



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 DES PROCÉDÉS DES MATÉRIAUX**

THÈME

Corrosion sous calorifuge de l'échangeur principal X16C

Présenté par :

- SAAD Aya
- OULD YUCEF Imen

Soutenu le 24 /06/ 2026 devant le jury composé de :

Présidente : MEKIBES Zohra	Grade DR	U - Mostaganem
Examinatrice : BENATMANE Saadiy	Grade MAA	U - Mostaganem
Encadrante : FARES Zineb	Grade MCA	U - Mostaganem
Co-encadrant: KESSAS Mohamed	Grade DOCT	U - Mostaganem

Année Universitaire : 2025 / 2026

DEDICACES

Avant tout, je remercie Dieu de m'avoir donné la force, le courage et la patience pour accomplir ce modeste travail.

Je dédie ce mémoire avec une immense gratitude et beaucoup d'amour à ma très chère maman, qui a toujours été mon plus grand soutien, ma source de motivation et de tendresse.

Merci pour tes sacrifices, tes prières et ton amour inconditionnel qui m'ont accompagnée tout au long de mon parcours.

À ma grand-mère bien-aimée, que Dieu ait son âme, même absente, tu resteras éternellement présente dans mon cœur et dans mes pensées.

Que Dieu t'accorde Son vaste paradis et Sa miséricorde.

À mes frères et sœurs, merci pour votre présence, votre affection et vos encouragements qui m'ont donné la force d'avancer.

À mon encadreuse, je tiens à exprimer ma profonde reconnaissance pour son accompagnement, sa patience, ses précieux conseils et son soutien durant la réalisation de ce travail.

À mes chers amis(es), merci pour tous les moments partagés, votre aide, votre motivation et votre présence dans les moments difficiles comme dans les plus beaux.

Enfin, je dédie ce travail à toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à la réussite de ce mémoire.

Avec tout mon respect et ma reconnaissance.

AYA

DEDICACES

Avant tout, je remercie Dieu, le Tout-Puissant, de m'avoir accordé la force, le courage et la patience nécessaires pour mener à bien cet humble travail.

À ma très chère maman, mon inspiration et ma source de sérénité. À toi qui as veillé sur moi durant tant d'années pour me voir atteindre mes objectifs aujourd'hui, je dédie le fruit de mes efforts. Je suis infiniment reconnaissante pour chaque prière silencieuse qui a été ma clé vers la réussite.

À mon cher papa, symbole de force et pilier de ma vie. Merci d'avoir toujours été mon abri protecteur et le guide qui m'a orientée vers le bon chemin. Que tu restes pour toujours ma fierté et mon soutien inestimable.

À mes chers frères et sœurs, mes compagnons de route. Vous avez partagé avec moi les détails de ce parcours, et grâce à vos mots encourageants et votre présence motivante, les difficultés sont devenues plus légères. Merci d'être des piliers inébranlables à mes côtés.

À ma distinguée encadreuse, qui n'a jamais hésité à partager son expertise et son temps. J'exprime ma profonde gratitude pour votre rigueur scientifique, votre patience et vos précieux conseils qui ont illuminé mon chemin tout au long de cette recherche.

À mes chers amis, partenaires de succès et de vie. Merci d'avoir été des alliés précieux, transformant la fatigue du chemin en souvenirs mémorables que je chérirai toujours.

*Enfin, je dédie ce travail à toutes les mains tendues pour m'aider et à tous les cœurs qui m'ont encouragée à poursuivre mon objectif.
Avec tout mon respect et ma reconnaissance.*

IMEN

REMERCIEMENTS

*En premier lieu, on tiens tout d'abord à remercier **DIEU** le tout puissant et miséricordieux, qui nous a donné la force et la patience d'achever ce modeste travail.*

*On tient à exprimer notre profonde gratitude et nos remerciements les plus chaleureux et les plus sincères à notre encadreur **Mme FARES Zineb**. Merci à vous, pour le suivi de ce travail, pour l'encadrement et pour les corrections apportées à ce manuscrit.*

*J'exprime également mes remerciements à **Dr MEKIBES Zohra**, enseignante l'université de Mostaganem, qui m'a fait l'honneur de s'intéresser à ce travail et de présider le jury d'examen.*

*Que **Pr BENATMANE Saadiya** enseignante à l'université de Mostaganem, trouve ici toute nos reconnaissances pour avoir accepté de porter un regard critique sur cet humble travail de recherche. Et toutes les personnes qui ont contribué au succès de notre stage et qui nous ont aidée lors de la rédaction de ce mémoire.*

*Nous adressons nos sincères remerciements à **Monsieur LACHACHI Mokhtar** le DRH pour son soutien constant, ses encouragements, sa disponibilité et son aide tout au long de la réalisation de ce mémoire, qui ont grandement facilité ce travail.*

*Nous sommes reconnaissant envers **Monsieur LACHACHI Mokhtar** le chef du département de laboratoire au complexe GL2Z d'Oran, qui a contribué au succès de mon stage et qui m'a aidé lors de la rédaction de ce mémoire.*

*À mon amie et compagne de route **YFRAH Houda** , merci pour ton temps et ton soutien dans ce travail. Tu as été une véritable partenaire à chaque étape."*

Résumé : Cette étude porte sur le phénomène de corrosion sous calorifuge (CUI) dans l'industrie des hydrocarbures, en se focalisant sur l'alliage d'aluminium 5083 utilisé dans les installations pétrolières. L'échangeur thermique principal (X16C) du complexe de liquéfaction de gaz naturel (GL2Z) de la SONATRACH a été pris comme cas d'étude. Les inspections visuelles et les contrôles non destructifs (CND) ont révélé la présence d'une corrosion localisée par piqûres sur la surface externe de l'échangeur, particulièrement au niveau des zones de soudure, causée par l'infiltration d'humidité et de chlorures issus du milieu marin suite à la dégradation de l'isolant. Enfin, l'étude propose des recommandations techniques et un programme d'inspection périodique afin de minimiser les risques de ce phénomène et prolonger la durée de vie des équipements.

Mots-clés : Corrosion sous calorifuge (CUI), Aluminium 5083, Échangeur thermique X16C, Corrosion par piqûres, Milieu marin.

Abstract: This study investigates the phenomenon of Corrosion Under Insulation (CUI) within the hydrocarbon industry, focusing on the 5083 aluminum alloy used in oil and gas facilities. The main heat exchanger (X16C) at SONATRACH's natural gas liquefaction complex (GL2Z) was selected as a case study. Visual inspections and Non-Destructive Testing (NDT) revealed the presence of localized pitting corrosion on the external surface of the exchanger, particularly around the welded joints. This degradation was driven by moisture and chloride infiltration from the surrounding marine environment due to insulation failure. Concluding the study, several technical recommendations and periodic inspection programs are proposed to mitigate CUI risks and extend the operational lifespan of the equipment.

Keywords: Corrosion Under Insulation (CUI), Aluminum 5083, Heat Exchanger X16C, Pitting Corrosion, Marine Environment.

ملخص: تتناول هذه الدراسة ظاهرة التآكل تحت العزل الحراري (CUI) في صناعة المحروقات، مع الألمنيوم 5083 المستعملة في المنشآت النفطية. تم اتخاذ المبادل الحراري الرئيسي التركيز على سبيكة (X16C) في مركب تسيليل الغاز الطبيعي (GL2Z) التابع لشركة سوناطراك كحالة للدراسة والتطبيق. وأظهرت الفحوصات البصرية والاختبارات غير الإتلافية وجود تآكل موضعي بالنقر على السطح الخارجي للمبادل، ولا سيما في مناطق اللحام؛ نتيجة تسرب الرطوبة والكلوريدات الناتجة عن البيئة البحرية المحيطة وتدهور العزل الحراري. وفي الختام، قدمت الدراسة مجموعة من التوصيات التقنية وبرامج الفحص الدوري للحد من مخاطر هذه الظاهرة وإطالة العمر التشغيلي للمعدات.

الكلمات المفتاحية: التآكل تحت العزل، الألمنيوم 5083، التآكل بالنقر، المبادل الحراري

X16C، البيئة البحرية

TABLE DES MATIERES

Introduction générale.....	02
Chapitre I	
Présentation du complexe.....	03
I. Présentation du complexe GL2Z.....	05
I.1 Introduction.....	05
I.2 Historique du complexe GL2 Z.....	05
I. 2.1 Mission du complexe GL2Z.....	05
I.2.2 Situation géographique du complexe.....	06
I.2.3 Description et fonctionnement.....	06
I.2.4 Organisation du complexe.....	06
I-3) Les composant du gaz naturel.....	08
I-4- Traitement de la charge (GN)	09
b.1 Section de séparation.....	10
b.2 Section de liquéfaction.....	10
c)..... Unité de fractionnement des hydrocarbures lourds.....	11
.....	
c.1 Section de dééthanisation X51-E.....	11
c.2 Section de dépropanisation X52-E.....	11
c.3 Section de débutanisation X53-E.....	11
d) Unité de compression.....	12
I.5 Principe de procédé de liquéfaction.....	14
I.5.1 Stockage de GNL.....	15
I.5.2 Présentation du Service Inspection.....	16
a) Section machine tournante	16
b) Section électricité et instrumentation.....	16
c) Section équipements statiques.....	16

I.5.3 Les taches de l'inspecteur des équipements statiques.....	17
a) L'inspection sur site.....	17
a.1 Inspection accidentelle.....	17
a.2 Inspection préventive	17
a.3 Inspection suite à des modifications.....	17
CHAPITRE II.....	
Etudes des matériaux et des équipements impliqués dans la corrosion sous calorifuge.....	19
II.1 Définition et classification.....	20
II.1.1 Définition.....	20
II.1.2 Classification.....	20
a) Selon la nature du contact entre les fluides.....	20
b) Selon la géométrie et la configuration.....	20
c) Selon le sens de cerpulation des fluides.....	21
II.2 Description de l'échangeur XCC.....	21
II.2.1 Circuit GN.....	21
II.2.2 Circuit GNL.....	21
II.2.3 Circuit MCR liquides.....	21
II.2.4 Circuit MCR vapeure.....	21
II.3 Philosophie de fonctionnement de l'échangeur de XCC.....	32
II.4 Fiche technique_ dimension, matériaux et fluides	37
II.4.1 Données dimensionnelles.....	37
II.4.2 Fluides et circuit.....	38
II.5 Rôle dans le procédé.....	39
II.6 Condition de service- Température, Pession et cicle.....	40
II.6 .1 Température.....	40
II.6.2 Pression et débits.....	40
II.6.3 Cicle et mode de Fonctionnement.....	41
II.7 Historique de maintenance et des insidents.....	41

II.7.1 Chronologie de la mise en service de complexe GL2Z.....	41
II.7.2 Organisations de service d'inspection (TI).....	42
II.7.3 Types d'inspection documentés.....	42
II.8 Matériaux de construction (l'aluminium de ses alliages).....	43
II.8.1 Généralité.....	43
II.8.2 Propriété chimique de l'aluminium.....	43
II.8.3 Avantage de l'aluminium	45
II .8.4 Les alliages de l'aluminium.....	45
II.8.5.2 Les critères de choix des alliages d'aluminium.....	46
II.8.5.3 La série 5000 (AL – Mg).....	46
II.8.5.4 Avantages d'usage de l'alliage 5083 dans la série 5000.....	47
II.9 Le Calorifuge — Isolation Thermique Industrielle	48
II.9.1 Le calorifuge.....	48
II.9.2 Définition.....	49
II.9.3 Fonctions générales du calorifugeage.....	49
A) Choix des isolations.....	49
B) Classification des isolants	50
C) Isolations « froides ».....	50
D) Isolants à structure cellulaire ils sont d'origine.....	50
E) Isolants à structure poudreuse.....	50
F) Isolants à structure fibreuse.....	50
G) Super isolant.....	51
H) Isolation « chaude ».....	51
II.10 Mise en Œuvre de l'Isolant	51
II.12 Calorifugeage à froid.....	52
II.13 Matériaux de calorifugeage	52
II.14 Matériaux étanchéité	53
II.15 Matériaux de chemisage	54
II.16 Mise en place du calorifugeage à froid	54
II.17 Problèmes liés à l'exploitation des équipements calorifugée.....	56
II.18 Les méthodes utilisées pour le contrôle de la corrosion	56

L'aluminium, métal passif	58
Chapitre III Corrosion sous calorifuge : Fondements, types et lutte contre la dégradation de l'échangeur X16C.....	57
III Introduction.....	58
III-1) Définition.....	58
III-2) Le comportement électrochimique de l'aluminium.....	58
III-3) L'aluminium, métal passif.....	59
III-4) Le rôle de film d'oxyde.....	60
III-5) Diagrammes d'équilibre électrochimique de Pourbaix.....	60
III-6) Différentes types de corrosion de l'aluminium.....	61
III-6-1) Corrosion uniforme.....	61
III-6-2) Corrosion par piqûre	62
III.1.6 Le phénomène : (cas de l'aluminium).....	63
III-6-2-2) Vitesse de propagation de la piqûre.....	65
III-6-3) Corrosion caverneuse.....	66
III.6.4 Corrosion inter cristalline.....	66
III-6-5) Corrosion sous contrainte.....	67
III-6-6) Corrosion Galvanique.....	68
III.1.8 Principe de base	68
III.7 Lutte contre la Corrosion.....	70
III.7.1 Choix des inhibiteurs.....	72
III.7.2 Protection cathodique.....	72
III .8 Partie pratique.....	73
III.8.1 Milieu et environnement.....	73
III.8.2 Étendue de l'inspection.....	73
III.8.3 Étude et description du dommage.....	75
III.8.4 Interprétation et analyse.....	75
CALCULS DE CORROSION PAR PIQURE (CUI).....	77

Echangeur Principal X16C – GL2/Z SONATRACH – Arzew.....	77
CONTEXTE ET DESCRIPTION DE L'EQUIPEMENT.....	77
CONTEXTE ET DESCRIPTION DE L'EQUIPEMENT.....	82
V. TABLEAU DE SUIVI D'INSPECTION (PIE).....	84
VI. TABLEAU DE SYNTHESE DES RELEVES ET CALCULS.....	85
VII. CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS.....	86
Recommandation.....	89
Conclusion générale	70
Bibliographie	

LISTE DES FIGURES

FIGURE. II.1 : SCHÉMA TECHNIQUE DE L'ÉCHANGEUR DE CHALEUR PRINCIPAL (MCHE) - TYPE X16C	28
FIGURE. II.2 : L'ÉCHANGEUR PRINCIPAL X16C	30
FIGURE. II.3 : COMPARAISON ENTRE LE PALIER DE LIQUÉFACTION D'UN CORPS PUR ET LE PSEUDO-PALIER D'UN MÉLANGE	31
FIGURE. II.4 : COURBE DE REFROIDISSEMENT D'UN MÉLANGE AVEC UN SYSTÈME DE 7 ÉCHANGEURS EN CASCADE	32
FIGURE. II.5: FAISCEAU TUBULAIRE D'UN ÉCHANGEUR THERMIQUE	42
FIGURE. III.1 : DIAGRAMME DE POURBAIX E-PH DE L'ALUMINIUM	63
FIGURE. III.2 : LE MÉCANISME DE LA CORROSION PAR PIQÛRE	64
FIGURE. III.3 : SCHÉMA SIMPLIFIÉ DE LA CORROSION PAR PIQÛRE D'UN ALLIAGE D'ALUMINIUM SUIVANT VARGEL	66
FIGURE. III.4 : PIQÛRE EN GROS PLAN — LA PUSTULE D'HYDROXYDE D'ALUMINIUM EST BIEN VISIBLE	66
FIGURE. III.5 : PRINCIPE D'UNE PILE	70
FIGURE. III.6 : ISOLEMENT ENTRE L'ALUMINIUM ET UN AUTRE MÉTAL	70
FIGURE. III.7 : VUE REPRÉSENTATIVE DE LA BONNE CONDITION DE LA SURFACE INTERNE DE L'ÉCHANGEUR PRINCIPAL X16C	74

FIGURE. III.8 : CORROSION PAR PIQÛRE AUX ZONES SOUDÉES ET RAYURES	
.....	75

FIGURE. III.9 ET III.10 : CORROSION PAR PIQÛRE AVANCÉE SUR CERTAINS ENDROITS (RAYURES ET SOUS DES DÉPÔTS)	
.....	77

LISTE DES TABLEAUX

TABLEAU I.1. LES COMPOSANTS DU GAZ NATUREL ET LEUR TEMPERATURE D'EBULLITION	
.....	08
TABLEAU I.2.A. LA COMPOSITION MOYENNE DU GAZ NATUREL DE HASSI R'MEL	
.....	08
TABLEAU I.2.B. PROPRIETES PHYSIQUE DU GN A L'ALIMENTATION DES TRAINS	
.....	09.
TABLEAU I.2.C. CONDITION D'ENTREE DU GN L 'ALIMENTATION	
.....	09
TABLEAU I.3. COMPOSITIONS DU GNL	14
TABLEAU I.4. CONDITIONS DE STOCKAGE DU GNL	14
TABLEAU I.5. CARACTERISTIQUES DU RESERVOIR	15
TABLEAU.II.1. NOMENCLATURE DES RACCORDEMENTS ET OUVERTURES DE L'ÉCHANGEUR PRINCIPAL X16C	
.....	28
TABLEAU .II.2 : NOMENCLATURE DES RACCORDEMENTS ET OUVERTURES DE L'ÉCHANGEUR PRINCIPAL X16C	
.....	36
TABLEAU.II.3: PROPRIETES MECANQUES DE L'ALUMINIUM PUR A LA TEMPERATURE AMBIANTE	
.....	44
TABLEAU II.4: CLASSIFICATION DES ALLIAGES D'ALUMINIUM	45

TABLEAU II.5: COMPOSITION CHIMIQUE DE L'ALLIAGE 5083.....	47
TABLEAU II.6: CARACTERISTIQUE DE L'ALLIAGE 5083.....	48
TABLEAU II.7: CARACTERISTIQUE PRINCIPALES DES DIFFERENTES FAMILLES D'ISOLANTS.....	51
TABLEAU.II.8: SPÉCIFICATIONS TECHNIQUES DE LA MOUSSE DE POLYURÉTHANE.....	52
TABLEAU.II.9: CARACTÉRISTIQUES TECHNIQUES DE LA LAINE DE VERRE	53
TABLEAU.II.10: SPÉCIFICATIONS TECHNIQUES DE L'AGENT D'ÉTANCHÉITÉ (BENJAMIN FOSTER 30- 45).....	53
TABLEAU.II.11:SPÉCIFICATIONS TECHNIQUES DU FILM PARE-VAPEUR (BENJAMIN FOSTER 30- 60).....	54
TABLEAU.II.12:SPÉCIFICATIONS TECHNIQUES DE LA FEUILLE D'ALUMINIUM DE CHEMISAGE.....	54
TABLEAU.II.13: MATÉRIAUX ET ACCESSOIRES DE FIXATION DU CALORIFUGEAGE	54
TABLEAU III.1. : LES INHIBITEURS POUR L'ALUMINIUM.....	73
TABLEAU.III.2.MONTRE LES ELEMENTS MINERAUX DE L'EAU DE MER.....	76

LISTE DES ABREVIATIONS

GL2Z: Complexe de Gaz Liquéfié Arzew

SONATRACH : Société Nationale Pour La Recherche, La Production, Le Transport, La Transformation Et La Commercialisation Des Hydrocarbures

F36 : Formaldéhyde 36%

UFC80 : Formuree 80

L10 : Résines Uréiques Liquides

CPG : La Chromatographie En Phase Gazeuse

CH4: Methane

CH3OH: Le Methanol (Alcool Méthylque)

MP : Moyenne Pression

N : Azote

FeMo : Molybdate De Fer

RTO : Réseau De Transport Ouest

MUF : Melamine- Uree -Formaldéhyde

UF : Uree-Formaldéhyde

PF : Phenol-Formaldéhyde

MDI : Isocyanate

H2CO : Le Formaldéhyde (Ou Méthanal)

CH3COOH : Acide Acétique

NOAH : La Soude

HP : Haute Pression

BP : Basse Pression

PH : Potentiel Hydrogène



INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

L'industrie des hydrocarbures constitue un pilier fondamental de l'économie algérienne. Les complexes de liquéfaction de gaz naturel, tels que le complexe GL2/Z, jouent un rôle stratégique dans la chaîne de production et d'exportation des hydrocarbures. Ces installations mettent en œuvre des équipements, soumis à des conditions opératoires sévères — pressions élevées, températures extrêmes et environnements corrosifs —, ce qui les expose à des phénomènes de dégradation pouvant compromettre leur intégrité, leur performance et la sécurité des installations.

Parmi ces phénomènes, la corrosion représente l'une des principales causes de défaillance des équipements métalliques dans l'industrie pétrolière et gazière. Elle engendre des coûts considérables en maintenance, en réparation et en remplacement, tout en constituant un risque majeur pour la sécurité des personnes et la continuité de la production. Une forme particulièrement redoutée est la Corrosion Sous Calorifuge (CUI — Corrosion Under Insulation), qui se développe à l'interface entre une surface métallique et son isolant thermique. Sa dangerosité réside dans sa difficulté de détection, ce qui lui permet d'évoluer silencieusement jusqu'à provoquer des défaillances graves.

Dans ce contexte, la gestion de l'intégrité des équipements statiques, notamment les échangeurs de chaleur, est devenue une priorité pour les opérateurs industriels. Le présent travail s'inscrit dans le cadre d'une mise en situation professionnelle, au sein du service Inspection, du département Technique, du complexe GL2/Z (SONATRACH), où une attention particulière a été portée à l'échangeur principal X16C, équipement stratégique identifié comme étant vulnérable à la CUI.

PROBLEMATIQUE

Le complexe GL2/Z enregistre des dépenses importantes liées aux travaux de traitement de la corrosion sous calorifuge, estimées à 13 millions de dollars US, représentant le coût le plus élevé parmi les complexes du groupe SONATRACH. Cette réalité soulève une question centrale : comment évaluer, diagnostiquer et prévenir la corrosion sous calorifuge affectant l'échangeur principal X16C, afin d'optimiser la fiabilité de l'équipement, réduire les coûts de maintenance et garantir la sécurité des installations du complexe GL2/Z ?

Cette problématique soulève plusieurs interrogations secondaires :

- Quels sont les mécanismes et les facteurs favorisant le développement de la CUI sur l'échangeur X16C ?
- Quelles sont les méthodes d'inspection et d'évaluation conformes aux codes API applicables (API 510, 570, 571, 579) ?
- Quelles solutions correctives et préventives peuvent être proposées pour limiter la progression de la corrosion ?

Objectifs du travail

Ce travail a pour objectifs de :

1. Identifier et analyser les facteurs et mécanismes de la Corrosion Sous Calorifuge (CUI) au niveau de l'échangeur X16C, dans le contexte du complexe GL2/Z.
2. Évaluer l'état de dégradation de l'équipement à travers une démarche d'inspection conforme aux normes et codes API en vigueur.
3. Déterminer les causes et conséquences des défaillances enregistrées sur l'échangeur, en s'appuyant sur les données de terrain.
4. Proposer des solutions correctives et préventives adaptées pour améliorer la durée de vie de l'équipement, réduire les coûts de maintenance et renforcer la sécurité des installations.

Chapitre I

Présentation du complexe $GL_2 \mathbb{Z}$

I.1 Introduction :

L'ALGÉRIE dispose de nombreux puits gaziers dont le plus important est celui de HASSI R'MEL.

Ce gisement alimente quatre complexes de liquéfaction ; trois à ARZEW et un à SKIKDA. La liquéfaction a pour but d'augmenter la capacité d'exploitation.

Parmi les complexes de liquéfactions construits en ALGÉRIE il y a le GL2/Z. Il comprend six trains de liquéfactions indépendants en fonctionnement autonome, chaque train comprend quatre unités, traitement, refroidissement, liquéfaction et fractionnement

Le gaz naturel entrant dans chaque train ; doit être traité avant d'être liquéfié. Les composants du gaz naturel tel que le dioxyde de carbone CO₂, la vapeur d'eau et les hydrocarbures lourds tendraient à se condenser dans l'extrémité froide du train de liquéfaction, puis à se solidifier, provoquant l'obstruction de la tuyauterie et de l'équipement froids. C'est pourquoi ces composants condensables sont d'abord éliminés dans une série d'unités de traitement avant que le gaz naturel ne puisse être liquéfié.

I.2 Historique du complexe GL2 Z :

Le complexe GL2 Z est la dernière usine de liquéfaction où l'engineering a été assuré par la société américaine d'engineering « PULLMAN KELLOGG » qui a été chargée des études de la construction et du démarrage des différentes installations. Signature du contrat -----
----- 09 février 1976

Ouverture du chantier ----- 15 mars 1977

Pose de la première pierre ----- 21 février 1978

Première production du GNL ----- 20 janvier 1981

Première expédition du GNL ----- 29 janvier 1981

I. 2.1 Mission du complexe GL2Z :

Le complexe GL2/Z a pour mission de liquéfier le gaz naturel provenant des champs gaziers de HASSI R'MEL, avec possibilité d'extraction du propane, du butane et de la gazoline. Le

GNL (Gaz Naturel Liquéfié) est pompé et chargé dans des méthaniers spécialement conçus pour le transport cryogénique pour être expédié vers l'étranger.

I.2.2 Situation géographique du complexe :

Le complexe de liquéfaction du GAZ naturel (GL2Z) de SONATRACH, est situé dans la zone industrielle d'ARZEW à 450 Km de l'ouest d'Alger ;

Il s'étend sur une superficie de soixante-douze (72) hectares au bord de la mer d'où la facilité du transport sur bateaux.

La construction de l'usine a débuté en 1977 et le début de la production en 1981.

I.2.3 Description et fonctionnement :

L'usine est récente, elle est différente par certaines méthodes de fonctionnement. GL2/Z possède six trais de liquéfaction qui travaillent en parallèle ; l'arrêt de l'un ou de l'autre n'influe pas sur la production des autres trains.

Le GAZ naturel d'alimentation est distribué a chaque train par des réseaux de canalisation. -le débit total environ de GN est de 1500000 M/H -le débit moyen par train est de 250000 M/H.

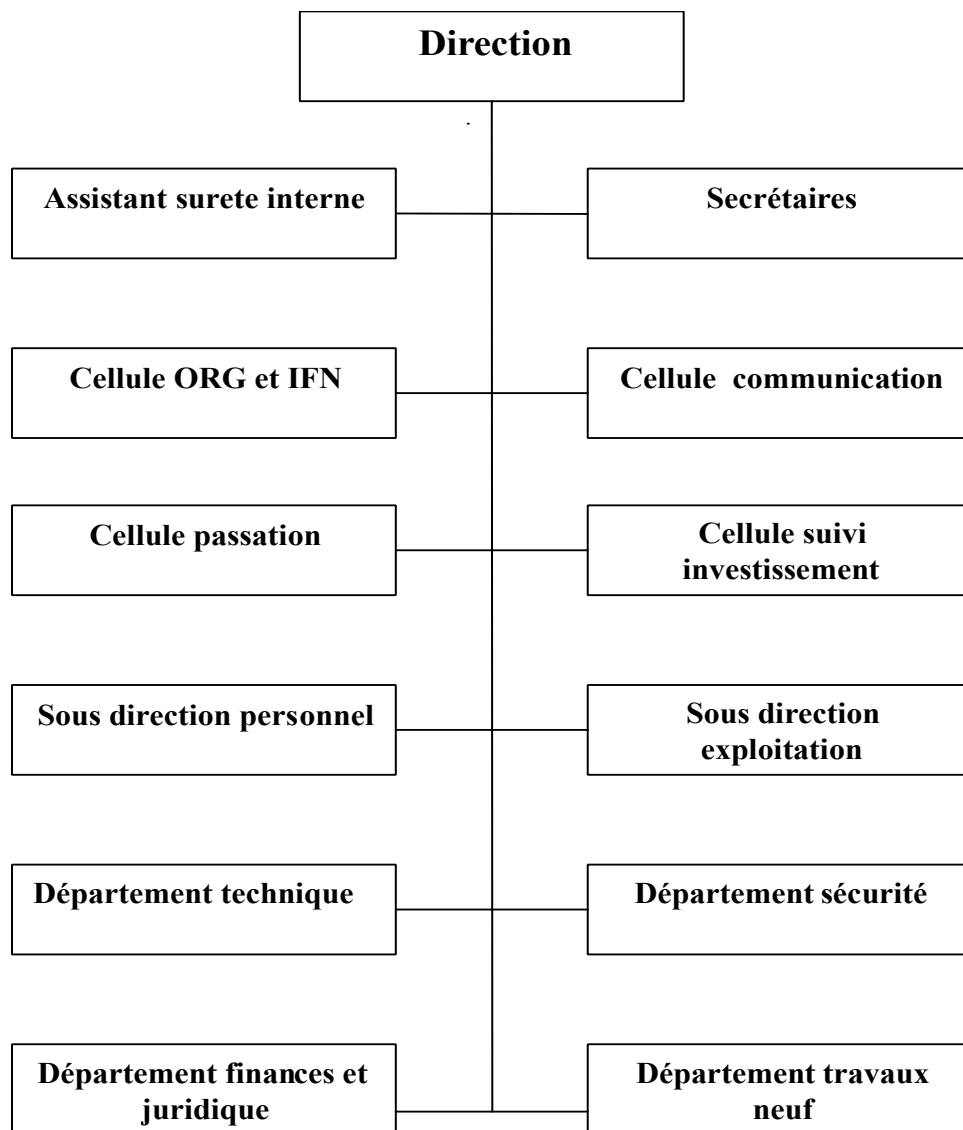
L'usine est composée de trois zones :

- Zone des utilités.
- Zone des procédés.
- Zone des stockages et de chargement.

I.2.4 Organisation du complexe :

Les activités du complexe sont structurées sur la base d'un organigramme articulé sur plusieurs départements fonctionnels :

- Fonction du contrôle : Finance, Technique, Sécurité.
- Fonction d'exploitation : Production, Maintenance, Approvisionnement.
- Fonction personnelle : Administration, Moyen Généraux.

Organigramme général du complexe GL2/Z :

I-3) Les composant du gaz naturel

Le gaz naturel provenant de HASSI R'MEL à liquéfier à la composition regroupée dans le tableau 2-a ainsi que ses propriétés physiques et les conditions d'alimentation des trains dans les tableaux 2-b et 2-c.

Tableau I.1. les composants du gaz naturel et leur température d'ébullition

COMPOSANTS	PROPORTION EN %	TEMPERATURE
Hélium (He)	(Molaire 0.19)	-269
Azote (N ₂)	5.80	-196
Méthane (CH ₄)	83.00	-162
Ethane (C ₂ H ₆)	7.10	-90
Propane (C ₃ H ₈)	2.25	-45
i-Butane (C ₄ H ₁₀)	0.6	-12
n-Butane (C ₄ H ₁₀)	0.4	0
i-Pentane (C ₅ H ₁₂)	0.15	+28
n-Pentane (C ₅ H ₁₂)	0.12	+36
Gaz carbonique (CO ₂)	0.21	-78
Vapeur d'eau (H ₂ O)	50 ppm	-----
Mercure (Hg)	Trace	-----

Tableau I. 2.A. La composition moyenne du gaz naturel de Hassi R'mel.

COMPOSANTS	POURCENTAGE MOLAIRE MOYEN (%)
Azote N ₂	5,435
Hélium He	0,18

Dioxyde du carbone	CO ₂	0,195
Méthane	CH ₄	83,57
Ethane	C ₂ H ₆	7,499
Propane	C ₃ H ₈	2,00
Iso butane	iC ₄ H ₁₀	0,314
Butane	nC ₄ H ₁₀	0,532
Iso pentane	iC ₅ H ₁₂	0,12
Pentane	nC ₅ H ₁₂	0,058
Hexane	nC ₆ H ₁₄	0,13

Tableau I.2.B. Propriétés physique du GN à l'alimentation des trains

Poids moléculaire	18.88 g/mole
Teneur en eau	50 PPM

Tableau I.2.C. Condition d'entrée du GN l'alimentation

Pression	42.5 bars absolue
Température	De 15°C à 38°C
Débits	Environ 300.000 m ³ /h /1train

I-4- Traitement de la charge (GN)

Le complexe GL2/Z comprend six trains de liquéfaction indépendants en fonctionnement autonome. Le gaz naturel alimente chacun des trains par un réseau de canalisation permettant d'assurer un débit pour chaque train de 268000 Nm³/hr.

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

a) Unité de traitement et préparation de la charge du GN**1. Prétraitement :**

A l'entrée du train, le gaz brut passe par un ballon séparateur pour séparer les hydrocarbures liquides en suspension dans le gaz naturel et les éliminer vers le système de rejet liquide.

2. Démercurisation :

Pour éviter les problèmes de corrosion par le mercure le complexe GL2/Z a été équipé par un démercuriseur qui a l'aptitude à éliminer le mercure dans le courant du gaz naturel jusqu'à des concentrations inférieures à 0.1 g/Nm^3 .

❖ Section de décarbonatation :

Le dioxyde de carbone CO_2 est extrait du gaz naturel par lavage de celui-ci à contre-courant dans une colonne d'absorption par une solution de MEA à 15% pour réduire la teneur du CO_2 jusqu'à 70 ppm, car sa présence provoque la formation de cristaux dans les sections froides de l'installation.

❖ Section de déshydratation :

Le gaz naturel quitte la section de décarbonatation, saturée d'eau, il passe ensuite dans la section de déshydratation qui sert à éliminer de l'eau du GN jusqu'à moins de 1 ppm. Cette opération est effectuée dans des sécheurs à tamis moléculaire après avoir été refroidi et séparé.

b) Unité de liquéfaction : *Section de séparation :

Cette section a pour rôle l'extraction des hydrocarbures lourds, contenus dans le gaz naturel.

L'opération est assurée par un simple pré refroidissement du gaz naturel avec le propane réfrigérant dans une installation d'échange thermique.

❖ Section de liquéfaction :

La partie légère de la section de séparation est refroidie et liquéfiée dans l'extrémité froide de l'échangeur principal, par un fluide frigorigène mixte MCR. A ce niveau, le GNL est détendu et envoyé dans le déazoteur où sa teneur en azote est réduite par une simple détente. Le GNL est alors pompé et stocké dans des bacs, à une pression, de 1.030 bars, et une température de -162°C .

c) Unité de fractionnement des hydrocarbures lourds :

Elle comprend trois sections :

❖ Section de déméthanisation X51-E :

Elle est constituée par une colonne de 48 plateaux, (plateaux perforés à déversoir latéral du n° 1 et n° 18 à déversoir central intercalé avec déversoir latéral (du n° 19 au n° 48), une pression (31 bars) et une température propre (l'échelle de température allant de -6°C en tête à 112°C en fond de colonne).

C'est une colonne de 32 m de hauteur. Les vapeurs de tête sont dirigées vers le condenseur de 151°C pour y être condensé partiellement. Une conduite sur la ligne des vapeurs de tête permet d'évacuer en cas de nécessiter une partie des vapeurs vers TF par HIC 410.

❖ Section de dépropanisations X52-E :

C'est une colonne de 29 m de longueur, constituée par un ensemble de 47 plateaux perforés.

La pression de fonctionnement de la colonne est de 19 bars. L'échelle de température varie de 55°C en tête à 123°C en fond de colonne. L'alimentation de cette colonne est située au 31^{ème} plateau. Les plateaux sensibles sont le 32^{ème} et le

38^{ème}. Du 7^{ème} au 12^{ème}, déversoir central intercalé avec déversoir latéral pour les soutirages liquides.

❖ Section de débutanisations X53-E :

Il est constitué par un ensemble de 21 plateaux perforés. L'alimentation est située au 9^{ème} plateau.

La pression de service de la colonne est de 5.0 bars.

L'échelle de température est : 54°C tête à 113°C en fond de colonne.

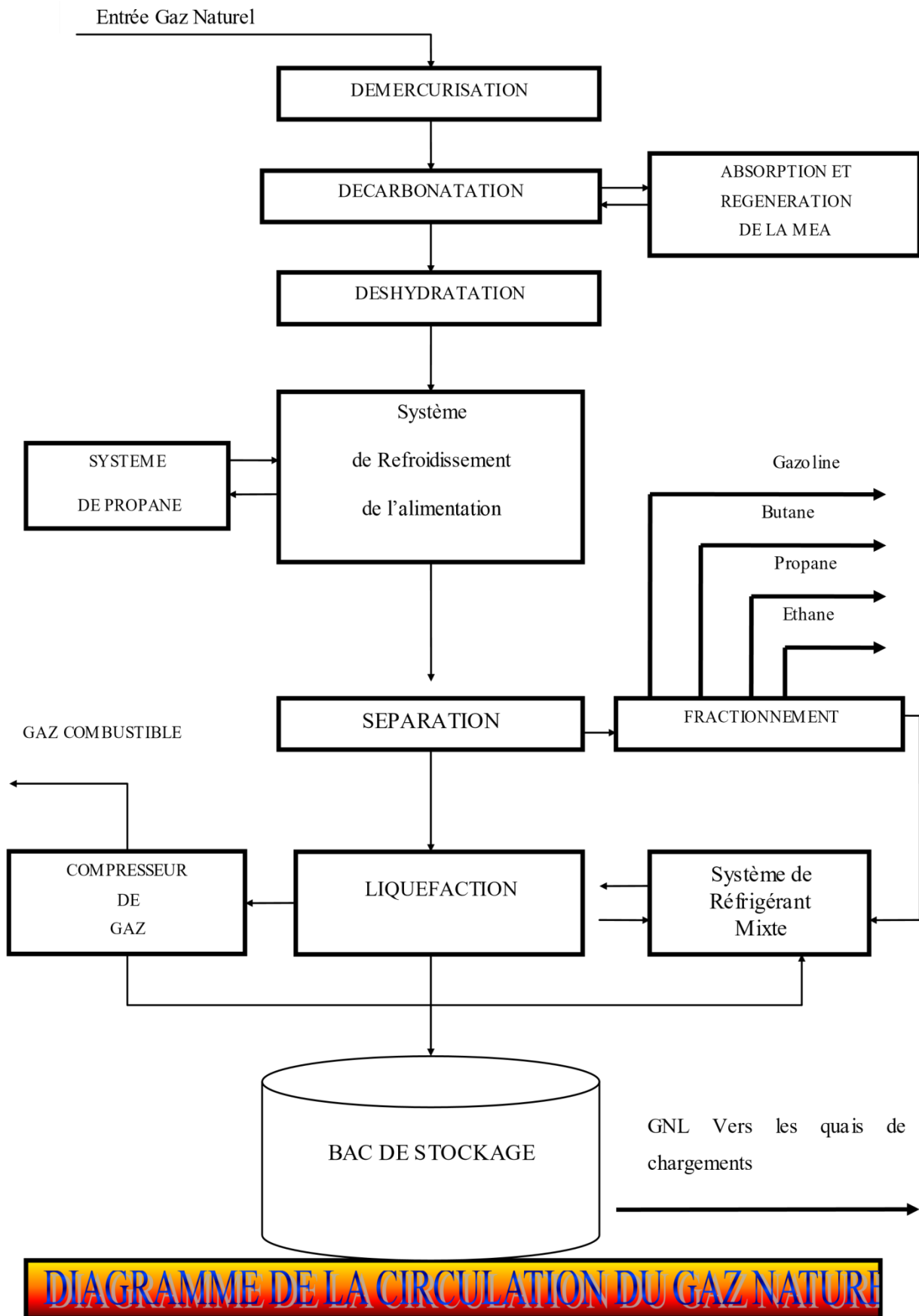
d) Unité de compression :

Les fluides générateurs de frigories (propane et MCR) circulent en circuit fermé. A la fin de cycle le propane est comprimé par un compresseur (X01-JT) et le MCR par deux compresseurs (X02-JT, X03-JT).

Les vapeurs de tête du désazoter sont comprimées dans le compresseur de gaz combustible avant d'être véhiculé dans le collecteur principal de gaz process.

Les quatre compresseurs sont entraînés par des turbines à vapeur à haute pression qui est produit par des chaudières.

Le processus de liquéfaction du gaz naturel à GL2/Z est porté dans le diagramme suivant :



I.5 Principe de procédé de liquéfaction :

L'usine de liquéfaction du gaz naturel d'ARZEW GL2Z, a été conçue pour assurer le transport sous forme liquide du GN. Les propriétés physiques et la composition chimique du GNL sont regroupées dans les tableaux 4 et 5.

Tableau I.3. Compositions du GNL :

COMPOSANTS	% MOLAIRES 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

Tableau I.4. Conditions de stockage du GNL.

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

1.5.1 Stockage de GNL :

Trois (03) réservoirs de GNL assurent le stockage de la totalité de la production de GNL des six trains pendant cinq jours environ. Les réservoirs d'une capacité unitaire de 100000m^3 permettent de stocker le GNL à la pression de 1,03 bars et à une température de -162°C . Lors du remplissage des réservoirs, une certaine quantité du produit se vaporise. Les échanges de chaleur avec l'extérieur due à la conduction sont aussi la cause de vaporisation du produit. Le GNL peut être transféré d'un réservoir à un autre lorsqu'on ne charge pas, en utilisant la pompe de transfert.

Il est également possible de transférer la production de GNL de GL1/Z vers les bacs de stockages de GL2/Z (et réciproquement) en utilisant également la pompe de transfert de GL2/Z (GL1/Z), le débit maximum est de $12000\text{m}^3/\text{h}$.

Tableau I.5. Caractéristiques du réservoir

Constructeur	TTK (Japon)
Capacité	100000m^3
Diamètre extérieur	76,8m
Hauteur paroi verticale	34,9m
Température de service	-163°C
Pression de service	1,05 bar absolu
Taux d'évaporation	Inférieur à 0,07% de la capacité total

2- Présentation du Service Inspection :

Le service inspection désignée par les insignes « **TI** » dépend du département technique « **T** ».
Il a pour tâches :

- De réceptionner, d'inspecter et de suivre les installations et les équipements en exploitation (machines tournantes, équipements statiques, équipement et installation électriques ainsi que les systèmes de régulation et d'instrumentation) afin de détecter toutes les anomalies et d'évaluer leur performance dans le but de prévenir les accidents qui peuvent parvenir lors de l'exploitation de ces équipements.
- D'assurer le suivi des inspections réglementaires des équipements soumis à la réglementation (tels que les équipements sous pression, les machines électriques et du débitmètre légal).

Ce service gère à son tour trois sections :

1. Section machine tournante

Cette section assure l'inspection et le contrôle des équipements mécaniques tels que pompes, compresseurs, turbine etc.

2. Section électricité et instrumentation

Qui se charge de tester les différentes installations électriques, ainsi que l'instrumentation, à savoir les appareils de mesure et de contrôle tels que : manomètres, soupapes, système d'alarme etc.

3. Section équipements statiques

La section équipements statiques s'occupe du suivi et contrôle des pipes et tuyauteries de gaz, de vapeur et d'eau, et des équipements soumis à des pressions statiques tels que chaudières, échangeurs, ballons et colonnes.

C'est dans ce service, et plus précisément dans cette dernière section que s'est déroulé le stage pratique faisant objet du présent rapport.

3- Les tâches de l'inspecteur des équipements statiques :

L'ingénieur inspecteur des équipements statiques doit remplir un certain nombre de conditions pour accomplir au mieux sa fonction. On peut citer :

- La connaissance du site et de ses installations.
- La maîtrise de la documentation et plans relatifs aux installations.
- L'interprétation des codes et normes de construction, d'inspection et de réception (**ASME, API, ASTM...**).
- La perception des défauts, de leurs causes et l'apport de solutions.
- La maîtrise de la réglementation en vigueur des équipements soumis.
- La maîtrise des différents outils d'inspection et de contrôle (**Ressuage, prise d'épaisseur par ultrasons...**).

Par ailleurs, le travail de l'ingénieur inspecteur se subdivise en trois (03) principales catégories :

3-1 **L'inspection sur site :**

Le contrôle et suivi des différentes installations de l'usine par l'ingénieur inspecteur se fait selon trois (03) aspects (**Ou genres d'inspection**) :

3-1-1 **Inspection accidentelle**

Suite à un problème survenu lors de la marche normale de l'installation (Pipe, échangeur...), une demande d'inspection est établie immédiatement après la localisation de l'anomalie par le département production (**P**). Cette demande d'inspection (**DI**) est réceptionnée par l'inspecteur concerné (**Inspecteur responsable de la zone où fut localisée l'anomalie**) qui effectue, en suite, une visite sur site afin d'établir un diagnostic.

3-1-2 **Inspection préventive**

Il s'agit d'une inspection externe de l'installation en marche normale afin d'anticiper d'éventuelles incidents.

Inspection suite à des modifications

Après la mise en place d'un nouvel équipement, ou le changement d'une ancienne installation endommagée, une inspection est indispensable pour savoir si les travaux ont été réussis.

Chapitre II

Étude des matériaux et des équipements
impliqués dans la corrosion sous calorifuge

II.1. Définition et classification

II.1.1 Définition

Un échangeur de chaleur est un dispositif thermique conçu pour transférer de l'énergie thermique entre deux fluides — (ou plus) — sans qu'il y ait mélange entre eux, en exploitant la différence de température existant entre ces fluides. Ce transfert s'effectue à travers une paroi solide conductrice de chaleur, généralement métallique, qui constitue la surface d'échange.

Les échangeurs de chaleur sont des équipements omniprésents dans de nombreux secteurs industriels : raffinage du pétrole, pétrochimie, industrie agroalimentaire, production d'énergie, traitement du gaz naturel et génie chimique. Leur rôle est fondamental pour l'optimisation des bilans énergétiques, la récupération de chaleur et le contrôle des conditions opératoires des procédés.

II.1.2 Classification

Les échangeurs de chaleur peuvent être classés selon plusieurs critères :

a) Selon la nature du contact entre les fluides :

Type	Description
- Échangeurs à surface séparatrice	Les fluides sont séparés par une paroi solide (le plus courant)
- Échangeurs à contact direct	Les fluides sont en contact direct (tours de refroidissement)
- Échangeurs régénératifs	Un matériau solide emmagasine et restitue alternativement la chaleur.

b) Selon la géométrie et la configuration :

- **Échangeurs tubulaires ;**
 - Tubes et calandre (Shell & Tube) : le type le plus répandu dans l'industrie ;
 - Double tubes (double pipe) : pour faibles débits
 - Faisceaux de tubes : grande surface d'échange.

- **Échangeurs à plaques :**

- Plaques jointives (PHE) : démontables et facilement nettoyables
- Plaques brasées : compactes et résistantes aux hautes pressions
- Plaques soudées : pour fluides corrosifs

- **Échangeurs à ailettes :**

- Aéroréfrigérants (air coolers)
- Échangeurs compacts à ailettes et plaques

c) Selon le sens de circulation des fluides :

- **Co-courant** : les deux fluides circulent dans le même sens.
- **Contre-courant** : les fluides circulent en sens opposés (plus efficace thermiquement).
- **Croisé** : les fluides circulent perpendiculairement l'un par rapport à l'autre.

II.2. DESCRIPTION DE L'ÉCHANGEUR X16C :

L'échangeur principal X16C est un équipement vertical de 42,8 m de hauteur et de 4,41 m de diamètre de la partie inférieur, et de 2,35 m de diamètre de la partie supérieur. La matière de fabrication c'est de l'aluminium.

L'échangeur principal X16C est un échangeur à 3 faisceaux, chaud, moyen et froid. Il est constitué de 4 circuits :

1. **CIRCUIT GN** : CE CIRCUIT OCCUPE LE FAISCEAU CHAUD.
2. **CIRCUIT GNL** : CE CIRCUIT OCCUPE 2 FAISCEAUX ; MOYEN ET FROID.
3. **CIRCUIT MCR LIQUIDE** : IL OCCUPE 2 FAISCEAUX ; CHAUD ET MOYEN.
4. **CIRCUIT MCR VAPEUR** : IL OCCUPE 3 FAISCEAUX ; CHAUD, MOYEN ET FROID.

Tous les faisceaux de ces circuits forment une bobine qui se développe sous forme spirale au tour d'un noyau.

Chaque faisceau est constitué de deux parties opposées l'une à l'autre, connectées des deux côtés, bas et haut par des collecteurs (supérieur et inférieur).

Le X16C est équipement de liquéfaction du GAZ Naturel, qui s'écoule à travers les faisceaux de tube spiral, de bas en haut en sens inverse par rapport à l'écoulement du MCR liquide et vapeur qui sont injectés à l'intérieur de l'échangeur coté calandre. Cela après leurs

passages à travers des vannes de détente Joule-Thomson (vanne J-T), cette vanne est un organe de détente par laminage du fluide, cette détente a les caractéristiques suivantes :

- ❖ Détente adiabatique.
- ❖ Ecoulement stationnaire.
- ❖ Pas de travail dépensé.
- ❖ Pas de variation de vitesse du gaz.
- ❖ Détente isenthalpique.

$$\cancel{Q} + \cancel{W} = H_2 - H_1 = 0$$

Le procédé de détente isenthalpique peut s'effectuer de trois manières :

- ❖ Détente avec augmentation de la température.
- ❖ Détente à température constante.
- ❖ Détente avec chute de température.

Ce phénomène est exprimé par le coefficient de Joule-Thomson α_H

$$\alpha_H = (\partial T / \partial P)_H$$

- $\alpha_H > 0$: effet positif (chute de température)
- $\alpha_H < 0$: effet négatif (augmentation de la température).
- $\alpha_H = 0$: effet nul (cas des gazes parfait).

En ce qui concerne le MCR qui s'élève à travers les tubes des faisceaux, il est lui-même liquéfié par le même MCR qui est injecté à l'intérieur de l'échangeur.

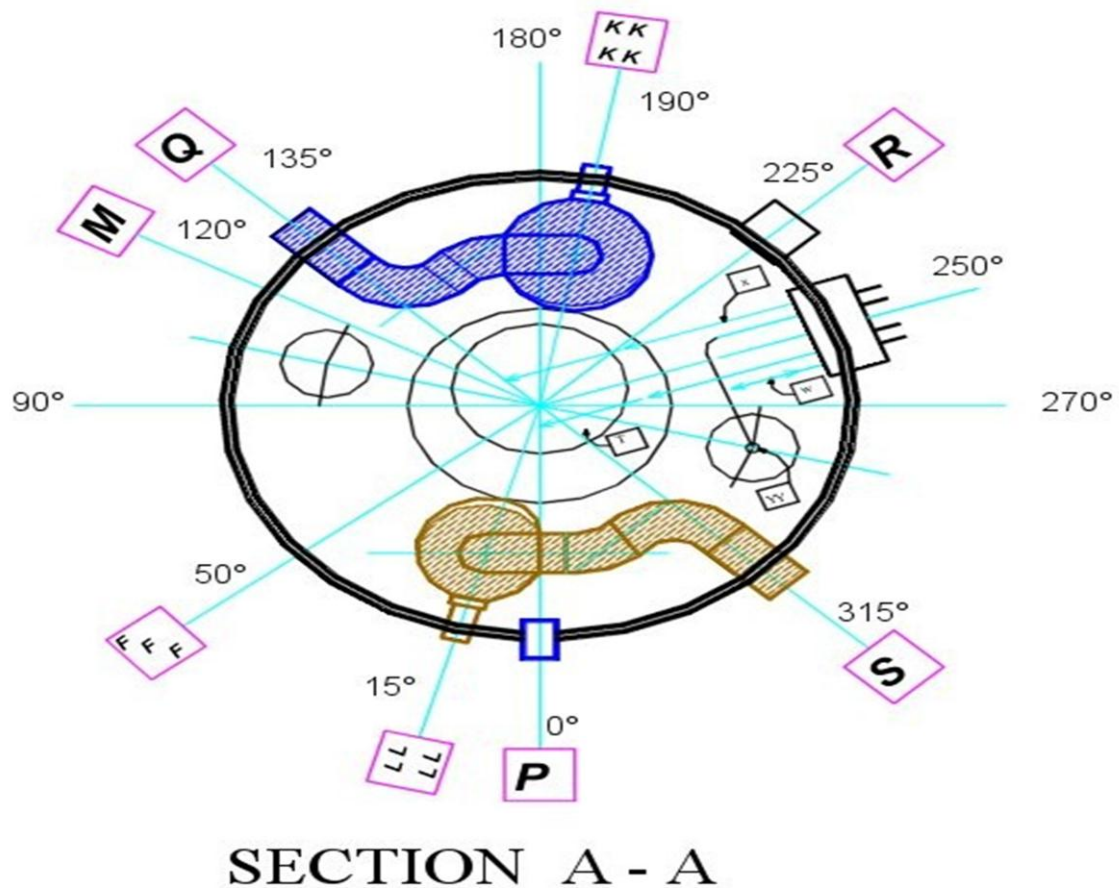
Concernant les collecteurs inférieurs du faisceau chaud ils sont dotés des points bas prévus pour assurer l'évacuation de l'eau ou autres produits liquides durant les opérations de dégivrage.

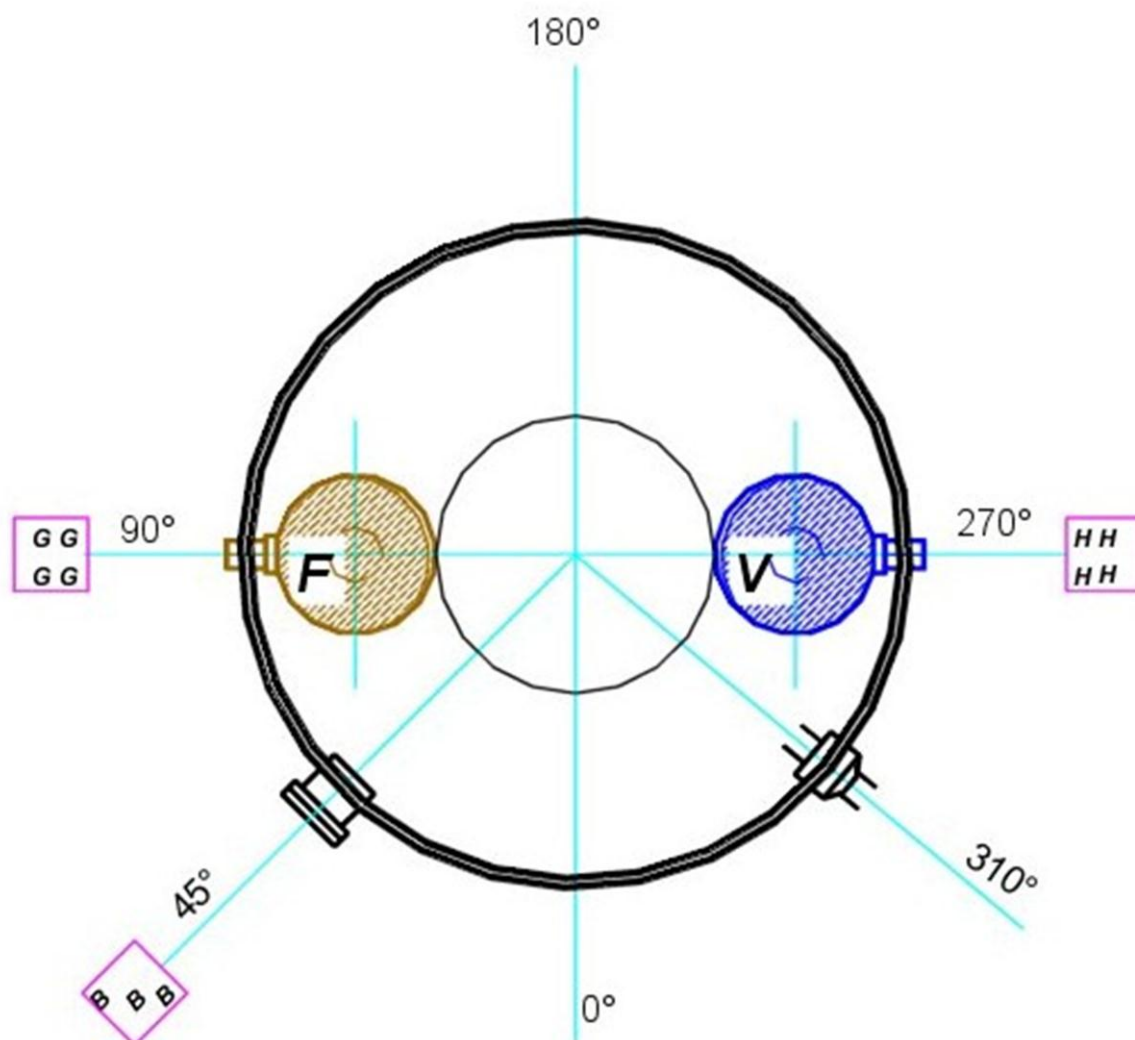
Il existe dans l'ensemble, 6 lignes de purge :

- 2 provenant du collecteur du gaz d'alimentation (GN), qui est identifiés par les désignations "PPPP" et "RRRR".

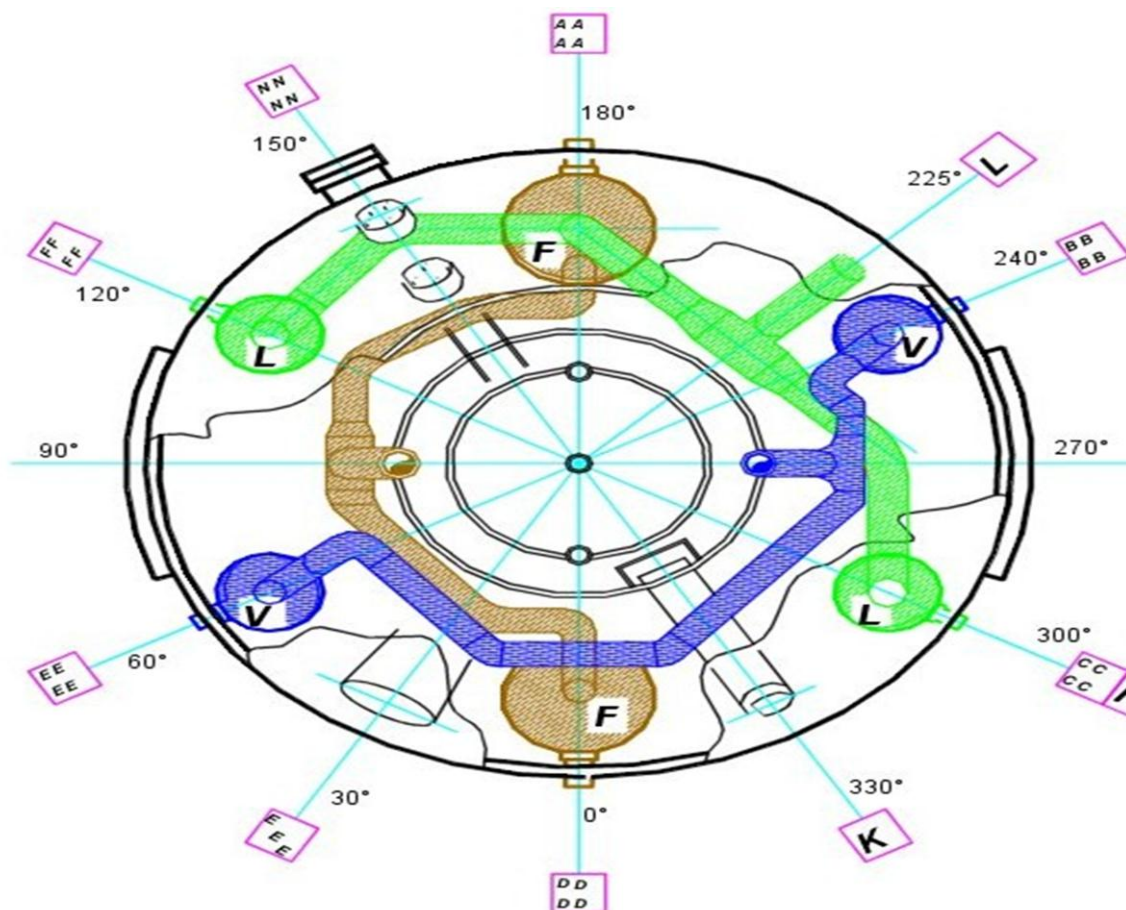
- 2 provenant du collecteur du **MCR liquide** désignées par “TTTT” et “QQQQ”.
- 2 provenant du collecteur du **MCR vapeur** désignées par “SSSS” et “UUUU”.

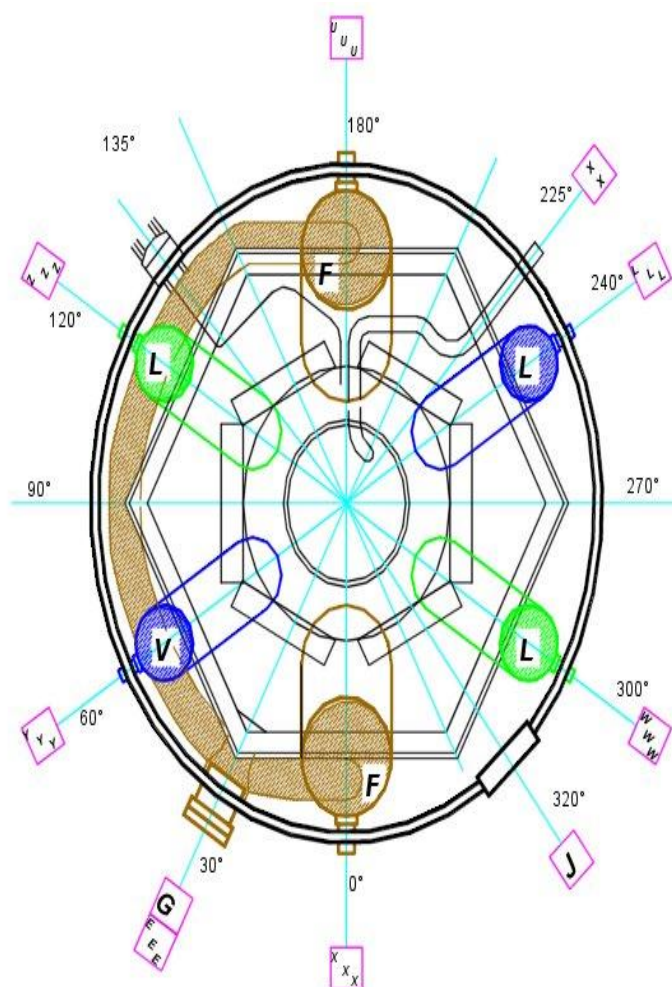
Ces lignes de purge munies de vannes situées à l’extérieur de la jupe de l’échangeur.



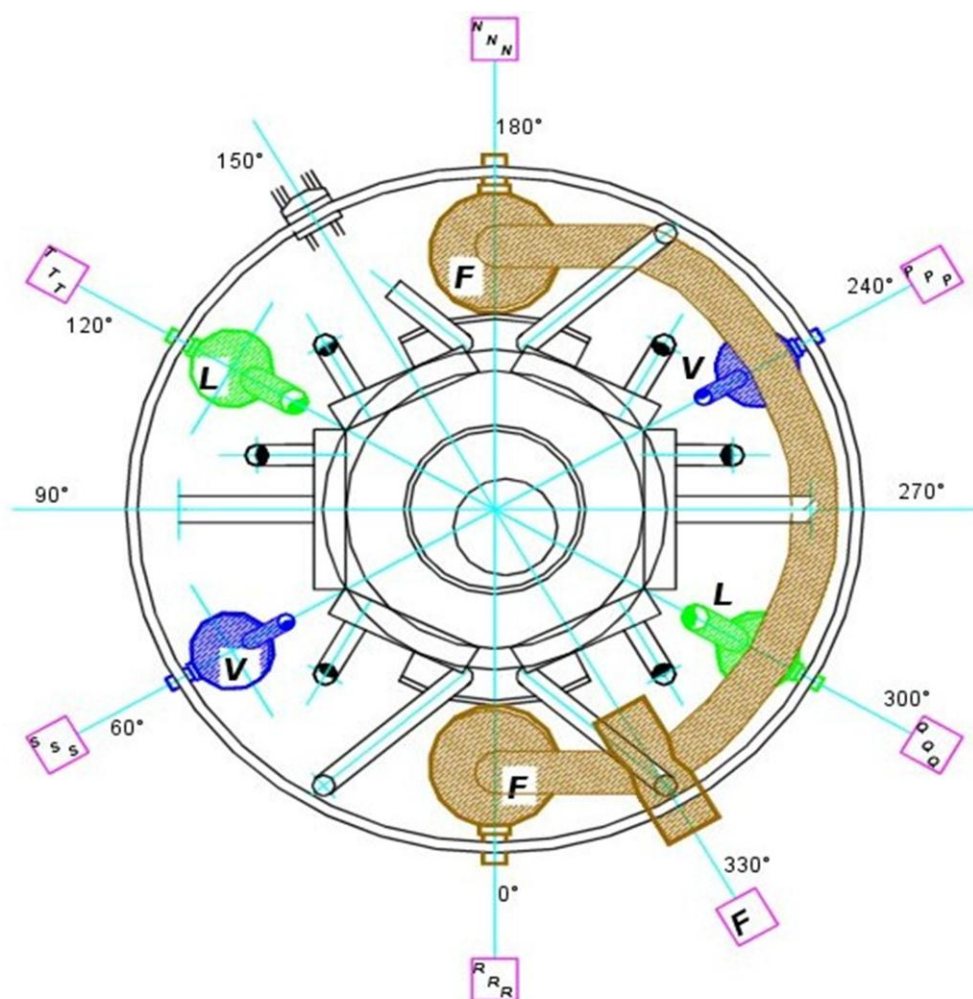


SECTION B - B

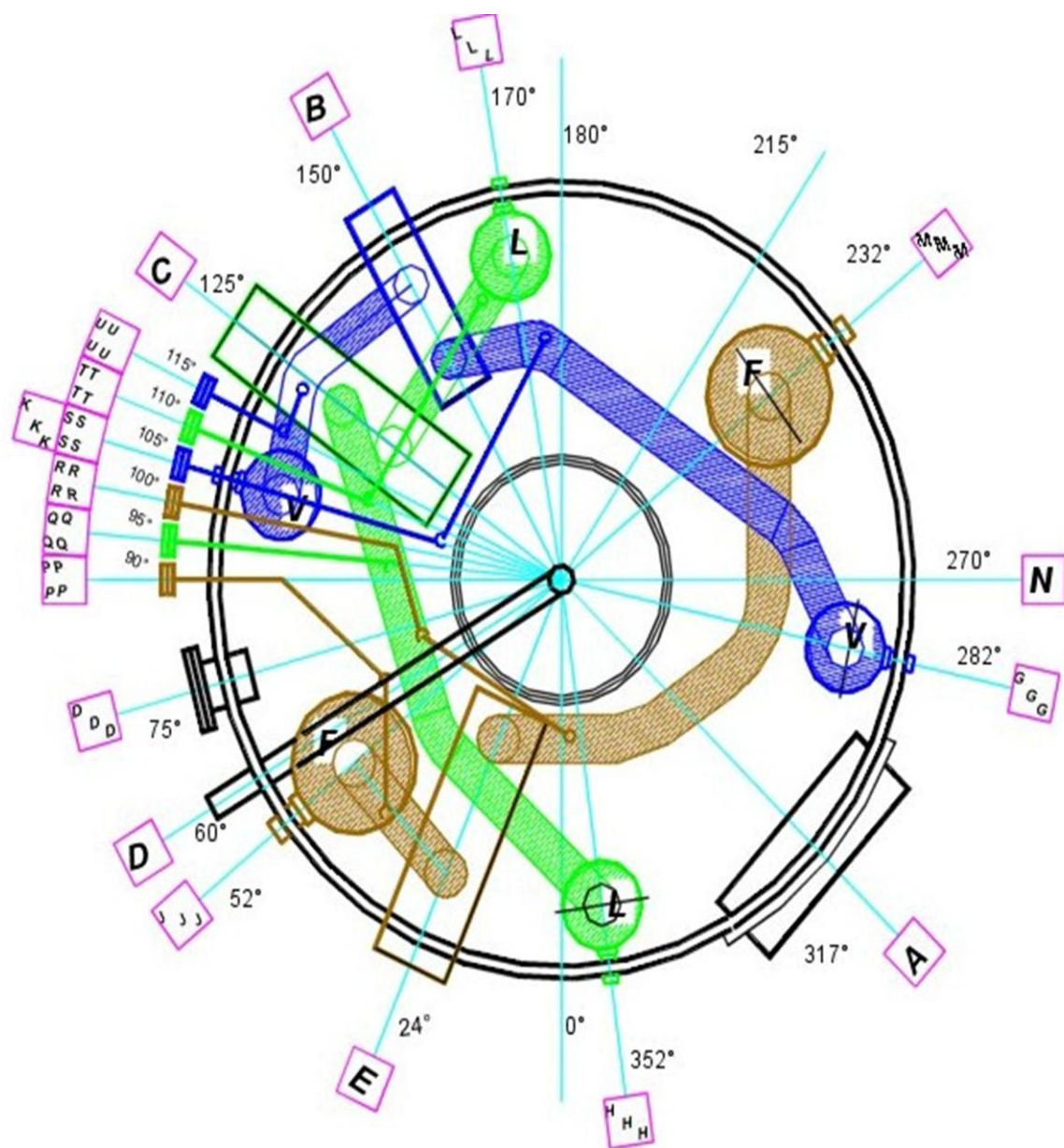




SECTION D - D



SECTION E - E



SECTION F - F

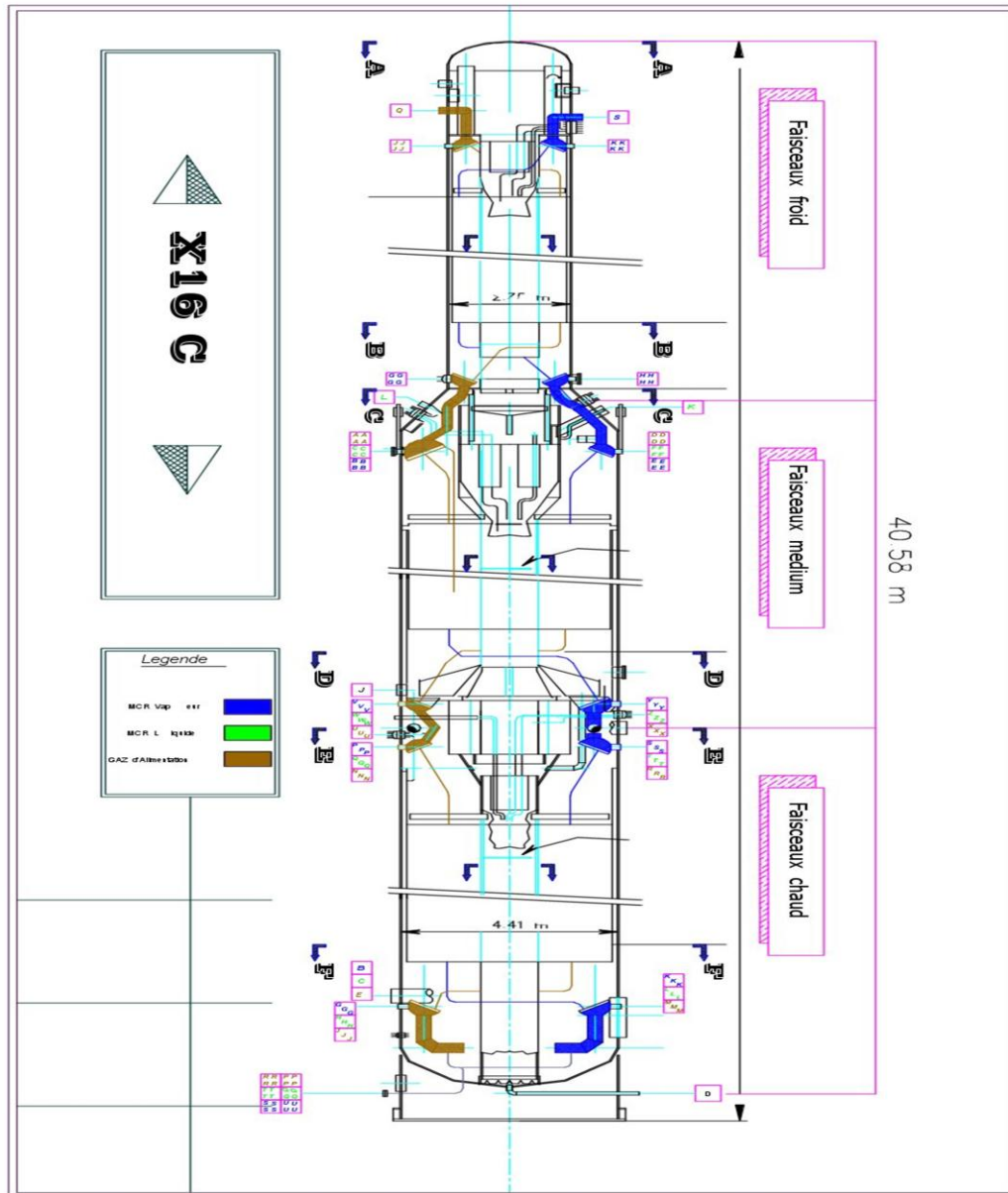


Figure.II.1. Schéma technique de l'échangeur de chaleur principal (MCHE) - Type X16C

Tableau.II.1. Nomenclature des raccords et ouvertures de l'échangeur principal
X16C

**Chapitre II Etudes des matériaux et des équipements impliqués dans la corrosion
sous calorifuge**

Indication	Service	Position (en degré)	Section
A	MCR vapeur (Sortie)	317°	FF
B	MCR vapeur (Entrée)	150°	FF
C	MCR liquide (entrée)	125°	FF
D	Drainage	60°	FF
E	GN (entrée)	24°	FF
F	GN (sortie vers 108F)	330°	EE
G	GN (entrée de 108F)	30°	DD
J	Trou d'homme	320°	DD
L	MCR liquide (vers J.T.)	225°	CC
N	Trou de la jupe	270°	FF
P	MCR vapeur (de J.T.)	0°	AA
Q	MCR vapeur (vers J.T.)	135°	AA
S	GNL (sortie)	315°	AA
EEE	Trou d'homme	30°	CC
FFF	Trou d'homme	50°	AA
GGG	Hand hole MCR V	282°	FF
HHH	Hand hole MCR L	352°	FF
JJJ	Hand hole GN	52°	FF
KKK	Hand hole MCR V	105°	FF
LLL	Hand hole MCR L	240°	DD
MMM	Hand hole GN	232°	FF
NNN	Hand hole GN	180°	EE
PPP	Hand hole MCR V	240°	EE
QQQ	Hand hole MCR L	300°	EE
RRR	Hand hole GN	0°	EE
SSS	Hand hole MCR V	60°	EE
TTT	Hand hole MCR L	120°	EE
UUU	Hand hole GN	180°	DD
VVV	Hand hole MCR V	240°	DD

WWW	Hand hole MCR L	300°	DD
XXX	Hand hole GN	0°	DD
YYY	Hand hole MCR V	60°	DD
ZZZ	Hand hole MCR L	120°	DD
AAAA	Hand hole GN	180°	CC
BBBB	Hand hole MCR V	240°	CC
CCCC	Hand hole MCR L	300°	CC
DDDD	Hand hole GN	0°	CC
EEEE	Hand hole MCR V	60°	CC
FFFF	Hand hole MCR L	120°	CC
GGGG	Hand hole GN	90°	BB
HHHH	Hand hole MCR V	270°	BB
JJJJ	Hand hole GN	15°	AA
KKKK	Hand hole MCR V	190°	AA
PPPP	Purge GN	90°	FF
QQQQ	Purge MCR L	95°	FF
RRRR	Purge GN	100°	FF
SSSS	Purge MCR V	105°	FF
TTTT	Purge MCR L	110°	FF
UUUU	Purge MCR V	115°	FF



Figure. II.2: L ‘échangeur principal X16C.

II.3. Philosophie de fonctionnement de l'échangeur X16C :

Le gaz naturel doit être refroidi de -30°C à -150°C le gaz étant constitué de plusieurs composants. Les corps qui le constituent se refroidiront puis se liquéfieront successivement.

La courbe (température – apport frigorifique) sera donc différente de celle d'un corps pur.

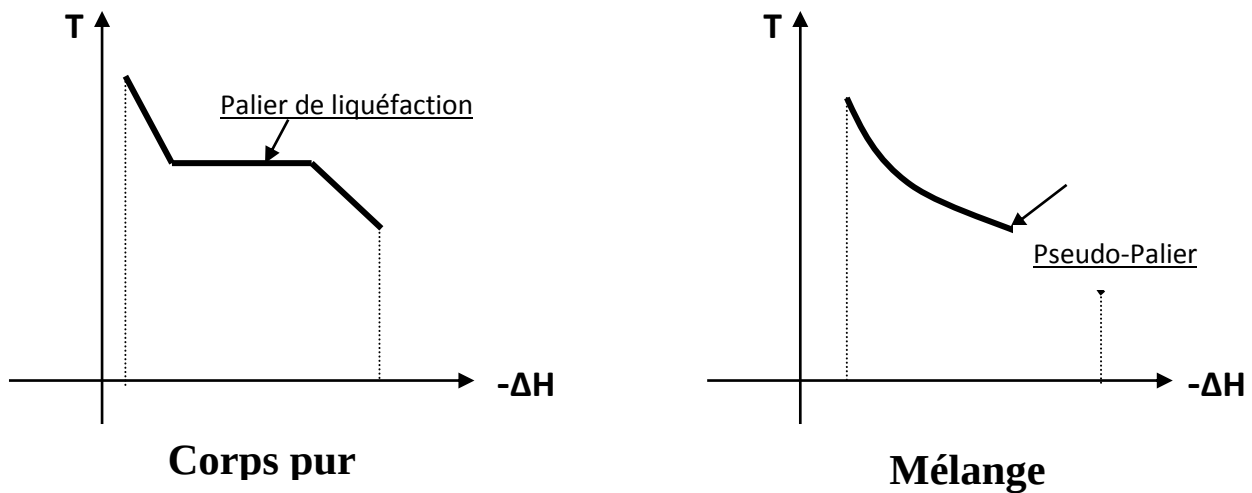


Figure II.3. .Comparaison entre le palier de liquéfaction d'un corps pur et le pseudo-palier d'un mélange.

On remarque que l'apport frigorifique le plus important est fourni sous forme de chaleur latente pour la liquéfaction du gaz. Dans le cas d'un mélange, si un corps est en quantité prépondérante, lors de sa liquéfaction, on observera un pseudo-palier sur la courbe, partie plus ou moins rectiligne. La position du palier dépendra des conditions de pression, le % molaire et de la qualité des autres constituants etc...

Afin de refroidir le gaz avec le maximum de rendement, il faut y utiliser un fluide frigorigène à une température aussi proche que possible tout au long du refroidissement (approche de l'échangeur).

On peut donc utiliser la vaporisation de plusieurs fluides à des pressions (et températures) différentes. On utilise la vaporisation car c'est grâce à la chaleur latente que l'on peut fournir le plus de frigories. Ceci conduit à des cycles « en cascade » où le gaz naturel est refroidi dans une succession d'échangeur. Les différents niveaux utilisent plusieurs fluides (méthane, éthylène, propane), chacun d'eux à plusieurs niveaux de pression.

Une autre solution consiste à utiliser (dans un ou plusieurs échangeurs distincts) un fluide unique à plusieurs composants, dont la vaporisation successive réalisera les « paliers », qui deviennent alors des pseudo-paliers.

Ce fluide est ici le MCR dont la vaporisation se fera en épousant le mieux possible la courbe de liquéfaction du GN.

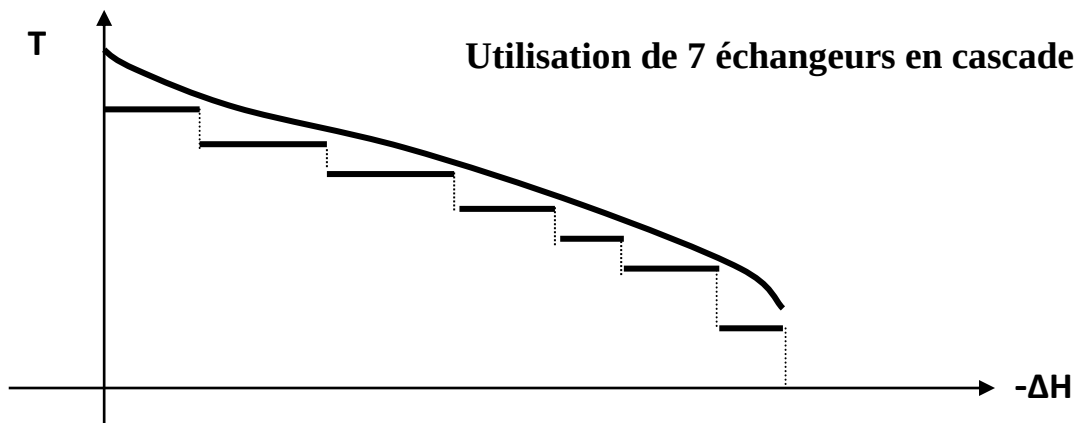
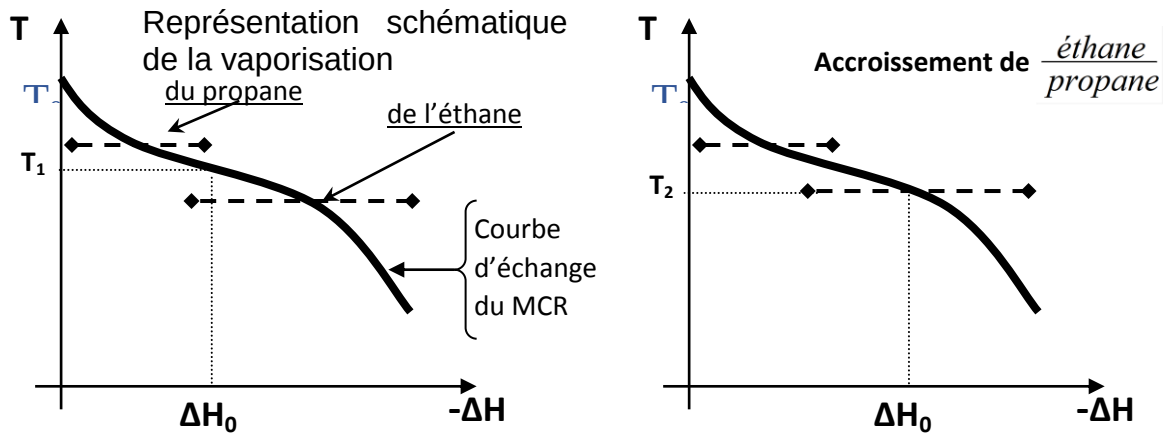


Figure.II.4: Courbe de refroidissement d'un mélange avec un système de 7 échangeurs en cascade

En faisant varier la proportion en différents constituants, on changera la valeur de l'apport frigorifique dû à chacun d'eux sous forme de chaleur latente (le plus important) qui se fait aux alentours d'une température fixe (pseudo-température de vaporisation du corps au sein du mélange, à sa pression partielle, qui peut être envisagée intuitivement). L'apport par chaleur sensible est à peu près constant tout au long de l'échangeur (C_p proches pour tous les corps, dans leurs deux phases).

Ainsi, en augmentant la proportion d'éthane par exemple, on augmentera la longueur du pseudo-palier éthane et l'influence pseudo-température de palier sur la courbe de vaporisation. Si on diminue en proportion le palier propane (qui intuitivement, bien que l'on ait un mélange aux propriétés complexes, se situe à une pseudo-température supérieur), la réfrigération sera déplacée vers des températures plus basses :

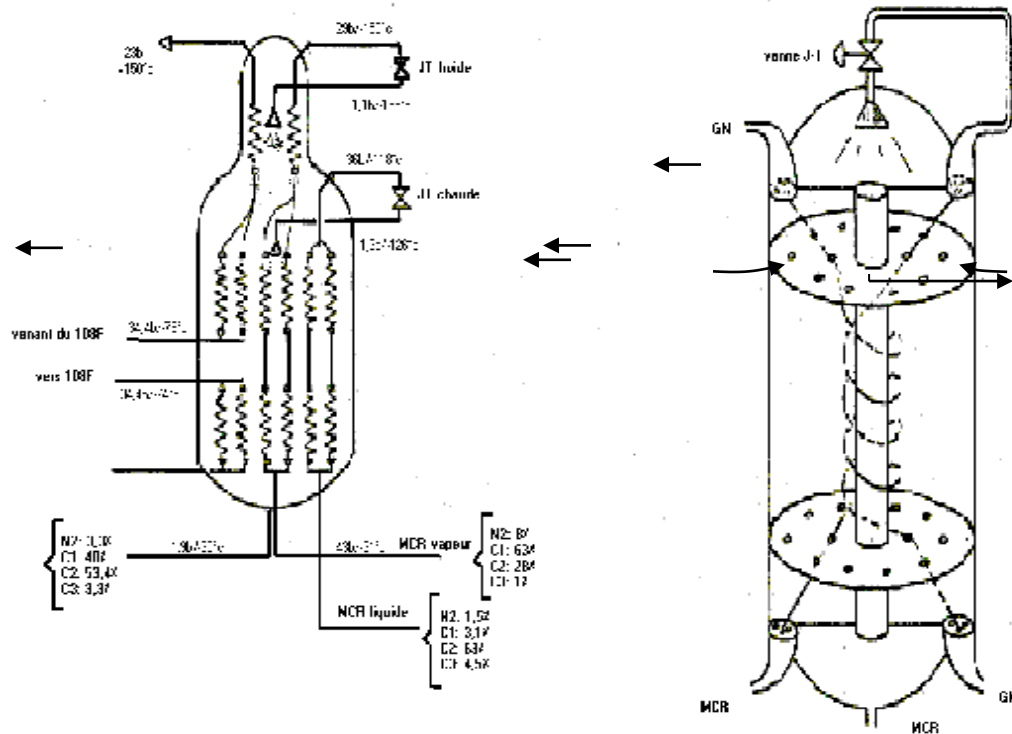


$T_1 (\Delta H_0) > T_2 (\Delta H_0)$ où la quantité de chaleur ΔH_0 a été échangée entre T_0 et T_1 dans le premier cas et T_0 et T_2 dans le deuxième ; Cela correspond ainsi en première approximation à la même longueur d'échangeur.

Les phénomènes qui interviennent sont en fait beaucoup plus compliqués, mais cette illustration permet de comprendre pourquoi, en augmentant le rapport $\frac{\text{éthane}}{\text{propane}}$ dans le MCR, on diminuera la température du point milieu (faisceau moyen de l'échangeur) et inversement. Car pour bien équilibrer l'échangeur, on essaie d'avoir une puissance thermique constante le long des faisceaux et le $(-\Delta H)$ peut être, en première approximation, confondu avec la « longueur d'échangeur ».

Chapitre II Etudes des matériaux et des équipements impliqués dans la corrosion sous calorifuge

Dans le cas du X16C, le fluide à refroidir circule dans des faisceaux de tubes enroulés autour d'un noyau et arrosés par le MCR qui ruisselle sur les tubes, et vaporiser de haut en bas de la calandre.



Configuration interne et principe de fonctionnement de l'échangeur thermique X16C

En fait, en même temps que le GN, on refroidisse le MCR qui sera, après détente, injecté dans la calandre. Donc l'échangeur joue un rôle d'économiseur vis-à-vis du MCR. La détente sert à amener le MCR à une température inférieure à celle des faisceaux, donc quelques degrés suffisent et la détente Joule-Thomson est appropriée.

Comme on utilise surtout l'échange de chaleur par la chaleur latente, il serait peu utile de trop sous-refroidir (c'est-à-dire jusqu'à -150°C) les éléments lourds du MCR qui sont déjà liquides.

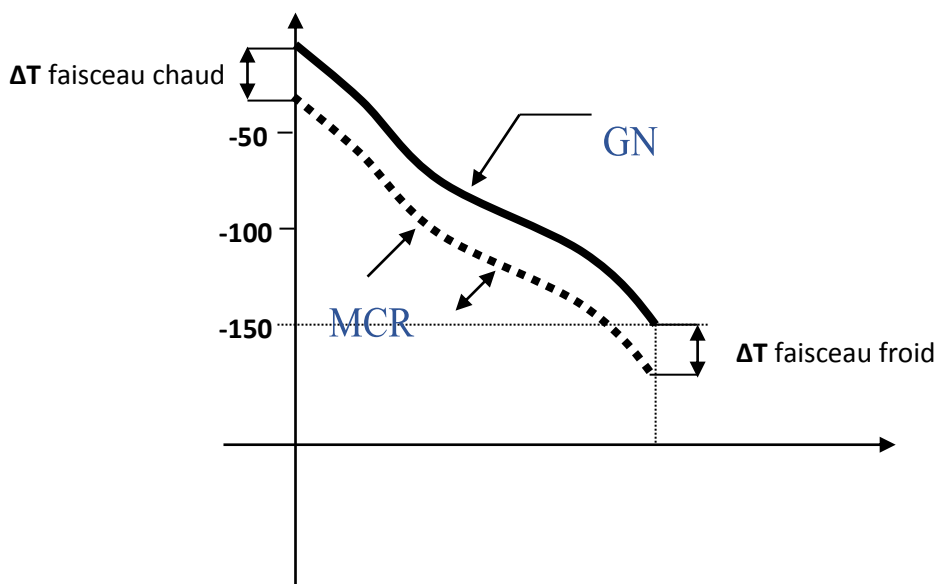
Il est préférable de séparer les deux phases avant l'entrée dans l'échangeur, afin de pouvoir sortir la phase liquide au niveau optimum de température et continuer à liquéfier puis sous refroidir la phase initialement gazeuse (plus légère) afin de l'utiliser dans la partie supérieure de l'échangeur.

On peut noter que le fait d'accroître la proportion d'azote dans le GNL, augmentera la différence de température par détente J-T (car à ces températures, bien que l'azote soit en mélange, la détente de ce corps provoque un refroidissement plus grand que pour les autres composants : On est plus près du point critique). Donc si on augmente le % de N_2 , on accroît ΔT du faisceau froid.

Par contre, si on accroît la proportion en lourds par rapport aux légers, on va utiliser la chaleur latente de ces corps sur une partie plus importante de l'échangeur, à la limite jusque dans sa partie la plus basse au lieu d'y utiliser uniquement la chaleur sensible du MCR vapeur et on amène donc au faisceau chaud de l'échangeur une température plus basse, maintenue par les changements de phases. Donc, si on augmente le rapport $\frac{\text{lourds}}{\text{légers}}$, on accroît ΔT du faisceau

chaud. On voit donc qu'en agissant sur le rapport $\frac{\text{éthane}}{\text{propane}}$ (point milieu), $\frac{\text{lourds}}{\text{légers}}$, (ΔT du

faisceau chaud) et % N₂ du faisceau froid), on peut améliorer le rendement de l'échangeur en appliquant mieux la courbe MCR sur celle du GN



II.4. Fiche technique _ Dimension, Matériaux & Fluides

II.4.1. Données dimensionnelles

Tableau II.2 : Nomenclature des raccords et ouvertures de l'échangeur principal X16C

Paramètre	Valeur
Orientation	Verticale
Hauteur totale	42,8 m
Diamètre — partie inférieure	4,41 m
Diamètre — partie supérieure	2,35 m
Matériau de fabrication	Aluminium (tenue cryogénique)
Type de construction	Tubes spiraux enroulés autour d'un noyau (bobine)
Nombre de faisceaux	3 — chaud, moyen, froid

Nombre de circuits	4 — GN, GNL, MCR liquide, MCR vapeur
Collecteurs	Supérieur et inférieur par faisceau
Lignes de purge	6 (2×GN, 2×MCR liquide, 2×MCR vapeur)
Position des purges	Section FF — angles de 90° à 115°

II.4.2. Fluides & circuits

Circuit	Faisceaux occupés	Description
GN (gaz naturel)	Chaud	Gaz naturel d'alimentation — circule dans les tubes de bas en haut
GNL(gaz naturel liquéfié)	Moyen, froid	GN liquéfié — sortie vers puis à 108 °F stockage
MCR liquide	Chaud, moyen	Réfrigérant mixte liquide — injecté côté calandre après détente J-T
MCR vapeur	Chaud, moyen, froid	Réfrigérant mixte vapeur — injecté côté calandre après détente J-T

Composition du gaz naturel d'alimentation (Hassi R'Mel)

Composant	% molaire moyen	Température d'ébullition
Méthane(CH ₄)	83,57 %	−162 °C
Éthane (CH) ₆	7,50 %	−90 °C
Azote(N ₂)	5,44 %	−196 °C
Propane (CH ₈)	2,00 %	−45 °C

Hélium (He)	0,18 %	-269 °C
Dioxyde de carbone (CO) ₂	0,195 %	-78 °C
Poids moléculaire du gaz naturel (GN)	18,88 g/mol	—
Poids moléculaire du gaz naturel liquéfié (GNL)	18,2 g/mol	—

Le MCR (réfrigérant mixte) est un mélange de méthane, et d'éthane, propane et azote dont la vaporisation successive crée des pseudo-paliers épousant la courbe de liquéfaction du GN.

II.5. Rôle dans le procédé

Le X16C est l'échangeur principal de chaque train de liquéfaction GL2/Z. Il intervient en toute fin de processus, après le traitement du gaz naturel (démercurisation, décarbonatation, déshydratation, et séparation). Il remplit deux fonctions simultanées :

- Liquéfaction principale : refroidissement du gaz naturel (GN) de -30 °C à -150 °C par échange thermique avec le méthane (MCR) vaporisé côté calandre
- Économiseur : pré-refroidissement du MCR avant sa détente Joule-Thomson (quelques degrés suffisent)

Position dans la chaîne de procédé :

Étape	Opération	Équipement	T° / Conditions
1	Prétraitement + traitement GN	Démerc. / décarb. / déshyd.	15 à 38 °C / 42,5 bar abs.
2	Pré-refroidissement au propane	Système X06F / X09F	Sortie ≈ -30 °C
3	Liquéfaction principale (X16C)	Échangeur X16C	-30 °C → -150 °C

4	Déazotage du GNL	Déazoteur	Réduction du N ₂ par détente
5	Stockage du GNL	3 bacs de 100 000 m ³ (TTK Japon)	−162 °C / 1,03 bar abs.

II.6. Conditions de service — Température, pression et cycles

II.6.1 Températures

Point de mesure	Valeur
Alimentation GN (entrée du train)	15 °C à 38 °C
Entrée X16C (après pré-refroidissement au propane)	−30 °C
Sortie X16C (GNL)	−150 °C
Stockage final GNL	−162 °C
Service du réservoir de stockage	−163 °C

II.6.2. Pressions et débits

Paramètre	Valeur
Pression d'alimentation en gaz naturel (GN)	42,5 bar absolue
Pression de stockage du GNL	1,03 bar absolue
Pression du service du réservoir	1,05 bar absolu

Débit gaz naturel par train	268 000 Nm ³ / h
Débit total du complexe (6 trains)	≈ 1 500 000 m ³ / h

II.6.3. Cycles et mode de fonctionnement

Paramètre	Description
Mode de fonctionnement	Continu — boucle fermée MCR
Nombre de trains en parallèle	6 (arrêt d'un train sans impact sur les autres)
Compresseur propane / train	1 compresseur X01-JT
Compresseurs MCR / train	2 compresseurs X02-JT et X03-JT
Entraînement des compresseurs	Turbines à vapeur haute pression (chaudières)
Type de détente MCR	Joule-Thomson — détente adiabatique isenthalpique ($\Delta H = 0$)
Sens d'écoulement du gaz naturel (tubes)	Bas → Haut
Sens d'écoulement du MCR (calandre)	Haut → Bas (ruissellement sur les tubes)
Opération cyclique identifiée	Dégivrage des collecteurs inférieurs du faisceau chaud

Détente J-T est caractérisée par une détente adiabatique, un écoulement stationnaire, l'absence de travail dépensé, et une détente isenthalpique. L'effet de Joule-Thomson est positif ($\mu_H > 0$) → chute de température.

II.7. Historique la maintenance et des incidents

II.7.1 Chronologie de la mise en service du complexe GL2/Z

Date	Événement
09 février 1976	Signature du contrat (société Pullman Kellogg — États-Unis)
15 mars 1977	Ouverture du chantier
21 février 1978	Pose de la première pierre
20 janvier 1981	Première production de GNL
29 janvier 1981	Première expédition de GNL (méthaniers cryogéniques)

II.7.2. Organisation du service d'inspection (TI)

Le service d'inspection (TI) dépend du département technique (T). Il se compose de trois sections :

- La section des machines tournantes : (pompes, compresseurs, turbines);
- La section électricité et instrumentation : (manomètres, soupapes, systèmes d'alarme);
- La section équipements statiques : (échangeurs, ballons, colonnes, chaudières, tuyauteries section concernée par le X16C)

II.7.3. Types d'inspection documentés

Type	Déclencheur	Description
Inspection accidentelle	Anomalie en cours d'exploitation	Demande d'inspection (DI) du département Production — visite sur site et diagnostic immédiat
Inspection préventive	Planifiée — marche normale	Inspection externe périodique pour anticiper les incidents éventuels
Inspection post-modification	Après travaux / remplacement	Vérification de conformité après mise en place d'un nouvel équipement ou réparation

II.7.4. Méthodes d'inspection et normes applicables

Méthode / norme	Application
Contrôle d'épaisseur par ultrasons (UT)	Suivi de la corrosion et de l'usure des parois
Ressuage (PT)	Détection des fissures de surface
Norme ASME	Construction, inspection et réception
Norme API	Inspection des équipements pétroliers
Norme ASTM	Matériaux et essais
Points bas — collecteurs inférieurs	Évacuation de l'eau et des liquides lors du dégivrage (faisceau chaud)



Figure. II.5.Faisceau tubulaire d'un échangeur thermique

II.8 Matériaux de construction (l'aluminium et ses alliages)

II.8.1 Généralité :

L'aluminium est un élément chimique, de symbole Al et de numéro atomique 13. C'est un élément important sur la Terre avec 1,5 % de la masse totale.

C'est un métal argenté et malléable.

Il est remarquable pour sa résistance à l'oxydation et sa faible densité.

En fait, il est très oxydable mais à l'air, il se forme une couche de quelques micromètres d'alumine, un oxyde imperméable de formule Al_2O_3 qui protège le reste du métal et se reforme très rapidement. On parle alors d'une protection cinétique contrairement à la protection thermodynamique car l'aluminium reste très oxydable.

Il est principalement extrait d'un minerai appelé bauxite où il est présent sous forme d'oxyde hydraté dont on extrait l'alumine. Il pourrait également être extrait d'autres minéraux : néphéline, leucite, sillimanite, andalousite, muscovite.

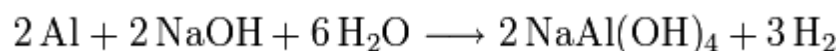
L'aluminium est employé dans beaucoup d'industries pour faire de nombreux produits différents et il est très important pour l'économie mondiale. La Chine est un important pays producteur, devant l'Amérique du Nord (États-Unis et Canada).

Les composants structuraux faits à partir d'aluminium sont essentiels à l'industrie aérospatiale et très importante dans d'autres secteurs du transport et de la construction où sa faible densité, sa longévité et sa résistance sont nécessaires.

II.8.2 Propriété chimique de l'aluminium

En solution, l'aluminium se trouve le plus généralement sous la forme d'ions Al^{3+} . Il s'oxyde lentement à froid et rapidement à chaud pour former l'alumine Al_2O_3 . L'action des acides sur l'aluminium produit l'ion cité plus haut.

La réaction de Al avec NaOH produit de l'aluminate hydraté de sodium $\text{NaAl}(\text{OH})_4$ et du gaz dihydrogène H_2 , selon l'équation :



Les hydroxydes d'aluminium s'obtiennent en général en précipitant une solution contenant des cations Al^{3+} à l'aide d'une base. Cette méthode permet de former selon les conditions de

précipitation différentes phases cristallographiques tel que la bayerite, la boehmite, la gibbsite.

L'aluminium est aussi utilisé en tant que réducteur fort, notamment en pyrotechnie. Par exemple pour l'Aluminothermie, ou pour les feux d'artifices, où il joue un rôle similaire au magnésium, à moindre coût et avec une puissance plus grande.

II.8.3 Propriétés mécaniques de l'aluminium pur :

L'aluminium pur possède :

- Une structure cristallin cubique à face centré CFC paramètre de maille : 0.405 nm à 298k.
- Masse volumique a 25°C : 2698.7kg /m³.
- Point de fusion : 660°C.
- Coefficient de dilatation moyen entre 20 et 300°C : 2.55.10⁻⁵/°C.
- Retrait volumique : 5.6 en cours de solidification.
- Capacité thermique massique à 20°C : C =950 J.kg⁻¹.k⁻¹.
- Conductivité thermique à 20°C : $\lambda = 217.6 \text{ W.m}^{-1}.\text{k}^{-1}$.
- Résistivité électrique à 20°C : $\rho = 2.63 \mu\Omega.\text{cm}$.

Tableau II. 3: Propriétés mécaniques de l'aluminium pur à la température ambiante.

Module d'élasticité (MPa)	Charge de rupture (MPa)	Limite d'élasticité 0.2%(MPa)	A (%)
68000	80 à 100	30 à 40	25 à 30

II.8.4 Avantage de l'aluminium :

- **100% recyclage :**

L'aluminium est recyclable à 100% sans perte de qualité.

- **Résistant à la corrosion et durable :**

L'aluminium génère naturellement une couche d'oxyde protectrice, qui le rend très résistant à la corrosion. Différents types de traitements de surface comme l'anodisation, la peinture et le revêtement par pulvérisation, grenaillage peuvent encore améliorer cette propriété. Il est particulièrement utile dans les applications où la protection et la conservation sont des critères clés.

- **Excellentes ductilité et malléabilité :**

L'aluminium est un matériau très malléable qui présente un point de fusion peu

Élevé ainsi qu'une faible densité. Il peut être manipulé et traité à l'état fondu ou à froid. Grâce à leur malléabilité, l'aluminium est façonné à la forme exacte souhaitée. Il est d'un usinage facile et peut aisément être soudé, riveté et collé.

- **Excellent conducteur électrique et thermique :**

L'aluminium est un excellent conducteur de la chaleur et de l'électricité. C'est pourquoi l'aluminium le matériau le plus employé dans les lignes de transmission du courant.

II.8.5 Les alliages d'aluminium :

II.8.5.1 Classification des alliages d'aluminium :

L'aluminium est capable de se ' marier ' avec grand nombre d'autres éléments donnant ainsi naissance à beaucoup d'alliages différents ayant de propriétés très larges et permettant de satisfaire un grand nombre d'applications.

Les alliages d'aluminium sont classés en sept familles selon l'élément principal d'addition. Dans chaque famille, les différents alliages ont des caractères 'génétiques' communs mais ont aussi chacun leur propre personnalité.

Tableau II.4: Classification des alliages d'aluminium.

Elément d'addition	Série	Phases principales	Classification
AL	1000	AL-Fe-Si	Sans durcissement structurale
AL-Mn	3000	AL6Mn	
AL-Mg	5000	Mg ₂ AL ₃	
AL-Mg-Si	6000	Mg ₂ Si	Avec durcissement structurale
AL-Cu	2000	AL ₂ Cu ; AL ₂ CuMg	
AL-Si-Cu	4000	Mg ₂ Si ; AL ₂ CuMg	
AL-Zn-Mg	7000	MgZn ₂	

II.8.5.2 Les critères de choix des alliages d'aluminium :

Le choix d'un alliage est une adéquation entre ses propriétés, ses aptitudes technologiques et les conditions de service. Les critères de choix les plus fréquents sont :

- ✚ Les caractéristiques mécaniques.
- ✚ L'aptitude à la déformation.
- ✚ L'aptitude à l'usinage.
- ✚ L'aptitude au soudage.
- ✚ L'aptitude à l'anodisation.
- ✚ La tenue à la corrosion.

II.8.5.3 La série 5000 (AL – Mg) :

L'élément d'alliage est le magnésium (jusqu'à 5%). Ce sont des alliages par écrouissage.

Ces alliages ont des caractéristiques mécaniques moyennes qui augmentent avec le taux de magnésium, Ces caractéristiques augmenteront également avec le taux d'écrouissage, Ils ont :

- Une bonne aptitude à la déformation. Cette dernière diminue si le taux de magnésium augmente.
- Un excellent comportement à la soudure et à ce titre sont utilisés en chaudronnerie soudure.
- Un bon comportement aux basses températures.

- Un bon comportement à la corrosion qui justifie leur utilisation dans les applications marines. Cependant une exposition à la température (à partir de 65°C) peut générer des problèmes de corrosion extrêmement importants. Ce phénomène augmentant avec le taux de magnésium.
- Également utilisés pour certaines applications de décoration grâce à un bon comportement aux traitements de surface (anodisation, brillantage).
- Utilisés dans la construction navale, le transport, l'industrie chimique.

II.8.5.4 Avantages d'usage de l'alliage 5083 dans la série 5000 :

Ce sont généralement les alliages 5083 et 5086 qui sont les plus utilisés pour les bordés des navires parce qu'ils offrent non seulement une excellente résistance à la corrosion et une très bonne résistance mécanique après soudage mais aussi une facilité accrue pour la mise en forme.

L'alliage 5083, quant à lui, est principalement utilisé pour les superstructures en raison de son coût et leur disponibilité. En comparant les propriétés mécaniques dans les zones soudées, il est observé que l'alliage 5083 possède des propriétés mécaniques supérieures de 33% par rapport à l'alliage 5052 et de 44% par rapport à l'alliage 5086. Ainsi, en raison de ces propriétés mécaniques plus hautes dans les zones soudées, l'alliage 5083 doit être réservé que pour les applications où la structure est fortement sollicitée.

L'alliage 5083 permet d'obtenir des réductions additionnelles en poids allant jusqu'à 10% par rapport à l'utilisation d'un alliage plus conventionnel 5052.

A- Composition chimique de l'alliage 5083 :

Les concentrations sont en pourcentage massique.

Tableau II.5: Composition chimique de l'alliage 5083.

Alliage		Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Ti	Autres chaque	Autres total	AL
5083	Min	/	/	/	0.20	4.00	0.05	/	/	/	/	/	Le reste
	max	0.4	0.50	0.10	0.70	5.00	0.25	/	0.25	0.15	0.05	0.15	

B- Caractéristiques de 5083 :

Tableau II.6: Caractéristique de l'alliage 5083.

Caractéristiques physiques	
Masse volumique (g /cm ³)	2.66
Intervalle de fusion	585-642
Coefficient de dilatation linéique (0 à 100°C)	23.9
Module d'élasticité (MPa)	71000
Coefficient de poisson	0.33
Conductivité thermique (0 à 100°C) (W/M°C)	Etat 0 : 126
Résistivité à 20°C (μΩcm)	Etat 0 : 5.6
Capacité thermique massique (0 à 100°C) (J/kg°C)	945
Limite élastique RP0.2 (MPa)	190
Limite à la rupture Rm (MPa)	275-340
Allongement (%)	11

II.9 Le Calorifuge — Isolation Thermique Industrielle

II.9.1 Le calorifuge

Certains équipements dans l'industrie des hydrocarbures, sont recouvert d'un isolant thermique selon les besoins.

Mais cette couverture peut provoquer des défaillances lors de présence de corrosion sous l'isolant, qui est difficile à trouver par ce que la couverture de l'isolant masque le problème jusqu'à ce qu'il soit trop tard.

L'American petroleum Institute code, **API** identifié la corrosion sous calorifuge comme une préoccupation particulière.

- **Corrosion sous calorifuge :** Corrosion sous isolation est causée par la pénétration d'eau ou l'humidité dans l'isolant, qui retient l'eau comme une éponge en contact avec la surface métallique et accélère la corrosion.

II.9.2 Définition :

Le calorifuge est une protection de matière isolante qui empêche déperdition de chaleur, il doit être la méthode la plus simple, la plus acceptée et la plus rentable d'économiser l'énergie.

Un calorifuge est un corps peu conducteur de la chaleur, c'est-à-dire ayant Un coefficient de conductibilité λ faible.

On recouvre les corps bon conducteurs de chaleur (métaux en générale) à l'aide de calorifuge afin de diminuer les pertes thermiques.

II.9.3 Fonctions générales du calorifugeage :

Les fonctions les plus importantes du calorifugeage au sein d'une industrielle sont les suivantes :

- La conservation de l'énergie, soit sous forme d'énergie thermique économisée, soit sous forme de l'énergie nécessaire à la réfrigération.
- Le contrôle des températures de procéder dans les colonnes, réacteurs, etc.
- Le contrôle de la condensation de la vapeur d'eau sur les récipients, les équipements froids et les tuyauteries. Ceci est nécessaire non seulement pour conserver la rentabilité du calorifugeage mais aussi pour empêcher l'oxydation ou la corrosion excessive des tuyauteries et équipements.
- La protection des tuyauteries et récipients contre les incendies.
- Le maintien des températures de surface à un niveau inférieur au point d'inflammation des produits fabriqués.
- La protection et la conservation du produit durant la fabrication, le transport et le stockage.
- Le contrôle des températures de surface de manière à protéger le personnel contrôle les brûlures.

A) Choix des isolations :

Choisir un type d'isolant implique de considérer l'ensemble des contraintes auxquelles il sera soumis afin d'assurer son efficacité dans le temps. On doit prendre en compte :

- Le premier critère étant évidemment la température de support,
- Les efforts mécaniques que l'isolant devra supporter,

- Les éventuelles agressions chimiques ou climatiques ou son comportement en cas d'incendie.

B) Classification des isolants :

On distingue deux types de l'isolant :

- Les isolations « froid » pour lesquelles la température est inférieure à la température ambiante.
- Les isolations « chaud » pour lesquelles la température est supérieure à la température ambiante.

C) Isolations « froides » :

- Les isolants les plus fréquemment employés sont les isolants à structure cellulaire.
- Il existe également les isolants à structure fibreuse poudreuse ou et les super isolants.

D) Isolants à structure cellulaire ils sont d'origine :

- Végétale comme le liège,
- Minérale comme le verre cellulaire,
- Synthétique comme les mousses de polystyrène, de polychlorure de vinyle et de polyuréthane.

E) Isolants à structure poudreuse :

- Les poudres de perlites de qualité cryogénique s'emploient uniquement en vrac et sous double enveloppe parfaitement étanche. Très sensibles à la vapeur d'eau, elles sont protégées de l'humidité de l'air atmosphérique par la Présence d'un gaz neutre sous pression à l'intérieur de l'enceinte délimitée par la double enveloppe.

F) Isolants à structure fibreuse :

De tels isolants sont utilisés essentiellement en isolation froid sous double enveloppe (boîte froide par exemple).

Lorsque ces isolants sont utilisés sur des tuyauteries, gaines ou appareils, le renforcement indispensable du pare-vapeur et les risques résultant d'une éventuelle rupture de sa continuité sont impérativement à prendre en compte.

G) Super isolant

Ils ont pour principe le pouvoir réfléchissant de membranes successives allié à la suppression de la convection par le vide.

Couches réfléchissantes sont constituées par des feuilles d'aluminium ou de polyesters métallisés, elles sont entretoisées par des fibres très fines, et toutes enfermées dans une enceinte étanche.

H) Isolation « chaude » :

Le domaine de l'isolation chaude ne dépasse pas 600°C ; tout fois cette limite peut être considérablement relevée et atteindre des températures de l'ordre de 1200 à 1300 °C qui, normalement, sont du domaine de la fumisterie (fours, chaudières). D'après leur constitution physique, ils se divisent en deux grandes catégories :

- ✓ **Les isolants solides** : Type silicate de calcium
- ✓ **Les isolants fibreux** : fibres de verre, fibres de silice pure (céramique).

Tableau II.7: Caractéristique principales des différentes familles d'isolants

Isolant	Température d'emploi (0°)	Masse volumique (Kg/m³)	Résistance en compression (KPa)	Conductivité à 0°C (W/m .K)
----------------	--------------------------------------	---	--	--

II.10 Mise en Œuvre de l'Isolant :

Pour être efficace, un isolant doit être correctement mis en œuvre.

Si on veut que l'efficacité thermique de l'isolation soit en rapport avec les résultats attendus, il est indispensable de respecter les normes spécifiques actuellement en vigueur :

N F P 52-306 1 et 2 (DTU 65-20)

Isolation thermique des circuits et appareils dont la température de service est supérieure à la température ambiante.

NF P 75-411 1 et 2 (DTU 67. 1)

Isolation thermique des circuits frigorifiques.

II.11 Exigence générale :

- ✓ Les matériaux de calorifugeage seront tenus à sec. En cas où les matériaux ont été mouillés après mise en œuvre, ils seront remplacés avant la pose du chemisage métallique.
- ✓ Préalablement à la pose du calorifugeage, les surfaces seront nettoyées de toutes traces d'huiles, graisse, poussières, rouilles prononcées.
- ✓ Le calorifugeage ne masquera pas les plaques signalétiques et sera imperméabilisé avec le produit d'étanchéité.
- ✓ Le calorifugeage sera interrompu de part et d'autre des raccordements à brides à une distance suffisante pour permettre de déposer les boulons sans endommager le calorifugeage.
- ✓ Le calorifugeage des vannes, brides et raccords aura la même épaisseur que celle de la canalisation.
- ✓ Le calorifugeage appliqué sera protégé par les matériaux de chemisage définitif, au plus tard dans les 24 heures.

II.12 Calorifugeage à froid :

Les présentes spécifications du calorifugeage à froid définissent les exigences minimales de mise en place des matériaux de calorifuge permettant d'empêcher les phénomènes de condensation sur les tuyauteries et équipements industriels

(Échangeurs, réservoirs et pompes) opérant à des températures de moins de 21°C.

II.13 Matériaux de calorifugeage :

- **Polyuréthane** : panneaux et coquilles de polyuréthane utilisé comme matériau principal pour l'isolation thermique à froid au niveau des tuyauteries, coudes, té, réducteurs, brides, robinets, échangeurs et divers instruments.
-

Tableau II.8: Spécifications techniques de la mousse de polyuréthane

Spécifications techniques
Mousse de polyuréthane conforme à ASTM C591 TYPE 2 grade 2
température d'utilisation : jusqu'à -60 °C
Masse volumique : de 35 jusqu'à 300 Kg/m ³
Incombustible, non hydrophile
Coefficient de conductivité thermique : 0.020 kcal/hm°C

- **Laine de verre** : rouleaux de laine de verre employés pour le calorifugeage des formes irrégulières et les différents instruments.

Tableau II.9: Caractéristiques techniques de la laine de verre

Caractéristiques techniques
Résistance à haute température : jusqu'à 125 °C
Masse volumique : 32 Kg/m ³
Réaction au feu : produit classé MO
incombustible, non hydrophile
chimiquement inerte
Conductivité thermique : 0.033 à 0.041 W/Mk

II.14 Matériaux étanchéité :

- **Agent d'étanchéité** : du type Benjamin Foster 30-45 « foamseal » ou équivalent.

Tableau II.10: Spécifications techniques de l'agent d'étanchéité (Benjamin Foster 30-45)

Spécifications techniques	Normes
Forme : visqueuse	-
Couleur : vert	-
Odeur : caractéristique	-
Point d'inflammation : 163°C	Mesuré selon DIN 53 213
Produit ininflammable	-
Densité à 20°C : 1.45g/cm ³	Mesuré selon DIN 51 757

- **Film pare vapeur** : du type Benjamin Foster 30-60 « fire résistive mastic » ou équivalent

Tableau II.11: Spécifications techniques du film pare-vapeur (Benjamin Foster 30-60)

Spécifications techniques	Normes
Forme : pâteuse	-
Couleur : gris	-
Odeur : caractéristique	-
Point de fusion : 101 °C	Mesuré selon DIN 53 213

Chapitre II Etudes des matériaux et des équipements impliqués dans la corrosion sous calorifuge

Produit ininflammable	-
Densité à 20°C : 1.73g/cm ³	Mesuré selon DIN 51 757

II.15 Matériaux de chemisage :

- Feuille d'Aluminium

Tableau II.12: Spécifications techniques de la feuille d'aluminium de chemisage

Spécifications techniques	Normes
Feuille d'aluminium d'épaisseur de : 0.5mm à 1mm	Alliage 3003 H14 ASTM B209
Température d'utilisation : de -70° C jusqu'à 150 °C	-
Masse volumique : 140 Kg/m ³	Selon ASTM D1 822
Allongement à la rupture	140% selon ASTM D822-67
Perméabilité à la vapeur	0.000 selon ASTM D2434-66

Accessoires de fixation

Tableau II.13: Matériaux et accessoires de fixation du calorifugeage

Matériaux
fil en acier galvanisée SWG N°18 (ASTM A112-66)
Feuillards en acier galvanisé conforme à ASTM A525 (épaisseur =0.4, largeur=13 1313mm)
Feuillards en acier galvanisé conforme à ASTM A525, (épaisseur=0.5mm, largeur=19 19mm)
Feuillards en acier inoxydable conforme à ASTM A525, (épaisseur=0.4mm largeur=13
Feuillards en acier inoxydable conforme à ASTM A167-TYPE304, (épaisseur=0.5mm, largeur= 19mm)
Treillis en acier galvanisé SWG N°22*16mm conforme à ASTM A112

II.16 Mise en place du calorifugeage à froid :

- Équipement :

Le calorifugeage des équipements tel que les échangeurs, récipients et pompes sera en segments courbés en mousse de polyuréthane découpés selon la forme et la taille de l'équipement à calorifuger.

Le calorifugeage des calottes des échangeurs de grand diamètre sera soit bombé, soit plat.

Le calorifugeage des calottes des échangeurs de petit diamètre aura la forme d'un disque. Les vides subsistant à l'articulation de la calotte seront comblés de laine de verre foisonnante. Dans le cas d'assemblage multicouches, seuls les joints circonférentiels de la première couche seront

Étanchéifiés. Les joints longitudinaux et circonférentiels des autres couches seront tous étanchéifiés.

Le calorifugeage sera fermement maintenu avec des bandes en acier inoxydable. Dans le cas des calottes d'échangeur ces bandes seront disposées radialement à

Une certaine distance de la virole flottante, avec un écartement maximum de 300mm. Un joint de retrait sera prévu en dessous de chaque patte de soutien du calorifugeage avec en dessous de la patte un espace de 25mm rempli de laine de verre foisonnante comprimé. Deux couches de mastic parent vapeur de pas moins de

6 Kg/m², seront appliqués sur la totalité de l'isolant Un treillis de fibre de verre sera noyé dans la première couche du mastic et servant d'armature pour ce dernier.

Le chevauchement aux extrémités des treillis sera d'au moins 50mm.

Le calorifugeage sera revêtu d'un chemisage métallique avec des joints à recouvrement d'au moins 50mm.

Les joints longitudinaux seront à bords roulés.

Les recouvrements des joints circonférentiels entre tôle adjacentes seront à bord roulés et seront maintenus avec des bandes en acier.

- **Échangeurs et récipients**

Le matériau de l'isolation des échangeurs sera les panneaux en mousse de polyuréthane.

Les panneaux seront serrés bout à bout et les joints seront étanchéifiés pour empêcher toute pénétration d'eau. Les panneaux seront fermement retenus par des bandes en acier inoxydables sur chaque intervalle de 200mm.

Dans le cas d'assemblage multicouches, les couches internes de l'isolant ne seront pas étanchéifiées.

Un enrobé d'écran pare vapeur sera appliqué intégralement sur toute la surface à calorifuger en deux couches de 6Kg/m².

Une enveloppe en tôle Aluminium sera posée sur la surface avec recouvrement d'au moins 50mm.

Les joints longitudinaux seront à bords roulés et les joints circulaires seront aussi à bords roulés et seront sellés avec des bandes d'acier inoxydables.

Pour les calottes des échangeurs et récipients, les blocs de polyuréthane seront découpés soit en segments incurves, soit en formes épousant les calottes.

Les vides au niveau des articulations de la calotte seront bourrés de laine de verres foisonnants. Dans ce cas, le calorifugeage sera maintenu par des bandes en acier

Inoxydables disposés radialement avec écartement maximum de 300mm entre les bandes par rapport au point de tangence.

II.17 Problèmes liés à l'exploitation des équipements calorifugée :

Difficultés liées à la mise en œuvre des équipements calorifugés (canalisations, bacs de stockage réfrigérés ou réchauffés, échangeurs, fours, colonnes etc. ...).

Les malfaçons lors de la préparation des équipements, puis la mise en place du matériau d'isolation et de sa gaine de protection est à l'origine de plusieurs accidents. Fuites non repérée sous le calorifuge qui peut entraîner un départ de feu (risque d'incendie notamment au contact d'un point chaud).

II.18 Les méthodes utilisées pour le contrôle de la corrosion :

Les méthodes suivantes sont applicables à la recherche de fissures de corrosion lorsque la surface de pièce est visible :

- Contrôle visuel
- Magnétoscopie
- Contrôle manuel par ultrasons
- Contrôle par radiographie conventionnelle ou numérique
- Mesure d'épaisseur ultrason.

Lorsque la surface de pièce est inaccessible (exemple : tuyauteries sous calorifuge), les méthodes suivantes sont applicables :

- Contrôle par ondes ultrasonores guidées
- Contrôle par rebonds multiples
- Contrôle par émission acoustique.

Chapitre III

Corrosion sous calorifuge : fondements,
types et lutte contre la dégradation de
l'échangeur X16C

III.1 La Corrosion sous Calorifuge (CUI)

III.1.1 Introduction et Généralités

III.1.1.1 Définition :

La corrosion peut être définie de plusieurs manières:

- Destruction ou détérioration des matériaux au contact d'un environnement agressif
- Destruction des matériaux par des moyens non mécaniques.
- Retour des métaux et alliages à leur état naturel de minerais (processus inverse de la métallurgie)

La norme **ISO 8044** (1999) définit la corrosion d'un métal comme « une interaction physico-chimique entre un métal et son environnement entraînant des modifications dans les propriétés du métal et souvent une dégradation fonctionnelle du métal lui-même, de son environnement ou du système technique constitué par les deux facteurs.

Note: Cette interaction est généralement de nature électrochimique».

Quelle que soit la définition adoptée, le résultat est le même : il conduit soit à la réparation, soit au remplacement de la structure endommagée.

La plupart des matériaux sont susceptibles de se détériorer dans certaines conditions: par exemple les plastiques gonflent sous l'effet de certains solvants, le bois pourrit, le granit s'érode, les métaux et alliages métalliques s'oxydent, passent en solution par dissolution d'atomes de leur surface ou se fissurent par sous l'effet d'une attaque combinée d'une tension mécanique et d'une dissolution localisée.

On voit donc que le terme corrosion est beaucoup plus général que celui de rouille qui est réservé exclusivement à la corrosion du fer et des aciers peu alliés, corrosion qui se traduit surtout par la formation d'oxyde ferrique.

III.1.1.2 Le comportement électrochimique de l'aluminium :

Le comportement électrochimique de l'aluminium est influencé par le film d'oxyde naturel qui régit la tenue à la corrosion de l'aluminium.

Le potentiel qu'on mesure sur l'aluminium n'est pas celui du métal, mais un potentiel mixte entre le film d'oxyde et le métal. Il n'est pas possible de mesurer celui du métal du fait que le film d'oxyde se reforme instantanément en milieu oxydant, dont l'eau, en une fraction de seconde.

Le potentiel de piqûres n'a pas le même sens de prévision sur l'aluminium qu'il peut avoir sur l'acier.

Sur l'acier, la piqûre est contrôlée par l'étape d'amorçage (détectée par le potentiel de piqûres) et sa propagation est rapide. Sur l'aluminium, il y a toujours amorçage de très nombreuses piqûres superficielles et microscopiques autour des intermétalliques dont le potentiel est cathodique par rapport à la matrice. La propagation des piqûres n'est pas prévisible par une mesure de potentiel.

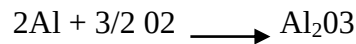
Quand on mesure une vitesse instantanée de corrosion, on la considère comme résultant d'une corrosion uniforme. Sur l'Aluminium la corrosion se propage sous forme de piqûres dans les milieux proches de la neutralité. La mesure d'un courant de corrosion donne des indications sur la vitesse globale de corrosion mais il ne renseigne pas sur ses aspects morphologiques : diamètre, densité, localisation des piqûres.

III.1.2 L'aluminium, métal passif :

L'aluminium est un métal naturellement passif et n'a donc pas à être passivé comme on le fait pour certains métaux, l'acier par exemple est un métal passivable a subi un traitement chimique ou contient un élément d'alliage qui le rend passif vis-à-vis du milieu. Il peut être dépassivé ou ne pas avoir été passivé. Ce n'est pas le cas de l'aluminium, qui est naturellement toujours recouvert de son film d'oxyde naturel.

Le potentiel de dissolution de l'aluminium dans la plupart des milieux aqueux est de l'ordre de -500 mV par rapport à l'électrode à hydrogène alors que son potentiel standard (par rapporte cette même électrode) est de -1660 mV. Un tel niveau de potentiel, aussi électronégatif, le place parmi les métaux les plus oxydables. En fait, l'expérience montre que c'est un métal très stable, en particulier dans les milieux oxydants (air, eau. etc.).

Ce comportement est dû au fait que, comme tous les métaux passifs, l'aluminium est recouvert d'un film d'oxyde naturel continu et uniforme, de formule chimique Al_2O_3 , qui se forme spontanément en milieu oxydant suivant la réaction :



L'énergie libre de cette réaction d'oxydation est : -1 675 kJ, est l'une des plus élevées, qui soit, ce qui explique la très grande réactivité de l'aluminium vis-à-vis de l'oxygène.

III.1.3 Le rôle de film d'oxyde :

La très bonne tenue à la corrosion de l'aluminium et de ses alliages est due à la présence permanente sur le métal d'un film continu d'oxyde d'aluminium, appelé «alumine» qui le rend passif à l'environnement. Ce film se forme dès que le métal est mis au contact d'un milieu oxydant : l'oxygène, l'air, l'eau. Il se reforme instantanément au contact de l'air lors des opérations de mise en forme : pliage, découpage, perçage et même lors du soudage lors de la solidification du cordon de soudure.

Son épaisseur est comprise entre 5 et 10 nanomètres. Sa stabilité physico-chimique dépend en particulier des caractéristiques du milieu.

La vitesse de dissolution du film d'oxyde dépend du pH du milieu corrosif. Elle est très forte en milieu acide et alcalin, elle est faible dans les milieux proches de la neutralité de pH = 5 à 9 (eaux naturelles pH = 7, eau de mer pH = 8), le film est donc particulièrement résistant dans ces milieux.

Le pH n'est pas le seul critère à prendre en compte pour prévoir la tenue à la corrosion des alliages d'aluminium, il faut aussi tenir compte de la nature de l'acide de base et des sels dissous.

Les acides chlorhydriques et sulfuriques attaquent fortement l'aluminium et ses alliages. La vitesse d'attaque augmente avec la concentration. L'acide nitrique concentré n'a pas d'actions sur les alliages d'aluminium, d'ailleurs par sa fonction oxydante, il contribue à renforcer légèrement la couche d'oxyde naturel. Il est utilisé en concentration supérieure à 50% pour le décapage des dérivés de l'aluminium.

La soude caustique et la potasse même à faible concentration attaquent l'aluminium. Il faut noter qu'à pH identique, les solutions d'ammoniac n'ont qu'une action modérée.

De tout cela, il résulte que le choix et la formulation des produits de nettoyage et d'entretien doivent être spécifiques aux alliages d'aluminium.

III.1.4 Diagrammes d'équilibre électrochimique de Pourbaix :

L'idée de Pourbaix a été d'inventorier toutes les réactions chimiques et électrochimiques pouvant se produire entre un métal et l'eau, et de définir les domaines de stabilité des espèces chimiques, en fonction du pH pour les réactions chimiques et du potentiel pour les réactions électrochimiques. Pour cela, il a utilisé les relations thermodynamiques : loi de Nernst, produits de solubilité, etc. Il a tracé les diagrammes de E-pH dans lesquels sont représentés trois types d'équilibres :

- Entre espèces solides,
- Entre deux espèces en solution,
- Entre une espèce solide et une espèce en solution.

Les diagrammes de Pourbaix sont constitués de plusieurs domaines de trois états possibles :

- Corrosion, s'il existe un produit de corrosion soluble. Pourbaix a fixé comme limite inférieure, la concentration de 10^{-6} M (soit 0,027 mg.l⁻¹ pour l'aluminium) à partir de laquelle on peut considérer qu'il y a corrosion du métal. Sur la plupart de ces diagrammes, les seuils supérieurs de concentration : 10^{-5} , 10^{-4} , 10^{-3} , sont aussi indiqués ;
- Passivation, si le métal peut se recouvrir d'un oxyde ou hydroxyde insoluble ;
- Immunité, si la concentration des ions M est $< 10^{-6}$ M.

Le diagramme E-pH de l'aluminium (**fig. III-1**) illustre bien la propriété amphotère du métal : il est attaqué en milieu acide et en milieu alcalin.

Il faut noter qu'il s'agit de diagrammes d'équilibre qui permettent de, déterminer les espèces stables, leur domaine de stabilité et le sens des réactions possibles. Ils ne permettent pas de prévoir la vitesse de corrosion éventuelle.

La portée de ces diagrammes est restreinte par le fait qu'ils sont tracés dans un liquide « idéal » l'eau chimiquement pure, à 25 °C, pour un métal aussi pur que possible, jamais pour un alliage. Ils ne tiennent pas compte de la présence éventuelle de chlorures dont le rôle est important dans la corrosion par piqûres, ni de la nature de l'acide et de la base qui modifie le pH. Ils n'indiquent pas les risques de corrosion « cathodique » dans les domaines d'immunité quand le potentiel est très électronégatif. Cela tient à la méthode qui est basée sur des données thermodynamiques et non sur des données cinétiques.

Compte tenu de ces remarques, il a paru intéressant de tracer le diagramme E-pH d'un alliage de l'aluminium, le 5086, dans l'eau de mer (ou plus précisément dans une solution à 30 g.l^{-1} de NaCl dont on fait varier le pH.

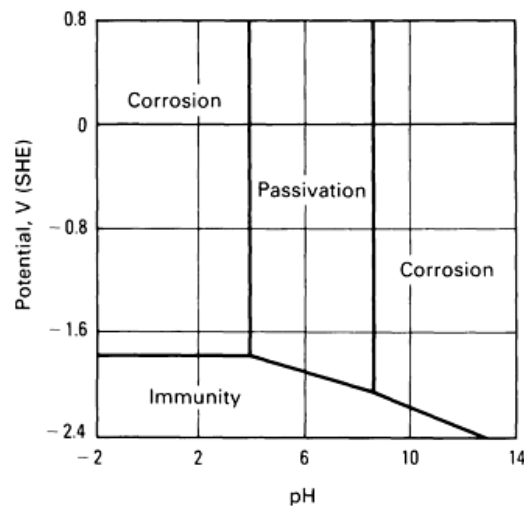


Figure. III.1 : Diagramme de Pourbaix E- pH de l'aluminium.

III.1.5 Différents types de corrosion de l'aluminium :

➤ Corrosion uniforme :

Cette corrosion se développe dans les milieux de pH acides ou très alcalins. Elle se traduit par une diminution régulière et uniforme de l'épaisseur sur toute la surface du métal. La vitesse de dissolution peut varier de quelques microns par an, dans un milieu non agressif, à plusieurs microns par heure selon la nature de l'acide ou de l'hydroxyde en solution.

Exemple : alliage 1050 H24 immergé dans l'eau de mer, corrosion de 1 micron par an.



➤ Corrosion par piqûre :

L'aluminium est sensible à la corrosion par piqûres, elle se développe sur des sites où le film d'oxyde naturel présente des défauts qui peuvent être dus aux procédés de mise en forme ou aux éléments d'addition.

C'est dans les milieux aqueux, dont le pH est voisin de la neutralité (eaux de distribution, eau de mer). Le mécanisme de la propagation des piqûres est de nature électrochimique.

Elle se traduit par la formation de cavités dans le métal, généralement recouvertes de pustules blanches d'alumine hydratée gélatineuse très volumineuses.

Il est important de connaître la vitesse d'approfondissement des piqûres, dès qu'elles sont initiées. L'alumine hydratée est insoluble, une fois formée, elle reste accrochée sur le métal. La vitesse de corrosion par piqûres décroît rapidement dans la plupart des milieux.

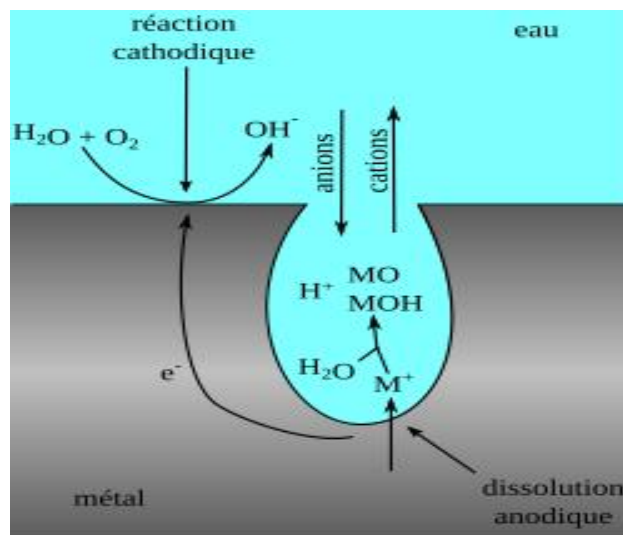
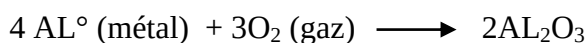


Figure. III.2 : le mécanisme de la corrosion par piqûre.

III.1.6 Le phénomène : (cas de l'aluminium)

L'aluminium est naturellement recouvert d'une couche de protection, ou couche de passivation. Il s'agit d'une couche d'oxyde formée suivant la réaction :

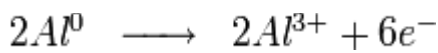


La très forte réactivité de l'aluminium est due à une valeur élevée de l'énergie libre (-1675 kJ).

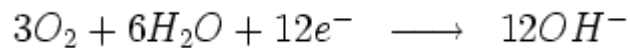
La piquûration est provoquée par la rupture du film d'oxyde dans un milieu contenant par exemple des ions chlorure (Cl^-). La piquûration est influencée par le milieu dans lequel se trouve l'aluminium : acide, nourriture.

La composition de l'alliage peut également rentrer en ligne de compte. La présence de cuivre dans l'alliage peut par exemple être une cause de piquûration. Cependant, le milieu extérieur est le facteur dominant

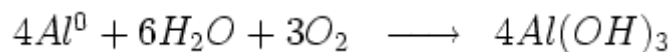
Après la rupture du film protecteur, l'aluminium nu devient une anode où se produit la réaction d'oxydation suivante :



À la cathode sur la surface du métal, nous avons les réactions suivantes :



Globalement, l'aluminium métal se dissout pour former de l'hydroxyde d'aluminium (souvent appelé par erreur alumine dans le langage courant) suivant la réaction :



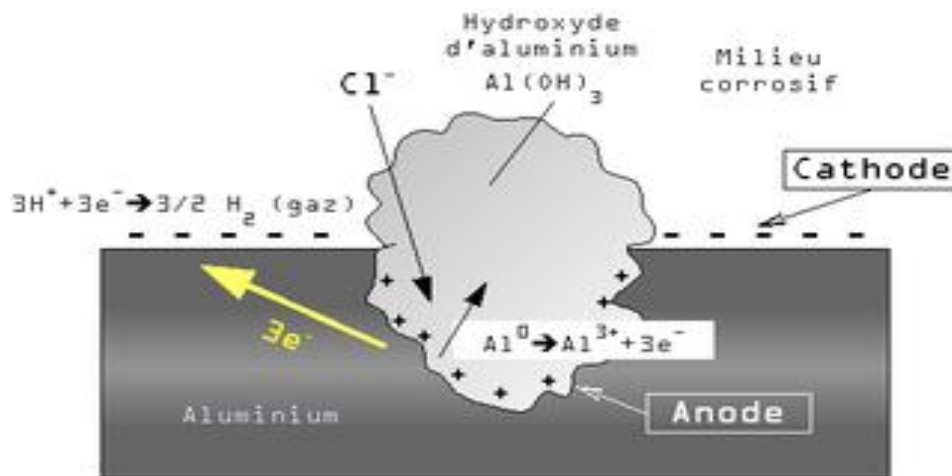


Figure .III.3. simplifié de la corrosion par piqûre d'un alliage d'aluminium suivant Vargel.



Figure. III.4. Piqûre en gros plan — la pustule d'hydroxyde d'aluminium est bien visible

III.1.7 Vitesse de propagation de la piqûre :

La profondeur de la piqûre augmente rapidement au départ, puis la vitesse d'augmentation ralentit avec le temps :

$$d = k\sqrt[3]{t}$$



d: profondeur de la piquûre

t : temps

k : constante dépendant de l'alliage et des conditions (température, nature du fluide etc.)

En effet, dans le cas d'une piquûre hémisphérique de rayon r idéale, la quantité de métal dissout pendant un temps t est :

$$C = \frac{2\pi r^3}{3t}$$

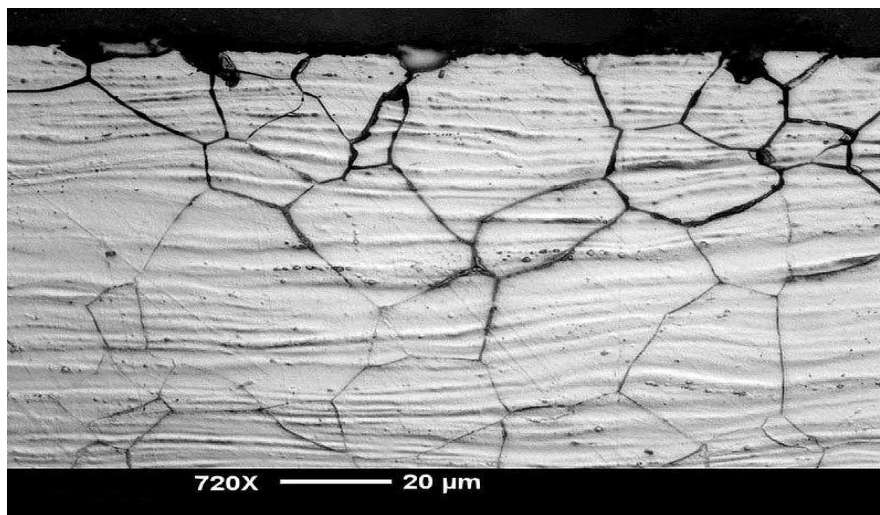
➤ **Corrosion caverneuse :**

Elle se développe dans les recoins, sous les dépôts, là où l'eau ou l'humidité, pénètre et ne se renouvelle pas. Elle progresse généralement peu. Il est toutefois conseillé ne pas laisser dans les assemblages des niches à corrosion telles que les soudures discontinues.

➤ **Corrosion trans ou inter cristalline :**

Elle peut se propager de deux manières :

- progresser dans toutes les directions : corrosion transcristalline
- emprunter un chemin préférentiel le long des joints de grains : corrosion intercristalline.



➤ **Corrosion feuillante :**

Ce type de corrosion se propage suivant une multitude de plans parallèles à la direction du laminage ou du filage. Elle se produit sur un métal très écroui. C'est un risque mineur pour les alliages 5000, il dépend des conditions de transformation.

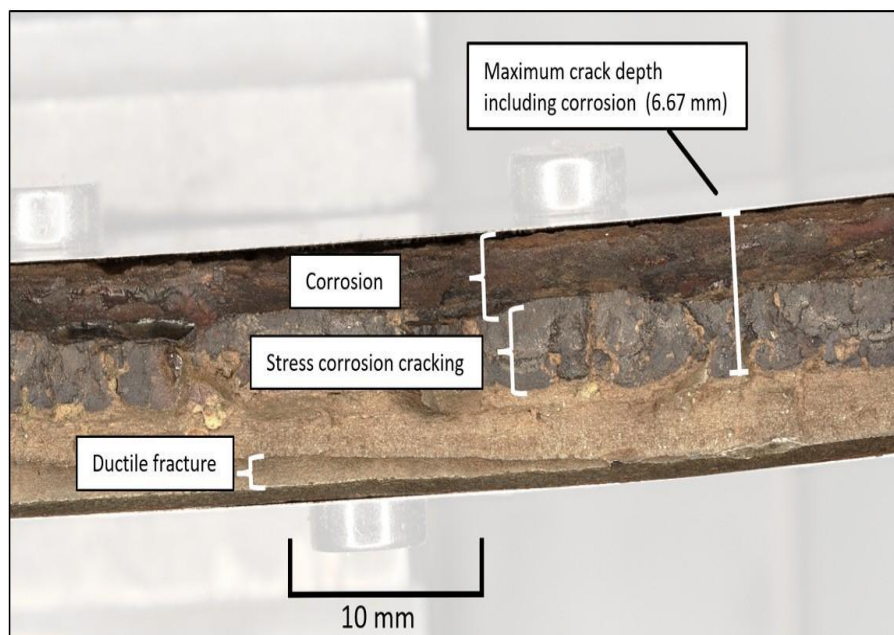
➤ **Corrosion sous contrainte :**

L'expérience montre qu'une structure peut se rompre brutalement sous l'effet conjugué d'une contrainte (flexion, traction et contrainte interne résiduelle due à la trempe) et d'un milieu corrosif (ambiance humide plus ou moins chargée de chlorures)

Les alliages à hautes caractéristiques mécaniques (2000, 7000) peuvent être sensibles à la corrosion sous contrainte.

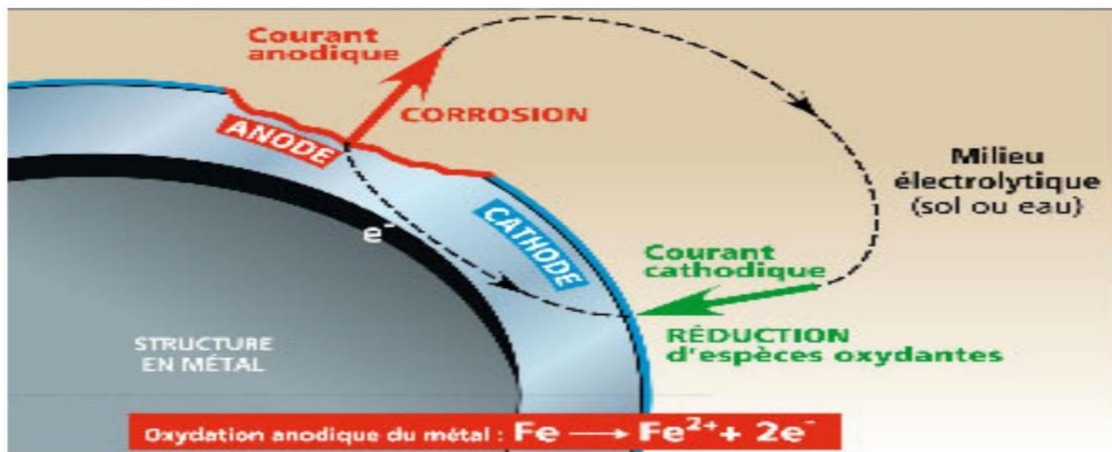
L'influence des traitements thermiques est importante, la vitesse de trempe doit être aussi élevée que possible, les états de sous revenus sont plus sensibles que les états contraires.

La résistance à la corrosion sous contrainte, pour les tôles épaisses, dépend de la direction d'application de la contrainte, elle est plus faible dans le sens travers court.



➤ Corrosion Galvanique :

L'aluminium et ses alliages sont plus électronégatifs que la plupart des métaux usuels. Ce fait a freiné pendant longtemps les applications d'assemblages hétérogènes aluminium et autre métal car



se posait la question de leur tenue en présence d'autres métaux ou alliages.

III.1.8 Principe de base :

Dès que deux métaux ou alliages de nature différente sont en contact direct ou reliés électriquement par des boulons, dans un milieu humide et conducteur, par exemple l'eau de mer ou une solution saline, l'un des métaux peut se consommer tandis que l'autre conservera son intégrité.

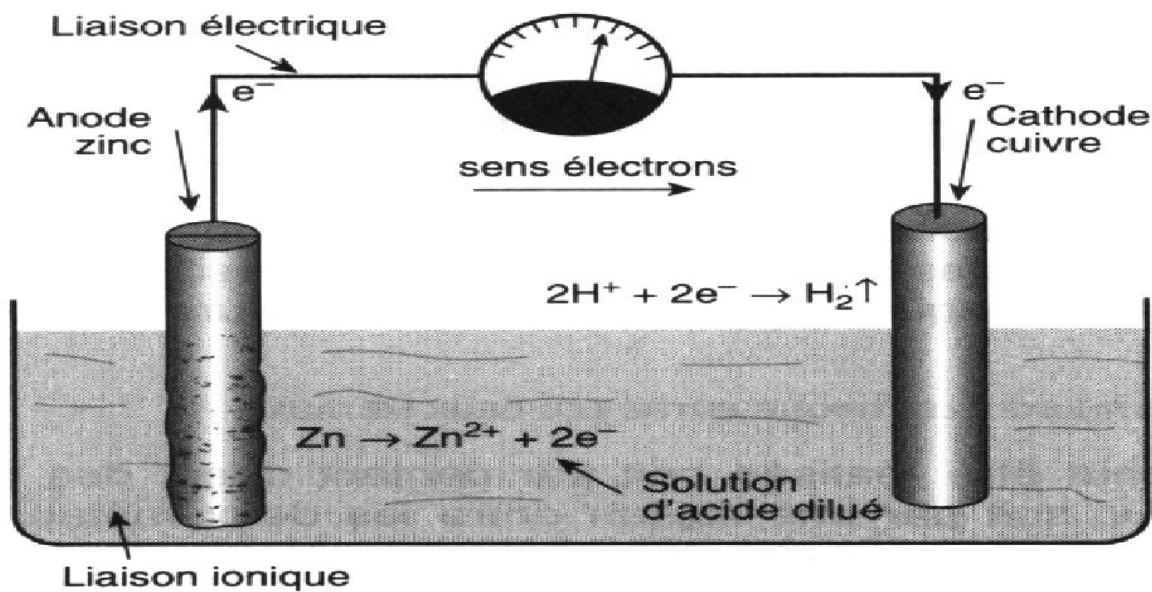


Figure. III.5. Principe d'une pile.

La cathode est le siège d'une réaction de réduction, le plus souvent celle des ions H^+ présents dans l'eau.

Pour qu'il y ait corrosion galvanique il faut :

- La présence d'un électrolyte : la zone doit être mouillée, réaction plus forte dans un milieu salin.
- Continuité électrique entre les deux métaux : donc l'un des moyens simples pour éviter cette corrosion est d'interposer un isolant :

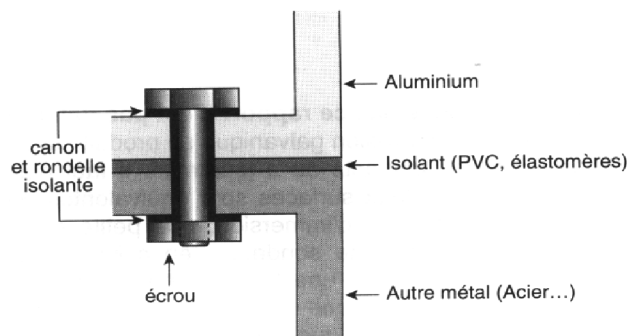


Figure. III.6 . Isolement entre l'aluminium et un autre métal

de nature différente : il dépend des potentiels de dissolution. Le tableau suivant montre le classement dans une échelle de potentiels. Il permet de prévoir lequel des deux métaux, en cas de contact, dans un milieu aqueux sera attaqué :

- celui qui est électronégatif, si l'autre est électropositif.
- celui qui est le plus électronégatif, si tous deux ont un potentiel électronégatif.

Alliage	Potentiel mV	Alliage	Potentiel mV
Graphite	+90	Acier inoxydable	-100
Titane	-150	Inconel	-170
Cupronickel 70-30	-250	Cupronickel 90-10	-280
Bronze	-360	Laiton	-360
Cuivre	-360	Plomb	-510
Acier ordinaire	-610	Fonte	-610
Cadmium	-700	Aluminium	-750
Zinc	-1130	Magnésium	-1600

III.2- Lutte contre la Corrosion :

La lutte contre la corrosion doit être une préoccupation constante, depuis la conception des équipements jusqu'à leur entretien quotidien. Si les moyens à mettre en œuvre sont variés et dépendent en grande partie des situations d'utilisation particulière, le but de recherche est le même : enrayer la dégradation des équipements pour augmenter leur durée de vie, en empêchant la production des réactions électrochimiques qui entraînent une dissolution et une attaque du métal.

En effet, on peut citer plusieurs types de protection contre la corrosion :

➤ Protection par le choix correct des matériaux.

1. Conception et tracé des assemblages :

Par exemple : éviter la formation des couples galvaniques entre les métaux différents, le cas de l'aluminium avec le cuivre.

2. Protection par Revêtement :

Un Revêtement ayant pour fonction d'isoler le métal du milieu corrosif, il doit être continu, adhérent et inerte par rapport à l'environnement.

3. Revêtement non métallique :

Les revêtements non métalliques sont soit des peintures, soit des polymères, soit des goudrons.

En ce qui concerne les peintures de l'aluminium ; les surfaces doivent être propre et sans graisse. Les surfaces très polies doivent être attaquées à l'acide phosphorique ou chromique afin d'améliorer l'adhésion de la peinture. Les apprêts " jaune zinc " sont les plus appropriés pour combattre la corrosion.

4. Revêtement métallique :

Il existe plusieurs types de protection par revêtement métallique parmi eux on a :

Le placage :

C'est une protection cathodique. Il existe une différence de potentiel suffisante d'au moins 100 mV entre certains alliages d'aluminium de corroyage pour envisager une protection cathodique de l'alliage crème par un placage en aluminium plus électronégatif.

Le zingage :

Pour protéger des formes compliquées comme des profilés, des tubes à ailettes, etc., il y a deux solutions :

- Le zingage chimique suivi d'une diffusion à chaud.
- Protection thermique ou par plasma de zinc.

5. Les inhibiteurs :

Un inhibiteur est une substance (ou une combinaison de substances) qui, ajoutée en faible concentration dans un milieu, annule ou réduit son agressivité vis-à-vis d'un métal. Le silicate de sodium est employé comme inhibiteur de l'aluminium depuis 1929. Pour l'aluminium, l'inhibition a pour but de réduire ou de supprimer la corrosion par piqûres au contact de l'eau ou des liquides aqueux, principalement dans les circuits fermés des échangeurs de chaleur. Mais il existe d'autres applications de l'inhibition, pour les bains de décapage par exemple.

III.2.1 Choix des inhibiteurs :

Il n'est pas possible de recenser tous les inhibiteurs qui ont été proposés pour protéger l'aluminium. Le lecteur pourra consulter des publications spécialisées. Les inhibiteurs les plus cités pour l'aluminium sont indiqués dans le tableau. Il faut rappeler que les inhibiteurs peuvent vieillir et que leur efficacité n'est pas toujours totale.

Tableau. III.1. les Inhibiteurs pour l'aluminium.

Milieu	Inhibiteur
Acétate de sodium	Silicate de sodium
Acide chlorhydrique < 5%	Nicotine Thiourée Acridine
Acide phosphorique < 2%	0.5 à 1% d'acide chromique
Acide sulfurique < 5%	Chlorate, iodate ou bromate de potassium

III.2.2 Protection cathodique :

La protection cathodique consiste à placer le métal à protéger en situation de cathode. Pour cela, il faut lui associer un métal dont le potentiel de dissolution dans le milieu sera plus électro-négatif, la différence de potentiel entre les deux métaux étant d'au moins 100 mV.

A cet effet, il existe deux méthodes de protection cathodique :

- **Par anode sacrificielle** : c'est le cas du zinc qui est dissous pour protéger le métal ; cette méthode est la plus employée pour l'aluminium ;
- **Par courant imposé** : on impose un débit de courant entre l'anode (non consommable) et la cathode (le métal à protéger) de sorte que le potentiel de la cathode soit suffisamment abaissé.

Remarque : Les alliages d'aluminium des familles 5000 et 6000 présentent une

excellente résistance à la corrosion dans l'eau de mer. Il n'est donc pas nécessaire de leur appliquer une protection cathodique On ne le fait Jamais.

III .3 Partie pratique :

III.3.1 Milieu et environnement :

D'après la situation du complexe GL2/Z qui est juste au front de mer, les équipements installés sur cette zone sont en contact direct avec l'atmosphère marine qui n'est pas forcément la source des chlorures dans cette zone.

Les chlorures sont présents dans l'eau de mer, mais également dans des matériaux d'isolation contenant du PVC. Ils peuvent également être présents dans des produits de décapage, de l'eau de rinçage.

L'eau de mer est composée d'eau et de sels ; ainsi que diverses substances aux faibles quantités.

III.3.2 Étendue de l'inspection :

- **Aspect parois internes :**

L'inspection interne de l'échangeur principal à été démontré un état très propre et très sain au niveau des parois, des soudures, et des accessoires

interne.

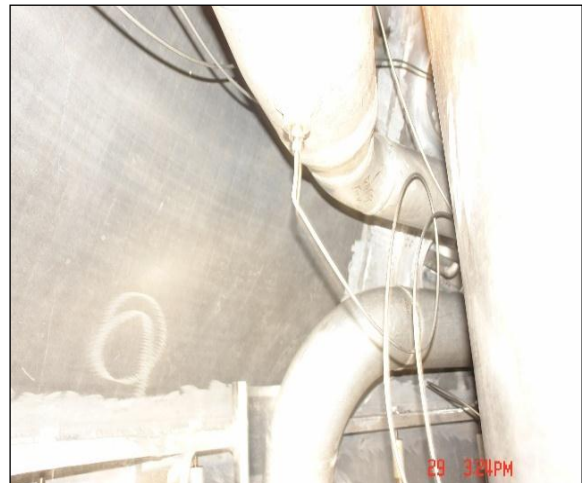


Figure. III.7: Vue représentative de la bonne condition de la surface interne de l'échangeur principal X16C

- **Aspect parois externe:**

Le nettoyage mécanique de paroi externe de l'équipement (les joints de soudure), et contrôle non destructif par ressuage ont mis en évidence :

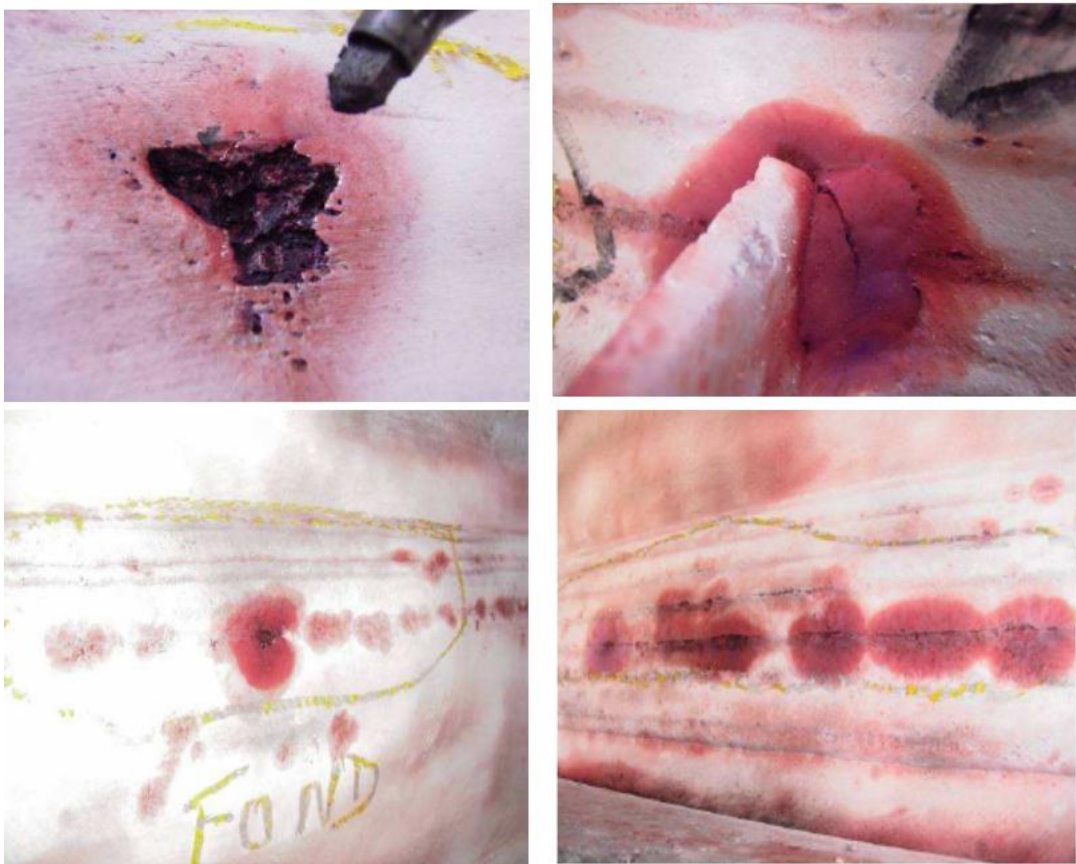


Figure.08. Corrosion par piqure aux zones soudées et rayures

Description : les quatre photos ci-dessus illustrent :

- ✓ Présence de quelques traces de corrosion (par l'extérieur) sur les soudures de la jupe, fond inférieur et entre le 1^{er} et 2^{ème} virole.

III.3.3 Étude et description du dommage :

Le dommage ou le type de perforation qui se manifeste sur ce système étant une corrosion par piqûre au fond de l'échangeur principal (partie extérieure) sujette à la corrosion sous calorifuge.

La corrosion sous calorifuge se traduit par la corrosion par oxydation due à la stagnation des eaux pluviales (ou humidité) qui peuvent pénétrer par les zones mal calorifugées (mauvaise étanchéité).

III.3.4 Interprétation et analyse :

D'après l'analyse visuelle de l'équipement on constate que :

La présence de corrosion par piqûre au niveau des cordons de soudure de la jupe, fond inférieur/virole 1 et virole 1 /virole 2 due aux présences du chlorure (Cl^-) dans l'atmosphère marine ou l'air humide.

Tableau III.2. montre les éléments minéraux de l'eau de mer.

Élément	Teneur (g/kg)
Chlorures Cl^-	19,353
Sulfates SO_4^{2-}	2,712
Bicarbonates HCO_3^-	0,142
Bromures Br^-	0,067
Sodium Na^+	10,760
Magnésium Mg^{+2}	1,294
Calcium Ca^{+2}	0,413
Potassium K^+	0,387

La présence d'eau ou condensation d'air humide ou l'air salée crée des particules d'eau, qui perforent le film passif de la partie extérieure de la paroi par attaque des chlorures qui ont le plus grand pouvoir de détériorer le film d'oxyde naturel.

L'attaque de chlorure se limite à des trous, très localisés et pouvant progresser rapidement en profondeur, alors que le reste de la surface reste indemne .Elle correspond à des attaques très locales, liées à l'existence d'hétérogénéités (inclusions) qui aboutissent à la détérioration de la couche passive et à la création des zones anodiques en certains points, la progression est d'autant plus rapide que le rapport entre la surface anodique et la surface cathodique, qui l'entourne, est faible.

La présence de Cl^- est due à la pénétration d'eau et l'air marin aux surfaces des viroles, suite au vieillissement de l'isolation (le calorifuge date de la construction du complexe).

Ce phénomène est nommé CUI (Corrosion Under Isolation).

Donc la cause majeure de ce phénomène de corrosion est due à l'endommagement du calorifuge.

On sait préalablement que les tôles laminées comportent toujours des contraintes résiduelles, Ce qui est le cas de la jupe et de la virole.

NB : La présence des défauts physiques sur les parois des équipements ou d'un couplage des métaux dissemblables a pour conséquence l'apparition des zones anodiques et cathodiques sur une même surface, qui sont les endroits d'amorce.



Figure.09

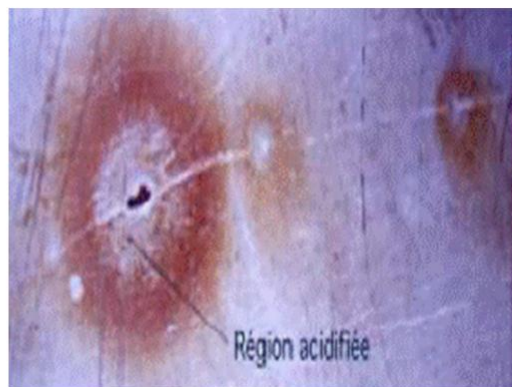


Figure.10

Figure.09et 10: Corrosion par piquêre avancée sur certains endroits (rayures et sous des dépôts).

IV- CALCULS DE CORROSION PAR PIQUE (CUI)

Echangeur Principal X16C – GL2/Z SONATRACH – Arzew

Equipement	Echangeur X16C	Materiau	Alliage Al 5083
Inspection	ISQ International – Avr./Mai 2010	Norme	API 510 / CODAP / ISO 8044
Modele	$d(t) = k * t^n$	k ; n	k = 1.4 mm/an ⁿ ; n = 0.33

CONTEXTE ET DESCRIPTION DE L'EQUIPEMENT

Description generale de l'echangeur principal X16C

Parametre	Valeur	Description
Longueur totale	42.8 m	Equipement vertical
Diametre partie inf.	4.41 m	Base de l'echangeur
Diametre partie sup.	2.35 m	Sommet de l'echangeur

Temperature de service	-171 a -65.5 °C	Cryogenique – GNL
Pression de service	49.36 bar	Pression haute
Milieu interne	Gaz naturel / GNL	Circuit GN, GNL, MCR liquide/vapeur
Materiau	Alliage Al 5083	Mg jusqu'a 5% – haute resistance corrosion
Calorifuge	Polyurethane	Vieilli depuis construction (1978)
Age a l'inspection	32 ans (1978-2010)	Inspection ISQ Avr./Mai 2010

Milieu et environnement

Le complexe GL2/Z est situe en zone cotiere (Arzew). Les equipements sont exposes en permanence a une atmosphere marine riche en chlorures (Cl⁻). La composition de l'eau de mer presente les caracteristiques suivantes :

Element	Teneur (g/kg)
Chlorures Cl⁻	19.353
Sulfates SO₄²⁻	2.712
Sodium Na⁺	10.760
Magnesium Mg²⁺	1.294

II. MODELE MATHEMATIQUE DE LA CORROSION PAR PIQUE

Loi de propagation des piqures :

D'après le Chapitre III, la profondeur d'une pique évolue selon la loi en puissance :

$$d(t) = k * t^n \quad V(t) = k*n * t^{(n-1)} \quad V_{\text{moy}} = d(t) / t$$

Parametre / Formule	Expression / Valeur	Unite	Note
Equation de propagation	$d(t) = k * t^n$	mm	Chap. III – modele puissance
Vitesse instantanee V(t)	$V(t) = k*n * t^{(n-1)}$	mm/an	Derivee de d(t)
Vitesse moyenne	$V_{\text{moy}} = d(t) / t$	mm/an	Valeur integree
Exposant n (Al milieu marin)	$n = 0.33$	—	Loi racine cubique (litterature Al)
Constante k (Al 5083, CUI marin)	$k = 1.4$	mm/an ⁿ	Ajustee aux releves mesures

d: profondeur pique (mm) | **t**: temps (ans) | **k** = 1.4 | **n** = 0.33

Evolution numerique de la profondeur

t (ans)	$d(t) = 1.4*t^{0.33}$ (mm)	$V_{\text{inst}} = k*n*t^{(n-1)}$ (mm/an)	$V_{\text{moy}} = d/t$ (mm/an)	Stade
1	1.400	0.4620	1.4000	Initial
2	1.760	0.2904	0.8800	Initial
5	2.381	0.1572	0.4762	Progression
10	2.993	0.0988	0.2993	Progression
15	3.422	0.0753	0.2281	Progression

20	3.762	0.0621	0.1881	Avance
25	4.050	0.0535	0.1620	Avance
30	4.301	0.0473	0.1434	Avance
32	4.394	0.0453	0.1373	Critique <- Inspection 2010
35	4.526	0.0427	0.1293	Critique
40	4.729	0.0390	0.1182	Critique

Modele de la pique hemispherique – Quantite de metal dissous

Pour une pique hemispherique de rayon r, le volume de metal dissous est $V = (2/3) \cdot \pi \cdot r^3$ et la masse correspondante $Dm = \rho \cdot V$ ($\rho_{Al5083} = 2.66 \text{ g/cm}^3$) :

Rayon r (mm)	Volume V (mm ³)	Masse dissoute Dm (mg)	Formule appliquee
0.5	0.262	0.697	$V = (2/3) \cdot \pi \cdot r^3$; $m = \rho \cdot V$
1.0	2.094	5.570	$V = (2/3) \cdot \pi \cdot r^3$; $m = \rho \cdot V$
1.5	7.069	18.804	$V = (2/3) \cdot \pi \cdot r^3$; $m = \rho \cdot V$
2.0	16.755	44.568	$V = (2/3) \cdot \pi \cdot r^3$; $m = \rho \cdot V$
2.5	32.725	87.049	$V = (2/3) \cdot \pi \cdot r^3$; m

			$= \rho \cdot V$
3.0	56.549	150.420	$V = (2/3) \cdot \pi \cdot r^3$; $m = \rho \cdot V$
3.5	89.797	238.860	$V = (2/3) \cdot \pi \cdot r^3$; $m = \rho \cdot V$
4.0	134.041	356.549	$V = (2/3) \cdot \pi \cdot r^3$; $m = \rho \cdot V$

III. CALCUL DE LA PERTE DE MASSE

Application de la Loi de Faraday

La perte de masse est calculée par la loi de Faraday, en utilisant le courant de corrosion i_{corr} estimé pour l'alliage Al 5083 en milieu marin ($i_{\text{corr}} = 5 \mu\text{A}/\text{cm}^2$, $S = 1200 \text{ cm}^2$) :

Formule	Expression	Resultat	Unite
Vitesse electrochimique	$V = (i \cdot M \cdot T_s) / (n \cdot F \cdot \rho \cdot 10)$	0.1471	mm/an
Perte de masse annuelle	$Dm_{\text{an}} = (i \cdot S \cdot M \cdot T_s) / (n \cdot F)$	17.65	g/an
Perte de masse totale (32 ans)	$Dm_{\text{tot}} = Dm_{\text{an}} \cdot 32$	564.81	g (= 0.5648 kg)

Evolution de la perte de masse dans le temps

t (ans)	Dm cumulee (g)	Reduction epaisseur (mm)	% epaisseur perdue	Statut
---------	----------------	--------------------------	--------------------	--------

5	88.25	2.381	11.90 %	Surveiller
10	176.50	2.993	14.96 %	Surveiller
15	264.75	3.422	17.11 %	Surveiller
20	353.00	3.762	18.81 %	Surveiller
25	441.25	4.050	20.25 %	Surveiller
30	529.51	4.301	21.51 %	Surveiller
32	564.81	4.394	21.97 %	Surveiller <- Inspection
35	617.76	4.526	22.63 %	Surveiller
40	706.01	4.729	23.64 %	Surveiller

CONTEXTE ET DESCRIPTION DE L'EQUIPEMENT

Criteres d'acceptabilite et methodes de calcul

Criteres d'acceptabilite

Critere	Valeur limite	Unite	Norme / Base	Note
Epaisseur nominale e0	20.0	mm	Specification	
Epaisseur min. admissible e_min	14.0	mm	API 510 / CODAP	70% de e0
Prof. max. pique admissible d_lim	6.0	mm	e0 - e_min	Marge corrosion
Taux de corrosion admissible max.	0.5	mm/an	Norme API 510	

Facteur de securite FS	2.0	—	Jugement ingenieur	
Prof. pique mesuree max. (2010)	4.0	mm	UT – Zone soudure	Valeur mesure
Marge residuelle disponible	2.0	mm	d_lim - d_mes = 6-4	

Calcul de la duree de vie residuelle – 3 methodes

Methode	Formule	Calcul	RLV (ans)	Unite
Methode 1 – Lineaire (V moy.)	$RLV = (d_{lim} - d_{mes}) / V_{moy}$	$RLV = 2.0 / 0.1373$	14.6	ans
Methode 2 – Modele $d(t)=k*t^n$	$t_{lim}=(d_{lim}/k)^{(1/n)}$; $RLV=t_{lim}-t_0$	$t_{lim} = 82.3$ ans	50.3	ans
Methode 3 – Avec FS = 2	$RLV_{FS} = RLV_{modele} / FS$	$RLV_{FS} = 50.3 / 2$	25.1	ans
RLV RETENU (conservateur)	min(Methode 1, Methode 3)	min(14.6, 25.1)	14.6	ans

Prevision d'approfondissement apres 2010 (depuis t = 32 ans)

Annee	Age (ans)	d(t) prevu (mm)	Marge residuelle (mm)	Decision
2010	32	4.394	1.606	Inspection renforcee (Etat 2010)

2011	33	4.439	1.561	Inspection renforcee
2012	34	4.482	1.518	Inspection renforcee
2013	35	4.526	1.474	REPARATION URGENTE
2014	36	4.568	1.432	REPARATION URGENTE
2015	37	4.609	1.391	REPARATION URGENTE
2016	38	4.650	1.350	REPARATION URGENTE
2017	39	4.690	1.310	REPARATION URGENTE
2018	40	4.729	1.271	REPARATION URGENTE
2020	42	4.806	1.194	REPARATION URGENTE

V. TABLEAU DE SUIVI D'INSPECTION (PIE)

Plan d'Inspection de l'Equipement – Toutes zones de corrosion par piqure

Zone / Composant	Methode CND	d mes. (mm)	V_cor (mm/an)	e_res (mm)	RLV (ans)	Statut	Action
Soudure Jupe / Fond inf.	UT + Ressuage	2.5	0.078	17.5	50.3	Surveiller	Inspection annuelle UT

Soudure Virole 1 / Virole 2	UT + Ressuage	3.2	0.1	16.8	25.1	Surveiller	Inspection 6 mois + meulage local
Metal base – Piquage E	Ressuage + UT	1.8	0.056	18.2	14.6	Acceptable	Surveillance annuelle
Cordon soudure (apport)	Ressuage + UT	4	0.125	16	25.1	ACTION REQUISE	Reparation soudure / revetement
Metal base Virole 2	UT	1.2	0.038	18.8	14.6	Acceptable	Surveillance annuelle
Jupe externe	Visuel + UT	0.5	0.016	19.5	14.6	Acceptable	Remplacer calorifuge en priorite

Legende : VERT = Acceptable (marge > 3 mm) | JAUNE = Surveiller (marge 1.5-3 mm) | ROUGE = Action requise (marge < 1.5 mm)

VI. TABLEAU DE SYNTHESE DES RELEVES ET CALCULS

Plan d'Inspection de l'Equipement – Toutes zones de corrosion par piqure

Zone	d mes (mm)	e_res (mm)	V_cor (mm/an)	d_lim (mm)	Marge (mm)	RLV (ans)	Indice risque
Jupe / Fond inf.	2.5	17.5	0.078	6	3.5	50.3	MOYEN
Virole 1 / Virole 2	3.2	16.8	0.1	6	2.8	25.1	ELEVE
Piquage E (base)	1.8	18.2	0.056	6	4.2	14.6	FAIBLE

Cordon soudure	4	16	0.125	6	2	25.1	CRITIQUE
Virole 2 (base)	1.2	18.8	0.038	6	4.8	14.6	FAIBLE
Jupe externe	0.5	19.5	0.016	6	5.5	14.6	FAIBLE

Statistiques globales

Statistique	Valeur	Unite	Commentaire
Profondeur pique MAXIMALE	4.0	mm	Zone cordon soudure
Profondeur pique MINIMALE	0.5	mm	Zone jupe externe
Profondeur pique MOYENNE	2.2	mm	Valeur moyenne 6 zones
Vitesse de corrosion MAX.	0.125	mm/an	Cordon soudure
Vitesse de corrosion MOY.	0.1373	mm/an	Modele global t=32 ans
RLV minimal (conservateur)	14.6	ans	Methode FS=2 – Zone critique (2010)
Annee de depassement limite	2025	—	Zone cordon soudure

VII. CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

- Type de corrosion : Corrosion par Pique sous Calorifuge (CUI – Corrosion Under Insulation)
- Mecanisme : Attaque des ions Cl^- → rupture du film d'oxyde Al_2O_3 → dissolution anodique de l'aluminium
- Zone la plus critique : Cordon de soudure ($d_{\text{max}} = 4.0$ mm mesure par UT)
- Cause principale : Vieillissement du calorifuge polyurethane → infiltration d'eau de mer + Cl^- marin

Resultats des calculs

- Vitesse de corrosion moyenne (t=32 ans) : $0.1373 \text{ mm/an} = 137.3 \text{ }\mu\text{m/an}$
- Profondeur prevue par modele a t=32 ans : 4.394 mm (mesure 4.0 mm → cohesite du modele)
- Duree de vie residuelle retenue (2010) : 14.6 ans (methode conservatrice, FS=2)
- Annee critique estimee : vers 2025 pour la zone de cordon de soudure
- Perte de masse totale sur 32 ans : $564.81 \text{ g} = 0.5648 \text{ kg}$ (loi de Faraday)



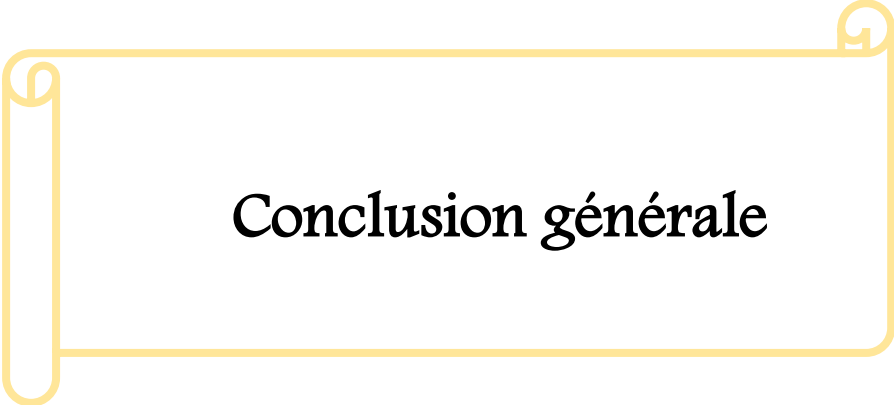
Recommandation

Recommandation

Afin d'éviter ou de minimiser la corrosion par piquûre sous calorifuge sur les alliages d'aluminium, il est conseillé de suivre les recommandations suivantes :

- ✓ Nettoyage : le choix et la formulation des produits de nettoyage et d'entretien deviennent être spécifiques aux alliages d'aluminium.
Par exemple : dans notre cas l'acide nitrique concentré n'a pas d'action sur les alliages d'aluminium, d'ailleurs par sa fonction oxydante, il contribue à renforcer l'égerment la couche d'oxyde naturel.
- ✓ Assure la propriété et l'homogénéité des surfaces (l'état de surface) : une surface lisse résiste mieux qu'une surface rugueuse toutes condition égale un bon nettoyage.
- ✓ Éviter toute rayure ou écrouissage locale (par l'opération de piquage ou bien martelage).
- ✓ Éliminer le plus possible les milieux corrosifs en particulier les chlorures, même si leur concentration est de l'ordre de un par mille, cela nécessite une installation d'un nouveau calorifuge qui empêche la pénétration des molécules corrosives (l'eau de réseau incendie, l'air marin).
- ✓ Produire un plan d'inspection de la corrosion sous calorifuge CUI sur dix 10 ans pour l'ensemble des équipements.
- ✓ Produire une liste des équipements affectés parla CUI avec leurs ordres de priorité.
- ✓ être considérée comme un élément primordial de la prévention des risques.
- ✓ La méthode d'inspection primordiale est la visuelle complémentée par des mesures des épaisseurs pour la détermination de l'état de l'échangeur en particulier aux joints de soudure qui sont des endroits d'amorce.
- ✓ Respecter les actions d'entretien avec l'eau de réseau incendie lors de l'opération de dégivrage ou bien dans les cas des incendies.
- ✓ Faire réparer le calorifuge après chaque intervention lors du changement des pièces de rechange (les trous, et les ouvertures) ou bien d'autre travail.

- ✓ Faire appliquer le calorifuge extérieur a basse température conformément aux spécifications suivantes de la société **Pullman Kellogg** P40-5J5300 "spécification d'étude du calorifuge à basse température".
- ✓ Implique d'avantage des agents de Sonatrach pour une maîtrise meilleure dans le domaine d'exploitation et de réparation de ces équipements stratégique qui nécessite aussi des formations spécifiques.
- ✓ Prévoir l'achat de tout le matériel et l'outillage de réparation manquant, afin d'éviter d'éventuels problèmes et de permettre, par-là même de réduire le temps et les coûts d'intervention sur l'équipement à réparer.
- ✓ Collecte des données et création de la base de données CUI
- ✓ Sensibilisation du personnel concernant la CUI et ses conséquences.



Conclusion générale

Conclusion générale

En pratique, les dommages liés aux équipements industriels par la **corrosion sous calorifuge** sont très importants, puisque, dans l'industrie de liquéfaction du gaz, les cas identifiés représentent environ 1 /3 des dommages liés à la corrosion.

Le but du présent mémoire consiste à étudier le phénomène de la corrosion sous calorifuge, déterminer les causes, les facteurs qui la favorisent, et en déduire ainsi les recommandations appropriées on vue d'atténuer ses conséquences.

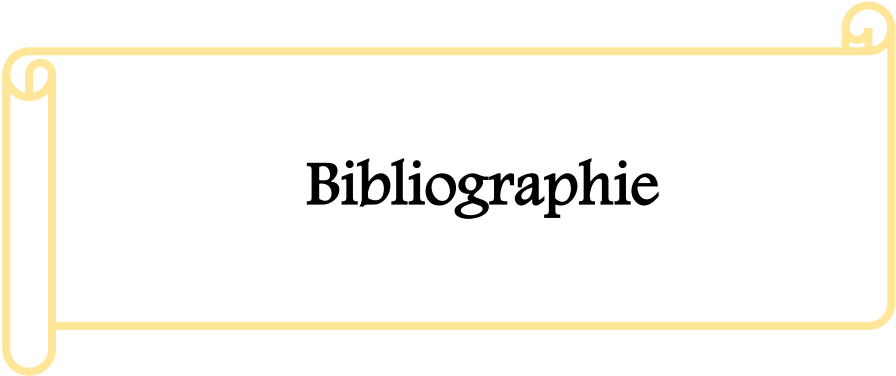
Les recherches effectuées ont démontré que l'installation du calorifuge au niveau des équipements est d'une importance majeure pour leur protection contre la corrosion ainsi que pour l'isolation thermique.

Toutefois, de par l'intérêt du calorifuge, nous avons pu rencontrer plusieurs inconvénients liés à celui-ci tels que :

- Mauvaise application du calorifuge.
- Manque de formation pour les agents chargés d'appliquer le calorifuge.
- Vieillessement du calorifuge (présence des givres).

Par ailleurs, afin de sauvegarder les équipements contre la corrosion il serait judicieux de trouver des solutions définitives par l'implication d'avantage des agents de SONATRACH contre ce phénomène pour une meilleure maîtrise dans le domaine d'exploitation et de la réparation de ces équipements stratégiques nécessitants aussi des formations spécifiques.

Ce travail nous a été très bénéfique, puisqu'il nous a permis d'apprendre beaucoup d'informations sur le X16C, les types du calorifuge utilisés, sur les procédures de maintenance, et les types d'inspection applicables (C.N.D) tel que (ressuage, ultrasons, et radiographie).



Bibliographie

Bibliographie

- [1]** : Lycée Raymond, « Aluminium et alliages d'aluminium ».
- [2]** : Technique d'ingénieur : « Aluminium et alliages d'aluminium ».
- [3]** : Formation ingénieur : « corrosion ».
- [4]** : Dr. Ahmed Hanani, « Corrosion et protection des ouvrages métalliques ».
- [5]** : Formation ingénieur : « calorifuge ».
- [6]** : stratégie d'inspection, de réparation et de maintenance en présence de la corrosion sous calorifuge » : « Shell Aval ». Document numéro DMS-1510002 RP-02.
- [7]** : « Corrosion et protection contre la corrosion en milieu industriel » : CPE (Centre de perfectionnement d'entreprise).