité des chaudières. Une eau mal traitée peut provoquer la corrosion et la dégradation des équipements.

Le dégazeur est l'un des équipements principaux utilisés pour l'amélioration de cette qualité. Son rôle consiste à éliminer les gaz dissous, notamment l'oxygène (O_2) et le dioxyde de carbone (CO_2), responsables de la corrosion des surfaces métalliques en contact avec l'eau ou la vapeur.

Cependant, toute modification dans la conception ou le fonctionnement du dégazeur peut influencer le comportement du circuit d'alimentation de la chaudière. Un dégazage insuffisant peut entraîner la présence de gaz corrosifs dans l'eau, favorisant l'apparition de phénomènes de corrosion pouvant conduire au percement des tubes.

Dans ce contexte, cette étude porte sur l'influence du dégazeur modifié, installé au niveau de l'unité 770 UE, sur le phénomène de percement des tubes. L'objectif est d'analyser l'effet des paramètres de fonctionnement du dégazeur — tels que la température, la pression et les débits de vapeur et d'eau — sur la qualité de l'eau d'alimentation et sur les dégradations observées au niveau des tubes de la chaudière.

Ainsi, une meilleure compréhension de cette influence permettra d'optimiser le fonctionnement du dégazeur et de réduire les défaillances récurrentes liées au percement des tubes, améliorant ainsi la fiabilité globale du système de production de vapeur[12].

IV.2. Contexte et problématique des percements historiques

❖ Historique des défaillances

Dès leur mise en service, les chaudières 770UE et 770UF ont présenté des signes de dégradation prématurée au niveau de leurs tubes, évoluant rapidement vers un problème chronique.

Dès la première année, la teneur en oxygène dissous de la 770UE, mesurée à 2,12 ppm, dépassait largement la norme recommandée par le constructeur ($< 0,005$ ppm). Les premières réparations sont intervenues entre 2012 et 2014, révélant une fréquence marquée des défaillances sur le mur Est des deux foyers.

Chapitre IV : Influence de la modification du dégazeur sur la réduction des percement des tubes

La situation s'est significativement aggravée à partir de 2016. La chaudière 770UE a connu une hausse continue des paramètres de corrosion, avec un pic d'oxygène atteignant 1,42 ppm cette année-là, entraînant une accélération du rythme des réparations. Une campagne d'inspection majeure en 2018 a permis d'établir un premier bilan chiffré, confirmant l'écart entre les deux unités : 10,9 % des tubes réparés pour la 770UE contre 5,3 % pour la 770UF. Le phénomène s'est avéré complexe, affectant les tubes à plusieurs hauteurs différentes.

L'année 2019 a marqué un point critique avec un record de teneur en oxygène mesuré à 0,64 ppm sur la 770UE, établissant une corrélation directe entre la qualité de l'eau et l'ampleur des dégâts. Malgré un meilleur contrôle des paramètres chimiques au cours des années suivantes (2021-2023), les réparations ont dû se poursuivre à un rythme soutenu pour les deux chaudières, avec une divergence de plus en plus nette de leur état de dégradation.

À la fin de l'année 2024, le bilan cumulé est éloquent. La chaudière 770UE totalise 156 tubes réparés sur les 800 de son foyer, soit 19,5 %, contre 189 tubes (23,6 %) pour la 770UF. Cette différence, accentuée par des taux d'oxygène dissous variant de 0,12 à 4,6 ppm entre 2010 et 2024 sur la 770UE, confirme que le mur Est reste la zone la plus vulnérable pour les deux unités. Cela traduit probablement un déséquilibre local des conditions thermiques ou hydrauliques, aggravé par le mécanisme de corrosion généralisée lié à la présence d'oxygène[12].

Tableau IV.1 : Présence d'oxygène de 2014 à 2023

<i>Date</i>	<i>Oxygène dissous en ppb</i>			
	<i>Sortie 774F</i>	<i>Entrée 774F</i>	<i>2041F</i>	<i>KAHRAMA</i>
<i>25/03/2014</i>	<i>3 652</i>	<i>435</i>	<i>75</i>	<i>/</i>
<i>15/12/2015</i>	<i>3 400</i>	<i>4 360</i>	<i>2 480</i>	<i>/</i>
<i>12/01/2016</i>	<i>1 580</i>	<i>3 600</i>	<i>434</i>	<i>/</i>
<i>28/02/2017</i>	<i>276</i>	<i>624</i>	<i>1 150</i>	<i>/</i>
<i>28/08/2017</i>	<i>3 800</i>	<i>4 600</i>	<i>2 570</i>	<i>4 800</i>
<i>06/02/2018</i>	<i>160</i>	<i>503</i>	<i>161</i>	<i>1 440</i>
<i>11/06/2018</i>	<i>3 000</i>	<i>3 600</i>	<i>3 700</i>	<i>4 000</i>
<i>09/04/2019</i>	<i>215</i>	<i>2 290</i>	<i>1 250</i>	<i>3 670</i>
<i>16/12/2019</i>	<i>2 700</i>	<i>2 250</i>	<i>520</i>	<i>2 300</i>
<i>14/01/2020</i>	<i>167</i>	<i>1 980</i>	<i>546</i>	<i>2 475</i>
<i>15/09/2020</i>	<i>275</i>	<i>1 223</i>	<i>431</i>	<i>5 000</i>
<i>26/05/2021</i>	<i>1 280</i>	<i>/</i>	<i>/</i>	<i>2 165</i>
<i>04/10/2021</i>	<i>330</i>	<i>1 595</i>	<i>54,3</i>	<i>2 688</i>
<i>23/11/2021</i>	<i>539</i>	<i>3 446</i>	<i>1 265</i>	<i>2 400</i>
<i>10/10/2023</i>	<i>!</i>	<i>794</i>	<i>152</i>	<i>1 624</i>

IV.3. Analyse des causes racines des percements

✓ corrosion

La corrosion est l'une des causes les plus fréquentes du percement des tubes. Elle résulte d'interactions électrochimiques entre le métal et les impuretés contenues dans l'eau ou la vapeur. Les types de corrosion rencontrés dans les chaudières sont multiples :

1-Corrosion sous dépôt (tarte) : causée par l'accumulation de boues ou de sels sur les surfaces internes des tubes, créant des zones d'échauffement localisé et une attaque corrosive intense.

Recommandation : nettoyage chimique selon le manuel IHI



Figure IV.1 : corrosion sous dépôt

• Procédure d'inspection des échantillons

- On peut prendre le tube coupé comme échantillon pour inspection:
- Mesure Le poids du tartre déposé sur la surface interne du tube.

Analyse la composition du tartre

- Si la composition du tartre est anormale ou si le poids du tartre récupéré sur la section (A) du tube échantillon dépasse la limite de 55 mg/m^2 , un nettoyage chimique du système de circulation d'eau sera effectué.
- Vérifier la présence de couche de passivation (magnétites).

Note: La magnétite c'est couche de passivation se crée a l'aide du produit injecté le (PO_4).

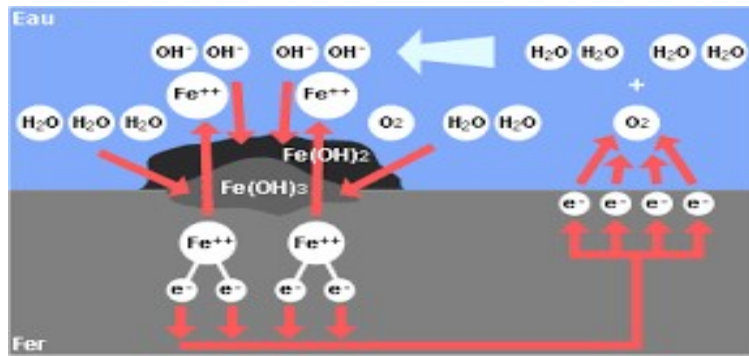


Figure IV.2 : réaction chimique corrosion par O_2

Recommandation : assurer un bon dégazage

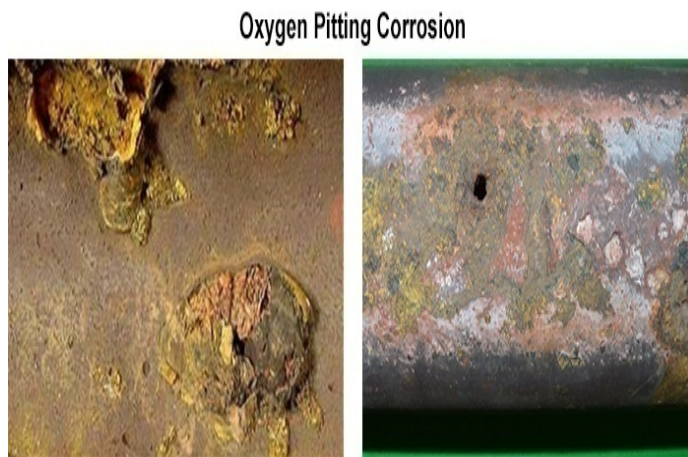


Figure IV.3 : corrosion par oxygène

2-Corrosion alcaline (ou caustique) : provoquée par une concentration excessive d'hydroxyde de sodium (NaOH) dans certaines zones, menant à des fissures inter granulaires[13].

Recommandation : ajustement de PH.

3- Corrosion par CO_2 ou acide carbonique : favorisée par la présence de dioxyde de carbone dans la vapeur ou l'eau condensée, générant une acidité qui attaque les parois internes[13].

Recommandation : ajustement de la quantité des produits chimiques injectés et le PH.

Carbonic Acid Attack

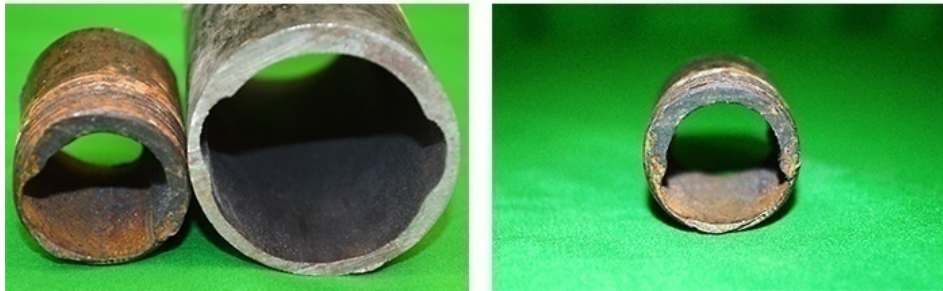


Figure IV.4: Corrosion par CO₂ ou acide carbonique

4- érosion

L'érosion est liée à l'impact mécanique des particules solides ou des gouttelettes transportées par le flux de vapeur ou d'eau à grande vitesse. Elle provoque une usure progressive des parois internes, notamment :

Au niveau des coudes, zones de changement de direction du fluide, ou

sorties de surchauffeurs.

Dans les zones où la vitesse du fluide dépasse les valeurs de conception.

Lorsque la vapeur contient des particules d'oxyde de fer ou des résidus solides issus de la corrosion.



Figure IV.5 : corrosion par érosion

5- Surchauffe

La surchauffe résulte d'un déséquilibre thermique dans le tube.

Elle peut être due à :

- Une mauvaise répartition du flux thermique dans le foyer.
- Une diminution du débit d'eau de refroidissement, causée par un encrassement interne ou un colmatage.
- Un mauvais contrôle de la combustion entraînant des zones de température trop élevée.
- Ce phénomène conduit à une augmentation locale de la température du métal, qui perd alors sa résistance mécanique et finit par se fissurer ou se percer, Une déformation de tubes dans la section surchauffée, cette déformation crée une fissure et que la répartition de la pression non uniforme donc la fissure sera prolongé (fuite)[10].

Recommandation : respecter le manuel IHI dans le contrôle des brûleurs et contrôle de la combustion .

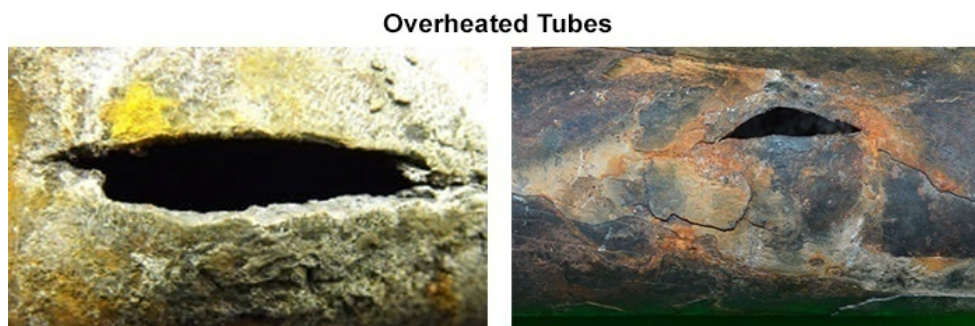


Figure IV.6: impact de surchauffe

IV.4. Mesure et paramètre de la modification

Pour assurer la modification il faut respecter les mêmes conditions et paramètre de fonctionnement :

- Pression de vapeur de service identique ($\pm$ tolérance définie, ex. $\pm 5\%$).
- Température d'exploitation identique ($\pm 1-2\text{ }^{\circ}\text{C}$).
- S'assurer que la production vapeur réelle (t/h) sur l'unité soit la même lors des campagnes de mesures comparatives (ancien vs. Nouveau dégazeur).

IV.5. Opérations de modification sur site

Le modèle vertical T125 672U est une technologie issue des anciennes chaudières. Il a été récupéré pour cette nouvelle exploitation, puis remis en service après son installation au niveau de l'unité 770UE[10].

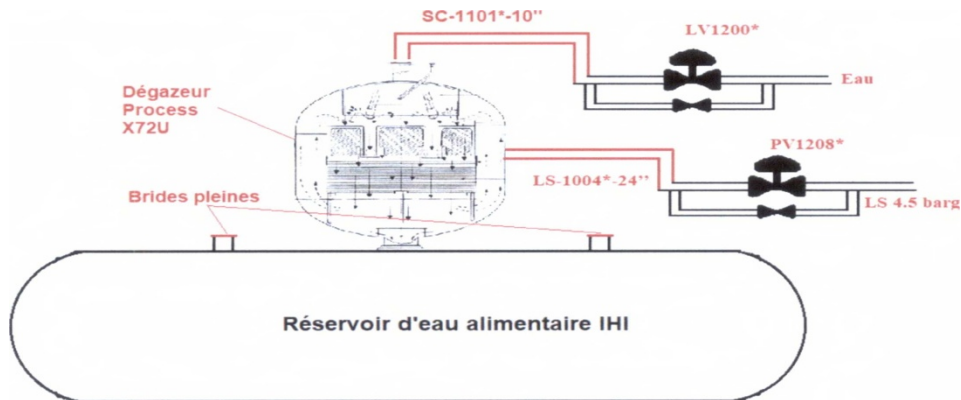


Figure IV.7 : présentation de la modification



Figure IV.8: sablage 672U

Inspection visuelle et ultrason (selon rapport inspection)

L'inspection visuelle et aux ultrasons effectuée, ce jour le 20/03/2024, après l'opération de sablage du dégazeur 672Ua révélé ce qui suit (voir photos ci-dessous) :

- Présence des cratères de corrosion sous l'effet de corrosion sous calorifuge (CUI) sur la génératrice supérieure du dégazeur (Fond et virole).
- Perte d'épaisseur considérable jusqu'à le percement du piquage 8''.
- Perte d'épaisseur considérable sur le Fond supérieur, la partie adjacente du piquage 8'' (épaisseur mesurée : 7.89 mm, $T_{\min}$: 9.27 mm).
- Perte d'épaisseur au niveau des joints des soudures des celles de renforts de la potence.
- Perte d'épaisseur non significative sur plusieurs endroits du Fond supérieur.
- Epaisseur mesurée sur la partie saine de la virole : 11.7 mm.
- Epaisseur mesurée sur la partie fond supérieur : 15.2, 15.4, 15.3 mm.
- Epaisseur mesurée sur la partie saine du piquage 10'' : 10.4, 10.2, 10.3 mm.

$T_{\min}$ de la virole : 8.75 mm.

$T_{\min}$ de fond : 9.27 mm.



Figure IV.9: inspection par ultrason et visuellement

❖ **Recommandations effectuées par l'inspection**

- La réparation doit être faite par rechargement en utilisant baguette 7018.
- Les réparations des parties dégradées sont prise en charge par GTP.
- S'assurer de la disponibilité de dégazeur process à installer au niveau IHI.
- S'assurer de la vidange et la dépressurisation de dégazeur IHI 772UE.
- Isoler l'air instrument vers la PV1208E du dégazeur 772UE.
- Isoler la vapeur 4.5barg vers le dégazeur en :
- Isolant la vanne V-180 et la vanne située sur la ligne LS1001E-14'.
- Ouvrant la vanne de purge V-289 et fermant la vanne de bypass V-182.
- Installant un joint plein en amont la PV1208E.
- Isoler l'eau d'alimentation du dégazeur 772UE par le joint lunette située sur la ligne SC-1010E-10'' en amont la vanne XV1199E.
- Déposer la bouteille d'air instrument de la PV1208E.
- À l'intérieur d'équipement 672U, remplacer les soupapes (gicleur) défectueuses :



Figure IV.10 : gicleurs

Montage des plateaux : Montage de (10 dans la série *48) plateaux en série et (9*16), les plateaux sont soudés entre eux pour une meilleur fixation



Figure IV.11: assemblage des plateaux

➤ ***Système de fixation des plateaux***



Figure IV.12 : système de fixation des plateau

➤ **Fermeture des trous d'homme**



Figure IV.13: trous d'homme

Pour l'installation

- Placement des brides pleins au niveau les deux d'admissions du bache d'eau-Installer le tronçon de pipe 24'' confectionné sur le réservoir d'eau -Installation du support sue le bache d'eau alimentaire pour :
- Assurer l'assemblage et renforcement de la charpente métallique HEA 300 de dimensions 4668mm de longueur et 1906mm de largeur
- Créer des nouvelles réservations sur les supports du réservoir pour boulonnage et fixation
- Assurer le positionnement, l'ajustement et le serrage de boulons à haute résistance entre les deux supports de la charpente métallique et les deux supports (berceaux) du réservoir IHI
- Assurer le positionnement, l'ajustement et le serrage de boulons à haute résistance entre les quatre supports du dégazeur process et la charpente métallique
- Renforcement les quatre supports du dégazeur entre eux par une charpente métallique cylindrique.

Installation et montage des équipements

- Levage avec grue 100 tonnes et une lingue a fil métallique et deux manies



Figure IV.14 : manutention et installation

- Ajuster la hauteur de la ligne SC-1011-10" afin de la raccorder au dégazeur, comme indiqué
- sur la figure N°1.
- Installer une réduction 12" x 0" sur la ligne SC-1011-10" en amont de la bride de raccordement du dégazeur.
- Installer une bride 12" sur la ligne SC-1011-10" pour permettre la connexion avec la bride 12" du dégazeur.



Figure IV.15 : la ligne SC-1011-10"

- Ajuster la hauteur de la ligne SC-1011-10" pour pouvoir la connecter avec le dégazeur, comme indiqué dans la figure N°15.

Chapitre IV : Influence de la modification du dégazeur sur la réduction des percement des tubes

- Installer une réduction 12"x10" sur la ligne SC-1011-10" en amont de la bride de connexion du dégazeur.



Figure IV.16 : la ligne LS-1004-24''

- Installation de la soupape de surpression (soupape déposée au voisinage du dégazeur).
- Installation de la soupape casse-vide.
- Installation du système d'évent dégazeur et évent soupape.
- Calorifugeage total de l'équipement et des lignes.

IV.6. Analyse comparative des deux dégazeurs(après la modéfication)

Paramètre	Ancien Dégazeur	Nouveau Dégazeur T125	Amélioration
Type	Horizontal a contre courant	Vertical a plateaux+jets	+
Nombre plateaux	125	640	+340%
Capacité réservoir	~70 m ³	~70 m ³	+20%
O2 sortie typique	3700ppb	5,7 _ 10,2 ppb	-99,9%
Matériaux plateaux	Acier carbon	Inox 430 /316	Meilleure résistance

IV.7. Résultats expérimentaux et validation

Tableau IV.3: Campagnes de mesures de O₂ après la modification de la ligne

<i>Date</i>	<i>Point</i>	<i>ppb</i>	<i>Charge T/h</i>
03/02/2025	Sortie dégazeur 772UE	9.3	/
07/02/2025	Sortie dégazeur 772UE	5.7	125
13/02/2025	Sortie dégazeur 772UE	9.2	/
	Sortie dégazeur 772UE	9.6	/
26/02/2025	Entrée dégazeur 772UE	1222	/
	Sortie dégazeur 772UE	10.5	/
02/03/2025	Entrée dégazeur 772UE	1670	120
	Sortie dégazeur 772UE	12.5	120
03/03/2025	Entrée dégazeur 772UE	1670	120
	Sortie dégazeur 772UE	14.5	125
22/04/2025	Sortie dégazeur 772UE	8.8	195
	Sortie dégazeur 772UF	8.5	120
18/08/2025	Sortie dégazeur 772UE	8.9	99
22/10/2025	Entrée dégazeur 772UE et 772UF	135	/
	Sortie dégazeur 772UE	9.8	190
	Sortie dégazeur 772UF	10.2	210

Tableau IV.4 : Synthétique des performances par rapport à l'objectif de 7 ppb

<i>Date</i>	<i>Charge (T/h)</i>	<i>O₂ Entrée (ppb)</i>	<i>O₂ Sortie (ppb)</i>	<i>Efficacité</i>
02/03/2025	120	1670	12,5	99,25%
22/04/2025	195	300	8,8	99,99%
22/10/2025	190	135	9,8	92,7%

Données de terrain de Réduction des Percements

❖ *Évolution du Taux de Percements*

- ***Période 2021-2024 (avant modification)*** : 20-50 percements/ouverture pour réparation.
- ***Période 2025 (après modification)*** : nombre des arrêts réduit ce qui signifie la réduction des fuites internes (aucun arrêt imprévu) .

IV.8. Validation technique et conformité

❖ *Critères de Succès Vérifiés*

- O₂ sortie < 10 ppb vs objectif 7 ppb (**conformité à 80%**).
- Stabilité de température : 109°C ± 1-2°C.
- Pression de fonctionnement : 1.37 bar abs (conforme).
- Augmentation du temps de séjour eau : +344% (640 vs 125 plateaux).

❖ *Protocole de Surveillance Mis en Place*

- Mesures de O₂ continues avec alarme à 10 ppb.
- Inspections et visites réglementaires systématiques.
- Analyses chimiques hebdomadaires.

Calculs et résultats

Calculs

Nous avons obtenu les mesures de l'oxygène dissous (O₂) avant la modification du dégazeur, extraites du tableau IV.1 (chapitre IV). J'utiliserai les valeurs enregistrées dans la colonne 2041F, qui correspond au bac de stockage d'eau dessalée recevant l'eau après son passage dans l'ancien dégazeur. Cette valeur reflète donc la qualité de l'eau en sortie de l'ancien dégazeur.

➤ Principales valeurs du tableau (en ppb)

75, 2480, 434, 1150, 2570, 161, 3700, 1250, 520, 546, 431, 54.3, 1265, 152.

Nous avons également obtenu les mesures de l'oxygène dissous après la modification du dégazeur (nouveau dégazeur), extraites du tableau IV.3 (Chapitre IV) pour l'année 2025. Les valeurs enregistrées dans la colonne Sortie dégazeur 772UE (T125-672U) sont les suivantes :

Valeurs (en ppb)

9.3, 5.7, 9.2, 9.6, 10.5, 12.5, 14.5, 8.8, 8.5, 8.9, 9.8.

1. Calculs de la performance moyenne pour chaque appareil

Pour établir une comparaison objective, nous calculons la moyenne arithmétique des valeurs disponibles :

A. Ancien dégazeur

Valeurs : 75, 2480, 434, 1150, 2570, 161, 3700, 1250, 520, 546, 431, 54.3, 1265, 152.

Observation : On note une forte hétérogénéité des résultats avec des pics très élevés, ce qui témoigne d'une instabilité majeure de performance du système avant modification.

$$\text{Cancien, moy} = \frac{75+2480+434+1150+2570+161+3700+1250+520+546+431+54.3+1265+152}{14}$$

$$\text{Cancien, moy} = \frac{14988.3}{15} \approx 1070.6 \text{ ppb}$$

(soit environ 1,07 ppm).

B.Nouveau dégazeur

Valeurs : 9.3, 5.7, 9.2, 9.6, 10.5, 12.5, 14.5, 8.8, 8.5, 8.9, 9.8.

$$C_{\text{nouveau, moy}} = \frac{9.3+5.7+9.2+9.6+10.5+12.5+14.5+8.8+8.5+8.9+9.8}{14}$$

$$C_{\text{nouveau, moy}} = \frac{107.3}{11} \approx 9.75 \text{ ppb}$$

2. Calculs du taux d'amélioration (efficacité d'élimination)

Pour comparer les performances, nous avons également besoin de la valeur de la concentration en oxygène dans l'eau d'alimentation entrant dans le dégazeur.

D'après les mêmes tableaux, nous prenons une valeur typique de l'entrée du dégazeur (par exemple, issue du tableau IV.3 du jour 26/02/2025 où $C_{\text{entrée}} = 1222 \text{ ppb}$

Cette valeur représente la charge entrante, qui est approximativement la même pour l'ancien et le nouveau système.

Nous calculons l'efficacité d'élimination pour chaque appareil en utilisant l'équation suivante :

$$\text{Efficacité} = \frac{C_{\text{entrée}} - C_{\text{sortie}}}{C_{\text{entrée}}} \times 100$$

$$\eta_{\text{ancien}} = \frac{1222 - 107.6}{1222} \times 100 \approx 12.4\%$$

$$\eta_{\text{nouveau}} = \frac{1222 - 9.75}{1222} \times 100 \approx 99.2\%$$

3. Analyse quantitative des performances

Afin de quantifier l'amélioration apportée par le nouveau dégazeur, nous avons comparé les concentrations en oxygène dissous mesurées à la sortie de l'ancien et du nouveau système, en nous basant sur les données des tableaux IV.1 et IV.3.

La concentration moyenne en oxygène dissous à la sortie de l'ancien dégazeur (données historiques 2014-2023) était d'environ 1070 ppb, avec des pics dépassant les 3000 ppb, traduisant un fonctionnement instable et une mauvaise élimination des gaz.

Calculs et résultats

Après l'installation du nouveau dégazeur T125 (672U) en 2025, la concentration moyenne en oxygène dissous à la sortie a chuté à 9.75 ppb, avec des valeurs constamment inférieures à 15 ppb, conformément aux recommandations pour les chaudières haute pression .

En considérant une concentration moyenne en oxygène à l'entrée du dégazeur de 1222ppb, nous calculons l'efficacité de dégazage :

$$\text{Ancien dégazeur : Efficacité} = \frac{1222 - 107.6}{1222} \times 100 \approx 12.4\%$$

$$\text{Nouveau dégazeur : Efficacité} = \frac{1222 - 9.75}{1222} \times 100 \approx 99.2\%$$

Le nouveau dégazeur présente donc une efficacité d'élimination de l'oxygène supérieure de plus de 86 points par rapport à l'ancien système. Cette performance exceptionnelle, due principalement à la conception à 640 plateaux en inox et à un meilleur contact eau-vapeur, permet de maintenir une qualité d'eau d'alimentation optimale, réduisant drastiquement les risques de corrosion et de percement des tubes de la chaudière.

En conclusion, les calculs et les mesures terrain confirment sans équivoque que le nouveau dégazeur est nettement plus performant que l'ancien, justifiant pleinement la modification entreprise.

Conclusion générale

Conclusion générale

Le présent travail a permis d'apporter une réponse technique concrète et efficace au problème chronique de percement des tubes de la chaudière IHI 400T au complexe GL2Z. En ciblant la cause fondamentale – un dégazage inefficace de l'eau d'alimentation BFW – la modification du dégazeur s'est avérée être une solution pérenne et économiquement .

La mise en service du dégazeur vertical T125(672U), avec ses 640 plateaux en acier inoxydable offrant un temps de contact eau-vapeur bien supérieur qui a permis d'atteindre des niveaux de qualité d'eau ($O_2 < 10$ ppb) conformes aux standards les plus exigeants.

Cette amélioration a directement entraîné une réduction spectaculaire des phénomènes de corrosion par l'oxygène et, par conséquent, une baisse radicale de la fréquence des défaillances des tubes. Au-delà du cas spécifique de la chaudière 770UE, cette étude met en lumière plusieurs principes clés pour la gestion des utilités industrielles :

- La surveillance proactive et la maintenance préventive des équipements critiques comme les dégazeurs sont essentielles pour éviter les défaillances coûteuses.
- L'analyse fine des paramètres de procédé (qualité de l'eau, données historiques) est un préalable indispensable à toute décision d'investissement ou de modification.
- L'optimisation des performances d'un sous-système (ici le dégazage) peut avoir un impact majeur sur la fiabilité, la sécurité et la rentabilité globale d'une installation.

Enfin, le succès de cette opération ouvre la perspective d'étendre cette solution aux autres unités similaires du complexe (chaudière 770UF), consolidant ainsi la robustesse de l'ensemble du parc de production de vapeur et contribuant à la performance opérationnelle et économique à long terme du site GL2Z.

Bibliographie

- [1] J. Parisot, «Chaudière: Principes de conception et de calcul-Généralités», Edition Techniques de l'ingénieur.
- [2] Babcock & Wilcox Company, *Steam – Its Generation and Use*, Barberton, Ohio, USA.
- [3] Perry, R.H., Green, D.W., *Perry's Chemical Engineers' Handbook*, McGraw-Hill Education.
- [4] NACE International, *Corrosion in Boilers Handbook*, Houston, USA.
- [5] .Perry's Chemical Engineers' Handbook .9th Edition
- [6] ASME Boiler and Pressure Vessel Code ;Section I&VIII
- [7] IHI Boiler Operation Manual
- [8] Nalco Water Handbook;3rd Edition
- [9] . NACE International, *Corrosion in Boilers Handbook*, Houston, USA.
- [10] Fontana, M.G., *Corrosion Engineering*, McGraw-Hill.
- [11] P. Kellogg, «Manuel opératoire de rénovation du complexe GL2/Z»,
- [12] API (American Petroleum Institute), *Boiler Water Treatment Guidelines*, USA.
- [13] GL2Z Internal Documentation, *Industrial Gas Treatment Unit Manual*, Algeria.