

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

UNIVERSITE BADJI MOKHTAR - ANNABA  
BADJI MOKHTAR – ANNABA UNIVERSITY



جامعة باجي مختار – عنابة

Faculté : Science d'ingénierat  
Département : Métallurgie et Génie des matériaux  
Domaine : science techniques  
Filière : Métallurgie  
Spécialité : Génie des surfaces métalliques

## Mémoire

Présenté en vue de l'obtention du Diplôme de Master  
Thème:

Contribution à l'étude de l'effet de la corrosion sur les  
échangeurs  
L'échangeur 10-78 A (unité TOPPING R1K)

Présenté par : *Boudjelal Mouhamed Khaireddine*

Encadrant : *Zahzouh Moussa*

Grade Professeur

*Université Annaba*

### Jury de Soutenance :

|             |            |                   |           |
|-------------|------------|-------------------|-----------|
| ZAHZOUH.M   | Professeur | Université Annaba | Président |
| ZAHZOUH.M   | Professeur | Université Annaba | Encadrant |
| BECCOUCHE.M | Professeur | Université Annaba | Examineur |
| KETTACHE.A  | Professeur | Université Annaba | Examineur |

Année Universitaire : 2019/2020

# Remerciements

*Au terme de ce travail, il m'est agréable de remercier vivement tous ceux qui, grâce à leur aide précieuse, ont permis la réalisation de cette mémoire.*

*Je voudrais en premier lieu remercier Monsieur Zahizouh Moussa , Professeur à l'Université de Badji Mokhtar Annaba, pour avoir accepté de diriger ce travail et pour son appui, ses conseils et ses orientations tout au long de ce travail. Je lui adresse mes vifs remerciements et ma reconnaissance ;*

*Mes remerciements vont aux membres de jury qui m'ont fait l'honneur de participer au jury afin d'évaluer et enrichir cette thèse.*

*Mes remerciements et ma grande gratitude s'adressent à Messieurs Lamamra Mouhamed , et les Ingénieurs de département de technique dans la R1K skikda , d'avoir m'accepter et m'aider au cours de mon stage;*

*A tous les professeurs et les cadres qui ont contribué de près ou de loin à ma formation Sans oublier ma famille, mes amis et mes collègues.*

**B. M<sup>ed</sup> KHAÏREDDINE**

# DEDICACES

*A la sainte ame de mon  
père*

*A mon mère de  
temoignage en tout  
amour*

*A toute ma famille*

*A toute mes collegues  
et amies*

## Sommaire

|                            |     |
|----------------------------|-----|
| Liste des figures.....     | I   |
| Listes des tableaux.....   | II  |
| Introduction générale..... | III |

### Chapitre I : Etat de l'art

|  |    |
|--|----|
| <b>1-généralité</b> .....  | 1  |
| <b>2-aspect économique de la corrosion</b> .....                     | 2  |
| <b>3-influence de la corrosion dans le choix d'un matériau</b> ..... | 2  |
| <b>4-types de corrosion humide et étude de cas</b> .....             | 2  |
| 4-1 la corrosion généralisée.....                                    | 2  |
| 4-1-1 Prévention.....  | 4  |
| 4-2 la corrosion galvanique.....                                     | 4  |
| 4-3 la corrosion par crevasse.....                                   | 5  |
| 4-4 la corrosion intergranulaire.....                                | 5  |
| 4-5 la corrosion sous contrainte.....                                | 6  |
| 4-5-1 Mécanisme.....   | 7  |
| 4-6 la corrosion par piqûres .....                                   | 7  |
| 4-7 la corrosion calorifuge .....                                    | 8  |
| 4-8 la corrosion-érosion.....  | 9  |
| 4-9 la corrosion bactérienne.....                                    | 9  |
| 4-9-1 bactéries sulfato-réductrices.....                             | 10 |
| 4-9-2 bactéries oxydant le soufre.....                               | 10 |
| 4-10 la corrosion par l'hydrogène.....                               | 11 |
| 4-10-a hydrogène blistering.....                                     | 11 |
| 4-10-b fragilisation par l'hydrogène.....                            | 11 |
| <b>5- types de corrosion sèche(à haute température)</b> .....        | 12 |
| 5-1 décarburation et attaque par l'hydrogène.....                    | 12 |
| 5-2 corrosion par les gaz, fumées et vapeurs d'eau.....              | 13 |
| 5-3 corrosion par le soufre a haute température.....                 | 13 |
| 5-4 corrosion par les acides naphthéniques.....                      | 14 |
| <b>6- Moyens de prévention</b> .....                                 | 15 |
| 6-1 Conception des équipements .....                                 | 15 |
| 6-1-1 Epaisseur des parois .....                                     | 15 |
| 6-1-2 Réglages de conception .....                                   | 15 |
| 6-2 Les revêtements.....   | 15 |
| 6-3 La protection anodique.....                                      | 15 |
| 6-4 La protection cathodique .....                                   | 16 |
| 6-5 Examens non destructifs.....                                     | 17 |
| 6-6 Les inhibiteurs de corrosion.....                                | 17 |
| 6-1-6-1 Définition.....  | 17 |
| 6-1-6-2 Propriétés essentielles d'un inhibiteur de corrosion.....    | 17 |
| 6-1-6-3 L'efficacité d'un inhibiteur de corrosion.....               | 18 |
| 6-1-6-4 Mécanismes et principes d'action .....                       | 18 |
| 6-1-5 Types d'inhibiteurs.....                                       | 19 |
| 6-1-5-1 Inhibiteurs organiques.....                                  | 19 |
| 6-1-5-2 Inhibiteurs minéraux.....                                    | 19 |
| 6-1-5-3 inhibiteur d'adsorption.....                                 | 20 |

### Chapitre II : les échangeurs thermiques

|  |    |
|--|----|
| <b>1-Généralites</b> .....   | 21 |
| 1-2 définition.....  | 21 |
| 1-3 L'utilisation des échangeurs.....  | 21 |
| 1-4 Ces classification.....  | 21 |
| 1-4-1 batterie chaude ou froide(serpentin) .....   | 21 |
| 1-4-2 échangeur coaxial.....   | 21 |
| 1-4-3 échangeur tubulaire.....   | 22 |
| 1-4-4 échangeur à plaques.....   | 22 |
| 1-5 Dimensionnement d'échangeur.....   | 22 |
| <b>2- Théorie des échangeurs</b> .....   | 22 |
| 2-1 Echangeurs à courants parallèles.....  | 23 |
| 2-2 Echangeurs à courants croisés.....   | 24 |
| 2-3 Méthode des NUT .....  | 25 |
| <b>3- Applications</b> .....   | 27 |
| 3-1 Echangeur tubulaire .....  | 27 |
| 3-1-1 Dimensionnement.....   | 27 |
| 3-2 Echangeur à plaques.....   | 28 |
| 3-2-1 Dimensionnement.....   | 31 |
| 3-3 Evolutions technologiques récentes (schémas sur diapos ou transparents) .....                | 32 |
| <b>Chapitre III : stage pratique</b>   |    |
| <b>1-L'échangeur étudié 10-E-78A</b> .....   | 33 |
| <b>2-Matériau de fabrication de l'échangeur</b> .....  | 33 |
| <b>3-Dimensionnement de l'échangeur</b> .....  | 34 |
| <b>4-Emplacement des anodes sacrificiel</b> .....  | 36 |
| <b>5-les produits utilisé dans les tours de refroidissement de la raffinerie de skikda</b> ..... | 38 |
| <b>6-Les analyses de l'eau circulé dans l'échangeur : (Qualité de l'eau brute)</b> .....         | 38 |
| <b>7- Les analyses que nous avons pris</b> .....   | 39 |
| 7-1 La qualité de la tour A (état excellente) .....  | 39 |
| <b>8-Résultat et discussion</b> .....  | 40 |
| <b>Conclusion générale</b> .....   | 41 |
| <b>Références bibliographiques</b> .....   | 42 |

## Chapitre 1 : corrosion en générale

|  |    |
|--|----|
| Figure 1-1 : le phénomène de corrosion.....                              | 3  |
| Figure 1-2 : corrosion galvanique coté calendre de l'échangeur.....      | 5  |
| Figure 1-3 : Mécanisme de la corrosion caverneuse.....                   | 5  |
| Figure 1-4 : photo réel de la corrosion intragranulaire. ....            | 6  |
| Figure 1-5 : corrosion sous contrainte d'une pièce. ....                 | 7  |
| Figure 1-6 : corrosion par piqures d'un tuyaux de fer. ....              | 8  |
| Figure 1-7 : corrosion sous calorifuge.....                              | 8  |
| Figure 1-8 : corrosion érosion par effet de cavitation.....              | 9  |
| Figure 1-9 : corrosion bactérienne .....                                 | 10 |
| Figure 1-10 : hydrogène blistering.....                                  | 11 |
| Figure 1-11 : fragilisation par l'hydrogène.....                         | 12 |
| Figure1-12 : provoque des fissures par la decarburation du metal.....    | 12 |
| Figure1-13 : corrosion par la vapeur d'eau.....                          | 13 |
| Figure 1-14 : corrosion d'un acier au carbone par le soufre.....         | 14 |
| Figure 1-16 : anode sacrificiel dans un bateau. ....                     | 16 |
| Figure 1-17 : photo réel d'une protection cathodique d'un tuyaux.....    | 16 |
| Figure1-18 : un inibteur de corrosion. ....                              | 17 |
| Figure 1-19 : Comparaison de l'efficacité des inhibiteurs chimiques..... | 18 |
| Figure 1-20 : principe de travail de l'inibiteur de corrosion.....       | 19 |

## Chapitre 2 : les échangeurs

|  |    |
|--|----|
| Figure 2-1 : batterie chaude.....  | 21 |
| Figure 2-2 : échangeur coaxial.....  | 21 |
| Figure 2-3 : échangeur tubulaire.....  | 22 |
| Figure 2-4 : échangeur à plaques.....  | 22 |
| Figure 2-5 : Evolutions des températures le long d'échangeurs à courants parallèles.....                           | 23 |
| Figure 2-6 : Schéma de principe d'un échangeur de chaleur.....   | 23 |
| Figure 2-7 : Efficacité d'un échangeur à courant parallèle en fonction de NUT et de C.....                         | 26 |
| Figure 2-8 : Efficacité d'un échangeur à courants parallèles et de sens contraires en fonction de NUT et de C..... | 26 |
| Figure 2-9 : Schéma de principe d'un échangeur tubulaire.....  | 27 |
| Figure 2-10 : Echangeur à calandres.....   | 27 |
| Figure 2-11 : Echangeur à calandres (double Parcours) .....  | 28 |
| Figure 2-12 : Principe de fonctionnement d'un échangeur à plaques.....   | 28 |
| Figure 2-13 : Circulation des fluides dans un échangeur à plaques.....   | 30 |
| Figure 2-14 : Variation du coefficient K en fonction de $\Delta P$ et de la température de l'eau.....              | 31 |

## Chapitre 3 : stage pratique

|  |    |
|--|----|
| Figure 3-1 : échangeur 10-E-78A nouveau.....   | 33 |
| Figure 3-2 : Appreil(DRX) utilisé pour donner la composition chimique du metal. ....       | 33 |
| Figure 3-3 : coupe horizontale de l'emplacement des tubes d'échangeur(coté calendre). .... | 34 |
| Figure 3-4 : photo réel de l'échangeur. ....   | 34 |
| Figure 3-5 : coupe verticale de les différents parties de l'intérieur de l'échangeur. .... | 35 |
| Figure 3-6 : photo réel vertical de l'échangeur.....                                       | 35 |
| Figure 3-7 : dimmensionnement de l'anode .....   | 36 |

|  |    |
|--|----|
| Figure 3-8 : une anode sacrificiel(en Zn) .....                      | 36 |
| Figure 3-9 : l'emplacement des anodes sur l'échangeur.....           | 36 |
| Figure 3-10 : photo réel des anodes sacrificiels.....                | 36 |
| Figure 3-11 : l'autre emplacement des anodes sacrificiels.....       | 37 |
| Figure 3-12: échangeur après l'utilisation(corrosion –érosion) ..... | 37 |
| Figures 3-13 : l'effet terrible de corrosion sur l'échangeur. ....   | 37 |
| Figure 3-14 : NALCO 3DT.....   | 38 |

## Chapitre 1 : corrosion en générale

|                                      |   |
|--------------------------------------|---|
| Tableau 1-1 : taux de corrosion..... | 4 |
|--------------------------------------|---|

## Chapitre 2 : les échangeurs

|  |    |
|--|----|
| Tableau 2-1 : Résistances d'encrassement.....  | 24 |
| Tableau 2-2 : Valeurs typiques de coefficients d'échange.....                          | 24 |
| Tableau 2-3 : Efficacité de quelques échangeurs .....                                  | 25 |
| Tableau 2-4 : Domaines d'utilisation des échangeurs à plaques Alfa-Laval.....          | 29 |
| Tableau 2-5 : Comparaison entre un échangeur à plaques et un échangeur tubulaire ..... | 29 |
| Tableau 2-6 : Caractéristiques des différents modèles d'échangeurs à plaques.....      | 30 |

## Chapitre 3 : stage pratique

|   |    |
|---|----|
| Tableau 3-1 : composition chimique de l'acier au carbone 179.....                           | 33 |
| Tableau 3-2 : l'eau brute.....  | 38 |
| Tableau 3-3 : les analyses de l'eau de refroidissement circulé de la tour A(en stage) ..... | 39 |
| Tableau 3-4 : la qualité de l'eau de la tour A.....   | 39 |



## Abstract

Corrosion in oil and gas production is widely regarded as the most serious problem in the world, for which researchers are increasing their research efforts to better understand the mechanism of corrosion. Carbon steel and stainless steel enjoy privileges in all industrial fields of our country.

In this work, in addition to a theoretical study of corrosion and its different types and mechanisms, we moved on to the exchangers and inhibitors used to minimize the destructive effect of corrosion in the petroleum industry.

In our analysis, the E-78 A heat exchanger was designed to these dimensions and the terrible effect of corrosion on the equipment.

Our proposed solutions are to coat the inside of the exchanger tubes or to do a total overhaul on the cooling towers.

Keys words : corrosion, heat exchanger, inhibitors

## Résumé

La corrosion dans la production de pétrole et de gaz est généralement considérée comme le problème le plus sévère dans le monde, pour lequel les chercheurs multiplient leur effort de recherche pour mieux comprendre le mécanisme de la corrosion. L'acier au carbone et l'acier inoxydable bénéficient de privilèges dans tous les domaines industriels de notre pays.

Dans ce travail, en plus d'une étude théorique de la corrosion et ces différentes types et ces mécanismes, nous avons passé au échangeurs et l'inhibiteurs utilisé pour minimiser l'effet destructif de la corrosion dans l'industrie pétrolière

Dans notre analyse, on a étudié l'échangeur E-78 A , ces dimensions et l'effet terrible du phénomène la corrosion sur l'équipement.

Nos solutions proposé sont de faire des revêtements a l'intérieur des tubes des échangeurs ou faire une révision totale sur les tours de refroidissements.

Mots clé : corrosion, échangeur thermique, inhibiteurs

## ملخص

التآكل في إنتاج النفط والغاز على أنه أخطر مشكلة يقوم الباحثون بزيادة جهودهم البحثية من أجل فهم آلية التآكل بشكل أفضل. يتمتع الفولاذ الكربوني والفولاذ المقاوم للصدأ بامتيازات في جميع المجالات الصناعية في بلدنا في هذا العمل ، بالإضافة إلى الدراسة النظرية للتآكل وأنواعه وآلياته المختلفة ، تعرضنا إلى المبادلات والمثبطات المستخدمة لتقليل التأثير المدمر للتآكل في صناعة البترول.

في تحليلنا ، تم دراسة المبادل الحراري E-78 ، أبعاده والتأثير الرهيب للتآكل على المعدات. حلولنا المقترحة هي تغطية الجزء الداخلي لأنابيب المبادل أو إجراء إصلاح شامل لأبراج التبريد.

الكلمات الدالة : التآكل , المبادل الحراري, المانع

**INTRODUCTION**

**GENERALE**

## Introduction générale

La corrosion dans la production de pétrole et de gaz est généralement considérée comme le problème le plus sévère dans le monde aujourd'hui. L'acier au carbone et l'acier inoxydable bénéficient de privilèges dans tous les domaines industriels de notre pays. Ils sont couramment utilisés pour produire, transporter et stocker des produits pétroliers et du gaz nature.

L'environnement d'exposition de ces structures conduit à la dégradation par corrosion de ces structures, ce qui pose de sérieux problèmes économiques, techniques et de sécurité. L'acier immergé dans le sol est particulièrement sensible à la corrosion et les dommages causés peuvent entraîner des pertes économiques importantes et constitue un facteur de risque majeur en matière de sécurité industrielle. On estime que la quantité d'acier détruite chaque année en raison de ce phénomène représente un quart de la production de fer. Dans les pays industrialisés, le coût des dommages directs et indirects causés par la corrosion est estimé à 2 à 4% du produit national brut (PNB); le coût comprend la perte de métal, les coûts d'entretien et de réparation, les coûts de recherche et de protection.

Par conséquent, il est important de développer notre compréhension des phénomènes de corrosion à la même vitesse que l'industrie de haute technologie. Il existe plusieurs façons de protéger les structures exposées à des environnements corrosifs, et ce revêtement est l'un des plus couramment utilisés en raison de sa facilité d'utilisation. De plus, il est économique et peut répondre à toutes les exigences. Les revêtements en mousse à base de résine époxy sont utilisés depuis longtemps, mais avec le temps, il a été constaté que le revêtement se dégraderait partiellement et que l'acier entrerait directement en contact avec des milieux corrosifs. Ainsi, par exemple, il a été observé que le fond d'une boîte de rangement destinée à être utilisée pendant 25 ans s'est détérioré après seulement 3 à 10 ans d'utilisation.

Afin de résoudre ce problème, les chercheurs multiplient les efforts de recherche pour mieux comprendre le mécanisme de la corrosion, tandis que les ingénieurs travaillent à perfectionner la technologie conçue pour protéger les structures métalliques de cette dégradation. En fait, la méthode pour protéger le pipeline de la corrosion du sol ou de l'eau est très simple, il suffit d'isoler le pipeline.

Cependant, le revêtement utilisé à cet effet peut difficilement assurer la conservation suffisante et durable du tube en acier, il faut donc utiliser une autre méthode appelée protection active.

La protection cathodique par appel de courant est la méthode de base de la protection active contre la corrosion et est généralement utilisée en complément de la protection passive des structures larges et élancées. En effet, la plupart des études établies dans le cadre du dimensionnement de ce système de protection s'accordent pour adopter une certaine marge de sécurité pour différents paramètres, dont le dimensionnement et les augmentations de puissance sur 25 ans, qui entraînent immédiatement des pertes. Une taille excessive ne peut pas être compensée et entraînera des coûts supplémentaires. Par conséquent, l'importance de développer des modèles mathématiques pour optimiser ces systèmes. Parmi les autres méthodes de protection existantes, la protection cathodique des anodes sacrificielles mérite d'être étudiée aujourd'hui car elle peut offrir une durée de vie plus longue, un coût moindre et une protection unifiée.

Dans ce processus, des anodes sacrificielles sont utilisées pour consommer des anodes afin de protéger des structures sous-marines ou enterrées.

Dans le premier chapitre, nous introduisons les concepts théoriques de base de la corrosion et de les moyens de préventions. Chapitre2, où nous introduisons la technologie de dimensionnements et principe de fonctionnement des échangeurs thermiques, suivi d'un chapitre qui résume les résultats obtenus et leurs explications. La conclusion générale soulignera les bénéfices de cette recherche et ses perspectives.

# CHAPITRE 1 : ETAT DE L'ART

# CHAPITRE 1

---

## 1-GÉNÉRALITÉS

La corrosion est le phénomène de dégradation le plus courant dans les unités de traitement. C'est la cause de la plupart des pannes des équipements sous pression.

On estime que la corrosion détruira un quart de la production annuelle d'acier dans le monde, soit environ 150 millions de tonnes par an ou 5 tonnes par seconde. La corrosion ne se limite pas à l'acier, mais affecte également tous les métaux ainsi que les polymères et céramiques. Elle est causée par l'interaction chimique et / ou physique entre le matériau et son environnement. Voici quelques exemples de phénomènes de corrosion:

- Transformation de l'acier en rouille
- Fissuration d'un laiton en présence d'ammoniac
- Oxydation d'un contact électrique en cuivre
- Fragilisation par l'hydrogène d'un acier à haute résistance
- Corrosion à chaud d'un superalliage dans une turbine à gaz
- Gonflement du polyéthylène en contact avec un solvant
- Dégradation du PVC par le rayonnement ultraviolet
- Attaque d'un tuyau en nylon par un acide oxydant
- Attaque des briques réfractaires par les laitiers
- Attaque d'un verre minéral par une solution alcaline

La corrosion est une réaction d'interface irréversible entre un matériau et le milieu environnant, qui implique la consommation du matériau ou la dissolution de composants environnementaux dans le matériau. Cette définition inclut les effets positifs de la corrosion et l'absorption d'une partie de l'environnement sans consommer de matériaux. L'absorption d'hydrogène par l'acier est considérée, par exemple, comme une réaction de corrosion.

Pour cette raison, on distingue la corrosion humide, ou corrosion à température ambiante, de la corrosion sèche,  
ou corrosion à haute température.

Le comportement à la corrosion d'un matériau en service dépend d'une multitude de facteurs :

- composition chimique et microstructure du métal
- composition chimique de l'environnement
- paramètres physiques (température, convection, irradiation, etc.)
- sollicitations mécaniques (contraintes, chocs, frottements)

Par conséquent, la résistance à la corrosion n'est pas une caractéristique inhérente aux métaux, mais une caractéristique de l'interface métal / milieu, il est donc nécessaire de caractériser la composition chimique et la microstructure et le comportement électrochimique de ces derniers. Par conséquent, la corrosion dépend d'un

# CHAPITRE 1

---

système extrêmement complexe, et l'effet du système se manifestera sous de nombreux aspects en pratique, parfois imprévisibles.

## 2- ASPECT ÉCONOMIQUE DE LA CORROSION

Les effets directs ou indirects de la corrosion sont résumés ci-après :

- Coût des pièces à remplacer, des réparations à effectuer
- Coût de l'entretien et du contrôle (mise en peinture, protection cathodique)
- Coût dû à l'utilisation de matériaux les plus nobles
- Augmentation des coefficients de sécurité
- Contamination du produit par les produits de corrosion
- Arrêt de production

On estime qu'un quart de la production annuelle d'acier sera endommagé par la corrosion (soit 150 millions de tonnes par an ou 5 tonnes par seconde). Selon les estimations de la littérature.

## 3- INFLUENCE DE LA CORROSION DANS LE CHOIX D'UN MATÉRIAU

Le choix des matériaux de construction des équipements est le résultat d'un compromis entre plusieurs facteurs:

- Un compromis entre la résistance à la corrosion et d'autres propriétés, telles que la résistance mécanique, la facilité de mise en œuvre, le soudage, le délai de livraison.
- Il y a un compromis entre la durée de vie de l'équipement et la durée de vie estimée du matériau.

## 4-TYPES DE CORROSION HUMIDE

### 4-1 LA CORROSION GÉNÉRALISÉE

En effet, les réactions chimiques ou électrochimiques se produisent uniformément sur toute la surface considérée.

En général, sa vitesse est facile à prévoir avec une précision suffisante pour déterminer la durée de vie possible de l'équipement [11].

# CHAPITRE 1

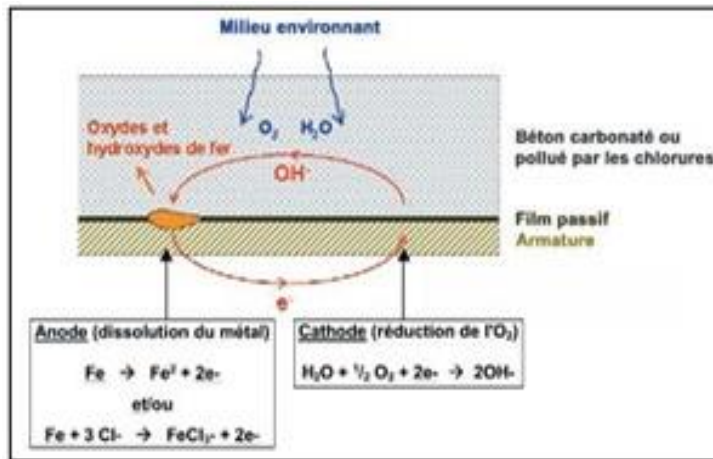
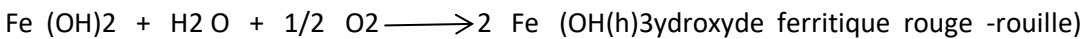
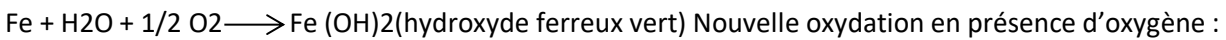


Figure 1-1 : le phénomène de corrosion

Exemples de corrosion généralisée :

- acier au carbone immergé dans une solution d'acide sulfurique diluée
- acier au carbone en présence d'air humide
- acier au carbone en présence d'eau de mer

Dans le cas du fer la réaction globale d'oxydoréduction se résume à :



Tant qu'aucune couche protectrice, film de passivation ou oxyde protecteur n'est formé, la dissolution du matériau reste active.

Généralement, la "rouille" de l'acier ordinaire dans un environnement humide ne peut pas protéger le métal. Il peut être entartré et possède un certain degré de porosité, permettant la diffusion de l'eau et de l'oxygène.

Ce type de corrosion peut être bien évidemment aggravé par la présence d'impuretés (SO<sub>2</sub>, Cl<sup>-</sup>).

- **Taux de corrosion**

Il s'exprime en :

- mdd : milligrammes par dm<sup>2</sup> par jour
- mm/an : millimètres par an
- iPY : pouces par an
- mPY : millième de pouce par an

# CHAPITRE 1

| Taux de corrosion                       | Tenue                 |
|---|-----------------------|
| < 0,002 iPY<br>< 0,05 mm/an             | Excellente Excellente |
| 0,002 à 0,005 iPY<br>0,05 à 0,130 mm/an | Bonne                 |
| 0,005 à 0,05 iPY<br>0,130 à 1,25 mm/an  | Satisfaisante         |
| > 0,05 iPY<br>> 1,25 mm/an              | Non satisfaisante     |

Tableau 1-1 : taux de corrosion

## 4-1-1 Prévention :

La prévention contre la corrosion se fait en assurant :

- Des inspections régulières et des mouvements de mesure d'épaisseur par ultrasons permettent de surveiller la corrosion et d'évaluer la perte d'épaisseur.
- Utilisez de la peinture (peinture, placage, etc.), un inhibiteur de corrosion ou une protection cathodique.
- Dans le cas de l'eau, la valeur du pH peut être augmentée, et dans le cas de la réduction de la teneur en oxygène (pour la chaudière, de l'hydrazine ou du sulfite de sodium peuvent être ajoutés)

## 4-2 LA CORROSION GALVANIQUE

Il existe une différence de potentiel entre les deux métaux différents immergés dans l'électrolyte. Si ces métaux sont en contact (c.-à-d. Connexion électrique), un courant sera établi.

Le métal le moins noble (potentiel de dissolution le moins élevé dans la série galvanique) joue le rôle d'anode et se corrode[11].

Exemples de piles galvaniques :

- Hélice en bronze connectée à une coque de bateau en acier dans l'eau de mer
- Assemblage à brides réunissant deux métaux différents
- Assemblages soudés mixtes ou hétérogènes
- Boîtes de distribution d'échangeurs en acier et faisceau tubulaire en laiton



# CHAPITRE 1

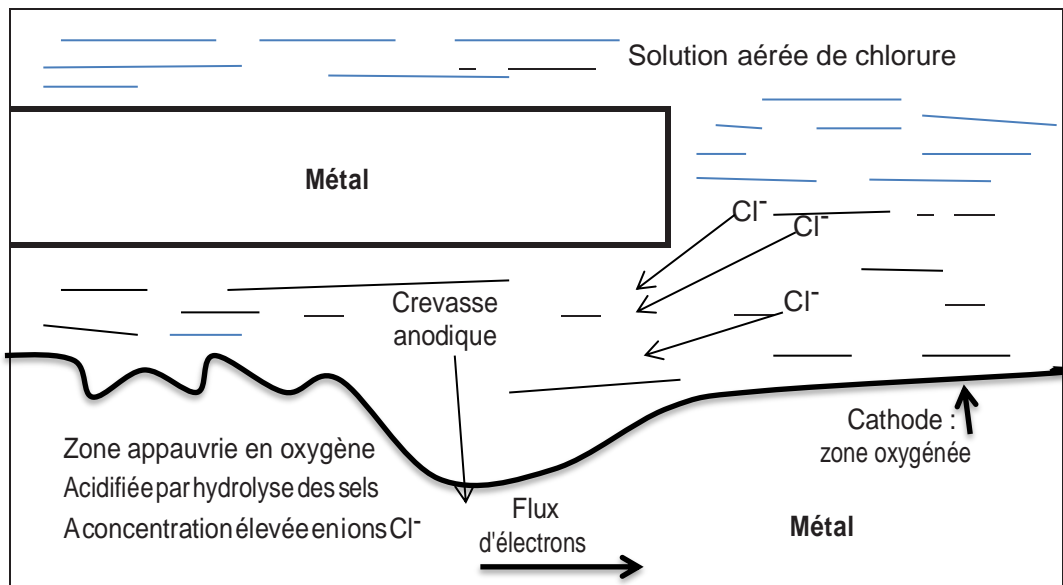


Figure 1-2 : corrosion galvanique coté calandre de l'échangeur

## 4-3 LA CORROSION PAR CREVASSE

Elle correspond à une attaque électrochimique par "aération différentielle".

Elle est généralement liée à une petite quantité de solution stagnante dans les pores, en cours de dépôt et sous les joints non scellés [11].



DMAC029A

figure 1-3 : Mécanisme de la corrosion caverneuse.

## 4-4 LA CORROSION INTERGRANULAIRE

Les métaux et alliages sont généralement constitués de grains, limités entre eux par des interfaces appelés "joints de grains".

La corrosion intergranulaire est due à la présence d'impuretés aux joints de grains et à l'enrichissement ou à l'appauvrissement de l'un des composants de l'alliage à proximité du joint [11]

# CHAPITRE 1

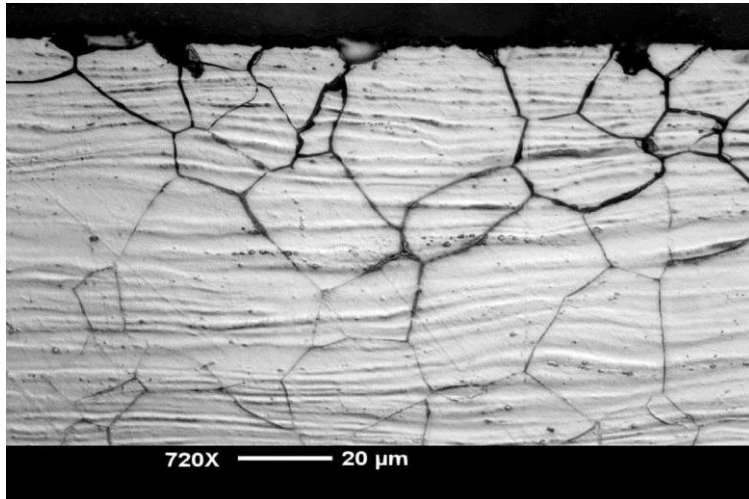


Figure 1-4 : photo réel de la corrosion intragranulaire. [32]

Le cas le plus courant est l'acier inoxydable austénitique. Ces alliages sont exposés à des températures allant de 400 ° C à 900 ° C, où les cristaux de carbure de chrome précipitent.

L'incursion dans ce domaine de température peut être due :

- soit à la température de service
- soit lors d'une opération de soudage
- soit lors d'un traitement thermique mal conduit dans le domaine de sensibilisation (par exemple refroidissement trop lent)

La précipitation de carbures riches en chrome entraîne de part et d'autre du joint de grain une véritable "déchromisation" de l'alliage (la teneur en chrome peut chuter en-dessous de 13 %). Ces zones deviennent alors anodiques par rapport au reste de la structure.

## 4-5 LA CORROSION SOUS CONTRAINTE

Elle se produit sous l'action simultanée du stress et de l'environnement corrosif.

Elle provoque la fissuration intergranulaire ou transgranulaire du métal, souvent sous forme ramifiée[7].

- Effets de contraintes

Les contraintes peuvent avoir des origines diverses :

- contraintes thermiques
- contraintes d'érouissage
- contraintes résiduelles de soudage
- charge appliquée

# CHAPITRE 1



Figure 1-5 : corrosion sous contrainte d'une pièce. [33]

La contrainte minimale requise pour amorcer une fissure dépend de la composition de l'alliage, de la nature de l'environnement et de la température. Dans certains cas, un niveau de contrainte égal à 10% de la limite élastique suffit pour initier le processus de corrosion sous contrainte.

- Effet du temps

Le taux de fissuration dépend de nombreux paramètres. Elle peut être constante au début du phénomène, mais elle peut être accélérée très rapidement du fait de la réduction de section.

- Effet de l'environnement

Nous fournissons ci-dessous une liste non exhaustive des environnements à l'origine de la corrosion sous contrainte de certains métaux et alliages.:

- aciers au carbone → H<sub>2</sub>S humide, soude, solutions de cyanure (HCN) nitrates en solution, M.E.A., ...
- aciers inoxydables → halogènes, soude, potasse, eau de mer, ..., acides polythioniques
- laiton → ions ammonium (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>), mercure (Hg)
- titane → méthanol

#### 4-5-1 Mécanisme :

- La contrainte de traction détruira le film protecteur sur la surface métallique et permettra à la corrosion de commencer à divers points.
- La corrosion joue également un rôle important dans la génération de fissures (corrosion par piqûres et autres discontinuités qui augmentent les contraintes).
- La propagation se produit sous l'action combinée de la corrosion et du stress.

#### 4-6 LA CORROSION PAR PIQÛRES :

La corrosion est limitée à des trous très localisés, qui peuvent progresser très rapidement en profondeur, tandis que les surfaces restantes ne sont pas corrodées [11].

# CHAPITRE 1

Il s'agit d'une forme cachée de corrosion car elle peut provoquer des fuites très rapidement, et la perte de poids est négligeable (elle échappe au test ultrasonique traditionnel; en revanche, elle peut être prouvée par radiographie.



Figure 1-6 : corrosion par piqures d'un tuyaux de fer. [31]

Mécanisme: fondamentalement identique à la corrosion cavernuse. Le rapport de surface entre la surface de l'anode et la surface de la cathode étant défavorable (forte densité de courant d'électrolyse), la progression est plus rapide.

Les inclusions contenues dans les métaux, les particules de fer formées lors de la fabrication des équipements en acier inoxydable, etc.) sont toutes des zones anodiques potentielles.

Les aciers inoxydables austénitiques sont particulièrement vulnérables à ce type d'attaque en présence de produits chimiques frustrants (halogènes, hypochlorites, cations oxydants, comme  $Fe^{3+}$ ).

## 4-7 Corrosion sous calorifuge :

La corrosion atmosphérique des matériaux (oxydation → rouille) est un problème auquel l'industrie s'intéresse.



Figure 1-7 : corrosion sous calorifuge [34]

Beaucoup plus importante sous calorifuge, parce que :

- Pas complètement étanche.

# CHAPITRE 1

---

- Agit comme une éponge.
- maintien d'une atmosphère humide.
- concentration des espèces corrosives.

Plus dangereuses sous calorifuge, parce que :

- cachée.
- Il est difficile à détecter car il doit être retiré de la couche isolante (opération coûteuse).

Pas besoin de s'inquiéter à basse température car il garde l'humidité, principalement:

-sur les aciers au carbone et faiblement alliés entre 0 et 80°C (0,5 mm/an). Le taux de corrosion double tous les 15°C environ

-sur les aciers inoxydables :

- piqûres et crevasses à basse température.
- fissuration par corrosion sous contrainte entre 70 et 150-200°C

## 4-8 LA CORROSION - ÉROSION

Cette corrosion est causée par le mouvement du fluide sur la surface métallique. L'aspect mécanique du mouvement est très important. La turbulence, les collisions et les phénomènes de couplage de courant peuvent endommager le film protecteur et conduire à une vitesse de corrosion élevée sur les matériaux, et ces matériaux sont très résistants aux conditions statiques [7].



Figure 1-8 : corrosion érosion par effet de cavitation. [35]

## 4-9 LA CORROSION BACTÉRIENNE

La corrosion bactérienne affecte les métaux en contact avec l'eau industrielle, qui sont obtenus à partir d'eau brute ou par dessalement [16].

Un très grand nombre d'alliages, de compositions très différentes, sont susceptibles d'être atteints :

# CHAPITRE 1

- aciers non alliés
- aciers inoxydables austénitiques
- alliages cuivreux (cupronickel, bronze) Le développement de ce type de corrosion dépend :
- du pH
- de la température
- de la teneur en oxygène dissous



Figure 1-9 : corrosion bactérienne

La biocorrosion se produit généralement sous la forme de nodules étroitement espacés, conduisant éventuellement à une corrosion spongieuse. L'intérieur des amas en couches nodulaires est généralement creux, contenant parfois un liquide noir à l'intérieur.

L'addition de quelques gouttes d'acide chlorhydrique à la rouille suffit parfois pour déceler la présence de sulfure de fer (dégagement d'H<sub>2</sub>S).

Deux types de bactéries sont particulièrement bien connues :

#### 4-9-1 bactéries sulfato-réductrices

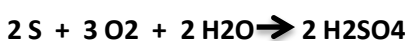
Ce sont des bactérie anaérobies réductrices de sulfates, qui donnent des sulfures suivant la réaction :



L'hydrogène est fourni par des plages cathodiques ou les composés organiques de l'environnement.

#### II-8-2 bactéries oxydant le soufre

Ces bactéries aérobies sont capables d'oxyder le soufre des composés soufrés suivant la réaction :



# CHAPITRE 1

On les retrouve dans les gisements de pétrole et dans les égouts où elles attaquent rapidement le ciment.

Il y a parfois effets concomitants des bactéries sulfato-réductrices à la partie inférieure (fermentation anaérobie des boues déposées) et des bactéries aérobies à la partie supérieure.

## 4-10 LA CORROSION PAR L'HYDROGÈNE

Les dommages causés par l'hydrogène se répartissent en trois catégories :

- hydrogène blistering.
- fragilisation par l'hydrogène.
- décarburation et attaque par l'hydrogène.

Les deux premiers processus d'endommagement ont été trouvés dans les processus chimiques, lors du décapage, du soudage, etc.

Les deux derniers ne se présentent qu'à haute température.

### 4-10-a Hydrogène blistering

Certains atomes d'hydrogène diffusent à travers le métal et sont bloqués par des pores ou des inclusions (comme le sulfure de manganèse dans l'acier laminé), où ils se combinent en molécules d'hydrogène.

La pression d'équilibre  $H / H_2$  est suffisamment élevée pour garantir que tout équipement se rompra en raison de la formation de cloques.

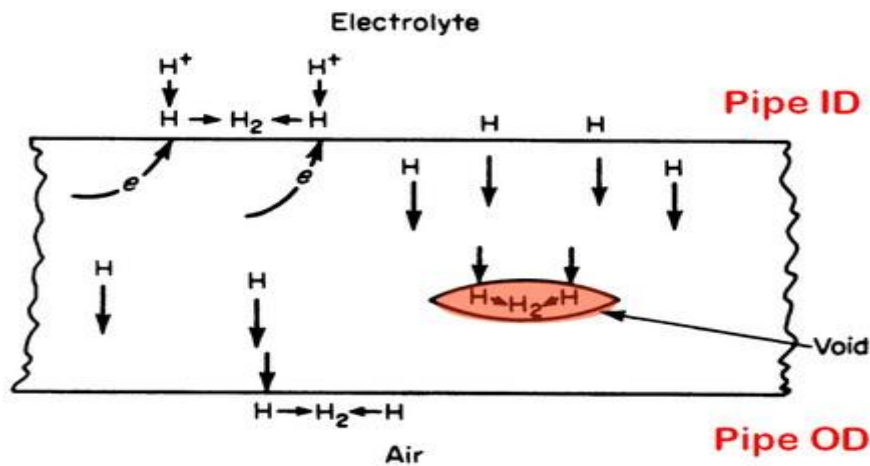


Figure 1-10 : hydrogène blistering

### 4-10-b Fragilisation par l'hydrogène

La pénétration de l'hydrogène atomique rendra le matériau cassant, et l'hydrogène incorporera des défauts (dislocations, inclusions, etc.). Si une charge est appliquée, des fissures se produiront.

# CHAPITRE 1



Figure 1-11 : fragilisation par l'hydrogène[36]

Par exemple, la ductilité de l'acier au carbone chargé d'hydrogène diminuera considérablement et l'allongement diminuera considérablement (de 42% à 7%).

Les aciers à hautes caractéristiques mécaniques sont particulièrement sensibles à ce type de fragilisation et d'autant plus qu'ils sont soumis à des contraintes plus élevées.

La concentration d'hydrogène dans le métal augmente la tendance à la fragilisation, mais ce phénomène est réversible. Cela signifie que les propriétés mécaniques d'origine peuvent être restaurées en remplaçant l'hydrogène.

## 5-TYPES DE CORROSION SÈCHE (à haute température)

### 5-1 DÉCARBURATION ET ATTAQUE PAR L'HYDROGÈNE

Dans un appareil de conversion utilisant de l'hydrogène sous haute pression et haute température, la structure en acier en contact avec la phase gazeuse est sujette à la corrosion à chaud de l'hydrogène (température > 200 ° C).

Le principal effet de l'hydrogène à haute température est une décarburation de l'alliage suivant le processus

Suivant :



Le méthane formé se rassemble préférentiellement aux joints des grains. Il ne peut diffuser et provoque la fissuration intergranulaire du métal.

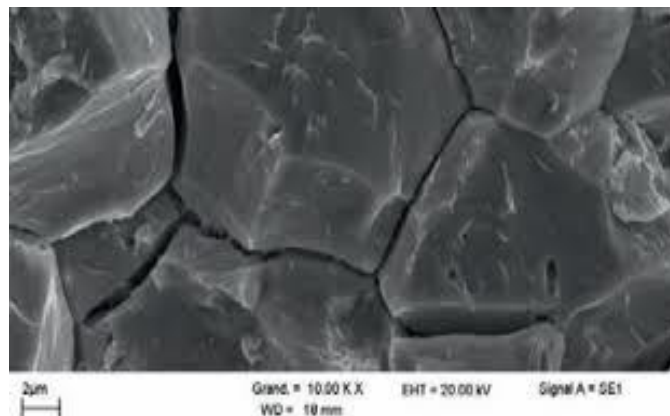


Figure1-12 : provoque des fissures par la décarburation du métal [31]



# CHAPITRE 1

## 5-2 CORROSION PAR LES GAZ, FUMÉES ET VAPEURS D'EAU :

L'oxygène libre dans l'atmosphère ou la fumée joue un rôle majeur, mais les gaz industriels et les fumées contiennent également des produits combinés tels que  $\text{SO}_2$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ , etc., et la vapeur d'eau à l'état surchauffé n'est pas calculée. Ces vapeurs d'eau constituent l'environnement est nettement plus agressif que l'atmosphère.

Selon le milieu considéré et la température de service, les dégradations constatées se manifestent par :

- L'oxydation du matériau augmente avec l'augmentation de la température.
- La carburation du matériau affaiblit le métal et accélère son oxydation.
- Attaque prioritaire (attaque intergranulaire de certains alliages de nickel en présence de soufre et de composés soufrés)
- des oxydations catastrophiques comme celles provoquées par les oxydes de vanadium (vanadyl-vanadates de sodium/ $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{V}_2\text{O}_4$ ,  $5 \text{V}_2\text{O}_5$ )



Figure1-13 : corrosion par la vapeur d'eau[38]

## 5-3 CORROSION PAR LE SOUFRE à HAUTE Température :

Dans les raffineries de pétrole, la corrosion de différents composés soufrés entre  $260^\circ\text{C}$  et  $540^\circ\text{C}$  est un problème courant. Les composés soufrés proviennent du pétrole brut et sont principalement composés de polysulfures,  $\text{H}_2\text{S}$ , mercaptans et thiophènes.

En plus du thiophène, d'autres composés soufrés réagissent avec les surfaces métalliques à des températures élevées pour former des sulfures métalliques, des molécules organiques et du  $\text{H}_2\text{S}$ . L'agressivité des composés soufrés augmente généralement avec la température.

Selon les conditions du processus, la corrosion peut être de type uniforme, locale ou corrosive. Son évolution dépend principalement de la formation de sulfures protecteurs.

Généralement, les alliages riches en nickel et en nickel sont rapidement corrodés par les composés soufrés à haute température, tandis que les aciers contenant du chrome ont une bonne résistance.

# CHAPITRE 1

L'expérience a montré que le taux de corrosion est relativement faible lorsque la teneur totale en soufre est  $\leq 0,6\%$  et qu'il n'y a pas de H<sub>2</sub>S.

A l'exception de certains équipements (colliers et plateaux de distillation) plaqués d'acier inoxydable à 12% de chrome (AISI 405), l'acier au carbone est généralement utilisé.



Figure 1-14 : corrosion d'un acier au carbone par le soufre. [37]

## 5-4 CORROSION PAR LES ACIDES NAPHTÉNIQUES

Ce type de corrosion est souvent difficile à distinguer de la corrosion au soufre. En fait, la corrosion de l'acide naphténiq ue se produit lorsqu'il n'y a pas d'eau à haute température, comme la corrosion par le soufre. C'est un aspect très caractéristique de la corrosion qui survient lors du traitement du pétrole brut riche en acide naphténiq ue qui permet de distinguer cette agressivité particulière.

L'acide naphténiq ue est un acide organique présent dans certains pétroles bruts, en particulier ceux de Californie, du Venezuela, d'Europe de l'Est et de Russie. La teneur en acide naphténiq ue du produit brut est généralement exprimée par IA (indice d'acide total), qui est déterminé par titrage de potasse.

L'acide naphténiq ue n'est corrosif que lorsqu'il a un indice d'acide de 1 à 6 à une température de  $\sim 230$  ° C. A une température donnée, la vitesse de corrosion est proportionnelle à l'indice d'acide. Une augmentation de la température augmentera considérablement la vitesse de corrosion (multipliée par 3 lorsque la température augmente de 55 ° C). La présence d'acide naphténiq ue peut accélérer l'effet de la corrosion du soufre à haute température dans la zone turbulente.

La corrosion se développera autour de 230 ° C et dans la plage de 290-345 ° C. Il peut apparaître comme des zones de piqûres ou de corrosion, avec des bords émoussés et tranchants. Au-dessus de 350 ° C, la corrosion a tendance à disparaître, probablement à cause de la formation d'une couche protectrice.

L'acier allié léger et l'acier contenant 12% de chrome n'ont aucun avantage sur l'acier au carbone non allié. En revanche, l'acier inoxydable austénitique 18-8 souffre de corrosion par piqûres. En effet, les aciers et alliages résistants à la corrosion par l'acide naphténiq ue correspondent aux aciers inoxydables austénitiques contenant du molybdène (AISI 316 ou mieux AISI 317, alliage 20) et du titane grade 2.

# CHAPITRE 1

---

## 6-MOYENS DE PRÉVENTION

### 6-1 CONCEPTION DES ÉQUIPEMENTS

#### 6-1-1 Épaisseur des parois

Outre le fait que l'épaisseur de l'équipement doit être compatible avec diverses considérations mécaniques, nous avons également développé nos propres règles pour considérer la corrosion.

Pour cette raison, il existe un cahier des charges dans le bureau d'études et d'ingénierie qui précise la surépaisseur de corrosion de chaque fluide transporté, en fonction du matériau et de la température.

#### 6-1-2 Règles de conception

D'une manière générale, il faut éviter toutes sortes d'hétérogénéités. Nous passons en revue ci-dessous quelques règles pratiques à suivre:

- Vidange efficace du conteneur.
- facilité de nettoyage.
- Recherchez le système qui aide à remplacer les pièces les plus vulnérables.
- Évitez d'appliquer une pression excessive sur les composés exposés à des environnements corrosifs.
- Évitez le contact électrique avec des métaux différents.
- Évitez la flexion ou la contraction soudaine des tuyaux.
- Évitez les points chauds et froids.
- Évitez les entrées d'air, sauf pour certains matériaux (comme l'acier inoxydable ou le titane), qui sont plus résistants aux acides contenant de l'air dissous ou à d'autres oxydants.

#### 6-2 LES REVÊTEMENTS :

Ils constituent une barrière physique entre le milieu agressif et le métal à protéger. Leur efficacité dépend de leur comportement dans des environnements agressifs et de l'intégrité du revêtement.

On distingue :

- les revêtements métalliques obtenus soit par électrolyse (Zn, Ni, Cr, Cu, Cd, ...), soit par immersion (Zn, Al, ...), par diffusion (chromisation, shérardisation "Zn"), par projection (Zn, Al, ...), par placage (tôles plaquées colaminées)
- les revêtements non métalliques (peintures, vernis, émaux, verres, matières plastiques, caoutchouc, phosphatation et oxydation anodique)

#### 6-3 LA PROTECTION ANODIQUE

La série électrochimique vue précédemment répertorie les métaux des plus réactifs (en haut de la liste) aux métaux les plus précieux (en bas de la liste). Lorsque le métal réactif est connecté électriquement au métal noble dans l'électrolyte, un bain de corrosion se forme. Le métal le plus réactif agira en tant qu'anode et le métal le moins réactif agira en tant que cathode.

# CHAPITRE 1

La protection cathodique des anodes sacrificielles est basée sur ce principe et utilise en fait les propriétés électrochimiques inhérentes aux métaux. Il fonctionne en utilisant un métal qui est plus négatif que le potentiel du tube comme anode.

Comme le métal dans l'anode a un potentiel négatif plus important, il brûle, endommageant ainsi le métal dans le tuyau. En fait, c'est le même principe que lorsque deux métaux différents sont en contact. L'anode la plus adaptée à ce type de protection est l'anode en magnésium et de zinc. D'autres types de matériaux peuvent être utilisés comme anode de système de protection cathodique par anodes sacrificielles, tel que l'aluminium.

L'anode de magnésium est la plus utilisée dans le sol en raison de sa grande réactivité. Ce type d'anode est généralement fourni sous une forme préemballée et entouré d'un anolyte à faible résistance. Ce type d'anode est directement connecté au tuyau enterré ou via le point d'inspection. [30]

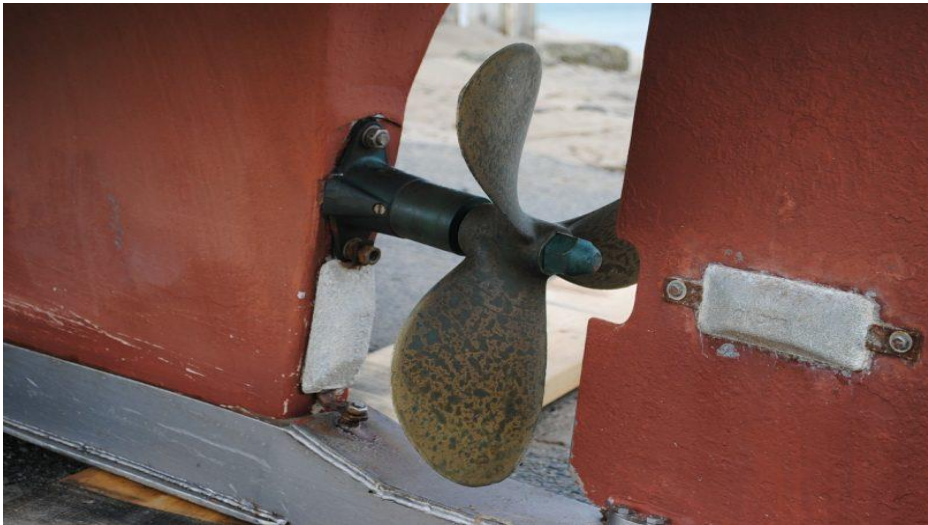


Figure 1-16 : anode sacrificiel dans un bateau. [39]

## 6-4 LA PROTECTION CATHODIQUE :

Il comprend la réduction de la tension du milieu métallique pour entrer dans la zone d'immunité. Presque deux possibilités sont utilisées:

- Utiliser le générateur externe de f.e.m pour réaliser une protection cathodique anode réglable et auxiliaire par courant imposé
- L'anode sacrificielle assure une protection cathodique et l'anode est constituée d'un métal plus actif que le métal à protéger. Former une cellule galvanique.



Figure 1-17 : photo réel d'une protection cathodique d'un tuyaux

# CHAPITRE 1

## 6-5 EXAMENS NON DESTRUCTIFS :

La corrosion est généralement cachée dans l'équipement. Utilisez ensuite des méthodes d'inspection non destructives pour vérifier l'état de l'équipement utilisé.

## 6-6 LES INHIBITEURS DE CORROSION

### 6-6-1 Définition

L'inhibiteur de corrosion fait référence à toute substance qui est injectée dans le corrosif en très petite quantité, afin de réduire ou d'éliminer sa corrosivité pour les métaux. Cela ne change pas la nature ou la concentration du milieu. Les inhibiteurs de corrosion agissent en établissant une barrière entre le métal et le réactif, et ils se fixent à la surface du métal sous une forme qui dépend de leurs propriétés [7].



Figure1-18 : un inhibiteur de corrosion.

### 6-6-2 Propriétés essentielles d'un inhibiteur de corrosion :

En plus de tout mécanisme d'action, l'inhibiteur de corrosion doit également vérifier certaines propriétés de base:

- Réduire le taux de corrosion des métaux tout en conservant les propriétés physiques et chimiques des métaux.
- Il reste stable en présence d'autres composants du milieu, en particulier pour les agents oxydants (tels que certains fongicides).
- Ne modifie pas la stabilité des substances contenues dans le milieu, par exemple en provoquant l'apparition d'émulsion et de mousse.
- Etre stable à la température d'utilisation.
- Etre efficace à faible concentration.
- Etre compatible avec les normes de non-toxicité.

# CHAPITRE 1

-Etre peut onéreux [18].

## 6-6-3 L'efficacité d'un inhibiteur de corrosion

Les termes les plus couramment utilisés pour exprimer l'efficacité des inhibiteurs de corrosion sont les suivants.

- Le taux d'inhibition  $\tau = *100$  [%]

Où-  $U_0$  : la mesure de corrosion (perte de masse, intensité de corrosion) en absence d'inhibiteur,

- $U$  : la mesure de corrosion en présence d'inhibiteur.

- Le coefficient d'inhibition  $\gamma$

Le coefficient d'inhibition  $\gamma$  qui différencie mieux des inhibiteurs entre eux lorsque le taux d'inhibition devient très élevé [19].

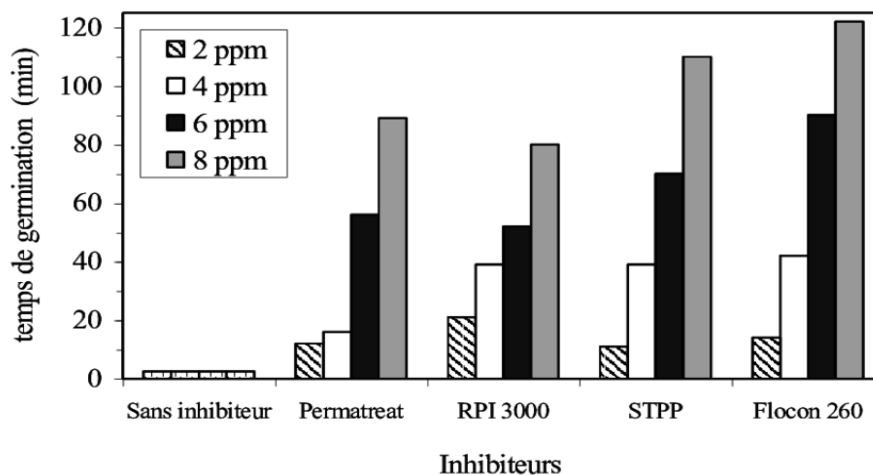


Figure 1-19 : Comparaison de l'efficacité des inhibiteurs chimiques[41]

## 6-6-4 Mécanismes et principes d'action :

Les inhibiteurs de corrosion n'ont pas leur propre mode d'action, mais ils sont liés au système de corrosion.

L'inhibiteur peut agir comme une barrière entre le métal et le milieu corrosif, et peut être préexistant: une couche d'oxyde ou d'hydroxyde a été formée, auquel cas le mécanisme implique généralement le processus d'adsorption et le blocage de surface. Le mode d'action peut également être de nature cinétique (réaction partielle). Les inhibiteurs de corrosion peuvent ralentir la réaction cathodique ou anodique, ou agir sur les deux en même temps. Les inhibiteurs de corrosion peuvent également être provoqués par la formation de composés insolubles, qui bloquent les zones sensibles et réduisent la vitesse de corrosion. Au fil du temps [7].

# CHAPITRE 1

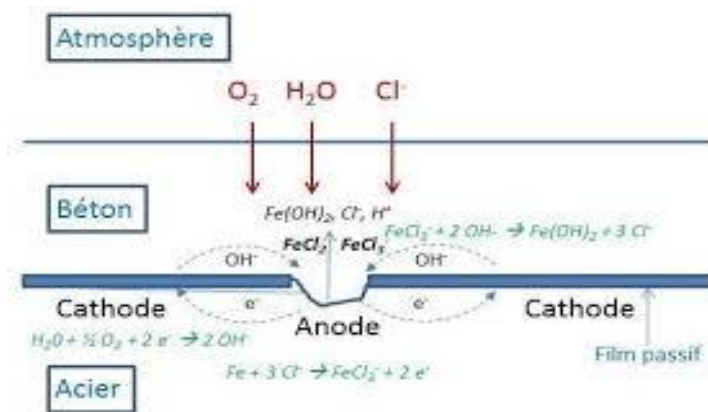


Figure 1-20 : principe de travail de l'inhibiteur de corrosion

## 6-6-5 Types d'inhibiteurs

### 6-6-5-1 Inhibiteurs organiques

C'est actuellement l'application privilégiée car son écotoxicité est inférieure à celle des inhibiteurs inorganiques et ce sont principalement des sous-produits de l'industrie pétrolière. Ils contiennent au moins un atome comme centre actif qui peut échanger des électrons pour se fixer à des métaux tels que l'azote, l'oxygène, le phosphore ou le soufre [19].

- Les inhibiteurs organiques agissent par :
- Adsorption à la surface (cas des composés amines et soufrés).
- Neutralisation ou alcalinisation du milieu corrosif.
- Formation d'un film protecteur à la surface du métal.
- Hydrophobisation de la surface du métal [8].

Les groupes fonctionnels usuels, permettant leurs fixations sur le métal, sont : [20].

- Le radical aminé —  $\text{NH}_2$ .
- Le radical mercaptan —  $\text{SH}$ .
- Le radical hydroxyle —  $\text{OH}$ .

### 6-6-5-2 Inhibiteurs minéraux

Il s'agit généralement de substances oxydantes, généralement appelées agents de passivation (chromates, nitrates, phosphates, etc.), qui peuvent passiver les métaux et augmenter considérablement le potentiel de corrosion à une valeur plus élevée tout en réduisant la vitesse de corrosion. On peut classer en trois catégories :

- Anions oxydants : chromates et nitrates.

# CHAPITRE 1

---

-Anions non oxydants oxygénés : (phosphates, molybdates, silicates...etc.) Produisant la passivation, ceci est complété par un film de phosphate.

--Cation de valences élevées :  $\text{Cu}^{+2}$  ,  $\text{Fe}^{+2}$  ,  $\text{Ca}^{+2}$  [19].

## **6-6-5-3 Selon l'action interfaciale : inhibiteur d'adsorption**

Dans le mécanisme d'absorption, l'inhibiteur forme une couche monomoléculaire ou une couche multimoléculaire sur le métal, qui agit comme une couche isolante pour l'espace corrosive pour la solution. Il existe deux types d'adsorption physique et d'adsorption chimique.



# **CHAPITRE 2 : LES ECHANGEURS THERMIQUES**

### 1- Généralités sur les échangeurs :

#### 1-2 Définition :

Un dispositif utilisé pour transférer l'énergie thermique entre deux fluides, généralement séparés par une paroi solide.

#### 1-3 L'utilisation des échangeurs :

-Lorsque vous avez besoin d'utiliser d'autres fluides (serpentins chauds ou froids, évaporateurs ou condenseurs, tours de refroidissement, etc.) pour chauffer ou refroidir des fluides

Deux réseaux de distribution de fluides doivent être séparés pour résoudre les problèmes d'hygiène ou de corrosion (chauffe-eau solaires, géothermie, etc.)

-Les deux réseaux de distribution de fluide doivent être séparés pour résoudre le problème de pression (chauffage de zone).

#### 1-4 Ces classifications :

- -Selon le type de flux.
- -Courant croisé parallèle dans le même sens ou dans le sens opposé.
- -Combinaison des deux premiers types -Selon le type de fluide utilisé.
- -2 fluide avec des caractéristiques thermiques similaires (eau / eau).
- -2 fluides aux caractéristiques thermiques très différentes (eau / air) .
- -En fonction de la surface d'échange ;
- -Mur de matériau (panneau, tuyau, etc.) Contact direct (refroidisseur d'air, tour de refroidissement).

(Remarque : Ici, nous ne considérons qu'un seul échangeur de fluide pour le transfert de chaleur à travers la paroi du matériau.)

**1-4-1 batterie chaude ou froide (serpentin) :**  
échange entre air et eau, gaz frigorigènes, solutions non givrante.

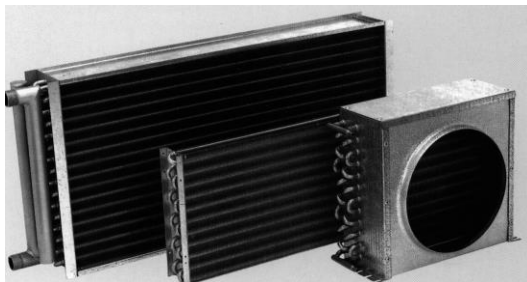


Figure 2-1 :batterie chaude

**1-4-2 échangeur coaxial :**

évaporateurs, condenseurs de pompes à chaleur, climatisation et réfrigération.

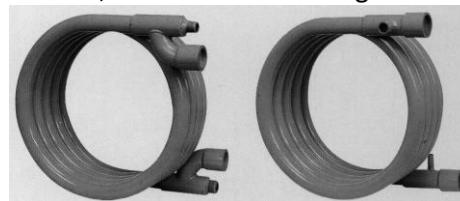


Figure 2-2 : échangeur coaxial

**1-4-3 échangeur tubulaire** : Eau surchauffée ou filet de chauffage à vapeur, eau chaude de piscine, etc.

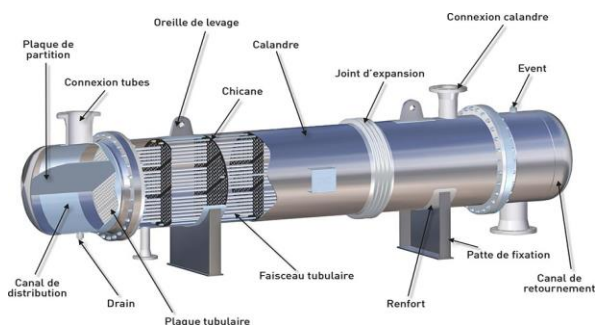


Figure 2-3 : échangeur tubulaire

**1-4-4 échangeur à plaques** : chauffage, réfrigération, récupération de chaleur dans de nombreux secteurs d'activité .

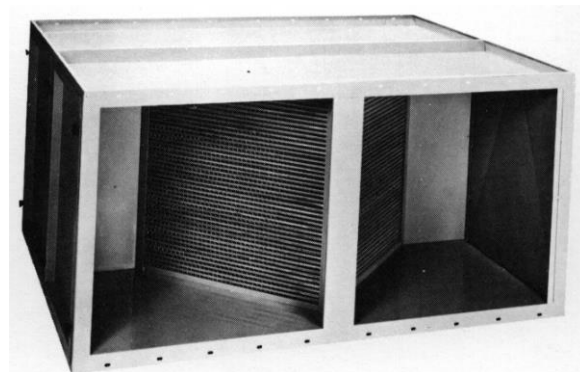


Figure 2-4 : échangeur à plaques

### 1-5 Dimensionnement d'échangeur :

-La taille de l'échangeur de chaleur est principalement basée sur le calcul du bilan thermique, mais tient également compte de la perte de ch

-La puissance P d'un échangeur peut s'écrire de la manière suivante :  $P = K S \Delta T_m$ (1)

- K est le coefficient de transmission thermique surfacique *moyen*, S la surface d'échange et  $\Delta T_m$  représente l'écart de température *moyen* entre les deux fluides. On est obligé de raisonner sur des valeurs moyennes de K et de  $\Delta T_m$  dans la mesure où les températures des deux fluides et le coefficient K varient d'un endroit à l'autre de l'échangeur.

## 2- Théorie des échangeurs

L'approche théorique est réalisée en régime permanent et en faisant les hypothèses suivantes :

L'approche théorique est réalisée en régime permanent et en faisant les hypothèses suivantes :

-l'échangeur est parfaitement isolé de l'extérieur (pas de pertes), on néglige conduction axiale.

-les coefficients K et Cp sont constants,

la température de chaque fluide est homogène dans une section donnée.

L'équation (1) peut ainsi s'écrire :

$$P = K S \Delta T_m = \dot{m}_c C_{p_c} (T_{ce} - T_{cs}) = \dot{m}_f C_{p_f} (T_{fs} - T_{fe}) \quad (2)$$

où  $\dot{m}$  représente le débit massique (kg/s) et Cp la chaleur spécifique (J/kg K)

les indices f et c sont relatifs aux fluides froid et chaud et les indices s et e à l'entrée et à la sortie de l'échangeur.

La résolution de cette équation dépend du type d'échangeur considéré. Nous commencerons par la méthode la plus simple, la méthode avec courant parallèle.

### 2-1 ECHANGEURS A COURANTS PARALLELES

-On considère la situation avec des courants parallèles et de même sens (anti-méthode ou écoulement parallèle) et des sens opposés (méthode ou contre-courant).

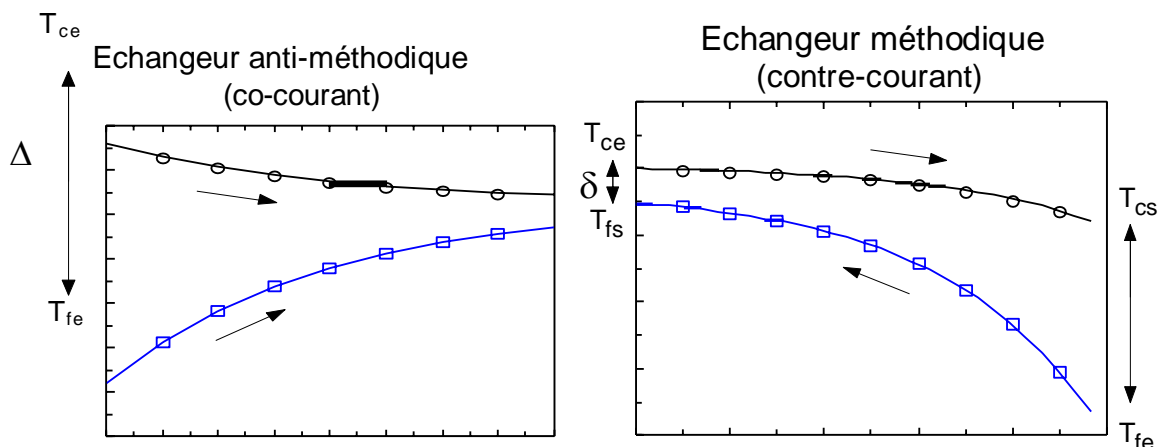


Figure2-5: Evolutions des températures le long d'échangeurs à courants parallèles

Dans les deux configurations, l'écart de température moyen entre les fluides froid et chaud peut être calculé en réalisant un bilan thermique sur la partie de base puis en intégrant sur toute la longueur de l'échangeur.

Par conséquent, nous avons trouvé:

$$\Delta T_m = \delta - \Delta / \ln(\delta / \Delta)$$

$\delta$  et  $\Delta$  sont définis sur la figure 1.

On appelle  $\Delta T_m$  l'écart logarithmique moyen et on le note DTLM.

Pour une puissance connue, si on fixe les débits et les températures d'entrée, on a 3 équations et 4 inconnues qui sont S, K,  $T_{fs}$  et  $T_{cs}$  ; il faut donc calculer séparément K.

Calcul du coefficient K

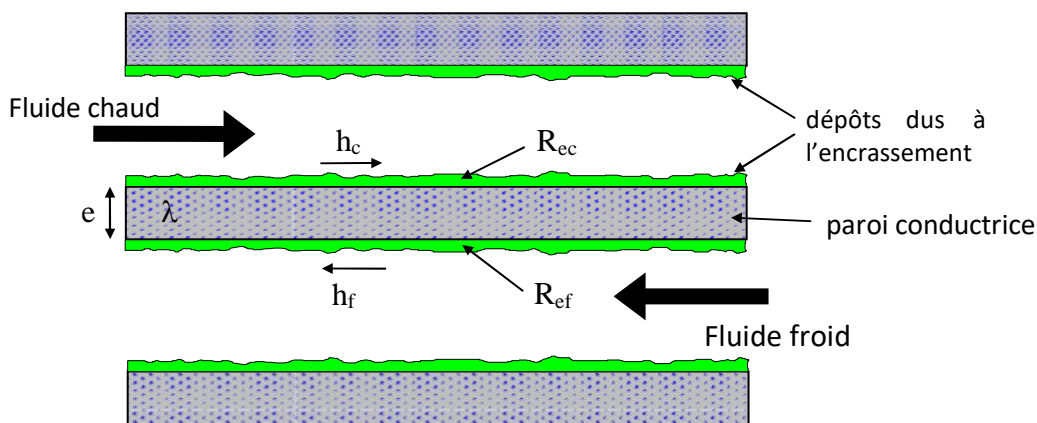


Figure 2-6 : Schéma de principe d'un échangeur de chaleur

Si l'on suppose que le transfert de chaleur entre le fluide et la paroi (principalement la convection) est le transfert de chaleur avec une épaisseur de e et une conductivité thermique de λ épaisseur, alors K peut s'écrire:

$$\frac{1}{K} = \frac{1}{h_c} + \frac{e}{\lambda} + \frac{1}{h_f} + R_{ec} + R_{ef} \quad (4)$$

$h_c$  et  $h_f$  sont calculés avec les formules de convection forcées pour des températures de

fluides moyennes et  $R_{ec}$  et  $R_{ef}$  sont les résistances thermiques d'encrassement dont les valeurs typiques sont données dans le tableau 1.

| FLUIDES                 | Valeurs moyennes <sup>1</sup> de $R_e$ (m <sup>2</sup> K/W) |
|-------------------------|---|
| eau de mer T < 50°C     | $10^{-4}$   |
| eau de mer T > 50°C     | $2.10^{-4}$   |
| eau de rivière « sale » | 10 à 20 . $10^{-4}$   |
| eau industrielle        | $2.10^{-4}$   |
| vapeurs non grasses     | $10^{-4}$   |
| air industriel          | $4.10^{-4}$   |
| liquide réfrigérant     | 4 à 6. $10^{-4}$  |
| gas-oil                 | $2.10^{-4}$   |

Tableau 2-1 : Résistances d'encrassement

Nous donnons dans le tableau 2 quelques valeurs typiques de coefficients d'échange.

| Types de fluides             | K en W/m <sup>2</sup> K |
|------------------------------|-------------------------|
| Eau/eau                      | 800 - 2000              |
| Eau/ huile                   | 110 - 350               |
| Vapeur/eau                   | 1000 - 6000             |
| batterie eau/air (serpentin) | 25 - 50                 |

Tableau2-2 : Valeurs typiques de coefficients d'échange

### 2-2 ECHANGEURS A COURANTS CROISES :

Dans ce cas, le problème est plus compliqué car la température de sortie change en fonction de la position du fluide dans l'échangeur. Selon que chaque fluide est librement mélangé (fluide agité) ou dirigé à l'opposé (fluide non agité), plusieurs configurations sont possibles. Bien que l'expression de  $\Delta T_m$  ait été calculée pour certains cas, on utilise souvent des abaques donnant un coefficient correctif F tel que :

$$P = K S F \Delta T_m \quad (5)$$

F est donné par les abaques des figures 3 et 4 et  $\Delta T_m$  est calculé comme pour un échangeur à courant parallèle et de sens contraire.

**2-2-1 METHODE DES NUT**

Dans certains cas, la méthode du DTLM requiert un calcul itératif. La méthode des NUT permet par contre le plus souvent un calcul direct.

Elle repose sur la notion d'efficacité, notée  $\epsilon$  et définie de la manière suivante :

$$\epsilon = \frac{\text{puissance réelle}}{\text{puissance maximale}} = \frac{P}{P_{\max}}$$

La puissance maximale  $P_{\max}$  peut s'écrire :

$$P = C_{\min} (T_{ce} - T_{fe}) \text{ avec :}$$

$$C_{\min} = \text{Min}(m \& c C_{pc}, m \& f C_{pf}) \quad (7)$$

$$\text{trouve ainsi : } \epsilon = \frac{m \& c C_{pc} (T_{ce} - T_{cs})}{C_{\min} (T_{ce} - T_{fe})} \quad (8)$$

Dans le cas particulier des fluides et de débits identiques

$$\epsilon = \frac{(T_{ce} - T_{cs})}{(T_{ce} - T_{fe})} \quad \text{en supposant que } C_{pf} = C_{pc} \quad (9)$$

On démontre assez facilement que pour des échangeurs à courants parallèles, l'efficacité est essentiellement fonction de deux paramètres NUT et C définis de la manière suivante :

$$C = C_{\min} / C_{\max} \quad (10)$$

$$NUT = K S / C_{\min} \quad (11)$$

|  |  |
|--|--|
| Courants parallèles et de même sens  | $\epsilon = \frac{1 - \exp[-NUT(1 + C)]}{1 + C}$   |
| Courants parallèles et de sens contraires  | $\epsilon = \frac{1 - \exp[-NUT(1 - C)]}{1 - C \exp[-NUT(1 - C)]}$   |
| Courants croisés : fluides non mixés (valeur approchée)                          | $\epsilon = 1 - \exp\left\{\frac{1}{\eta C} [\exp[-NUT(\eta C)] - 1]\right\} \text{ avec } \eta = NUT^{-0,22}$                           |
| Courants croisés : fluides mixés   | $\epsilon = NUT \left\{ \frac{NUT}{1 - \exp[-NUT]} + \frac{(NTU)(C)}{1 - \exp[-NUT(C)]} - 1 \right\}^{-1}$                               |
| Courants croisés : fluide $C_{\min}$ non mixé                                    | $\epsilon = \frac{1}{C} \left\{ 1 - \exp[-C[1 - \exp(-NUT)]] \right\}$   |
| Courants croisés : fluide $C_{\max}$ non mixé                                    | $\epsilon = 1 - \exp\left\{-1/C [1 - \exp[-NUT(C)]]\right\}$   |
| Echangeur tubulaire (coque et tubes) : 1 passe coté coque et 2 passes coté tubes | $\epsilon = 2 \left\{ \frac{1 + C + 1 + \exp[-NUT(1 + C^2)^{1/2}]}{1 - \exp[-NUT(1 + C^2)^{1/2}]} \cdot ((1 + C^2)^{1/2})^{-1} \right\}$ |

Tableau 2-3 : Efficacité de quelques échangeurs [3]

-L'efficacité ne dépend que des caractéristiques physiques de l'échangeur de chaleur. Par conséquent, si nous fixons une surface, le calcul de la température de sortie est simple grâce à la formule (8); par conséquent, l'exercice 2 peut être directement résolu par cette méthode.

-Si l'on considère les derniers développements en algèbre et la popularité croissante des solveurs, on pourrait penser que cet avantage est négligeable par rapport à la méthode DTLM. Cependant, l'expérience a montré que ces outils sont généralement difficiles à utiliser les fonctionnalités DTLM et que la méthode NUT est plus stable. On peut également utiliser des abaques qui donnent directement  $\epsilon$  en fonction de NUT (figures 5 et 6)

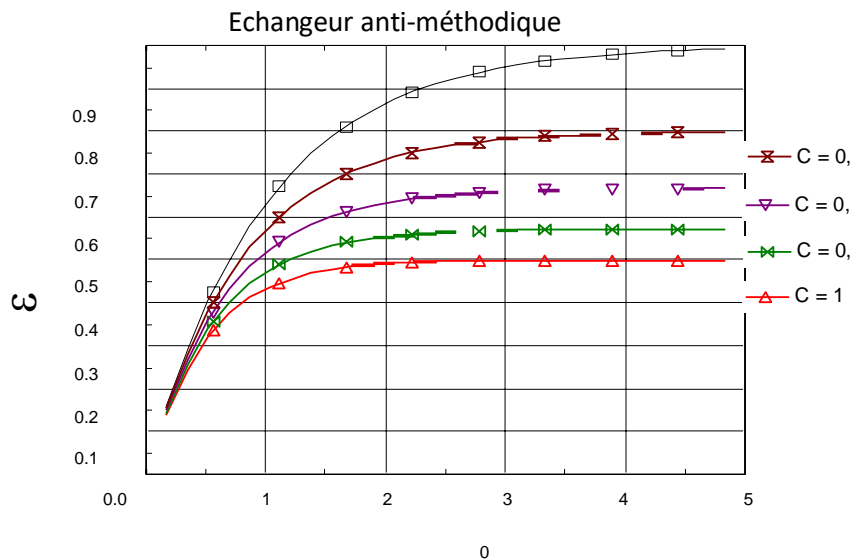


Figure 2-7 : Efficacité d'un échangeur à courant parallèle en fonction de NUT et de C

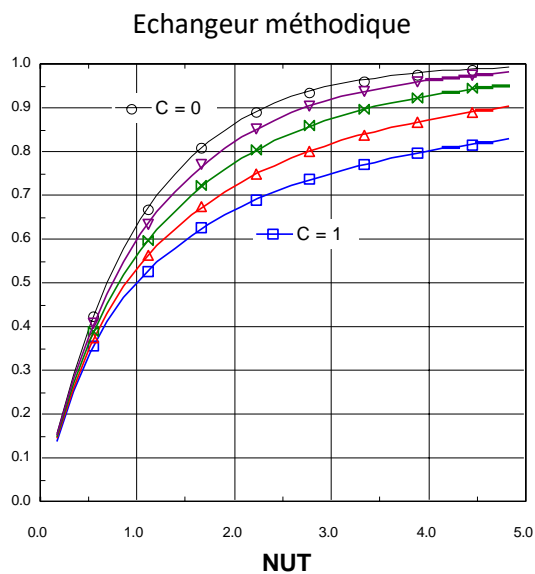


Figure 2-8 : Efficacité d'un échangeur à courants parallèles et de sens contraires en fonction de NUT et de C

### 3- Applications

Nous étudierons plus spécifiquement les deux types d'échangeurs très courants en CVC, à savoir les échangeurs tubulaires et les échangeurs à plaques.

#### 3-1 ECHANGEUR TUBULAIRE

Ces échangeurs sont utilisés depuis de nombreuses années dans les sous-stations de chauffage urbain (eau surchauffée ou vapeur), pour la production d'eau chaude sanitaire et pour de nombreuses applications industrielles nécessitant des pressions élevées ; ils sont toutefois de plus en plus concurrencés par les échangeurs à plaques décrits dans le paragraphe suivant.

Leur schéma de principe est décrit par la figure 7 : ils sont constitués soit d'un tube unique (serpentin), soit d'un faisceau de tubes branchés en parallèle enfermés dans une enveloppe appelée calandre (coque).

Des chicanes sont placées dans la calandre (coque) pour augmenter la turbulence et l'efficacité de l'échange.

Les tubes sont en général métalliques (acier, cuivre, inox, etc.) et le fluide chaud ou agressif passe en général dans les tubes afin de minimiser les pertes de chaleur.

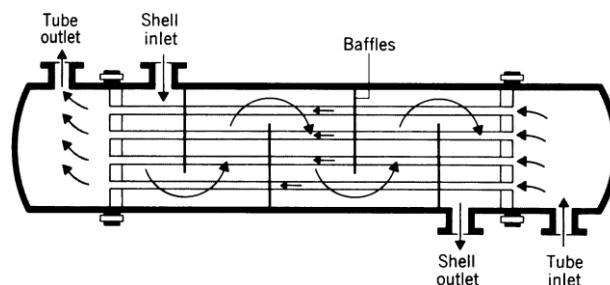


Figure 2-9 : Schéma de principe d'un échangeur tubulaire

#### 3-1-1 Dimensionnement

Il s'agit d'échangeurs à courants croisés et leur dimensionnement peut se faire en suivant la méthode exposée dans le paragraphe 2.2 utilisant la formule (5) et les abaques des figures 8 et 9

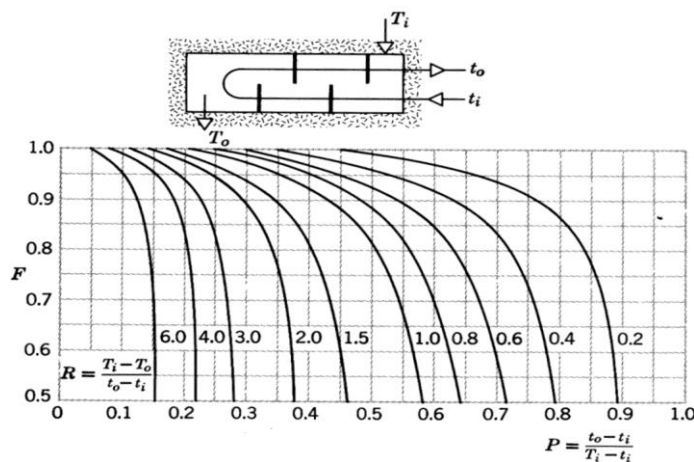


Figure 2-10 : Echangeur à calandres



Toutefois, chaque fabricant utilisant son propre schéma d'écoulement (forme et nombre des chicanes, tubes à double parcours, etc...), il sera souvent plus précis d'utiliser les abaques fournis par chaque constructeur

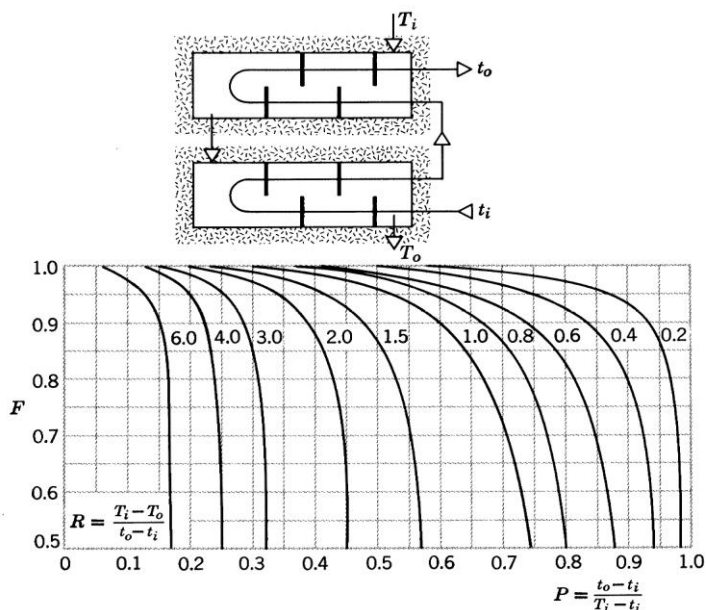


Figure 2-11 Echangeur à calandres (double Parcours)

### 3-2 ECHANGEUR A PLAQUES

Ces échangeurs sont utilisés dans les industries agro-alimentaires depuis plus de 60 ans, mais leur développement dans le bâtiment est plus récent.

Ils se distinguent par une compacité remarquable due en partie à leur coefficient K élevé, une grande facilité de nettoyage et la possibilité d'ajuster leur surface à la demande.

Leur principe de fonctionnement est décrit par la figure 10.

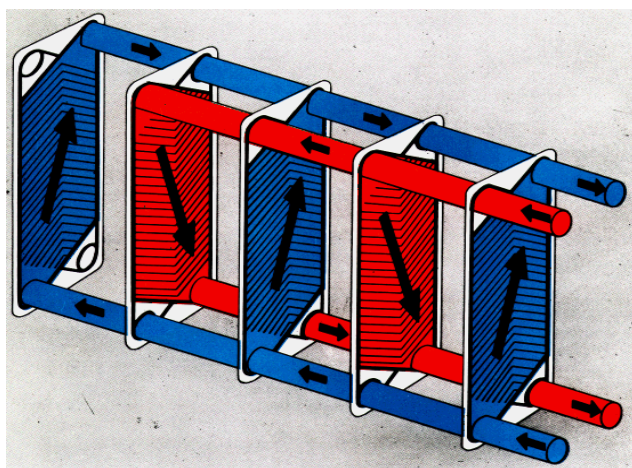


Figure 2-12 : Principe de fonctionnement d'un échangeur à plaques

Cet échangeur est constitué par un ensemble de plaques embouties équipées de joints et maintenues serrées entre 2 plateaux reliés par des tirants des serrage.

Les plaques sont généralement à chevrons pour augmenter la turbulence et fournir des points de support pour résister à la pression. Leur faible épaisseur permet l'utilisation de matériaux de haute qualité (acier inoxydable, titane, etc.) avec une bonne résistance à la corrosion. Les joints en polymères assurent

un double rôle :

- étanchéité,
- répartition des fluides dans l'échangeur.

L'échangeur de chaleur à plaques brasées utilise le même principe: pour l'échangeur de chaleur à plaques brasées, la technologie du brasage est utilisée au lieu de l'étanchéité.

Le tableau 4 présente les domaines d'utilisation des échangeurs à plaques Alfa-Laval

| Fluides                           | Pression maxi de service | Température maxi de service                       | Matériaux   |                                    | Coefficient d'échange eau/eau  | Surface maxi d'échange par appareil | Débit maxi par fluide  |
|-----------------------------------|--------------------------|---|---|------------------------------------|--------------------------------|-------------------------------------|------------------------|
|                                   |                          |   | Joint   | Plaques                            |                                |                                     |                        |
| Liquide/liquide ou Vapeur/liquide | 25 bar                   | 150°C à 200°C selon le type de joint <sup>2</sup> | Nitrile<br>Viton<br>Hypalon<br>Téflon<br>Néoprène | Inox<br>Titane<br>Titane-palladium | 3500 à 7500 W/m <sup>2</sup> K | 2200m <sup>2</sup>                  | 3500 m <sup>3</sup> /h |

Tableau 2-4 : Domaines d'utilisation des échangeurs à plaques Alfa-Laval

Le tableau 5 résume quelques caractéristiques des échangeurs à plaques et tubulaires.

| Caractéristiques                                   | Echangeur à plaques traditionnel       | Echangeur tubulaire                |
|--|--|------------------------------------|
| croisement de température <sup>3</sup>             | possible                               | impossible                         |
| approche de température                            | 1°C                                    | 5°C                                |
| raccordements                                      | dans un même plan                      | sur plusieurs plans                |
| rapport des coefficients de transmission thermique | 3 à 5                                  | 1                                  |
| rapport des poids                                  | 1                                      | 3 à 10                             |
| volume de rétention                                | faible                                 | élevé                              |
| rapport d'encombrement                             | 1                                      | 2 à 5                              |
| soudures   | aucune                                 | appareil soudé                     |
| résistance aux vibrations                          | bonne résistance                       | sensible                           |
| détection des fuites                               | aisée (par l'extérieur)                | difficile                          |
| temps nécessaire à l'ouverture                     | 15 minutes avec outil pneumatique      | 60 à 90 minutes                    |
| réparation   | joint et plaques remplaçables          | implique le remplacement des tubes |
| modification                                       | simple par ajout ou retrait de plaques | impossible                         |

Tableau 2-5 : Comparaison entre un échangeur à plaques et un échangeur tubulaire

<sup>2</sup> 225°C pour les échangeurs brasés

<sup>3</sup> Le terme «croisement» signifie ici que  $T_{fs}$  peut être supérieur à  $T_{cs}$

Remarque: le concept d'intersection peut prêter à confusion. En fait, dans certains travaux, (6), ce terme indique la possibilité que la courbe de température représentée sur la figure 1 se croise réellement. Cependant, ce phénomène néfaste ne peut affecter que de multiples échanges.

**3-2-1 Dimensionnement**

Ce sont des échangeurs à flux parallèles dans des directions opposées, donc la détermination de leur taille à l'avance ne devrait pas poser de problèmes particuliers. En fait, ce n'est pas parce que peu de fabricants fournissent des informations sur le calcul du facteur K. La plupart des fabricants utilisent un logiciel dédié pour chaque marque pour l'ajustement de la taille.

On va exposer la méthode donnée par Alfa-Laval, seule société donnant à ce jour, des informations suffisantes pour mener à bien un dimensionnement.

Le coefficient K est donné par la formule (4) dans laquelle on prendra :  $e/\lambda = 3.10^{-5} \text{ m}^2 \text{ K/W}$

$h_c$  et  $h_f$  se calculent à partir de la formule expérimentale (12) en se fixant une perte de charge admissible  $\Delta P$  :

$$h/\lambda * Pr^{1/3} = 234(\Delta P/\mu^2)^{0,3275} \quad (12)$$

$\rho$  : la masse volumique en  $\text{kg/m}^3$

$\Delta P$  : la perte de charge en kPa

$\mu$  : viscosité dynamique en cP (rappel :  $1 \text{ N s/m}^2 = 10^3$  centipoise)

On voit donc que pour un fluide et une température moyenne fixés, le coefficient h n'est fonction que de la perte de charge  $\Delta P$ .

En effet, la valeur fixe de  $toP_{ce-cs}$  correspond à la valeur de la vitesse du fluide, et correspond donc à un coefficient fixe h, quel que soit le nombre de plaques, car nous avons une série de plaques parallèles (si la perte est ignorée comme le montre la figure 11.

De plus, si on a le même fluide et les mêmes débits de part et d'autre on a :

$$\Delta P_{ce-cs} = \Delta P_{fe-fs}$$

De plus, le graphique de la figure 12 montre l'évolution de K en fonction de  $\Delta P$  et de différentes valeurs de température. Ces résultats sont obtenus en supposant que le débit d'eau de l'échangeur eau / eau est égal des deux côtés de l'échangeur et en utilisant les valeurs Re et  $e/\lambda$  recommandées par ALFA-LAVAL.

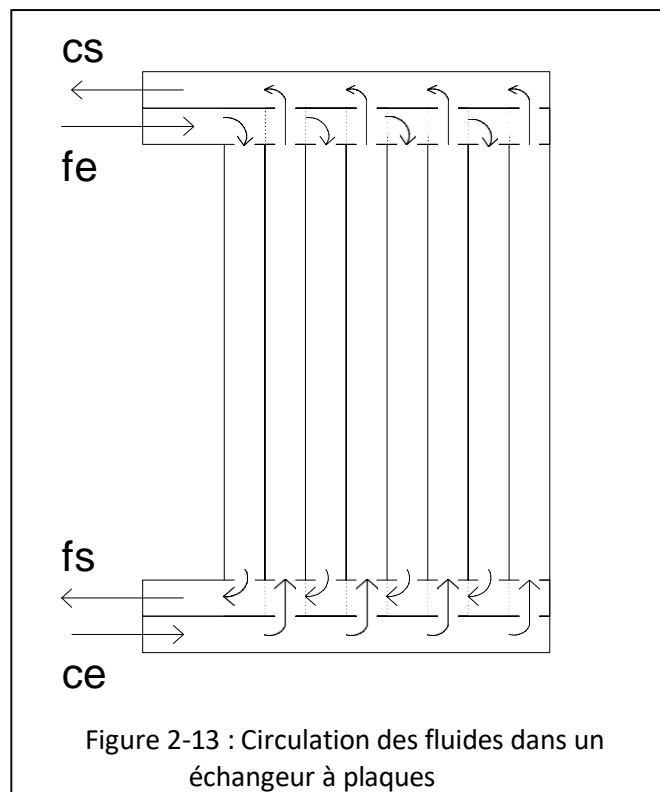


Figure 2-13 : Circulation des fluides dans un échangeur à plaques

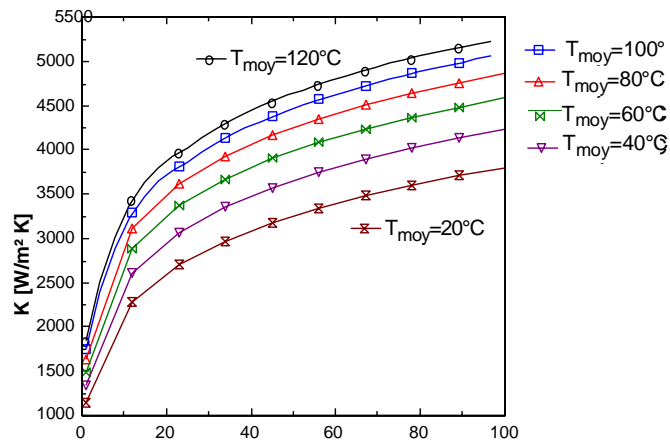


Figure 2-14 : Variation du coefficient K en fonction de  $\Delta P$  et de la température de l'eau

Une fois le coefficient K calculé en définissant la chute de pression maximale admissible, la surface d'échange est obtenue en calculant DTLM, puis en utilisant la formule (2) pour déterminer la taille. Sélectionnez ensuite le type de plaque en fonction du débit et de la valeur limite NUT indiqués dans le tableau 6.

| Type   | Diamètre raccords (mm) | Débit maxi eau (m <sup>3</sup> /h) | Nombre d'unités de transfert mini/maxi | Surface d'échange d'une plaque (1 coté) (m <sup>2</sup> ) | Surface maxi de l'échangeur (m <sup>2</sup> ) |
|--------|------------------------|------------------------------------|--|---|---|
| A45    | 450                    | 4000                               | 1,5/4                                  | 2,25  | 1600  |
| AX35   | 350                    | 2300                               | 2/5                                    | 2,70  | 1900  |
| A35    | 350                    | 2300                               | 0,6/1,8                                | 2   | 1200  |
| AX30-B | 300                    | 1700                               | 1/4,2                                  | 1,61  | 1000  |
| A20-B  | 200                    | 750                                | 1,5/4                                  | 1,07  | 640   |
| AM20   | 200                    | 750                                | 0,4/1,2                                | 0,79  | 400   |
| AM20-B | 200                    | 750                                | 0,6/2,9                                | 0,89  | 540   |
| AK20   | 200                    | 750                                | 0,3/0,8                                | 0,50  | 230   |
| A15-B  | 150                    | 400                                | 1,2/5,5                                | 0,75  | 430   |
| AM10   | 100                    | 160                                | 0,3/1                                  | 0,43  | 260   |
| A10-B  | 100                    | 160                                | 1/2,8                                  | 0,24  | 100   |

Tableau 2-6 : Caractéristiques des différents modèles d'échangeurs à plaques

### **3-3 Evolutions technologiques récentes (schémas sur diapos ou transparents)**

- échangeur tubulaire à plaques : pour programmes asymétriques avec un rapport de débit de 2 à 1 pour des propriétés physiques et des pertes de charge identiques
- échangeur à plaques à canal large : pour des liquides chargés ou très visqueux
- échangeur à plaques à cassettes : pour des liquides agressifs
- échangeur à plaques à double paroi : dans le cas de 2 fluides dont le mélange peut s'avérer dangereux
- échangeur à plaques en graphite « Diabon F » : pour liquides trop agressifs pour les alliages habituels
- joints sans colle : facilitent la maintenance et minimisent les coûts d'entretien liés aux arrêts de production.

**CHAPITRE 3 :**  
**STAGE PRATIQUE**

**1- L'échangeur étudié 10-E-78A :**



Figure 3-1 : échangeur 10-E-78A nouveau

**2- Matériau de fabrication de l'échangeur:**

-acier au carbone **A179**

La composition chimique :

| Ti    | Ni    | Cr    | Fe    | Mn    | Cu   | Nb    | Mo   | V     |
|-------|-------|-------|-------|-------|------|-------|------|-------|
| 0,047 | 0,046 | 0,019 | 98,37 | 0,055 | 0,06 | 0,005 | 0,09 | 0,015 |

Tableau 3-1 : composition chimique de l'acier au carbone 179



Figure 3-2 : Appreil(DRX) utilisé pour donner la composition chimique du metal.

3- Dimensionnement de l'échangeur :

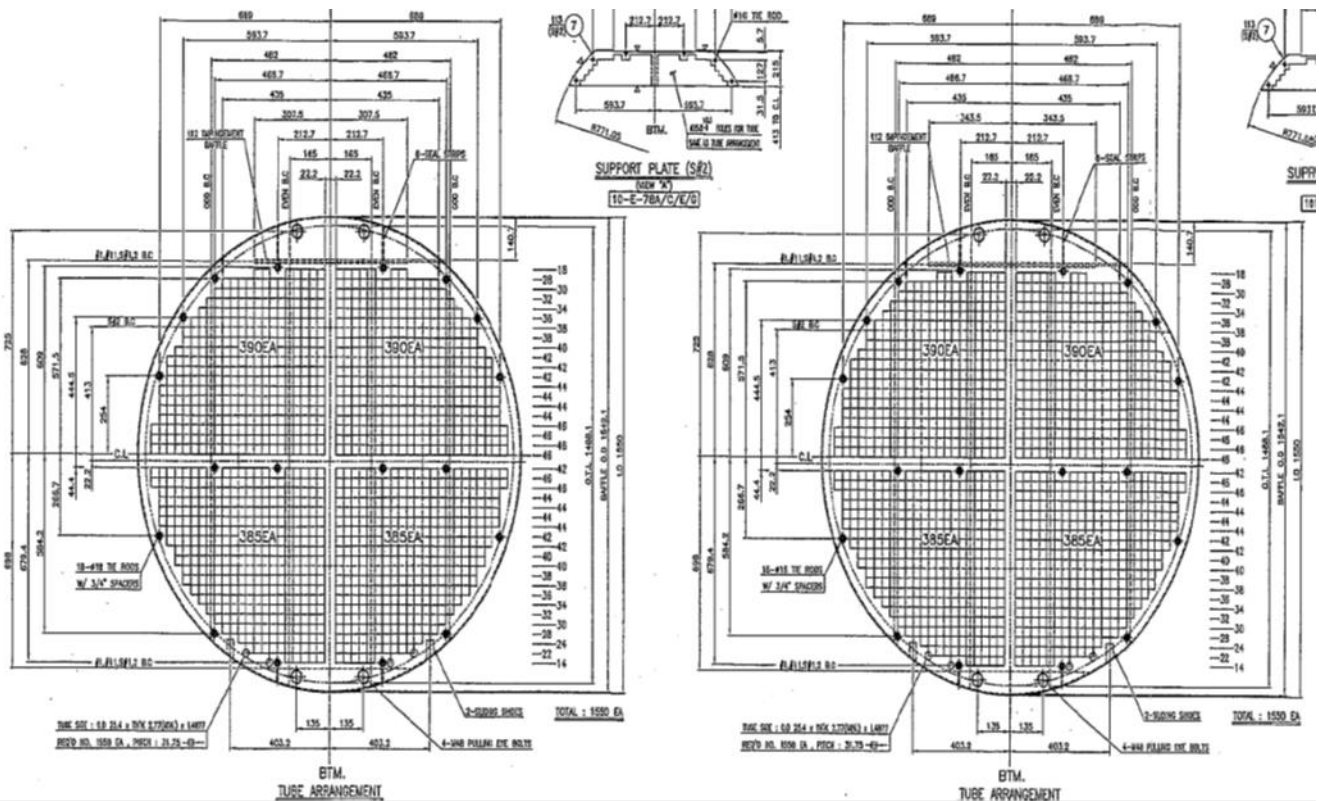


Figure 3-3 : coupe horizontale de l'emplacement des tubes d'échangeur(coté calandre). [42]

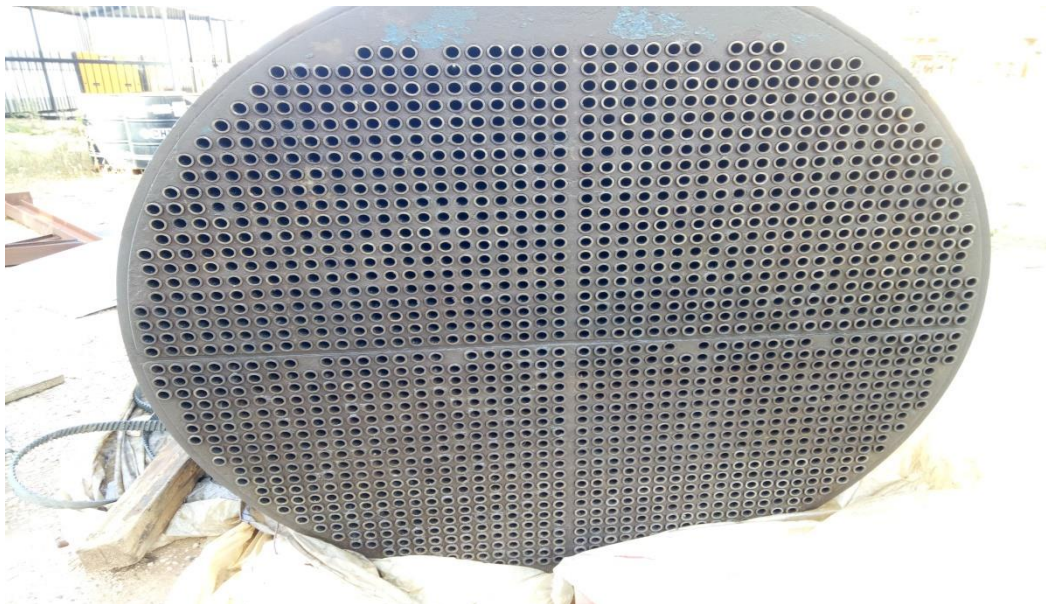


Figure 3-4 : photo réel de l'échangeur.



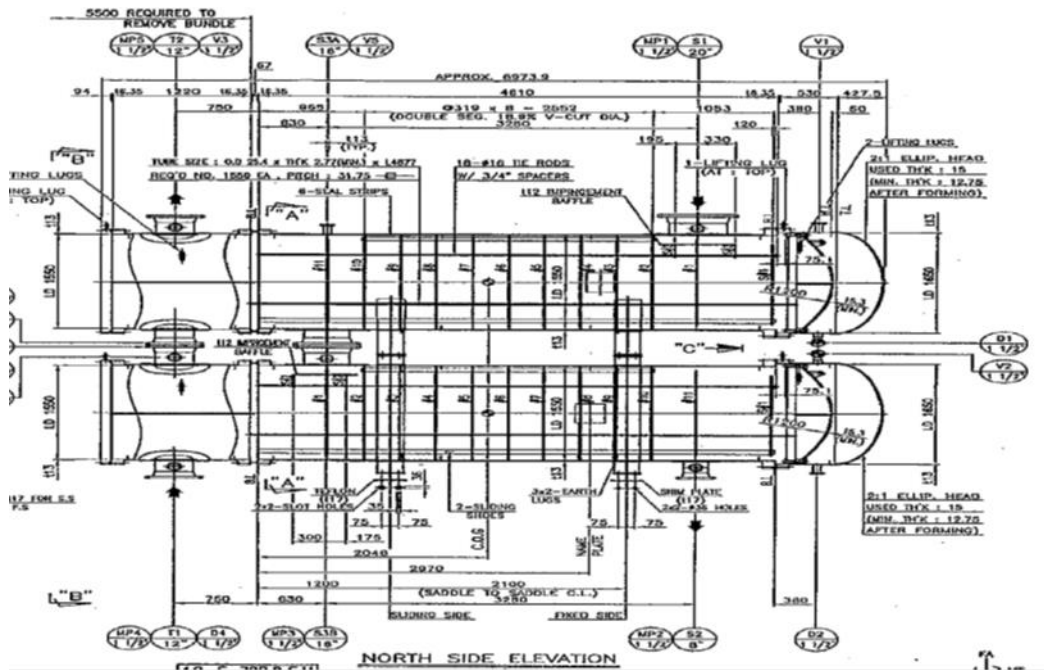


Figure 3-5 : coupe verticale de les différents parties de l'intérieur de l'échangeur. [42]



Figure 3-6 : photo réel vertical de l'échangeur.

4-Emplacement des anodes sacrificiel :

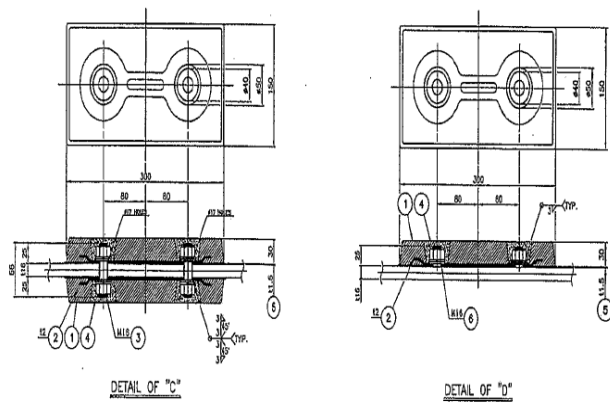
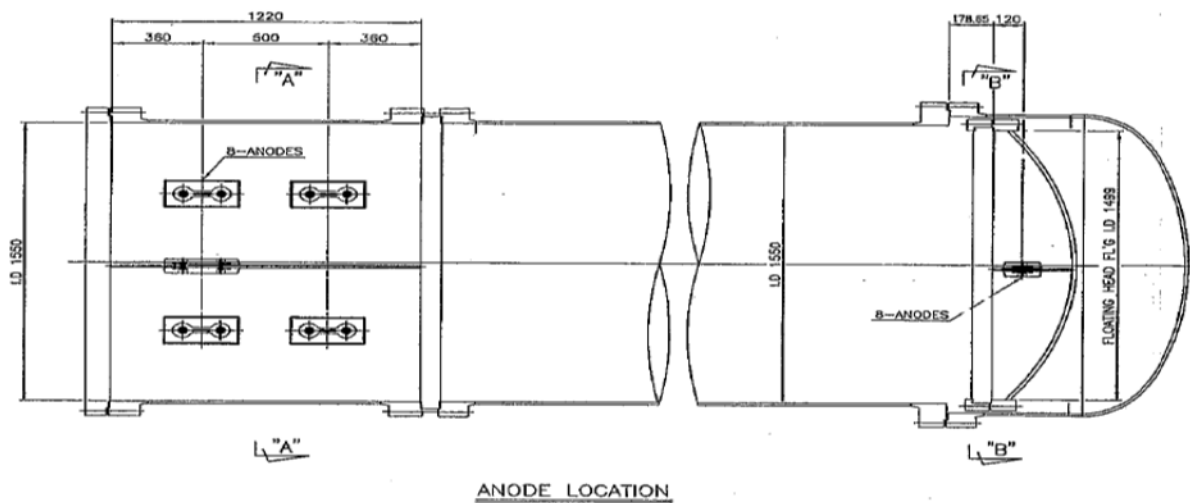


Figure 3-7 : dimensionnement de l'anode[42]

Figure 3-8 : une anode sacrificiel(en Zn)

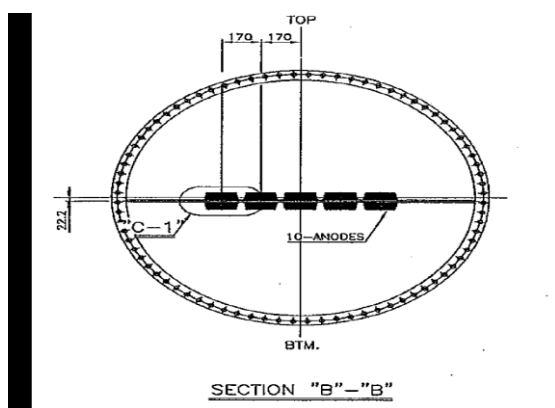


Figure 3-9 : l'emplacement des anodes sur l'échangeur [42]

figure 3-10 : photo réel des anodes sacrificiels

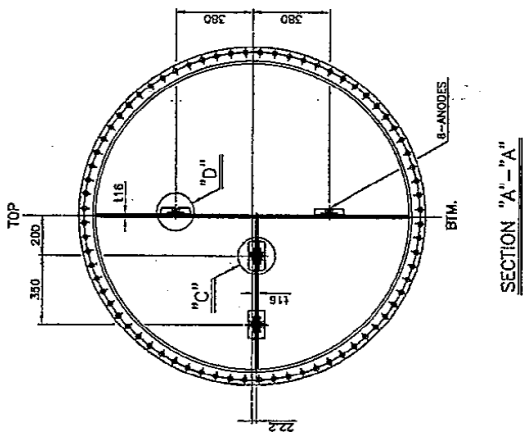


Figure 3-11 : l'autre emplacement des anodes sacrificiels[42]

- Le problème que ce échangeur a est la corrosion de ces tubes et la formation de tartre :



Figure 3-12: échangeur après l'utilisation (corrosion –érosion)



Figures 3-13 : l'effet terrible de corrosion sur l'échangeur.

## 5-les produits utilisé dans les tours de refroidissement de la raffinerie de skikda :

NALCO 3DT 227C (constitue de :l'acide chlorydrique , chlorure de zinc et Tolyltriazole) : anticorrosion , antitartre et dispersante.

NALCO 7330 : un biocide de synthèse non oxydant.

NALCO 7313 ( constitue de :Butoxy-2 éthanol , l'alcool oxyalkylé , Diéthanolamine , Héxylène glycol) : biodispersant des pollutions des hydrocarbures.

NALCO 37550(constitue : D-Glucopyranose et oligometric): biodetergent.

HYPOCHLORITE de sodium a 12,5 % ou l'eau JAVEL a 48° chlorométrique.

-Ces produits sont met dans l'eau avec des doses et des temps bien défini pour maintenir la propreté de l'eau.



Figure 3-14 : NALCO 3DT

## 6-Les analyses de l'eau circulé dans l'échangeur : (Qualité de l'eau brute)

| Sr | Paramètre                     | Unité     | Valeur  |
|----|-------------------------------|-----------|---------|
| 1  | pH                            | -         | 8       |
| 2  | Turbidité                     | NTU       | 1 Max   |
| 3  | Solides en suspension         | ppm       | Néant   |
| 4  | Total solides dissus(TDS)     | ppm       | 453     |
| 5  | Durtée Ca-comme CaCO3         | ppm       | 69      |
| 6  | Sodium comme CaCO3            | ppm       | 273     |
| 7  | Potassium comme CaCO3         | ppm       | 7       |
| 8  | Magnésium comme CaCO3         | ppm       | 13      |
| 9  | Alcalinité M-comme CaCO3      | ppm       | 67      |
| 10 | Durtée totale comme CaCO3     | ppm       | 82      |
| 11 | Chlorures comme Cl            | ppm       | 201     |
| 12 | Sulfates comme SO4            | ppm       | 7       |
| 13 | Silice reactive SiO2          | ppm       | 0.01    |
| 14 | Fer totale comme Fe           | ppm       | 0.2 Max |
| 15 | Matière organique comme KMnO4 | ppm       | 5 Max   |
| 16 | Cu <sup>+2</sup>              | ppm       | 1 Max   |
| 17 | Conductivité                  | μ mhos/cm | 728     |

Tableau 3-2 : l'eau brute

## 7- Les analyses que nous avons pris :

Les analyses qu'on a prend sont pendant notre durée de stage ce sont les valeurs prend de la sortie de l'eau de la tour(tour A) et la retour après la circulation dans les unités, les résultats sont :

| Les jours  | L'eau  | pH  | Cond | TA     | TAC | Th  | Ca <sup>+</sup> | M<br>g <sup>+</sup> | cl <sup>-</sup> | SiO <sub>3</sub> <sup>-</sup> | Po<br>4 <sup>-3</sup> | fe   | HC     | DC<br>O | Rcl <sub>2</sub> | I.S  | I.S.I |  |
|------------|--------|-----|------|--------|-----|-----|-----------------|---------------------|-----------------|-------------------------------|-----------------------|------|--------|---------|------------------|------|-------|--|
| 11/03/2020 | départ | 7,9 | 1617 | <0,5   | 20  | 135 | 85              | 50                  | 693             | -                             | -                     | -    | -      | -       | 0,40             | -0,4 | 8,7   |  |
|            | retour | -   | -    | -      | -   | -   | -               | -                   | -               | -                             | -                     | -    | 1,9    | -       | -                | -    | -     |  |
| 12/03/2020 | départ | 7,9 | 1593 | <0,5   | 19  | 185 | 160             | 25                  | 827             | -                             | -                     | -    | -      | -       | abs              | -0,5 | 8,9   |  |
|            | retour | -   | -    | -      | -   | -   | -               | -                   | -               | -                             | -                     | -    | 2,7    | -       | -                | -    | -     |  |
| 01/03/2020 | départ | 7,7 | 733  | Coloré |     |     |                 |                     |                 |                               |                       | 5,19 | Coloré |         |                  |      |       |  |
|            | retour | -   | -    | -      | -   | -   | -               | -                   | -               | -                             | -                     | -    | 1,6    | -       | -                | -    | -     |  |
| 02/03/2020 | départ | 7,8 | 898  | -      | -   | -   | -               | -                   | -               | -                             | -                     | -    | -      | -       | Abs              | -    | -     |  |
|            | retour | -   | -    | -      | -   | -   | -               | -                   | -               | -                             | -                     | -    | 1,9    | -       | -                | -    | -     |  |
| 03/03/2020 | départ | 7,9 | 1189 | coloré |     |     |                 |                     |                 | 0,11                          | -                     | 2,05 | -      | 0,47    | Abs              | -    | -     |  |
|            | retour | -   | -    | -      | -   | -   | -               | -                   | -               | -                             | -                     | -    | 0,7    | -       | -                | -    | -     |  |
| 04/03/2020 | départ | 7,9 | 2080 | -      | -   | -   | -               | -                   | -               | -                             | -                     | -    | -      | -       | 0,1              | -    | -     |  |
|            | retour | -   | -    | -      | -   | -   | -               | -                   | -               | -                             | -                     | -    | 1,0    | -       | -                | -    | -     |  |
| 05/03/2020 | départ | 7,8 | 1449 | coloré |     |     |                 |                     |                 |                               |                       |      |        |         |                  |      |       |  |
|            | retour | -   | -    | -      | -   | -   | -               | -                   | -               | -                             | -                     | -    | -      | 0,5     | -                | -    | -     |  |
| 08/03/2020 | départ | 8,0 | 1995 | <0,5   | 19  | 155 | 125             | 30                  | 980             | 0,1                           | -                     | 0,35 | -      | 1,15    | 0,24             | -0,5 | 9     |  |
|            | retour | -   | -    | -      | -   | -   | -               | -                   | -               | -                             | -                     | -    | 1,2    | -       | -                | -    | -     |  |
| 09/03/2020 | départ | 7,6 | 1148 | 20,5   | 17  | 150 | 110             | 40                  | 809,4           | -                             | -                     | -    | -      | -       | abs              | -1,1 | 9,8   |  |
|            | retour | -   | -    | -      | -   | -   | -               | -                   | -               | -                             | -                     | -    | 1,7    | -       | -                | -    | -     |  |
| 10/03/2020 | départ | 7,8 | 1734 | <0,5   | 19  | 130 | 86              | 44                  | 672             | 0,22                          | -                     | 2,24 | -      | 0,4     | 0,42             | -0,9 | 9,6   |  |
|            | retour | -   | -    | -      | -   | -   | -               | -                   | -               | -                             | -                     | -    | 2,5    | -       | -                | -    | -     |  |

Tableau 3-3 : les analyses de l'eau de refroidissement cirulé de la tour A(en stage)

### 6-1 La qualité de la tour A (état excellente) :

|                              |                  |
|------------------------------|------------------|
| pH                           | 8 → 8,1          |
| Conductivité                 | -3000 ms/cm      |
| TH                           | <100             |
| TAC                          | 20 → 25          |
| Chlorure                     | -400 mg/l        |
| Fer                          | -1 mg/l          |
| Zinc                         | 0,4 → 1 mg/L     |
| PO <sub>4</sub> ortho        | -2 mg/l          |
| PO <sub>4</sub> totale       | -2 mg/l          |
| Polymère réactive            | 7,5 mg/L         |
| Biocide oxydant              | 0,5 → 1 ppm      |
| Bactérie sulfato-réductrices | absence          |
| Flore Aérobie totale         | -10 <sup>3</sup> |
| R12NARD index                | ---              |
| Matières en sous             | -10 mg/L         |

Tableau 3-4 : la qualité de l'eau de la tour A

### **8- Résultat et discussion :**

Après avoir vu les chiffres de la tour dans son état excellente et les analyses quotidiennes, en a remarqué que l'eau de la tour A qui circule dans l'unité TOPPING 1 est dans état désagréable , ce qui explique la dégradation terrible par effet de la corrosion dans les tubes des échangeurs et la formation de tartre, aussi on a vu que la date d'expiration de l'inhibiteur de corrosion NALCO 3DT est passé et s'explique que-il ne pas fait son rôle d'inhiber la corrosion et protéger l'intérieur de les tubes pour prolonger sa durée de vie.

**CONCLUSION**

CONCLUSION

**GENERALE**

GENERALE

### **Conclusion générale :**

La corrosion des échangeurs de chaleur et des tuyaux dans le circuit de refroidissement peut entraîner de graves dommages, y compris des arrêts, qui peuvent entraîner des coûts économiques considérables. De plus, après la fuite dans l'échangeur de chaleur, le dégazage du circuit de refroidissement contenant des métaux lourds ou d'autres substances dangereuses dans le circuit d'eau de refroidissement affectera fortement l'impact environnemental.

Les stratégies de traitement anti-corrosion couramment utilisées pour protéger les équipements de refroidissement impliquent des inhibiteurs à base de phosphate, phosphonate, zinc et leurs mélanges. Si la protection apportée par ces différents inhibiteurs est généralement efficace, en revanche, ces réactifs chimiques présentent également certains inconvénients: faible biodégradabilité, présence de métaux lourds, nécessité d'ajouter des acides inorganiques pour contrôler le pH de l'eau en circulation, etc. Par conséquent, il existe un réel besoin d'inhibiteurs de corrosion avec de meilleures caractéristiques environnementales et une efficacité de protection contre la corrosion significative voire optimisée. Nos recherches actuelles montrent les résultats préliminaires de deux nouveaux inhibiteurs de corrosion. Les deux molécules sont formulées avec des acides organiques modifiés et ne contiennent aucun métal, et l'une d'elles ne contient pas de phosphore.

En présence d'acier au carbone, la concentration de chaque inhibiteur de corrosion est différente, la qualité de l'eau est différente (plus ou moins corrosive), et le test d'efficacité de corrosion est réalisé. Tests de corrosion accélérés à l'aide de techniques électrochimiques, telles que la voltampérométrie, la mesure de la résistance de polarisation (spectroscopie d'impédance électrochimique) et des tests en laboratoire à long terme à l'aide d'un simulateur pilote de circuit d'eau. De plus, l'efficacité anti-tartre de ces nouveaux inhibiteurs a été étudiée.



**REFERENCES**

REFERENCES

**BIBLIOGRAPHI-**

BIBLIOGRAPHI-

**QUES**

QUES

- [1] S. Chikhi, Etude du comportement des produits multifonctionnels sur un acier au carbone A53 Grade B dans une eau de réinjection de la région de Rhourd El Baguel. Mémoire de master académique en science de la matière. Université M'HAMED BOUGARRA – Boumerdes – Algérie, 2017.
- [2] A. Ettaqi, A. Irhzo, R. Drissidaoudi, M. Zertoubi, « Influence de l'addition d'inhibiteurs azotés sur le comportement électrochimique et métallurgique de fontes au chrome – Nickel (pompe d'extraction) en milieu acide », Afrique science, décembre 2004.
- [3] A. Olivier comment accroître et renouveler les réserves du pétrole et de gaz ? Institut Français du Pétrole, Paris, 2005.
- [4] J. L. Duplan, L'eau dans la production de carburants, Ed Institut Français du Pétrole panorama, p 02, 2011.
- [5] A. L. de Marignan, comment augmenter le taux de récupération de pétrole dans le gisement, Ed Institut Français du Pétrole, Mai, p 02, 2005.
- [6] M. Latil, Techniques d'exploitation pétrolière, Ed Technip, 1975, Ch 3, p 45.
- [7] K. Hamadache, H. Kerrouche, Etude du comportement de deux inhibiteurs de corrosion A et B dans différents rapports de mélange par différentes techniques électrochimiques. Mémoire d'étude universitaire appliquée en chimie de laboratoire. Université M'hamed Bougarra – Boumerdes – Algérie, 2005.
- [8] N. Brinis, Application des polymères conducteurs à l'inhibition de la corrosion de l'acier, Synthèse d'inhibiteurs solubles et élaboration de revêtement auto-cicatrisants. Mémoire de Magister en Génie des procédés option génie chimique. Université A. Mira – Béjaia – Algérie, 2009.
- [9] Djouhri Lyés, Titouah Khaled, Etude de l'efficacité d'inhibiteur de corrosion en présence des produits de traitements dans l'industrie pétrolière. Mémoire fin d'étude universitaire appliquée en chimie de laboratoire. Université Université A. MIRA – BEJAIA – Algérie, 2018.
- [10] C7-2-A
- [11] [11] J. L. Crolet et G. Beranger, Corrosion en milieu aqueux des métaux et alliages, M150, Technique de l'ingénieur. [19] F. Z. Mennad, Etude de corrosion de l'acier API5CTGradN 80 dans des puits d'injection d'eau par l'inhibiteur N-(2-aminoéthyl), mémoire de master. Université Kasdi Merbeh, Ouargla-Algerie, 2015.2000.
- [18] C. Fiaud, Inhibiteurs de corrosion, M160, Technique de l'ingénieur, 2000.
- [19] <http://www.concretecorrosion.net/> – consulter l'article de Christophe Carde, Directeur Technique du LERM, sur ce sujet dans la revue Béton[s] Magazine.
- [20] Incropera F.P., De Witt D.P., Fundamentals of heat and mass transfer, Wiley & Sons, 1990.
- [21] Parker J. D., MC Quiston F. C., Heating, Ventilating, and air conditioning - analysis and design, Ed. Wiley & Sons, 1994.
- [22] Kays W.M., London A.L., Compact heat exchangers, 3rd Ed., Mc Graw-Hill, New York, 1984.
- [23] Alfa-Laval, Les cahiers Alfa-Laval, Spécial Thermique, N°17, 1987.
- [24] Documentations techniques fabricants ( Mueller, Superchanger, Alfa-Laval).
- [25] Padet J., Echangeurs thermiques, Masson, 1993. (BIB'INSA)

- [26] Les échangeurs, B. Bourret
- [27] <http://www.hvac.alfalaval.com/>
- [28] <http://www.alfalaval.se/>
- [29] <https://thermofin.net/fr/produits/caleos-echangeurs-faisceau-tubulaire>
- [30] page 11 ,protection cathodique, Kadoum Noureddine
- [31] <https://www.blinkerfrance.com/blog/les-causes-de-la-corrosion-des-metaux-et-comment-la-resoudre/picadura/>
- [32] [https://www.wikiwand.com/fr/Acier\\_inoxydable](https://www.wikiwand.com/fr/Acier_inoxydable)
- [33] [https://www.cdcorrosion.com/mode\\_corrosion/corrosion\\_contrainte.htm](https://www.cdcorrosion.com/mode_corrosion/corrosion_contrainte.htm)
- [34] <https://calorifugeur-avise.com/corrosion-sous-isolation/>
- [35] [https://www.cdcorrosion.com/mode\\_corrosion/corrosion\\_erosion.htm](https://www.cdcorrosion.com/mode_corrosion/corrosion_erosion.htm)
- [36] [https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/materiaux-th11/corrosion-et-vieillessement-phenomenes-et-mecanismes-42371210/fragilisation-des-aciers-par-l-hydrogene-31\\_mecanismes-m176/](https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/materiaux-th11/corrosion-et-vieillessement-phenomenes-et-mecanismes-42371210/fragilisation-des-aciers-par-l-hydrogene-31_mecanismes-m176/)
- [37] <http://traitementsetmateriaux.fr/Imprimer/fiche/?id=757&from=actualites&type=archive>
- [38] <https://www.tlv.com/global/FR/steam-theory/corrosion.html>
- [39] <http://www.ufip.fr/uploads/img/A3%20Slides%20GEMER%202014%20Corrosion%20de%20acier%20carbone%20par%20le%20soufre%20+%C3%A1%20chaud%20%20impact%20de%20la%20teneur%20en%20silicium%20rev%20dD.pdf>
- [40] <https://www.cerib.com/wp-content/uploads/2017/05/276-e-corrosion-armatures-interet-inhibiteur-corrosion.pdf>
- [41] [https://www.researchgate.net/figure/Comparaison-de-lefficacite-des-inhibiteurs-chimiques-vis-a-vis-de-la-formation-du\\_fig32\\_303719526](https://www.researchgate.net/figure/Comparaison-de-lefficacite-des-inhibiteurs-chimiques-vis-a-vis-de-la-formation-du_fig32_303719526)
- [42] 10-E 78-A,B,C,D,E,F,G,H/dessins, Document no.6 Plan détaillé avec index ,Dossier d'étude finale , Contrat SECL Vol 1sur 2 , SONATRACH et SAMSUNG ENGINEERING co.,LTD.SEOUL KOREA