



وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
جامعة عبد الحميد ابن باديس مستغانم
Université Abdelhamid Ibn Badis de Mostaganem
كلية العلوم و التكنولوجيا
Faculté des Sciences et de la Technologie



N° d'ordre : M2...../IP/2022

MEMOIRE DE FIN D'ETUDE DE MASTER ACADEMIQUE

Filière : Industries Pétrochimiques

Spécialité : Génie Pétrochimique

ETUDE DE LIQUEFACTION DU CHLORE AU NIVEAU DE L'ENTREPRISE ADWAN

Présenté par :

BRIDJA Fatma

Soutenu le 07/07/2022 devant le jury composé de :

Président :	Y. SEFIR	MCA	Université de Mostaganem
Examineur :	M. A. KHEDIM	MAA	Université de Mostaganem
Encadreur :	C. BENDENIA	MCA	Université de Mostaganem

Année Universitaire : 2021 / 2022

Dédicace

Je dédie ce mémoire particulièrement,

*Aux personnes qui ont partagé avec moi cette année en toutes
ses couleurs:*

*Mon symbole de patience, d'amour et de tendresse Ma très
chère mère.*

*Mon très cher père, cette flamme de sacrifice et d'honnêteté
que je remercie pour tout ce qu'il ma donné.*

Mes frères, ma source de joie qui m'ont toujours encouragé.

*À tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation
de ce travail.*

BRIDJA FATMA.

Remerciements

Je tiens à remercier en premier lieu DIEU le tout puissant pour nous avoir donné : le courage, la patience et la bonne santé afin de mener ce projet à terme.

Un grand merci tout particulier à Madame **Chahrazed BENDENIA**, Maître de conférences A, à l'Université de Mostaganem, qui a accepté de m'encadrer. Je la remercie aussi pour sa gentillesse, ses conseils, ses encouragements, ses remarques et surtout son aide précieuse.

Je tiens à exprimer toute mes reconnaissances à Madame **Yamina SEFIR**, Maître de conférences A, à l'Université de Mostaganem, d'avoir accepté de présider le jury, c'est un grand honneur pour moi.

Mes vifs remerciements vont, également, à Monsieur **Amine KHEDIM**, Maître Assistant A, à l'université de Mostaganem, d'avoir accepté d'examiner ce travail et pour sa disponibilité.

J'adresse aussi mes remerciements à Madame **Souhila BENDENIA** et **Madame Hanaa DIB** de m'avoir conseillé et guidé dans ce travail.

Mes sincères remerciements sont dédiés également à Monsieur **BENOURRAD Mohammed**, Monsieur **Samir BRAHMA**, les ingénieurs de **DCS Hakim et Mehdi** et toutes personnes ayant contribué, de près ou de loin, à l'aboutissement de ce travail trouvent ici le témoignage de mon profond respect.

LISTE DES ABREVIATIONS

ACIC : ADWAN, Chemicals Industries Company

TEMA : Standards of Tubular Exchanger Manufacturers Association (une association professionnelle de constructeurs d'échangeurs)

DEG : diéthylenglycol

PVC : polychlorure de vinyle

NaOH : la soude caustique

HCl : acide chlorhydrique

NaCl : chlorure de sodium

OH⁻ : ion d'hydroxyde

Cl₂ : chlore liquide

H₂ : hydrogène

FeCl₃ : chlorure ferrique

H₂SO₄ : l'acide sulfurique

LISTE DES FIGURES

CHAPITRE I

Figure I.1. ADWAN Chemicals Industries Company (ACIC), Algeria.....	4
Figure I.2. Situation géographique du complexe ADWAN Chemicals Cie Algérie SPA.....	5
Figure I.3. Organigramme de l'entreprise ADWAN Chemicals.....	6
Figure I.4. Présentation géographique des unités d'activités.....	9
Figure I.5. Industrie de production de sable et dérivés.....	10
Figure I.6. Unité de traitement du sable industriel :(a) Lavage de sable, (b) Séchage de sable.....	10
Figure I.7. Farine de silice.....	11
Figure I.8. Unité de production de silicate de sodium	12
Figure I.9. Usine de production de chlore et dérivés	13
Figure I.10. Laboratoire d'analyse de sable.....	14
Figure I.11. Laboratoire d'analyse de chlore et dérivés	14

CHAPITRE II

Figure II.1. Structure chimique du chlore.....	16
Figure II.2. Diagramme de phases du chlore	18
Figure II.3. Usages du chlore	19
Figure II.4. Etapes de liquéfaction du chlore	21
Figure II.5. Sel brut (NaCl).....	22
Figure II.6. (a) tapis, (b) Saturateur	22
Figure II.7. Schéma de manipulation du sel et saturation de la saumure.....	23

Figure II. 8. (a) Réacteur T102, (b) Produits chimiques.....	24
Figure II.9. Schéma de traitement de la saumure.....	24
Figure II.10. Décanteur(T108).....	25
Figure II. 11. Schéma de filtration de la saumure	25
Figure II. 12. Etapes de filtration de la saumure : (a) Formation de pre-coat, (b) Formation de gâteau de filtration, (c) Enlèvement de gâteau de filtre.....	26
Figure II. 13. Unité de déionisation de la saumure	26
Figure II.14. Les colonnes V115 A, B, C.....	27
Figure II.15. Schéma du processus d'électrolyse de la saumure.....	29
Figure II.16. Electrolyse à membrane.....	31
Figure II.17. Schéma du processus de refroidissement et séchage du chlore gazeux.....	33
Figure II.18. Schéma de compression du chlore.....	35
Figure II.19. Schéma de principe de liquéfaction du chlore.....	37
Figure II. 20. Réservoirs de stockage.....	37

CHAPITRE III

Figure III.1. Echangeurs à tubes-calendre.....	40
Figure III.2. Echangeurs à plaques.....	41
Figure III.3. Principe de fonctionnement d'un échangeur de chaleur : exemple simplifié, analogie électrique et notations principales.....	42
Figure III.4. Types d'échangeurs suivant la direction des écoulements.....	43
Figure III.5. Échangeur à co-courants.....	43
Figure III.6. Échangeur de chaleur à contre-courants.....	44
Figure III.7. Échangeur de chaleur à courants croisés.....	44
Figure III.8. Échangeur à tube-calandre.....	45

Figure III.9. L'évolution de l'efficacité de l'échangeur de chaleur en fonction de U55

Figure III.10. Influence de la surface d'échange S sur L'efficacité de L'échangeur de
Chaleur.....56

Figure III.11. L'évolution de l'efficacité de l'échangeur de chaleur en fonction du flux de
chaleur échangé.....57

Figure III.12. L'évolution de l'efficacité de l'échangeur de chaleur en fonction de T58

LISTE DES TABLEAUX

CHAPITRE. III

Tableau III.1. Données réelles de l'échangeur de chaleur principal48

Tableau III.2. Evolution de l'efficacité (ϵ) en fonction du coefficient d'échange global (U).....55

Tableau III.3. Variation de l'efficacité de l'échangeur de chaleur (ϵ) en fonction de la surface (S).....56

Tableau III.4. Développement de l'efficacité (ϵ) en fonction du flux (Φ).....57

Tableau III.5. Progression de l'efficacité (ϵ) en fonction de la température (T).....58

SOMMAIRE

DEDICACE

REMERCIEMENT

LISTE DES ABREVIATION

LISTE DES FIGURES

LISTE DES TABLEAUX

INTRODUCTION GENERAL.....01

CHAPITRE I : PRESENTATION DE L'ENTREPRISE ADWAN CHEMICAL CIE(ALGERIA)

I.1.INTRODUCTION.....04

I.2. SITUATION GEOGRAPHIQUE.....05

I.3. STRUCTURE ORGANISATIONNELLE DE L'ENTREPRISE.....05

I.4. UTILITES DES DIRECTIONS.....07

I.4.1. Direction générale.....07

I.4.2. Direction des projets.....07

I.4.3. Direction des ventes.....07

I.4.4. Direction d'approvisionnement.....07

I.4.5. Direction d'administration et finances.....07

I.4.6. Direction technique.....08

I.5. ACTIVITES DU COMPLEXE.....08

I.5.1. Industrie de sable.....09

I.5.2. Industrie de chlore et dérivés.....12

I.6. LABORATOIRE CONTROLE DE QUALITE.....13

I.7. CONCLUSION.....15

CHAPITRE II : PROCESSUS DE LIQUEFACTION DU CHLORE

II.1 INTRODUCTION.....16

II.2. DEFINITION.....16

II.3. PROPRIETES DU CHLORE.....17

II.4. PRINCIPAUX USAGES DU CHLORE.....18

II.4.1. Environnement.....18

II.4.2. Pâtes et papiers.....18

II.4.3. Industrie chimique.....18

II.4.4. Industrie des métaux.....19

II.4.5. Electronique.....19

II.5. PROCEDES DE LIQUEFACTION DU CHLORE.....19

II.5. 1. Production du chlore.....19

II.5.2. Etapes de production du chlore.....20

II.5.2.1. Saturation.....22

II.5.2.2. Traitement chimique de la saumure.....23

II.5.2.3. Traitement physique de la saumure.....24

II.5.2.4. Filtration de la saumure.....25

II.5.2.5. Déionisation (purification) de la saumure.....26

II.5.2.6.L'électrolyse.....27

II.5.3. Obtention du chlore.....30

II.5.3. 1. Electrolyse à membrane30

II.5.4. Refroidissement et séchage chlore.....31

II.5.5. Compression et liquéfaction du chlore.....	34
II.5.5. 1. Compression du chlore.....	34
II.5.5. 2. Liquéfaction du chlore.....	36
II.5.6. Stockage et remplissage du chlore liquide.....	37
II.6. CONCLUSION.....	38

CHAPITRE III : ECHANGEUR DE CHALEUR

III.1. INTRODUCTION.....	39
III.2. ECHANGEURS DE CHALEUR.....	39
III.2.1. Définition d'un échangeur de chaleur.....	39
III.2.2. Principaux types d'échangeurs thermiques	39
III.2.2.1. Echangeurs à tubes et calandre.....	40
III.2.2.2. Echangeurs à plaques.....	40
III.2.3. Principe de fonctionnement de l'échangeur de chaleur	41
III.3.4. Critères de classement des échangeurs.....	42
III.3.4.1. Type de contact.....	42
Échangeur à contact direct.....	42
Échangeur à contact indirect.....	42
III.3.4.2. Classement suivant la direction des écoulements.....	42
Les échangeurs à courants parallèles (co-courants).....	43
Les échangeurs à contre-courants.....	43
Les échangeurs à courants croisés.....	44
III.3.4.3. Classement suivant la nature du matériau de la paroi d'échange.....	44

III.3.4.4. Classement suivant la construction de la géométrie.....	45
III.3.5. Les échangeurs à fiscaux tubulaires et calandre.....	45
III.4. CALCUL THERMIQUE DE L'ECHANGEUR TUBULAIRE HE-162.....	46
III.4.1. Calcul de l'efficacité de l'échangeur de chaleur.....	46
III.4.1.1. Définition de l'efficacité.....	46
III.4.1.2. Méthodes de calcul de l'efficacité dans l'échangeur de chaleur.....	46
III.4.1.3. Etude de l'efficacité dans l'échangeur de chaleur par la méthode ΔT_{lm}	47
III.4.1.4. Calcul de l'écart logarithmique moyen de température.....	48
III.4.1.5. Calcul du débit thermique unitaire pour les deux fluides.....	49
III.4.1.6. Calcule ϕ réel échangé.....	49
III.4.1.7. Calcul de température différentielle maximale.....	49
III.4.1.8. Calcul flux de chaleur maximal (ϕ max possible).....	49
III.4.1.9. Calcul de l'efficacité de l'échangeur de chaleur HE-162.....	50
III.5. CALCULE DU COEFFICIENT D'ECHANGE GLOBALE.....	50
III.5.1. Calcul des coefficients d'échanges côté tubes et calandres.....	50
III.5.1.1. Coefficient d'échange côté tubes (DEG).....	50
III.5.1.1.1. Calcul de Re et Pr.....	50
a- Calcul de T moyenne.....	50
b-Surface d'échange d'un tube (interne).....	50
c-Nombre de tubes par passe (vu qu'il s'agit de 4 passe côté tube).....	50
d- Surface totale d'écoulement interne (dans les tubes).....	51
e- Vitesse massique de DEG.....	51
f-Vitesse linéaire de DEG dans les tubes.....	51

g- Nombres adimensionnels.....	51
h- Calcul de Nu et de h tubes.....	51
III.5.2. Coefficient d'échange côté calandre (chlore).....	52
III.5.2.1. Calcul du nombre des chicanes.....	52
III.5.2.2. Calcul de la surface d'écoulement entre chicanes.....	52
III.5.2.3. Calcul la vitesse massique g du côté calandre.....	52
III.5.2.4. Calcule du diamètre équivalent deq de la calandre.....	52
III.5.2.5. Calcul du nombre de Reynolds.....	53
III.5.2.6. Calcul du nombre de Prandtl.....	53
III.5.2.7. Coefficient de convection côté calandre calculé par la corrélation de Mc Adams pour les écoulements externes.....	53
III.6. CALCUL DE COEFFICIENT GLOBAL DE L'ECHANGEUR.....	53
III.6.1. Calcul du facteur d'encrassement.....	54
III.7. L'EFFICACITE EN FONCTION DE U, S, Φ ET T.....	54
III.7.1. L'efficacité en fonction du U.....	54
III.7.2. L'efficacité en fonction du S.....	56
III.7.3. L'efficacité en fonction de Φ	57
III.7.4. L'efficacité en fonction T.....	58
III.8. CONCLUSION.....	59
CONCLUSION GENERALE.....	60
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	61

INTRODUCTION GENERALE

L'industrie chimique est le secteur le quel l'activité consiste à fabriquer des produits chimiques de base, des produits chimiques intermédiaires et produits finis par synthèse chimique contrôlée dont l'industrie du chlore fait partie.

En effet, cette industrie dont l'activité est la conception du chlore et ses dérivés chlorés joue un rôle crucial dans le développement industriel et économique mondial du fait que le chlore qui est un élément chimique fortement réactif et l'une des matières premières les plus abondantes dans la nature et les plus utilisées au monde [1].

Ce composé, découvert il y a plus de deux siècles par le chercheur suédois Karl Wilhelm Scheele, provient du sel extrait des mines et des eaux salées qui en représentent une source quasiment inépuisable. Avec ses dérivés, Ils sont répandus dans des activités innombrables à savoir ; l'électronique, l'aéronautique, l'industrie automobile, la médecine et la santé, l'alimentaire et l'agriculture, les loisirs, l'immobilier, les télécommunications... etc. [2].

Cependant, le chlore gazeux étant suffocant, très désagréable, extrêmement toxique et trop réactif, il ne peut être utilisé qu'à l'état liquide par processus de liquéfaction dont le but est de diminuer le volume du gaz chloré dans un rapport déterminé en vue de faciliter son transport dans des conditions optimums aussi bien sur le plan économique que sur celui de la sécurité [1-3].

Le chlore liquéfié est produit par électrolyse de saumure purifiée et concentrée, une solution de chlorure de sodium (du sel de cuisine – NaCl dans de l'eau) [3].

Le procédé de liquéfaction se fait par combinaison de compression et de refroidissement en employant des unités de refroidissement de remorquage appelés ainsi échangeurs de chaleurs qui permettent de renforcer le transfert de chaleur entre deux fluides chaud et froid avec des températures différentes, tout en empêchant leur mélange. C'est pourquoi de tels dispositifs sont indispensables dans le perfectionnement des systèmes thermiques au niveau des secteurs d'activités industrielles [4,5].

L'échangeur étudié est du type échangeur à tubes-calendre. Ce dernier fonctionne dans des conditions de débits et de températures variables.

L'objectif de notre travail consiste à étudier le processus de liquéfaction du chlore au niveau de l'entreprise ADWAN CHEMICALS COMPANY ALGERIA

tout en estimant les paramètres éminents du mode de fonctionnement de l'échangeur de chaleur utilisé.

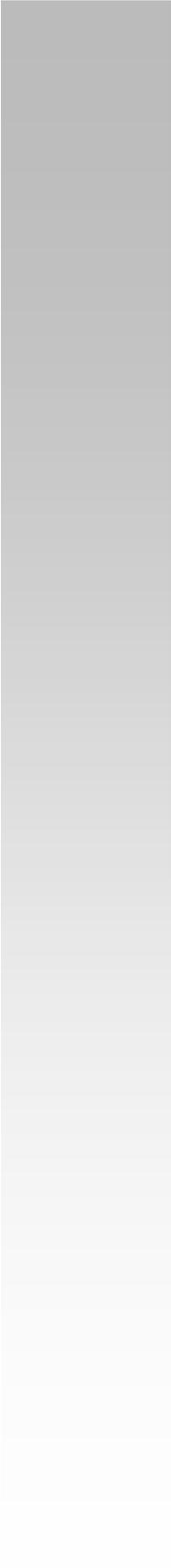
Ce mémoire débute par une introduction générale suivie par trois chapitres :

Le premier chapitre comprend une présentation du complexe ADWAN CHEMICALS COMPANY ALGERIA tout en définissant ses différentes unités.

Le deuxième chapitre détermine l'historique du chlore fabriqué dans le complexe, ses propriétés et ses utilisations. Ensuite, le procédé de sa liquéfaction sera détaillé.

Le troisième chapitre est consacré à l'étude des paramètres du fonctionnement de l'échangeur de chaleur HE-162.

Finalement, nous terminons notre travail par une conclusion dans laquelle les résultats trouvés sont récapitulés.



Chapitre

I

PRESENTATION DE L'ENTREPRISE

CHAPITRE I : PRESENTATION DE L'ENTREPRISE

I.1. INTRODUCTION

ADWAN, Chemicals Industries Company (ACIC) (figure I.1), est une société privée fondée en Arabie Saoudite le 19 mai 2004. Il s'agit d'une société à ressources saoudiens en vertu de la loi algérienne pour étendre ses activités. Elle est dirigée par le directeur Général Mr oussim koudri et le directeur Général Adjoint Mr. Allaa.

La société étant formée de plusieurs usines en Afrique du nord est spécialisée dans la fabrication, la transformation des minéraux industriels et la commercialisation de différents produits chimiques à base de silice et d'autres produits chimiques inorganiques.

La présence de telle entreprise réside dans sa contribution considérable à la croissance économique de la région.

Le principal objectif de l'entreprise est d'assurer des produits de haute de qualité à leurs clients locaux et étrangers.



Figure I.1. ADWAN Chemicals Industries Company (ACIC), Algeria.

I.2. SITUATION GEOGRAPHIQUE

D'une superficie de 70 000 m², le complexe ADWAN chemicals Cie Algérie SPA est situé à l'OUEST Algérien dans la zone industrielle N°02 et 03 de la commune de Fornaka, wilaya de Mostaganem. Elle offre 200 postes d'emploi (figure I.2).



Figure I.2. Situation géographique du complexe ADWAN Chemicals Cie Algérie SPA.

I.3. STRUCTURE ORGANISATIONNELLE DE L'ENTREPRISE

L'organisation de l'entreprise ADWAN chemicals est conçue à partir d'une coordination complète entre les différentes unités de la société dans le but d'obtenir une utilisation rentable des moyens fournis.

Le fonctionnement de la société est géré suivant un organigramme, décrit sur la figure I.3. Il est composé d'un Conseil d'administration et une direction exécutive situés en Arabie Saoudite et d'une direction générale située en Algérie supervisant cinq sous-directions.

Chaque direction assure le suivi continu des activités de plusieurs départements pour répondre convenablement aux exigences clientèles.

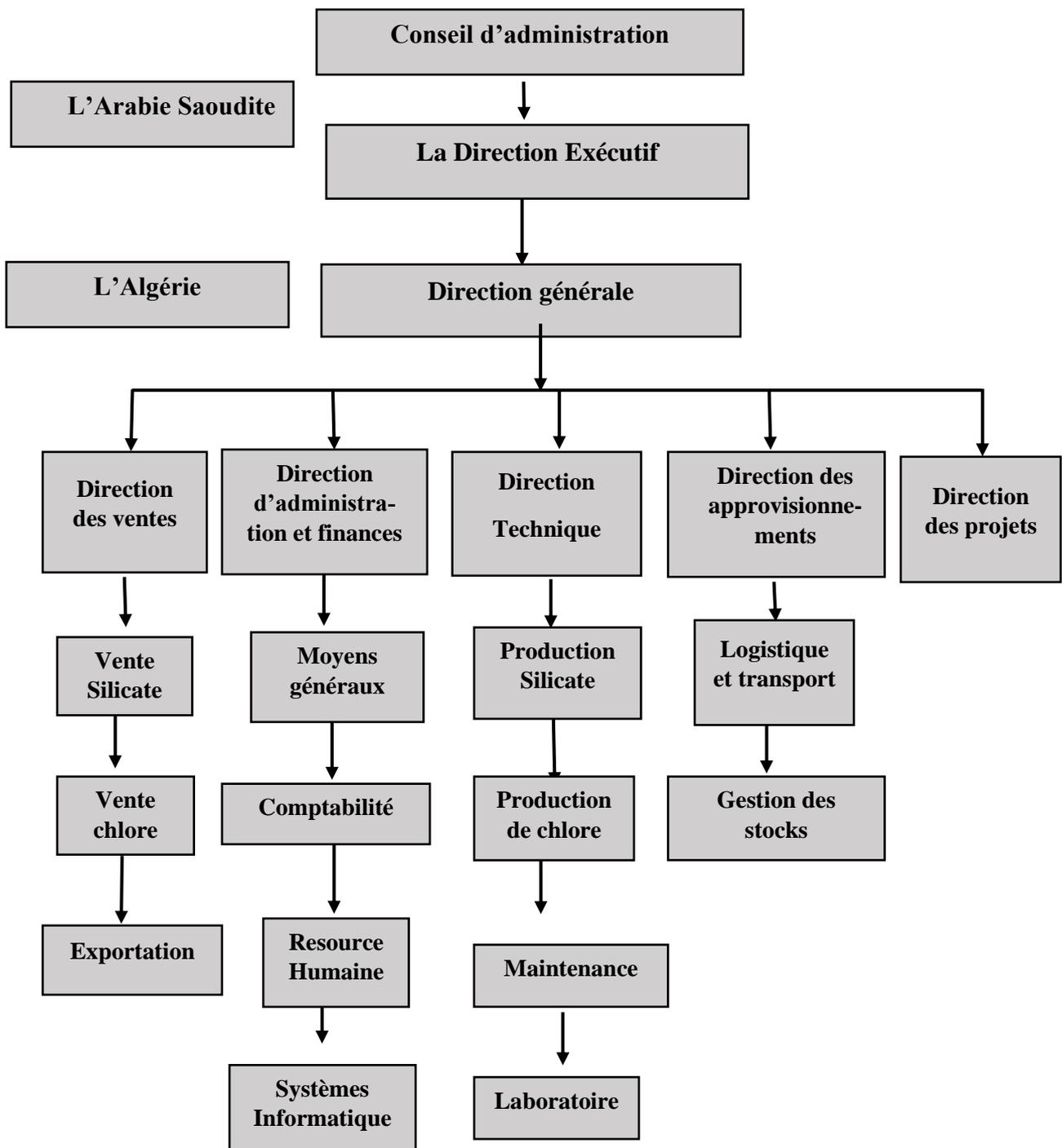


Figure I.3. Organigramme de l'entreprise ADWAN Chemicals.

I.4. UTILITES DES DIRECTIONS

I.4.1. Direction générale : c'est le responsable direct de la gestion quotidienne de l'unité. Elle dirige toutes les activités des départements et divisions de l'unité tout en ayant l'accès aux différentes informations nécessaires à la gestion afin de prendre des décisions et de signer tous les documents.

I.4.2. Direction des projets : Elle s'occupe des études et du suivi des nouveaux projets de l'entreprise et leur réalisation.

I.4.3. Direction des ventes : Elle est responsable du marketing, du contrôle des ventes, de l'orientation de la production de l'entreprise selon les désirs des clients et l'étude de marché et la prospection des nouveaux marchés. De plus, elle est chargée du suivi et l'analyse de l'évolution des ventes afin de répondre aux exigences du marché en termes de qualité et quantité.

Elle supervise les départements suivants :

- Le département de la vente chlore dont le rôle consiste à faire des études de marché pour orienter la direction, la production et la vente du chlore.
- Le département de la vente silicate.
- Le département de l'exportation qui effectue la prospection des nouveaux marchés et s'occupe des signatures des contrats de vente avec des entreprises à l'extérieur de l'Algérie.

I.4.4. Direction d'approvisionnement : Elle supervise les départements suivants :

- Le département de la logistique et transport qui est responsable de fournir tous les moyens de transport et la machinerie lourde tels que les grues et les tracteurs ; tout en respectant les délais spécifiés.
- Le département de la gestion de stocks qui est fait tous les achats d'équipements, pièces détachées et matières premières lorsqu'un de ces achats est nécessaire.

I.4.5. Direction d'administration et finances : Elle dirige les départements suivants :

- Le département des ressources humaines qui s'occupe de divers plans de gestion des ressources humaines et du suivi de la carrière professionnelle des travailleurs en formation et amélioration de la main-d'œuvre dans l'institution.
- Le département des systèmes informatiques qui surveille le système d'information de l'entreprise et contrôle toutes les opérations liées aux médias automatisés et la préparation des programmes internes de chaque direction.
- Le département de comptabilité qui enregistre toutes les opérations comptables possibles.
- Le département des moyens généraux qui s'occupe de :
 - ✓ la disponibilité des outils bureautiques et Les opérations bancaires.

- ✓ la prise en charge de paiement des différentes factures, du transport des travailleurs et des journées de formation, des stages à l'étranger, et mission de travail.
- ✓ viser à atteindre des normes de qualité pour les produits fabriqués selon des normes de qualités internationalement reconnues, ce qui a permis à l'entreprise d'obtenir la certification ISO.

I.4.6. Direction technique : Elle gère les départements suivants :

- Le département de la production du chlore et ses dérivés comme la soude caustique et l'hydrogène qui sont deux autres produits de base de l'industrie chimique.
- Le département de la production du sable et ses dérivés.
- Le département de la maintenance qui effectue la maintenance des défauts et la maintenance périodique.
- Le Département de laboratoire qui s'occupe de la réalisation des analyses quotidiennes des produits chimique utilisés ou fabriqués.

I.5. ACTIVITES DU COMPLEXE

L'entreprise Adwan assure deux industries chimiques : industrie de production de sable et dérivés et usine de production de chlore et dérivés comme la soude caustique et l'hydrogène (figure I.4).



Figure I.4. Présentation géographique des unités d'activités [6].

I.5.1. Industrie de sable

L'usine de production de sable industriel et dérivés (figure I.5) produit depuis sa conception, en février 2008, 300 000 T/an de sable traité, 45 000 T/an de farine de silice et 45 000T/an de silicate de sodium.



Figure I.5. Industrie de production de sable et dérivés.

Le sable industriel est utilisé pour la Fonderie, la construction chimique, le traitement des eaux et la production du verre, du PIPE GRP et de céramique. Son traitement consiste d'abord à laver et à trier le sable brut (figure I.6.a), puis à sécher le sable humide dans un four rotatif (figure I.6.b), enfin à tamiser le sable séché pour le séparer en fragments selon la granulométrie demandée par les clients.



Figure I.6. Unité de traitement du sable industriel :
(a) Lavage de sable, (b) Séchage de sable.

Dans le cas de la farine de silice (figure I.7), elle entre dans la production de céramique et de fibres abrasifs ainsi que le domaine gasoil. Cette substance est fournie par l'entreprise avec une grande pureté et de différentes dimensions de particules allant de 8 à 100 microns et elle est délivrée dans des emballages variés.



Figure I.7. Farine de silice.

Quant au silicate de sodium, celui-ci est produit à partir de la silice du sable lessivés sous une pression donnée, ensuite, une solution de soude caustique concentré est ajoutée pour son usage dans la fonderie, la production de céramique et le domaine de détergence (figure I.8).



Figure I.8. Unité de production de silicate de sodium.

I.5.2. Industrie de chlore et dérivés

Cette usine a été mise en œuvre en décembre 2012 (figure I.9). Elle produit le chlore liquide, la soude caustique, l'hypochlorite de sodium, l'acide chlorhydrique et le chlorure ferrique pour leurs applications dans le traitement des eaux, le domaine gazoil et la production des détergents.

Le chlorure d'hydrogène est produit par synthèse directe entre le dichlore et le dihydrogène réalisée par combustion du dichlore avec le dihydrogène en excès, à température de 5000°C par la réaction (I.1) [7].



La capacité de conception de l'industrie est de : 22300 T/an pour l'acide chlorhydrique, 24 000 T/an pour la soude caustique, 42 000T/an pour d'hypochlorite de sodium et 35 600T/an pour le chlore liquide.

L'hydroxyde de sodium NaOH est obtenu via l'électrolyse d'une solution de chlorure de sodium NaCl.[8], alors que les solutions d'hypochlorite de sodium sont élaborées à partir du barbotage de chlore gazeux dans de la soude caustique diluée.

Le chlore liquide est fabriqué en ajoutant le chlore gazeux (97%) obtenu par l'électrolyse de la saumure sur l'acide sulfurique H₂SO₄ qui permet d'absorber l'eau du chlore, ensuite il est compressé et refroidi à l'aide d'un échangeur de chaleur. Par ailleurs, Le chlore et la soude sont obtenus par électrolyse de

la saumure (NaCl). Quant au chlorure ferrique, il est traité à partir d'une réaction de fer avec le chlore en présence de l'eau réactions (I.2) et (I.3) :



Figure I.9. Usine de production de chlore et dérivés.

I.6. LABORATOIRE CONTROLE DE QUALITE

D'une superficie étendue à 174 m², le laboratoire contrôle de qualité est formé de deux laboratoires ; laboratoire d'analyse de sable (figure I.10) et laboratoire d'analyse de chlore et dérivées (figure I.11).



Figure I.10. Laboratoire d'analyse de sable.



Figure I.11. Laboratoire d'analyse de chlore et dérivées.

Le laboratoire constitue le garant de la qualité des produits auprès des clients grâce aux études de formulation aux analyses physicochimiques établies par une équipe diplômée avec de hautes qualités étant le représentant technique auprès des clients. En effet, Le personnel du laboratoire gère d'innombrables et importantes fonctions à savoir :

PRESENTATION DE L'ENTREPRISE ADWAN CHEMICAL CIE (ALGERIA)

- Sélectionner des matières premières telles que le sel, le sable brut et la soude caustique écaillée.
- Participer à l'agrément de nouvelles gammes de produits.
- Échantillonner et analyser les matières premières et les produits fabriqués dans l'entreprise dans le but de confirmer leur conformité par rapport aux normes et aux exigences des clients.
- Contrôler les produits lors du processus de leur fabrication pour assurer l'uniformité, la stabilité et l'évolution de la qualité.
- Délivrer des certificats d'analyse afin d'accompagner la marchandise transmise au client.

I.7. CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons évoqué une présentation de la société ADWAN, Chemicals Industries Company (ACIC) et son rôle dans la fabrication des produits chimiques commerciaux. Ensuite, nous avons démontré ses différentes activités.

Chapitre

II

PROCESSUS DE LIQUEFACTION DU CHLORE

CHAPITRE II : PROCESSUS DE LIQUEFACTION DU CHLORE

II.1 INTRODUCTION

Le présent chapitre présente un historique sur le chlore qui sera suivi par ses propriétés qui le caractérisent. Par la suite, les différentes applications du chlore seront abordées et au final, le processus de production de ce composé sera détaillé tout en illustrant les lieux de chaque étape du processus.

II.2. DEFINITION

De nombreuses activités quotidiennes ne peuvent être élaborées qu'en présence d'une substance fondamentale qui est le chlore.

Le mot chlore vient du grec *khlôros* signifiant « vert pâle ». Il fut découvert en 1774 par le chercheur chimiste suédois Karl Wilhelm Scheele en faisant réagir de l'acide chlorhydrique avec du dioxyde de manganèse. En 1809-1810, Humphry Davy confirma que c'était un gaz simple et lui attribua le nom de chlore comme étant un élément chimique bien spécifique [1-3].

Le chlore, gaz verdâtre plus lourd que l'air, est un composé chimique le plus commun de la famille des halogènes, de symbole Cl et numéro atomique 17. Il se présente à l'état pur sous la forme de la molécule de dichlore Cl₂ (figure II.1) [6,9].

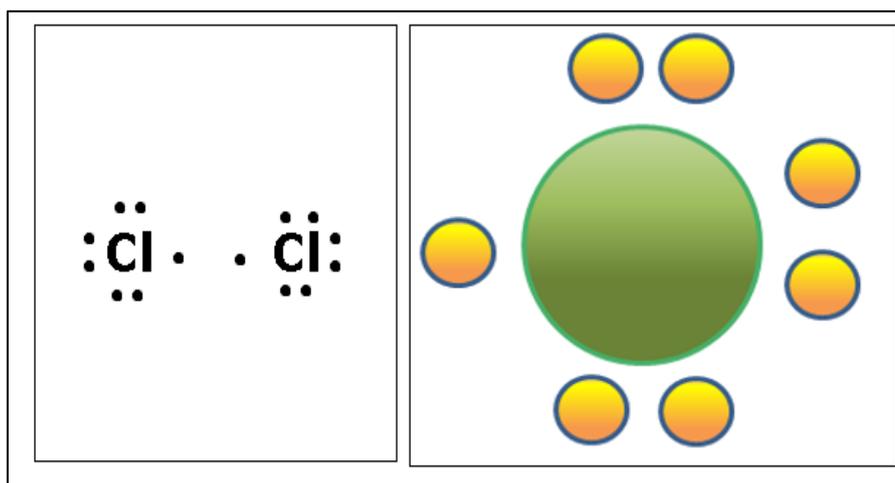


Figure II.1. Structure chimique du chlore.

D'un état suffocant, très désagréable, extrêmement toxique et trop réactif pour exister à l'état libre, le chlore a été utilisé comme gaz de combat lors de la première guerre mondiale au

début du XX^e siècle. Cet élément chimique est une matière première quasiment inépuisable provenant du sel [8]. Il est particulièrement le plus abondant dans l'écorce terrestre, principalement dans les mines, les mers et les océans qui en représentent une source presque intarissable. Il s'agit également d'une substance importante des organismes vivants, tels que le sérum sanguin autour de 7 grammes de chlorure de sodium par litre [1].

Le chlore est fabriqué sur 650 sites de production, disséminés dans quelque 85 pays à travers le monde. Près de 70% de la production se trouvent concentrés dans les trois régions du globe les plus dynamiques sur le plan industriel : l'Asie, l'Amérique du Nord et l'Europe occidentale [3].

II.3. PROPRIETES DU CHLORE

L'élément chlore, gaz verdâtre ininflammable Possédant sept électrons périphériques, sa position dans la septième colonne du tableau périodique de Mendeleïev lui confère des propriétés physico-chimiques assez particulières. Sa masse molaire est 71g, sa densité est 2,49, sa pression de vapeur à 20 °C est 6,5 bar et ses températures de changement d'état sont pour l'ébullition $T_{eb}=-35^{\circ}C$ et pour la fusion $T_{fusion}=-105^{\circ}C$.

Il est peu soluble dans l'eau, mais bien plus dans le benzène. Il se liquéfie facilement, soit par refroidissement au-dessous de $-35^{\circ}C$, soit par compression sous 7 à 10 bars (figure II.2). Le chlore gazeux se transporte habituellement à l'état liquide dans des cylindres d'acier sous pression [6].

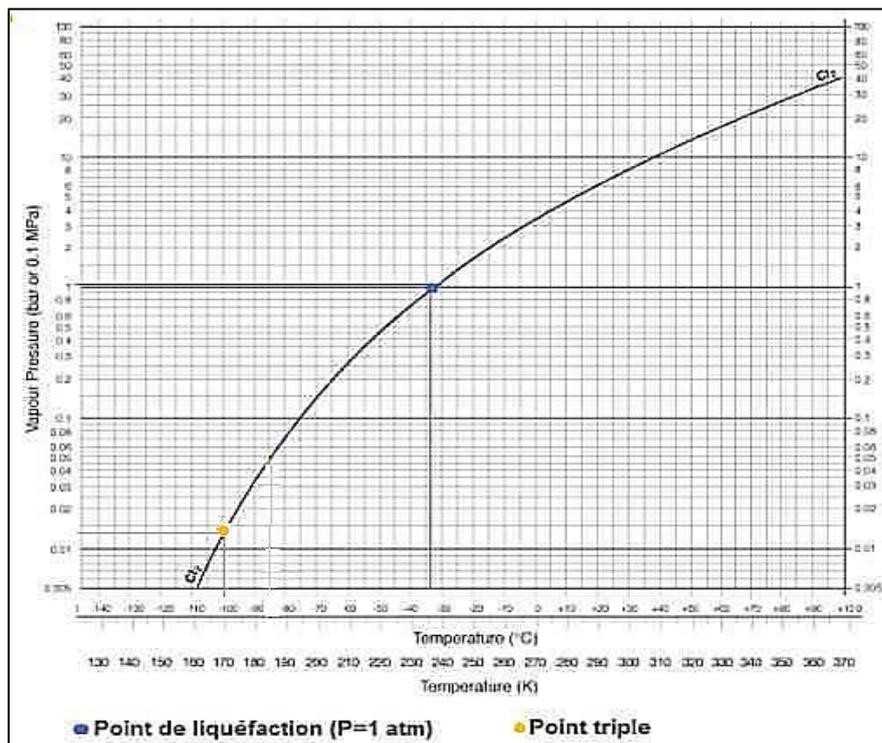


Figure II.2. Diagramme de phases du chlore [10].

II.4. PRINCIPAUX USAGES DU CHLORE

Bien que le chlore suscite un composé toxique, il est pourtant très significatif. En effet, il est impliqué dans différentes fonctions de l'organisme en particulier l'équilibre acido-basique du sang. Il est aussi présent dans de nombreux objets et applications courants comme illustré sur la figure II.3 [1-6,9] :

II.4.1. Environnement

Etant un composant de l'eau de Javel, le chlore contribue comme biocide dans les désinfectants, la purification des eaux potables et le traitement des eaux de piscine.

II.4.2. Pâtes et papiers

En qualité d'un produit décolorant, le chlore intervient dans les procédés de blanchiment industriel du papier en employant du dioxyde de chlore combiné avec du peroxyde d'hydrogène.

II.4.3. Industrie chimique

Le chlore est également introduit dans une variété de produits tels que les produits pétroliers, les antiseptiques, les peintures, les colorants, les insecticides, les médicaments, ...etc.

Il est polyvalent et massivement utilisé en chimie organique dans la formule du PVC (polychlorure de vinyle, ou PCV en français) et donne diverses propriétés aux composés organiques par substitution.

Le principal dérivé du chlore est le sel de table dont le chlorure de sodium NaCl qui occupe un peu moins de 2% de la surface des océans.

En géomorphologie et paléosismologie, L'isotope ^{36}Cl , radioactif, est utilisé pour la datation par isotopes cosmogéniques de surfaces ou la détermination de taux d'érosion [10].

II.4.4. Industrie des métaux

En chimie minérale, le chlore est très fortement utilisé dans la production de l'oxyde de titane par le procédé au rutile. Le chlore est aussi employé dans la purification de l'aluminium.

II.4.5. Electronique

Introduit dans la fabrication de semi-conducteurs pour graver par plasma l'aluminium et d'autres couches métalliques [3,10,11].

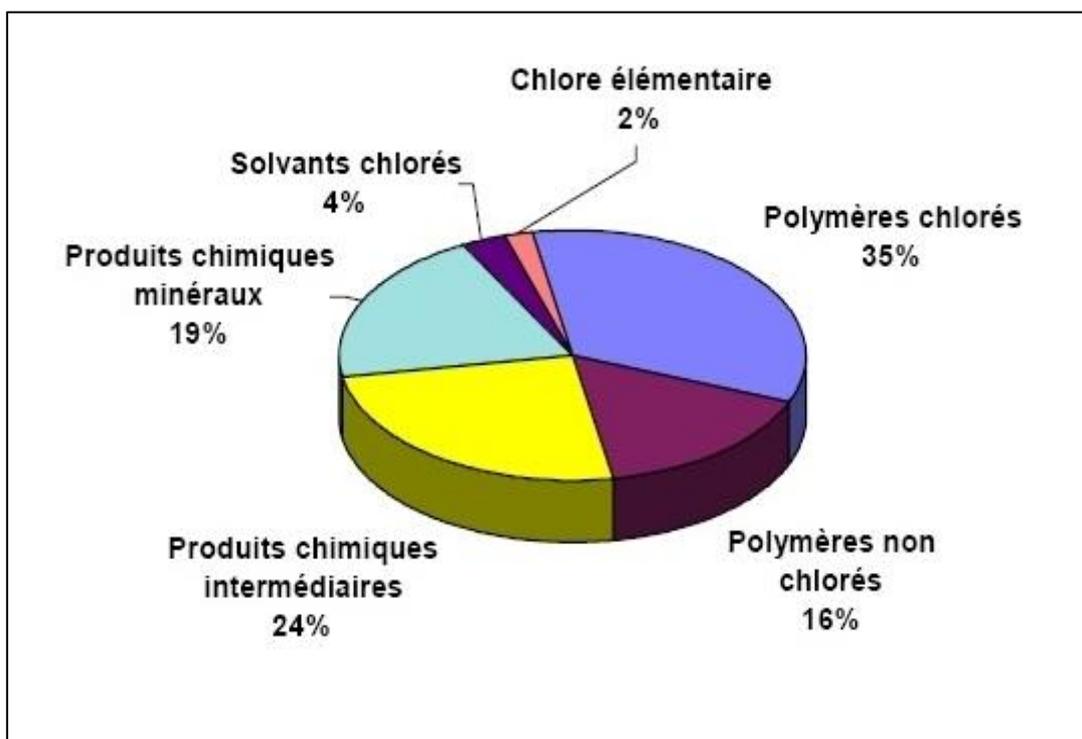


Figure II.3. Usages du chlore [3].

II.5. PROCÉDES DE LIQUEFACTION DU CHLORE

II.5. 1. Production du chlore

Le dichlore est un produit synthétique préparé par l'industrie chimique essentiellement par oxydation électrochimique d'ions chlorure. Il est principalement préparé via électrolyse de

saumure purifiée et concentrée, une solution de chlorure de sodium (du sel de cuisine – NaCl dans de l'eau). Outre du chlore récupéré sous forme gazeuse, l'électrolyse produit de la soude caustique (ou lessive de soude - NaOH) et de l'hydrogène (H₂) [1,3,6,8].



La production et la manipulation du chlore sont soumises à des réglementations sévères et à des procédures rigoureuses. L'industrie chimique contrôle ces opérations et réduit au minimum les risques associés, dans le cadre de sa politique d'amélioration continue.

II.5.2. Etapes de production du chlore

La fabrication du chlore s'établit au niveau du complexe ADWAN à partir du procédé suivant comme illustré sur la figure II.4 :

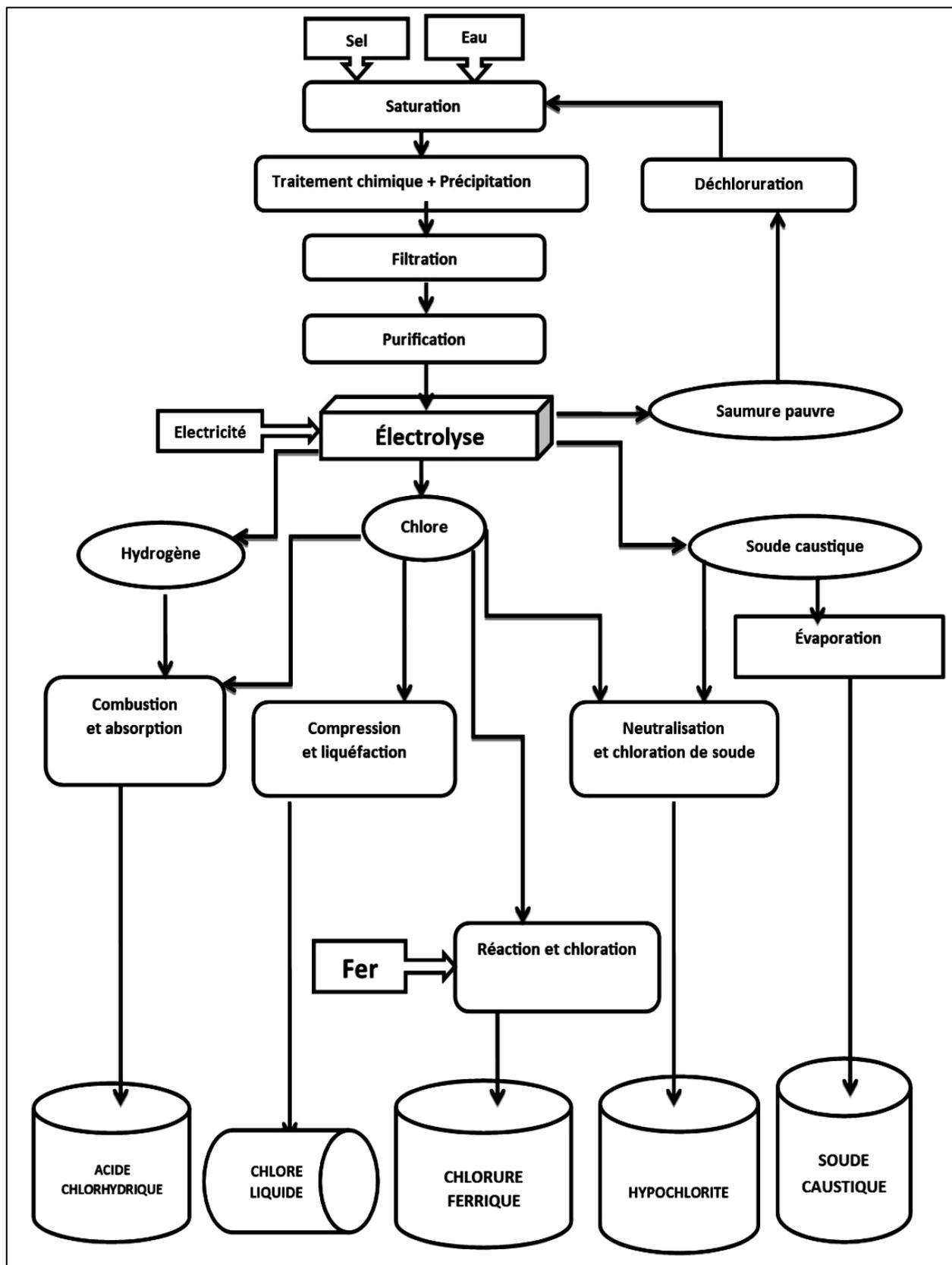


Figure II.4. Etapes de liquéfaction du chlore.

II.5.2.1. Saturation

Cette étape consiste à obtenir de la saumure à partir du sel brut (NaCl) sous forme de solide, la matière première extraite de l'eau salée, qui est apporté de la ville d'Oued (figure II.5).



Figure II.5. Sel brut (NaCl).

Le sel est tout d'abord déchargé et stocké dans une trémie. Puis, à l'aide de deux tapis (figure II.6.a), il est évacué dans deux bacs (saturateurs) A(T101) et B (T101) où il se dissout (figure II.6.b). Ensuite, il passe à l'état de solution liquide par l'ajout de l'eau afin d'avoir une saumure ; La saumure ainsi produite doit avoir une concentration de 300 à 310 g/L en NaCl et une température supérieure à 45°C (voir figure II.7) [4,8].

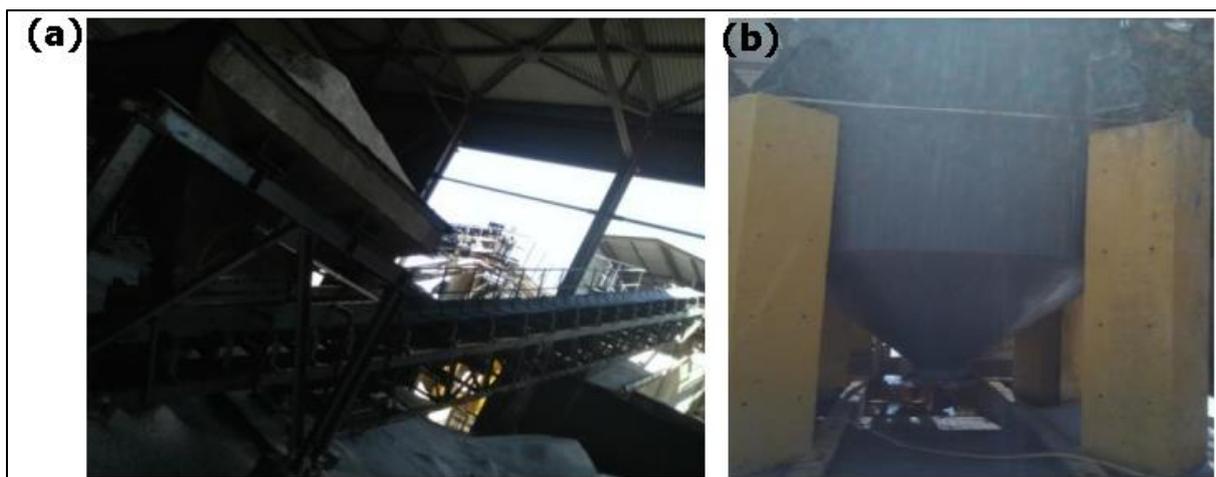


Figure II.6. (a) tapis, (b) Saturateur.

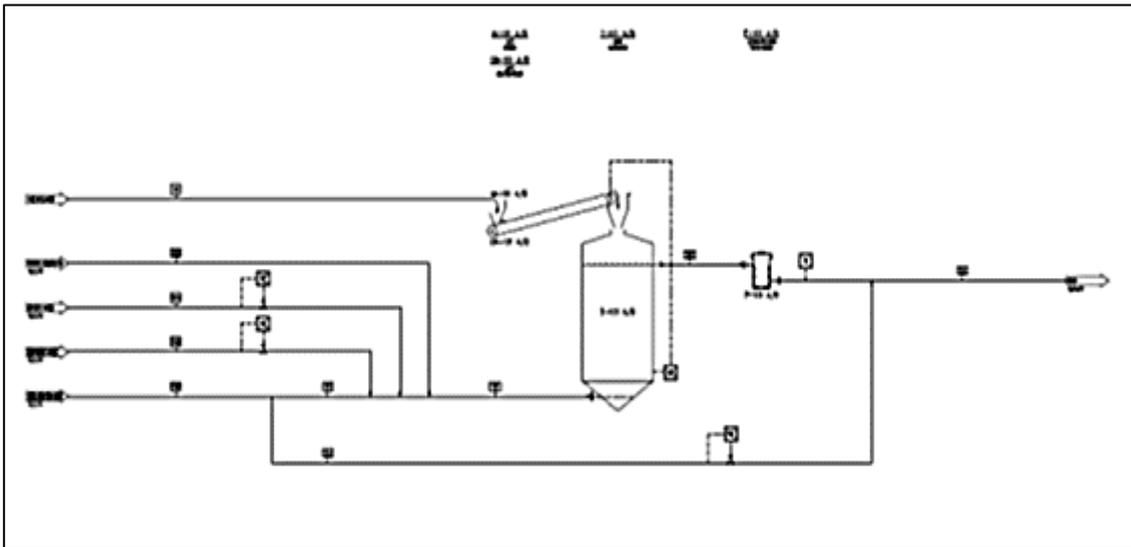
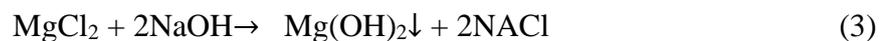


Figure II.7. Schéma de manipulation du sel et saturation de la saumure.

II.5.2.2. Traitement chimique de la saumure

L'objectif de cette opération est l'élimination des particules contaminées affectants la qualité du produit et ses performances.

La saumure sortant du saturateur parcourt trois réacteurs (figure II.8.a) ; T102, T104 et T106 pour extraire les impuretés sous forme de précipités qui sont le calcium (Ca), le magnésium (Mg) et le sulfate (SO₄) en utilisant des produits chimiques (Na₂CO₃; NaOH ; BaCl₂) selon les réactions suivantes :



Par la suite, les flocculants (FeCl₃) sont aussi incorporés en vue de stimuler la précipitation ou la floculation des impuretés par leurs agrégation qui a pour conséquence d'accroître leurs poids pour se décanter au fond du réacteur (figure II.8.b) [6,7].

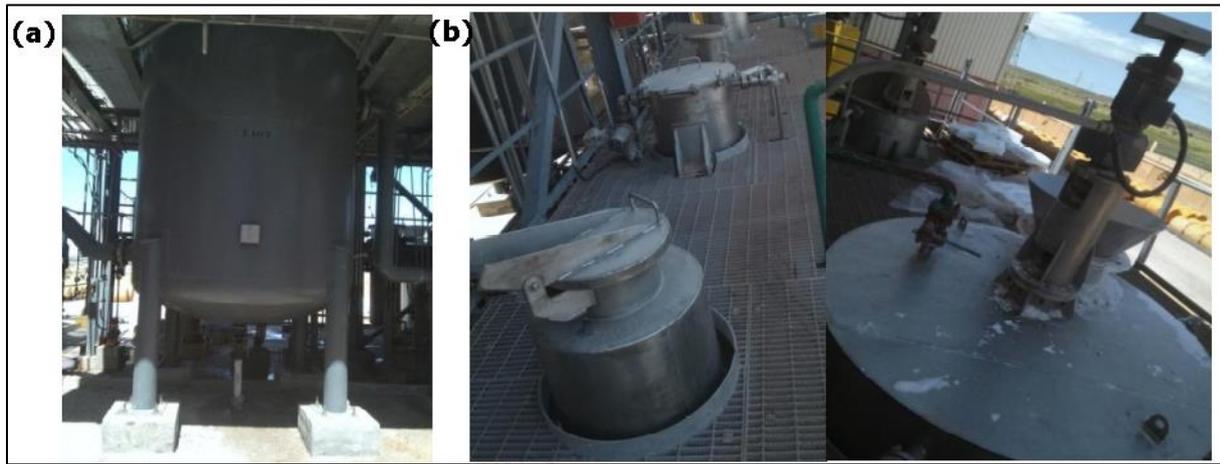


Figure II. 8. (a) Réacteur T102, (b) Produits chimiques.

II.5.2.3. Traitement physique de la saumure

Le traitement physique (figure II.9) de la saumure se procède en traversant un réacteur clarifié T108 qui est un grand décanteur concave dans lequel la boue répandue se décante par rotation (figure II.10). Lors de la décantation, les précipités accumulés (principalement $Mg(OH)_2$ et $CaCO_3$) sont collectés au fond du décanteur sous forme de boues à évacuer [2,4].

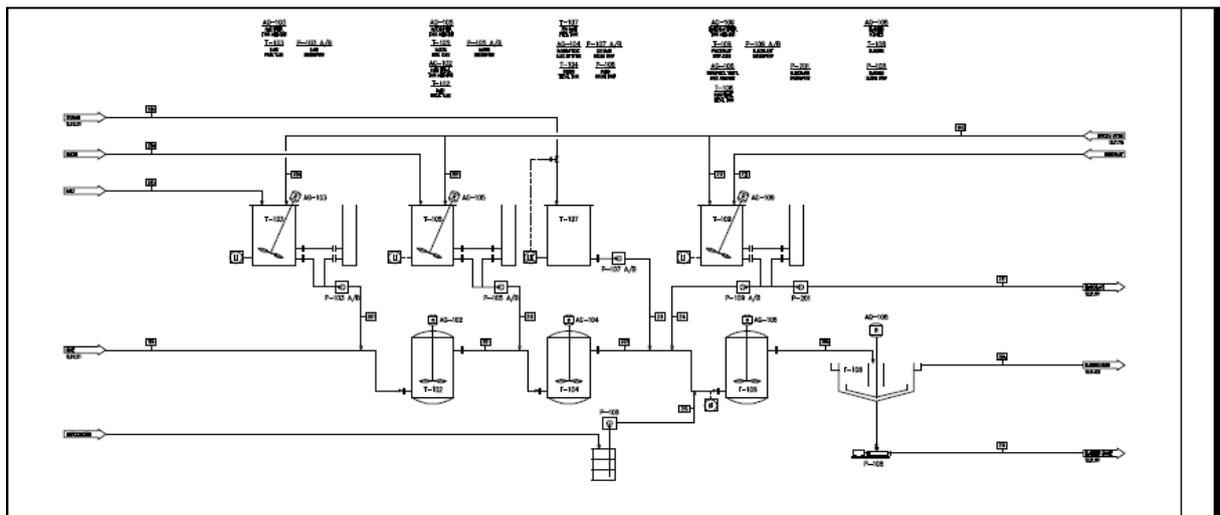


Figure II.9. Schéma de traitement de la saumure.

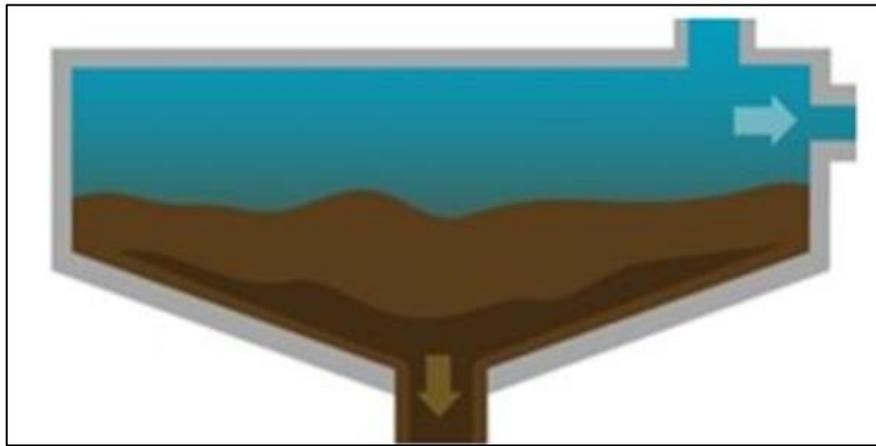


Figure II. 10. Décanteur (T108).

II.5.2.4. Filtration de la saumure

Afin que la saumure soit filtrée, elle est transférée vers un bac de stockage le T110 ; via deux pompes P110A et P110B et ensuite, elle est introduite dans deux filtres F111A et F111B pour sa filtration (figure II.11).

La filtration s'établit en trois étapes à l'aide d'un pre-coat comme indiqué à la figure II.12 [2,6,7] :

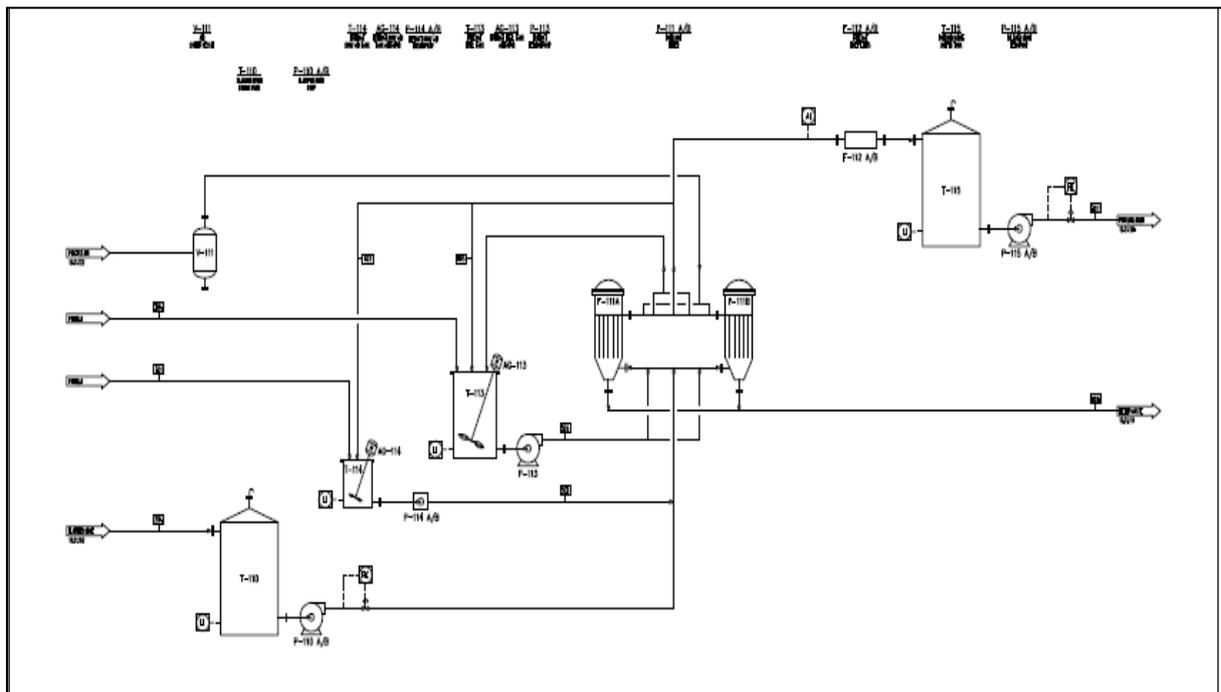


Figure II. 11. Schéma de filtration de la saumure.

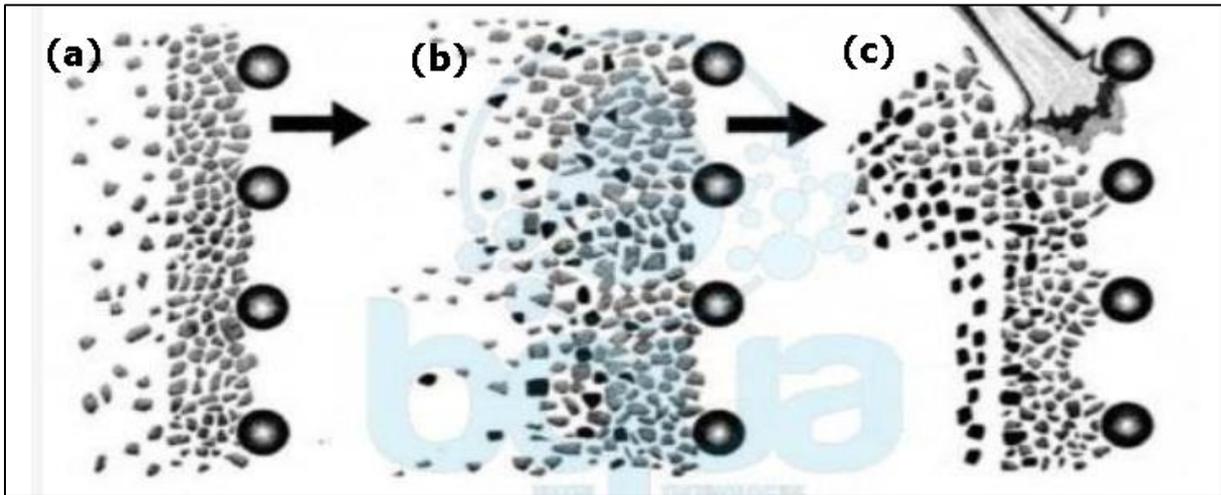


Figure II. 12. Etapes de filtration de la saumure : (a) Formation de pre-coat, (b) Formation de gâteau de filtration, (c) Enlèvement de gâteau de filtre.

II.5.2.5. Déionisation (purification) de la saumure

L'unité déionisation de la saumure est installée pour réduire la dureté de la saumure en Mg^{2+} et Ca^{2+} à 20 ppb et conserver la haute performance de l'électrolyse membranaire (figure II.13).

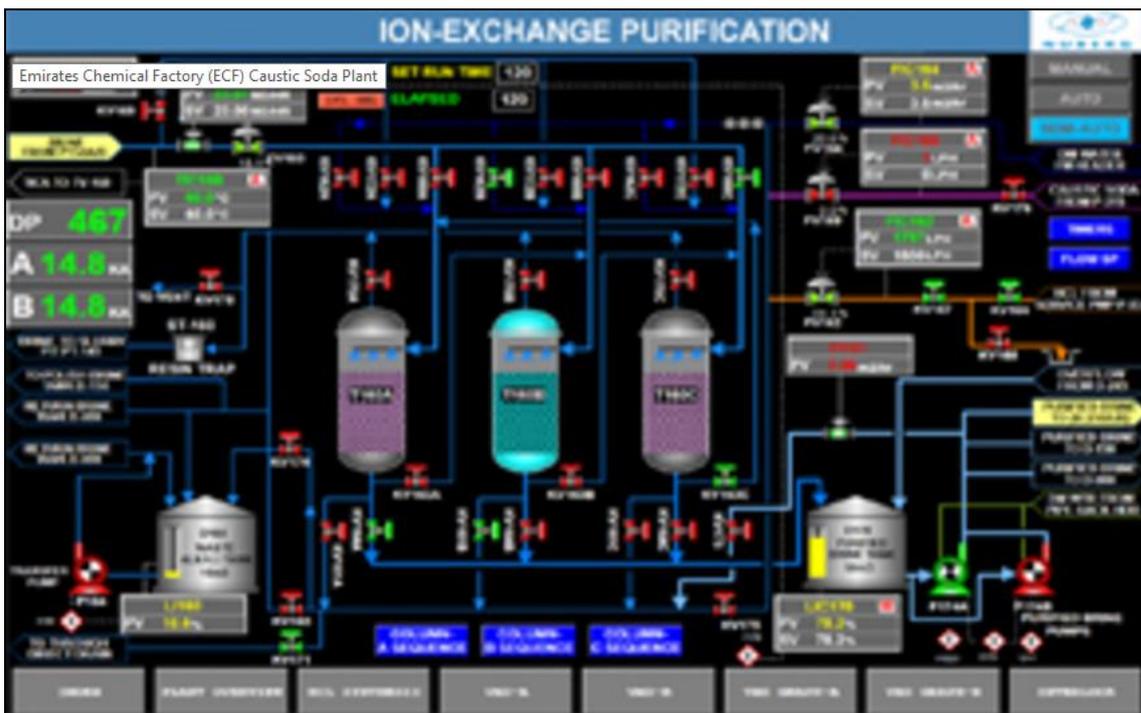


Figure II. 13. Unité de déionisation de la saumure.

Dans cette étape, la saumure est envoyée vers le bac de stockage T115 où elle est transmise à un échangeur de chaleur par deux pompes P115A et P115B afin d'augmenter la température de 40°C jusqu'à 60°C. La saumure est ensuite envoyée aux colonnes V115 A ; B et C en série (figure II.14) pour qu'elle soit filtrée par une résine qui permet d'éliminer les impuretés métalliques sous forme de cations (Ca, Mg, Fe, ...).

Lors du fonctionnement continu de deux colonnes, l'une de ces dernières entre à la régénération avec la soude NaOH et l'acide HCl ainsi que le rinçage avec l'eau pour extraire complètement la résine les traces de régénérant [1,4,7].



Figure II.14. Les colonnes V115 A, B, C.

II.5.2.6. L'électrolyse

Une fois filtrée (déionisée), la saumure pure est pénétrée dans le bac de stockage T120. Ensuite elle est transférée à l'électrolyseur par deux pompes P120A et P120B où s'effectue le processus d'électrolyse de la saumure (figure II.15).

L'électrolyseur mis en œuvre est formé d'un nombre défini de cellules composée Chacune d'elle d'une anode en titane, une cathode en nickel et une membrane poreuse. Ces cellules sont groupées et branchées aux bornes des électrodes (la cathode et de l'anode) du redresseur qui assure l'alimentation en courant continu de ces cellules pour la formation des réactions de l'électrolyse.

Sous l'influence d'un courant continu, la membrane permet sélectivement aux ions sodium (Na^+) de migrer de l'anode vers la cathode afin d'être combiné aux ions hydroxydes (OH^-) formant ainsi de la soude caustique (NaOH) de 31% à 32% selon la réaction [2,7,8] :



La soude caustique produite est écoulee au réservoir de stockage puis diluée à une concentration de l'ordre de 20% pour son application dans la fabrication de l'hypochlorite de sodium alors que le chlore gazeux recueilli au niveau de l'anode est conduit vers le réacteur

pour la production de l'hypochlorite de sodium (eau de Javel) ou pour la production d'autres produits à savoir ; l'acide chlorhydrique HCl, le chlorure ferrique FeCl₃ et chlore liquide Cl₂. L'hydrogène formé ainsi lors de la réduction de l'eau au niveau de la cathode est dissipé dans l'atmosphère [1].

II.5.3. Obtention du chlore

Le chlore est particulièrement réalisé par électrolyse de solutions aqueuses de chlorure de sodium à partir de la demi-réaction d'oxydation (5) et à la réduction de l'eau avec production d'ions hydroxydes (6) à l'anode et la cathode respectivement [1] :



Par mesure de sécurité, chaque électrolyse est équipée d'une installation capable de transformer le chlore hautement concentré en un hypochlorite de faible concentration. Ainsi, les procédés de sa fabrication sont essentiellement électrolytiques comprenant trois techniques différentes [3] :

- le procédé d'électrolyse à diaphragme et le procédé d'électrolyse à membrane qui permettent de séparer les compartiments anodiques et cathodiques.
- le procédé à l'amalgame de mercure, aussi appelé l'électrolyse à mercure qui permet d'éviter la réduction de l'eau et conséquemment la formation d'hydroxydes.

Dans le cas de l'industrie Adwan, le procédé utilisé est celui de l'électrolyse membranaire étant le plus respectueux pour l'environnement [8,10].

II.5.3. 1. Electrolyse à membrane

Développée dans les années 70, cette technique nécessite une cellule subdivisée en deux compartiments, le compartiment anodique alimenté par la saumure purifiée et saturée en chlorure de sodium et le compartiment cathodique, via une membrane poreuse de haute qualité fonctionnant ainsi comme un échangeur d'ions. La membrane est formée d'un squelette de polymère perfluoré des deux côtés où sont greffés les deux groupes d'échangeurs de cations : le sulfonique à l'anode, le carboxylique à la cathode comme illustré sur la figure II.16.

Le chlore gazeux se libère à l'anode, l'hydrogène à la cathode. Les ions de sodium passent au compartiment cathodique en traversant la membrane et réagissent en présence de l'eau formant ainsi la lessive de soude. Par évaporation, la densité finale est évoluée de 32% à 50%.

L'avantage du procédé à membrane réside dans la consommation d'énergie basse voisine de celle des cellules à diaphragme et la production d'une soude caustique très pure. Ce processus est utilisé pour la production de 33% du chlore en Europe. [6-8,12].

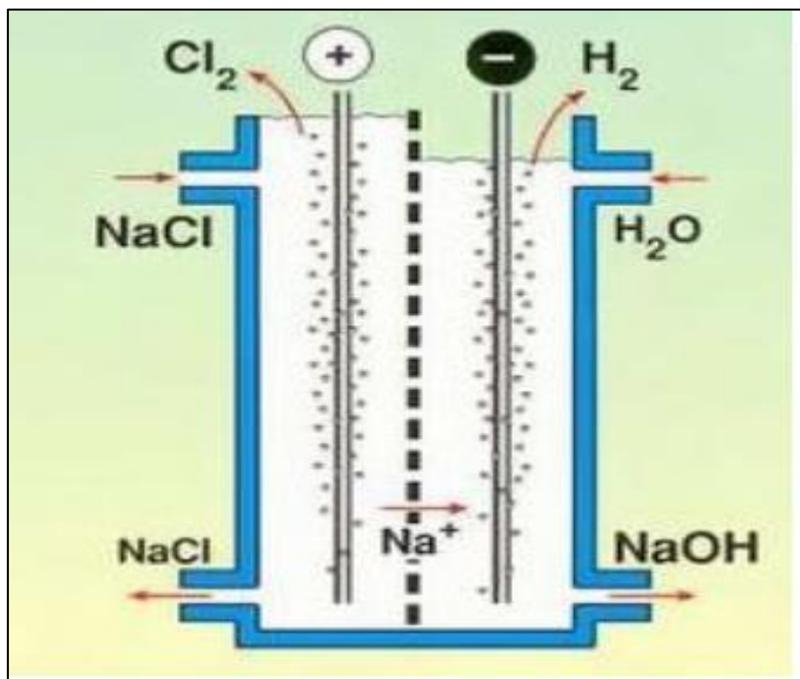


Figure II.16. Electrolyse à membrane

II.5.4. Refroidissement et séchage chlore

Evacué des électrolyseurs, Le chlore gaz humide est refroidi par l'eau glacée au niveau de son refroidisseur correspondant HE-160 à une température maintenue d'environ 15 ° C et contrôlée avec la vanne de contrôle de température TCV-160 et la paire de réglages de commande TT-160 de l'émetteur de température. Le chlore doux est retiré de son eau passant par le dimère de chlore D-160.

Le gaz de chlore refroidi est séparé en quatre flux ; le premier va à la neutralisation, le second concerne l'hypochlorite, le troisième passe à l'unité de synthèse de HCL sous une pression constante et contrôlée par des soupapes de contrôle de pression (PCV-160 A et B) et un émetteur de pression (PT-160) et le quatrième se dirige vers la tour de séchage composée de deux opérateurs tel présenté à la figure II.17, l'opérateur C-161 avec environ 83% de H2SO4 (acide faible) circulant sous une faible Pompes P-161 A et B et l'opérateur C-162 avec 96% de H2SO4 (acide fort) qui circule au moyen d'une forte pompe à acide, P-126 A et B.

En raison de la chaleur de décoloration de l'acide sulfurique, il est refroidi à l'eau glacée par un refroidisseur d'acide HE-161 pour maintenir une température inférieure à environ 30 ° C dans la première tour C-161 [1,4,12].

Une certaine quantité d'eau dans le gaz chloré est éliminée dans la première tour d'acide, C-161, et l'eau restante est enlevée dans la deuxième tour d'acide, C-162.

II.5.5. Compression et liquéfaction du chlore

II.5. 5. 1. Compression du chlore

Le gaz chloré sec est comprimé tout d'abord à l'aide d'un compresseur à anneau liquide avec 96% de H₂SO₄ en un mélange de deux phases chlore gazeux comprimé/gaz sulfurique (figure II.18). Puis, il est envoyé au premier séparateur XD-161 où il est séparé de l'acide sulfurique et déchargé après avoir traversé un élément de démoulage, à une pression de 3,5 bar ensuite au second séparateur D-161 où l'acide sulfurique est recyclé dans le refroidisseur XHE-161 qui supprime l'énergie de compression. Le recyclage du gaz chloré est contrôlé par le contrôleur de pression PIC-4161 [4].

II.5. 5. 2. Liquéfaction du chlore

La liquéfaction du chlore a pour objectif de réduire son volume pour pouvoir le transporter sur de très grandes distances. Elle est aussi employée, pour stocker une partie du gaz sous forme liquide en période de plus faible consommation et le vaporiser lorsque la demande est forte.

Pour liquéfier le chlore, des unités de refroidissement de remorquage sont prévues pour produire la saumure réfrigérée et collecter la saumure glacée et la pomper vers l'unité de refroidissement (K-163) 12 ° C (figure II.19).

Sec et comprimé à une pression d'environ 3,5 bar, Le gaz de chlore entre dans le liquéfacteur HE-162 où il est refroidi et liquéfié à l'aide d'une solution de diéthylenglycol (DEG) dans l'échangeur de chaleur à calandre et à tubes. Ensuite, il est transféré par gravité au séparateur D-162 où le mélange à deux phases de chlore gazeux / liquide est séparé [2,5].

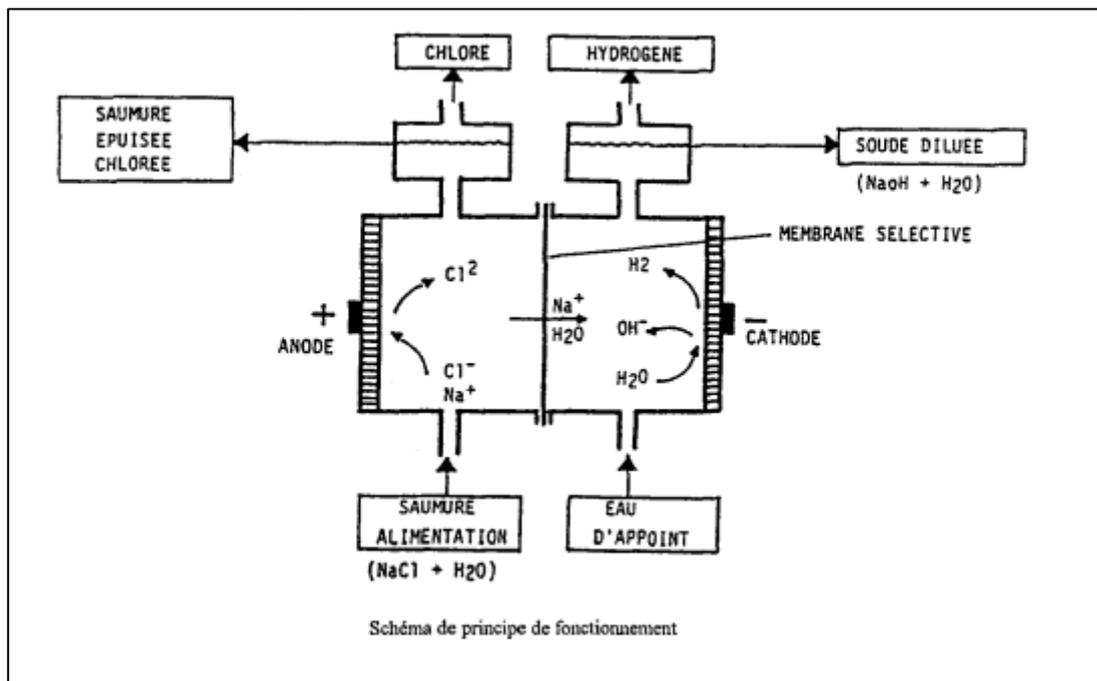


Figure II.19. Schéma de principe de liquéfaction du chlore [2].

II.5.6. Stockage et remplissage du chlore liquide

Le chlore liquéfié d'une densité de $1500 \text{ kg} / \text{m}^3$ s'écoule par gravité vers l'un des réservoirs de stockage T-162A / B / C / D d'une capacité d'eau de 50 m^3 (figure II.20). Les gaz résiduels au chlore et les inerts sont ventilés sous contrôle de contre-pression PIC-162 à la réaction de l'hypochlorite de sodium C-191.



Figure II. 20. Réservoirs de stockage

Dans ces réservoirs, 75 tonnes de chlore liquide peuvent être stockées avec un volume qui ne dépasse pas 95% du volume total disponible du bac, même pour une température maximale de 50 ° C.

Des bouteilles de chlore liquides (conteneurs à tonne) sont remplies dans les trois stations de remplissage dans lesquelles le processus de remplissage est effectué manuellement par l'opérateur de la zone. Les stations de remplissage sont équipées de balances reliées aux transmetteurs de poids et aux panneaux de contrôle locaux. L'opérateur remplit les cylindres en utilisant les boutons sur le panneau de commande et peut surveiller la quantité de remplissage du chlore sur l'écran du panneau [7]. Les réservoirs de stockage de chlore liquide sont également équipés d'une soupape à excès de débit.

II.6. CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons fourni une description du chlore étant un composé chimique halogéné dont les propriétés lui confèrent une grande importance dans la vie humaine et le développement industriel. Par la suite, nous avons détaillé les différentes techniques de sa fabrication. Puis, nous présentés la méthode de sa liquéfaction et son stockage pour des usages quotidiens.

Chapitre

III

ECHANGEURS DE CHALEUR

CHAPITRE III : ECHANGEURS DE CHALEUR

III.1. INTRODUCTION

Dans les sociétés industrielles, comme dans notre environnement quotidien, nous rencontrons des échanges thermiques « les radiateurs de refroidissement des voitures, les évaporateurs et les condenseurs des réfrigérateurs... ».

Dans ce chapitre, nous nous intéressons de calculer les paramètres fondamentaux du fonctionnement d'un échangeur de chaleur comme étant le responsable de transfert de la chaleur entre les fluides. Rappelons que le gaz de chlore entre dans le liquéfacteur HE-162 où il est refroidi et liquéfié dans l'échangeur de chaleur à calandre et à tubes.

III.2. ECHANGEURS DE CHALEUR

III.2.1. Définition d'un échangeur de chaleur

Un échangeur de chaleur est un appareil thermique de grande importance dans les installations énergétiques. Il est utilisé dans de nombreux domaines à savoir (automobile, climatisation, chauffage, ...etc.). Cet appareil est destiné à transférer un flux de chaleur d'un fluide à un autre. En général, les deux fluides sont séparés par une paroi (simple ou composée) constituant ainsi une résistance thermique. Dans certains équipements, le transfert thermique se fait par contact direct entre les fluides. C'est le cas de condenseurs et évaporateurs, ou l'un des fluides subit un changement de phase.

La diversité des domaines d'applications des échangeurs thermiques entraîne un foisonnement de formes géométriques (tubulaires, multitubulaires, plaques, à ailettes, etc.). L'échangeur consiste essentiellement à transmettre la chaleur d'une source chaude à une autre source de plus faible température [13].

III.2.2. Principaux types d'échangeurs thermiques [14].

Les échangeurs thermiques sont multiples et variés. Leurs configurations dépendent de leurs domaines d'installations énergétiques attribués. De leurs principaux types rencontrés :

- Les échangeurs à tubes et calandre : monotubes, coaxiaux ou multitubulaires.
- Les échangeurs à plaques : à surface primaire ou à surface secondaire.

- Les échangeurs d'autres types : contact direct, à caloducs ou à lit fluidisé.

III.2.2.1. Echangeurs à tubes et calandre

Dans les procédés chimiques et particulièrement les raffineries pétrolières, l'échangeur à tubes et calandre est largement adapté pour les applications à haute pression. Il est formé d'un faisceau de tubes déposé à l'intérieur d'une enveloppe appelée calandre (Figure III.1). L'un des fluides circule à l'intérieur d'un ensemble des tubes parallèles et l'autre fluide circule dans la calandre où il est ajouté des chicanes pour améliorer le transfert à l'extérieur des tubes. A chaque extrémité du faisceau sont fixées des boîtes de distribution assurant ainsi la circulation du fluide dans le faisceau en une ou plusieurs passes [15,16].

Ce type d'appareil peut être constitué de plusieurs tubes tels que plaines, coaxial, multitubulaire, longitudinalement à ailettes, etc.

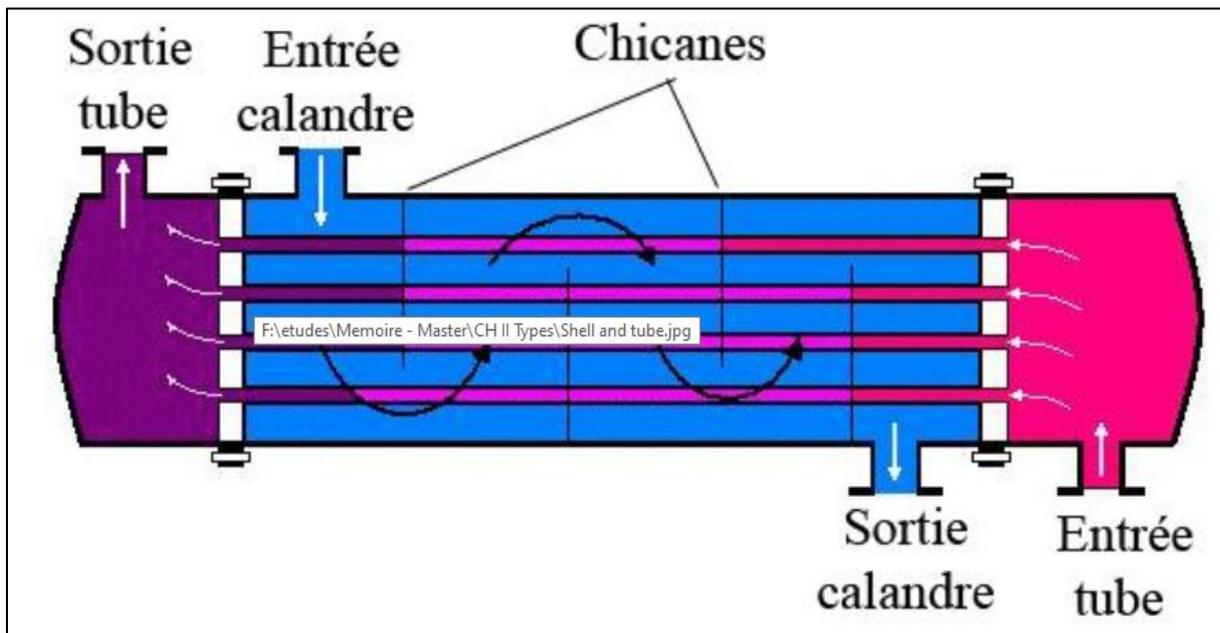


Figure III.1. Echangeurs à tubes-calandre.

III.2.2.2. Echangeurs à plaques

Un dispositif à plaques (Figure III.2) est composé d'un ensemble de plaques métalliques à travers lesquelles s'effectue le transfert de chaleur entre deux fluides. Ces plaques sont positionnées et serrées en chevrons ou en cannelures (industries alimentaires) entre deux bâtis (barres) fixe (inférieur) et mobile (supérieur) respectivement qui permettent de les guider et favoriser la turbulence des fluides et assure une bonne tenue à la pression [17,18].

Par chaque plaque est ajouté un joint afin d'assurer l'étanchéité de l'échangeur ainsi que la répartition des fluides dans les canaux formés par les deux plaques.

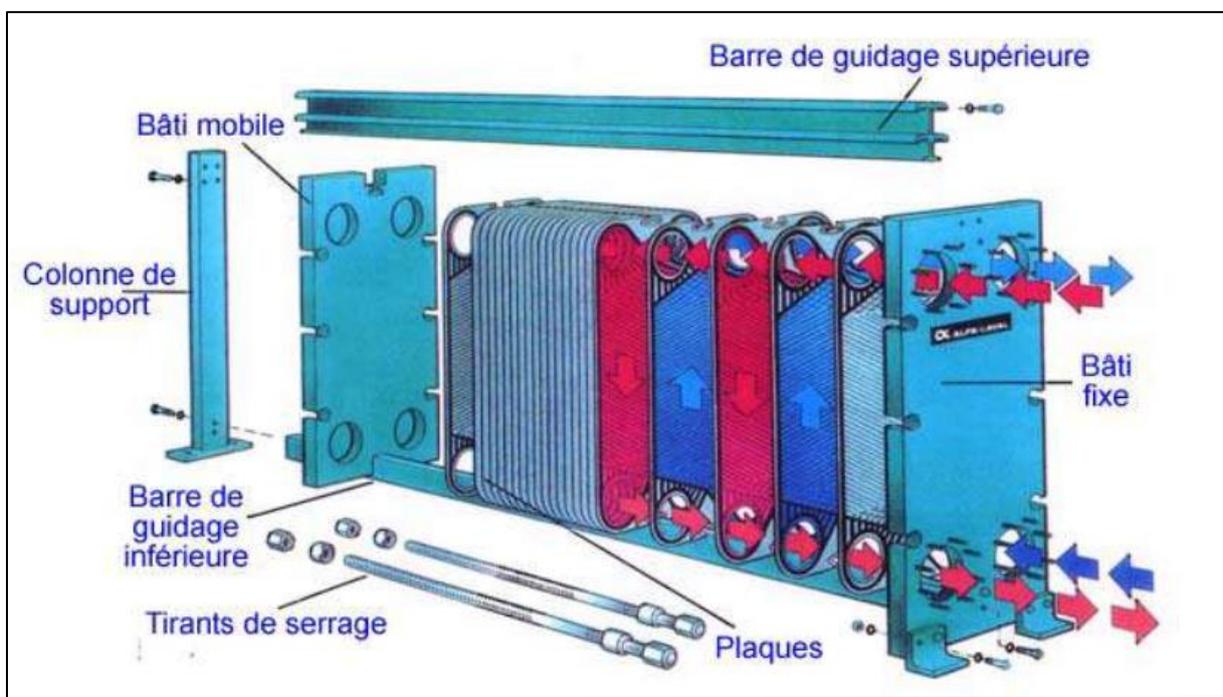


Figure III.2. Echangeurs à plaques.

III.2.3. Principe de fonctionnement de l'échangeur de chaleur [19]

Dans un échangeur, la chaleur est transmise d'un fluide à un autre. Le même fluide peut être conservé dans son état physique (liquide ou gazeux) ou se présenter successivement sous les deux phases (cas des condenseurs et des vaporiseurs) voir la figure (III.3). L'échange de chaleur entre les deux fluides suit trois étapes :

- ✓ Transfert de chaleur par convection du fluide chaude vers la paroi
- ✓ Transfert de chaleur par conduction à travers la paroi
- ✓ Transfert de chaleur par convection de la paroi vers le fluide froid.

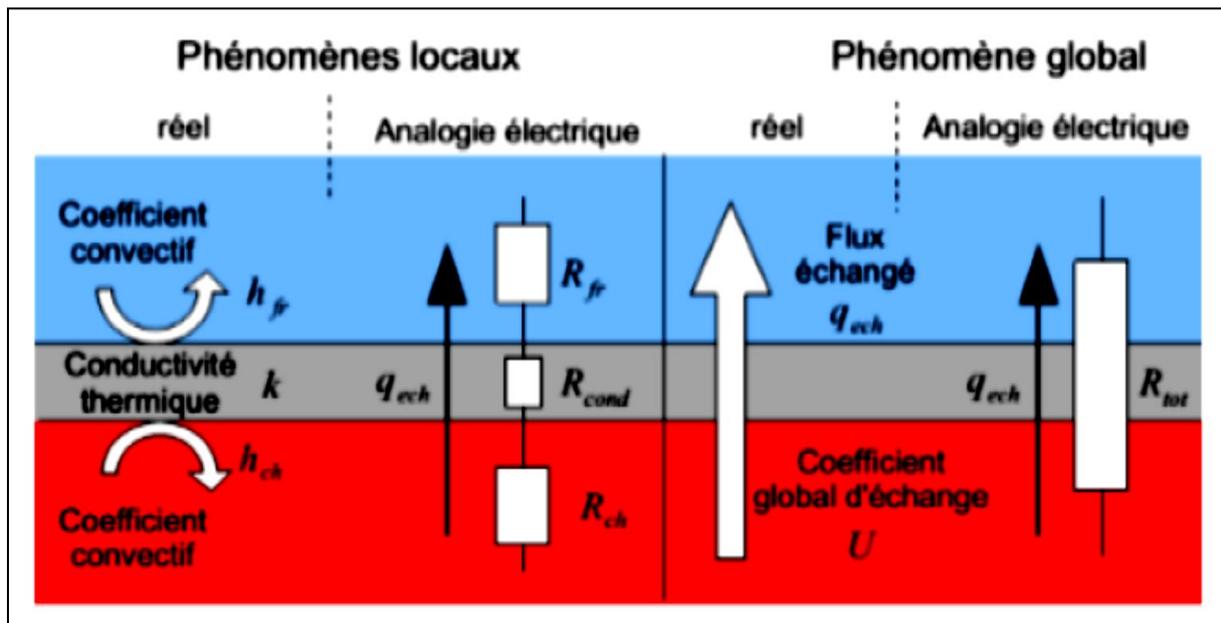


Figure III.3. Principe de fonctionnement d'un échangeur de chaleur : exemple simplifié, analogie électrique et notations principales [20].

III.3.4. Critères de classement des échangeurs [21]

Il existe plusieurs critères de classement des d'échangeurs thermiques.

III.3.4.1. Type de contact

- **Échangeur à contact direct** : Le type le plus simple comprend un récipient ou canalisation dans lequel les deux fluides sont directement mélangés et atteignent la même température finale.
- **Échangeur à contact indirect** : Les fluides s'écoulent dans des espaces séparés par une paroi.

III.3.4.2. Classement suivant la direction des écoulements

Les modes de circulation des fluides peuvent se ranger en trois catégories (Fig. III.4) :

- Même sens « Co-courants ».
- Sens contraire « Contre-courants ».
- Ou bien les vecteurs vitesses sont perpendiculaires l'un a l'autre ; il s'agit cette fois de « Courants Croisés ».

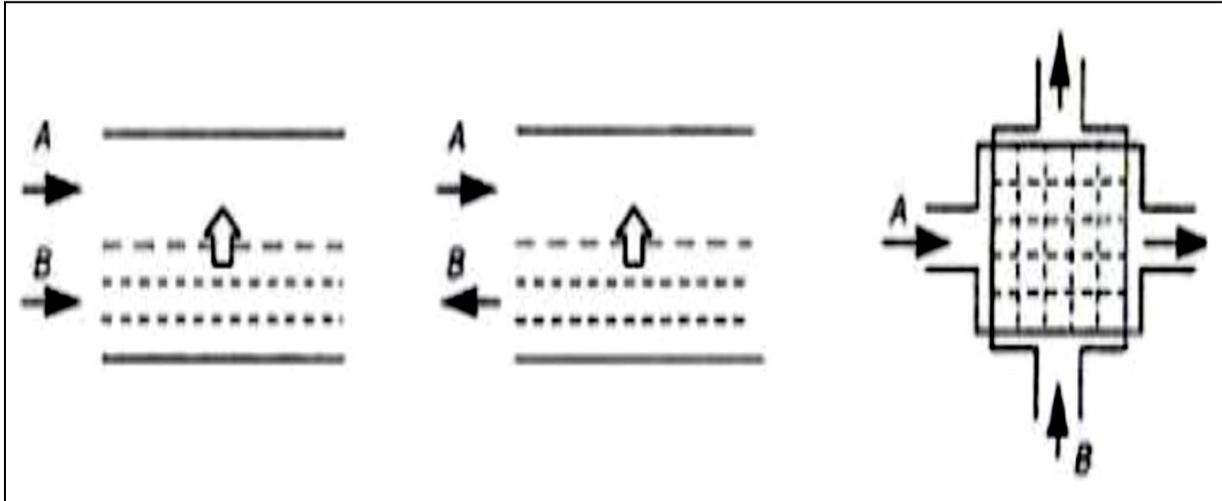


Figure III.4. Types d'échangeurs suivant la direction des écoulements [15].

- Les échangeurs à courants parallèles (co-courants) [22]

Les fluides chauds et froids circulent parallèlement dans la même direction comme le montre la figure (III.5).

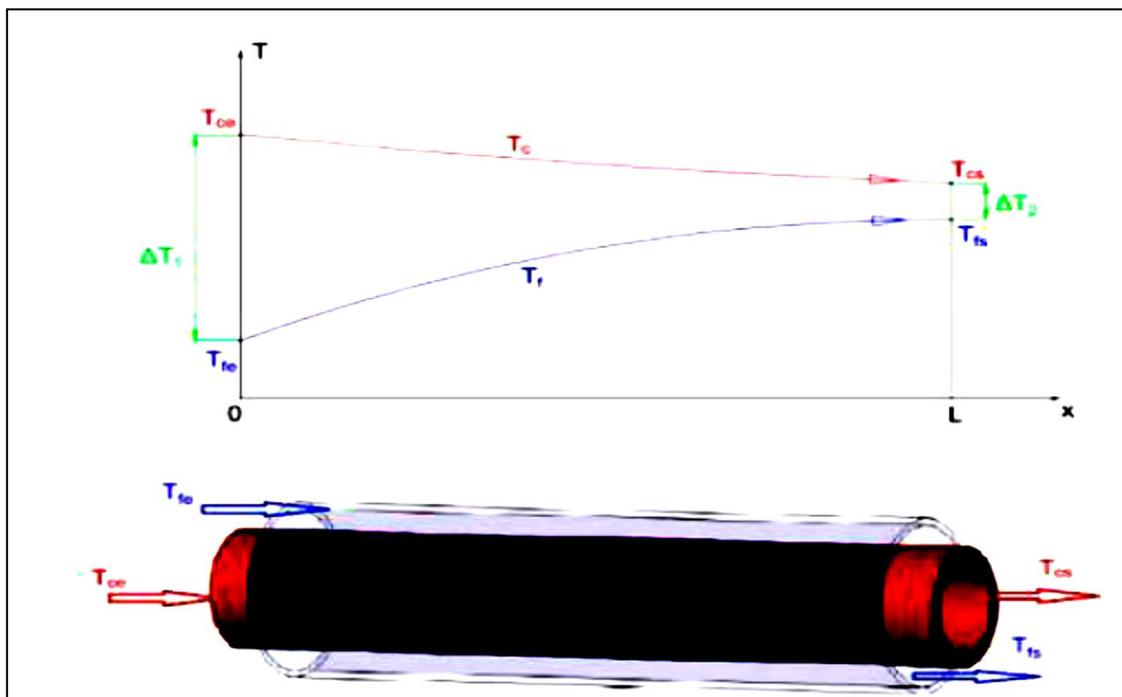


Figure III.5. Échangeur à co-courants.

- Les échangeurs à contre-courants [22]

Les fluides chauds et froids circulent parallèlement dans le sens contraire (figure (III.6)).

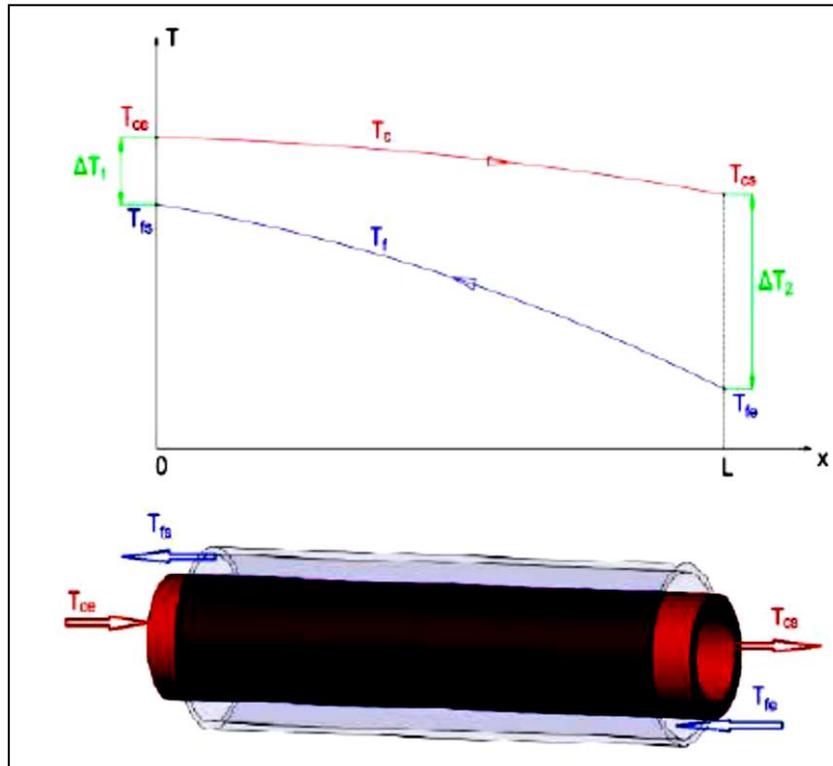


Figure III.6. Échangeur de chaleur à contre-courants.

- Les échangeurs à courants croisés [22]

Les fluides chauds et froids circulent perpendiculairement comme le montre la figure (III.7).

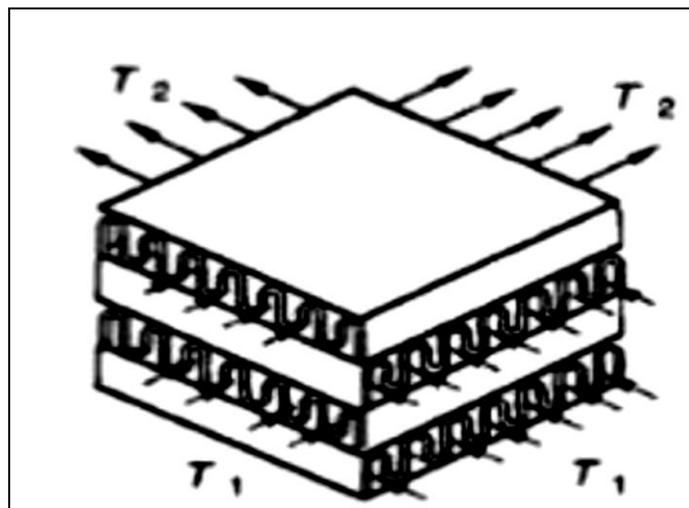


Figure III.7. Échangeur de chaleur à courants croisés.

III.3.4.3. Classement suivant la nature du matériau de la paroi d'échange

- Les échangeurs métalliques en acier, cuivre, aluminium.

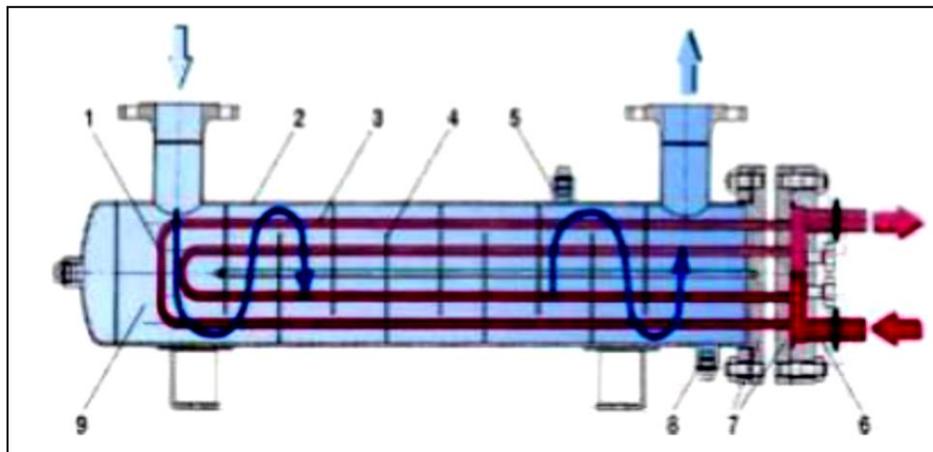
- Les échangeurs non métallique en plastique, céramique, verre, ...etc.

III.3.4.4. Classement suivant la construction de la géométrie

Il existe plusieurs configurations des échangeurs de chaleur : échangeurs tubulaires (tube, coaxial, échangeur multitubulaire : compact, à ailettes), échangeur tube et calandre (tube en forme U, échangeur de chaleur à plaques à tube, échangeur plaques et joints...etc.).

III.3.5. Les échangeurs à faisceaux tubulaires et calandre [23]

L'appareil est constitué d'un faisceau de tubes, disposé à l'intérieur d'une enveloppe dénommée calandre (Fig. III.8). L'un des fluides circule à l'intérieur d'un ensemble des tubes parallèles. L'autre fluide circule à l'intérieur de la calandre. On ajoute en général des chicanes dans la calandre pour améliorer le transfert à l'extérieur des tubes. A chaque extrémité du faisceau sont fixées des boîtes de distribution qui assurent la circulation du fluide à l'intérieur du faisceau en une ou plusieurs passes. Les tubes et la calandre sont donc soumis à la pression des fluides et doivent donc être construits pour y résister.



- | | |
|--------------------------|---------------------------|
| 1. Faisceau tubulaire. | 6. Intérieur boîte à eau. |
| 2. Enveloppe (calandre). | 7. Plaque tubulaire. |
| 3. Intérieur tube. | 8. Raccord vidange. |
| 4. Chicane. | 9. Intérieur enveloppe. |

Figure III.8. Échangeur à tube-calandre.

La plupart des échangeurs tubulaires de ce type sont conçus en respectant les normes « Standards of Tubular Exchanger Manufacturers Association » (TEMA). TEMA est une

association professionnelle de constructeurs d'échangeurs de ce type, qui se sont réunis pour définir des normes de conception.

III.4. CALCUL THERMIQUE DE L'ÉCHANGEUR TUBULAIRE HE-162

III.4.1. Calcul de l'efficacité de l'échangeur de chaleur

III.4.1.1. Définition de l'efficacité

L'efficacité dans l'échangeur de chaleur est le rapport du flux de chaleur effectivement transféré dans l'échangeur cryogénie ($\Phi_{\text{réel échangé}}$) aux flux de chaleur maximal ($\Phi_{\text{max possible}}$) qui serait transférer dans les mêmes conditions de température d'entrée de deux fluides.

$$\varepsilon = \Phi_{\text{réel échangé}} / \Phi_{\text{max possible}}$$

L'efficacité dans l'échangeur de chaleur peut être calculée par l'utilisation des équations suivantes :

- **A partir de K et S**
$$\varepsilon = \frac{K \cdot S \cdot \Delta T_{lm}}{\Phi_{\text{max possible}}} \quad (\text{III.1})$$

- **A partir M_c et CP_c**
$$\varepsilon = \frac{M_c \cdot CP_c \cdot \Delta T_c}{\Phi_{\text{max possible}}} \quad (\text{III.2})$$

- **A partir m_f et cp_f**
$$\varepsilon = \frac{M_f \cdot CP_f \cdot \Delta T_f}{\Phi_{\text{max possible}}} \quad (\text{III.3})$$

Avec:

ε : L'efficacité dans l'échangeur de chaleur

K: le coefficient de transfert de chaleur globale en $w/m^2 \text{ } ^\circ\text{C}$.

S: la surface de transfert de chaleur en m^2 .

ΔT_{lm} : la différence de la température logarithmique moyenne en $^\circ\text{C}$.

M_c, m_f : débit massique du fluide chaud et fluide froid respectivement en kg/s .

CP_c, cp_f : capacité calorifique du fluide chaud et fluide froid respectivement en $kcal/kg^\circ\text{C}$.

$\Delta T_c, \Delta T_f$: la différence de la température sortie et entrée fluide chaud et froid respectivement en $^\circ\text{C}$.

III.4.1.2. Méthodes de calcul de l'efficacité dans l'échangeur de chaleur

✓ La méthode de NUT.

✓ La méthode de ΔT_{lm} .

III.4.1.3. Etude de l'efficacité dans l'échangeur de chaleur par la méthode ΔT_{lm}

Cette méthode est utilisée dans le cas où les débits des fluides chauds et froids et leurs températures sont connus à l'entrée et à la sortie [24].

Nous avons utilisé cette méthode pour évaluer l'efficacité de l'échangeur de chaleur utilisé dans ce travail « échangeurs à fluides séparés, précisément aux échangeurs multitubulaires ».

Ce type d'échangeur est le plus répandu dans les unités de transformations des industries chimiques et pétrochimique. Un faisceau de tube est situé à l'intérieur d'une calandre dans laquelle circule le deuxième fluide.

Dans le tableau (III.1), nous regroupons les données réelles de l'échangeur de chaleur principal.

Tableau III.1. Données réelles de l'échangeur de chaleur principal.

Propriétés	Unité	Coté tube	Coté calandre
Fluide circulant		DEG	Gaz de chlore
Température d'entrée	°C	-12	30
Température de sortie	°C	-5	-1
Débit	Kg/h	27500	2500
Chaleur spécifique	Kcal/Kg°C	0,863	0,225
Masse volumique ρ	Kg/m ³	1032	1491
Diamètre	mm	27	438
Longueur	mm	6000	5930
Conductivité	W/m. °C	0,377	0,126
Viscosité	Pa.s	2,9	0,374
R (facteur d'encrassement ; résistance)	m ² C/w	0,000205	0,000205
Nombre de tubes	/	88	/

*DEG (di-éthylène glycol)

III.4.1.4. Calcul de l'écart logarithmique moyen de température :

En utilisant les paramètres physico-chimiques de l'échangeur étudié « tubulaire HE-162 » cités ci-dessus dans le tableau (III.1), nous avons calculé ΔT_{lm} .

$$\Delta T_{lm} = \frac{\Delta T_c - \Delta T_f}{\ln\left(\frac{\Delta T_c}{\Delta T_f}\right)} \quad (III.4)$$

Avec :

a) $\Delta T_{chaud} = T_{ce} - T_{fs} = (30 - (-5)) = 35^\circ C$

b) $\Delta T_{froid} = T_{cs} - T_{fe} = (-1 - (-12)) = 11^\circ C$

$\Delta T_{lm} = 20,74^\circ C$

III.4.1.5. Calcul du débit thermique unitaire pour les deux fluides

a) Q_{tc} : débit thermique unitaire pour le fluide chaud (le gaz de chlore)

$Q_{tc} = MC * C_p = 2500 * 0,225 = 562,5 \text{ k cal/h } ^\circ C$

$Q_{tc} = 562,5 \text{ k cal/h } ^\circ C$

a) q_{tf} : débit thermique unitaire pour le fluide froid (DEG di éthylène glycol)

$q_{tf} = m_f * c_p = 27500 * 0,863 = 23732,5 \text{ k cal/h } ^\circ C$

$q_{tf} = 23732,5 \text{ k cal/h } ^\circ C$

III.4.1.6. Calcule ϕ réel échangé

On établit un bilan thermique global de l'échangeur, en supposant que les pertes thermiques sont négligeables, donc la quantité de chaleur ϕ perdue par le fluide chaud est égale à celle reçue par le fluide froid :

La quantité de chaleur ϕ est calculée par utilisation de l'équation suivante :

$\phi \text{ réel échangé} = Q_{tc} * (T_{ce} - T_{cs}) = Q_{tf} * (t_{ce} - t_{cs})$

Donc:

$\phi \text{ réel échangé} = 562,5 * (30 - (-1)) = 17437,5 \text{ W}$

$\phi \text{ réel échangé} = 17437,5 \text{ W}$

III.4.1.7. Calcul de température différentielle maximale

$\Delta T_{max} = T_{ce} - T_{fe} = 30 - (-12)$

$\Delta T_{max} = 42^\circ C$

III.4.1.8. Calcul flux de chaleur maximal (ϕ max possible)

C'est le flux maximum échangé dans un échangeur à contre-courant de longueur infinie soit :

$\phi \text{ max possible} = (\text{la valeur minimum entre } Q_{tc} \text{ et } q_{tf}) * \Delta T_{max}$

On a:

$Q_{tf} > Q_{tc}$ donc:

$$\phi \text{ max possible} = Q_{tc} * \Delta T_{\text{max}} = 562,5 * 42$$

$$\phi \text{ max possible} = 23625 \text{ kcal/h}^\circ\text{C}$$

III.4.1.9. Calcul de l'efficacité de l'échangeur de chaleur HE-162

C'est le rapport du flux de chaleur effectivement transféré dans l'échangeur au flux de chaleur maximal qui serait transféré dans les mêmes conditions de températures d'entrée des deux fluides :

$$\varepsilon = \frac{\Phi_{\text{réel échangé}}}{\Phi_{\text{max possible}}} = \frac{17437,5}{23625} \quad (\text{III.5})$$

L'efficacité de l'échangeur de chaleur HE-162 obtenue est de :

$$\varepsilon = 0,73 \quad \text{donc} \quad \varepsilon = 73 \%$$

III.5. CALCULE DU COEFFICIENT D'ECHANGE GLOBALE

III.5.1. Calcul des coefficients d'échanges côté tubes et calandres

III.5.1.1. Coefficient d'échange côté tubes (DEG)

III.5.1.1.1. Calcul de Re et Pr

a) Calcul de T moyenne

Température moyenne de DEG (di-éthylène glycol) « DEG » entre à -12°C et sort à une température de -5°C :

$$T_{\text{m.DEG}} = \frac{T_e + T_s}{2} = \frac{-12 + (-5)}{2} = -8,5^\circ\text{C}$$

b) Surface d'échange d'un tube (interne)

$$S_i = \pi * \frac{d^2}{4} = \frac{((3,14 * (27)^2)}{4} = 572,27 \text{ mm}^2 \quad (\text{III.6})$$

c) Nombre de tubes par passe (vu qu'il s'agit de 4 passe côté tube)

Le nombre de tube dans l'échangeur de chaleur est de : 88 tubes

$$N_t = \frac{88}{4} = 22$$

d) **Surface totale d'écoulement interne (dans les tubes)**

$$S_{i, totale} = N_t * S_i = 22 * 572,27(10^{-6}) = 0,013 \text{ m}^2$$

e) **Vitesse massique de DEG**

$$V_{\text{massique, DEG}} = \frac{D_{DEG}}{S_{i, totale}} = \frac{27}{0,013} = 2076 \text{ kg.s}^{-1}.\text{m}^{-2} \quad (\text{III.7})$$

- masse volumique de DEG utilisé à -8,5 °C

$$\rho_{\text{DEG}} = 1032 \text{ kg/m}^3$$

f) **Vitesse linéaire de DEG dans les tubes**

$$V_{\text{DEG}} = \frac{V_{\text{massique DEG}}}{\rho_{\text{DEG}}} = \frac{2076}{1032} = 2,01 \text{ m/s} \quad (\text{III.8})$$

- Conductivité thermique de DEG : $\lambda = 0,377 \text{ w/m.}^\circ\text{C}$
- Viscosité thermique de DEG : $\mu_{\text{DEG}} = 2,9 * 10^{-3} \text{ Pa .S}$

g) **Nombres adimensionnels**

$$\text{Re}_{\text{DEG}} = \frac{\rho_{\text{DEG}} * d_i * v_{\text{DEG}}}{\mu} = \frac{1032 * 0,027 * 2,01}{2,9 * 10^{-3}} = 19312,63 \quad (\text{III.9})$$

$$\text{Pr}_{\text{DEG}} = \frac{c_p \text{DEG} * \mu}{\lambda_{\text{DEG}}} = \frac{0,863(10^3) * 2,9(10^{-3})}{0,377} = 6,64 \quad (\text{III.10})$$

h) **Calcul de Nu et de h tubes**

Pour le calcul du coefficient de convection dans les tubes, plusieurs corrélations sont utilisables .On peut, dans ce cadre, utiliser celle de Mc Adams qui s'écrit :

$$\begin{aligned} \text{Nu}_i &= \frac{d_i . h_{\text{tub}}}{\lambda_{\text{DEG}}} = 0,023 * (\text{Re}_{\text{DEG}})^{0,8} * (\text{Pr}_{\text{DEG}})^{0,4} \quad (\text{III.11}) \\ &= \frac{0,023 * 0,377}{0,0027} * (19312)^{0,8} (6,64)^{0,4} \end{aligned}$$

On aura : $h_{\text{tubes}} = 1837,57 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$

III.5.2. Coefficient d'échange côté calandre (chlore)

Choix de l'espacement entre chicanes : les valeurs standardisées de l'espacement entre chicanes varient de 0,2 jusqu' à 1 fois le diamètre de calandre. L'optimum est généralement trouvé entre 0,2 et 0,5 fois diamètre de calandre.

Dans ce cadre, en choisissant une valeur de 0,3 et connaissant le diamètre de calandre $D_c = 438 \text{ mm}$, on peut calculer l'espacement entre chicanes noté E_c :

$$E_c = 438 * 0,3 = 131,4 \text{ mm}$$

III.5.2.1. Calcul du nombre des chicanes

$$N_{\text{chicanes}} = \left(\frac{\frac{\text{Longueur des tubes}}{4(\text{passes})}}{\text{Espacement entre chicanes}} \right) = \left(\frac{\frac{6}{4}}{0,1314} \right) = 11 \quad (\text{III.12})$$

Pas tubulaire (pitch) choisi : $1,25 * 27 = 33,75 \text{ mm}$

III.5.2.2. Calcul de la surface d'écoulement entre chicanes

La surface d'écoulement entre chicanes est calculée en tenant compte des tubes et de l'espacement entre chicanes par la formule suivante :

$$A = \left(\frac{Pt - d_{\text{ext}}}{Pt} \right) * D_c * E_c \quad (\text{III.13})$$

$$A = \left(\frac{33,75 - 27}{33,75} \right) * 438(10^{-3}) * 131,4(10^{-3}) = 0,023 \text{ m}$$

III.5.2.3. Calcul la vitesse massique g du côté calandre :

$$G = \frac{D_{\text{chlore}}}{A} = \left(\frac{27500}{3600} \right) * \left(\frac{1}{0,023} \right) = 30,19 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1} \text{ m}^{-2} \quad (\text{III.14})$$

III.5.2.4. Calcule du diamètre équivalent d_{eq} de la calandre

$$d_{\text{eq}} = \left(\frac{4 * \frac{pt^2 - \pi \cdot di^2}{4}}{di} \right) = \frac{1,10}{27} * (33,75^2 - 0,917 * (27)^2) = 19,17 \text{ mm} \quad (\text{III.15})$$

Température moyenne du fluide : $\frac{30 + (-1)}{2} = 14,5 \text{ } ^\circ\text{C}$

Densité du chlore à 14,5 °C : $\rho_{\text{chlore}} = 1461 \text{ kg/m}^3$

Viscosité du chlore à 14,5 °C : $\mu_{\text{chlore}} = 0,374 \text{ Pa.s}$

Conductivité thermique de chlore à 14,5 °C : $\lambda_{\text{chlore}} = 0,126 \text{ W/m.}^\circ\text{C}$

III.5.2.5. Calcul du nombre de Reynolds

Le **nombre de Reynolds** représente le rapport entre les forces d'inertie et les forces visqueuses.

$$Re = \frac{G \cdot Deq}{\mu} = \frac{332.12 \cdot 19.17 (10^{-3})}{0.374 (10^{-3})} = 17023,37 \quad (\text{III.16})$$

III.5.2.6. Calcul du nombre de Prandtl

Le **nombre de Prandtl** compare la rapidité des phénomènes thermiques et des phénomènes hydrodynamiques dans un fluide.

$$Pr = \frac{Cp_{\text{chlore}} \cdot \mu}{\lambda_{\text{chlore}}} = \frac{0,225 (10^3) \cdot 0,374 (10^{-3})}{0,126} = 0,67 \quad (\text{III.17})$$

III.5.2.7. Coefficient de convection côté calandre calculé par la corrélation de Mc Adams pour les écoulements externes

$$Nu = \frac{Deq \cdot h_{cal}}{\lambda_{chlore}} \rightarrow h_{cal} = \frac{Nu \cdot \lambda_{chlore}}{Deq} \quad (\text{III.18})$$

$$Nu = 0,023 \cdot (Re_{\text{chlore}})^{0,8} \cdot (Pr_{\text{chlore}})^{0,4}$$

$$h_{cal} = \frac{0,126}{19,17 \cdot (10^{-3})} \cdot 0,023 \cdot (17023,37)^{0,8} \cdot (0,67)^{0,4} = 312,42 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$$

III.6. CALCUL DE COEFFICIENT GLOBAL DE L'ÉCHANGEUR

Le coefficient d'échange global d'un échangeur à faisceau et calandre basé sur la surface d'échange externe s'écrit suivant la formule :

$$U_0 = \frac{1}{\left(\frac{1}{h_{cal} \cdot A_{ext}} + \left(\frac{R_{f_{cal}}}{A_{ext}} \right) + \frac{\ln\left(\frac{d_{ext}}{d_{int}}\right)}{2 \cdot \pi \cdot L \cdot \lambda} + \left(\frac{R_{f_{tubes}}}{A_{int}} \right) + \frac{1}{h_{tubes} \cdot A_{int}} \right)} \quad (\text{III.19})$$

Avec : $R_{f_{cal}}$ et $R_{f_{tubes}}$, les résistances thermiques respectives de l'encrassement côté calandre et tubes en ($\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C/W}$).

A_{int} et A_{ext} : les surfaces respectives externes et internes d'un tube.

On a donc :

$$\left(\frac{1}{U_0}\right) = \left(\frac{1}{h_{cal}}\right) + R_{f\ cal} + \left(\frac{\pi \cdot d_{ext} \cdot L \cdot \ln\left(\frac{d_{ext}}{d_{int}}\right)}{2 \cdot \pi \cdot L \cdot \lambda}\right) + \frac{\pi \cdot d_{ext} \cdot L \cdot R_{ftubes}}{\pi \cdot d_{int} \cdot L} + \frac{\pi \cdot d_{ext} \cdot L}{h_{tubes} \cdot \pi \cdot d_{int} \cdot L}$$

III.6.1. Calcul du facteur d'encrassement

a) $R_{f\ cal} = 0,000205 \text{ m}^2 \cdot \text{°C/W}$

$$\frac{1}{0,000205} = 4878,05 \text{ W/ m}^2 \cdot \text{°C}$$

b) $R_{f\ tubes} = 0,000205 \text{ m}^2 \cdot \text{°C/W}$;

Alors le facteur d'encrassement est de : $\frac{1}{0,000205} = 4878,05 \text{ W/ m}^2 \cdot \text{°C}$

Donc :

$$\begin{aligned} \frac{1}{U_0} &= \frac{1}{312,42} + 0,000205 + \left(\frac{438(10^{-3}) \cdot \ln\left(\frac{438}{27}\right)}{0,377}\right) + \left(\frac{438(10^{-3}) \cdot 0,000205}{27,10^{-3}}\right) \\ &\quad + \left(\frac{438(10^{-3})}{1837,57 \cdot 27 \cdot 10^{-3}}\right) = 0,001694 \end{aligned}$$

$$U_0 = 590 \text{ W/ m}^2 \cdot \text{°C}$$

III.7. L'EFFICACITE EN FONCTION DE U, S, Φ ET T

Le flux de chaleur maximal (ϕ max possible) dans un échangeur de chaleur est généralement constant. Cependant l'efficacité (ϵ) varie relativement avec les facteurs suivants :

III.7.1. L'efficacité en fonction du U

L'évolution de l'efficacité de l'échangeur de chaleur (ϵ) en fonction du coefficient d'échange global (U) est présentée dans le tableau ci-dessous :

Tableau III.2. Evolution de l'efficacité (ϵ) en fonction du coefficient d'échange global (U).

U (w/m²°C)	592,01	590,5	557,57	507,80	438,88	326,35
Efficacité ϵ	0,7428	0,7380	0,7241	0,69	0,64	0,54

Les résultats trouvés sont aussi représentés graphiquement dans la figure ci-dessous :

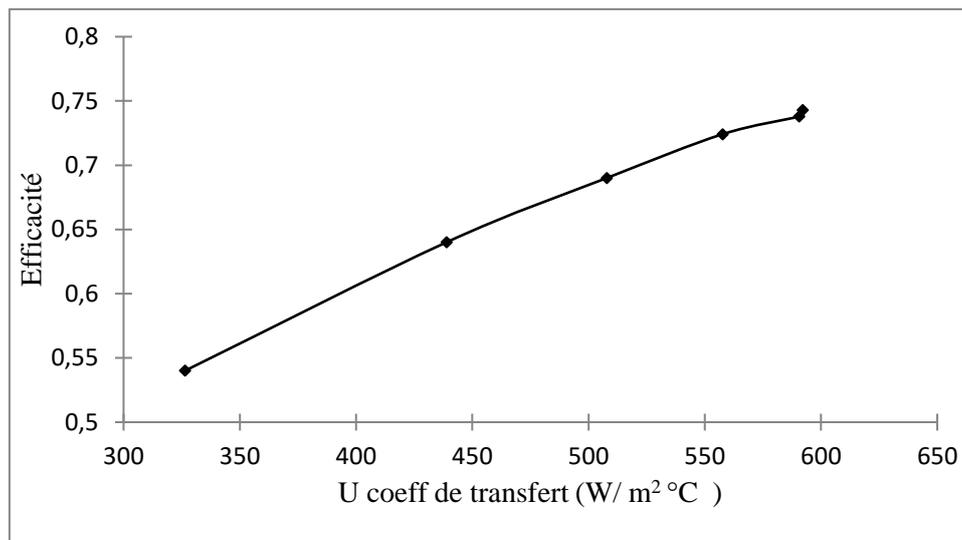


Figure III.9: L'évolution de l'efficacité de l'échangeur de chaleur en fonction de U.

Interprétations :

La figure III.9 : représente la variation de l'efficacité de l'échangeur de chaleur ϵ en fonction du coefficient d'échange global U.

En général, on sait que le coefficient d'échange de chaleur est en fonction des caractéristiques physiques des fluides utilisés à des températures de fonctionnement de l'échangeur de chaleur ainsi que des matériaux des tubes et de calendres et leur épaisseur.

On remarque que cette variation est une fonction linéaire croissante positive. L'efficacité de l'échangeur de chaleur croît linéairement avec le coefficient de transfert de chaleur global, plus le coefficient augmente plus l'efficacité est importante.

III.7.2. L'efficacité en fonction du S

La variation de l'efficacité de l'échangeur de chaleur (ϵ) en fonction de la surface d'échange globale (S) est déterminée dans le tableau suivant :

Tableau III.3. Variation de l'efficacité de l'échangeur de chaleur (ϵ) en fonction de la surface d'échange globale (S).

S (m²)	1,437	1,435	1,431	1,429	1,420	1,400
Efficacité ϵ	0,7428	0,7380	0,7241	0,69	0,64	0,54

Les résultats extraits du tableau sont aussi figurés ci-dessous :

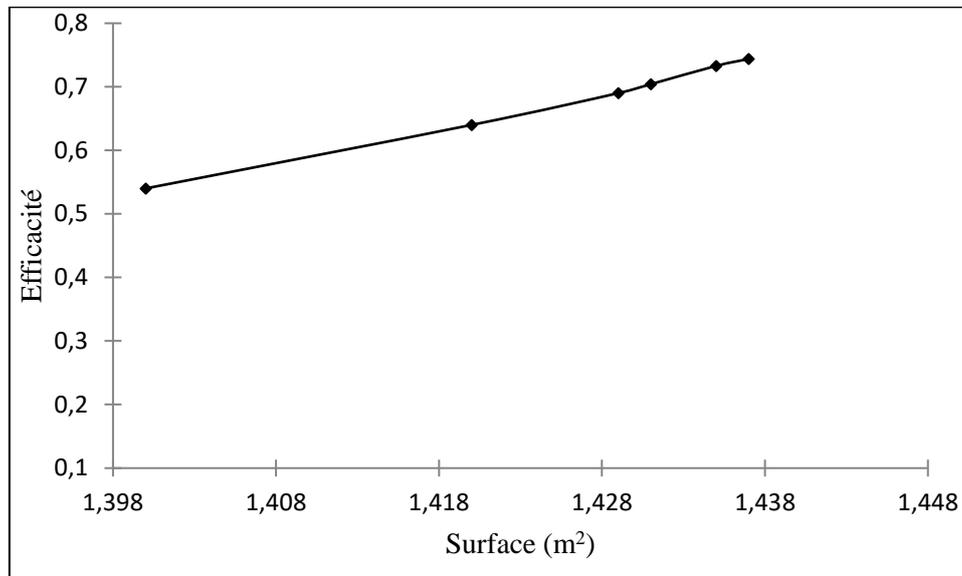


Figure III.10. Influence de la surface d'échange S sur l'efficacité de l'échangeur de chaleur.

Interprétations :

La Figure III.10 : représente l'évolution de l'efficacité de l'échangeur de chaleur ϵ en fonction de la surface d'échange globale S.

On remarque que cette variation est une fonction linéaire croissante positive. L'efficacité de l'échangeur de chaleur croît linéairement avec la surface d'échange globale S. Plus le coefficient augmente plus l'efficacité est importante.

III.7.3 L'efficacité en fonction de Φ

Le développement de l'efficacité de l'échangeur de chaleur (ϵ) en fonction du flux de chaleur échangé (Φ) est identifié dans le tableau suivant :

Tableau III.4. Développement de l'efficacité (ϵ) en fonction du flux (Φ).

Φ (W)	17437,5	14625	11812,5	9000	6187,5	3375
Efficacité ϵ	0,7428	0,7380	0,7241	0,69	0,64	0,54

Les résultats relevés du tableau sont aussi tracés graphiquement dans la figure suivante :

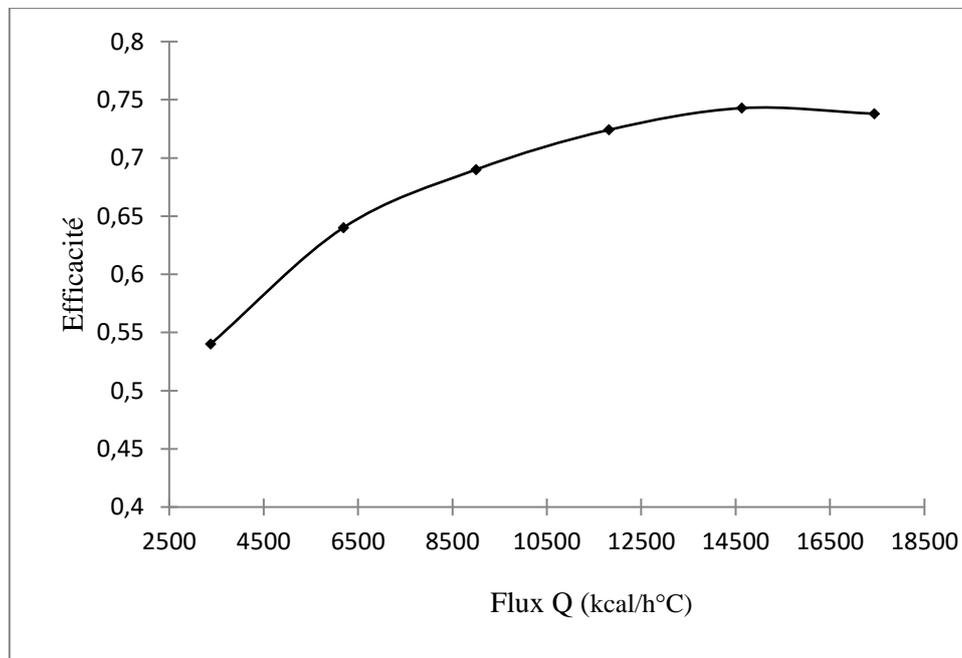


Figure III.11. L'évolution de l'efficacité de l'échangeur de chaleur en fonction du flux de chaleur échangé.

Interprétation :

La Figure III.11 : représente la variation de l'efficacité ϵ de l'échangeur de chaleur en fonction de flux de chaleur. On remarque que cette variation est une fonction linéaire croissante positive. L'efficacité de l'échangeur de chaleur croît linéairement avec la valeur du flux de chaleur échangée entre les deux fluides, plus le flux augmente plus l'efficacité est importante.

III.7.4 L'efficacité en fonction T

Le tableau ci-dessous regroupe les calculs de progression de l'efficacité de l'échangeur de chaleur (ϵ) en fonction de la température (T).

Tableau III.5. Progression de l'efficacité (ϵ) en fonction de la température (T).

T	30	25	20	15	10	5
Efficacité ϵ	0,7428	0,7380	0,7241	0,69	0,64	0,54

Les résultats obtenus du tableau sont également représentés sur le graphe suivant :

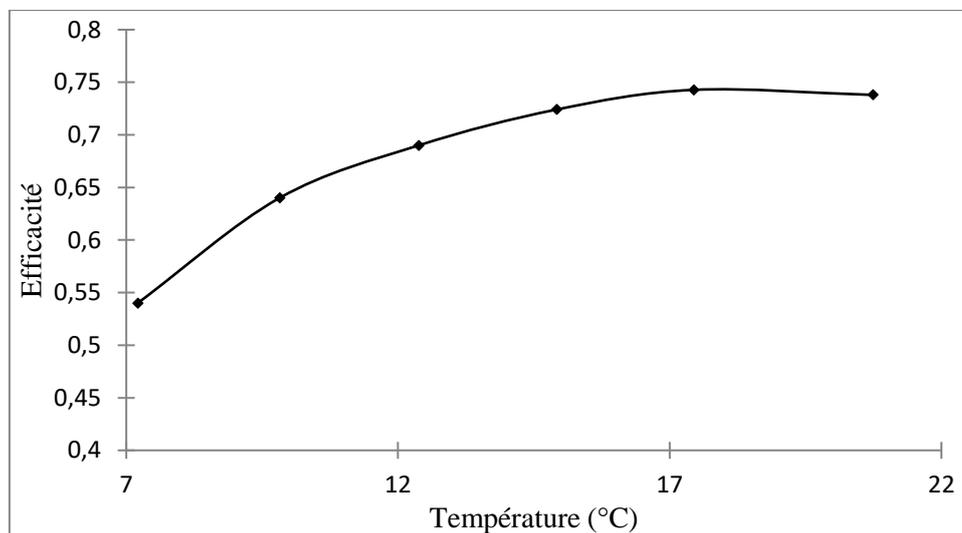


Figure III.12: l'évolution de l'efficacité de l'échangeur de chaleur en fonction de T.

Interprétation :

La figure III.12: représente la variation de l'efficacité de l'échangeur de chaleur ϵ en fonction de T (température). Cette variation est une fonction exponentielle positive. A partir de cette courbe, on peut dire qu'il y a une relation d'équivalence entre ϵ et T, lorsque T augmente, l'efficacité de l'échangeur augmente aussi, jusqu'à une valeur voisine à $\epsilon = 1$.

III.8. CONCLUSION

On sait que le coefficient d'échange de chaleur est en fonction des caractéristiques physique des fluides utilisés à des températures de fonctionnement du dispositif ainsi que de la nature du matériau de construction des tubes et de calendres. D'après nos résultats, l'efficacité de l'échangeur de chaleur évolue linéairement avec le coefficient de transfert de chaleur global, plus le coefficient augmente plus l'efficacité de l'échangeur est importante. Aussi, la variation de l'efficacité de l'échangeur de chaleur est en fonction de la surface d'échange globale, elle est linéaire, croissante et positive. L'efficacité de l'échangeur de chaleur croit linéairement avec la surface d'échange globale.

La grande efficacité thermique du dispositif étudié est en relation avec le mode du fonctionnement de l'échangeur qui est à contre-courant. Alors, l'échangeur de chaleur HE-162 traité dans ce travail est très efficace car cet appareil joue un rôle très important dans le circuit de liquéfaction et précisément celle du chlore.

CONCLUSION GENERALE

Depuis quelques années, l'élément chlore qui est ainsi une matière première de base pour de nombreuses industries a acquis une importance considérable dans le développement économique mondial.

Le chlore liquide présente des utilités diverses dans différents domaines industriels ainsi que dans les usages quotidiens de l'homme.

Cependant, ses qualités physico-chimiques envisagées dépendent de façon prépondérante de celles du sel brut qui entre dans sa conception et d'une moindre façon du procédé que l'on peut lui faire subir. Ainsi que le matériel employé.

La liquéfaction, l'un des traitements du chlore, est une technique principale qui permet de liquéfier le gaz chlore et le stocker dans des bacs de stockage puis le transporter sur de grandes distances lors de sa demande.

Ce procédé nécessite des échangeurs de chaleur dont le rôle est de faciliter le transfert de chaleur entre deux fluides chaud et froid respectivement sans les mélanger.

Dans le cadre de ce travail, nous avons étudié le mécanisme de liquéfaction de l'élément chimique « le chlore » au sein de l'entreprise ADWAN CHEMICALS COMPANY ALGERIA. En parallèle, nous avons observé les paramètres principaux de de l'échangeur de chaleur à tube-calandre HE-162, à partir des données réelles de l'installation, qui constitue une unité importante dans laquelle s'élabore le transfert de chaleur entre les fluides.

Il est à noter que le coefficient d'échange de chaleur est en fonction des caractéristiques physique des fluides utilisés à des températures de fonctionnement du dispositif ainsi que de la nature du matériau de construction des tubes et de calendres.

D'après nos résultats, l'efficacité de l'échangeur de chaleur évolue continuellement avec le coefficient de transfert de chaleur global, plus le coefficient croît plus l'efficacité de l'échangeur est importante.

Aussi, la variation de l'efficacité de l'échangeur de chaleur est en fonction de la surface d'échange globale, elle est linéaire, croissante et positive. L'efficacité de l'échangeur de chaleur augmente linéairement avec la surface d'échange globale.

La grande efficacité thermique de l'appareil traité est en relation avec le mode du fonctionnement de l'échangeur étant à contre-courant. Alors, l'échangeur de chaleur HE-162 étudié dans ce travail est très efficace car il joue un rôle primordial dans le circuit de liquéfaction et essentiellement celle du chlore.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] R. DANDRES, Le Chlore, Institut National de Recherche et de sécurité (1971).
- [2] F. DELMAS. Production de chlore et de soude par le procédé à membrane échangeuse d'ions. Journal de Physique IV Colloque, 1994.
- [3] Jules Houtmeyers, BelgoChlor c/o Fedichem, livre blanc du chlore, (2004).
- [4] Gauthier Villars Masson et Cie, La liquéfaction des gaz et ses applications, (1917).
- [5] Mounir Bennajah Naoil Chaouni, échangeur de chaleur technologie, calcul et design, éditions TECHNIP, (2014).
- [6] DJEDDH Halima, Procédé de fabrication d'hypochlorite de sodium et la caractérisation de produit, (2018).
- [7] Jacques Dugua, Angelo Auttaviani, L'unité Chlore-Soude à Membrane de Fos, L'actualité chimique, (1994).
- [8] Jean Christophe Millet, Chlore, (2007).
- [9] SALIHA GHERMOUCHE, CHERIFA RABIA, Les halogènes Chimie Minérale Descriptive Cours, Editions Al Djazair, (2013).
- [10] <https://www.compagnie-des-sens.fr/chlorure-proprietes-bienfaits-et-conseils-d-utilisation/>
- [11] <https://www.techno-science.net/glossaire-definition/Chlore-page-2.html>
- [12] ABDELHAK N, KELLOUMA : Conception d'un système de comptage automatisé à l'usine FCI : Partie automatisation par API S7-1200 mémoire de fin d'étude, Université Kasdi Merbah Ouargla (2016).
- [13] A. BOUKHEDENA, Calcul thermique d'une installation cryogénique de liquéfaction du méthane, mémoire de master académique, génie mécanique, énergétique, Université de Annaba, (2020).
- [14] A. BONTEMPS, A. GAREIGUE, CH. GOUBIER, J. HUETZ, CH. MARVILLET ET R. VIDIL « Description des échangeurs de chaleur », technique de l'ingénieur [B 2 341].
- [15] FAROUK TAHROUR, « Modélisation et optimisation des échangeurs de chaleur à ailettes indépendantes », thèse de doctorat, option : Physique Energétique, Université El Hadj Lakhder Batna, (2016).

- [16] « transfer de chaleur » CESIRE, université de Joseph Fourier, Grenoble.
- [17] Leconte. J, « Echangeur de chaleur dimensionnement thermique », techniques de l'ingénieur, traité mécanique et chaleur [B2342]
- [18] F RAMESH K. SHAH AND DUSAN P. SEKULIC, Fundamentals of heat Exchanger design, John wiley & Sons, Inc.p 3/4, (2003).
- [19] B. ABBAS, "Etude d'échangeurs de chaleur (Application à raffinerie de Hassi Messaoud)," in génie mécanique : Mouhamed Boudiaf-M'SILA-, (2016-2017).
- [20] Mathieu LEGAY, "Intensification des processus detransfert de chaleur par ultrasons, vers un nouveau type d'échangeur dechaleur : l'échangeur vibrant," 26 octobre (2012).
- [21] T. FARIDA, "Etude du comportement dynamique et thermique des deux écoulements du fluide dans un échangeur de chaleur (comparaison entre le cas simple et le cas avec ailettes)," in génie mécanique : Université Abou BakrBelkaid-TLEMEN-, pp. 6-8, (/2013).
- [22] Jean-Marie SEYNHAEVE, Les bases du transfert de chaleur.
- [23] Zoé Minville, NasiaCaney, Patrice Clement, Philippe Bandelier, Philippe Marty, Jean AntonieGruss et Claude Roussel. Description des échnageurs de chaleur. Technique de l'ingénieur [BE 9516].
- [24] H. Lanez, D. Khader, Optimisation du bilan thermique d'un circuit de refroidissement du solvant lourd en présence du phénomène d'encrassement, mémoire master académique, génie des procédés, raffinage et pétrochimie, université deEchahid Hamma Lakhdar El Oued, (2015).

ملخص

باعتباره مادة خام لا تتضب ، يعتبر الكلور موضوع اهتمام كبير في النمو الصناعي والاقتصادي العالمي. تعمل في عدة مجالات مثل معالجة المياه ، الطب ، الصحة ، الإلكترونيات ، إلخ. يخضع إنتاجها ومعالجتها لإجراءات صارمة تعتبر عملية التسييل جزءًا منها.

من هذا المنظور ، فإن عملنا الحالي مكرس لدراسة تقنية تسييل الكلور التي أجريت على مستوى شركة
ADWAN CHEMICALS COMPANY ALGERIA

تتم هذه العملية باستخدام مجموعة من المعدات بما في ذلك المبادلات الحرارية ، والتي تلعب دورًا أساسيًا لأنها تعزز انتقال الحرارة بين جسمين مائلين دون خلطهما. بعد ذلك ، تم حساب المعلمات الأساسية للمبادل الحراري للذيفة والأنبوب HE-162 من البيانات الفعلية لتركيبها.

أظهرت النتائج التي تم الحصول عليها أن أعلى كفاءة حرارية للجهاز المستخدم مرتبطة بطريقة تشغيل المبادل من نوع التيار المعاكس. لذلك ، فإن المبادل الحراري HE-162 المعالج هنا ذو كفاءة عالية لدوره الأساسي في دائرة التميع وخاصة دور الكلور.

الكلمات الدالة: غاز الكلور ، عملية ، تسييل ، شركة عدوان ، مبادل ، حرارة.

Résumé

Comme matière première inépuisable, le gaz chlore fait l'objet d'un grand intérêt dans la croissance industrielle et économique mondial. Il intervient dans plusieurs domaines tels que le traitement des eaux, la médecine, la santé, l'électronique...etc.

Sa fabrication et sa manipulation sont soumises à des procédures rigoureuses dont le procédé de liquéfaction fait partie.

Dans cette optique, notre présent travail est consacré à une étude sur la technique de liquéfaction du chlore effectuée au niveau de l'entreprise ADWAN CHEMICALS COMPANY ALGERIA. Ce processus s'effectue à l'aide d'un ensemble d'équipement parmi lesquels les échangeurs thermiques qui constitue un rôle indispensable car il favorise le transfert de chaleur entre deux corps fluides sans les mélanger.

Par la suite, les paramètres fondamentaux de l'échangeur de chaleur à tube-calandre HE-162 ont été calculé à partir des données réelles de son installation.

Les résultats obtenus nous ont montré que l'efficacité thermique la plus élevée du dispositif exploité est corrélative avec le mode du fonctionnement de l'échangeur type contre-

courant. Alors, l'échangeur de chaleur HE-162 traité ici est fortement performant pour son rôle essentiel dans le circuit de liquéfaction et particulièrement celle du chlore.

Mots clefs : gaz chlore, procédé, liquéfaction, entreprise ADWAN, échangeur, chaleur.

Abstract

As an inexhaustible brut material, chlorine is the object of great interest in the world industrial and economic growth. It is used in several fields such as water treatment, medicine, health, electronics...etc. Its production and handling are subject to rigorous procedures of which the liquefaction process is part.

In this perspective, our present work is devoted to a study on the liquefaction technique of chlorine carried out at the level of the company ADWAN CHEMICALS COMPANY ALGERIA. This process is performed out with a set of equipment among which the heat exchangers which constitutes an indispensable role because it favors the heat transfer between two fluid bodies without mixing them.

Subsequently, the fundamental parameters of the HE-162 calandria-tube heat exchanger were calculated from the real data of its installation.

The obtained results showed us that the highest thermal efficiency of the operated device is correlated with the operation mode of the countercurrent type exchanger. So, the HE-162 heat exchanger treated here is highly efficient for its essential role in the liquefaction circuit and particularly that of chlorine.

Key words: chlorine gas, process, liquefaction, ADWAN company, exchanger, heat.