



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
People's Democratic Republic of Algeria  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي  
Ministry of Higher Education and Scientific Research  
جامعة أمحمد بوقرة ببومرداس  
University M'hamed Bougara of Boumerdes  
كلية المحروقات والكيمياء  
Faculty of Hydrocarbons and Chemistry



**Département Transport et Equipements des Hydrocarbures**

**MEMOIRE DE FIN D'ETUDES**

**En vue de l'obtention du diplôme de Master**

**Domaine : Sciences et Technologies**

**Filière : Hydrocarbures**

**Option : Génie Mécanique - Mécanique des Unités Pétrochimiques**

***Thème***

**Calcul thermique et mécanique de l'échangeur de chaleur E-512  
du complexe GL1/Z, simulation par HYSYS et Eléments Finis**

*Présenté par :*

**IARHATI Ahmed Yacine**

*Devant le jury composé de :*

M. KHELIFI TOUHAMI Mohamed Salah	MCA	Etablissement	Président
M. SAHNOUN Khaled	MCA	Etablissement	Examineur
Mme. HARKAT Yamina	MAA	Etablissement	Examineur
M. BETTAYEB Mourad	MCA	Etablissement	Encadrant

*Année universitaire : 2024/2025*

## Dédicace

*Au nom d'Allah, Le Tout Miséricordieux, Le Très Miséricordieux*

*Je dédie ce modeste travail à Celui qui inspire et facilite chaque pas vers la connaissance et la vérité.*

*Alhamdulillah, Souverain des Cieux et de la Terre, qui m'a prodigué la force, la patience et l'inspiration nécessaires pour achever ce projet.*

*À mes chers parents, qui m'ont guidé avec amour et patience sur le chemin de la vie, par leurs conseils éclairés, leur soutien constant et leurs prières. À ma mère, pour son amour infini et ses sacrifices silencieux, et à mon père, pour sa sagesse et sa force, vous êtes ma source d'inspiration.*

*À mes sœurs, compagnons de mes joies et de mes peines, dont la présence réconfortante et les encouragements ont été précieux, et à ma famille bien-aimée, pilier de mon existence. Qu'Allah vous protège, et fasse de vous une source de bénédiction pour cette vie et l'au-delà.*

*À mes amis sincères et précieux, dont l'amitié reflète la beauté de la bonne compagnie prônée par notre Prophète (ﷺ), et qui ont partagé leurs connaissances, révisé ce travail ou apporté une aide précieuse, que ce soit par un conseil, une relecture, une discussion ou une simple dua. Qu'Allah vous récompense et illumine vos cœurs de Sa lumière.*

*À mes enseignants et encadrant, pour leur transmission de savoir, leurs retours bienveillants et leur patience. Qu'Allah récompense chacun d'eux pour le bien qu'ils sèment dans la communauté des chercheurs de connaissance.*

*À toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont contribué à ce cheminement, par leur soutien ou leurs efforts : qu'Allah les bénisse et multiplie leurs bonnes œuvres.*

*Alhamdulillah pour ces bénédictions, et Insha'Allah, que ce projet soit une œuvre agréable à Allah.*

## **Remerciements**

Je tiens à exprimer ma plus profonde gratitude à mon encadreur de mémoire, Dr M. Bettayeb, pour l'honneur qu'il m'a fait en acceptant d'encadrer ce travail. Sa disponibilité sans faille, ses conseils avisés, sa rigueur scientifique et sa patience ont été essentiels à la bonne conduite de cette recherche.

Je souhaite également remercier chaleureusement mes enseignants Dr A. Benbrik et le Dr M.S. Khelifi Touhami pour leur soutien précieux et son accompagnement constant, qui ont constitué un véritable moteur tout au long de cette période.

Ma reconnaissance va à l'ensemble du corps professoral de la faculté des Hydrocarbures et de la chimie pour la qualité de leur enseignement, leur générosité dans le partage du savoir et la patience dont ils ont fait preuve, malgré leurs lourdes charges académiques et professionnelles.

# Table des matières

Dédicace.....	I
Remerciements.....	II
Table des matières.....	III
Liste des figures.....	VIII
Liste des tableaux.....	X
Liste des symboles et abréviations.....	XI
Introduction générale.....	1
<b>Chapitre I :Présentation du lieu de stage.....</b>	<b>3</b>
I.1 Introduction.....	4
I.2 Présentation du complexe.....	4
I.2.1 Historique.....	4
I.2.2 Mission du complexe.....	5
I.2.3 Situation géographique du complexe.....	5
I.2.4 Les zones du complexe GL1/Z.....	5
I.2.4.1 Zone Utilités.....	5
I.2.4.2 Zone Procès.....	6
I.2.4.3 Zone terminale.....	6
I.3 Procédé de liquéfaction.....	7
I.3.1 Section de traitement de gaz.....	7
I.3.2 Décarbonatation.....	8
I.3.3 Déshydratation.....	8
I.3.4 Démercurisation.....	9
I.3.5 Section de séparation et de liquéfaction.....	9
I.3.5.1 Séparation.....	9
I.3.5.2 Liquéfaction.....	9
I.3.6 Section fractionnement.....	10
I.3.7 Stockage et chargement du GNL.....	11
<b>Chapitre II : Généralités sur les échangeurs de chaleur.....</b>	<b>13</b>
II.1 Introduction.....	13
II.2 Définition d'un échangeur.....	13
II.2.1 Échangeur.....	13
II.2.2 Condenseur.....	13
II.2.3 Rebouilleur.....	13
II.2.4 Réchauffeur.....	14
II.2.5 Cooler.....	14
II.3 Les différents modes de transfert de chaleur.....	14
II.3.1 Conduction.....	14
II.3.2 Convection.....	14
II.3.3 Rayonnement.....	15
II.4 Classification des échangeurs de chaleur.....	15

II.4.1 Classification selon le mode de transfert de chaleur .....	15
II.4.2 Classification selon le type de contact .....	15
II.4.2.1 Échangeurs à contact direct.....	16
II.4.2.2 Échangeurs à contact indirect.....	16
II.4.3 Classification selon le procédé de transfert de chaleur .....	16
II.4.4 Classification selon le mode de circulation.....	16
II.4.4.1 Circulation à co-courant (ou à courants parallèles) et contre-courant .....	16
II.4.4.2 Circulation utilisant simultanément le co-courant et le contre- courant .....	18
II.4.4.3 Circulation à courants croisés .....	20
II.4.5 Classement technologique.....	21
II.4.5.1 Les échangeurs à plaques .....	21
II.4.5.2 Les échangeurs tubulaires et multitubulaires .....	21
II.4.5.2.1 Rôle des divers constituants d'un échangeur tubulaire .....	22
II.4.5.2.2 Types d'Échangeurs Tubulaires – Exemples .....	23
II.4.5.2.3 Échangeurs à tubes en U (type CFU) .....	23
II.4.5.2.4 Les échangeurs à plaques tubulaires fixes.....	24
II.4.5.2.5 Autre différents Types d'Échangeurs Tubulaires .....	25
II.5 Description et rôle de l'échangeur E-512.....	26
II.5.1 Présentation de l'échangeur de chaleur E-512 .....	26
II.5.2 Position de l'échangeur de chaleur par rapport à l'unité de l'MCR.....	27
II.5.3 Le principe de fonctionnement de l'échangeur .....	27
II.5.4 Caractéristiques techniques et performance de l'échangeur .....	27
II.5.4.1 La calandre et les boîtes de distribution .....	28
II.5.4.2 Plaques tubulaires.....	28
II.5.4.3 Faisceau tubulaire.....	28
II.5.4.4 Chicanes .....	29
II.5.4.5 Boîte de distribution .....	29
<b>Chapitre III : Calcul thermique</b> .....	<b>130</b>
III.1 Introduction.....	31
III.2 Présentation de la méthode de « KERN » pour le calcul d'un échangeur à faisceau et calandre .....	31
III.2.1 Caractéristiques d'une Unité.....	39
III.2.2 Propriétés physiques des fluides .....	39
III.2.3 Caractéristique de l'échangeur E-512 .....	39
III.3 Calcul de vérification thermique.....	40
III.3.1 Calcul de la puissance thermique transférée .....	40
III.3.2 Calcul de la différence de température moyenne logarithmique .....	41
III.3.3 Calcul du coefficient de transfert propre $Up$ .....	41
III.3.3.1 Coté tube .....	41
III.3.3.1.1 Section passante <b><math>At</math></b> .....	41
III.3.3.1.2 Vitesse massique <b><math>Gt</math></b> .....	42
III.3.3.1.3 Nombre de Reynolds <b><math>Re</math></b> .....	42
III.3.3.1.4 Calcul du nombre de Prandtl $Pr$ .....	42

III.3.3.1.5	Facteur de correction $\phi_t$ .....	43
III.3.3.1.6	Coefficient de Colburn $j_h$ .....	43
III.3.3.1.7	Coefficient du film interne $h_i$ .....	44
III.3.3.1.8	Film interne corrigé $h_{i0}$ .....	44
III.3.3.2	Côté calandre .....	44
III.3.3.2.1	Surface passante maximale $A_s$ .....	44
III.3.3.2.2	La vitesse massique $G_t$ .....	45
III.3.3.2.3	Diamètre équivalent <b><i>D<sub>éq</sub></i></b> .....	45
III.3.3.2.4	Nombre de Reynolds $Re$ .....	45
III.3.3.2.5	Calcul du critère de Prandtl $Pr$ .....	46
III.3.3.2.6	Facteur de correction $\phi_c$ .....	46
III.3.3.2.7	Coefficient de Colburn <b><i>JH</i></b> .....	46
III.3.3.2.8	Coefficient du film externe <b><i>h<sub>e</sub></i></b> .....	47
III.3.3.3	Coefficient de transfert de chaleur global propre $UP$ .....	47
III.3.3.4	Coefficient de transfert de chaleur global encrassé <b><i>U<sub>encrassé</sub></i></b> .....	47
III.3.4	Calcul de la surface d'échange globale $S$ .....	48
III.3.5	L'efficacité $\epsilon$ .....	48
III.3.6	Calcul des pertes de charge.....	48
III.3.6.1	Perte de charge à l'intérieur des tubes .....	48
III.3.6.1.1	Facteur de frottement $j_f$ .....	49
III.3.6.1.2	Calcul la vitesse $U$ .....	49
III.3.6.2	Perte de charge à l'extérieur des tubes (côté calandre).....	50
III.3.6.2.1	Facteur de frottement $J_f$ .....	50
III.3.6.2.2	Calcul la vitesse $U$ .....	50
III.4	Simulation par logiciel Aspen HYSYS.....	51
III.4.1	But de la simulation .....	51
III.4.2	Définitions.....	51
III.4.3	Introduction à HYSYS.....	51
III.4.4	Utilisation de HYSYS.....	52
III.4.5	Simulation de l'échangeur E-512.....	52
III.4.6	Caractéristiques des fluides.....	54
III.4.6.1	Côté tube .....	54
III.4.6.1.1	Conditions opératoires .....	54
III.4.6.1.2	Compositions chimiques.....	55
III.4.6.1.3	Propriétés physiques .....	55
III.4.6.2	Côté calandre .....	56
III.4.6.2.1	Conditions opératoires .....	56
III.4.6.2.2	Compositions chimiques.....	56
III.4.6.2.3	Propriétés physiques .....	57
III.4.7	Caractéristiques de l'échangeur E-512 .....	57
III.4.7.1	Données du dimensionnement de l'échangeur E-512.....	58
III.4.7.1.1	Dimensions de la calandre .....	59
III.4.7.1.2	Dimensions des tubes.....	60

III.4.8 Résultats de la simulation .....	60
III.4.9 Comparaison entre les résultats obtenus .....	61
<b>Chapitre IV :Calcul mécanique</b> .....	<b>63</b>
IV.1 Introduction .....	64
IV.2 Données de départ .....	64
IV.2.1 Détermination des pressions de calcul .....	64
IV.2.2 Détermination des températures de calcul .....	65
IV.3 Caractéristiques mécaniques des éléments d'échangeur de chaleur d'après les normes ASME .....	65
IV.3.1 Calcul des résistances pratiques à la traction .....	66
IV.3.2 Calcul des Epaisseurs .....	67
IV.3.2.1 Calcul de l'épaisseur des tubes .....	67
IV.3.2.2 Calcul de l'épaisseur de la calandre .....	67
IV.3.2.3 Calcul l'épaisseur de la plaque tubulaire .....	68
IV.3.3 Tableau récapitulatif .....	69
IV.4 Vérification de la résistance de dudgeonnage .....	69
IV.5 Simulation par éléments finis .....	71
IV.6 Types d'éléments de maillage .....	71
IV.6.1 Les éléments unidimensionnels (1D) .....	71
IV.6.2 Les éléments bidimensionnels (surfaccique-2D) .....	72
IV.6.2.1 Éléments triangulaires .....	72
IV.6.2.2 Éléments quadrangulaires .....	72
IV.6.3 Les éléments tridimensionnels (volumiques-3D) .....	73
IV.6.3.1 Linéaires .....	73
IV.6.3.2 Quadratiques .....	73
IV.6.3.3 Cubiques .....	73
IV.7 Types d'éléments finis utilisés .....	74
IV.8 Données géométriques et mécaniques .....	75
IV.9 Idéalisation du problème étudié .....	75
IV.10 Résultats .....	76
IV.10.1 Maillage avec des éléments triangulaires .....	76
IV.10.1.1 Élément triangulaire à trois nœuds T3 .....	76
IV.10.1.1.1 Simulation par logiciel RDM7 .....	77
IV.10.1.1.2 Vérification de la résistance du tube .....	78
IV.10.1.2 Élément triangulaire à six nœuds T6 .....	78
IV.10.1.2.1 Simulation par logiciel RDM7 .....	79
IV.10.1.2.2 Vérification de la résistance du tube .....	80
IV.10.1.3 Les courbes .....	80
IV.10.1.4 Commentaires .....	80
IV.10.2 Maillage avec des éléments quadrangulaires .....	82
IV.10.2.1 Élément quadrangulaire de premier degré Q4 .....	82
IV.10.2.1.1 Simulation par logiciel RDM7 .....	83
IV.10.2.1.2 Vérification de la résistance du tube .....	84

IV.10.2.2 Éléments quadrangulaires deuxième degré Q8 .....	84
IV.10.2.2.1 Simulation par logiciel RDM7 .....	85
IV.10.2.2.2 Vérification de la résistance du tube .....	86
IV.10.2.3 Les courbes.....	87
IV.10.2.4 Commentaires .....	87
<b>Conclusion Générale</b> .....	88
<b>Bibliographie</b> .....	90
<b>Les annexes</b> .....	93

## Liste des figures

Figure I. 1 : Situation géographique du complexe GL1/Z.....	5
Figure II. 1 : Phénomène de conduction [3] .....	14
Figure II. 2 : Phénomène de convection [3].....	15
Figure II. 3 : Phénomène de rayonnement [4] .....	15
Figure II. 4 : Échangeur bitube .....	16
Figure II. 5 : Échangeur à tube et calandre type 1-1 .....	17
Figure II. 6 : Échangeur à tube et calandre type 2-2.....	17
Figure II. 7 : Échangeur à plaques .....	17
Figure II. 8 : Échangeur à plaques en spirale.....	18
Figure II. 9 : Échangeur à tube et calandre type 1-2.....	18
Figure II. 10 : Échangeur à tube et calandre type 1-4.....	19
Figure II. 11 : Échangeur à 2 passes coté calandre (calandre type F).....	19
Figure II. 12 : Échangeur à tube et calandre (calandre type G, H et J).....	20
Figure II. 13 : Principe des échangeurs tubulaires à courants croisés .....	20
Figure II. 14 : Composition d'un échangeur à plaque .....	21
Figure II. 15 : Divers constituants d'un échangeur TEMA type AEL.....	22
Figure II. 16 : Disposition des tubes .....	23
Figure II. 17 : Échangeurs à tubes en U.....	24
Figure II. 18 : Échangeurs à plaque tubulaire fixes .....	24
Figure II. 19 : Différents types d'échangeurs tubulaires [6].....	25
Figure II. 20 : Échangeur de chaleur (eau de mer / MCR) .....	26
Figure II. 21 : La calandre et les boîtes de distribution [10].....	27
Figure II. 22 : Plaque tubulaire de l'échangeur existant .....	28
Figure II. 23 : Les chicanes [4] .....	29
Figure II. 24 : Boîte de distribution .....	29
Figure III. 1 : Principe d'un échangeur de chaleur (contre-courant) [13].....	31
Figure III. 2 : Schéma de températures dans un échangeur de chaleur à contre-courant [12].....	32
Figure III. 3 : Principe d'un échangeur de chaleur (co-courant) [13].....	32
Figure III. 4 : Schéma de températures dans un échangeur de chaleur à contre-courant [12].....	33
Figure III. 5 : Facteur de correction pour différents types d'échangeurs a, b, c, d [11] .....	35
Figure III. 6 : Schéma des fluides de l'échangeur E-512. ....	38
Figure III. 7 : Coefficient de film $j_h$ coté tube en fonction $Re$ [11, 12].....	43
Figure III. 8 : Surface passante maximale $A_s$ [11, 12].....	44
Figure III. 9 : Arrangement carré [12] .....	45
Figure III. 10 : Coefficient de film $J_H$ coté calandre en fonction $Re$ [12, 11].....	46
Figure III. 11 : Facteur de frottement $j_f$ coté tube en fonction $Re$ [12] .....	49
Figure III. 12 : Facteur de frottement $J_f$ en fonction $Re$ [12] .....	50
Figure III. 13 : Interface de HYSYS.....	51
Figure III. 14 : Bibliothèque des composants chimiques.....	53

Figure III. 15:Fluide packages .....	53
Figure III. 16 : Représentation de l'échangeur E-512 avec HYSYS .....	54
Figure III. 17 : Conditions opératoires de l'eau de mer coté tube .....	54
Figure III. 18 : Composition chimique de l'eau de mer coté tube .....	55
Figure III. 19 : Propriétés physiques de l'eau de mer coté tube .....	55
Figure III. 20 : Conditions opératoires du MCR coté calandre.....	56
Figure III. 21 : Composition chimique du MCR coté calandre .....	56
Figure III. 22 : Propriétés physiques du MCR coté calandre.....	57
Figure III. 23 : Schéma des connexions d'entrée et de sortie des charges.....	58
Figure III. 24 : Dimensionnement de l'échangeur E-512 .....	58
Figure III. 25 : Données caractéristiques de l'échangeur E-512.....	59
Figure III. 26 : Dimensions de la calandre.....	59
Figure III. 27 : Dimensions des tubes .....	60
Figure III. 28 : Résultats du calcul thermique par HYSYS .....	60
Figure III. 29 : Résultats du calcul thermique par HYSYS .....	61
Figure III. 30 : Conditions opératoires à l'entrée et à la sortie de la charge .....	61
Figure IV. 1 Types d'éléments unidimensionnels [21].....	72
Figure IV. 2 : Éléments triangulaires [21].....	72
Figure IV. 3 : Éléments quadrangulaires [21] .....	73
Figure IV. 4 : Types d'éléments tridimensionnels [21].....	74
Figure IV. 5 : Éléments triangulaires à trois nœuds T3.....	76
Figure IV. 6 : Contraintes de VON MISES dans le tube – T3 .....	77
Figure IV. 7 : Contraintes de TRESCA dans le tube – T3.....	77
Figure IV. 8 : Éléments triangulaires à six nœuds T6 .....	78
Figure IV. 9 : Contraintes de VON MISES dans le tube – T6 .....	79
Figure IV. 10 : Contraintes de TRESCA dans le tube – T6.....	79
Figure IV. 11 : Courbe des contraintes Von Mises et Tresca en fonction du nombre d'éléments triangulaires T3 et T6.....	80
Figure IV. 12 : Éléments quadrangulaires de premier degré Q4 .....	82
Figure IV. 13 : Contraintes de VON MISES dans le tube -Q4 .....	83
Figure IV. 14 : Contraintes de TRESCA dans le tube – Q4 .....	83
Figure IV. 15 : Éléments quadrangulaires deuxième degré Q8 .....	84
Figure IV. 16 : Contraintes de VON MISES dans le tube-Q8 .....	85
Figure IV. 17 : Contraintes de TRESCA dans le tube – Q8.....	86
Figure IV. 18 : Courbe des contraintes VonMises et Tresca en fonction du nombre d'éléments pour élément quadrangulaire Q4 et Q8.....	87

## Liste des tableaux

Tableau I.1 : Composition Molaire du GNL .....	7
Tableau I.2 : Conditions de stockage GNL .....	7
Tableau II. 1 : Les dimensions de la calandre [10] .....	28
Tableau II. 2 : Caractéristique de faisceau tubulaire. [10] .....	29
Tableau III. 1: Valeurs du facteur d'encrassement [11] .....	37
Tableau III. 2 : Caractéristiques d'une Unité [10] .....	39
Tableau III. 3 : Propriétés physiques des fluides [10].....	39
Tableau III. 4 : Données de constructeur de l'échangeur E-512 [10] .....	39
Tableau III. 5 : Caractéristiques de Faisceau et de calandre [10] .....	40
Tableau III. 6 : Les résultats du calcul thermique .....	62
Tableau IV. 1 : Les données de procès [10] .....	64
Tableau IV. 2 : Caractéristiques mécaniques des éléments [17, 18, 19] .....	65
Tableau IV. 3 : Comparaison entre les paramètres actuels et de design de l'échangeur E 512 ....	69
Tableau IV. 4 : Données géométriques et mécaniques [10] .....	75
Tableau IV. 5 : Les contraintes d'élément triangulaire à trois nœuds T3 .....	76
Tableau IV. 6 : Les contraintes d'élément triangulaire à six nœuds T6.....	78
Tableau IV. 7 : Les contraintes d'élément quadrangulaire à quatre nœuds Q4 .....	82
Tableau IV. 8 : Les contraintes quadrangulaire à huit nœuds Q8 .....	85

## Liste des symboles et abréviations

- Symboles

$P$  : Puissance thermique, en  $W$

$\dot{m}$  : Débit massique, en  $Kg/s$

$Cp$  : Capacité calorifique, en  $KJ/Kg.°C$

$T$  : Température, en  $°C$

$\Delta TLM$  : Différence de température moyenne logarithmique, en  $°C$

$F$  : facteur de correction.

$A_t$  : Section par passe, en  $m^2$

$Gt$  : Vitesse massique, en  $Kg/s.m^2$

$Re$  : Nombre de Reynolds.

$Pr$  : Nombre de Prandtl.

$\varphi$  : Facteur de correction.

$jh$  : Coefficient de Colburn coté tube.

$JH$  : Coefficient de Colburn coté calandre.

$hi$  : Coefficient du film interne, en  $W/m^2.°C$

$hi0$  : Coefficient du film interne corrigé, en  $W/m^2.°C$

$N_{tube}$  : nombre des tubes.

$d_i$  : Diamètre intérieure, en  $mm$

$d_e$  : Diamètre extérieure du tube, en  $mm$

$n_t$  : Nombre de pas de tube.

$P$  : Pas des tubes, en  $mm$

$\lambda$  : Conductivité thermique, en  $W/m.°C$

$\mu$  : Viscosité dynamique, en  $Pa.s$

$As$  : Surface passante maximale, en  $m^2$

$D_{\acute{e}q}$  : Diamètre équivalent, en  $mm$

$he$  : Coefficient du film externe, en  $W/m^2.°C$

$D_i$  : Diamètre intérieure de la calandre, en  $m$

$D_e$  : Diamètre extérieure de la calandre, en  $m$   
 $l_b$  : Espacement entre les chicanes, en  $m$   
 $Up$  : Coefficient de transfert global propre, en  $W/m.°C$   
 $U_{encrassé}$  : Coefficient de transfert de chaleur global encrassé, en  $W/m.°C$   
 $R_{encrassement}$  : Facteur d'encrassement, en  $m^2.°C/W$   
 $\Delta P_t$  : Pertes de charge coté tube, en  $bar$   
 $jf$  : Facteur de frottement coté tube.  
 $U_{int}$  : Vitesse intérieure coté tube, en  $m/s$   
 $L$  : Longueur de tube, en  $mm$   
 $\rho$  : Densité, en  $Kg/m^3$   
 $U_{ext}$  : Vitesse extérieure coté calandre, en  $m/s$   
 $l_b$  : Espacement entre les chicanes, en  $mm$   
 $Jf$  : facteur de frottement côté calandre.  
 $S$  : Surface, en  $m^2$   
 $\varepsilon$  : Efficacité  
 $\Delta H$  : Enthalpie massique, en  $KJ/Kg$   
 $\Delta S$  : Entropie massique, en  $KJ/Kg.°C$   
 $S_c$  : Surépaisseur de corrosion, en  $mm$   
 $t^\circ$  : Température de calcul, en  $°C$   
 $\sigma_r$  : Limite de résistance à la rupture, en  $MPa$   
 $\sigma_e$  : Limite d'élasticité, en  $MPa$   
 $\eta_{r,t}$  : Résistance à la rupture à la  $t^\circ$  de calcul  
 $\eta_{e,t}$  : Limite d'élasticité à la  $t^\circ$  de calcul à la  $t^\circ$  de calcul  
 $k$  : Coefficient de réduction  
 $\alpha$  : Coefficient de soudage.  
 $\sigma$  : Résistances pratiques à la traction, en  $MPa$   
 $C$  : Addition supplémentaire des épaisseurs, en  $mm$   
 $e$  : Épaisseur, en  $mm$   
 $q$  : Résistance de dudgeonnage, en  $daN$

**$f$**  : Charge spécifique admissible, en  **$daN/mm^2$**

**$d'$**  : Diamètre de logement, en  **$mm$**

**$E$**  : Module de Young, en  **$GPa$**

**$\nu$**  : Coefficient de poisson

**$\sigma_{Tresca}$**  : Contrainte de TRESCA, en  **$MPa$**

**$\sigma_{Von Mises}$**  : Contrainte de Von Mises, en  **$MPa$**

**$\sigma_{adm}$**  : Contrainte admissible, en  **$MPa$**

- **Abréviations**

**ASME** : American Society of Mechanical Engineers (Organisme de normalisation des équipements mécaniques).

**BWG** : Birmingham Wire Gauge (Norme de diamètre des tubes).

**CFU** : Échangeur à tubes en U (Type d'échangeur tubulaire).

**FEM** : Finite Element Method (Méthode des éléments finis).

**GL1/Z** : Complexe de liquéfaction de gaz naturel (Site industriel algérien).

**GN** : Gaz naturel.

**GNL** : Gaz Naturel Liquéfié.

**MCR** : Mélange Cryogénique de Réfrigérants (Fluide caloporteur).

**MEA** : Monoéthanolamine (Solution de décarbonatation).

**PFD** : Process Flow Diagram (Schéma de procédé).

**RDM** : Résistance Des Matériaux (Domaine d'étude mécanique).

**TEMA** : Tubular Exchanger Manufacturers Association (Norme de conception d'échangeurs).

**UNS** : Unified Numbering System (Système de codage des matériaux).

**PCS** : Potentiel Calorifique Supérieur

**GNT** : Gaz Naturel Traité

## Introduction générale

Les échangeurs de chaleur constituent des équipements incontournables dans les procédés industriels, notamment dans les secteurs énergétiques exigeants tels que le raffinage pétrolier et la liquéfaction du gaz naturel (GNL). Ces dispositifs permettent le transfert efficace d'énergie thermique entre deux fluides à températures différentes, sans mélange direct, optimisant ainsi la récupération de chaleur et réduisant les coûts opérationnels. Leur rôle devient particulièrement stratégique dans des installations comme le complexe GL1/Z de Sonatrach en Algérie, dédié à la production et à l'exportation de gaz naturel liquéfié. Cependant, ces équipements opèrent souvent sous des conditions extrêmes (pressions élevées, gradients de température, corrosion et encrassement) les exposant à des risques de dégradation des performances thermiques et de défaillances mécaniques, susceptibles de perturber la production, d'augmenter les coûts de maintenance et de compromettre la sécurité.

Dans ce cadre, l'échangeur de chaleur E-512, un appareil de type faisceau tubulaire et calandre à plaques fixes, occupe une position clé au sein de la section de réfrigération du Mélange Cryogénique de Réfrigérants (MCR) du complexe GL1/Z. Il assure le refroidissement du gaz de synthèse par échange thermique avec l'eau de mer, un processus essentiel à l'efficacité globale du cycle de liquéfaction. Le transfert de chaleur s'effectue par convection le long des parois, conduction à travers celles-ci, puis convection vers le fluide récepteur, dans un contexte où les changements de phase peuvent également intervenir. Une défaillance de cet échangeur pourrait entraîner des pertes de charge, une baisse de productivité ou des arrêts imprévus, rendant impérative une analyse approfondie de ses performances thermiques et de sa robustesse mécanique.

Ce mémoire propose une étude de l'échangeur E-512, combinant des approches thermique et mécanique pour garantir sa fiabilité et son efficacité. L'objectif est d'évaluer ses performances énergétiques et de vérifier sa résistance mécanique.

Nous allons aborder ce sujet à travers les chapitres suivants :

**Chapitre I :** Présentation du complexe GL1/Z, de son organisation, de ses zones opérationnelles (utilités, procédé, terminal) et du processus de liquéfaction.

**Chapitre II :** Fondements théoriques des échangeurs de chaleur (classification, principes de transfert thermique) et description technique détaillée de l'E-512.

**Chapitre III :** Calcul thermique analytique basé sur la méthode de KERN, suivi d'une validation par simulation avec Aspen HYSYS.

**Chapitre IV :** Analyse mécanique des composants selon les normes ASME, complétée par une simulation par éléments finis par le logiciel RDM 7 pour évaluer leur résistance aux contraintes opérationnelles.

En résumé, cette étude vise à renforcer la fiabilité et l'efficacité énergétique de l'échangeur E-512, contribuant ainsi à la durabilité des installations de liquéfaction du GNL dans un contexte industriel exigeant.

# **Chapitre I**

## **Présentation du lieu de stage**

## I.1 Introduction

Le complexe GL1/Z, géré par Sonatrach en Algérie, est une installation essentielle dans le secteur énergétique, dédiée à la liquéfaction et à l'exportation de gaz naturel. Face à la crise énergétique mondiale, le gaz naturel est devenu une ressource stratégique, moins polluante que le pétrole, et l'Algérie s'appuie sur des infrastructures comme le GL1/Z pour diversifier ses sources d'énergie. Situé à 40 km au nord-ouest d'Oran, près de Bethioua, ce complexe traite le gaz provenant des champs de Hassi R'mel, extrait des composants comme le propane et le butane, et exporte du gaz naturel liquéfié (GNL) via des méthaniers cryogéniques.

Son fonctionnement repose sur trois zones principales : Utilités pour l'énergie et le refroidissement, Procès pour la liquéfaction, et Terminal pour le stockage et l'exportation. Malgré son importance, il fait face à des défis, notamment une infrastructure datant des années 1970, nécessitant des modernisations pour maintenir son efficacité. Cette installation illustre l'équilibre entre objectifs économiques et responsabilité environnementale dans la stratégie énergétique algérienne.

## I.2 Présentation du complexe

### I.2.1 Historique

Le complexe GL1/Z, initialement connu sous le nom de projet GNL1, a été créé en 1971 pour répondre à un contrat avec El Paso Natural Gas Company visant à exporter du GNL. Sa construction, commencée en 1963, a connu des retards et des changements de contractants (Chemico, puis Bechtel), mais les opérations ont débuté en 1978.

Par la suite, et compte tenu de la demande internationale en matière de besoin en gaz naturel liquéfié, Sonatrach a décidé une des rénovations dans les années 1990 visant :

- ✓ À augmenter la capacité.
- ✓ Améliorer la fiabilité.
- ✓ Moderniser les technologies datant des années 1970 et qui se trouvent à présent dépassées.

## I.2.2 Mission du complexe.

Le complexe GL1/Z a pour mission de liquéfier le gaz naturel provenant des champs gaziers de Hassi R'mel, avec possibilité d'extraction du propane, du butane et de la gazoline Le GNL (*Gaz Naturel Liquéfié*) est pompé et chargé dans des méthaniers spécialement conçus pour le transport cryogénique pour être expédié vers l'étranger.

## I.2.3 Situation géographique du complexe

Le complexe GL1/Z est situé au nord-ouest du pays, à 40 km de la ville d'Oran, à proximité d'un village au bord de la mer Méditerranée nommé "Bethioua". Son implantation exacte se trouve entre le complexe voisin GL2/Z à l'Est et le complexe CEA/Z à l'Ouest au bord de l'autoroute de la zone industrielle d'Arzew.



**Figure I. 1 :** Situation géographique du complexe GL1/Z

## I.2.4 Les zones du complexe GL1/Z

Le complexe GL1/Z comprend trois (03) zones essentielles :

### I.2.4.1 Zone Utilités

Les utilités constituent une zone importante au sein du complexe GL1/Z. Elles permettent d'assurer la fourniture de tous les besoins pendant le démarrage et la marche normale des trains de liquéfaction, dont :

- **La source d'énergie** : la vapeur d'eau est la source d'énergie choisie pour le complexe :
  - ✓ 17 chaudières 115 tonnes de vapeur/heures à 62 bars.
  - ✓ 6 chaudières 400 tonnes de vapeur heures à 62 bars.
  - ✓ 3 chaudières 91 tonnes de vapeur/heure à 62 bars.
  - ✓ 1 chaudière de 51 tonnes de vapeur/heure à 27 bars.
- **La source de refroidissement** : l'eau est la source de refroidissement véhiculée par un ensemble de six (06) pompes de grande puissance de 175 000 m<sup>3</sup>/h chacune.
- **La production d'électricité** : la production d'électricité est assurée par trois (03) alternateurs entraînés par des turbines à vapeur et fournit 36 MW par générateur.
- L'unité de dessalement : elle permet de produire l'eau distillée nécessaire à l'alimentation des chaudières.
- Production d'air comprimé : une grande partie de l'instrumentation du complexe est de type pneumatique. La production de l'air comprimé est assurée par un ensemble de quatre (04) compresseurs et d'un compresseur d'air de secours.

#### **I.2.4.2 Zone Procès**

Cette zone est composée de six (06) trains qui produisent 8870 m<sup>3</sup>/jour/train de GNL. Chaque train dispose de sa propre production de vapeur et de ses propres sections de décarbonatation, de séchage et de liquéfaction des hydrocarbures.

#### **I.2.4.3 Zone terminale**

C'est la zone de stockage et de chargement, elle est constituée de :

- ✓ Trois (03) réservoirs de GNL d'une capacité de 300 000 m<sup>3</sup> et une sphère de gazoline d'une capacité de 3281 m<sup>3</sup>.
- ✓ Une station de pompage de GNL d'une capacité de 10 000 m<sup>3</sup>/h.
- ✓ Deux (02) quais d'expédition avec dix (10) bras de chargement.

## I.3 Procédé de liquéfaction

L'usine de liquéfaction du gaz naturel (GN) d'Arzew GL1/Z a été conçue pour assurer le transport du GN sous forme liquide. Les propriétés physiques et la composition chimique du GNL sont regroupées dans les tableaux I.1 et I.2.

**Tableau I.1 : Composition Molaire du GNL**

Composants	%Molaire	
	Min	Max
$N_2$	0.60	1.40
$CH_4$	84.00	92.50
$C_2H_6$	6.00	8.50
$C_3H_8$	2.20	3.00
$iC_4H_{10}$	0.30	0.50
$nC_4H_{10}$	0.30	0.70
$i C_5H_{12}$	0.00	0.02

**Tableau I.2 : Conditions de stockage GNL**

Caractéristiques	Valeurs
Masse moléculaire (g/mole)	18.2
Pression (bar)	1.03
Température (°C)	-162

L'usine de liquéfaction comprend six (06) trains de liquéfaction indépendants, qui fonctionnent en parallèle avec une capacité unitaire de production de GNL de 8870 m<sup>3</sup>/jour.

Afin d'être liquéfié et stocké, le gaz naturel passe par différentes sections :

### I.3.1 Section de traitement de gaz

Les composants du gaz naturel tels que le gaz carbonique la vapeur d'eau et les hydrocarbures lourds tendraient à se condenser et à se solidifier aux basses températures bien avant la température de liquéfaction du gaz naturel (-162 °C), provoquant ainsi l'obstruction des tuyauteries et des équipements cryogéniques. C'est pour cette raison que l'on doit éliminer ces composants gênants.

### I.3.2 Décarbonatation

Le gaz carbonique est extrait du gaz naturel par lavage de celui-ci à contre-courant dans une colonne par une solution aqueuse à 15 % de monoéthanolamine (MEA).

À la température de 38 °C et à une pression de 42 bars, la MEA et le CO<sub>2</sub> forment un mélange instable correspondant au second membre de la réaction, tandis qu'à chaud et sous une basse pression, le mélange se détruit en libérant le CO<sub>2</sub> et régénérant ainsi la MEA.

La solution aqueuse de MEA agit comme un agent d'absorption dans le système de décarbonatation et réduit la teneur du CO<sub>2</sub> présent dans le GN de 1400 ppm à 90 ppm.

Après être passée dans le ballon séparateur des hydrocarbures, la solution de MEA riche est tout d'abord chauffée à 93 °C par échange thermique avec la solution de MEA pauvre régénérée et, ensuite, elle est introduite en tête de la tour de régénération fonctionnant normalement à 110 °C et à 0,7 bar. La solution de MEA riche en CO<sub>2</sub> descend dans la colonne pour y être épurée par les gaz ascendants provenant de l'évaporation des produits de fond.

Le liquide (solution de MEA) au fond de la colonne s'appauvrit en CO<sub>2</sub>, il est renvoyé vers l'absorbeur après avoir réchauffé la MEA riche et être refroidi à 38 °C.

Les vapeurs de tête, riches en CO<sub>2</sub>, passent dans les condenseurs de tête de régénération et ensuite sont réinjectées en bas de la tour de régénération. Les gaz incondensables (essentiellement le CO<sub>2</sub>) sont évacués vers l'atmosphère.

### I.3.3 Déshydratation

Le système de déshydratation sert à éliminer les vapeurs d'eau par adsorption par l'intermédiaire des sécheurs pour éviter la formation de bouchons de glace qui causeraient des bouchages des équipements de liquéfaction.

Le gaz naturel venant de l'absorbeur de CO<sub>2</sub> pénètre dans les tubes du pré refroidissement où il sera refroidi à l'aide de propane liquide, ce qui provoque la condensation d'une partie de la vapeur d'eau contenue dans le gaz naturel, et passe ensuite dans le ballon séparateur où l'eau de condensation est retenue et purgée. Le gaz pénètre ensuite dans un des deux sécheurs (*le second étant en régénération*) et traverse les tamis moléculaires en perdant

progressivement son humidité. À la sortie de chaque sécheur, le gaz passe à travers des filtres afin de retenir les particules en suspension.

### **I.3.4 Démercurisation**

Après séchage, le gaz passe dans un démercuriseur utilisant du charbon actif imprégné de soufre afin d'éliminer le mercure jusqu'à une teneur de  $10^{-9}$  g/Nm<sup>3</sup>. Lors du réchauffage des installations, le mercure a un comportement particulier en matière de corrosion. Il devient très agressif vis-à-vis de l'aluminium, matériau utilisé pour la plupart des équipements cryogéniques.

### **I.3.5 Section de séparation et de liquéfaction**

#### **I.3.5.1 Séparation**

La section de séparation est conçue pour séparer les hydrocarbures lourds du gaz naturel d'alimentation, afin de pouvoir le liquéfier, et par la suite de le stocker. Les hydrocarbures lourds ainsi extraits sont envoyés vers la section de fractionnement.

Le gaz d'alimentation venant de la section de traitement du gaz est refroidi à  $-26$  °C par deux échangeurs à propane (à moyenne et basse pression). Il est ensuite injecté au milieu de la tour de lavage où les produits lourds sont condensés et séparés du méthane, sous l'action d'un courant de reflux et de deux rebouilleurs, l'un au butane et l'autre à vapeur, puis est recueilli sous forme liquide au bas de la colonne et dirigé vers la section de fractionnement.

La phase vapeur quittant la colonne est associée à un débit de recyclage de propane et de butane provenant de la section de fractionnement. Cela permet de retenir les dernières traces de pentane et de maintenir un débit de reflux acceptable dans la colonne pour l'envoi à la section de liquéfaction.

#### **I.3.5.2 Liquéfaction**

L'échangeur principal liquéfie le gaz naturel traité (GNT) en utilisant le MCR comme réfrigérant. Le GNT pénètre en bas de l'échangeur principal et progresse vers le haut où il traverse les douches de MCR, et quitte l'échangeur sous forme liquide à une pression de 28,3 bars et une température de  $-148$  °C.

La liquéfaction du GN se fait en deux temps :

- Tout d'abord, le GNT pénètre dans le faisceau central de l'échangeur principal où il est réfrigéré à  $-110\text{ }^{\circ}\text{C}$  par échange thermique avec le MCR liquide, puis le gaz partiellement condensé est liquéfié complètement dans le faisceau froid de l'échangeur principal par échange thermique avec le MCR vapeur et quitte l'échangeur à  $-148\text{ }^{\circ}\text{C}$  et sous une pression de 24 bars.
- Ensuite, ce mélange liquide-gaz est détendu dans une vanne jusqu'à 1,5 bar et sa température est abaissée à  $-158\text{ }^{\circ}\text{C}$ , puis il subit une deuxième détente jusqu'à 0.38 bar dans le ballon flash d'azote pour éliminer l'azote dissous dans la phase liquide du gaz naturel liquéfié. Les composants légers, essentiellement l'azote, sont extraits par vaporisation et montent vers le haut du ballon. La phase liquide GNL débarrassée de l'azote est récupérée au fond du ballon d'où elle est acheminée vers le stockage à l'aide des pompes GNL.

### **I.3.6 Section fractionnement**

L'unité de fractionnement est alimentée par les produits du fond de la tour de lavage. Cette unité est conçue pour séparer les composants des produits suivants :

- Méthane d'appoint pour le réfrigérant mixte MCR et le réseau fuel gaz.
- Éthane d'appoint pour le réfrigérant mixte MCR.
- Propane d'appoint pour le système propane, le MCR, le PCS de GNL et le reflux tour de lavage.
- Butane d'appoint pour le MCIL, le PCS de GNL reflux tour de lavage et rebouillage de la tour de lavage.
- Gazoline comme produit commercialisable.
- Gaz combustible de procédé des chaudières

Elle est constituée essentiellement de quatre (04) colonnes de distillation en cascade qui sont :

- La colonne de déméthanisation.
- La colonne de déthanisation.
- La colonne de dépropanisation.
- La colonne de débutants.

### **I.3.7 Stockage et chargement du GNL**

Le GNL produit par les six (06) trains du procédé est pompé vers la zone de stockage constituée de trois (03) bacs à double paroi métallique ayant une capacité de 100 000 m<sup>3</sup> chacun sous une pression atmosphérique et une température de -162 °C.

Lors du remplissage des réservoirs, une certaine quantité de produit se vaporise du fait des pertes de chaleur. La vapeur du réservoir est recueillie dans un collecteur qui l'envoie au compresseur de gaz combustible de chaque train. Le GNL peut être transféré d'un réservoir à un autre lorsqu'il n'y a pas de chargement, en utilisant la pompe de transfert. Le chargement du GNL est précédé par le refroidissement de la canalisation de la zone de chargement. La pompe de refroidissement aspire une petite quantité de GNL du réservoir de stockage et envoie ce GNL dans la canalisation chaude de la zone du chargement. Le GNL vaporisé est repris par la soufflante des gaz résiduels, puis est envoyé dans le collecteur de gaz du revus. Le chargement s'effectue au moyen de cinq (05) pompes de chargement du GNL, fonctionnant en parallèle et transférant le GNL du réservoir de stockage au navire en passant par les bras de chargement. Les vapeurs résiduelles du navire sont renvoyées au collecteur des vapeurs des réservoirs par la soufflante des gaz résiduels.

**Chapitre II**

**Généralités sur les échangeurs  
de chaleur**

## II.1 Introduction

Dans l'industrie, on doit très souvent réaliser un transfert de chaleur entre un fluide chaud et un fluide froid qui ne doit pas être mis en contact. Cette opération est généralement effectuée dans des appareils où les deux fluides circulent de part et d'autre des parois solides. Ces appareils sont appelés échangeurs de chaleur.

Un échangeur de chaleur est un dispositif permettant de transférer de l'énergie thermique d'un fluide vers un autre, sans les mélanger. Le flux thermique traverse la surface d'échange qui sépare les fluides. La plupart du temps, on utilise cette méthode pour refroidir ou réchauffer un liquide ou un gaz qu'il est impossible ou difficile de refroidir ou de réchauffer directement.

En principe, pour les échangeurs les plus courants dans l'industrie, les deux fluides s'écoulent dans des espaces séparés par une paroi ou cloison à faible inertie thermique à travers de laquelle les échanges se font par conduction. En effet, la chaleur que l'un des fluides cède à la paroi par convection, le long de la surface de contact, est transférée par conduction puis cédée à l'autre fluide par convection le long de l'autre face. [1]

## II.2 Définition d'un échangeur

Un échangeur peut avoir différentes fonctions dans une installation et avoir d'autres noms :

### II.2.1 Échangeur

Il permet le transfert de chaleur d'un fluide vers un autre sans changement d'état de ces fluides.

### II.2.2 Condenseur

Il permet le changement d'état d'un fluide : exemple : passer de l'état liquide à l'état gazeux.

### II.2.3 Rebouilleur

Échangeur de chaleur utilisé pour réchauffer ou vaporiser un fluide.

## II.2.4 Réchauffeur

Il permet d'augmenter la température d'un fluide ou d'un solide pour l'utiliser dans un système, par exemple le réchauffage de l'huile pour une meilleure circulation dans les pipes, le réchauffage du gaz avant l'entrée dans une turbine.

## II.2.5 Cooler

Il permet de refroidir un gaz ou un fluide après que celui-ci ait été utilisé, par exemple soustraire les calories emmagasinées par de l'huile de lubrification d'un moteur thermique. [2]

## II.3 Les différents modes de transfert de chaleur

Les trois modes de transfert de chaleur (conduction, convection, rayonnement) sont couplés dans la plupart des applications (chambre de combustion, récupération sur les fumées, etc.).

Il y a souvent un mode de transfert prédominant. Pour tout échangeur avec transfert de chaleur à travers une paroi, la conduction intervient. [3]

### II.3.1 Conduction

C'est la propagation de la chaleur dans la matière, sans transfert de masse à travers les solides, la conduction assure un bon transfert de chaleur.

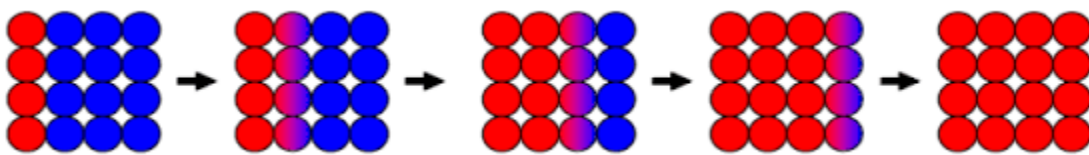


Figure II. 1 : Phénomène de conduction [3]

### II.3.2 Convection

Ce mode de transfert de chaleur apparaît entre deux phases dont l'une au moins est mobile, en présence d'une différence de température. Le mouvement des phases peut être provoqué par des différences de densité dans le fluide ; le transfert de chaleur est dit convection naturelle ou libre. Le mouvement peut être provoqué par une dégradation d'énergie

mécanique ; le transfert de chaleur est dit de convection forcée. Cette dernière est essentielle pour ces appareils (échangeurs). [2]

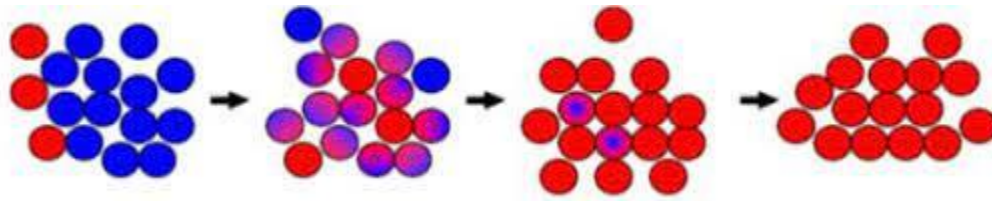


Figure II. 2 : Phénomène de convection [3]

### II.3.3 Rayonnement

C'est l'émission d'énergie par les surfaces des corps sous forme de radiation. Elle correspond à un échange de chaleur par l'intermédiaire d'une onde de nature électromagnétique et qui ne nécessite aucun support matériel (cas du vide, de certains gaz plus ou moins transparents et de certains solides). [4]

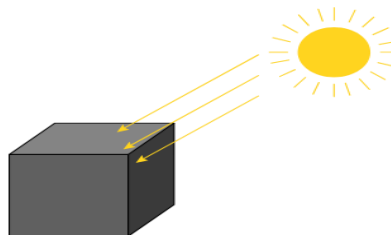


Figure II. 3 : Phénomène de rayonnement [4]

## II.4 Classification des échangeurs de chaleur

### II.4.1 Classification selon le mode de transfert de chaleur

Les trois modes de transfert de chaleur (conduction, convection, rayonnement) sont couplés dans la plupart des applications (chambre de combustion, récupération sur les fumées, etc.) ; il y a souvent un mode de transfert prédominant. Pour tout échangeur avec transfert de chaleur à travers une paroi, la conduction intervient. [4]

### II.4.2 Classification selon le type de contact

Dans cette classification, on distingue deux configurations :

### II.4.2.1 Échangeurs à contact direct

Le type le plus simple comprend un récipient ou une canalisation dans lequel les deux fluides sont directement mélangés et atteignent la même température finale.

### II.4.2.2 Échangeurs à contact indirect

Dans ce cas, les deux fluides s'écoulent à l'intérieur de l'échangeur dans des espaces séparés par une paroi, le plus souvent métallique. [5]

## II.4.3 Classification selon le procédé de transfert de chaleur

Suivant qu'il y a ou non stockage de chaleur, on définit un fonctionnement en récupérateur ou en régénérateur de chaleur :

- transfert sans stockage, donc en récupérateur, avec 2 ou n passages et un écoulement en général continu.
- transfert avec stockage, donc en régénérateur, avec un seul passage et un écoulement intermittent.

## II.4.4 Classification selon le mode de circulation

### II.4.4.1 Circulation à co-courant (ou à courants parallèles) et contre-courant

Les deux fluides circulent soit dans le même sens, soit en sens contraire de chaque côté de la paroi. La réalisation technologique peut se faire soit par :

- Des appareils tubulaires dits double-tube : constitués de 2 tubes concentriques ; un fluide s'écoule dans le tube intérieur, l'autre dans la section annulaire.

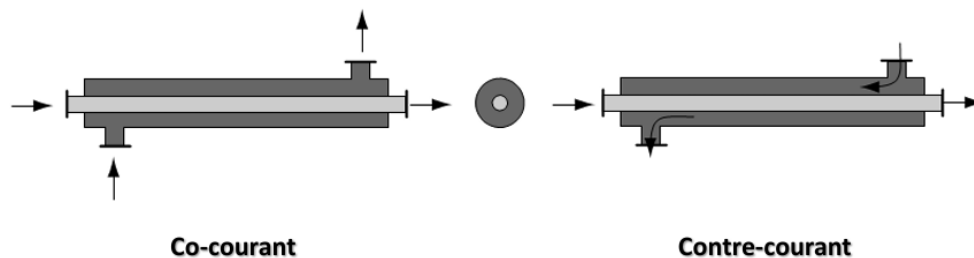
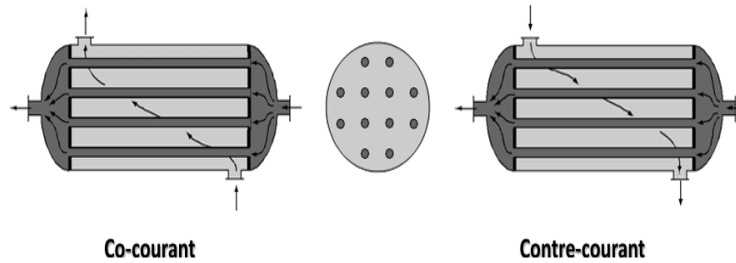
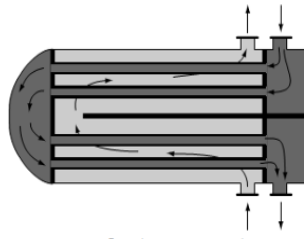


Figure II. 4 : Échangeur bitube

- b. Contre-courant des appareils à faisceau et calandre : un fluide passe à l'intérieur des tubes parallèles constituant un faisceau logé dans une calandre cylindrique, l'autre passe à l'extérieur des tubes. Il existe :

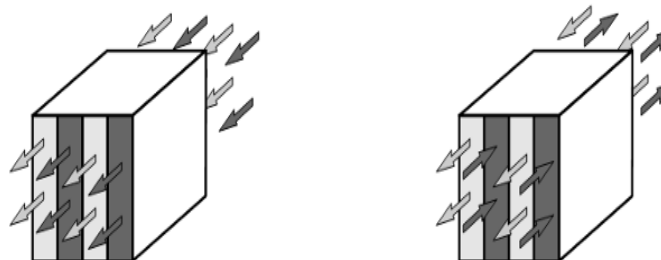


**Figure II. 5 :** Échangeur à tube et calandre type 1-1  
(1 passe côté calandre, 1 passe côté tubes)



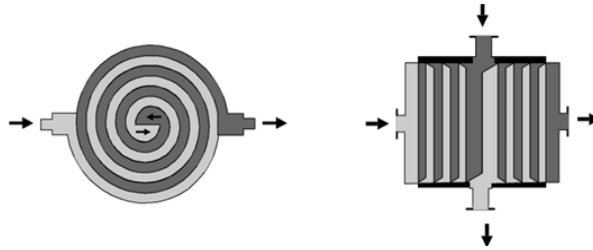
**Figure II. 6 :** Échangeur à tube et calandre type 2-2  
(2 passes côté calandre, 2 passes côté tubes)

- c. Des appareils à plaques ou lamelles :



**Figure II. 7 :** Échangeur à plaques

- d. Les plaques peuvent être formées en spirale.



**Figure II. 8 :** Échangeur à plaques en spirale

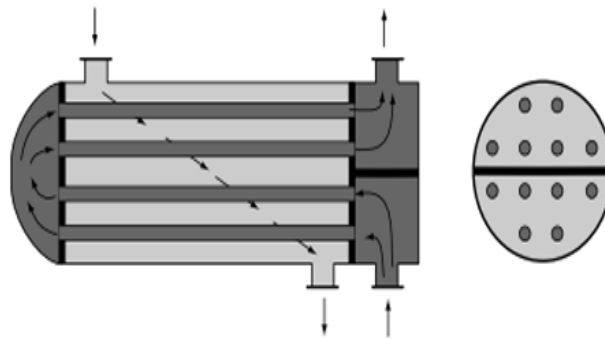
#### II.4.4.2 Circulation utilisant simultanément le co-courant et le contre- courant

Ce type de circulation est réalisé dans des appareils tubulaires à faisceau et calandre cylindrique :

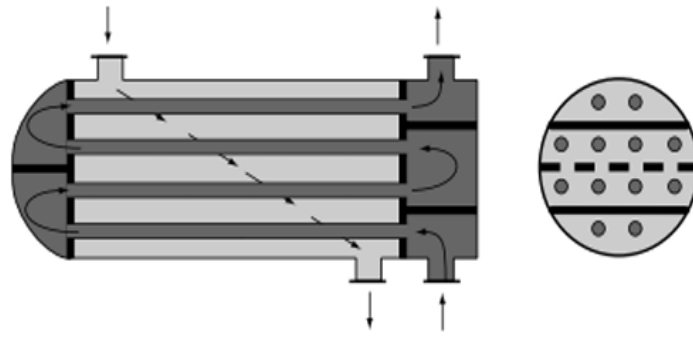
- a. Appareils à 1 passe côté calandre et 2 ou 4 ou 6, ... etc. passes côtés tubes (calandre de type E) :

Le nombre de passes côté tubes est souvent égal à 2, 4 parfois à 6 ; il est très rarement égal à 8 pour des raisons de pertes de charges prohibitives.

Le fluide côté tubes échange de la chaleur simultanément sur 2 passes, l'une à contre- courant avec le fluide côté calandre, l'autre à co-courant.



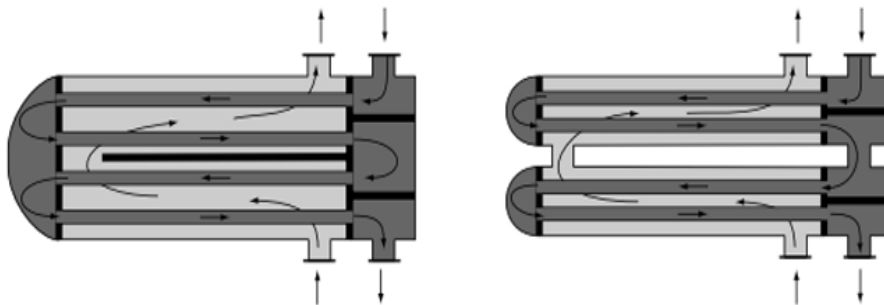
**Figure II. 9 :** Échangeur à tube et calandre type 1-2  
(1 passe côté calandre, 2 passes côté tubes)



**Figure II. 10 :** Échangeur à tube et calandre type 1-4  
(1 passe côté calandre, 4 passes côté tubes)

**b.** Appareils à 2 passes côté calandre (calandre de type F) :

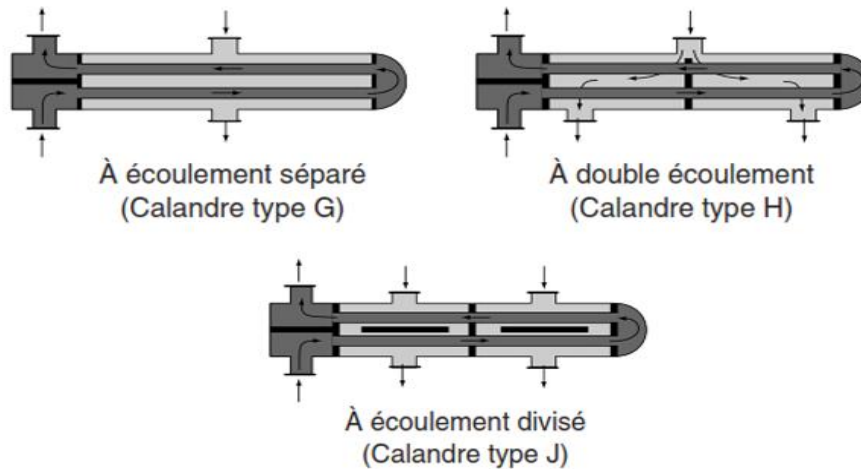
Le nombre de passes côté tubes associé peut être égal à 4 ou 8... Par exemple, l'appareil 2-4 associe 2 passes côté tubes à chacune des 2 passes côté calandre. Chacune des 2 parties de cet appareil 2-4 fonctionne comme un appareil 1-2, les 2 parties étant disposées en série sur les 2 fluides ; la mise en série respecte le contre-courant d'ensemble dans le cas du dispositif représenté ci-dessous :



**Figure II. 11 :** Échangeur à 2 passes coté calandre (calandre type F)

**c.** Autres appareils

Les modes de circulation suivants organisant des circuits en dérivation sont utilisés pour limiter les pertes de charge côté calandre. Les appareils schématisés ci-dessous fonctionnent avec 2 passes ; ce nombre peut être modifié. [5]



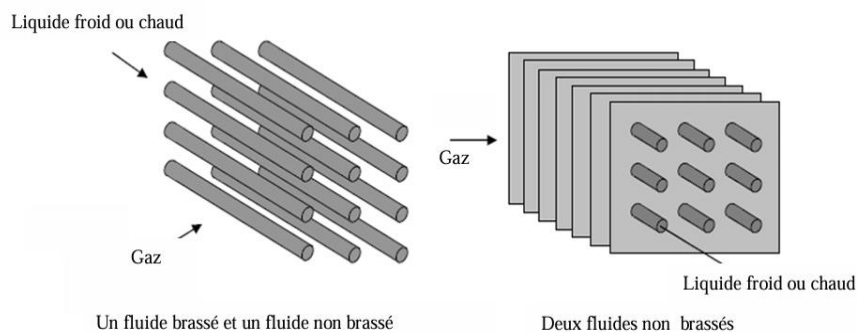
**Figure II. 12 :** Échangeur à tube et calandre (calandre type G, H et J)

#### II.4.4.3 Circulation à courants croisés

Dans ce type d'échangeurs, une circulation de l'un des fluides dans une série de tubes, alors que l'autre circule perpendiculairement autour des tubes. Généralement, c'est le liquide qui circule dans les tubes et le gaz à l'entour. Les tubes munis d'ailettes permettent un bon transfert de chaleur échangée en augmentant la surface d'échange. Le radiateur de refroidissement des véhicules à moteur est un exemple de cet échangeur. [4]

Il existe deux classes d'échangeurs à courants croisés :

- L'un des fluides n'est pas brassé tandis que l'autre l'est.
- Les deux fluides ne sont pas brassés.

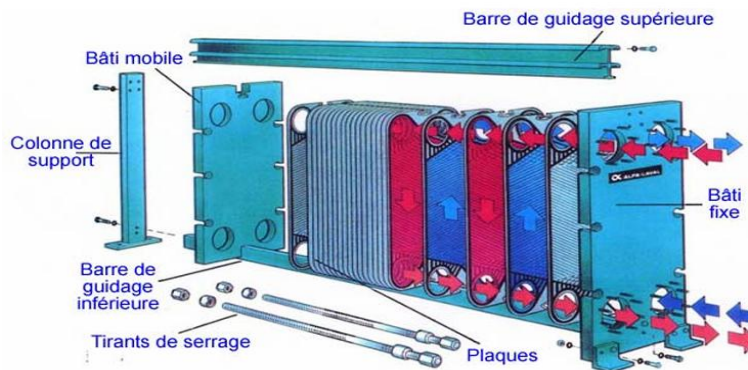


**Figure II. 13 :** Principe des échangeurs tubulaires à courants croisés

## II.4.5 Classement technologique

### II.4.5.1 Les échangeurs à plaques

En règle générale, les échangeurs à plaques sont constitués par un empilement de plaques écartées les unes des autres par des entretoises pour former un ensemble de conduits plats. Un fluide circule dans les conduits pairs, l'autre dans les conduits impairs selon le schéma ci-dessous [7] :



**Figure II. 14 :** Composition d'un échangeur à plaque

1. **Les plaques** sont serrées entre un bâti fixe et un bâti mobile. Elles sont positionnées et guidées par 2 barres support inférieure et supérieure.
2. **Les bâtis** maintiennent les plaques serrées au moyen de tirants. Les deux barres guides sont-elles même supportées par un pied support.
3. **Un joint** par plaque assure l'étanchéité de l'échangeur ainsi que la répartition des fluides dans les canaux formés par deux plaques.

On peut distinguer principalement deux types d'échangeurs à plaques : ceux à plaques et joints et ceux à plaques brasées (ou cassettes). [2]

### II.4.5.2 Les échangeurs tubulaires et multitubulaires

Ils représentent la majorité des échangeurs utilisés dans les industries chimiques et pétrolières. Dans leur plus simple configuration, ils sont constitués de deux tubes concentriques raccordés à leurs extrémités par des coudes. Cependant, pour les cas courants, ils sont faits de plusieurs tubes empilés sous forme d'un faisceau, d'où l'appellation échangeurs à faisceau tubulaires. [7]

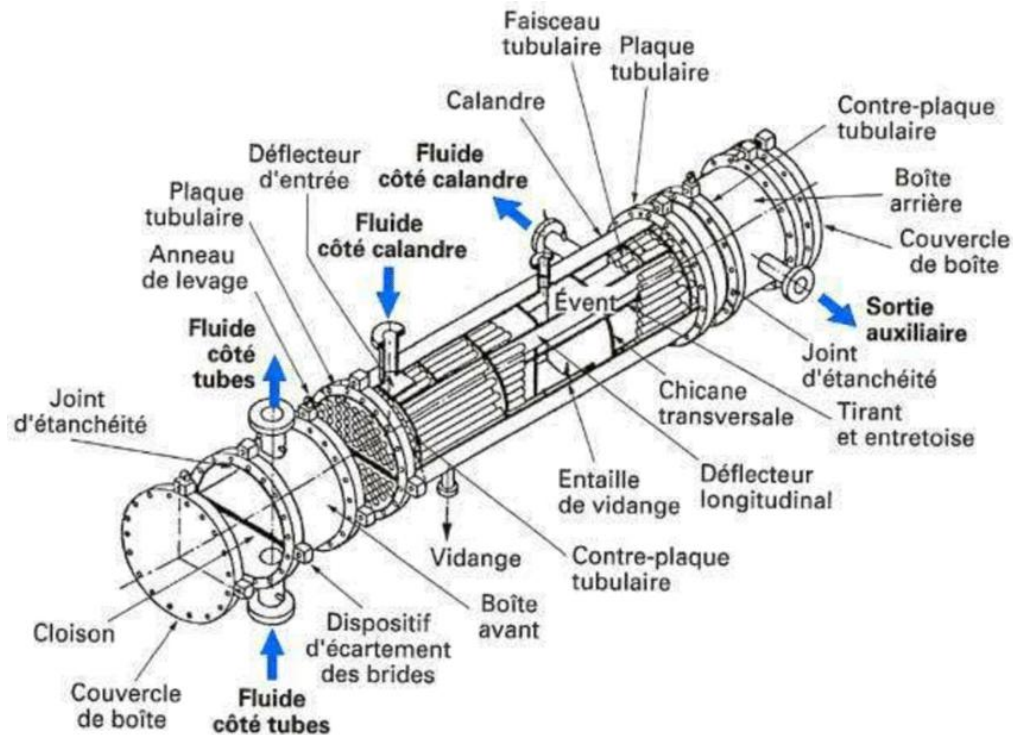


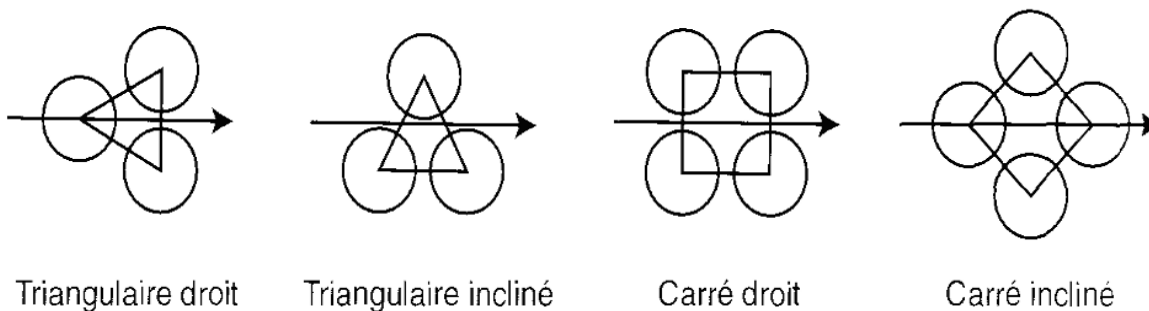
Figure II. 15 : Divers constituants d'un échangeur TEMA type AEL

#### II.4.5.2.1 Rôle des divers constituants d'un échangeur tubulaire

- a) **Boîtes d'échangeurs** : c'est l'organe qui distribue ou recueille le fluide aux extrémités des tubes. Sauf pour les tubes en U, il y a deux boîtes aux deux extrémités de l'échangeur. La disposition des boîtes dépend non seulement du type choisi, mais aussi du nombre de passes. La liaison cloison-plaque tubulaire est en général assurée par un joint. Les boîtes sont le plus souvent réalisées avec un matériau peu différent de celui des tubes.
- b) **Calandre** : c'est l'enveloppe entourant le faisceau tubulaire. Il semble que la limite technologique pour des calandres se trouve aux alentours de 2 m.
- c) **Plaques tubulaires** : ce sont des plaques percées supportant les tubes à leurs extrémités. Leur épaisseur (5 à 10 cm) est calculée en fonction de la différence de pression entre le fluide dans la calandre et le fluide dans les boîtes d'une part, des contraintes dues aux différences de dilatation entre les tubes et la calandre d'autre part. Les tubes peuvent être fixés à la plaque tubulaire par dudgeonnage ou par soudure, quelquefois aussi par dudgeonnage allié à une soudure qui sert alors simplement à assurer l'étanchéité. Les plaques tubulaires sont des

parties délicates des échangeurs. Les interstices entre tubes et plaques sont des lieux privilégiés de corrosion.

- d) **Tubes** : ce sont des tubes normalisés (BWG, soit par Birmingham Wire Gage) particuliers dont le diamètre annoncé, en pouces, correspond exactement au diamètre extérieur (à la différence des tubes utilisés en tuyauterie).
- e) **Chicanes** : les chicanes peuvent avoir deux rôles :
- ✓ Augmenter la vitesse du fluide,
  - ✓ Augmenter la rigidité du faisceau, pour éviter des phénomènes de vibration.
- f) **Tête flottante** : permet l'expansion thermique libre du faisceau tubulaire, pour éviter l'endommagement des tubes à cause de la dilatation thermique.
- g) **Disposition des tubes** : ce sont généralement des tubes normalisés disposés de deux façons possibles, le pas carré et le pas triangulaire (**figure II. 16**). [1]

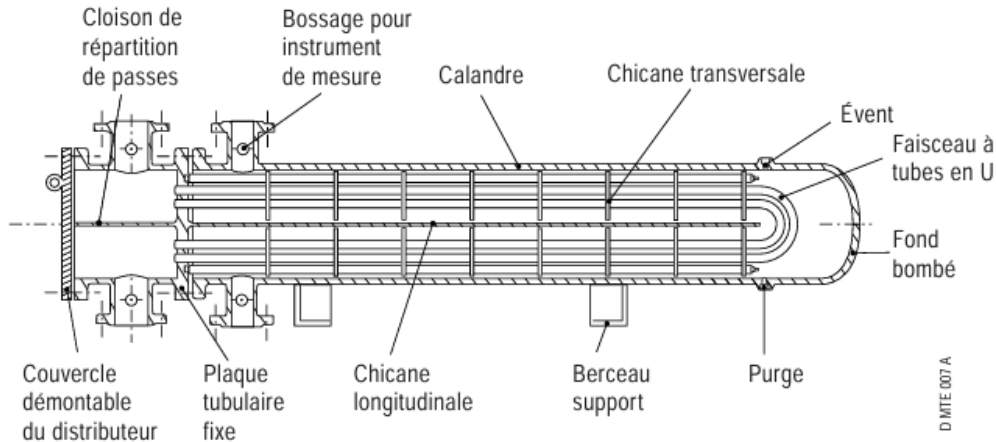


**Figure II. 16** : Disposition des tubes

#### II.4.5.2.2 Types d'Échangeurs Tubulaires – Exemples

#### II.4.5.2.3 Échangeurs à tubes en U (type CFU)

Le faisceau est constitué de tubes coudés en forme d'épingle, il n'est donc porté que par une seule plaque tubulaire. Ce système permet la libre dilatation du faisceau. En revanche, le nettoyage des tubes est difficilement réalisable autrement que par voie chimique. Ils sont obligatoirement à 2 passes côté tubes ; dans l'exemple présenté ci-dessous, l'appareil est à deux passes côté calandre. Celle-ci porte en effet une chicane longitudinale et les deux tubulures d'entrée et de sortie du fluide qui passent côté calandre sont dans un même plan vertical. [8]

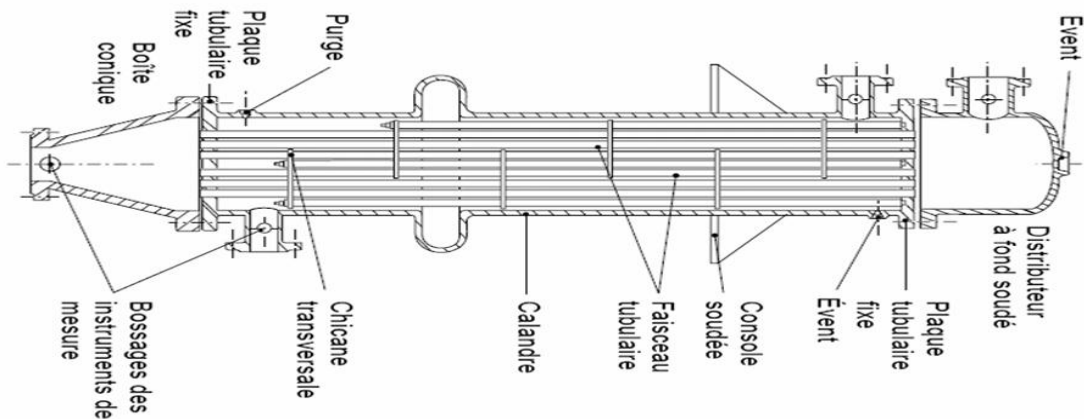


**Figure II. 17 :** Échangeurs à tubes en U

#### II.4.5.2.4 Les échangeurs à plaques tubulaires fixes

Dans ce cas, les plaques tubulaires peuvent être directement soudées sur la calandre. Faisceau et calandre étant solidaires, ces appareils ne peuvent être utilisés que si la différence de température entre les fluides chaud et froid est suffisamment faible pour que la dilatation ou la contraction du faisceau soit acceptable. Un soufflet de dilatation est prévu à cet effet. Par ailleurs, le faisceau n'étant pas démontable, on ne peut effectuer le nettoyage de l'extérieur des tubes que par voie chimique. Leur emploi sur des services encrassants est exclu.

L'exemple représenté ci-contre est à une passe côté tube et une passe côté calandre. Chaque boîte ne porte dans ce cas qu'une tubulure d'entrée ou de sortie du produit qui passe dans les tubes. [6]



**Figure II. 18 :** Échangeurs à plaque tubulaire fixes

II.4.5.2.5 Autre différents Types d'Échangeurs Tubulaires

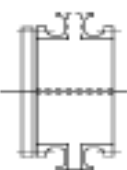
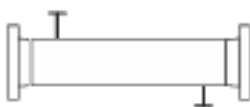

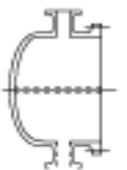
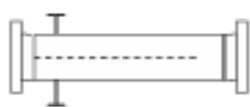

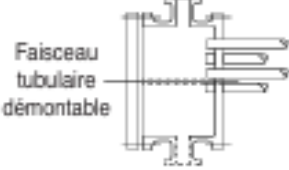
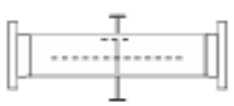

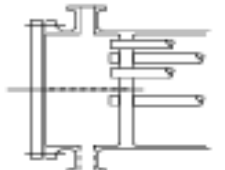
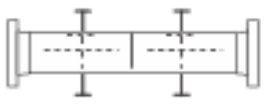
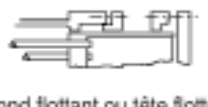
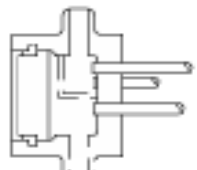
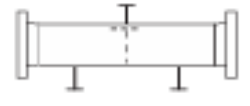


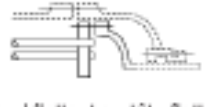
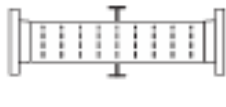


	Type de chambre de distribution	Type de calandre	Type de fond de calandre
<b>A</b>	 <p>Chambre avec couvercle démontable</p>	 <p>Calandre à une passe</p>	 <p>Plaque tubulaire fixe type "A"</p>
<b>B</b>	 <p>Chambre "Bonnet"</p>	 <p>Calandre à deux passes avec cloison longitudinale</p>	 <p>Plaque tubulaire fixe type "B"</p>
<b>C</b>	 <p>Faisceau tubulaire démontable</p> <p>Chambre intégrée à une plaque tubulaire avec couvercle démontable</p>	 <p>Écoulement séparé</p>	 <p>Plaque tubulaire fixe type "N"</p>
<b>N</b>	 <p>Chambre intégrée à une plaque tubulaire avec couvercle démontable</p>	 <p>Double écoulement séparé</p>	 <p>Fond flottant ou tête flottante avec garniture externe</p>
<b>D</b>	 <p>Chambre à fermeture spéciale pour haute pression</p>	 <p>Écoulement divisé</p>	 <p>Fond flottant ou tête flottante avec contre bride démontable</p>
		 <p>Rebouilleur "Kettle"</p>	 <p>Fond flottant ou tête flottante à passage direct</p>
		 <p>Courants croisés</p>	 <p>Faisceau à tubes en U</p>
			 <p>Fond flottant ou tête flottante avec garniture externe à détecteur de fuite</p>

Figure II. 19 : Différents types d'échangeurs tubulaires [6]

## II.5 Description et rôle de l'échangeur E-512

### II.5.1 Présentation de l'échangeur de chaleur E-512

L'équipement qu'on a étudié est un échangeur de chaleur à contact indirect (eau de mer/MCR) de type faisceaux et calandre à plaques tubulaires fixes. L'échangeur est à contre-courant. Les tubes sont montés sur les plaques tubulaires fixes qui sont soudées entre la calandre et les boîtes de distribution. L'échangeur repose sur deux supports. Les tubes peuvent être disposés sur la plaque tubulaire en pas carré ou triangulaire, comme dans le cas de notre échangeur (le pas est carré).

Le but de cet échangeur est le refroidissement de gaz MCR et la diminution de sa température au maximum pour réaliser une meilleure réfrigération de MCR. [9]



**Figure II. 20 :** Échangeur de chaleur (eau de mer / MCR)

## II.5.2 Position de l'échangeur de chaleur par rapport à l'unité de l'MCR

L'échangeur de chaleur que j'ai choisi est installé dans la section de synthèse exactement dans la section de réfrigération de MCR, entre le compresseur de réfrigération et le ballon de détente de MCR.

## II.5.3 Le principe de fonctionnement de l'échangeur

L'échangeur de chaleur est un équipement statique où se fait l'échange thermique dans cet appareil (eau de mer/MCR). Se fait entre l'eau de mer « côté tube » provenant de stations de pompage au niveau du port et le gaz de synthèse l'MCR « côté calandre » provenant du refoulement de compresseurs de réfrigération. Le passage des deux fluides dans l'échangeur s'effectue à contre-courant sans changement de phase.

## II.5.4 Caractéristiques techniques et performance de l'échangeur

La norme TEMA définit les principaux types d'échangeurs. Suivant cette norme, la forme de cet échangeur est caractérisée par 3 lettres AEL. Sur la figure II.19 sont représentés les différents types d'échangeurs selon la norme TEMA :

- 1<sup>re</sup> lettre : **A** pour la boîte de distribution démontable.
- 2<sup>e</sup> lettre : **E** pour la calandre à une passe.
- 3<sup>e</sup> lettre : **L** pour la plaque tubulaire fixe. [9]

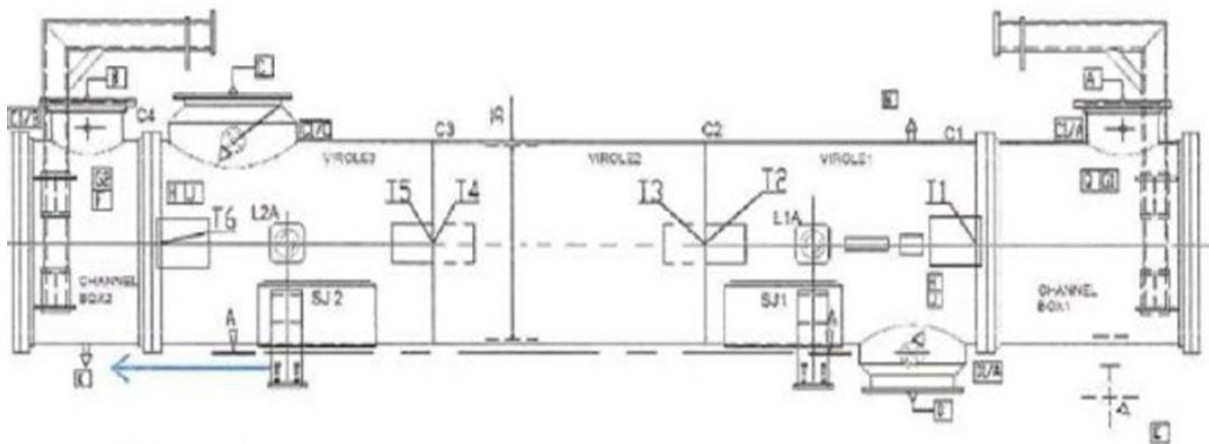


Figure II. 21 : La calandre et les boites de distribution [10]

### II.5.4.1 La calandre et les boîtes de distribution

La calandre prend la forme d'un cylindre construit de trois viroles et comprend une entrée de gaz MCR2 (S1) et une sortie de gaz plus MCR liquide (S2), et aussi un évent (S3) situé au sommet de la calandre pour faciliter le remplissage total de l'échangeur côté MCR. La calandre constituée d'une seule passe (nombre de passes = 1). De l'autre côté, les boîtes de distribution comprennent une entrée d'eau de mer (T1) et une sortie (T2).

**Tableau II. 1** : Les dimensions de la calandre [10]

	Diamètre intérieur (mm)	Epaisseur (mm)	Diamètre extérieur (mm)	Sur épaisseur de corrosion (mm)	Fluide circule
Calandre	1549	38.5	1620	3	MCR
Boite de distribution	1549	12.7	1620	0	Eau de Mer

### II.5.4.2 Plaques tubulaires

On les retrouve aux extrémités de la calandre. Les deux plaques ont une longueur de 7312 entre les plaques tubulaires qui sont en communication avec des boîtes de distribution qui assurent la circulation du fluide à l'intérieur du faisceau tubulaire.



**Figure II. 22** : Plaque tubulaire de l'échangeur existant

### II.5.4.3 Faisceau tubulaire

Les échangeurs tubulaires utilisent des tubes comme constituant principal de la paroi d'échange. Les matériaux utilisés dépendent des fluides choisis ; les plus courants sont les aciers ordinaires, les aciers inoxydables, le cuivre ou le laiton... etc. L'échangeur (eau de mer/MCR)

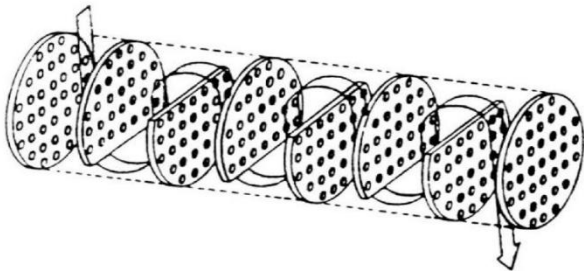
contient 1592 tubes droits rectilignes de 7300 mm de long, d'un diamètre de 19.05 mm et une épaisseur de 1.25 mm, est de pas carré de 25.4 mm. [9]

**Tableau II. 2 :** Caractéristique de faisceau tubulaire. [10]

Nombre des tubes	1592
Longueurs des tubes (mm)	7300
Diamètre des tubes (mm)	19.05
Epaisseur des tubes (mm)	1.25
Nombre de passe	1

#### II.5.4.4 Chicanes

Ce sont des tôles en forme de segment de 7 mm d'épaisseur et de diamètre inférieur au diamètre de la calandre et de la plaque tubulaire. Les chicanes sont dotées de trous de diamètres légèrement supérieurs aux diamètres extérieurs du tube du faisceau pour faciliter le passage de ces derniers lors de leurs montages. Entre les deux plaques tubulaires, on trouve un ensemble de 4 chicanes. Ces chicanes sont séparées l'une de l'autre par un espace de 1290 mm et de diamètre de 27 mm. Le rôle de chicane est de maintenir les tubes droits et d'éviter leur fléchissement, vibration et frottement. [4]



**Figure II. 23 :** Les chicanes [4]



**Figure II. 24 :** Boîte de distribution

#### II.5.4.5 Boîte de distribution

C'est l'organe qui distribue ou recueille le fluide aux extrémités des tubes, c.-à-d. que la circulation dans le faisceau est assurée par l'adjonction d'une boîte de distribution portant les brides d'entrée et de sortie. [9]

# **Chapitre III**

## **Calcul thermique**

### III.1 Introduction

Le présent calcul repose sur la méthode de dimensionnement la plus largement éprouvée pour les échangeurs à faisceau tubulaire et à calandre, dite « méthode de KERN ». Il a pour objectif de vérifier la conformité des données fournies par le constructeur pour l'échangeur de chaleur E-512, refroidi à l'eau de mer, existant au complexe GL1Z d'ARZEW en ce qui concerne la performance thermique.

### III.2 Présentation de la méthode de « KERN » pour le calcul d'un échangeur à faisceau et calandre

#### Étape 1 : Bilan thermique [11, 12]

La puissance  $P$  d'un échangeur peut s'écrire de la manière suivante :

$$P = \dot{m}_1 \cdot Cp_1 \cdot \Delta T_1 = \dot{m}_2 \cdot Cp_2 \cdot \Delta T_2 \quad [W]$$

Avec :  $P$  : puissance thermique [W].

$\dot{m}_1$  et  $\dot{m}_2$  : débits massiques des deux fluides [kg/s].

$Cp_1$  et  $Cp_2$  : Capacité calorifique [kJ/Kg. °C].

$\Delta T_1$  et  $\Delta T_2$  : les températures des deux fluides [°C].

#### Étape 2 : Calcul de la DTLM

##### ➤ Cas contre-courant

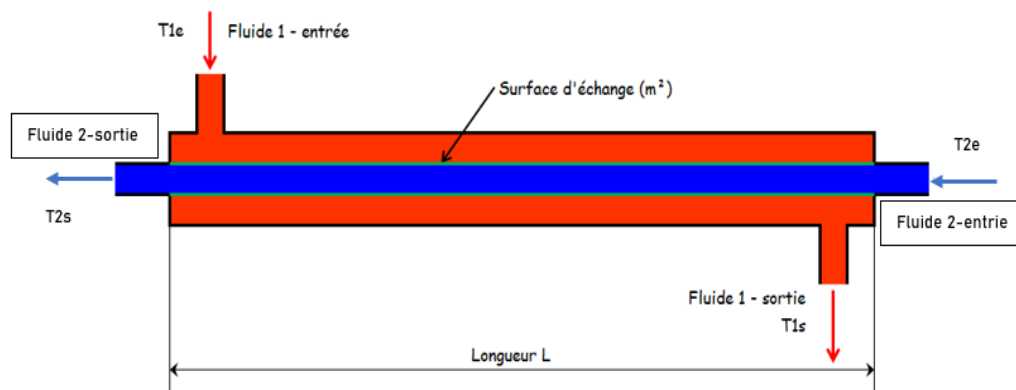
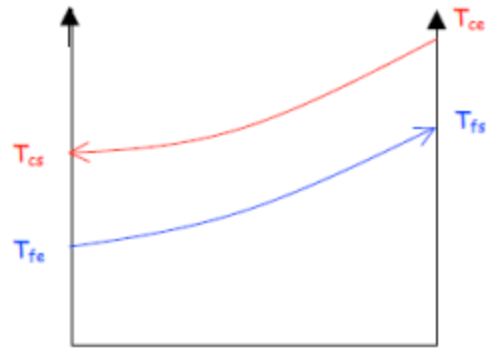


Figure III. 1 : Principe d'un échangeur de chaleur (contre-courant) [13]



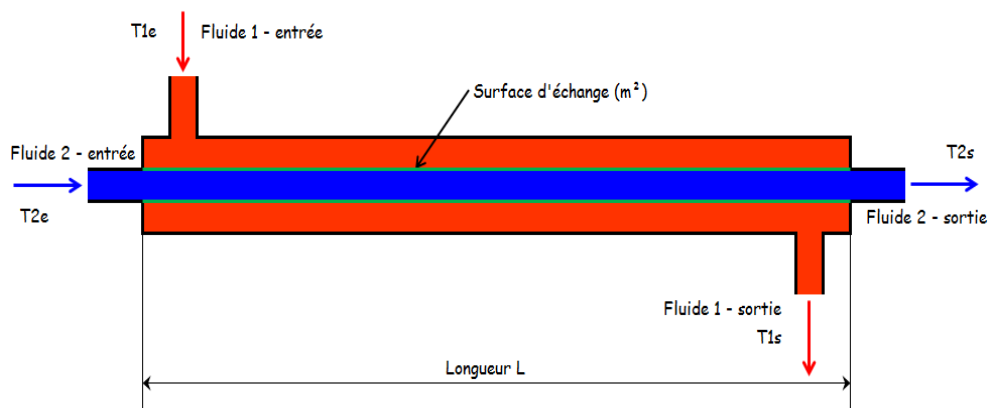
**Figure III. 2 :** Schéma de températures dans un échangeur de chaleur à contre-courant [12]

- Pour un échangeur contre-courant, le  $\Delta TLM$  qui s'écrit sous la forme :

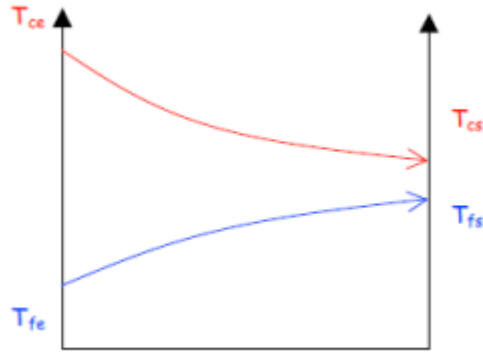
$$\begin{cases} \Delta T_1 = T_{1,\text{entré}} - T_{2,\text{sortie}} \\ \Delta T_2 = T_{1,\text{sortie}} - T_{2,\text{entré}} \end{cases}$$

$$\Delta TLM = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln\left(\frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}\right)} \quad [^{\circ}\text{C}]$$

- Cas co-courant



**Figure III. 3 :** Principe d'un échangeur de chaleur (co-courant) [13]



**Figure III. 4 :** Schéma de températures dans un échangeur de chaleur à contre-courant [12]

- Pour un échangeur Co-courant, le  $\Delta TLM$  qui s'écrit sous la forme :

$$\begin{cases} \Delta T_1 = T_{1,\text{entré}} - T_{2,\text{entré}} \\ \Delta T_2 = T_{1,\text{sortie}} - T_{2,\text{sortie}} \end{cases}$$

$$\Delta TLM = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln\left(\frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}\right)} \quad [^{\circ}\text{C}]$$

- Facteur de correction

La méthode de la Différence de Température Logarithmique Moyenne (DTLM) est effectivement limitée aux échangeurs à co-courant et contre-courant en raison de la simplicité de leurs profils de température. Pour les configurations complexes (courants croisés, multi passes), on utilise une DTLM corrigée par un facteur de correction  $F$ , afin de tenir compte des écoulements non idéaux. Tel que :

$$\Delta TLM_{c,c} = F \times \Delta TLM$$

**F** : Facteur de correction.

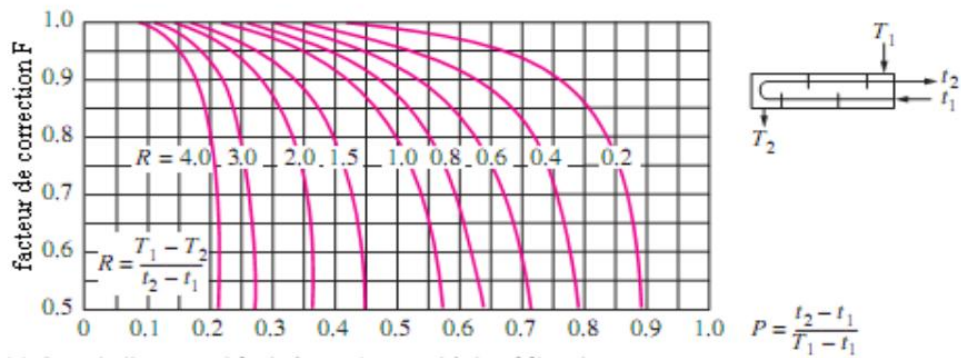
Le facteur  $F$  dépend de la géométrie de l'échangeur et des températures d'entrée et de sortie des fluides chaud et froid. Il permet d'ajuster la différence de température moyenne logarithmique dans des configurations non idéales.

Pour trouver le facteur de correction  $F$ , on va suivre les étapes suivantes :

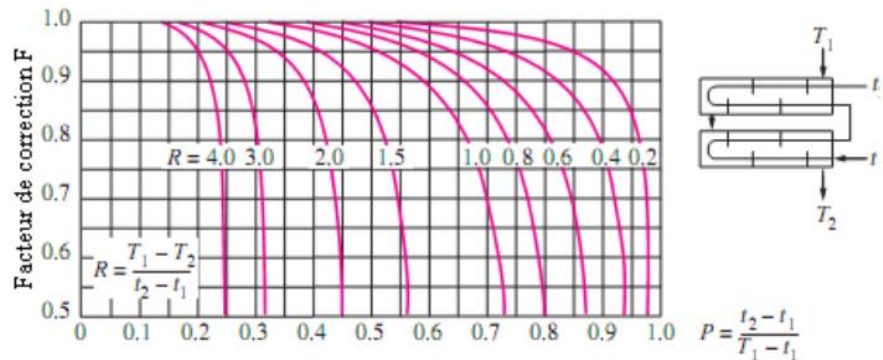
- Calcul des paramètres  $P$  et  $R$  :

$$P = \frac{t_2 - t_1}{T_1 - t_1} \text{ et } R = \frac{T_1 - T_2}{t_2 - t_1}$$

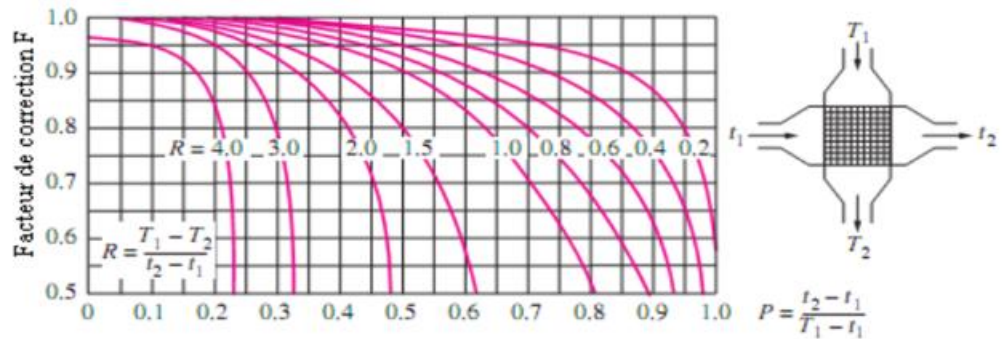
- Selon la géométrie de l'échangeur (par exemple, écoulement croisé ou multi-passes...), on fait la projection sur les courbes suivantes :



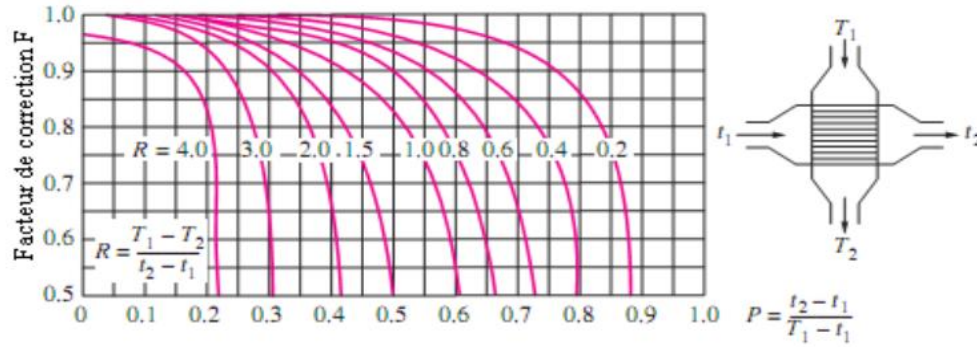
a) 1 passe coté calandre et 2, 4, 6, etc. (multiple de 2) coté tubes.



b) 2 passes coté calandre et 4, 8, 12, etc. (multiple de 4) coté tubes.



c) Simple passe croisé avec écoulements des 2 fluides dirigés.



d) Simple passe croisé avec écoulement d'un seul fluide dirigé.

**Figure III. 5 :** Facteur de correction pour différent types d'échangeurs a, b, c, d [11]

- Après la projection on trouve la valeur de F

- Alors, on va calculer  $\Delta TLM_{c.c}$

Tel que :  $\Delta TLM_{c.c} = F \times \Delta TLM$  et F est toujours inférieur ou égal à 1.

**Étape 3 :** Calcul le coefficient de transfert propre Up

➤ **Coté tube**

Section par passe $A_t$ [m <sup>2</sup> ]	$A_t = \left(\frac{N_{tube}}{n_t}\right) \cdot \left(\frac{\pi d_i^2}{4}\right)$
Vitesse massique $Gt$ [ $\frac{Kg}{s} \cdot m^2$ ]	$Gt = \frac{\dot{m}_{tube}}{A_t}$
Nombre de Reynolds $R_e$	$R_e = \frac{Gt \cdot di}{\mu_{f,moy}}$
Critère de Prandtl $Pr$	$Pr = \frac{Cp_{moy} \times \mu_{f,moy}}{\lambda_{moy}}$
Facteur de correction $\phi_r$	$\phi_t = \left(\frac{\mu_{f,moy}}{\mu_{f,sortie}}\right)^{0.14}$
Coefficient de Colburn $jh$	Tiré du graphe [Figure III.7]
Coefficient du film interne $hi$ [W/m <sup>2</sup> .°C]	$hi = \frac{jh \times \lambda_f}{di} \times R_e \times (Pr)^{\frac{1}{3}} \times \phi_t$
Coefficient du film interne corrigé $hi0$ [W/m <sup>2</sup> .°C]	$hi0 = hi \times \frac{d_i}{d_o}$

➤ **Coté calandre**

Surface passante maximale $A_s$ [ $m^2$ ]	$A_s = \frac{D_i}{P} (P - d_e) \times l_b$
Vitesse massique $Gt$ [ $\frac{Kg}{s} \cdot m^2$ ]	$Gt' = \frac{\dot{m}_{calandre}}{A_s}$
Diamètre équivalent $D_{\acute{e}q}$ [mm]	$D_{\acute{e}q} = 4 \left( \frac{P^2 - \frac{\pi d_{ext}^2}{4}}{\pi d_{ext}} \right)$
Nombre de Reynolds $R_e'$	$R_e' = \frac{Gt \cdot D_{\acute{e}q}}{\mu_{c,moy}}$
Critère de Prandtl $Pr$	$Pr' = \frac{Cp_{c,moy} \times \mu_{c,moy}}{\lambda_{c,moy}}$
Coefficient de Colburn $JH$	<b>Tiré du graphe [Figure III.10]</b>
Facteur de correction $\phi_c$	$\phi_c = \left( \frac{\mu_{c,moy}}{\mu_{c,sortie}} \right)^{0.14}$
Coefficient du film externe $h_e$ [ $W/m^2 \cdot ^\circ C$ ]	$h_e = \frac{JH' \times \lambda_{c,moy}}{D_{\acute{e}q}} \times R_e' \times (Pr')^{\frac{1}{3}} \times \phi_c$

Up est donné par :

$$Up = \frac{1}{\frac{d_e}{h_{i0} \times d_i} + \frac{d_e}{2 \times \lambda_p} \ln \left( \frac{d_e}{d_i} \right) + \frac{1}{h_e}} \quad [W/m^2 \cdot ^\circ C]$$

Avec :

$d_e$  : diamètre extérieure de tube [mm]

$d_i$  : diamètre intérieure de tube [mm]

$\lambda_p$  : conductivité thermique de la paroi du tube [ $W/m \cdot ^\circ C$ ]

$h_{i0}$  : Coefficient du film interne corrigé (coté tube) [ $W/m^2 \cdot ^\circ C$ ]

$h_e$  : Coefficient du film externe (coté calandre) [ $W/m^2 \cdot ^\circ C$ ]

**Étape 4 :** Coefficient de transfert de chaleur global encrassé  $U_{encrassé}$

$$U_{encrassé} = \frac{1}{\frac{d_e}{h_{i0} \times d_i} + \frac{d_e}{2 \times \lambda_p} \ln\left(\frac{d_e}{d_i}\right) + \frac{1}{h_e} + \frac{R_1 d_e}{d_i} + R_2} \quad [W/m^2 \cdot ^\circ C]$$

Avec :

$R_1$ : Facteur d'encrassement du fluide circulant coté tube [ $m^2 \cdot ^\circ C/W$ ]

$R_2$ : Facteur d'encrassement du fluide circulant coté calandre [ $m^2 \cdot ^\circ C/W$ ]

Quelques valeurs du facteur d'encrassement sont données dans le **tableau III.1** ci-dessous :

**Tableau III. 1:** Valeurs du facteur d'encrassement [11]

Fluide	Facteur d'encrassement : Rec [ $m^2 \cdot ^\circ C/W$ ]
Eau de mer ( $t < 50^\circ C$ )	0,0001
Eau de mer ( $t > 50^\circ C$ )	0,0002
Eau de rivière ( $t < 50^\circ C$ )	0,0002-0,0001
Huile	0,0009
Liquides réfrigérants	0,0002
Air industriel	0,0004

**Étape 5 :** Calcul des pertes de charge

➤ **Coté tube**

$$\Delta P_t = 4n_t \times jf \left(\frac{L}{d_i}\right) (\rho_{t,moy} U_{int}^2) \phi_t \quad [bar]$$

Avec :

$n_t$  : Nombre de pas de tube

$jf$  : Facteur de frottement coté tube

$L$  : Longueur de tube [ $mm$ ]

$U_{int}$  : La vitesse intérieure coté tube [ $m/s$ ]

$d_i$  : Diamètre intérieure de tube. [ $mm$ ]

$\rho_{t,moy}$  : Densité de fluide moyen coté tube [ $Kg/m^3$ ]

$\phi_t$  : Facteur de correction coté tube

➤ **Côté calandre**

$$\Delta P_C = 8 \times Jf \times \left( \frac{D_i}{D_{\acute{e}q}} \right) \times \left( \frac{L}{l_b} \right) \times \left( \frac{\rho_{C,moy} U_{ext}^2}{2} \right) \times \varphi_C \quad [bar]$$

Avec :

**$Jf$**  : Facteur de frottement côté calandre

**$D_i$**  : Diamètre intérieure de calandre [  **$mm$**  ]

**$D_{\acute{e}q}$**  : Diamètre équivalent de calandre [  **$mm$**  ]

**$l_b$**  : Espacement entre les chicanes [  **$mm$**  ]

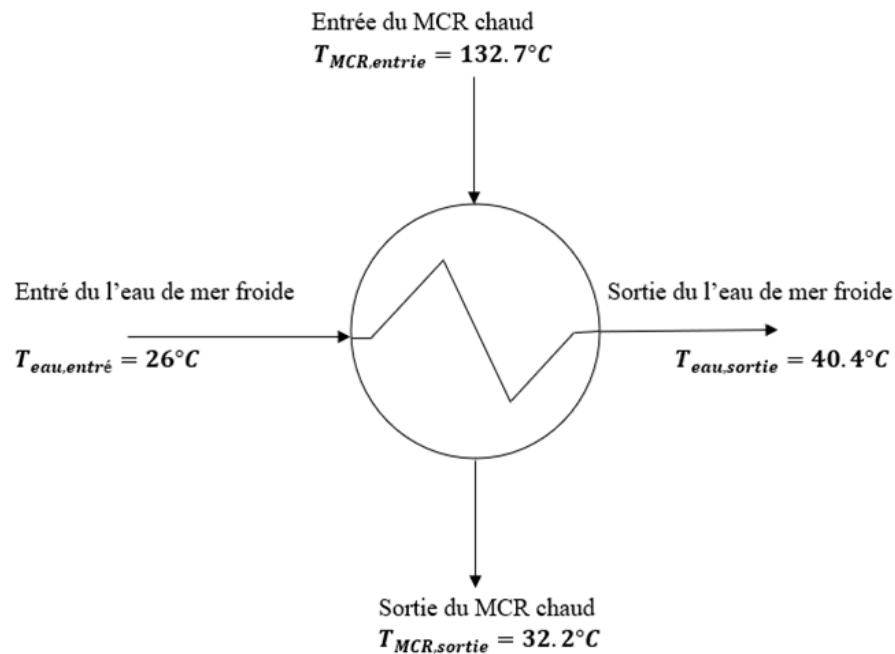
**$U_{ext}$**  : La vitesse extérieure coté calandre [  **$m/s$**  ]

**$\rho_{C,moy}$**  : Densité de fluide coté calandre [  **$Kg/m^3$**  ]

**$\varphi_C$**  : Facteur de correction coté calandre

## I.2 Fiche technique de l'échangeur E-512

### I.2.1 Schéma des fluides



**Figure III. 6** : Schéma des fluides de l'échangeur E-512.

### III.2.1 Caractéristiques d'une Unité

Tableau III. 2 : Caractéristiques d'une Unité [10]

Données Fluide		Coté calandre		Coté tube	
Fluide		MCR		L'eau de mer	
Débit	Kg/s	139.3		613.8	
		Entré	Sortie	Entré	Sortie
Température	°C	132.7	32.2	26	40.4
Pression absolue	Kg/cm <sup>2</sup> a	47.11	/	3.47	/
Liquide	Kg/s	/	/	613.8	613.8
Vapeur	Kg/s	139.3	139.3	/	/

### III.2.2 Propriétés physiques des fluides

Tableau III. 3 : Propriétés physiques des fluides [10]

		Coté calandre				Coté tube			
		LIQ	VAP	LIQ	VAP	LIQ	VAP	LIQ	VAP
Densité	Kg/m <sup>3</sup>	/	38.44	/	61.76	1025	/	1019	/
Viscosité	Cp	/	0.014	/	0.02	1	/	0.73	/
Chaleur latente	W/m <sup>2</sup> °C	/	0.045	/	0.032	0.598	/	0.624	/
Capacité calorifique	Kj/Kg°C	/	2.47	/	2.565	3.98	/	3.99	/

### III.2.3 Caractéristique de l'échangeur E-512

Tableau III. 4 : Données de constructeur de l'échangeur E-512 [10]

Construction			
Vitesse	m/sec		1.8
Perte. Charge Adm/Calc	Kg/cm <sup>2</sup>	0.4 / 0.25	0.7 / 0.36
Puissance Thermique	MW	35.2	MTD : 30.8 °C
Coefficient de Transfer de chaleur	W/m <sup>2</sup> °C	Encrassé : $U_{\text{encrassé}} = 520$	Propre : $U_p = 665.3$

Tableau III. 5 : Caractéristiques de Faisceau et de calandre [10]

Caractéristiques de Faisceau	
Matériel de tubes	70/30 Cu Ni – SB 111 UNS C71500
Nombre de tubes	$N_t = 1592 \text{ tubes}$
Diamètre extérieure	$d_{ext} 19.05 \text{ mm}$
Diamètre intérieure	$d_{int} 16.55 \text{ mm}$
Epaisseur moyen	$e = 1.25 \text{ mm}$
Longueur de tube	$L = 7300 \text{ mm}$
Pas carré	$P = 25.4 \text{ mm}$
Conductivité thermique	$\lambda = 28 \text{ W/m. } ^\circ\text{C}$
Résistance d'encrassement	$R_1 = 0.0001 \text{ m}^2\text{ }^\circ\text{C/W}$
Caractéristiques de calandre	
Matériel de calandre	SA-516 Gr.70
Diamètre extérieure	$D_{ext} = 1620 \text{ mm}$
Diamètre intérieure	$D_{int} = 1550 \text{ mm}$
Espacement entre les chicanes	$l_b = 1290 \text{ mm}$
Résistance d'encrassement	$R_2 = 0.0004 \text{ m}^2\text{ }^\circ\text{C/W}$

### III.3 Calcul de vérification thermique

#### III.3.1 Calcul de la puissance thermique transférée

- **Fluide froid : Côté tube (eau de mer)**

$$P_{tube} = \dot{m}_{tube} \cdot C_{p,tube} \cdot \Delta T_{tube}$$

$$\dot{m}_{tube} = 613.8 \text{ kg/s}$$

$$C_{p,tube} = 3.98 \text{ KJ/Kg } ^\circ\text{C} = 3980 \text{ J/Kg } ^\circ\text{C}$$

$$\Delta T_{tube} = T_{sortie} - T_{entrée} = 40.4 - 26$$

$$\Rightarrow \Delta T_{tube} = 14,4^\circ\text{C}$$

Donc :

$$P_{tube} = 613.8 \times 3980 \times 14,4 = 35.18 \times 10^6 \text{ W} \Rightarrow$$

$P_{tube} = 35.18 \text{ MW}$
-------------------------------

- **Fluide chaud : Côté calandre (MCR)**

$$P_{\text{calandre}} = \dot{m}_{\text{calandre}} \cdot C_{p,\text{calandre}} \cdot \Delta T_{\text{calandre}}$$

$$\dot{m}_{\text{calandre}} = 139.3 \text{ kg/s}$$

$$C_{p,\text{calandre}} = 2.47 \text{ KJ/Kg} \cdot ^\circ\text{C} = 2470 \text{ J/Kg} \cdot ^\circ\text{C}$$

$$\Delta T_{\text{calandre}} = T_{\text{entrée}} - T_{\text{sortie}} = 132.7 - 32.2$$

$$\Rightarrow \Delta T_{\text{calandre}} = 100.5 ^\circ\text{C}$$

Donc :

$$P_{\text{calandre}} = 139.3 \times 2470 \times 100.5 = 34.58 \times 10^6 \text{ W} \Rightarrow$$

$$P_{\text{calandre}} = 34.58 \text{ MW}$$

$\dot{m}$  : débit massique [Kg/s].

$C_p$  : Capacité calorifique [KJ/Kg. °C].

### III.3.2 Calcul de la différence de température moyenne logarithmique

Pour l'échangeur E-512, la circulation des fluides est un contre-courant, alors :

$$\Delta TLM = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\text{Ln} \left( \frac{\Delta T_1}{\Delta T_2} \right)}$$

$$\begin{cases} \Delta T_1 = T_{\text{MCR,sortie}} - T_{\text{eau,entré}} = 32.2 - 26 = 6.2 ^\circ\text{C} \\ \Delta T_2 = T_{\text{MCR,entré}} - T_{\text{eau,sortie}} = 132.7 - 40.4 = 92.3 ^\circ\text{C} \end{cases}$$

$$\Rightarrow \left\{ \Delta TLM = \frac{6.2 - 92.3}{\text{Ln} \left( \frac{6.2}{92.3} \right)} \Rightarrow \Delta TLM = 31.88 ^\circ\text{C} \right.$$

### III.3.3 Calcul du coefficient de transfert propre Up

#### III.3.3.1 Coté tube

##### III.3.3.1.1 Section passante $A_t$

$$A_t = \left( \frac{N_t}{n_t} \right) \left( \frac{\pi d_i^2}{4} \right)$$

$$A_t = \left( \frac{1592}{1} \right) \cdot \left( \frac{\pi (16.55 \times 10^{-3})^2}{4} \right) \Rightarrow$$

$$A_t = 0.3425 \text{ m}^2$$

Avec :

$N_{tube}$  : Nombre des tubes.

$d_i$  : Diamètre intérieure [m]

$n_t$  : Nombre de pas de tube

### III.3.3.1.2 Vitesse massique $Gt$

$$Gt = \frac{\dot{m}_{tube}}{A_t}$$

$$AN: Gt = \frac{613.8}{0.3425} \Rightarrow \boxed{Gt = 1792.247 \frac{Kg}{s} . m^2}$$

$\dot{m}_{tube}$  : débit massique [Kg/s]

### III.3.3.1.3 Nombre de Reynolds $R_e$

$$R_e = \frac{Gt . d_i}{\mu_{f,moy}}$$

$$\mu_{f,moy} = \frac{\mu_{f,sortie} + \mu_{f,entree}}{2} = \frac{(0.73 + 1) \times 10^{-3}}{2} \Rightarrow \mu_{f,moy} = 0.865 \times 10^{-3} Pa . s$$

$$R_e = \frac{1792.247 \times (16.55 \times 10^{-3})}{0.865 \times 10^{-3}} \Rightarrow \boxed{R_e = 34290.975}$$

On a :  $R_e > 2300 \Rightarrow$  régime turbulent

$\mu_{f,moy}$  : Viscosité dynamique moyen [Pa . s]

$Gt$  : Vitesse massique [Kg/m<sup>2</sup>s]

$d_i$  : diamètre intérieure du tube [m]

### III.3.3.1.4 Calcul du nombre de Prandtl $Pr$

$$Pr = \frac{Cp_{moy} \times \mu_{f,moy}}{\lambda_{moy}}$$

Avec :

$Cp_{moy}$  : capacité calorifique moyen de liquide froid [KJ/Kg . °C]

$\lambda_{moy}$  : conductivité thermique moyen de liquide froid [W/m . °C]

$$Cp_{moy} = \frac{Cp_{entree} + Cp_{sortie}}{2} = \frac{3.98 + 3.99}{2} \Rightarrow Cp_{moy} = 3.985 \text{ KJ/Kg.}^\circ\text{C}$$

$$\lambda_{moy} = \frac{\lambda_{entree} + \lambda_{sortie}}{2} = \frac{0.598 + 0.624}{2} \Rightarrow \lambda_{moy} = 0.611 \text{ W/m.}^\circ\text{C}$$

$$\text{Donc : } Pr = \frac{3.985 \times 10^3 \times 0.865 \times 10^{-3}}{0.611} \Rightarrow Pr = 5.642$$

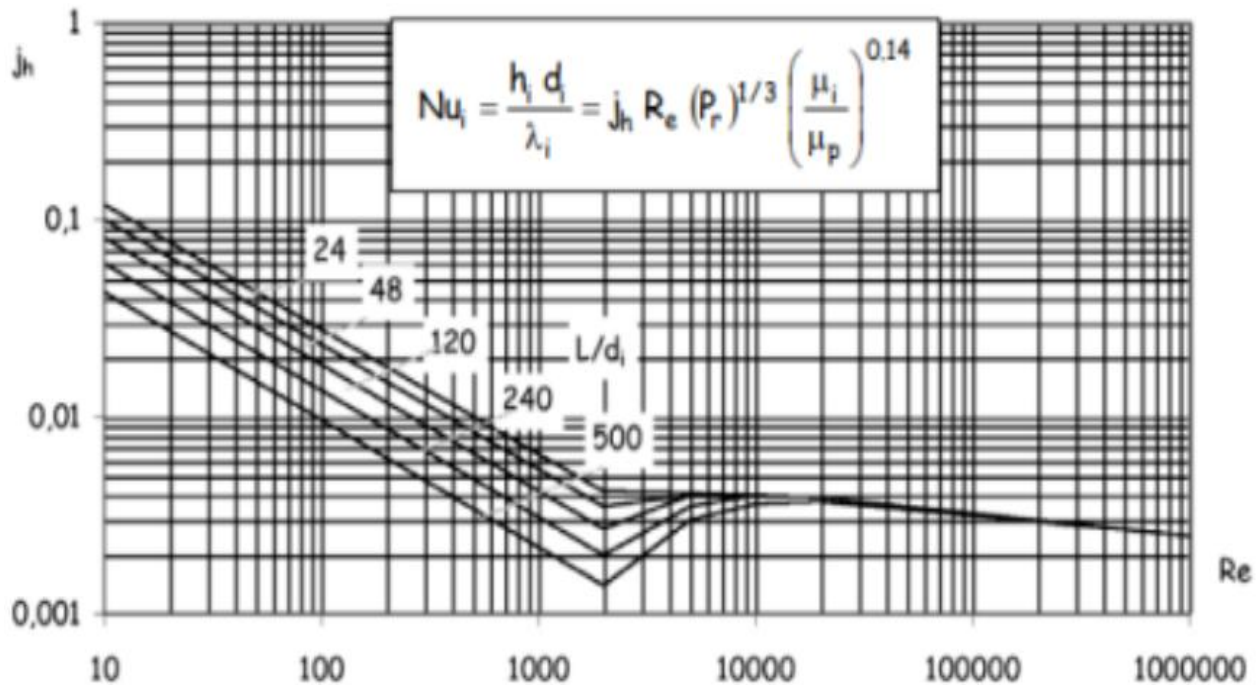
### III.3.3.1.5 Facteur de correction $\phi_t$

$$\phi_t = \left( \frac{\mu_{f,moy}}{\mu_{f,sortie}} \right)^{0.14}$$

$$AN : \phi_t = \left( \frac{0.865}{0.73} \right)^{0.14} \Rightarrow \phi_t = 1.024$$

### III.3.3.1.6 Coefficient de Colburn $j_h$

Le coefficient de transfert de chaleur  $j_h$  côté tubes varie selon le nombre de Reynolds dans les tubes et le rapport longueur sur diamètre des tubes. Il est directement lu sur la figure III.7 :



**Figure III. 7 :** Coefficient de film  $j_h$  coté tube en fonction  $Re$  [11, 12]

Par la projection on trouve :  $j_h = 0.0037$

### III.3.3.1.7 Coefficient du film interne $h_i$

La relation générale donnant le coefficient de film côté tube selon la méthode de Kern est :

$$\frac{h_i \times d_i}{\lambda_f} = jh \times R_e \times (P_r)^{\frac{1}{3}} \times \phi_t$$

$$h_i = \frac{jh \times \lambda_{f,moy}}{d_i} \times R_e \times (P_r)^{\frac{1}{3}} \times \phi_t$$

$$\text{AN : } h_i = \frac{0.0037 \times 0.611}{16.55 \times 10^{-3}} \times 34290.975 \times (5.642)^{\frac{1}{3}} \times 1.024 \Rightarrow \boxed{h_i = 8538.91 \text{ W/m}^2 \cdot \text{°C}}$$

$\lambda_{f,moy}$  : Conductivité thermique moyen de liquide froid [W/m. °C].

$Cp_{f,moy}$  : Capacité calorifique moyen de liquide froid [KJ/Kg. °C]

### III.3.3.1.8 Film interne corrigé $hi0$

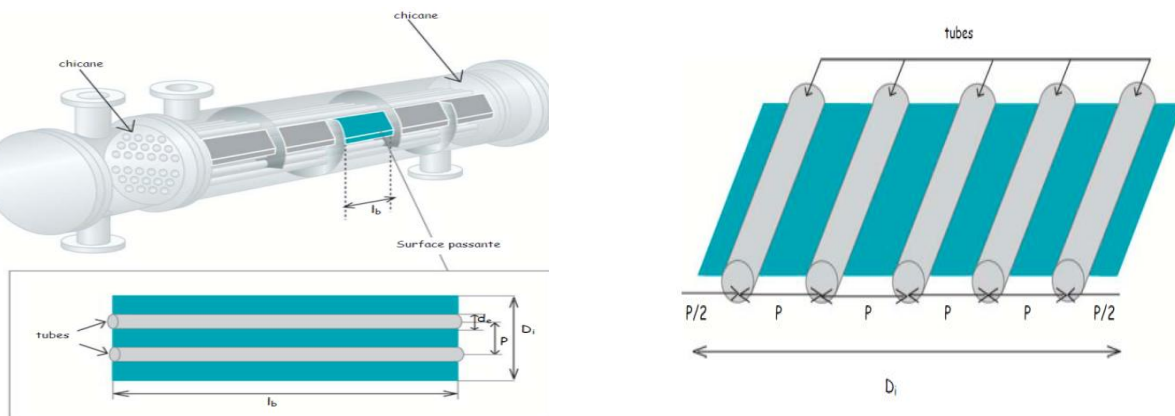
$$hi0 = h_i \times \frac{d_i}{d_o}$$

$$\text{AN : } hi0 = 8654.4 \times \frac{16.55}{19.05} \Rightarrow \boxed{hi0 = 7418.32 \text{ W/m}^2 \cdot \text{°C}}$$

### III.3.3.2 Coté calandre

#### III.3.3.2.1 Surface passante maximale $A_s$

C'est la surface transversale (i.e. "horizontale") libre entre deux chicanes, ce qui correspond à la surface transversale totale entre deux chicanes, moins la surface occupée par les tubes. (La figure III.8).



**Figure III. 8 :** Surface passante maximale  $A_s$  [11, 12]

Donc : 
$$As = \frac{D_i}{P} (P - d_e) \times l_b$$

AN : 
$$As = \frac{1.62}{25.4 \times 10^{-3}} (25.4 - 19.05) \times 1.29 \times 10^{-3} \Rightarrow \boxed{As = 0.52245 m^2}$$

$D_i$  : Diamètre de la calandre, en [m]

$P$  : Pas des tubes, en [mm].

$l_b$  : Espacement entre les chicanes, en [m].

$d_e$  : Diamètre extérieure du tube, en [mm]

### III.3.3.2 La vitesse massique $Gt$

$$Gt' = \frac{\dot{m}_{calandre}}{As}$$

AN : 
$$Gt' = \frac{139.3}{0.52245} \Rightarrow \boxed{Gt' = 266.628 \text{ Kg/s. m}^2}$$

### III.3.3.3 Diamètre équivalent $D_{\acute{e}q}$

Pour un arrangement carré, on a donc :

$$D_{\acute{e}q} = 4 \left( \frac{P^2 - \frac{\pi d_{ext}^2}{4}}{\pi d_{ext}} \right)$$

AN : 
$$D_{\acute{e}q} = 4 \left( \frac{25.4^2 - \frac{\pi(19.05)^2}{4}}{\pi \times 19.05} \right) \Rightarrow \boxed{D_{\acute{e}q} = 24.07 \text{ mm}}$$

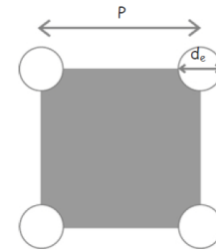


Figure III. 9 : Arrangement carré [12]

### III.3.3.2.4 Nombre de Reynolds $Re$

$$Re' = \frac{Gt' \cdot D_{\acute{e}q}}{\mu_{c,moy}}$$

Avec :  $\mu_{c,moy}$  : viscosité dynamique de MCR moyen. [Pa.s]

$$\mu_{c,moy} = \frac{\mu_{c,sortie} + \mu_{c,entree}}{2} = \frac{(0.014 + 0.02) \times 10^{-3}}{2} \Rightarrow \mu_{c,moy} = 0.017 \times 10^{-3} \text{ Pa.s}$$

$$Re' = \frac{266.628 \times 24.07 \times 10^{-3}}{0.017 \times 10^{-3}} \Rightarrow \boxed{Re' = 377513.88}$$
 On a :  $Re > 2300 \Rightarrow$  régime turbulent

### III.3.3.2.5 Calcul du critère de Prandtl $Pr$

$$Pr' = \frac{Cp_{c,moy} \times \mu_{c,moy}}{\lambda_{c,moy}}$$

$$Cp_{c,moy} = \frac{Cp_{c,entree} + Cp_{c,sortie}}{2} = \frac{2.47 + 2.565}{2} \Rightarrow Cp'_{moy} = 2.5175 \text{ Kj/Kg.}^\circ\text{C}$$

$$\lambda_{c,moy} = \frac{\lambda_{c,entree} + \lambda_{c,sortie}}{2} = \frac{0.045 + 0.032}{2} \Rightarrow \lambda'_{moy} = 0.0385 \text{ W/m.}^\circ\text{C}$$

$$Pr' = \frac{2.5175 \times 10^3 \times 0.017 \times 10^{-3}}{0.0385} \Rightarrow Pr' = 1.11$$

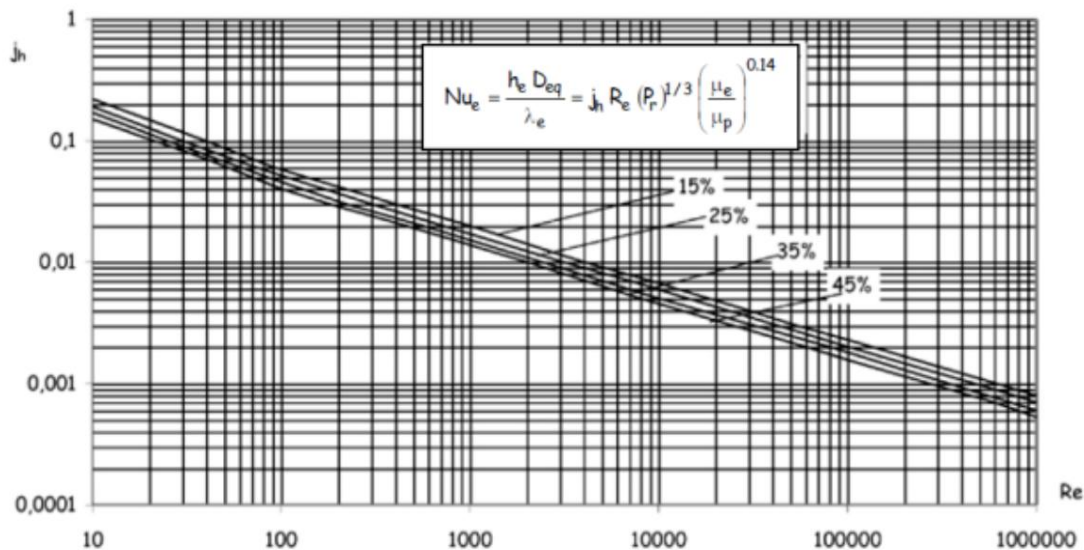
### III.3.3.2.6 Facteur de correction $\phi_c$

$$\phi_c = \left( \frac{\mu_{c,moy}}{\mu_{c,sortie}} \right)^{0.14}$$

$$\text{AN : } \phi_c = \left( \frac{0.017}{0.02} \right)^{0.14} \Rightarrow \boxed{\phi_c = 0.9775}$$

### III.3.3.2.7 Coefficient de Colburn $JH$

Côté calandre varie selon le nombre de Reynolds dans la calandre et le pourcentage de coupure des chicanes (section passante / section totale). (Il est directement lu sur la figure III.10).



**Figure III. 10 :** Coefficient de film  $JH$  coté calandre en fonction  $Re$  [12, 11]

Après la projection on trouve :

$$\boxed{JH = 0.0013}$$

### III.3.3.2.8 Coefficient du film externe $h_e$

On en déduit enfin le coefficient de film côté calandre  $h_e$  par la relation

$$\frac{h_e \times D_{\acute{e}q}}{\lambda_c} = JH' \times R_e' \times (P_r')^{\frac{1}{3}} \times \phi_c$$

$$h_e = \frac{JH' \times \lambda_{c,moy}}{D_{\acute{e}q}} \times R_e' \times (P_r')^{\frac{1}{3}} \times \phi_c$$

$$\text{AN : } h_e = \frac{0.00127 \times 0.0385}{24.07 \times 10^{-3}} \times 377513.88 \times (1.11)^{\frac{1}{3}} \times 0.9775 \Rightarrow \boxed{h_e = 770.04 \text{ W/m}^2 \cdot \text{°C}}$$

$\lambda_c$  : conductivité thermique de liquide chaud. [W/m. °C]

$Cp_c$  : Capacité calorifique de liquide chaud. [KJ/Kg. °C]

### III.3.3.3 Coefficient de transfert de chaleur global propre UP

$$Up = \frac{1}{\frac{d_e}{h_{i0} \times d_i} + \frac{d_e}{2 \times \lambda_p} \ln\left(\frac{d_e}{d_i}\right) + \frac{1}{h_e}}$$

AN :

$$Up = \frac{1}{\frac{19.05}{7418.32 \times 16.55} + \frac{19.05 \times 10^{-3}}{2 \times 28} \ln\left(\frac{19.05}{16.55}\right) + \frac{1}{770.04}}$$

$$\boxed{Up = 665.93 \text{ W/m}^2 \cdot \text{°C}}$$

### III.3.3.4 Coefficient de transfert de chaleur global encrassé $U_{encrassé}$

$$U_{encrassé} = \frac{1}{\frac{d_e}{h_{i0} \times d_i} + \frac{d_e}{2 \times \lambda_p} \ln\left(\frac{d_e}{d_i}\right) + \frac{1}{h_e} + \frac{R_1 d_e}{d_i} + R_2}$$

D'après le **Tableau III.1** :

- ✓ La valeur de facteur d'encrassement pour l'eau de mer et sa température  $t < 50^\circ\text{C}$  est- égale :  
 $R_1 = 0.0001 \text{ m}^2 \cdot \text{°C/W}$ .
- ✓ La valeur de facteur d'encrassement pour le fluide MCR (air industriel) est- égale :  
 $R_2 = 0.0004 \text{ m}^2 \cdot \text{°C/W}$ .

AN :

$$U_{encrassé} = \frac{1}{\frac{19.05}{7418.32 \times 16.55} + \frac{19.05 \times 10^{-3}}{2 \times 28} \ln\left(\frac{19.05}{16.55}\right) + \frac{1}{770.04} + \frac{10^{-4} \times 19.05}{16.55} + 4 \times 10^{-4}}$$

$$U_{encrassé} = 495.85 \text{ W/m}^2 \cdot \text{°C}$$

### III.3.4 Calcul de la surface d'échange globale S

$$S = \pi d_e L N_t$$

$$\text{AN : } S = \pi \times 0.0192 \times 7.3 \times 1592$$

$$S = 695.52 \text{ m}^2$$

### III.3.5 L'efficacité $\varepsilon$

$$\varepsilon = \frac{P_f}{P_{max}} = \frac{q_f(t_2 - t_1)}{q_{min}(T_1 - t_1)}$$

Calcul  $q_{min}$  :

$$\text{On a : } \begin{cases} q_f = \dot{m}_{tube} \cdot C_{P,tube} = 613.8 \times 3.985 \times 10^3 \\ q_c = \dot{m}_{calandre} \cdot C_{P,calandre} = 139.7 \times 2.5175 \times 10^3 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} q_f = 2.446 \text{ MW/°C} \\ q_c = 0.352 \text{ MW/°C} \end{cases}$$

$$\text{Donc : } q_{min} = 0.352 \text{ MW/°C}$$

$$\varepsilon = \frac{2.446 \times (40.4 - 26)}{0.352 \times (132.7 - 26)} \varepsilon = 0.9378 \Rightarrow \varepsilon = 93.78\%$$

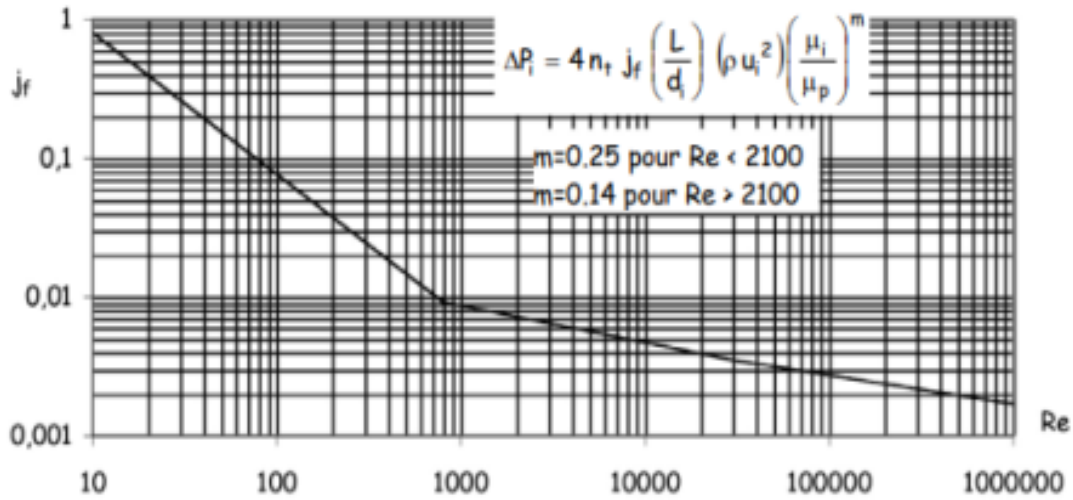
### III.3.6 Calcul des pertes de charge

#### III.3.6.1 Perte de charge à l'intérieur des tubes

La perte de charge  $\Delta P_i$  côté tubes est alors calculée par la relation, qui tient compte du nombre de passes tubes  $n_t$  :

$$\Delta P_t = 4n_t \times jf \left( \frac{L}{d_i} \right) (\rho_{f,moy} U_t^2) \phi_t$$

### III.3.6.1.1 Facteur de frottement $j_f$



**Figure III. 11** : Facteur de frottement  $j_f$  coté tube en fonction  $Re$  [12]

Par la projection on trouve la valeur de  $j_f$  :  $j_f = 0.0038$

### III.3.6.1.2 Calcul la vitesse $U$

$$U_t = \frac{\dot{m}}{\rho_{f,moy} \times A_t} = \frac{613.8}{1022 \times 0.3425}$$

$$U = 1.754 \text{ m/s}$$

Donc :

$$\Delta P_t = 4 \times 1 \times 0.0038 \times \left(\frac{7300}{16.55}\right) \times (1022 \times 1.754^2) \times 1.024$$

$$\Delta P_t = 0.22 \text{ bar}$$

On a  $\Delta P_t < \Delta P_{adm}$ , donc la valeur est vérifiée.

Avec :

$n_t$  : Nombre de pas de tube.

$L$  : Longueur de tube. [mm]

### III.3.6.2 Perte de charge à l'extérieur des tubes (côté calandre)

La perte de charge  $\Delta P_C$  côté calandre par passe calandre est alors calculée par la relation :

$$\Delta P_C = 8 \times Jf \times \left( \frac{D_i}{D_{\text{éq}}} \right) \times \left( \frac{L}{l_b} \right) \times \left( \frac{\rho_{c,moy} U_C^2}{2} \right) \times \varphi_C$$

#### III.3.6.2.1 Facteur de frottement Jf

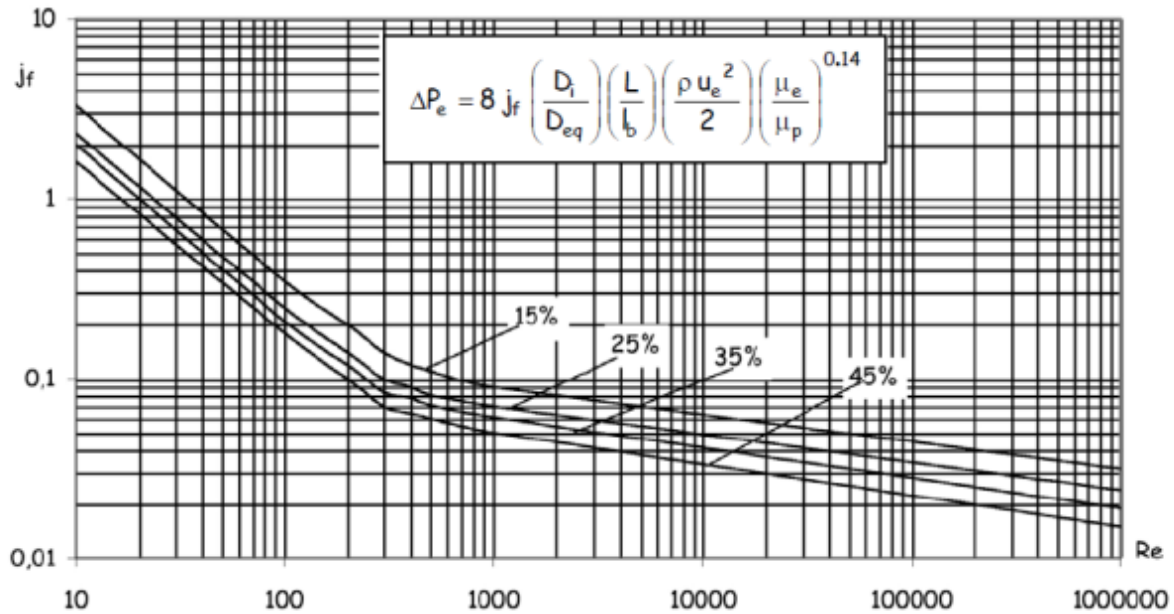


Figure III. 12 : Facteur de frottement Jf en fonction Re [12]

Par la projection on trouve la valeur de  $Jf$  :  $Jf = 0.013$

#### III.3.6.2.2 Calcul la vitesse U

$$U_C = \frac{\dot{m}}{\rho_{c,moy} \times A_s} = \frac{139.3}{50.1 \times 0.52245}$$

$$U = 5.322 \text{ m/s}$$

Donc :

$$\Delta P_C = 8 \times 0.013 \times \left( \frac{1550}{24.07} \right) \times \left( \frac{7300}{1290} \right) \times \left( \frac{50.1 \times 5.322^2}{2} \right) \times 0.973$$

$$\Delta P_C = 0.26 \text{ bar}$$

On a  $\Delta P_C < \Delta P_{adm}$ , donc la valeur est vérifiée.

## III.4 Simulation par logiciel Aspen HYSYS

### III.4.1 But de la simulation

Dans ce chapitre, nous allons vérifier les résultats du calcul thermique de notre échangeur, obtenus analytiquement dans ce chapitre. Pour ce faire, nous utiliserons le logiciel de simulation HYSYS.

### III.4.2 Définitions

La simulation est définie comme étant la représentation d'un phénomène physique à l'aide de modèles mathématiques simples permettant de décrire son comportement. Autrement dit, la simulation permet de représenter les différents phénomènes de transfert de matière et de chaleur dans les différentes opérations unitaires par modèles thermodynamiques, qui traduisent leur comportement par l'intermédiaire de la résolution des équations analytiques. [14]

### III.4.3 Introduction à HYSYS

Aspen HYSYS, développé par Aspen Tech, est un logiciel conçu pour optimiser les processus dans l'industrie pétrolière et gazière. Il permet aux utilisateurs de simuler des procédés tout en facilitant le développement, l'analyse et l'amélioration de divers processus techniques, tels que les procédés de séparation et le traitement...etc.

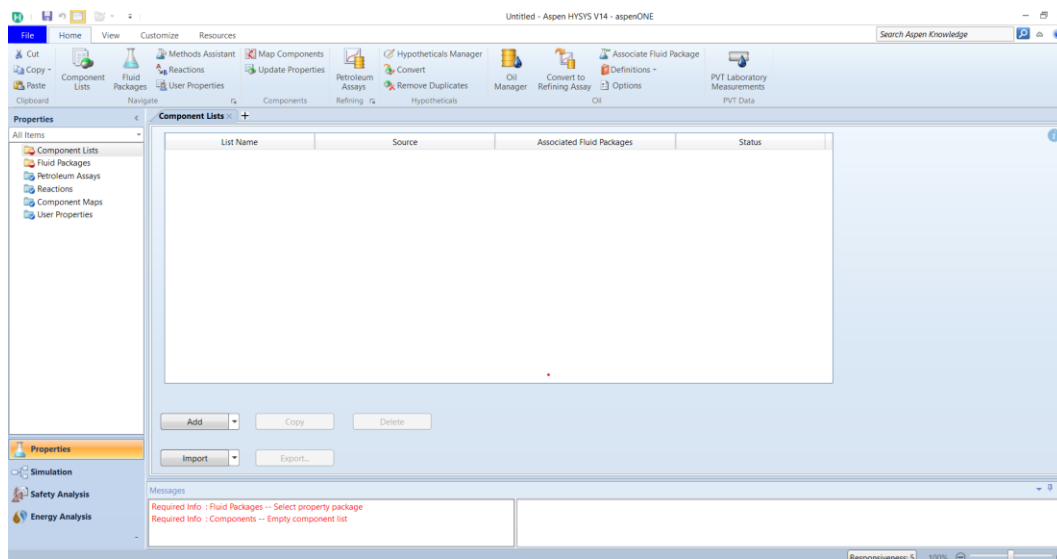


Figure III. 13 : Interface de HYSYS

### III.4.4 Utilisation de HYSYS

L'utilisation du simulateur HYSYS se fait de la façon suivante :

- **Spécification des constituants :**

Définir les composants du gaz, du liquide ou du mélange à simuler.

- **Établissement du schéma de procédé (PFD)**

Il est nécessaire de concevoir le schéma du procédé (**Process Flow Diagram**, ou **PFD**), qui représente la séquence des opérations unitaires et leurs interconnexions dans le procédé.

- **Définition des paramètres des opérations unitaires**

L'utilisateur doit fournir les paramètres nécessaires au calcul de chaque opération unitaire, tels que les températures, les pressions, les débits ou d'autres données spécifiques.

- **Résolution du schéma de procédé**

Une fois ces informations saisies, le simulateur HYSYS résout le schéma de procédé en effectuant des calculs complexes pour modéliser le comportement du système.

- **Dimensionnement des équipements**

En complément, le simulateur est capable de déterminer les dimensions ou capacités de certains équipements en fonction des résultats de la simulation.

Et pour la réalisation de celle-ci, HYSYS contient :

- Une bibliothèque de modèles de calcul des propriétés physiques et thermodynamiques des corps purs et des mélanges, couplée à une banque de données de corps purs.
- Une bibliothèque de modules standard de simulation des opérations unitaires les plus couramment présentées dans un procédé de fabrication.
- Une bibliothèque de modules de méthodes numériques algébriques.
- Une bibliothèque de modules de génération de diagnostics. [15]

### III.4.5 Simulation de l'échangeur E-512

Avant le commencement de notre simulation, on doit spécifier les constituants du fluide (MCR et l'eau de mer) dans l'échangeur.

1. On introduit depuis la bibliothèque des composants chimiques disponibles sur HYSYS les différents composants de notre charge d'entrée.

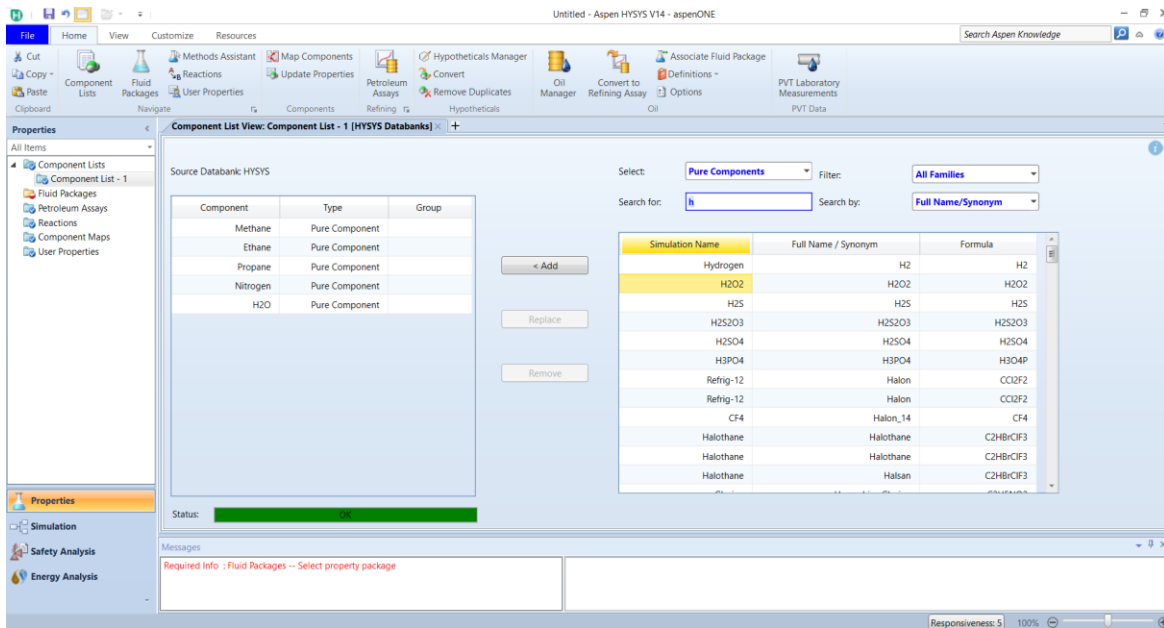


Figure III. 14 : Bibliothèque des composants chimiques

2. Après, on va spécifier l'équation d'état (fluid packages) qui détermine les propriétés du fluide qu'on utilisera après ; la plus utilisée est celle de Peng-Robinson.

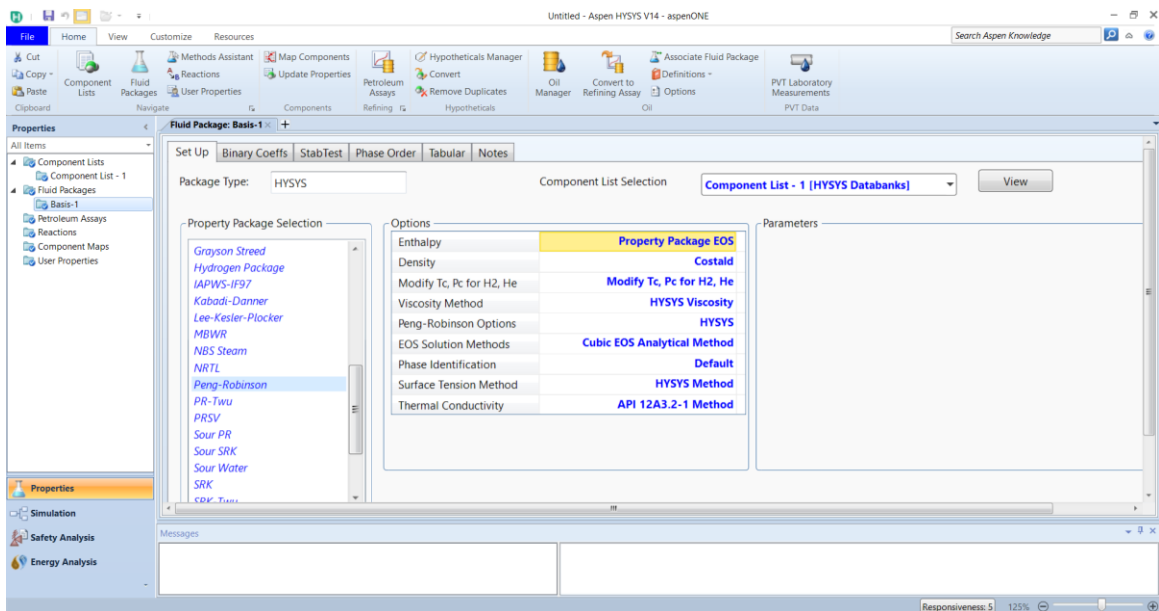


Figure III. 15: Fluid packages

3. L'étape suivante consiste à modéliser notre échangeur par HYSYS en choisissant le type de notre échangeur ainsi que les charges d'entrées et de sorties.

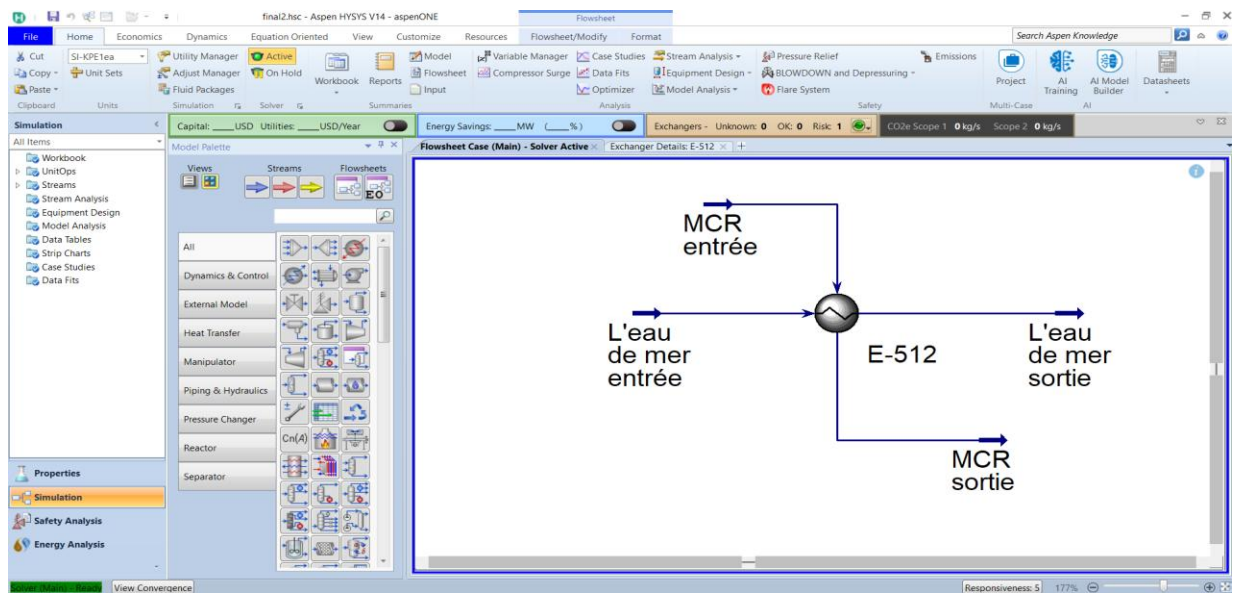


Figure III. 16 : Représentation de l'échangeur E-512 avec HYSYS

## III.4.6 Caractéristiques des fluides

### III.4.6.1 Coté tube

#### III.4.6.1.1 Conditions opératoires

Material Stream: L'eau de mer entrée

Worksheet	Attachments	Dynamics		
<b>Worksheet</b>			Stream Name	L'eau de mer entrée
				Aqueous Phase
Conditions			Vapour / Phase Fraction	0.0000
Properties			Temperature [C]	26.00
Composition			Pressure [kg/cm2]	3.470
Oil & Gas Feed			Molar Flow [kgmole/h]	1.227e+005
Petroleum Assay			Mass Flow [kg/s]	613.8
K Value			Std Ideal Liq Vol Flow [m3/s]	0.6150
User Variables			Molar Enthalpy [kJ/kgmole]	-2.861e+005
Notes			Molar Entropy [kJ/kgmole-C]	53.96
Cost Parameters			Heat Flow [W]	-9.749e+009
Normalized Yields			Liq Vol Flow @Std Cond [m3/h]	2177
Emissions			Fluid Package	Basis-1

Figure III. 17 : Conditions opératoires de l'eau de mer coté tube

### III.4.6.1.2 Compositions chimiques

On considère l'eau de mer comme l'eau pure.

	Mole Fractions	Aqueous Phase
Methane	0.0000	0.0000
Ethane	0.0000	0.0000
Propane	0.0000	0.0000
Nitrogen	0.0000	0.0000
H2O	1.0000	1.0000

Figure III. 18 : Composition chimique de l'eau de mer coté tube

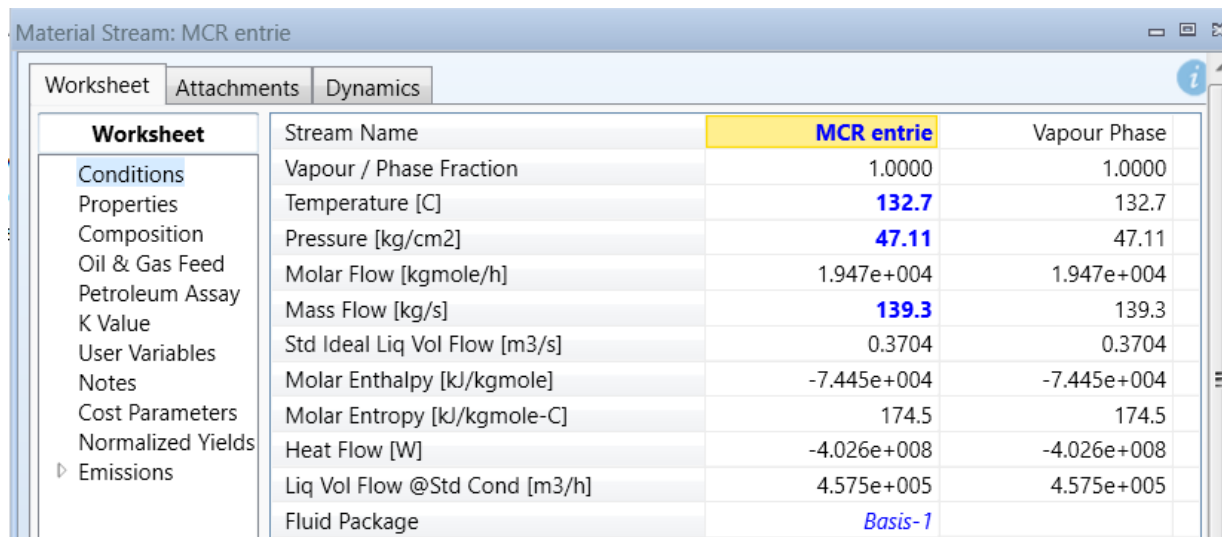
### III.4.6.1.3 Propriétés physiques

Stream Name	L'eau de mer entrie	Aqueous Phase
Act. Gas Flow [ACT_m3/h]	<empty>	<empty>
Act. Liq. Flow [m3/s]	0.6097	0.6097
Act. Volume Flow [m3/h]	2195	2195
Avg. Liq. Density [kgmole/m3]	55.40	55.40
Bubble Point Pressure [kg/cm2]	3.367e-002	<empty>
CO2 Apparent Mole Conc. [kgmole/m3]	<empty>	<empty>
CO2 Apparent Wt. Conc. [kgmol/kg]	<empty>	<empty>
CO2 Loading	<empty>	<empty>
Cost Based on Flow [Cost/s]	0.0000	0.0000
Cp/(Cp - R)	1.120	1.120
Cp/Cv	1.148	1.148
Cp/Cv (Ent. Method)	<empty>	<empty>
Cv [kJ/kgmole-C]	67.71	67.71
Cv (Ent. Method) [kJ/kgmole-C]	<empty>	<empty>
Cv (Semi-Ideal) [kJ/kgmole-C]	69.39	69.39
HHV Mass Basis (Std) [kJ/kg]	2276	2276
HHV Molar Basis (Std) [kJ/kgmole]	4.101e+004	4.101e+004
Heat Capacity [kJ/kgmole-C]	77.70	77.70
Heat of Vap. [kJ/kgmole]	3.913e+004	<empty>
Ideal Gas Cp [kJ/kgmole-C]	33.58	33.58
Ideal Gas Cp/Cv	1.329	1.329
Kinematic Viscosity [cSt]	0.8647	0.8647
LHV Mass Basis (Std) [kJ/kg]	0.0000	0.0000
LHV Molar Basis (Std) [kJ/kgmole]	0.0000	0.0000
Latent Heat [kJ/kgmole]	4.795e+004	<empty>
Liq. Mass Density (Std. Cond) [kg/m3]	1015	1015
Liq. Vol. Flow (Std. Cond) [m3/h]	2177	2177
Liq. Vol. Flow - Sum(Std. Cond) [m3/h]	2177	2177

Figure III. 19 : Propriétés physiques de l'eau de mer coté tube

### III.4.6.2 Côté calandre

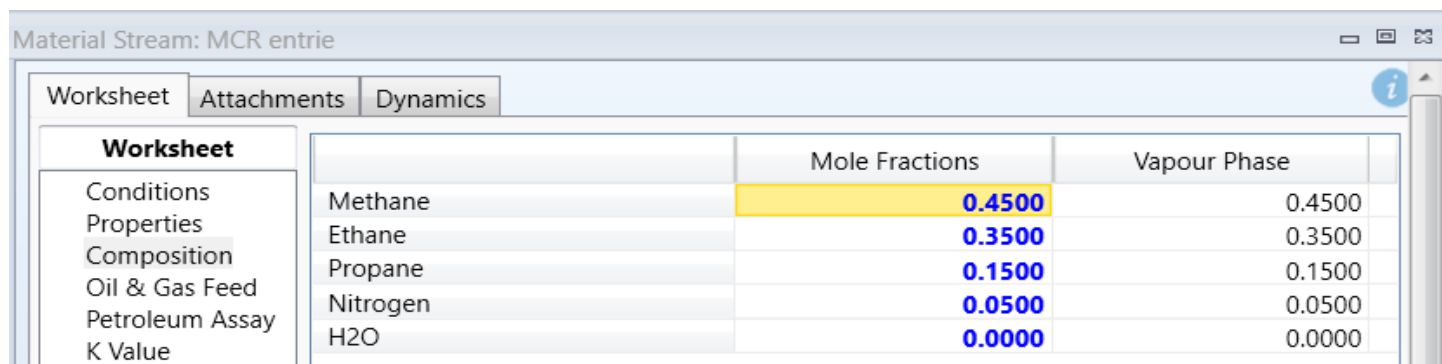
#### III.4.6.2.1 Conditions opératoires



Worksheet	Stream Name	MCR entrie	Vapour Phase
Conditions	Vapour / Phase Fraction	1.0000	1.0000
Properties	Temperature [C]	132.7	132.7
Composition	Pressure [kg/cm2]	47.11	47.11
Oil & Gas Feed	Molar Flow [kgmole/h]	1.947e+004	1.947e+004
Petroleum Assay	Mass Flow [kg/s]	139.3	139.3
K Value	Std Ideal Liq Vol Flow [m3/s]	0.3704	0.3704
User Variables	Molar Enthalpy [kJ/kgmole]	-7.445e+004	-7.445e+004
Notes	Molar Entropy [kJ/kgmole-C]	174.5	174.5
Cost Parameters	Heat Flow [W]	-4.026e+008	-4.026e+008
Normalized Yields	Liq Vol Flow @Std Cond [m3/h]	4.575e+005	4.575e+005
Emissions	Fluid Package	Basis-1	

Figure III. 20 : Conditions opératoires du MCR côté calandre

#### III.4.6.2.2 Compositions chimiques



Worksheet	Mole Fractions	Vapour Phase
Conditions	Methane	0.4500
Properties	Ethane	0.3500
Composition	Propane	0.1500
Oil & Gas Feed	Nitrogen	0.0500
Petroleum Assay	H2O	0.0000
K Value		

Figure III. 21 : Composition chimique du MCR côté calandre

### III.4.6.2.3 Propriétés physiques

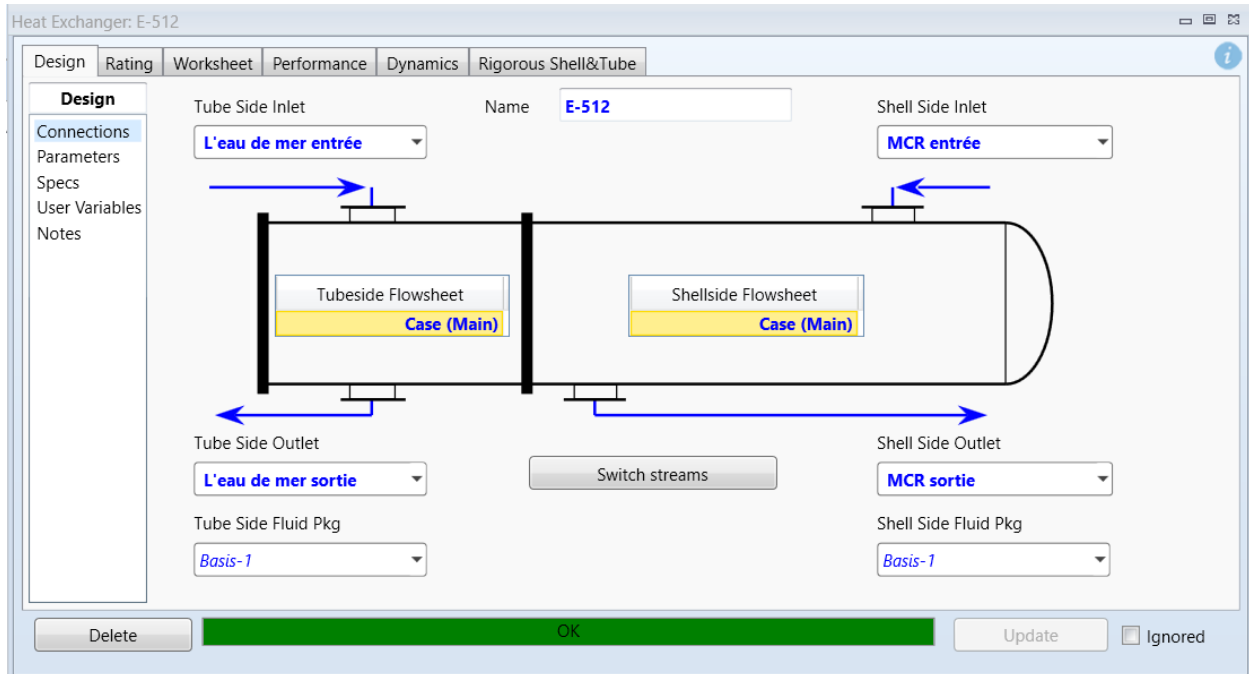
Material Stream: MCR entrée

Worksheet	Attachments	Dynamics	
<b>Worksheet</b>	Stream Name	<b>MCR entrée</b>	Vapour Phase
Conditions	Molecular Weight	25.76	25.76
Properties	Molar Density [kgmole/m3]	1.495	1.495
Composition	Mass Density [kg/m3]	38.51	38.51
Oil & Gas Feed	Act. Volume Flow [m3/h]	1.302e+004	1.302e+004
Petroleum Assay	Mass Enthalpy [kJ/kg]	-2890	-2890
K Value	Mass Entropy [kJ/kg-C]	6.776	6.776
User Variables	Heat Capacity [kJ/kgmole-C]	62.58	62.58
Notes	Mass Heat Capacity [kJ/kg-C]	2.430	2.430
Cost Parameters	LHV Molar Basis (Std) [kJ/kgmole]	1.168e+006	1.168e+006
Normalized Yields	HHV Molar Basis (Std) [kJ/kgmole]	1.273e+006	1.273e+006
▾ Emissions	HHV Mass Basis (Std) [kJ/kg]	4.940e+004	4.940e+004
	CO2 Loading	<empty>	<empty>
	CO2 Apparent Mole Conc. [kgmole/m3]	<empty>	<empty>
	CO2 Apparent Wt. Conc. [kgmol/kg]	<empty>	<empty>
	LHV Mass Basis (Std) [kJ/kg]	4.534e+004	4.534e+004
	Phase Fraction [Vol. Basis]	1.000	1.000
	Phase Fraction [Mass Basis]	1.000	1.000
	Phase Fraction [Act. Vol. Basis]	1.000	1.000
	Mass Exergy [kJ/kg]	380.8	<empty>
	Partial Pressure of CO2 [kg/cm2]	0.0000	<empty>
	Cost Based on Flow [Cost/s]	0.0000	0.0000
	Act. Gas Flow [ACT_m3/h]	1.302e+004	1.302e+004
	Avg. Liq. Density [kgmole/m3]	14.60	14.60
	Specific Heat [kJ/kgmole-C]	62.58	62.58
	Std. Gas Flow [STD_m3/h]	4.603e+005	4.603e+005
	Std. Ideal Liq. Mass Density [kg/m3]	376.1	376.1
	Act. Liq. Flow [m3/s]	<empty>	<empty>
	Z Factor	0.9158	0.9158

Figure III. 22 : Propriétés physiques du MCR coté calandre

### III.4.7 Caractéristiques de l'échangeur E-512

Dans cette étape, on introduit les données de notre échangeur données par le constructeur sur la datasheet de notre appareil.



**Figure III. 23 :** Schéma des connections d'entrée et de sortie des charges

### III.4.7.1 Données du dimensionnement de l'échangeur E-512

On spécifie d'abord le nombre de passes de chaque côté, la direction du courant fluide, ainsi que l'orientation de l'échangeur et sa norme d'après TEMA :

Configuration		Size	
TEMA Type	A - E - L -	AEL	
Tube layout option	New (optimum) layout	New (optimum) layout	
Location of hot fluid	Shell side	Shell side	
Tube OD / Pitch	mm 19.05 / 25.4	19.05 / 25.4	
Tube pattern	90-Square	90	
Tubes are in baffle window	Yes	Yes	
Baffle type	Single segmental	Single segmental	
Baffle cut orientation	Horizontal	H	
Default exchanger material	Carbon Steel 1	Carbon Steel	
Specify some sizes for Design	Yes		
Shell ID / OD	mm 1550 / 1620	1550 / 1620	
Tube length	mm 7300	7300	
Baffle spacing center-center (Bc)	mm 1290	1290	
Number of baffles	4	4	
Number of tubes / Tube passes	1592 / 1	1592 / 1	
Shells in series	1	1	
Shells in parallel	1	1	

**Figure III. 24 :** Dimensionnement de l'échangeur E-512

Heat Exchanger: E-512

Design Rating Worksheet Performance Dynamics Rigorous Shell&Tube

**Rating**

Sizing

Parameters

Nozzles

Heat Loss

Sizing Data

Overall  Shell  Tube

Configuration

Number of Shell Passes	1
Number of Shells in Series	1
Number of Shells in Parallel	1
Tube Passes per Shell	1
Exchanger Orientation	Horizontal
First Tube Pass Flow Direction	Counter
Elevation (Base)	0.0000

TEMA Type  A  E  L

**Figure III. 25 :** Données caractéristiques de l'échangeur E-512

#### III.4.7.1.1 Dimensions de la calandre

On introduit sur HYSYS les dimensions de la calandre données par le constructeur :

Heat Exchanger: E-512

Design Rating Worksheet Performance Dynamics Rigorous Shell&Tube

**Rating**

Sizing

Parameters

Nozzles

Heat Loss

Sizing Data

Overall  Shell  Tube

Shell and Tube Bundle Data

Shell Diameter [mm]	1620.00
Number of Tubes per Shell	1592
Tube Pitch [mm]	25.40
Tube Layout Angle	Square (90 degrees)
Shell Fouling [C-m <sup>2</sup> /W]	0.000000

Shell Baffles

Shell Baffle Type	Single
Shell Baffle Orientation	Horizontal
Baffle Cut (%Height) [%]	25.00
Baffle Spacing [mm]	1290.00

**Figure III. 26 :** Dimensions de la calandre

### III.4.7.1.2 Dimensions des tubes

On introduit les dimensions des tubes données par le constructeur :

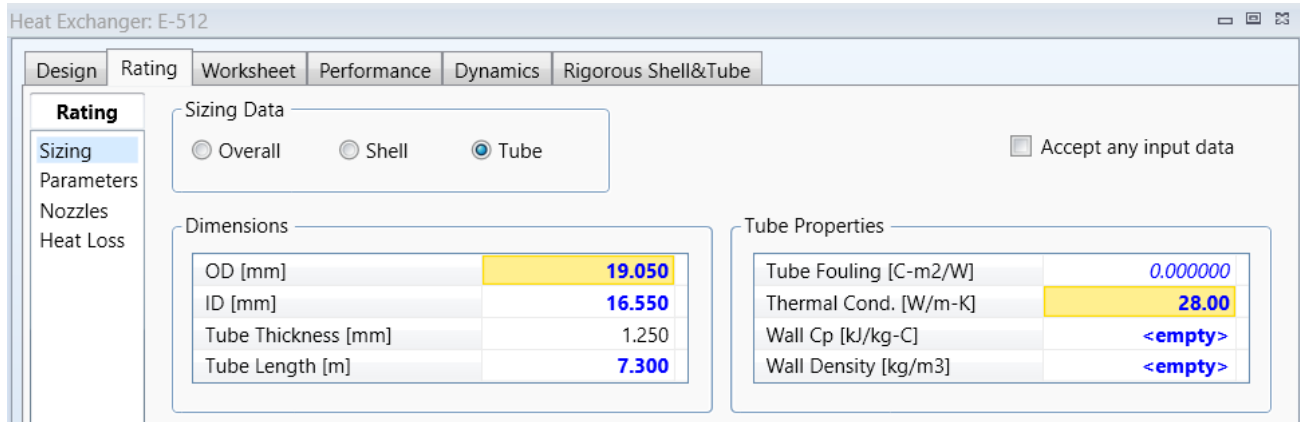


Figure III. 27 : Dimensions des tubes

### III.4.8 Résultats de la simulation

Après la mise en œuvre de la simulation, le logiciel HYSYS a abouti aux résultats suivants :

Overall Performance		Resistance Distribution		Shell by Shell Conditions		Hot Stream Composition		Cold Stream Composition			
<b>Simulation</b>		<b>Shell Side</b>				<b>Tube Side</b>					
Total mass flow rate	kg/h	501480				2209680					
Vapor mass flow rate (In/Out)	kg/h	501480		501480		0		0			
Liquid mass flow rate	kg/h	0		0		2209680		2209680			
Vapor mass fraction		1		1		0		0			
Temperatures	°C	132.7		32.18		26		38.66			
Bubble / Dew point	°C	-63.38 / 13.97		-63.76 / 13.84		137.85 / 137.85		132.99 / 132.99			
Operating Pressures	kPa	4619.914		4593.532		340.291		295.693			
Film coefficient	W/(m <sup>2</sup> -K)	2958.1				7914.2					
Fouling resistance	m <sup>2</sup> -K/W	0				0.00014					
Velocity (highest)	m/s	8.71				2.52					
Pressure drop (allow./calc.)	kPa	24.517	/	26.382		35.304	/	44.598			
Total heat exchanged	kW	33508.2				Unit	AEL	1 pass	1 ser	1 par	
Overall clean coeff. (plain/finned)	W/(m <sup>2</sup> -K)	1961.3	/	656.7		Shell size	1550	-	7300	mm	
Overall dirty coeff. (plain/finned)	W/(m <sup>2</sup> -K)	1547.9	/	518.3		Tubes	Lowfin tube				
Effective area (plain/finned)	m <sup>2</sup>	675.8	/	2018.2		Insert	None				
Effective MTD	°C	32.03				No.	1592	OD	19.05	Tks	1.25
Actual/Required area ratio (dirty/clean)		1	/	1.27		Pattern	90	Pitch	25.4	mm	
Vibration problem (HTFS)		Yes				Baffles	Single segmental		Cut(%d)	24.6	
TEMA RhoV2 limit exceeded		Yes				Total cost	613443 Dollar(US)				

Heat Transfer Resistance	
Shell side / Fouling / Wall / Fouling / Tube side	
Shell Side	
	Tube Side

Figure III. 28 : Résultats du calcul thermique par HYSYS

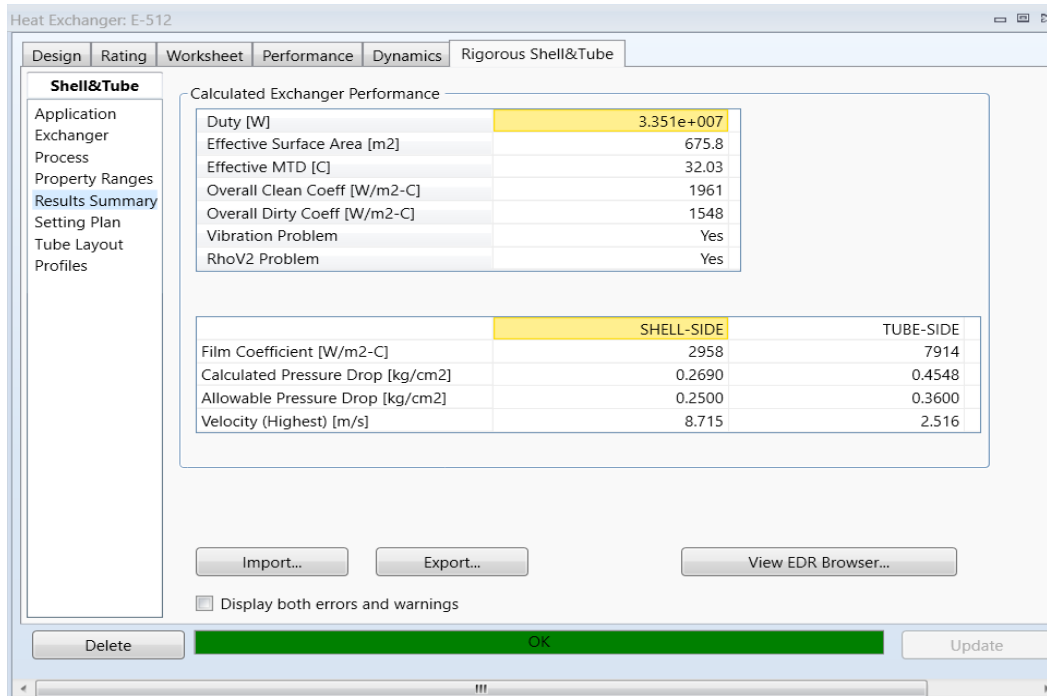


Figure III. 29 : Résultats du calcul thermique par HYSYS

Heat Exchanger: E-512

Design Rating Worksheet Performance Dynamics Rigorous Shell&Tube

Worksheet

Name	L'eau de mer entr	L'eau de mer sorti	MCR entrée	MCR sortie
Vapour	0.0000	0.0000	1.0000	1.0000
Temperature [C]	26.00	38.67	132.7	32.18
Pressure [kg/cm2]	3.470	3.015	47.11	46.84
Molar Flow [kgmole/h]	1.227e+005	1.227e+005	1.947e+004	1.947e+004
Mass Flow [kg/s]	613.8	613.8	139.3	139.3
Std Ideal Liq Vol Flow [m3/s]	0.6150	0.6150	0.3704	0.3704
Molar Enthalpy [kJ/kgmole]	-2.861e+005	-2.852e+005	-7.445e+004	-8.064e+004
Molar Entropy [kJ/kgmole-C]	53.96	57.18	174.5	157.0
Heat Flow [W]	-9.749e+009	-9.716e+009	-4.026e+008	-4.361e+008

Figure III. 30 : Conditions opératoires à l'entrée et à la sortie de la charge

### III.4.9 Comparaison entre les résultats obtenus

Le tableau III.6 suivant résume les résultats du calcul thermique obtenus analytiquement, par simulation à l'aide de HYSYS et par le constructeur :

**Tableau III. 6 : Les résultats du calcul thermique**

		Calcul analytique (Méthode de Kern)		Calcul par HYSYS		Calcul par le constructeur	
		Coté tube	Coté calandre	Coté tube	Coté calandre	Coté tube	Coté calandre
Température d'entrée	[°C]	26	132.7	26	132.7	26	132.7
Température de sortie	[°C]	40.4	32.2	38.66	32.18	40.4	32.2
$\Delta TLM$	[°C]	31.88		32.03		30.8	
Pression d'entrée	[bar a]	3.403	46.199	3.403	46.199	3.403	46.199
Pression de sortie	[bar a]	/	/	2.957	45.933	/	/
Perte charge	[bar]	0.22	0.26	0.446	0.264	0.36	0.25
Coefficient de transfert de chaleur global encrassé ( $U_{encrassé}$ )	[W/m <sup>2</sup> . °C]	499.58		518.3		520	
Coefficient de transfert propre ( $U_p$ )	[W/m <sup>2</sup> . °C]	665.94		656.7		665.3	
Puissance thermique	[MW]	35.18		33.51		35.2	

# **Chapitre IV**

## **Calcul mécanique**

## IV.1 Introduction

Le présent travail porte sur le calcul mécanique de l'échangeur de chaleur E-512, un échangeur à faisceau tubulaire et calandre à plaques tubulaires fixes. Ce calcul a pour objectif principal la vérification de la résistance de l'appareil face aux différentes sollicitations mécaniques, incluant les pressions internes, les charges thermiques ainsi que les efforts dus au poids propre.

## IV.2 Données de départ

Tableau IV. 1 : Les données de procès [10]

Caractéristique	Côté calandre	Côté tube
Nature de fluide	MCR	EAU DE MER
Pression de service d'entrée [bar]	47.11	3.47
Pression de calcul d'entrée [bar]	50.7	5.3
Température service d'entrée $T_e$ [C°]	132.7	26
Température service de sortie $T_s$ [C°]	32.2	40.4
Température de calcul $T_c$ [C°]	155(max) /-29(min)	66
Surépaisseur de corrosion [mm]	3	0
Longueur [mm]	10052	7300
Diamètre [mm]	1620	19.05
Nombre de passe	1	1

### IV.2.1 Détermination des pressions de calcul

La pression de calcul est la valeur la plus grande des deux valeurs calculées d'après la formule suivante : [16]

$$P = \max (P_s + 1; P_s + 10\%P_s)$$

- La pression de calcul côté calandre

$$P_C = \max \left\{ \begin{array}{l} P_s + 1 = 48,11 \text{ bar} \\ P_s + 10\%P_s = 47,11 + 10\% 47,11 = 51,821 \text{ bar} \end{array} \right.$$

$$P_C = 51,821 \text{ bar}$$

- La pression de calcul côté tube

$$P_t = \max \left\{ \begin{array}{l} P_s + 1 = 4,40 \text{ bar} \\ P_s + 10\%P_s = 3,40 + 10\% 3,40 = 3,817 \text{ bar} \end{array} \right.$$

$$P_t = 4,40 \text{ bar}$$

## IV.2.2 Détermination des températures de calcul

La température de calcul se détermine comme suit :

$$t_c = t_s + 15 \text{ pour } t_s \geq 0$$

$$t_c = t_s - 10 \text{ pour } t_s \leq 0$$

- La température de calcul côté calandre

$$t_{c,Ce} = t_{s,entr\acute{e}e} + 15 = 132,7 + 15 = 147,7 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$t_{c,Cs} = t_{s,sortie} + 15 = 32,2 + 15 = 47,2 \text{ } ^\circ\text{C}$$

- La température de calcul côté tube

$$t_{cte} = t_{s,entr\acute{e}e} + 15 = 26 + 15 = 41 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$t_{cts} = t_{s,sortie} + 15 = 40,4 + 15 = 55,4 \text{ } ^\circ\text{C}$$

## IV.3 Caractéristiques mécaniques des éléments d'échangeur de chaleur d'après les normes ASME

**Tableau IV. 2** : Caractéristiques mécaniques des éléments [17, 18, 19]

Les éléments	Matériaux	$\sigma_r$ (MPa)	$\sigma_e$ (MPa)
Tubes	70/30 Cu Ni – SB 111 UNS C71500	360	125
Calandre	SA-516 Gr.70	485	260
Plaque tubulaire	SA-266 Gr.4	570	290

$\sigma_r$  : Limite de résistance à la rupture.

$\sigma_e$  : Limite d'élasticité.

### IV.3.1 Calcul des résistances pratiques à la traction

$$[\sigma] = \min\left(\frac{\sigma_e^t}{\eta_e}, \frac{\sigma_r}{\eta_r}\right)$$

- $\sigma_r$  : résistance à la rupture.
- $\sigma_e^t$  : la limite d'élasticité à la t° de calcul.
- $\eta_r, \eta_e$  : coefficients de sécurité d'après les normes françaises,  $\eta_r = 3, \eta_e = 1,5$ . [16]
- **Pour les tubes 70/30 Cu Ni – SB 111 UNS C71500**

Les propriétés mécaniques sont :

$$\sigma_r = 360 \text{ MPa}$$

$$\sigma_e^{20} = 125 \text{ MPa}$$

Avec  $\sigma_e^t = k \cdot \sigma_e^{20}$  (pour le SB 111 UNS C71500 :  $k = 0.91$ ) [20]

$$\sigma_e^t = 0.91 \times 125 = 113.75 \text{ MPa}$$

$$[\sigma] = \min\left(\frac{113.75}{1.5}, \frac{360}{3}\right) = \min(75.83, 120), \text{ donc : } \boxed{[\sigma] = 75.83 \text{ MPa}}$$

- **Pour la calandre SA-516 Gr.70**

Les propriétés mécaniques sont :

$$\sigma_r = 485 \text{ Mpa}$$

$$\sigma_e^{20} = 260 \text{ Mpa}$$

Avec  $\sigma_e^t = k \cdot \sigma_e^{20}$  (pour le SA-516 Gr.70  $k = 0,89$ ) [20]

$$\sigma_e^t = 0.89 \times 260 = 231.4 \text{ MPa}$$

$$[\sigma] = \min\left(\frac{231.4}{1.5}, \frac{485}{3}\right) = \min(154.27, 161.67), \text{ donc : } \boxed{[\sigma] = 154.27 \text{ MPa}}$$

- **Pour la plaque tubulaire SA-266 Gr.4**

Les propriétés mécaniques sont :

$$\sigma_r = 570 \text{ MPa}$$

$$\sigma_e^{20} = 290 \text{ MPa}$$

Avec  $\sigma_e^t = k \cdot \sigma_e^{20}$  (pour le SA-266 Gr.4  $k = 0.89$ )

$$\sigma_e^t = 0.89 \times 290 = 258.1 \text{ MPa}$$

$$[\sigma] = \min\left(\frac{258.1}{1.5}, \frac{570}{3}\right) = \min(172.07, 190), \text{ donc : } \boxed{[\sigma] = 172.07 \text{ MPa}}$$

## IV.3.2 Calcul des Epaisseurs

### IV.3.2.1 Calcul de l'épaisseur des tubes

$$e_t = \frac{P_{ct} \cdot d_e}{2 [\sigma] \varphi + P_{tc}} + C \quad [mm]$$

$[\sigma]$ : Contrainte admissible à la traction de **SB 111 UNS C71500**  $[\sigma] = 75.83 \text{ MPa}$ .

$\varphi$ : Coefficient de soudage  $\varphi = 1$ .

$d_e$ : Diamètre extérieure des tubes  $d_e = 19.05 \text{ mm}$

$C$  : Addition supplémentaire des épaisseurs.  $C = 0 \text{ mm}$

$P_t$  : pression de calcul coté tube  $P_{c,t} = 4.40 \text{ bar} = 0.44 \text{ MPa}$

$$e_t = \frac{0.44 \times 19.05}{2 \times 75.83 \times 1 + 0.44} \Rightarrow \boxed{e_t = 0,06 \text{ mm}}$$

### IV.3.2.2 Calcul de l'épaisseur de la calandre

$$e_t = \frac{P_{ct} \cdot D_e}{2 [\sigma] \varphi + P_{tc}} + C [mm]$$

$[\sigma]$  : Contrainte admissible à la traction de **SA-516 Gr.70**  $[\sigma] = 154.27 \text{ MPa}$ .

$\varphi$ : Coefficient de soudage  $\varphi = 0.85$ .

$D_e$ : Diamètre extérieure de calander  $D_e = 1620 \text{ mm}$ .

$C$ : Addition supplémentaire des épaisseurs.  $C = 3 \text{ mm}$

$P_C$  : pression de calcul coté calander  $P_C = 51.821 \text{ bar} = 5.1821 \text{ MPa}$ .

$$e_c = \frac{5.1821 \times 1620}{2 \times 154.27 \times 0.85 + 5.1821} + 3 \Rightarrow \boxed{e_c = 34.39 \text{ mm}}$$

### IV.3.2.3 Calcul l'épaisseur de la plaque tubulaire

La plaque tubulaire est un couvercle circulaire plat sollicité à la flexion. La pression de calcul utilisée est la plus grande parmi  $P_c$  et  $P_t$ , et la formule utilisée pour calculer l'épaisseur est [16]:

$$e = D_i \sqrt{\frac{K \cdot P}{[\sigma]_f}} + C \text{ [mm]}$$

D'où ;

$D_i$ : diamètre intérieur de calandre  $D_i = 1550 \text{ mm}$ .

$P$ : la pression la plus grande parmi  $P_c$  et  $P_t$ .

Donc  $P = P_c = 5.1821 \text{ MPa}$ .

$[\sigma]_f$ : la résistance pratique à la flexion du matériau de la plaque. Tel que

$$[\sigma]_f = 1.2 \times [\sigma]^t = 1.2 \times 172.07 = 206.484 \text{ MPa} .$$

$C$  : addition supplémentaire  $C = 3 \text{ mm}$

$K$  : coefficient de pinçage qui dépend du mode de fixation de la périphérie de la plaque.

D'après la résistance périphérique d'une plaque serrée entre deux brides, on a :  $k = 0,19$ .  
D'après sa résistance au centre,  $k = 0,122$ . Il faudra comparer les deux cas et prendre la plus grande valeur.

La plaque tubulaire étant fixée,  $k = 0,19$ .

Alors on a :

$$e_{p,1} = 1550 \sqrt{\frac{0.19 \times 5.1821}{206.484}} + 3 \Rightarrow \boxed{e_{p,1} = 110.03 \text{ mm}}$$

$$e_{p,2} = 1550 \sqrt{\frac{0.122 \times 5.1821}{206.484}} + 3 \Rightarrow \boxed{e_{p,2} = 88.77 \text{ mm}}$$

Donc on prend le premier  $e_{p,1}$ .

### IV.3.3 Tableau récapitulatif

**Tableau IV. 3 :** Comparaison entre les paramètres actuels et de design de l'échangeur E-512

Les épaisseurs	Calculées (mm)	Données par le constructeur (mm)
Les tubes	0.05	1.25
La Calandre	34.39	38.5
La plaque tubulaire	110.03	114

### IV.4 Vérification de la résistance de dudgeonnage

Dans le cadre de cette étude, la charge appliquée à chaque tube peut être estimée en supposant une répartition uniforme de la charge, conformément à la formule suivante :

$$q = P_c \frac{\pi \cdot d_{ext}^2}{4} \quad [daN]$$

Où,  $P_c$  : est la pression de calcul cotés calandre ( $daN/mm^2$ )

$d_{ext}$  : Diamètre extérieur du tube ( $mm$ )

D'après la première méthode de calcul, la charge admissible  $[q]$ , que la jonction tube

$$[q] = h \times d' \times [f] \quad [daN]$$

$d'$  : est le diamètre de logement, en  $[mm]$

Ou,  $h$  : est la profondeur du dudgeonnage en  $[mm]$

$[f]$  : est la charge spécifique admissible pour l'unité de longueur de la circonférence du logement en  $[daN/mm^2]$

Remplaçons  $d'$  par  $d_{ext}$  s on aura :

$$[q] = h \times d_{ext} \times [f] \quad [daN]$$

Evidemment, la condition de résistance est :  $q < [q]$

On a aussi la charge admissible opposée par dudgeonnage à l'extérieur du tube est :

$$[q] = h \times d_{ext} \times [f]' \quad [daN]$$

$[f]'$  : est la charge spécifique admissible, déterminée selon la fiche technique du fabricant, agissant par  $1\text{mm}^2$  de surface de contact entre le tube et le logement.

$[f]'$  (1.5; 4) $\text{daN/mm}^2$ , dans notre cas on prend  $[f]' = 2 \text{ daN/mm}^2$ .

$$P_c \frac{\pi \cdot d_{ext}^2}{4} < h \times d_{ext} \times [f]'$$

D'où tirons la formule de calcul de dudgeonnage des échangeurs

$$P_c \frac{\pi \cdot d_{ext}}{4} < h \times [f]' \text{ daN/mm}^2$$

La condition de résistance du dudgeonnage est :  $q < [q]$

$$P_c \frac{\pi \cdot d_{ext}^2}{4} < h \times d_{ext} [f]' \Rightarrow h \geq \frac{\pi \cdot d_{ext} \cdot P_c}{4 [f]'} [\text{mm}]$$

$$h = \frac{\pi \times 0.51821 \times 19,05}{4 \times 2} = 3.88 \text{ mm}$$

$h = 3,88 < 114 \text{ mm}$
-----------------------------

Donc la valeur est acceptable.

## IV.5 Simulation par éléments finis

La méthode des éléments finis L'EMF ou FEM (Finite Element Method) est une méthode numérique permettant de résoudre des problématiques physiques pour lesquelles une solution analytique pourrait n'être pas disponible. Elle propose une solution approximative par rapport à la solution exacte dans un domaine spatial. Elle offre la possibilité de déterminer un champ (qu'il s'agisse de scalaires, de vecteurs ou de tenseurs - par exemple : champ de déplacement) qui répond à des équations spécifiques et à certaines conditions imposées.

Le milieu étudié ou le domaine spatial est divisé en plusieurs petits composants également désignés comme mailles, qui sont interconnectés par des nœuds. L'élément est défini par un nombre limité de nœuds situés sur sa périphérie. Dans le contexte de cette formation, l'application de la méthode des éléments finis pour résoudre un problème implique d'identifier les déplacements (translations et rotations) de ces nœuds. L'interpolation entre les valeurs calculées aux nœuds détermine le champ de déplacement à chaque point. [21]

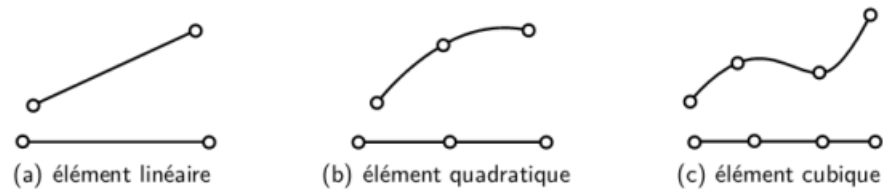
## IV.6 Types d'éléments de maillage

La méthode des éléments finis repose sur un concept simple : elle consiste à décomposer une forme, qu'elle soit simple ou complexe, en un grand nombre de sous-domaines élémentaires dotés de formes géométriques simples (les éléments finis), reliés entre eux par des nœuds. On se réfère à cela comme étant le maillage. Dans cette phase, divers types d'éléments sont employés en fonction de l'application, des capacités de calcul disponibles et du niveau de qualité souhaité pour les résultats. Ces éléments sont organisés selon l'espace d'interpolation (1D, 2D ou 3D) et le niveau d'interpolation associé au nombre de nœuds dans l'élément (linéaire, quadratique ou cubique). [21]

### IV.6.1 Les éléments unidimensionnels (1D)

Les éléments 1D sont utilisés pour modéliser des structures linéaires, comme les barres ou les poutres. Ils se déclinent en :

- Linéaires :  $L_2$  à deux nœuds.
- Quadratiques :  $L_3$  à trois nœuds.
- Cubiques :  $L_4$  à quatre nœuds.



**Figure IV. 1** Types d'éléments unidimensionnels [21]

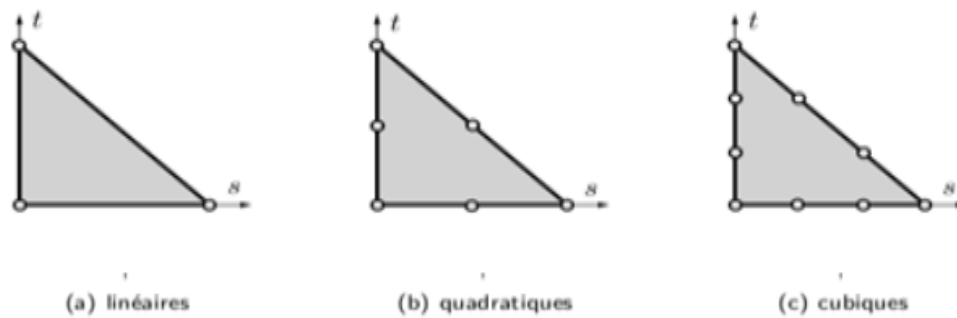
## IV.6.2 Les éléments bidimensionnels (surfactive-2D)

Les éléments 2D sont employés pour modéliser des structures planes ou axisymétriques.

Ils incluent :

### IV.6.2.1 Éléments triangulaires

- $T_3$  : Linéaire, 3 nœuds.
- $T_6$  : Quadratique, 6 nœuds.
- $T_9$  : Cubique, 9 nœuds.



**Figure IV. 2** : Éléments triangulaires [21]

### IV.6.2.2 Éléments quadrangulaires

- $Q_4$  : Linéaire, 3 nœuds.
- $Q_8$  : Quadratique, 6 nœuds.
- $Q_{12}$  : Cubique, 9 nœuds.

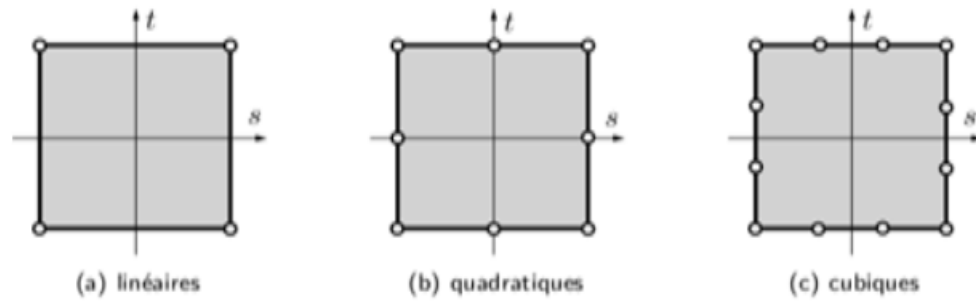


Figure IV. 3 : Éléments quadrangulaires [21]

### IV.6.3 Les éléments tridimensionnels (volumiques-3D)

Les éléments 3D permettent de modéliser des structures volumiques complexes. Ils comprennent : [21]

#### IV.6.3.1 Linéaires

- Tétraédrique  $TE_4$  : 4 nœuds.
- Prismatique  $P_6$  : 6 nœuds.
- Hexaédrique  $H_8$  : 8 nœuds.

#### IV.6.3.2 Quadratiques

- Tétraédrique  $TE_{10}$  : 10 nœuds.
- Prismatique  $P_{15}$  : 15 nœuds.
- Hexaédrique  $H_{20}$  : 20 nœuds.

#### IV.6.3.3 Cubiques

- Tétraédrique  $TE_{16}$  : 16 nœuds.
- Prismatique  $P_{24}$  : 24 nœuds.
- Hexaédrique  $H_{32}$  : 32 nœuds.

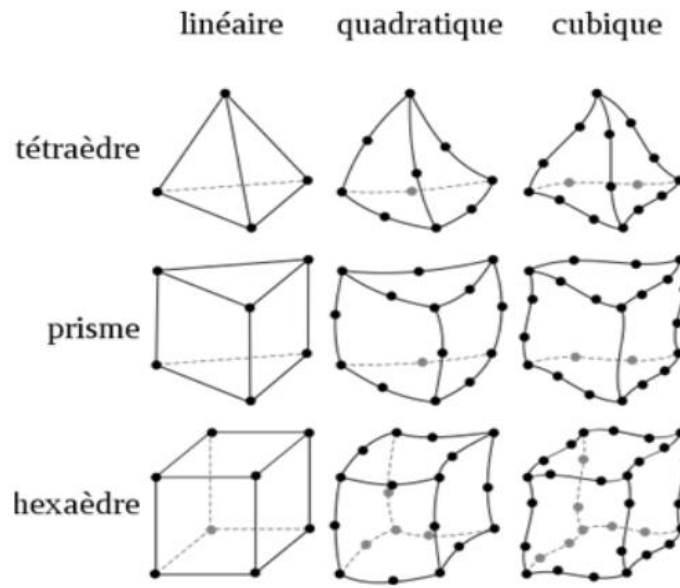


Figure IV. 4 : Types d'éléments tridimensionnels [21]

## IV.7 Types d'éléments finis utilisés

Les éléments finis bidimensionnels employés dans cette étude sont :

- Éléments triangulaires :
  - T3 : Éléments linéaires à 3 nœuds (premier ordre).
  - T6 : Éléments quadratiques à 6 nœuds (second ordre).
- Éléments quadrangulaires :
  - Q4 : Éléments linéaires à 4 nœuds (premier ordre).
  - Q8 : Éléments quadratiques à 8 nœuds (second ordre). [21]

## IV.8 Données géométriques et mécaniques

Tableau IV. 4 : Données géométriques et mécaniques [10]

Donnée		
Géométriques	Mécaniques	Thermique
Tube en 70/30 Cu Ni – SB 111 UNS C71500	Module de Young = 140 GP	Conductivité thermique =28 W/m°C
Diamètre externe = 19.05 mm	Limite élastique = 390 MPa	Capacité thermique Cp= 400 J/(kg·K) à 20°C.
Diamètre interne = 16.55 mm	Contrainte Ultime (résistance à la traction) = 560 MPa	Masse volumique =8.94 g/cm <sup>3</sup>
Epaisseur du tube = 1.25 mm	Pression de service interne = 3.47 Kg/cm <sup>2</sup> = 0.34029 MPa.	/
/	Pression de service Externe = 47.11 Kg/cm <sup>2</sup> = 4.619 MPa	/
/	Coefficient de poisson=0.33	Coefficient de dilatation=16 × 10 <sup>-6</sup> K <sup>-1</sup>

## IV.9 Idéalisation du problème étudié

Pour la modélisation et le calcul, on a utilisé le logiciel RDM 7. L'idéalisation du tube a été effectuée de manière à représenter au mieux le détail de sa construction, de points de vue géométrique et mécanique. On a identifié le problème à étudier comme étant celui d'un état plan de déformation. Le problème étant symétrique, la discrétisation n'a donc été effectuée que sur un quart du tube par des éléments finis triangulaires T3, T6 et quadrangulaires Q4 et Q8.

## IV.10 Résultats

### IV.10.1 Maillage avec des éléments triangulaires

#### IV.10.1.1 Élément triangulaire à trois nœuds T3

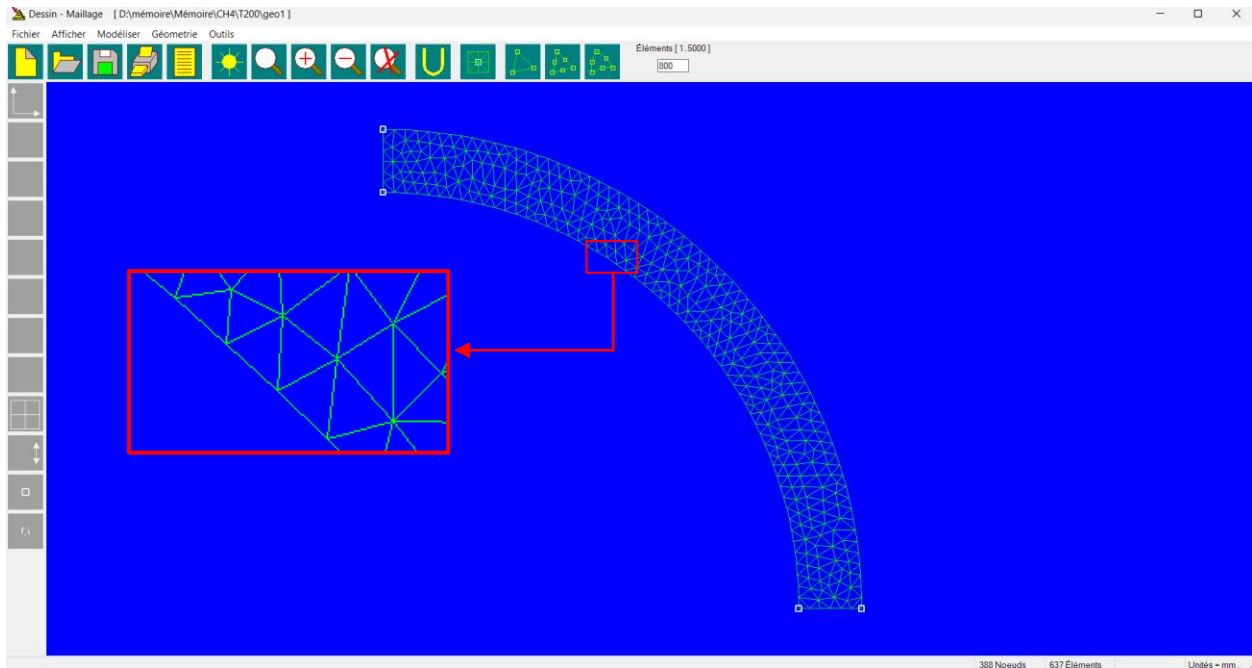
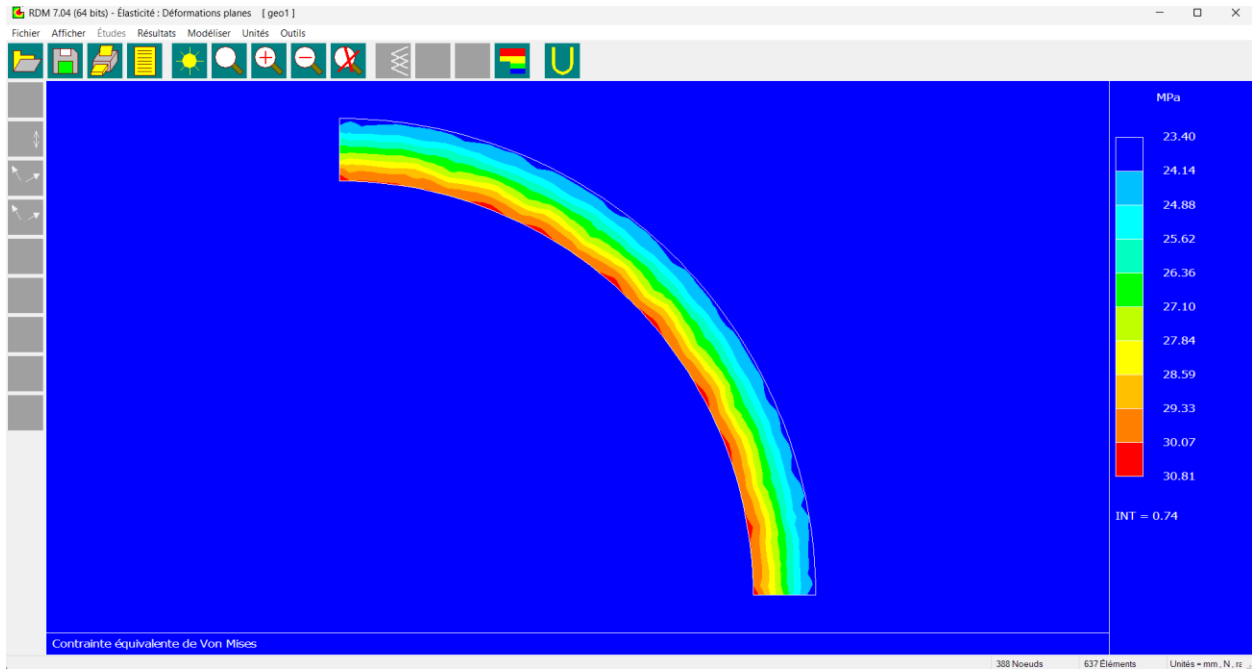


Figure IV. 5 : Élément triangulaire à trois nœuds T3

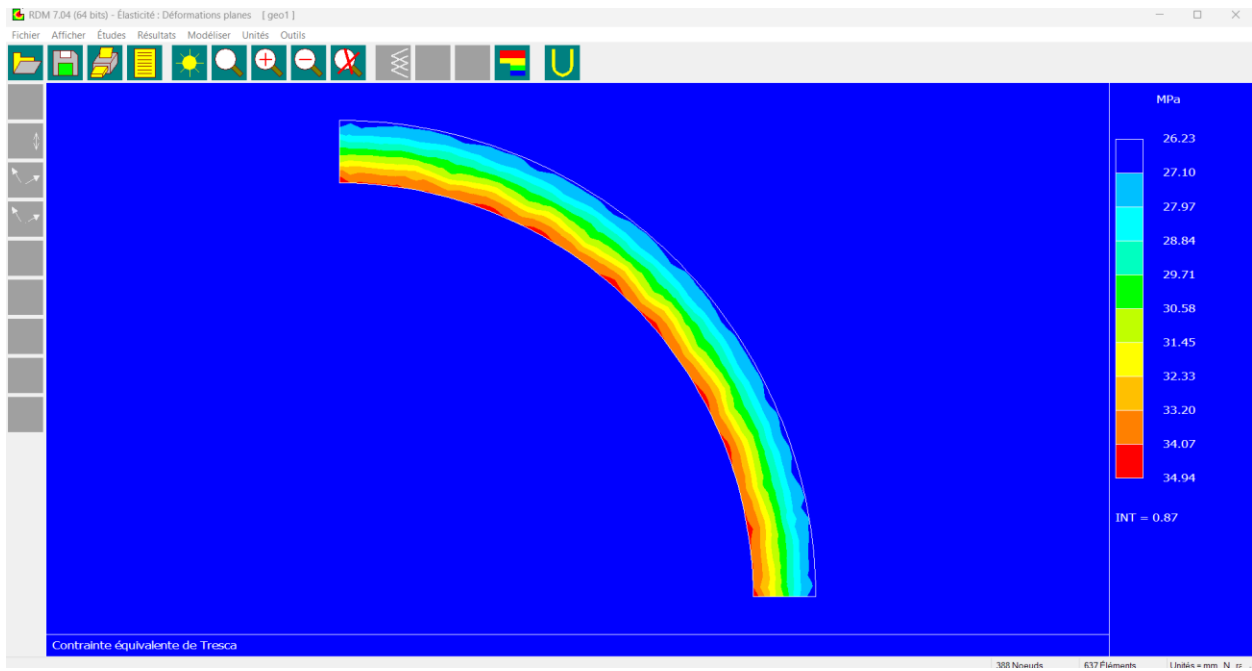
Tableau IV. 5 : Les contraintes d'élément triangulaire à trois nœuds T3

Nombre d'éléments	Contrainte de Von Mises (MPa)	Contrainte de Tresca (MPa)
25	27.01	30.40
50	27.31	30.76
100	30.76	34.83
200	30.64	34.71
500	31.16	35.34
800	30.91	35.06
1000	30.81	34.94
1200	30.81	34.94
1400	30.81	34.94

### IV.10.1.1.1 Simulation par logiciel RDM7



**Figure IV. 6 :** Contraintes de VON MISES dans le tube – T3



**Figure IV. 7 :** Contraintes de TRESCA dans le tube – T3

### IV.10.1.1.2 Vérification de la résistance du tube

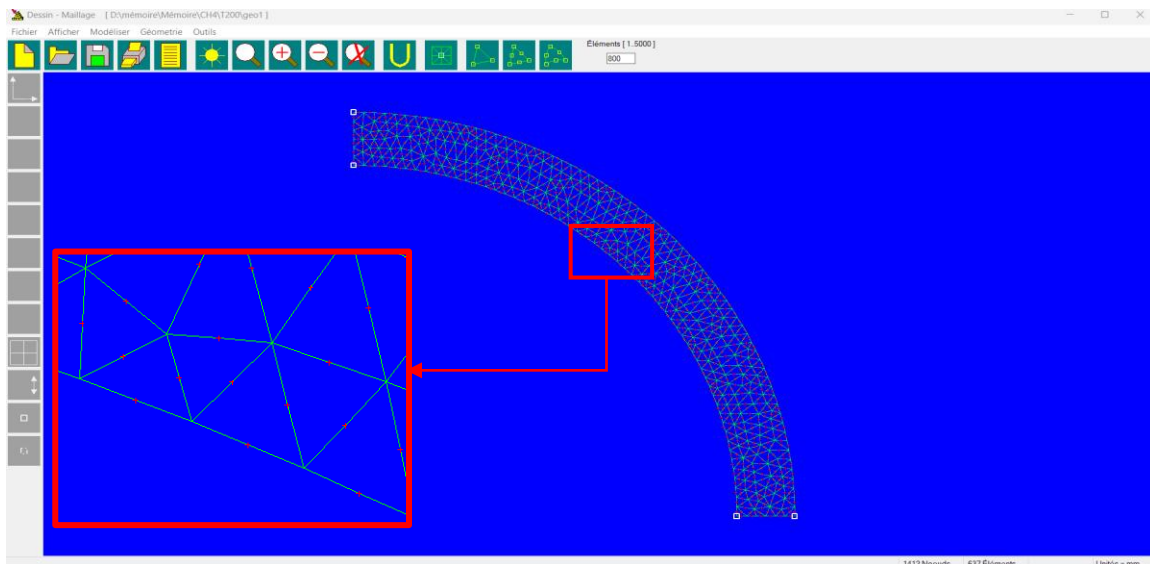
La contrainte élastique du matériau du tube  $\sigma_e = 290 \text{ MPa}$ , on la compare aux contraintes équivalentes de Tresca et Von Mises trouvées pour vérifier la résistance du tube on a :

$$\sigma_{\text{Tresca}} = 34.94 \text{ MPa} , \text{ et } \sigma_{\text{Von Mises}} = 30.81 \text{ MPa}$$

Sachant que la condition de résistance est :  $\sigma_{\text{max}} \ll \sigma_e$

Donc : **La résistance du tube est vérifiée.**

### IV.10.1.2 Elément triangulaire à six nœuds T6



**Figure IV. 8 :** Élément triangulaire à six nœuds T6

**Tableau IV. 6 :** Les contraintes d'élément triangulaire à six nœuds T6

Nombre d'éléments	Contrainte de VonMises	Contrainte de Tresca
	MPa	MPa
<b>25</b>	30.48	34.59
<b>50</b>	30.53	34.62
<b>100</b>	30.71	34.84
<b>200</b>	31.03	34.88
<b>500</b>	30.75	34.90
<b>800</b>	30.75	34.89
<b>1000</b>	30.75	34.89

### IV.10.1.2.1 Simulation par logiciel RDM7

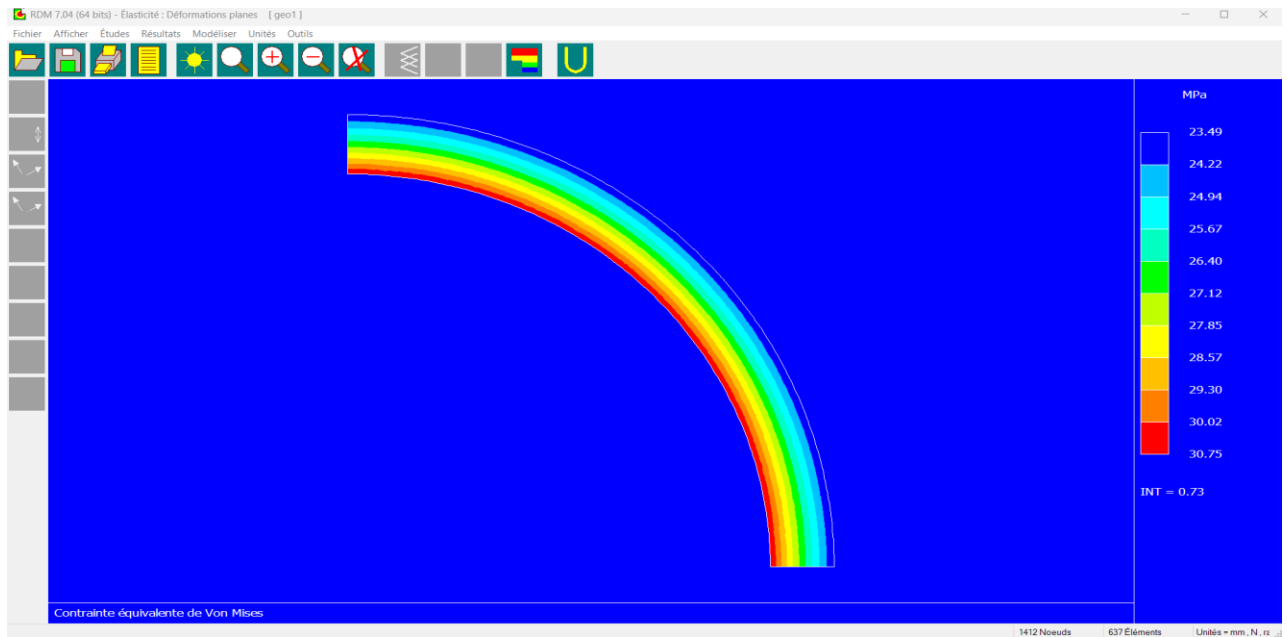


Figure IV. 9 : Contraintes de VON MISES dans le tube – T6

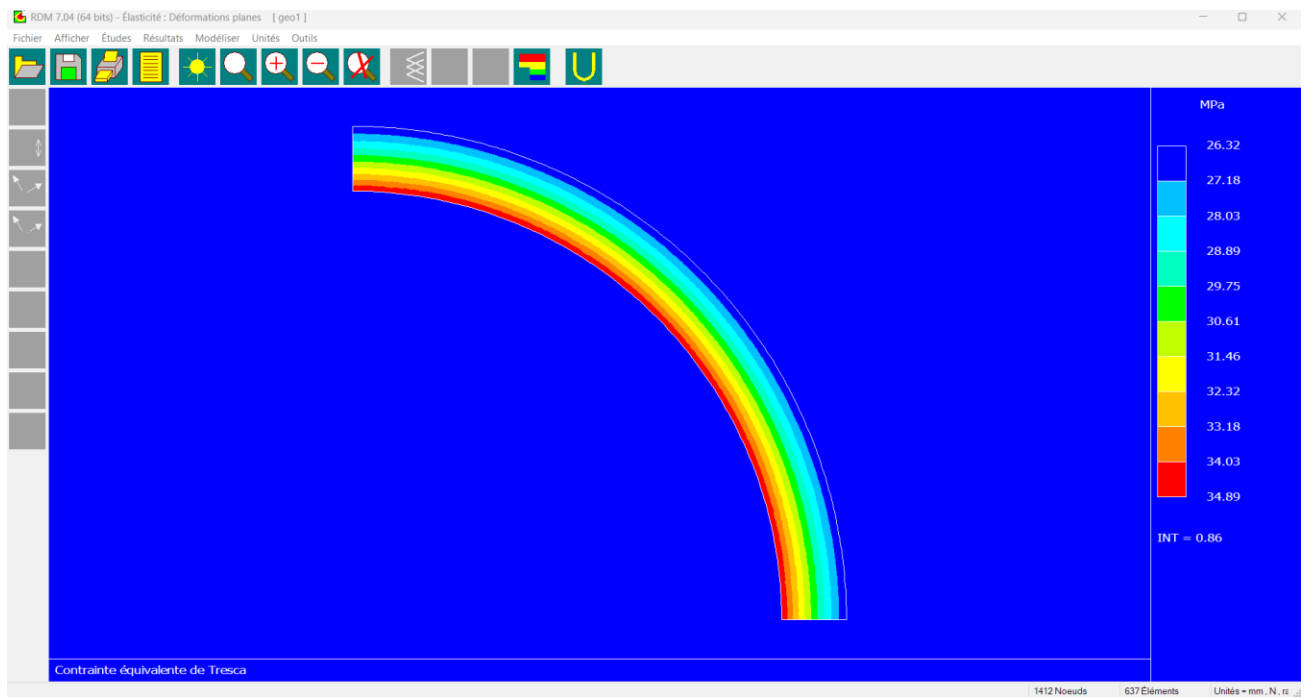


Figure IV. 10 : Contraintes de TRESCA dans le tube – T6

#### IV.10.1.2.2 Vérification de la résistance du tube

La contrainte élastique du matériau du tube  $\sigma_e = 290 \text{ MPa}$ , on la compare aux contraintes équivalentes de Tresca et Von Mises trouvées pour vérifier la résistance du tube.

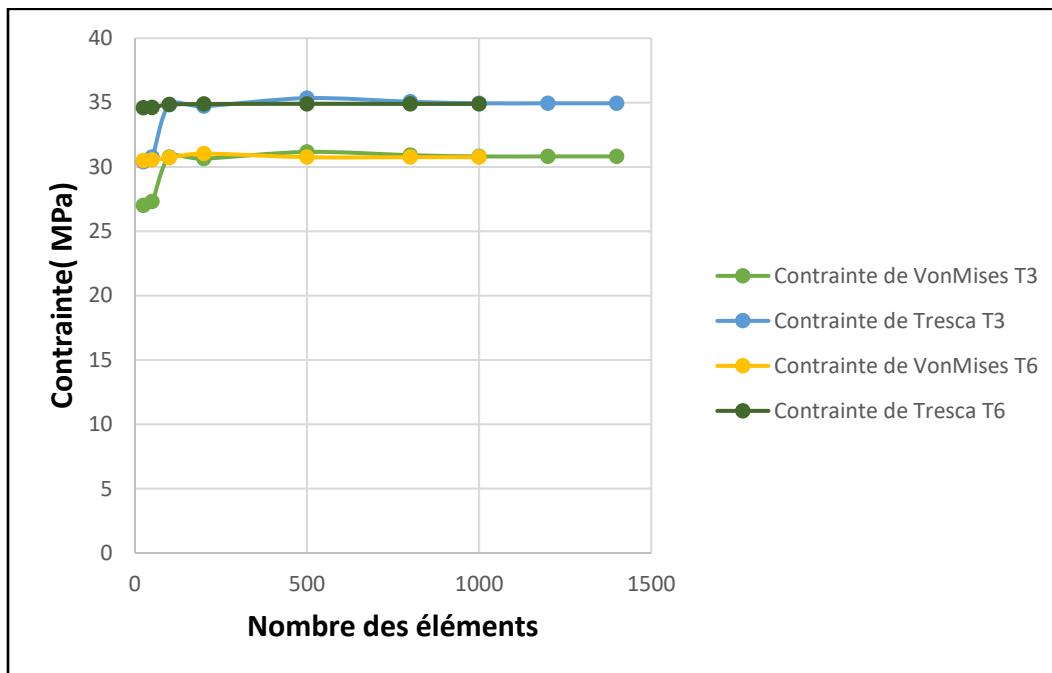
On a :

$$\sigma_{\text{Tresca}} = 30.75 \text{ MPa} , \text{ et } \sigma_{\text{Von Mises}} = 34.89 \text{ MPa}$$

Sachant que la condition de résistance est :  $\sigma_{\text{max}} \ll \sigma_e$

Donc : **La résistance du tube est vérifiée.**

#### IV.10.1.3 Les courbes



**Figure IV. 11** : Courbe des contraintes Von Mises et Tresca en fonction du nombre d'éléments triangulaires T3 et T6

#### IV.10.1.4 Commentaires

- **Niveaux de contrainte** : les valeurs de contrainte se stabilisent entre (30.80 MPa pour la contrainte Von Mises et 35 MPa pour la contrainte de Tresca après environ 1000 pour l'élément T3 et 500 pour l'élément T6, quel que soit le critère utilisé (Von Mises ou Tresca). Ces valeurs sont largement inférieures à la contrainte admissible de 260 MPa, ce qui indique que la résistance du tube est vérifiée dans les conditions du travail.

- **Convergence** : au-delà de 1000 éléments pour l'élément T3 et 500 éléments pour l'élément T6, augmenter le nombre d'éléments jusqu'à 1400 n'entraîne pas de variation significative des contraintes. Cela montre que le modèle par éléments finis a atteint une convergence, rendant un raffinement supplémentaire du maillage inutile.
- La contrainte élastique spécifiée est de 290 MPa, bien supérieure aux valeurs maximales observées dans le graphique (environ 35 MPa). Donc la résistance du tube aux conditions de travail est vérifiée.
- Pour déterminer l'option "meilleure" (ou si mieux), nous comparons les éléments T3 et T6 ainsi que les critères Von Mises et Tresca, en supposant que l'objectif est de minimiser les contraintes et à base moins d'éléments.

❖ Comparaison des types d'éléments :

À 200 éléments, on a :

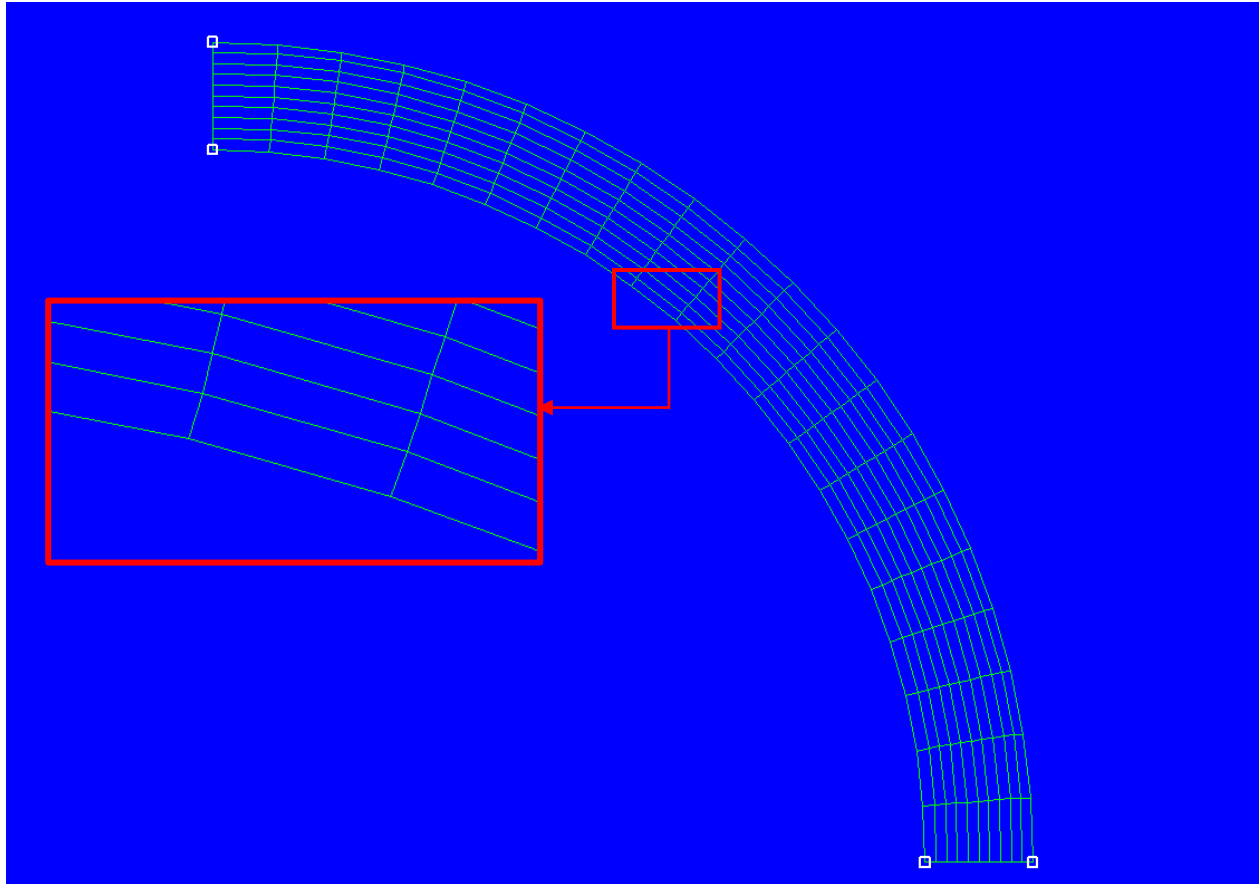
T3 : Tresca atteint 34.71 MPa, Von Mises 30.64 MPa.

T6 : Tresca atteint 34.88 MPa, Von Mises 31.03 MPa

**Observation** : les éléments T3 donnent les contraintes les plus basses à 200 éléments par rapport aux éléments T6. **Le meilleur est** les éléments T3.

## IV.10.2 Maillage avec des éléments quadrangulaires

### IV.10.2.1 Élément quadrangulaire de premier degré Q4



**Figure IV. 12 :** Élément quadrangulaire de premier degré Q4

**Tableau IV. 7 :** Les contraintes d'élément quadrangulaire à quatre nœuds Q4

Nombre d'éléments	Contrainte de Von Mises (Ma)	Contrainte de Tresca (MPa)
200 (20×10)	30.55	34.64
500 (25×20)	30.66	34.77
800 (40×20)	30.67	34.78
900 (45×20)	30.67	34.78
1000 (50×20)	30.67	34.78

IV.10.2.1.1 Simulation par logiciel RDM7



Figure IV. 13 : Contraintes de VON MISES dans le tube -Q4

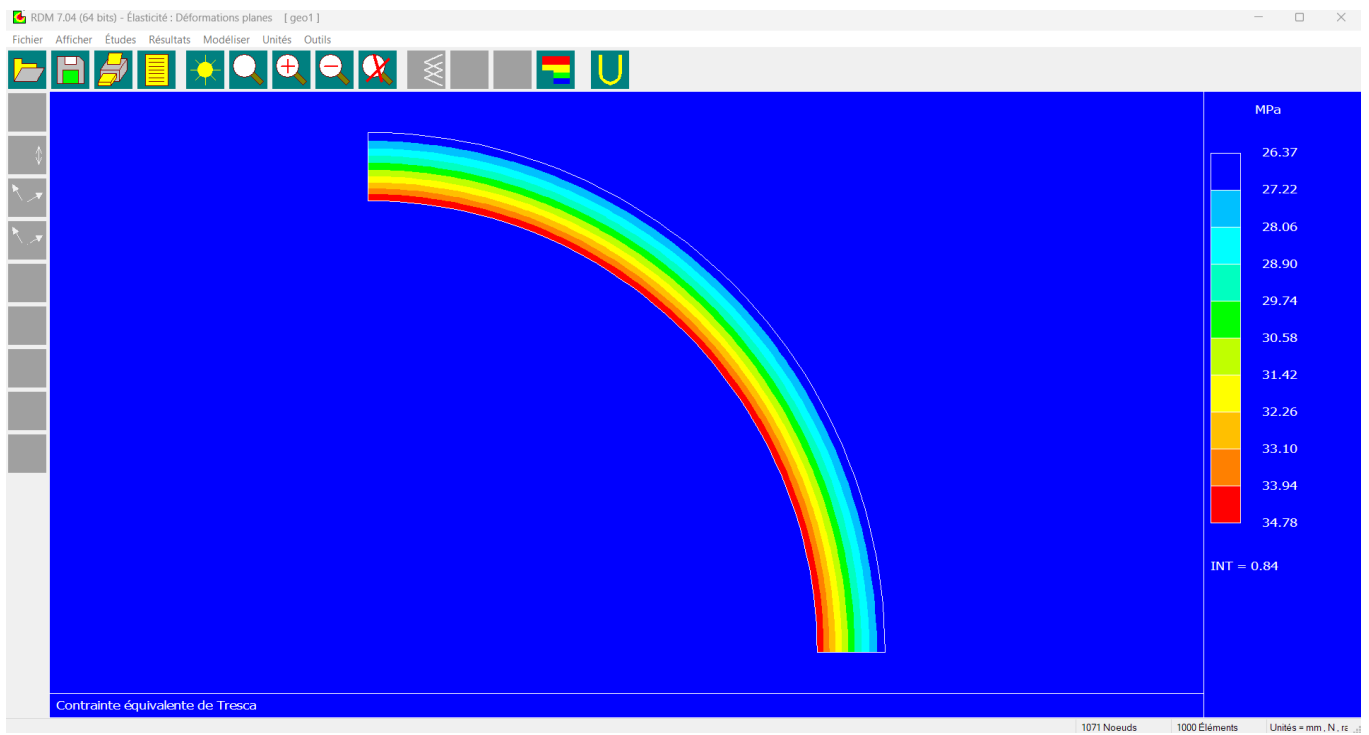


Figure IV. 14 : Contraintes de TRESCA dans le tube – Q4

#### IV.10.2.1.2 Vérification de la résistance du tube

La contrainte élastique du matériau du tube  $\sigma_e = 290 \text{ MPa}$ , on la compare aux contraintes équivalentes de Tresca et Von Mises trouvées pour vérifier la résistance du tube.

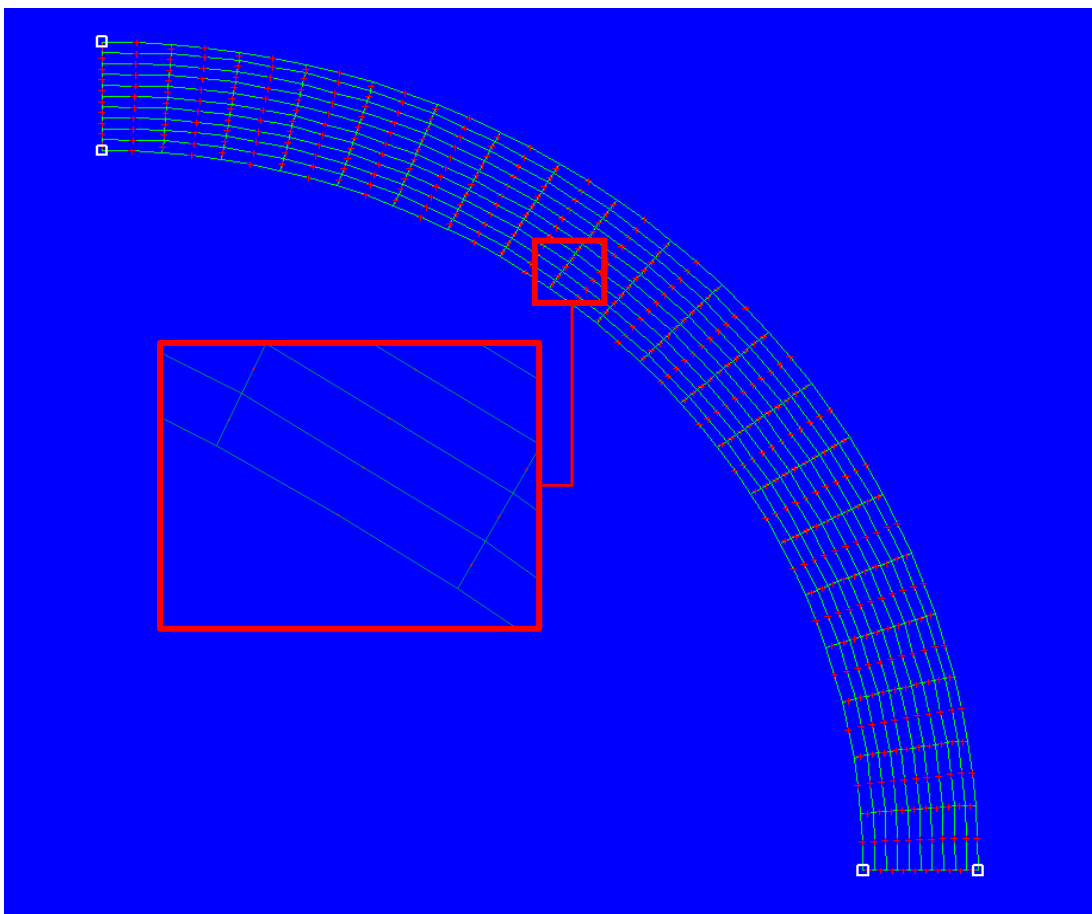
On a :

$$\sigma_{\text{Tresca}} = 30.67 \text{ MPa}, \text{ et } \sigma_{\text{Von Mises}} = 34.78 \text{ MPa}$$

Sachant que la condition de résistance est :  $\sigma_{\text{max}} \ll \sigma_e$

Donc : **La condition de résistance du tube est vérifiée.**

#### IV.10.2.2 Éléments quadrangulaires deuxième degré Q8

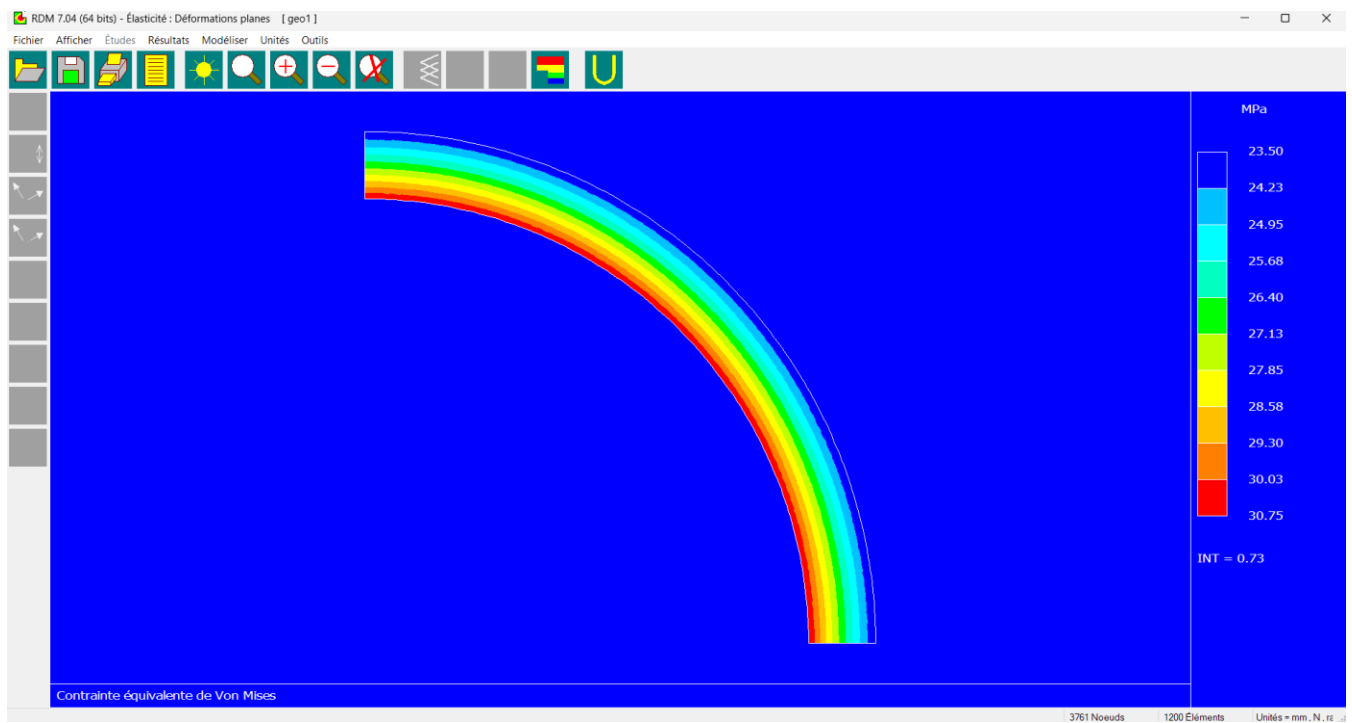


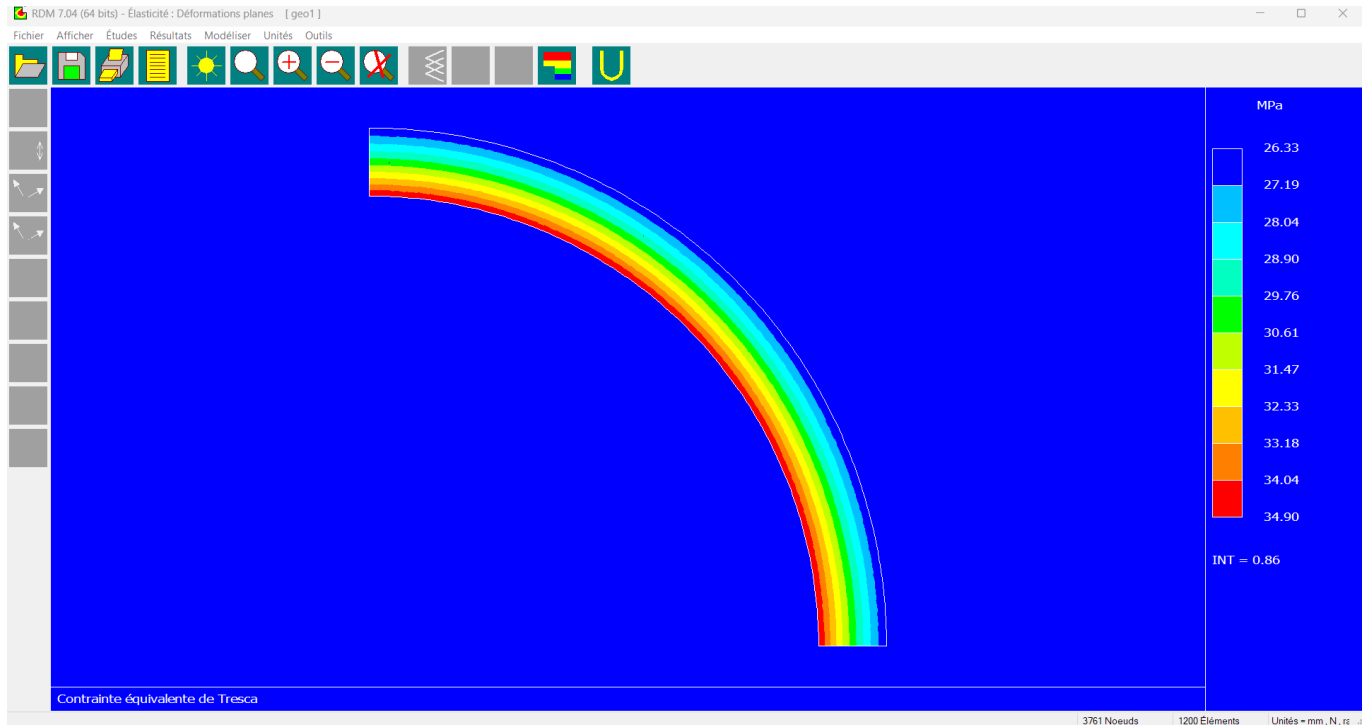
**Figure IV. 15 :** Éléments quadrangulaires deuxième degré Q8

**Tableau IV. 8** : Les contraintes quadrangulaire à huit nœuds Q8

Nombre d'éléments	Contrainte de VonMises MPa	Contrainte de Tresca MPa
200 (20×10)	30.78	34.94
500 (25×20)	30.81	34.98
800 (40×20)	30.76	34.91
900 (45×20)	30.82	34.90
1000 (50×20)	30.75	34.90
1200 (60×20)	30.75	34.90

#### IV.10.2.2.1 Simulation par logiciel RDM7

**Figure IV. 16** : Contraintes de VON MISES dans le tube-Q8



**Figure IV. 17** : Contraintes de TRESCA dans le tube – Q8

#### IV.10.2.2.2 Vérification de la résistance du tube

La contrainte élastique du matériau du tube  $\sigma_e = 290 \text{ MPa}$ , on la compare aux contraintes équivalentes de Tresca et Von Mises trouvées pour vérifier la résistance du tube,

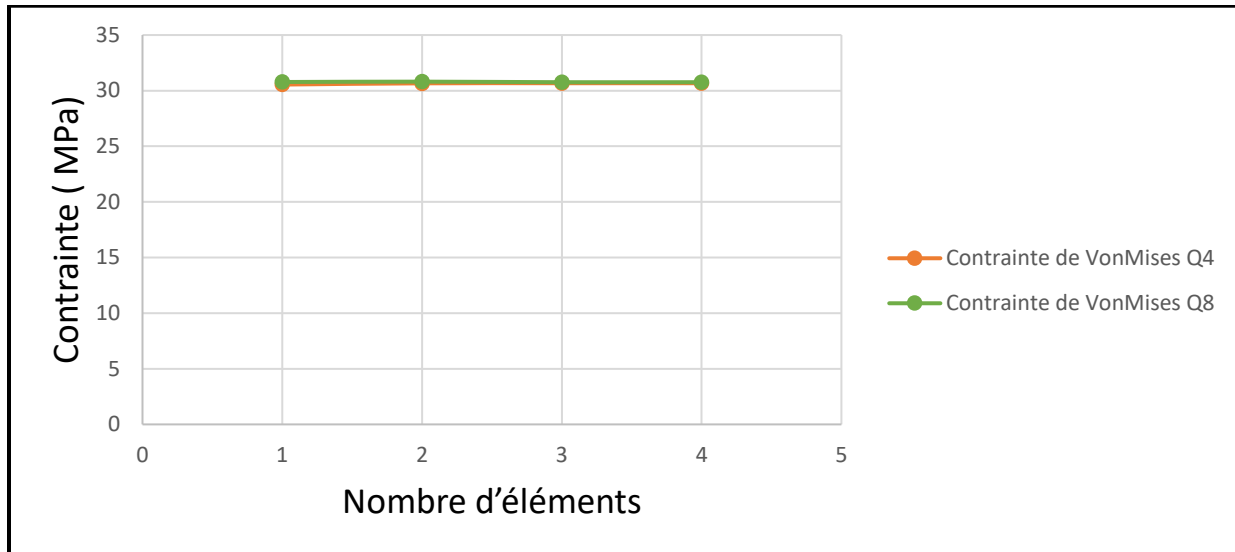
On a :

$$\sigma_{\text{Tresca}} = 30.75 \text{ MPa}, \text{ et } \sigma_{\text{Von Mises}} = 34.90 \text{ MPa}$$

Sachant que la condition de résistance est :  $\sigma_{\text{max}} \ll \sigma_e$

Donc : **La condition de résistance du tube est vérifiée.**

## IV.10.2.3 Les courbes



**Figure IV. 18 :** Courbe des contraintes VonMises et Tresca en fonction du nombre d'éléments pour élément quadrangulaire Q4 et Q8

## IV.10.2.4 Commentaires

- **Niveaux de contrainte :** les valeurs de contrainte se stabilisent entre 30.80 et 35 MPa après environ 800 pour élément 4 et 1000 pour élément Q8, quel que soit le critère utilisé (Von Mises ou Tresca). Ces valeurs sont largement inférieures à la contrainte admissible de 260 MPa, ce qui indique que la résistance du tube est vérifiée dans les conditions du travail.
- **Convergence :** au-delà de 800 éléments pour élément Q4 et 1000 éléments pour élément Q8, augmenter le nombre d'éléments jusqu'à 1200 n'entraîne pas de variation significative des contraintes. Cela montre que le modèle par éléments finis a atteint une convergence, rendant un raffinement supplémentaire du maillage inutile.
- La contrainte admissible spécifiée est de 290 MPa, bien supérieure aux valeurs maximales observées dans le graphe (environ 35 MPa). Donc la résistance du tube aux conditions de travail est vérifiée.
- **Implication :** cette sécurité élevée suggère une possibilité d'optimisation, comme augmenter les charges ou modifier le matériau, tout en restant dans les limites de 290MPa.
- Pour les mêmes contraintes calculées par le critère Von Mises et Tresca en utilisant des éléments Q4 et Q8, pour le premier élément Q4, on utilise moins d'éléments.

# **Conclusion Générale**

## Conclusion Générale

Dans ce mémoire, nous avons abordé la problématique de la conception et de l'analyse de l'échangeur de chaleur E-512, un équipement essentiel du complexe GL1/Z de Sonatrach, dédié à la liquéfaction du gaz naturel. L'objectif principal de notre étude était d'évaluer les performances thermiques et mécaniques de cet échangeur à faisceau tubulaire et calandre, tout en vérifiant sa capacité à résister aux sollicitations opérationnelles, telles que les pressions internes, les variations de température et les charges mécaniques.

Nous avons réalisé une étude approfondie des performances thermiques en combinant la méthode analytique de Kern et des simulations via le logiciel Aspen HYSYS. Au cours de nos recherches, nous avons exploré les coefficients de transfert de chaleur, les pertes de charge et la puissance thermique transférée entre l'eau de mer et le réfrigérant mixte (MCR), confirmant une bonne cohérence entre les résultats analytiques et numériques. En utilisant le logiciel RDM7, nous avons réalisé une étude mécanique basée sur les normes ASME et la méthode des éléments finis, permettant de valider la résistance des tubes et des autres composants structurels.

En conclusion, notre étude fournit une compréhension approfondie des interactions thermiques et mécaniques de l'échangeur E-512, validant sa conception robuste et efficace. Ce travail souligne l'importance d'une approche intégrée combinant analyses thermiques et mécaniques pour garantir la fiabilité et la durabilité des équipements industriels dans le secteur énergétique.

# **Bibliographie**

## Bibliographie

---

- [1] SONATRACH, IAP, «Les équipements d'échange thermique, cours IAP,» chez *Projet professionnel de fin de formation iap*.
- [2] Total, LES ÉQUIPEMENTS SUPPORT DE FORMATION Cours EXP-PR-EQ120 Révision 0.1.
- [3] BELHAMIANI Mohamed , « Échangeurs de chaleur » Cours, Universitaire BELHADJ Bouchaib –Ain Témouchent- Institut de Technologie. Année 2017
- [4] D. F. Mebarek-Oudina, « Échangeurs de chaleur » Cours & Exercices corrigés, Copyright Editions El-Djazair, Janvier 2014.
- [5] ENSPM Formation Industrie, technologie et utilisation des échangeurs, - IFP Training,, 2005.
- [6] P.Trambouze, « Le raffinage du pétrole: Matériels et équipements », Document de l'IFP, Editions technip, 1999.
- [7] BENNAJAH Mounir, CHAOUNI Naoil «Echangeurs de chaleur: Technologie, calcul et desigh » Editions TECHNIP 2014
- [8] ENSPM Formation, ROLE DES ÉCHANGEURS DE CHALEUR, 2005.
- [9] N. BELHADI, « Etude thermique d'un echangeur de chaleur a faisceau tubulaire et calandre (eau de mer/ammoniac) » Memoire de fin d'études en master energetique,Universite d'Annaba, 2019.
- [10] SONATRACH, «Fiche technique de l'échangeur de chaleur E-512,» Complex GL1/Z, Oran,Arzew, 2008.
- [11] A. Benbrik, «Les échangeurs de chaleur» cours, FHC/UMBB, 2022.
- [13] «wallonie energie SPW,» Document [En ligne]. 2015:  
<https://enhttps://energie.wallonie.be/fr/differents-types-d-echangeurs-de-chaieurs.html ?IDC=8049&IDD=97759>
- [14] D. MokhtarAdel, HYSYS® : une introduction à la simulation en génie chimique.
- [15] GRINE Oubaid, "Étude et calcul thermique et mecanique d'un échangeur de chaleur 101-E01-H" MFE, FHC/UMBB 2019.
- [16] M. ILYESS, (Étude et cacul thermique et mecanique d'un échangeur de chaleur),MFÉ, FHC/UMBB, 2012.
- [20] ASME Boiler and Pressure Vessel Section II, MATERIALS 2021.
- [21] M. BETTAYEB, Cours Méthode des éléments finis, FHC/UMBB, 2021.

- **Sites Web**

[12] «L'échange de chaleur,» univ-lorraine:

[http://rpn.univ-lorraine.fr/UL/echangeurs-de-chaleur/co/conclusion\\_3.html](http://rpn.univ-lorraine.fr/UL/echangeurs-de-chaleur/co/conclusion_3.html)

[17] «kingmetal»:

<https://kingmetal2009.en.made-in-china.com/product/nxeUFSYyfvWB/China-ASME-Sb-111-Sb-466-C71500-Seamless-Copper-Nickel-Tubes.html>.

[18] «masteel» :

<https://masteel.co.uk/asme-sa516-grade-70/>.

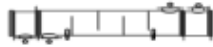
[19] «SA 266 Specification for carbon steel forgings for pressure vessel components» :

<https://www.lfpc.com/sa-266-grade1234.html>.


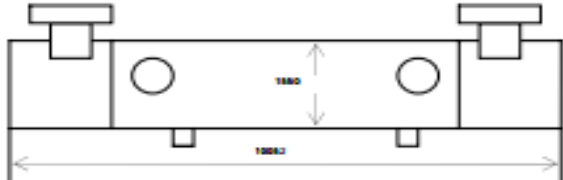
# **Les annexes**

Annexe 1 : Fiche technique obtenu par logiciel HYSYS.

Heat Exchanger Specification Sheet

Company:SONATRACH													
Location:ARZEW GL1/Z													
Service of Unit:					Our Reference:								
Item No.:					Your Reference:								
Date:		Rev No.:			Job No.:								
Size	1550 - 0	7300	mm	Type	AEL	Hor	Connected in	1	parallel	1	series		
Surf/unit(eff.)	2018.2		m <sup>2</sup>	Shells/unit	1		Surf/shell (eff.)	2018.2		m <sup>2</sup>			
<b>PERFORMANCE OF ONE UNIT</b>													
Fluid allocation				Shell Side				Tube Side					
FluidName				mcr in->mcr out				water in->water out					
Fluid quantity, Total				501480				2209680					
Vapor (In/Out)				kg/h		501480		0		0			
Liquid				kg/h		0		2209680		2209680			
Noncondensable				kg/h		0		0		0			
Temperature (In/Out)				°C		132.7		32.18		26			
Bubble / Dew point				C		-63.38 / 13.97		-63.76 / 13.84		137.85 / 137.85			
Density (Vap / Liq)				kg/m <sup>3</sup>		38.51 / 0		61.65 / 0		0 / 1006.68			
Viscosity				cp		0.0153 / 0		0.0128 / 0		0 / 0.8705			
Molecular wt, Vap						25.76		25.76		0			
Molecular wt, NC						0		0		0			
Specific heat				kJ/(kg-K)		2.43 / 0		2.517 / 0		0 / 4.313			
Thermal conductivity				W/(m-K)		0.0432 / 0		0.0321 / 0		0 / 0.6125			
Latent heat				kJ/kg		0		0		0			
Pressure (abs)				kPa		4819.914		4593.532		340.291			
Velocity (Mean/Max)				m/s		3.43 /		8.71		2.5 /			
Pressure drop, allow./calc.				kPa		24.517		26.382		35.304			
Fouling resistance (min)				m <sup>2</sup> -K/W		0		0.0001		0.00014			
Heat exchanged				33508.2		kW		MTD corrected		32.03 °C			
Transfer rate, Service				518.4		Dirty		518.3		Clean			
								656.7		W/(m <sup>2</sup> -K)			
<b>CONSTRUCTION OF ONE SHELL</b>										<b>Sketch</b>			
				Shell Side				Tube Side					
Design/vac/test pressure:g				kPa		5100 / 0 / 0		400 / 0 / 0					
Design temperature / MDMT				°C		170 / 0		75 / 0					
Number passes per shell						1		1					
Corrosion allowance				mm		3.18		0					
Connections				In mm		1 775 / -		1 539.75 / -					
Size/rating				Out		1 673 / -		1 590.55 / -					
ID				Intermediate		0 / -		0 / -					
Tube No.				1592		OD 19.05		Tks- Avg 1.25		mm			
Tubetype				Lowfin tube		# #/m		Material		CuNi 70/30			
Shell				Carbon Steel		ID 1550		OD 1620		mm			
Channel or bonnet				CuNi 90/10				Channel cover		CuNi 90/10			
Tubesheet-stationary				CuNi 90/10				Tubesheet-floating		-			
Floating head cover				-				Impingement protection		None			
Baffle-cross				Carbon Steel		Type		Single segmental		Cut(%d) 24.6			
Baffle-long				-		Seal type		H		Spacing: c/c 1290			
Supporttube				-		UBend		0		Type			
Bypass seal				-		Tube-tubesheet joint		Exp. 2		grv			
Expansion joint				-		Type		None					
RhoV2-Inlet nozzle				2268		Bundle entrance		2189		Bundle exit			
										kg/(m-s <sup>2</sup> )			
Gaskets - Shell side				-		Tube Side		Flat Metal Jacket		Fibe			
Floating head				-									
Code requirements				ASME Code Sec VIII Div 1		TEMA class		R - refinery service					
Weight/Shell				35172		Filled with water		51826.3		Bundle 13319.4			
										kg			

Annexe 2 : Fiche technique du constructeur.

Condenseur - Echangeur de chaleur Feuille de Spécifications Page 1 de 3		PROJET ETUDE, FOURNITURE, DEMONTAGE/MONTAGE, ESSAIS ET MISE EN SERVICE DES CONDENSEURS A SURFACE ET DES ECHANGEURS D'EAU DE MER					
Client		SONATRACH		Fabricant:		GEA	
Site d'unité		GL1Z					
Position N°		E-512					
Appellation		Post Refroidisseur du compresseur MCR2 (E 512)					
Construction / Type		Echangeur de Chaleur		Connexion :		1	Parallèle
Dimensions (D x L)		mm 1550 x 7300		Type		A-E-L	
Surface		m²		Calandre / Unité		Surf/Calandre (E <sub>f</sub> ):	2202,1
<b>Caractéristiques d'une Unité</b>							
Données Fluide		Côté Calandre				Côté Tube	
Fluide		MCR				SEA WATER	
Débit		kg/s 139.3				613.8	
Température		°C		ENTREE		SORTIE	
Pression absolue		Kg/cm² a		47.11		3.47	
Liquide		kg/s		139.3		613.8	
Vapeur		kg/s		139.3		613.8	
<b>PROPRIÉTÉS PHYSIQUES DES FLUIDES</b>							
		LIQ.		VAP.		LIQ.	
Densité		kg/m³		38.44		61.76	
Viscosité		cP		0.014		0.02	
Chaleur latente		W/m°C		0.045		0.032	
Capacité calorifique		kJ/Kg°C		2.47		2.565	
<b>CONSTRUCTION / DESIGN / MATERIAUX</b>							
Nbre. cycles / calandre							
Vitesse		m/sec		1.8			
Perte. Charge Adm/Calc		Kg/cm²		0.4 / 0.25			
Encrassement (min)		m²/CW		0.0001			
Puissance Thermique		MW		35.2		MTD : 30.8 °C	
Coefficient de Transfer de chaleur:		W/m²°C		Encrassé: 520		Propre : 665.3	
Pression de calcul / d'épreuve		Kg/cm² g		50.7		76.05	
Température de calcul		°C		155		-29	
Corrosion admissible		mm		3		0	
Connexions:		Voir page suivante					
Nombre de tubes:		OD : 19.05		N° Tubes : 1592		Épaisseur moy. 1.25 mm	
Matériel de tubes:		70/30 Cu Ni - SB 111 UNS C71500		Joint des tubes: Expanded & Seal Welded			
Calandre:		Matériel SA-516 Gr.70		DI: 1620 mm		Fond calandre:	
Boîte:		90/10 CuNi		Fond de boîte: 90/10 CuNi			
Plaque tubulaire fixé:		SA-266 Gr.4 + 90/10 CuNi Clad		Pl. tub. flottante: -			
Fond flottant:				Défecteur: Carbon Steel			
Chicanes transversal		Type: NTW-SEG		Coupe: H (%d) 27%		Espace : 1298 mm	
Chicanes longitudinal		Joint:		Support Tubes:			
Calorifugeage		Cal: mm		Boîte: mm		Soufflet dilatation:	
Joint :		Côté Calandre:		Côté Tube:			
Code de calcul		HEI :		Classe TEMA: R		Spécifications :	
Poids:		Par calandre: 28700 kg		Par faisceau:		kg Immersé 46600 kg	
Schéma							

### Annexe 3 : Placement de l'échangeur E-512.

