

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

UNIVERSITÉ BADJI MOKHTAR - ANNABA
BADJI MOKHTAR – ANNABA UNIVERSITY



جامعة باجي مختار – عنابة

Faculté : TECHNOLOGIE
Département : GENIE DES PROCEDES
Domaine : SCIENCES ET
TECHNOLOGIES
Filière : GENIE DES PROCEDES
Spécialité : GENIE CHIMIQUE

Mémoire

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

**ETUDE ET DIMENSIONNEMENT D'UN ECHANGEUR A
PLAQUES AU NIVEAU DU LAC, COMPLEXE SIDER**

Présenté par : *BOURAS Dounia & OUKIL Ines*

Encadrant : *DERRADJI Ahmed-Fawzi Professeur Université Badji Mokhtar Annaba*

Jury de Soutenance :

ROUBEHIE FISSA	MAB	UBM Annaba	Président
DERRADJI	Pr	UBM Annaba	Encadrant
LAKROUT	MAB	UBM Annaba	Examineur

Année Universitaire : 2023/2024

REMERCIEMENTS

On remercie DIEU le tout puissant de nous avoir donné la santé et la volonté d'entamer et de terminer ce mémoire de fin étude master.

*Nous remercions notre encadreur **Professeur DERRADJI Ahmed-Fawzi** pour l'aide compétente qu'il nous a apportée, pour sa patience, sa confiance, et ses orientations qui nous ont été très précieuses pour structurer et pour améliorer la qualité de notre mémoire.*

*Nous remercions le président de jury **Docteur Roubéie Fissa**, et*

*L'examineur **Docteur Lakrouf** qui en dépit de leur fonction nous font l'honneur de participer au jury de notre soutenance, de lire et d'examiner notre travail.*

*Nous voudrions aussi exprimer nos remerciements à tous **nos professeurs du département de Génie des Procédés** qui ont contribué à notre formation.*

*Nous saisissons aussi l'occasion pour adresser nos vifs remerciements au maître de stage **Mr. RERARI YUCEF** ingénieur de l'unité de Laminage à Chaud pour son aide précieuse, sa disponibilité, ses explications, ses conseils et sa patience infinie durant la période du stage.*

*Nous remercions aussi **tout le personnel du complexe Sidérurgique d'El Hdjar** pour leur générosité et leur contribution.*

*Nous profitons ainsi pour remercier **tous les membres de nos familles** ; en tête nos parents ; qui nous ont apporté beaucoup de soutien durant toute notre scolarité.*

Nos derniers remerciements, vont à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'aboutissement de ce travail.

DEDICACES

Je dédie ce modeste travail

A mes chers parents

*Qui n'ont pas cessé de me conseiller ; m'encourager et me
soutenir tous au long de mes études.*

A mon cher frère

Fethi

A mes chères sœurs

Sabrina et Karima

Et leurs enfants

Mohamed, Khalil, Abed Rahim, chiheb, Soumia, jouri,

Et les jumeaux

Abed Rahman et Farah

A mon binôme

Ines

A toutes mes amies

A tous ceux qui me sont chers

*Merci pour votre amour, votre soutien et vos
encouragements*

DOUNIA

DEDICACES

Je dédie ce modeste travail

A mes chers parents

*Qui n'ont pas cessé de me conseiller ; m'encourager et me soutenir tous
au long de mes études merci d'être mes piliers*

A mon cher frère Islem et Mouad

A ma sœur Soundous

*Nos liens sont précieux et notre complicité est une bénédiction merci
d'être mes compagnons de vie*

A mon fiancé

*Votre soutien et votre amour inconditionnel ont été ma force tout au
long de ce parcours merci d'être mon partenaire*

A ma belle-famille

*Votre accueil chaleureux et votre soutien sont des trésors précieux
dans ma vie merci d'être une part importante de mon bonheur*

A mon binôme Dounia

*Ta collaboration et ton soutien sont essentielles pour atteindre nos
objectifs ensemble merci d'être une partenaire si précieuse dans cette
aventure*

A toutes mes amies et ma famille

*Votre présence dans ma vie est un cadeau inestimable merci d'être à
mes côtés*

A mon petit chat "rose"

Tu es le bonheur dans ma vie

INES

Résumé

L'échangeur tubulaire dans l'unité de laminage à chaud (LAC) du complexe sidérurgique Sider El Hadjar est en train d'être remplacé par un échangeur à plaques "Alpha Laval M15" suite à un problème d'arrêt soudain avec l'augmentation de la température surtout en été.

De ce fait, cette recherche vise à vérifier les performances de l'échangeur à plaques en se basant sur la méthode de dimensionnement thermique.

Le dimensionnement a donné une surface d'échange équivalente à 12.77 m² avec une efficacité de 73,29%, indiquant un bon fonctionnement de l'échangeur. L'échangeur à plaques offre une meilleure résistance aux hautes températures et une plus grande surface d'échange par unité de volume.

Le remplacement de l'ancien échangeur tubulaire par le nouvel échangeur à plaques "Alpha Laval M15" s'avère être un excellent choix pour améliorer les performances et la fiabilité de l'unité de laminage à chaud du complexe sidérurgique.

Mots clés : échangeur tubulaire, à plaques, surface d'échange, efficacité, Sider El Hadjar, dimensionnement thermique.

ملخص

يتم حاليًا استبدال المبادل الحراري الأنبوبي في وحدة الدرفلة على الساخن (LAC) في مجمع سيدار الحجار للصلب بمبادل حراري لوحي من نوع "Alpha Laval M15" نتيجة لمشكلة التوقف المفاجئ مع ارتفاع درجات الحرارة خاصة في فصل الصيف.

يهدف هذا البحث إلى التحقق من أداء المبادل الحراري اللوحي باستخدام طريقة التصميم الحراري حيث أظهرت نتائج التصميم مساحة تبادل تعادل 12.77 متر مربع بكفاءة 73.29٪، مما يشير إلى أداء جيد للمبادل. يوفر المبادل الحراري اللوحي مقاومة أفضل لدرجات الحرارة العالية ومساحة تبادل أكبر لكل وحدة حجم.

يعد استبدال المبادل الأنبوبي القديم بالمبادل اللوحي الجديد "Alpha Laval M15" خيارًا ممتازًا لتحسين أداء ومردودية وحدة الدرفلة على الساخن في مجمع الصلب.

الكلمات المفتاحية: مبادل حراري أنبوبي، مبادل حراري لوحي، مساحة التبادل، الكفاءة، سيدار الحجار، التصميم الحراري

Abstract

The tubular heat exchanger in the hot rolling unit of the Sider El Hadjar steel complex is being replaced by an "Alpha Laval M15" plate heat exchanger due to sudden shutdown problems with temperature increases, especially in summer.

This research aims to verify the performance of the plate heat exchanger using the thermal sizing method.

The sizing resulted in an exchange surface area of 12.77 m² with an efficiency of 73.29%, indicating good exchanger performance. The plate heat exchanger offers better resistance to high temperatures and a larger exchange surface area per unit volume.

Replacing the old tubular exchanger with the new "Alpha Laval M15" plate exchanger proves to be an excellent choice for improving the performance and reliability of the steel complex's hot rolling unit.

Keywords: tubular heat exchanger, plate heat exchanger, exchange surface area, efficiency, Sider El Hadjar, thermal sizing

Résumé	I
Liste des Figures	VII
Liste des tableaux	IX

TABLES DES MATIÈRES

Introduction générale	01
------------------------------	-----------

CHAPITRE I : GENERALITES SUR L'ECHANGEUR DE CHALEUR

I.1 Introduction	03
I.2 Le transfert de chaleur	03
I.2.1 La conduction	03
I.2.2 La convection	04
I.2.3 Transfert de chaleur par rayonnement	05
I.3 Les échangeurs de chaleur	06
I.3.1 Définition	06
I.3.2 Les fonctionnalités des échangeurs thermiques	06
I.3.3 Classification des échangeurs de chaleur	07
I.3.3.1 Classement suivant le mode de transfert de chaleur	07
I.3.3.2 Classement selon les écoulements	08
I.3.3.3 Classement suivant la nature du matériau de paroi d'échange	09
I.3.3.4 Classement suivant la compacité de l'échangeur	09
I.3.3.5 Classement fonctionnel	09
I.3.3.6 Classement technologique	09
I.3.4 Les différents types des échangeurs thermiques	10
I.3.4.1 Les échangeurs tubulaires	10
I.3.4.2 Échangeur multitubulaire	11
I.3.4.3 Echangeur à tube et calendre	12

I.3.4.4 Echangeur à plaques	12
I.3.4.5 Échangeurs avec un fluide changeant de phase	13
I.3.5 Domaine d'utilisation des échangeurs de chaleur	14

CHAPITRE II : L'ÉCHANGEUR A PLAQUES

II.1 Introduction	15
II.2 Définition	15
II.3 Bref Historique	16
II.4 Composition et fonctionnement	16
II.4.1 Composants et structure	16
II.4.1.1 Plaques	16
II.4.1.2 Joints d'étanchéité	17
II.4.1.3 Bâti	17
II.4.2 Principe de fonctionnement et transfert de chaleur	17
II.5 Technologie des plaques	18
II.5.1 Plaque à canal large	19
II.5.2 Plaque à double paroi	19
II.5.3 Plaque semi-soudée	19
II.5.4 Types d'échangeurs à plaques	20
II.5.4.1 Les échangeurs à surface primaire	20
II.5.4.1.1 L'échangeur à plaques et joints	20
II.5.4.1.2 Les échangeurs avec plaques soudées ou brasées	20
II.5.4.2 Les échangeurs à surface secondaire	21
II.6 Avantages par rapport à d'autres types d'échangeurs	21
II.7 Applications industrielles	22

II.8	Maintenance et dépannage	22
II.8.1	Nettoyage	22
II.8.2	Fuites	22
II.9	Innovations et tendances futures	23
<i>CHAPITRE III : DIMENSIONNEMENT D'UN ECHANGEUR A PLAQUES</i>		
III.1	Introduction	24
III.2	Présentation du contexte d'étude	24
III.2.1	Présentation du Complexe El Hadjar	24
III.2.2	Présentation du laminoir à chaud (LAC)	26
III.2.2.1	Rôle du laminage à chaud (LAC)	26
III.2.2.2	Description de l'installation	27
III.2.2.3	Fonctionnement du laminage d'une bobine	30
III.2.2.4	Problème et objectif d'étude	31
III.3	Méthode de dimensionnement de l'échangeur à plaques	34
III.3.1	Les données caractéristiques des fluides	34
III.3.2	Détermination de la surface d'échange	34
III.3.3	Détermination de l'efficacité de l'échangeur	39
III.4	Résultats du dimensionnement de l'échangeur à plaques	40
III.4.1	Détermination de la surface d'échange	40
III.4.2	Détermination de l'efficacité de l'échangeur	42
	Conclusion et perspectives	44
	Résumés (Français, Arabe, Anglais)	45
	Références bibliographiques	46

LISTE DES FIGURES

Figure 1. Principe de la conduction.....	4
Figure 2. Principe de la convection.....	4
Figure 3. Transfert de chaleur par rayonnement.....	5
Figure 4. Les modes de transfert thermique regroupés.....	6
Figure 5. Échangeur à courant parallèle.....	8
Figure 6. Échangeur à contre-courant.....	8
Figure 7. Échangeur à courant-croisé.....	9
Figure 8. Les différents types d'un échangeur à tubulaire.....	10
Figure 9. Échangeur coaxial.....	10
Figure 10. Les différentes formes des ailettes pour Échangeur à tubes ailettes.....	11
Figure 11. Échangeur à tête flottante.....	12
Figure 12. Des variétés des échangeurs à plaques d'Alpha Laval.....	15
Figure 13. Les composantes d'un échangeur à plaques.....	16
Figure 14. Schéma d'un échangeur à plaques avec écoulement des fluides.....	17
Figure 15. Plaque à canal large.....	19
Figure 16. Plaque à double paroi.....	19
Figure 17. Plaque semi-soudée.....	20
Figure 18. Échangeur Packinox.....	21
Figure 19. Situation géographique.....	24
Figure 20. Organisation de l'unité LAC.....	26
Figure 21. Configuration du train de laminage.....	26
Figure 22. La bobine.....	30
Figure 23. Le laminage.....	31

Figure 24. L'échangeur tubulaire et la bobine de l'échangeur à plaques du complexe Sider El Hadjar 33

Figure 25. Les valeurs du coefficient de frottement en relation avec la valeur de Reynolds.. 37

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1. Produits du complexe, son installation et ses principales utilisations.....	25
Tableau 2. Les données caractéristiques des fluides (eau et Huile).....	34
Tableau 3. Résultats des calculs de la surface d'échange.....	40
Tableau 4. Résultats des calculs de l'efficacité de l'échangeur à plaques.....	42

INTRODUCTION
GENERALE

Introduction générale

Les échangeurs thermiques, dispositifs essentiels dans de nombreux procédés industriels, permettent le transfert de chaleur entre deux fluides sans qu'ils se mélangent. Depuis leur apparition au début de l'ère industrielle, ces équipements ont connu une évolution constante, répondant aux besoins croissants en efficacité énergétique et en optimisation des processus. L'industrie a vu se développer divers types d'échangeurs, chacun adapté à des applications spécifiques.

Parmi eux, les échangeurs à tubes ont longtemps dominé le marché en raison de leur robustesse et de leur polyvalence. Ces échangeurs, notamment les modèles tubulaires et à calandre, ont été largement adoptés dans l'industrie pour leur capacité à gérer des pressions et températures élevées, leur adaptabilité à une grande variété de fluides, leur facilité de nettoyage et d'entretien, ainsi que leur durabilité et résistance mécanique. Ces caractéristiques en ont fait des choix privilégiés dans des secteurs tels que la pétrochimie, l'industrie chimique et sidérurgique, et la production d'énergie.

Cependant, malgré leurs avantages, les échangeurs à tubes présentent certains inconvénients. Leur encombrement important nécessite beaucoup d'espace, leur poids élevé complique l'installation et le transport, leur efficacité thermique est limitée due à des coefficients d'échange plus faibles, et ils peuvent présenter des zones mortes favorisant l'encrassement. De plus, leur flexibilité est limitée pour ajuster la capacité d'échange. Face à ces limitations, les échangeurs à plaques sont devenus une alternative de plus en plus attrayante. Ils offrent une compacité jusqu'à 5 fois supérieure à celle des échangeurs tubulaires équivalents, une efficacité thermique supérieure grâce à des coefficients d'échange plus élevés dus à la turbulence accrue, une grande flexibilité permettant d'ajuster facilement la capacité par ajout ou retrait de plaques, une maintenance simplifiée grâce à un démontage aisé pour nettoyage et inspection, un poids réduit facilitant l'installation et réduisant les coûts de structure, ainsi qu'une meilleure distribution des fluides réduisant les zones mortes et l'encrassement.

Ces avantages rendent les échangeurs à plaques particulièrement pertinents dans des applications nécessitant une haute efficacité, une flexibilité opérationnelle, ou des contraintes d'espace, comme dans l'industrie automobile, agroalimentaire, la climatisation, ou certains procédés chimiques. De ce fait, au niveau de la zone du laminage à chaud du complexe

métallurgique SIDER El Hadjar à Annaba, les ingénieurs ont décidé de remplacer l'échangeur à tube déjà utilisé depuis longtemps par un échangeur à plaques « Alpha Lavale M15 », une décision motivée par des arrêts répétitifs de ce premier surtout en été lors des augmentations de la température.

D'où l'intérêt de la présente recherche de dimensionner l'échangeur à plaques « Alpha Lavale M15 » tout en se focalisant sur l'évaluation de la surface d'échange et la détermination de son efficacité. Ce travail est divisé en trois parties :

- Le 1^{er} chapitre aborde des généralités sur le transfert de chaleur et les échangeurs thermiques.
- Le 2^{ème} chapitre est consacré à la présentation d'un type spécifique qui est l'échangeur à plaques.
- Le 3^{ème} chapitre détaille le problème de l'échangeur du complexe El Hadjar, et les étapes du dimensionnement de l'échangeur à plaques « Alpha Lavale M15 », et en dernier nous présentons une interprétation des résultats obtenus.

CHAPITRE I
GENERALITES SUR
L'ECHANGEUR DE
CHALEUR

I.1 Introduction

Dans les installations industrielles, il est souvent nécessaire d'apporter une quantité de chaleur importante à une partie du système. Dans la majorité des cas, la chaleur est transmise à travers un échangeur de chaleur. Dans les échangeurs les plus courants, les deux fluides sont séparés par une paroi à travers laquelle, les échangeurs se font par conduction. La transmission de chaleur fluide-paroi relève essentiellement de la convection. Entre ces extrêmes, se trouvent de nombreux échangeurs à tube et enveloppe de type courant. Ces appareils sont très utilisés, car on peut les construire avec des grandes surfaces d'échange de chaleur dans un volume relativement petit, ils peuvent être fabriqués avec des alliages résistant à la corrosion et sont employés pour chauffer, refroidir, évaporer ou condenser toute sorte de fluide.

I.2 Le transfert de chaleur

Lorsque deux corps, ou deux milieux, ne sont pas à la même température, ils ne sont pas en équilibre thermique. On peut alors observer un passage d'énergie calorifique de chaleur, du corps, ou du milieu, le plus chaud vers le corps, ou le milieu, le plus froid. On sait que le transfert de chaleur spontané est impossible d'un milieu froid vers un milieu chaud (**Wuithier, 1987**). Pour se transmettre, la chaleur fait appel à trois mécanismes fondamentaux : La conduction, la convection, et le rayonnement.

I.2.1 La conduction

C'est le transfert d'énergie interne dû aux agitations moléculaires du système thermodynamique, en présence de source de chaleur les molécules près de la source commencent à vibrer et font vibrer les molécules voisine, la propagation de chaleur à travers le système n'est que le résultat de propagation d'ondes vibratoires à travers les molécules à l'état microscopique. Il est présent dans tous les corps quel que soit leur état (solide liquide ou gaz). On peut faire directement l'expérience de ce mode de transfert en tenant à la main un barreau métallique, et en mettant l'autre extrémité au contact d'une flamme. Au bout d'un certain temps, on est obligé de lâcher le barreau, pour éviter de se bruler car la chaleur s'est propagée tout le long de ce dernier (**Timothy et al., 2007**).

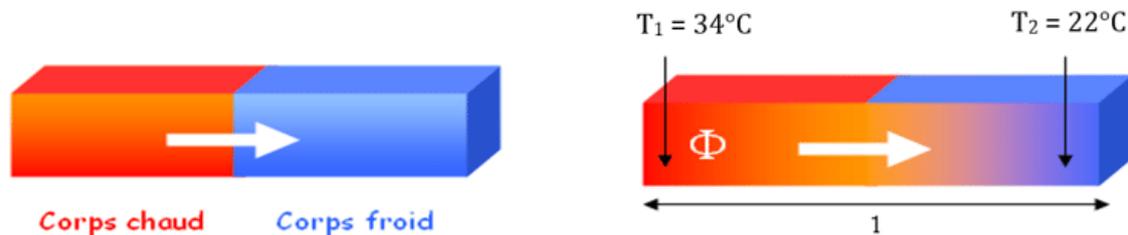


Figure 1. Principe de la conduction (google image)

I.2.2 La convection

C'est le mode de transfert le plus important entre une surface et un fluide (liquide ou gaz) mais qui exige le mouvement des fluides. On distingue deux types de convection :

- **Convection naturelle** : Dans un fluide les différences de masse volumique liée aux différences de températures produisent le mouvement du fluide qui s'échauffe en contact des corps chauds, en transportant de la chaleur sur les surfaces froides.
- **Convection forcée** : Le mouvement peut être communiqué par un appareil extérieur tel qu'un ventilateur dans le cas de radiation soufflants, ou une pompe forçant la circulation d'eau chaude d'un chauffage central le transfert se fait alors par convection forcée avec des vitesses de circulation généralement supérieures à celles rencontrées en convection naturelle. Donc, généralement la convection forcée est provoquée, dans une conduite par la différence d'altitude de deux sections d'une conduite (TOTAL, 2007).

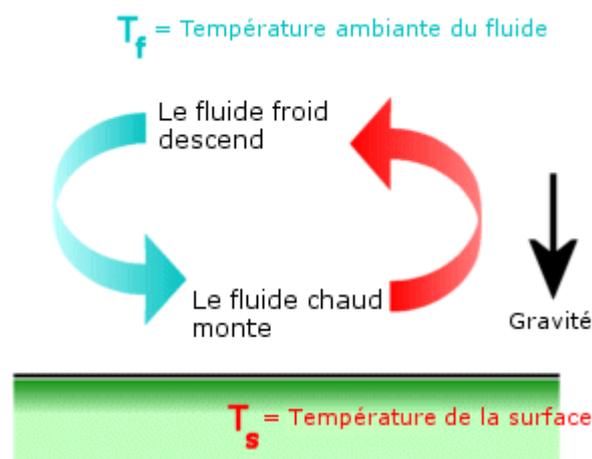


Figure 2. Principe de la convection (google image)

I.2.3 Transfert de chaleur par rayonnement

Un point matériel chauffé émet un rayonnement électromagnétique dans toutes les directions situées d'un même côté du plan tangent au point matériel. Lorsque ce rayonnement frappe un corps quelconque, une partie peut être réfléchiée, une autre transmise à travers le corps, et le reste est quantitativement absorbé sous forme de chaleur. Il est fondamentalement différent des deux autres types de transfert, et ce parce que les substances qui échangent de la chaleur n'ont pas besoin d'être en contact l'une à l'autre, elles peuvent même être séparées par le vide. Le rayonnement est l'émission d'ondes électromagnétiques par un corps chauffé selon la théorie quantique (TOTAL, 2007).

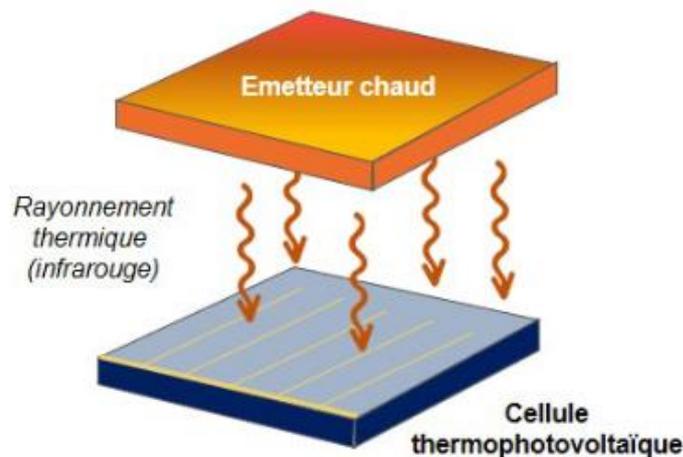


Figure 3. Transfert de chaleur par rayonnement (google image)

Dans la réalité, tout échange thermique s'effectue simultanément et éventuellement sous trois modes de transfert qui se concurrencent, l'échange est alors la somme des trois effets. Cependant, lorsque l'un des modes est prédominant, on négligera l'effet des deux autres. Les procédés utilisés dans l'industrie demandent souvent que les fluides traités soient réchauffés ou refroidis avec ou sans changement de phases au cours des diverses opérations auxquelles ils sont soumis. La chaleur mise en œuvre représente une importante dépense d'énergie dont il est nécessaire de récupérer la plus grande quantité possible. De ce fait les échangeurs de chaleur constituent des appareillages importants. (Slimi & Zediri, 2019)

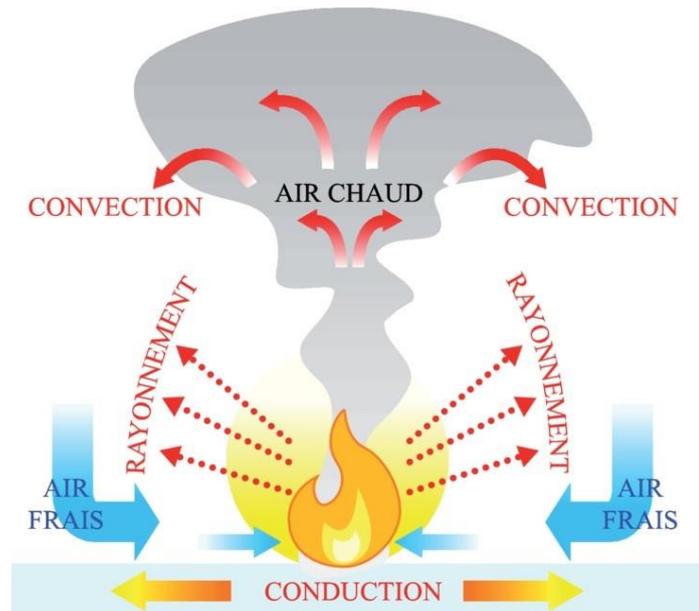


Figure 4. Les modes de transfert thermique regroupés (google image)

I.3 Les échangeurs de chaleur

I.3.1 Définition

Les échangeurs de chaleur sont des appareils permettant de transférer de la chaleur entre deux fluides à des températures différentes. Dans la plupart des cas, les deux fluides ne sont pas en contact, et le transfert s'effectue à travers une surface d'échange. Au sein de la paroi séparatrice, le mécanisme de transmission de la chaleur est la conduction, et sur chacune des deux surfaces de contact avec les fluides, ce sont presque toujours les phénomènes de convection qui prédominent (Chung et Sung, 2003).

I.3.2 Les fonctionnalités des échangeurs thermiques

La fonction principale de l'échangeur thermique est de transférer de l'énergie thermique d'un fluide vers un autre à des niveaux de températures distincts. Les fonctionnalités des échangeurs thermiques sont extrêmement diverses et variées. On peut, entre autres, citer les principales fonctionnalités suivantes (Christophe et Christophe, 2014):

- Préchauffeur ou refroidisseur d'un liquide ou d'un gaz (air par exemple) pour lesquels de très nombreux exemples pourraient être rappelés et qui se caractérise par une fonction simple : le contrôle de la température du fluide en un point particulier du procédé ;
- Récupérateur thermique qui permet d'introduire la récente notion de valorisation de l'énergie thermique d'un procédé. La fonction de cet échangeur est alors d'assurer le

transfert d'une capacité thermique maximale afin de permettre une valorisation maximale du rejet thermique sur des critères énergétiques et économiques ;

- Réfrigérants (et aéro-réfrigérant lorsque le vecteur de refroidissement est l'air, réfrigérant sur eau...) qui assure la dissipation de l'énergie thermique non valorisable d'un procédé vers le milieu extérieur ;
- Capteurs ou émetteurs thermiques dont les équipements ont pour fonction, respectivement, d'associer réception d'énergie thermique et transmission vers l'usage (les capteurs solaires thermiques, les radiateurs domestiques) ;
- Déshumidificateurs ou condenseurs partiels qui assurent la condensation d'une vapeur en mélange avec un gaz incondensable pour obtenir, en fin d'opération, un gaz appauvri en vapeur ;
- Évaporateurs qui assurent l'évaporation complète ou partielle d'un liquide dans différents procédés notamment de production d'énergie mécanique et de production frigorifique ;
- Condenseurs qui assurent la condensation complète ou partielle d'un gaz (vapeur) là encore par exemple pour la production d'énergie mécanique et frigorifique ;
- Équipements qui permettent la congélation et la fusion d'une phase liquide ou vapeur grâce à une paroi refroidie en dessous du point triple du fluide ;
- Le caloduc (Heat Pipe), véritable système thermique diphasique, qui permet notamment d'assurer la dissipation de la chaleur générée par les éléments électroniques (Microprocesseur, électronique embarquée...etc.), la récupération d'énergie, le maintien en température stable et uniforme...etc. Pour plus d'informations sur les caloducs vous pouvez vous référer à (Chaudourne, 1982 ; Reay *et al.*, 2014).

I.3.3 Classification des échangeurs de chaleur

Il existe plusieurs critères de classement des différents types d'échangeurs de chaleur, ces derniers peuvent être classés comme suit :

I.3.3.1 Classement suivant le mode de transfert de chaleur

Lorsqu'un corps plus chaud se trouve en présence d'un corps plus froid l'expérience nous montre qu'il y a transmission de chaleur, c'est à dire qu'une augmentation de température se produit dans le corps le plus froid et une diminution de température se produit dans le corps le plus chaud ; la transmission de chaleur demeure jusqu'à ce que les températures des deux corps soient égales. Ainsi, dans le même corps il y a transmission de chaleur lorsque deux points présentent des températures différentes.

D'après ce que nous venons de dire la transmission de chaleur se produit en cas de différence de températures. En effet c'est l'unique condition car, comme nous le verrons par la

suite, il n'est pas nécessaire que les corps soient en contact direct pour qu'il y ait transmission de chaleur (Ougana, 2019).

I.3.3.2 Classement selon les écoulements

Une classification des échangeurs peut être établie d'après le sens relatif des écoulements des fluides. On distingue ainsi notamment : (Bontemps *et al.*, 1995)

- **Les échangeurs à courants parallèles** : les deux fluides s'écoulent parallèlement et dans le même sens

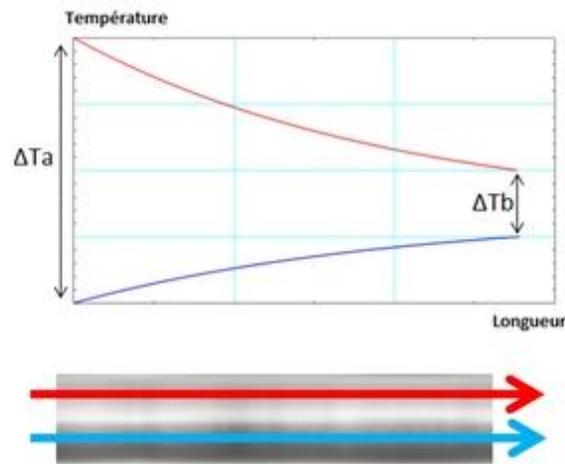


Figure 5. Échangeur à courant parallèle (google image)

- **Les échangeurs à contre-courant** : les deux fluides s'écoulent parallèlement et dans un sens contraire.

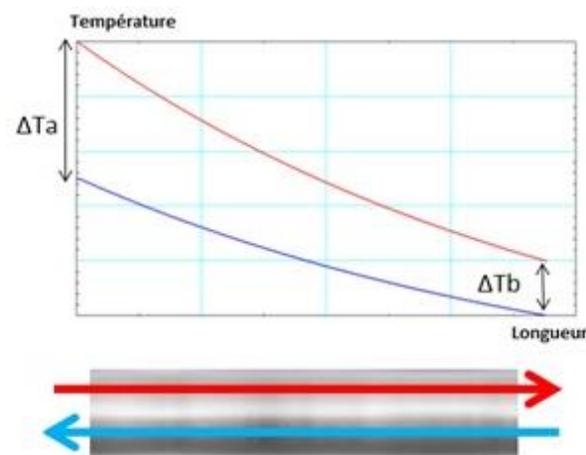


Figure 6. Échangeur à contre-courant (google image)

- **Les échangeurs à courant-croisé** : les deux fluides s'écoulent perpendiculairement l'un à l'autre.

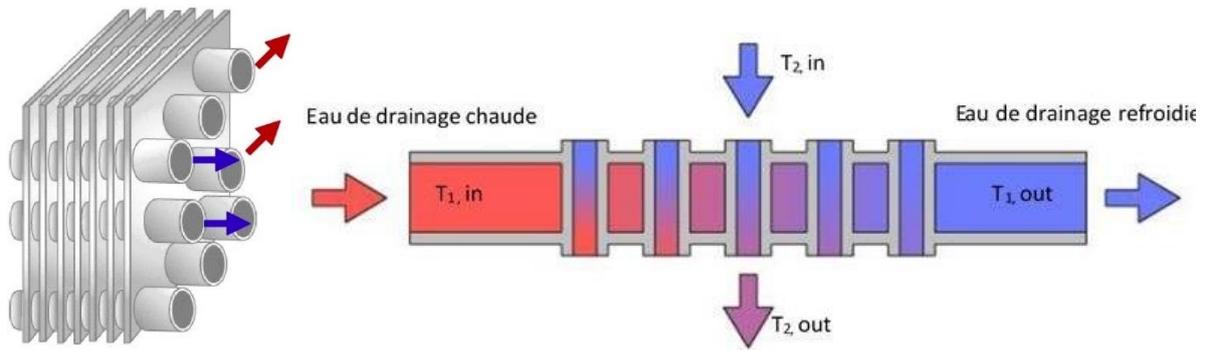


Figure 7. Échangeur à courant-croisé (google image)

I.3.3.3 Classement suivant la nature du matériau de paroi d'échange

On retiendra deux types de paroi : (Ougana, 2019)

- Les échangeurs métalliques en acier, cuivre, aluminium ou matériaux spéciaux superalliages, métaux ou alliages réfractaires ;
- Les échangeurs non métalliques en plastique, céramique, graphite, verre, etc...

I.3.3.4 Classement suivant la compacité de l'échangeur

La compacité est définie par le rapport de l'aire de la surface d'échange au volume de l'échangeur. R.K. Shah propose qu'un échangeur soit considéré comme compact si sa compacité est supérieure à 700 m⁻¹; cette valeur est susceptible de varier de 500 à 800 m⁻¹.

I.3.3.5 Classement fonctionnel

Le passage des fluides dans l'échangeur peut s'effectuer avec ou sans changement de phase ; suivant le cas, on dit que l'on a un écoulement monophasique ou diphasique. On rencontre alors les différents cas suivants :

- Les deux fluides ont un écoulement monophasique.
- Un seul fluide a un écoulement avec changement de phase, cas des évaporateurs ou des condenseurs.
- Les deux fluides ont un écoulement avec changement déphasés, cas des évapocondenseurs (Hamouzi et Bouchareb, 2015).

I.3.3.6 Classement technologique

Les principaux types d'échangeurs rencontrés dans ce type, sont les suivants :

- Les échangeurs à tubes : monotubes, coaxiaux ou multitubulaires.
- Les échangeurs à plaques : à surface primaire ou à surface secondaire.
- Les échangeurs d'autres types : contact direct, à caloducs ou à lit fluidisé

I.3.4 Les différents types des échangeurs thermiques

I.3.4.1 Les échangeurs tubulaires

Pour des raisons historiques et économiques, les échangeurs utilisant les tubes comme constituant principal de la paroi d'échange sont les plus répandus. On peut distinguer trois catégories suivant le nombre de tubes et leur arrangement, toujours réalisés pour avoir la meilleure efficacité possible pour une utilisation donnée (Bontemps et al., 1995).

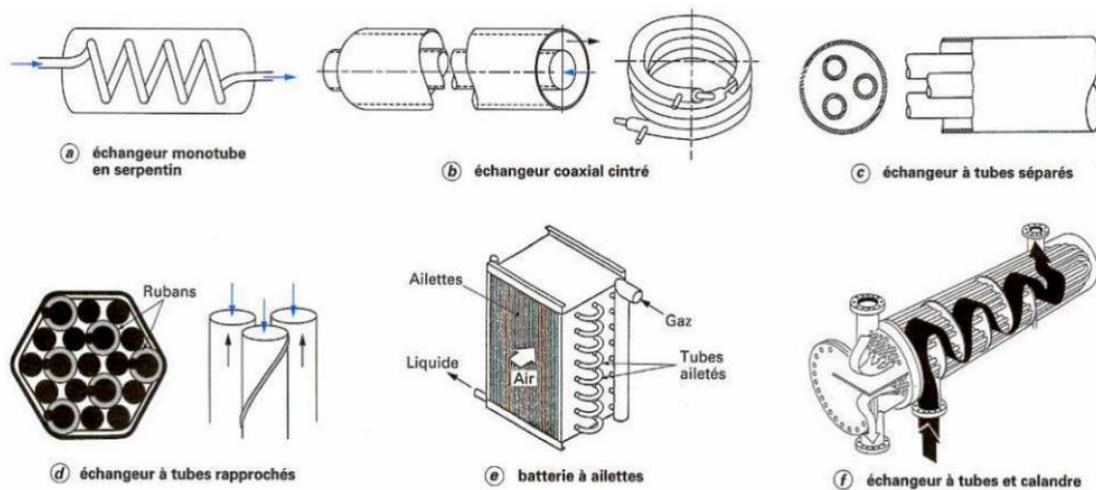


Figure 8. Les différents types d'un échangeur à tubulaire (google image)

- **Échangeur monotube** : Dans lequel le tube est placé à l'intérieur d'un réservoir et a généralement la forme d'un serpentín comme montré à la figure au-dessus.
- **Échangeur coaxial** : Dans lequel les tubes sont le plus souvent cintrés ; en général, le fluide chaud ou le fluide à haute pression s'écoule dans le tube intérieur comme montré à la figure au-dessus (Bontemps et al., 1995).

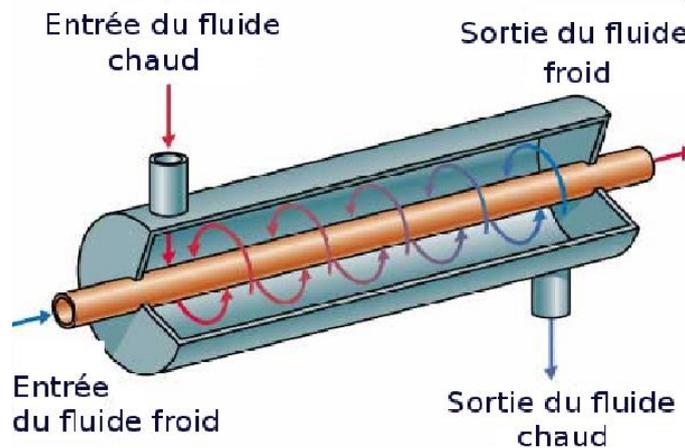


Figure 9. Échangeur coaxial (Adil, 2009).

I.3.4.2 Échangeur multitubulaire

Existant sous quatre formes :

- Échangeur à tubes séparés

À l'intérieur d'un tube de diamètre suffisant (de l'ordre de 100 mm) se trouvent placés plusieurs tubes de petit diamètre (8 à 20 mm) maintenus écartés par des entretoises. L'échangeur peut être soit rectiligne, soit enroulé (Bontemps *et al.*, 1995).

- Échangeur à tubes rapprochés

Pour maintenir les tubes et obtenir un passage suffisant pour le fluide extérieur au tube, on place un ruban enroulé en spirale autour de certains d'entre eux. Les tubes s'appuient les uns sur les autres par l'intermédiaire des rubans. (Bontemps *et al.*, 1995)

- Échangeur à tubes ailettes

Ces tubes permettent d'améliorer le coefficient d'échange thermique ; différents types d'ailettes sont toutefois présentés si contre (Bontemps *et al.*, 1995).

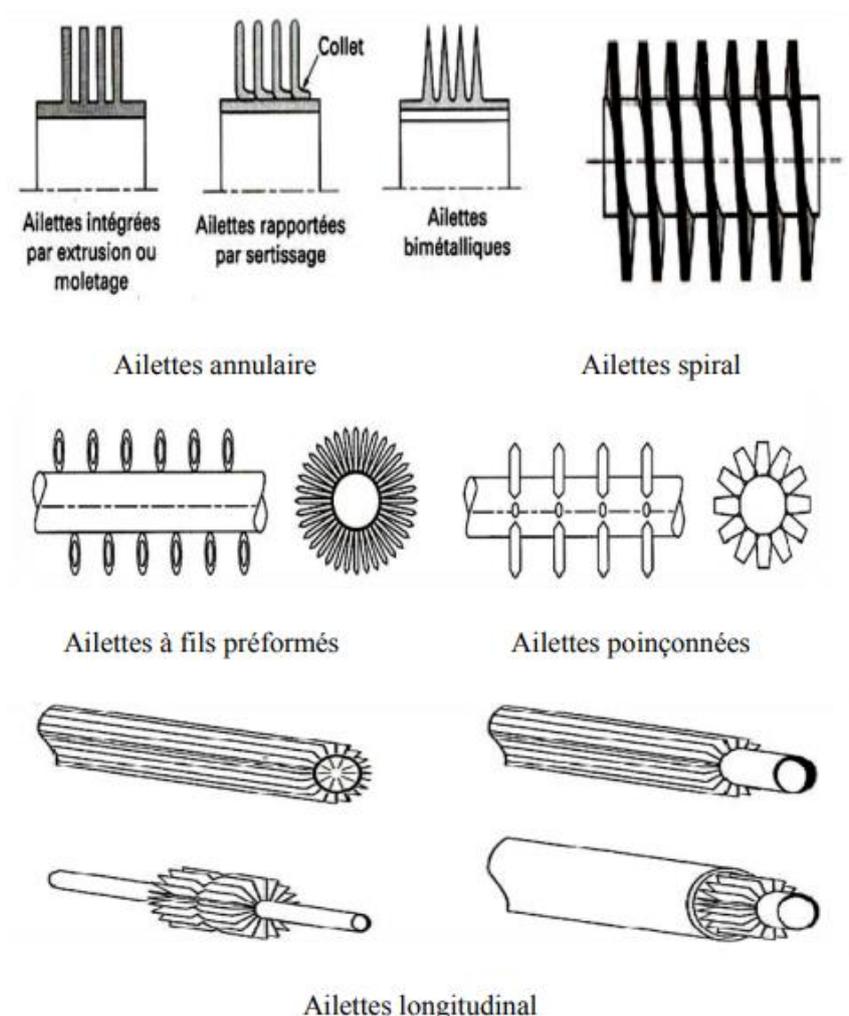


Figure 10. Les différentes formes des ailettes pour Échangeur à tubes ailettes (google image)

I.3.4.3 Echangeur à tube et calandre

- **Echangeur de chaleur à tête flottante**

L'une des plaques tubulaires est fixe, bloquée entre les brides de la calandre et de la boîte de distribution. La seconde plaque, d'un diamètre inférieur, porte la boîte de retour et peut coulisser librement à l'intérieur du capot qui ferme la calandre (**Menidjel, 2009**).

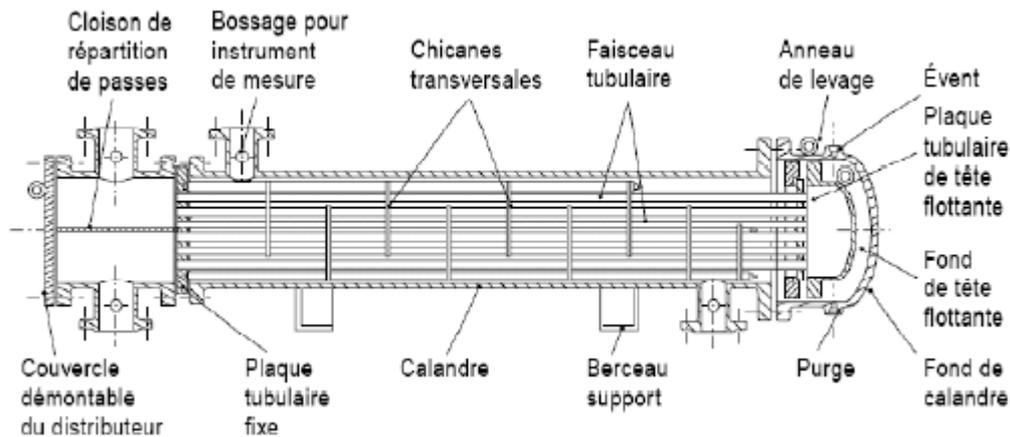


Figure 11. Échangeur à tête flottante (google image)

- **Echangeur à plaques tubulaires fixes**

Dans ce cas, les plaques tubulaires peuvent être directement soudées sur la calandre (**Menidjel, 2009**).

- **Echangeur à tubes en U**

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 (**Menidjel, 2009**).

I.3.4.4 Echangeur à plaques

- **Échangeurs à surface primaire**

Les échangeurs à surface primaire sont constitués de plaques corruguées, nervurées ou picotées. Le dessin du profil de plaques peut être assez varié mais il a toujours un double rôle d'intensification du transfert de chaleur et de tenue à la pression par multiplication des points de contact. (**Bontemps et al., 1995**)

- **Échangeurs à plaques et joints**

La surface d'échange est alors composée de plaques métalliques, équipées de joints, serrées les unes contre les autres à l'aide de tirants entre deux flasques, l'un fixe, l'autre mobile. (**Chung et Sung, 2003**)

- **Échangeurs à plaques soudées ou brasées**

Ils sont utilisés en récupération de chaleur, dans les domaines de la chimie, de la pétrochimie, de l'agro-alimentaire, etc. Parmi leur différent type :

- **Échangeur platulaire**

Qui contient des :

- Échangeur Compabloc
- Échangeur Packinox
- Échangeur lamellaire
- Échangeur à spirale
- Échangeur brasé (**Bontemps et al., 1995**)

I.3.4.5 Échangeurs avec un fluide changeant de phase

L'un des deux fluides peut subir un changement de phase à l'intérieur de l'échangeur. C'est le cas des *évaporateurs* si le fluide froid passe de l'état liquide à l'état gazeux, ou des *condenseurs* si le fluide chaud se condense de l'état de vapeur à l'état liquide.

- **Évaporateurs tubulaires**

Ces appareils sont généralement utilisés pour concentrer une solution, refroidir un fluide, ou produire de la vapeur. Le fluide chauffant peut être une phase liquide qui transmet sa chaleur sensible ou de la vapeur cédant sa chaleur latente de condensation sur la paroi.

Il existe deux types d'évaporateurs, qui sont : (**Brau, 2006**)

Évaporateurs à l'intérieur de tubes

On distingue les évaporateurs à tubes verticaux et ceux à tubes horizontaux :

a) Évaporations à tubes verticaux

Ces appareils sont utilisés pour concentrer une solution, fournir de la vapeur nécessaire au réchauffement d'un fluide à distiller ou comme évaporateurs cristallisateurs. Les tubes sont généralement chauffés extérieurement par de la vapeur qui se condense.

b) Évaporateurs à tubes horizontaux

Ces appareils sont généralement utilisés comme refroidisseurs de liquide (eau, saumure, eau glycolée, etc.). Le liquide à évaporer qui circule dans les tubes est un fluide frigorigène, alors que le fluide à refroidir circule à l'extérieur des tubes. (**Brau, 2006**)

Évaporation à l'extérieur de tubes

Ces évaporateurs utilisent généralement des tubes horizontaux. On distingue deux types : les évaporateurs noyés (ou submergés) et les évaporateurs arrosés (ou aspergés).

- **Condenseurs tubulaires**

Le but de ces échangeurs est de condenser une vapeur à l'aide d'un fluide réfrigérant. Ils concernent des secteurs d'activité très variés comme la production d'énergie (centrale thermique), les industries chimiques (colonnes à distillation), les industries du génie climatique, de l'agro-alimentaire, du séchage, etc.

I.3.5 Domaine d'utilisation des échangeurs de chaleur

- Chauffage de produits thermosensibles (pasteurisation du lait).
- Chauffage et refroidissements de produits visqueux.
- Raffinerie
- Préchauffage ou refroidissement de gaz
- Récupérateur thermique
- Capteurs ou émetteurs thermique
- Déshumidificateur
- Evaporateur
- Equipement qui permet la congélation et la fusion d'une phase vapeur
- Caloduc (refroidir les appareils électroniques)

CHAPITRE II
L'ECHANGEUR A
PLAQUES

II.1 Introduction

Les échangeurs de chaleur consistent à satisfaire la dualité entre le transfert de chaleur et la perte de charge pour avoir un compromis entre la maximisation du transfert et la minimisation de la perte de charge en se limitant toujours à optimiser les coûts d'investissement avec un bon rendement. Vu l'importance industrielles des échangeurs de chaleur, il existe une diversité des différents types des échangeurs de chaleur qui ont de nombreuses applications dans les différents domaines. De ce fait, on ce qui suit on va étudier l'échangeur à plaques.

II.2 Définition

Les échangeurs à plaques sont des dispositifs de transfert de chaleur qui utilisent une série de plaques minces, généralement métalliques, pour transférer la chaleur entre deux fluides sans les mélanger (**Kakaç et al., 2012**).



Figure 12. Des variétés des échangeurs à plaques d'Alpha Laval (google image)

Les échangeurs à plaques sont constitués par un assemblage de plaques cannelées indépendantes. Les plaques sont encastrées et serrées dans un bâti. Chaque paire de plaques adjacentes forme un canal et les deux fluides (produits et fluide caloporteur) circulent alternativement dans les canaux. L'échangeur à plaques est un appareil qui permet un transfert de chaleur entre deux liquides ayant des températures différentes et ce, sans contact direct entre les liquides. Ce sont des plaques d'acier inoxydable qui assurent le passage de la chaleur d'un liquide à l'autre (**Boudaoud et EL Haci, 2019**).

II.3 Bref Historique

Le concept des échangeurs à plaques date du début du siècle ; développés exactement dans les années 1920 par Dr. Richard Seligman, ces échangeurs ont été étudiés à l'origine pour répondre aux besoins de l'industrie laitière, dont la première utilisation commerciale était pour la pasteurisation du lait (**Seligman, 1934**), puis utilisés par la suite dans diverses branches de l'industrie (chimie, nucléaire, etc.). On regroupe sous ce vocable différentes technologies dont certaines sont d'un développement assez récent. (**Minvielle, 2021**)

II.4 Composition et fonctionnement

II.4.1 Composants et structure

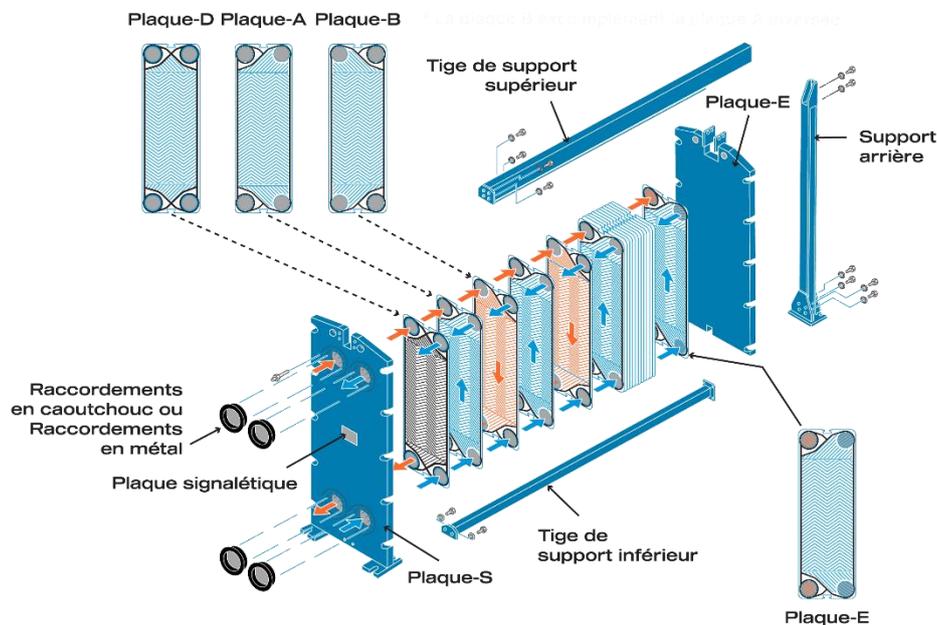


Figure 13. Les composantes d'un échangeur à plaques (google image)

II.4.1.1 Plaques

Les plaques doivent résister à la corrosion et aux hautes températures, elles peuvent être soit en acier inoxydable (304, 316), titane, Hastelloy qui est une gamme d'alliages de nickel, résistant à la corrosion, parfois à haute température et sous contraintes mécaniques sévères (**Wang et al., 2007**). On les trouve sous forme rectangulaires ou circulaires, avec des épaisseurs typiques de 0,4 à 1 mm (**Wang et al., 2007**). Les plaques ont plusieurs motifs : en chevrons, ondulations, ou motifs en vagues pour augmenter la turbulence et l'échange thermique.

II.4.1.2 Joints d'étanchéité

Ils servent à empêcher les fuites et séparer les flux de fluides, son Matériau est choisit selon la compatibilité chimique et la température soit en nitrile (NBR), EPDM, FKM (Viton), (Pakkanen, 2015).

II.4.1.3 Bâti

Il est composé de plaques de serrage et de barres de support pour maintenir l'alignement et la compression des plaques.

II.4.2 Principe de fonctionnement et transfert de chaleur

L'échangeur de chaleur à plaques comprend des plaques profilées et empilées présentant des orifices de passage et formant un paquet de fentes d'écoulement. Les canaux (créés par l'empilement des plaques) sont parcourus, à raison d'un sur deux, par les deux fluides participant à l'échange de chaleur. Les canaux sont formés entre les plaques et les passages de coins sont disposés de façon que les deux milieux circulent par des canaux alternatifs. La chaleur est transférée à travers la plaque entre les canaux et le flux à contre-courant est créé pour assurer une plus grande efficacité. L'ondulation des plaques fournit le passage entre elles, supportent chaque plaque contre adjacente, et augmente la turbulence, donnant lieu à un transfert de chaleur plus efficace.

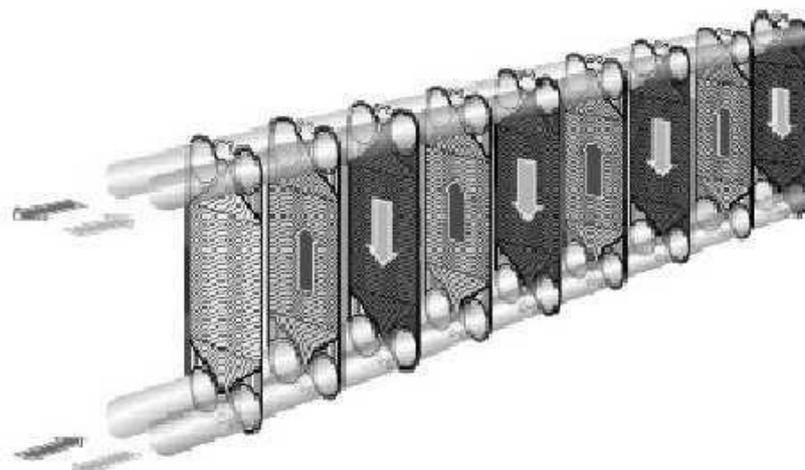


Figure 14. Schéma d'un échangeur à plaques avec écoulement des fluides (google image)

Les fluides chaud et froid circulent dans des canaux alternés formés par les plaques. La chaleur traverse les parois des plaques du fluide le plus chaud vers le fluide le plus froid (Kakaç *et al.*, 2012), selon les principes suivants :

- **Convection** : C'est le principal mode de transfert. Le coefficient de convection (h) dépend de la vitesse du fluide, de la viscosité, et de la géométrie des plaques (Muley & Manglik, 1999).
- **Conduction** : À travers l'épaisseur des plaques. La conductivité thermique (k) du matériau est cruciale.
- **Influence de la turbulence** : Les motifs des plaques créent une turbulence même à faible débit, augmentant le coefficient de convection (h). (Muley & Manglik, 1999).
- **Équation de base** : (Incropera *et al.*, 2007).

$$Q = U * S * \Delta TLM$$

Où :

Q : le taux de transfert de chaleur,

U : le coefficient global de transfert,

S : la surface d'échange,

ΔTLM : la différence de température moyenne logarithmique

II.5 Technologie des plaques

Les plaques d'un échangeur de chaleur sont en général en forme de chevron pour augmenter la turbulence et ménager des points d'appuis pour résister à la pression. Leur faible épaisseur permet d'utiliser des matériaux de bonne qualité ayant une bonne tenue à la corrosion (acier inox, titane, etc.). De plus, les joints en polymères assurent un double rôle dans l'échangeur de chaleur à plaque jointé : étanchéité et répartition des fluides dans l'échangeur.

Parmi les techniques de fabrication des plaques d'un échangeur de chaleur, nous citons les plus répandus dans le marché :

II.5.1 Plaque à canal large

Avec des canaux de 12 mm sans points de contact, cette plaque est idéale pour les fluides contenant des fibres ou des particules de grande taille. Chaque canal a été conçu pour éliminer le passage des solides dans la zone d'entrée. La figure ci-contre représente une plaque à canal large. (Alpha Laval, 2018)

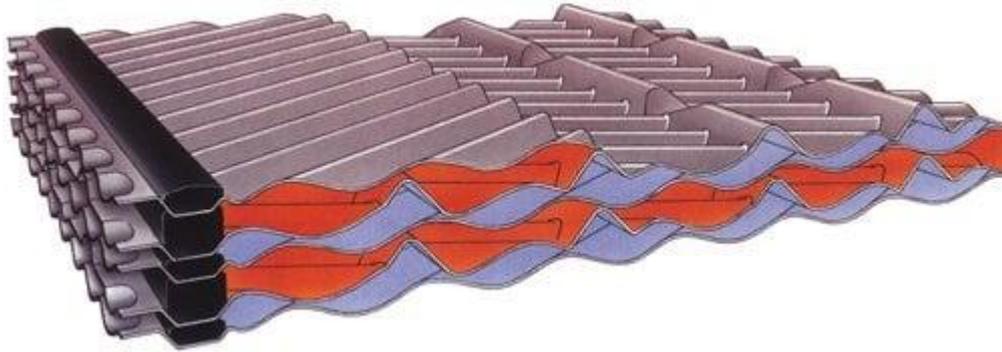


Figure 15. Plaque à canal large (google image)

II.5.2 Plaque à double paroi

Composée de plaques comprimées simultanément et soudées au laser sur le port, cette plaque est conçue pour les applications nécessitant une fiabilité totale contre le brassage. La défaillance d'une plaque entraîne une détection externe sans fuite interne. La seconde paroi assure une double barrière entre les fluides, répondant aux normes sanitaires locales. (Alpha Laval, 2018)

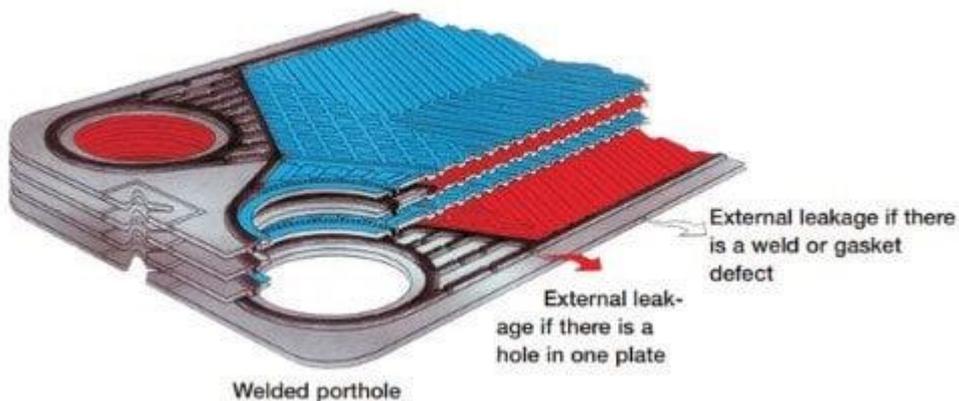


Figure 16. Plaque à double paroi (google image)

II.5.3 Plaque semi-soudée

La Figure suivante présente deux plaques semi-soudée, séparés avec des joints. (Alpha Laval, 2018)

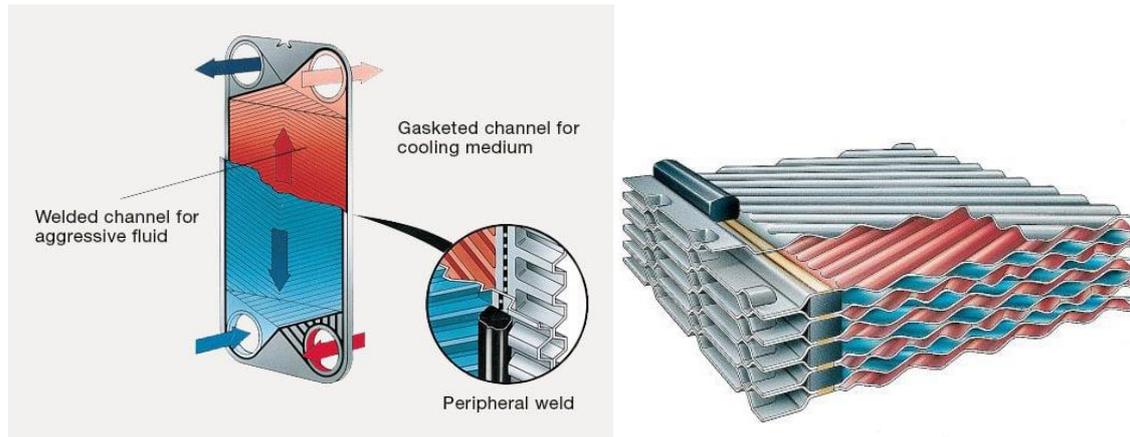


Figure 17. Plaque semi-soudée (google image)

II.5.4 Types d'échangeurs à plaques

On distingue suivant la géométrie de canal utilisée les échangeurs à surface primaire et les échangeurs à surface secondaire.

II.5.4.1 Les échangeurs à surface primaire

Les échangeurs à surface primaire sont constitués de plaques corruguées, nervurées ou picotées. Le dessin du profil de plaques peut être assez varié mais il a toujours un double rôle d'intensification du transfert de chaleur et de tenue à la pression par multiplication des points de contact.

II.5.4.1.1 L'échangeur à plaques et joints

C'est le type le plus commun, dont les applications sont limitées par la pression maximale de service et par la pression différentielle entre les deux fluides (Carlson, 2011). On peut réaliser industriellement aujourd'hui des échangeurs fonctionnant à des pressions de l'ordre de 15 à 20 bars ; la température maximale de service est limitée par la nature des joints. On admet, comme limite supérieure d'utilisation des joints standards, une valeur de l'ordre de 150 °C et de 230 °C pour les joints spéciaux.

II.5.4.1.2 Les échangeurs avec plaques soudées ou brasées

Ils permettent d'utiliser ces surfaces d'échanges primaires à des niveaux de température et de pression plus élevés que les échangeurs à plaques et joints. Tous les fluides

peuvent être véhiculés dans ces échangeurs, mais les fluides encrassants sont à utiliser avec précaution.

Les plaques brasées se constituent des plaques soudées avec du cuivre ou du nickel, sans joints (**Palm & Claesson, 2006**). Ils sont compacts, pour hautes pressions (jusqu'à 50 bar), mais non démontables. Cependant, les plaques soudées utilisent la soudure laser ou par faisceau d'électrons pour conditions extrêmes (**Carlson, 2011**).

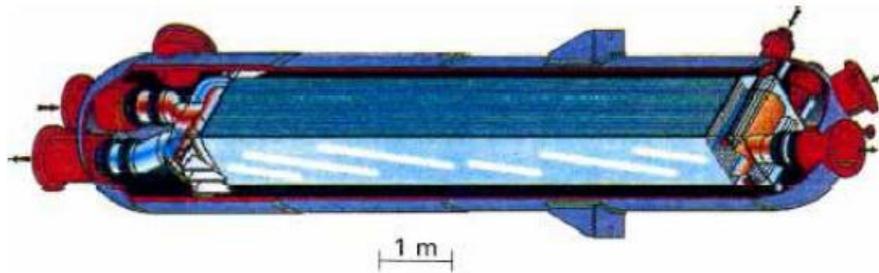


Figure 18. Échangeur Packinox (google image)

Échangeur Packinox : C'est un échangeur à plaques soudées de grandes dimensions. Le faisceau est constitué d'un empilement de plaques formées par explosion et insérées dans une calandre pouvant atteindre une longueur de plus de 10 m. Cet échangeur peut fonctionner jusqu'à des températures de l'ordre de 600 °C et des pressions de 50 bars. (**Bontemps et al., 1995**)

II.5.4.2 Les échangeurs à surface secondaire

Ils utilisent des ailettes plissées ou ondulées qui sont insérées entre les plaques. Pour des applications sur l'air atmosphérique, ces échangeurs sont fabriqués en tôle légère alors que, pour des applications cryogéniques ou aéronautiques, les matériaux utilisés sont l'aluminium ou l'acier inoxydable, l'assemblage de l'échangeur se faisant au moyen d'une technique de brasage sous vide. (**Minvielle et al., 2021**)

II.6 Avantages par rapport à d'autres types d'échangeurs

- Efficacité thermique : Coefficients U jusqu'à 7500 W/(m²·K), contre 1000 pour les échangeurs tubulaires (**Gut & Pinto, 2003**).
- Compacité : Surface d'échange jusqu'à 5 fois plus grande par unité de volume (**Gut & Pinto, 2003**).

- Faible encrassement : Les hautes turbulences réduisent les dépôts (**Mayer et al., 2013**).
- Flexibilité et maintenance : Capacité ajustable et facilité de nettoyage.

II.7 Applications industrielles

- Alimentaire et boissons : pour la pasteurisation, stérilisation, refroidissement de produits laitiers (**Lewis & Deeth, 2009**).
- Chauffage, ventilation et climatisation (CVC) : dans le chauffage urbain, pompes à chaleur, récupération de chaleur (**Hesselgreaves, 2001**).
- Chimique et pétrochimique : pour le refroidissement de réacteurs, condensation de vapeurs (**Klemeš et al., 2015**).
- Énergie, marine, et pharmaceutique : Diverses applications de chauffage et refroidissement, des échangeurs en acier inoxydable sont également utilisés. (**Bontemps et al., 1995**)
- Le domaine de la cryogénie : où leur efficacité est élevée avec des niveaux de températures compris entre -269 et + 65 °C et des niveaux de pression pouvant atteindre 75 bars.

II.8 Maintenance et dépannage

II.8.1 Nettoyage

Il existe deux méthodes de nettoyage :

- **Chimique** : Solutions acides (HCl, H₂SO₄) pour le tartre, alcalines (NaOH) pour les graisses (**Bansal et al., 2000**).
- **Mécanique** : Jet d'eau haute pression, brossage pour les BHE.

II.8.2 Fuites

Les échangeurs peuvent avoir des fuites dues généralement à un joint usé, une plaque déformée, un serrage incorrect...etc. pour cela on utilise des tests spécifiques pour les détecter tels que le test à la fluorescéine, et le test d'ultrasons (**Reppich & Stephan, 2007**).

II.9 Innovations et tendances futures

L'innovation dans les échangeurs à plaque peut se faire à plusieurs niveaux :

Matériaux :

- Polymères pour applications à basse température (**Ma et al., 2019**).
- Revêtements anti-corrosion (PTFE, PFA) pour milieux agressifs.

Industrie :

- Capteurs intégrés et maintenance prédictive basée sur l'IA (**Diaz et al., 2020**).

Efficacité énergétique :

- Optimisation des motifs pour réduire les pertes de charge.

CHAPITRE III
DIMENSIONNEMENT
D'UN ECHANGEUR A
PLAQUES

III.1 Introduction

Les échangeurs sont des équipements importants et au même temps, ils sont complexes à dimensionner. Chaque échangeur est particulier à cause des fluides qui y circulent. On s'intéresse dans cette étude aux échangeurs à tube et calandre qui sont très utilisés dans le domaine pétrochimie.

III.2 Présentation du contexte d'étude

III.2.1 Présentation du Complexe El Hadjar

Complexe sidérurgique intégré, filiale du groupe IMITAL, placé sous la tutelle du Ministère de l'Industrie et des Mines, est une entreprise créée en 03 septembre 1964. Il se situe à 12km d'Annaba avec une superficie de 832 hectares, dont trois cents (300) hectares occupés par les ateliers de production, Trois cents (300) hectares réservés au stockage des matières premières et des produits sidérurgiques, deux cents (200) hectares affectés aux structures de services.

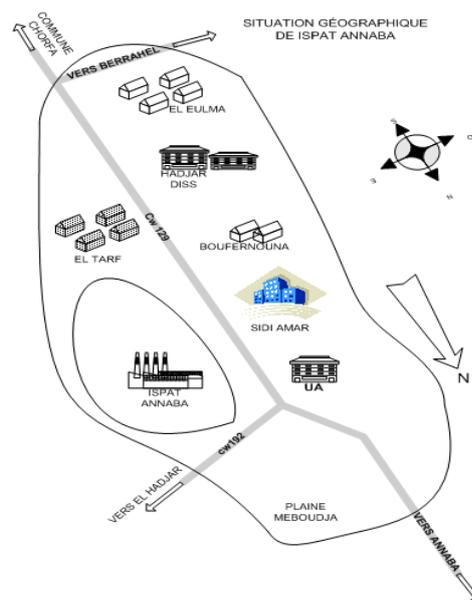


Figure 19. Situation géographique

Ce complexe dispose de ses propres installations maritimes reliées au réseau ferroviaire pour le transport des matières premières et les expéditions des produits finis. Il dispose aussi d'un réseau commercial composé de 7 points de vente à travers le territoire national.

En matière de besoins en énergie et fluides le complexe est équipé : Trois (3) centrales thermiques, Quatre (4) centrales à oxygène, et Trois (3) usines à eau.

Ce complexe contient des unités spécialisées :

- Unité de production : contient trois zones :
 - Zone chaude : pour la préparation matières et agglomération (PMA), haut fourneau (HF) + coulée pour fonte en gueuse, aciérie à oxygène pour brames (ACO1), aciérie à oxygène pour billettes (ACO2), coulée en source pour lingots (ACE).
 - Zone produits plats : pour fabrication des laminoirs à chaud (LAC + ligne de cisailage), laminoir à froid avec parachèvement et revêtement (LAF/RPA).
 - Zone produits longs : pour production de laminoir à rond à béton (LRB)
 - Unités support et logistiques COX, PDE, FLUIDES, AMM, ATC, MCM, GTM, PORT.

Le rôle principal de ce complexe est la fabrication et commercialisation des produits sidérurgiques finis et semi-finis pour le marché national et international qui sont cités dans le tableau ci-après.

Tableau 1. Produits du complexe, son installation et ses principales utilisations

Installation	Produit	Principaux utilisateurs
Cokerie	Coke	Métallurgie
HF01 et HF02	Fonte	Métallurgie
AC01	Brames	Industrie de transformation
AC02	Billettes	Industrie de transformation
LAC	Tôles fortes, tôles	Construction métallique chantiers navals tube bouteilles à gaz
LAF	Tôles fines	Electroménager mobilier métallique industrie de transformation
Etamage	Fer blanc	Emballage métallique divers pour les industries alimentaires et chimique
Galvanisation	Tôles galvanisées	Bâtiment pour l'agronomie industrie et levage
ACE	Lingots	Recherche et production pétrolière transport des hydrocarbures
LFR	Fil rond à béton	Bâtiment et travaux publics hydraulique
LRB	Rond à béton	Bâtiment et travaux publics hydraulique
TSS	Tube sans soudure	Bâtiment et travaux publics hydraulique

III.2.2 Présentation du laminoir à chaud (LAC)

Le laminoir à chaud est l'unité la plus importante dans le processus de transformation de l'acier (sous forme de brame) au produit fini (bobine). Elle constitue de 5 secteurs : parc à brames (PAB), atelier de rectification de cylindres (ARC), fluide (FLD), train à chaud (TAC), dépôt.

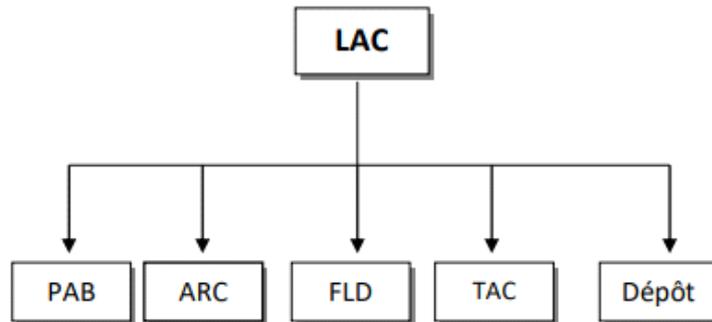


Figure 20. Organisation de l'unité LAC.

III.2.2.1 Rôle du laminage à chaud (LAC)

Le laminage est un processus continu qui consiste à réduire l'épaisseur d'une plaque de métal (chaud) par passage successif entre des cylindres, opérations au cours desquelles la plaque est à la fois écrasée.

Laminoir à chaud fonctionne (3×8) continu avec un périodique de quinze jours, et arrêt systématique annuel, sauf des imprévisibles.

Le laminoir à chaud de SIDER, est un train de laminage du type semi continu capable de transformer des brames d'acier provenant de l'aciérie à oxygène (AC01), en tôles fortes et en bobines.

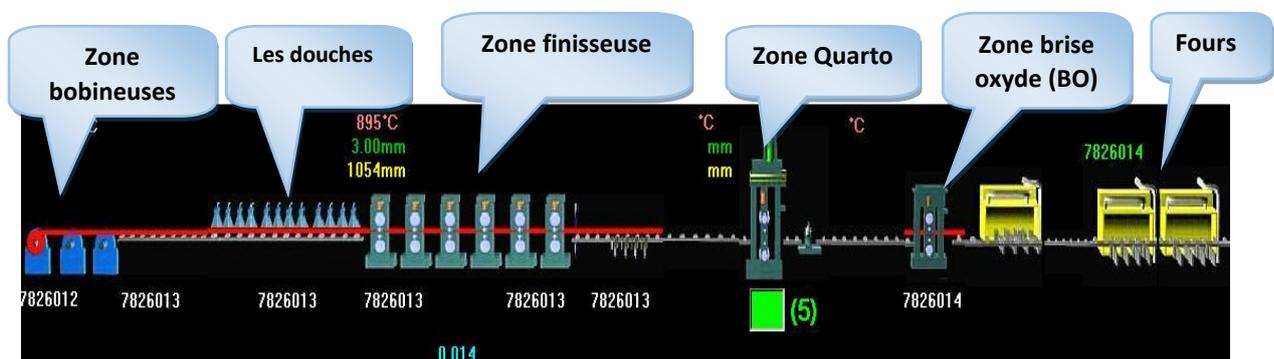


Figure 21. Configuration du train de laminage

III.2.2.2 Description de l'installation

Le laminoir à chaud est situé à l'aval de l'aciérie à oxygène (AC01) et l'amont du laminoir à froid (LAF). Il représente l'une des plus importantes unités de production au sein du complexe, un ensemble de plusieurs installations forment la chaîne du laminage. Pour réchauffage des brames aux températures de 1260 °C – 1300 °C donc le LAC est un atelier qui transforme à chaud des brames d'acier en bondes et tôles fortes.

Le train de laminage comprend les installations suivantes :

▪ Parc des brames

Les brames produites au niveau de l'aciérie à oxygène AC01 sont réceptionnées par deux halles de stockage parallèles au LAC, ensuite les brames subissent un refroidissement à l'air libre ou avec de l'eau dans des piscines.

▪ Fours poussants**• Four N⁰=01**

Il est destiné à réchauffer les brames programmées afin de produire la tôle forte, cette opération vise l'augmentation de l'élasticité du métal et par conséquent on économise l'effort de laminage et pour avoir une meilleure réduction de l'épaisseur et de la largeur.

Le four a les caractéristiques suivantes :

- Longueur L1 =36500 mm
- Largeur L2=6300 mm
- Hauteur H=650 mm
- Capacité C=125t/h
- Température T=1260⁰c

• Les Fours N⁰ 2et N⁰ 3

Ils sont spécialisés pour les brames destinées à la production des bandes fines. Elles ont les caractéristiques suivantes :

- Longueur L₁=32500 mm
- Largeur L₂=9800 mm
- Hauteur H=4700 mm
- Capacité C=240 t/h
- La température T=1250 °C

- **Laveuse à brame**

Cette installation permet d'enlever la calamine qui se forme sur les brames durant leur séjour dans le four, le milieu ambiant ainsi que le temps de séjour contribuent à la formation de cette calamine (oxyde de fer) cette dernière est enlevée par jets d'eau avec une pression de 140 bar.

- **Brise oxyde**

C'est une cage duo universelle, composée deux cylindres horizontaux et deux cylindres verticaux, elle permet l'élimination de la calamine restée adhérente après la laveuse à brame, l'opération se fait par la réduction de l'épaisseur et de la largeur, tout accompagné par un décalaminage à l'eau avec une pression de 140 bar le laminage au niveau de cette cage, permet de diminuer le nombre de passes. Les cylindres de cette cage sont refroidis à l'eau avec une pression de 4 bar (la vitesse de laminage de cette cage est de 1.25 m/s, taux de réduction pouvant atteindre 30 %).

Elle permet à l'aide d'un travail réversible (aller et retour) de réduction l'épaisseur et la largeur des brames jusqu'à l'obtention d'une ébauche ou d'une tôle, dans les dimensions programmées, le nombre de passes (5 à 7 passes) est en fonction de l'épaisseur finale à réaliser.

- **Cage de type quarto**

En amont de cette cage est placée une cage, dénommé « cage edger » permettant la réduction des languers, cette dernière n'est utilisée que dans les trois premières passes impaires, (la vitesse des deux cages est 5 m/s).

- **Planeuse**

A la sortie de quarto, les tôles laminées peuvent présenter une mauvaise planéité qui sera corrigé par cette installation, la planeuse est utilisée seulement lors de laminage des tôles fortes. Elle est constituée de plusieurs rouleaux (9 rouleaux de travail, 27 rouleaux d'appuis et deux rouleaux auxiliaires).

- **Cisaille volante**

Placée devant le train finisseur, cette installation permet l'ébouage des têtes et queues des ébauches, provenant du quarto, afin d'éliminer l'irrégularité de l'épaisseur et de largeur, sur la tête et la queue provoquée par la déformation qu'a subie la brame durant son

ébauchage, la tête est coupée en forme d'arrondie pour faciliter son engagement au train finisseur, tandis que la queue est coupée droite pour éviter son retournement, entre les cages risqueraient d'abimer la surface des cylindres.

- **Train finisseuse (6 cages)**

C'est un train à action continue de la première cage à la dernière cage l'ébauche, durant son passage, est prise dans toutes les cages en même temps, cette installation est destinée à la production des tôles minces livrées en bobine, en réduisant successivement l'épaisseur de l'ébauche, pour la porter jusqu'à la dimension, demandée et de donner à la bobine un profil bien déterminé suivant sa destination, les vitesses du tain finisseur vont de la dernière à la première.

Les cylindres de travail et d'appui sont refroidis à l'eau avec une pression respectivement de 18 à 4 bar.

Le train finisseur est doté des aussi des systèmes de mesure et de contrôles suivants :

- Jauge d'épaisseur à rayons X.
- Jauge de largeur : placée en aval de la jauge d'épaisseur, elle sert pour la mesure des largeurs des bobines.

- **Systèmes de refroidissement des bobines**

Placée à la sortie du train finisseur, ce système permet de refroidir la bobine pour l'obtention des températures de bobinage désirée.

Le refroidissement se fait par écoulement laminaire d'eau cette installation est composée de : 84 caissons supérieurs comportant chacune, 43 buses avec un débit global d'arrosage bobine de 6000m³/heures, 117 rampes inférieures comportant chacune 19 buses avec un débit global unitaire de balayage de 700m³/heures.

- **Table à rouleaux sortie finisseur**

Cette table permet l'acheminement de la bobine, du train finisseur jusqu'aux bobineuses, elle est composée de 264 rouleaux automoteurs, divisée en quatre sections, les vitesses de ces sections sont synchronisées avec celle de la dernière cage finisseuse, respectivement de 7%, 12% et 15% de plus que la vitesse de la cage n° 6.

▪ La bobineuse

Le LAC possède trois bobineuses à la sortie du train finisseur espacé d'une distance bien déterminée, car à la sortie de train peut atteindre une longueur de 500 m, ce qui exige un bon bobinage de la bonde et avoir un produit fini et acceptable pour le client.

• Bobineuses (1) et (2)

- Ils sont entraînés par deux moteurs à courant continu.
- Un rouleau entraîneur ou pinceur.
- Quatre rouleaux presseurs.
- Un mandrin à expansion.

• La bobineuse (3)

- Elle est entraînée par un moteur asynchrone à cage d'écureuil.
- Un rouleau entraîneur ou pinceur.
- Trois rouleaux presseurs.
- Un mandrin à expansion

III.2.2.3 Fonctionnement de laminage d'une bobine

Figure 22. La bobine

Le laminoir à chaud (LAC) est distinct à la production des bobines en acier. La bobine est chauffée au Four (Four 2 ou bien dans Four 3 puisqu'en travail en permutation) à une température 1300 °C, c'est la température qui nous permet d'appliquer des traitements sur la brique comme suite :

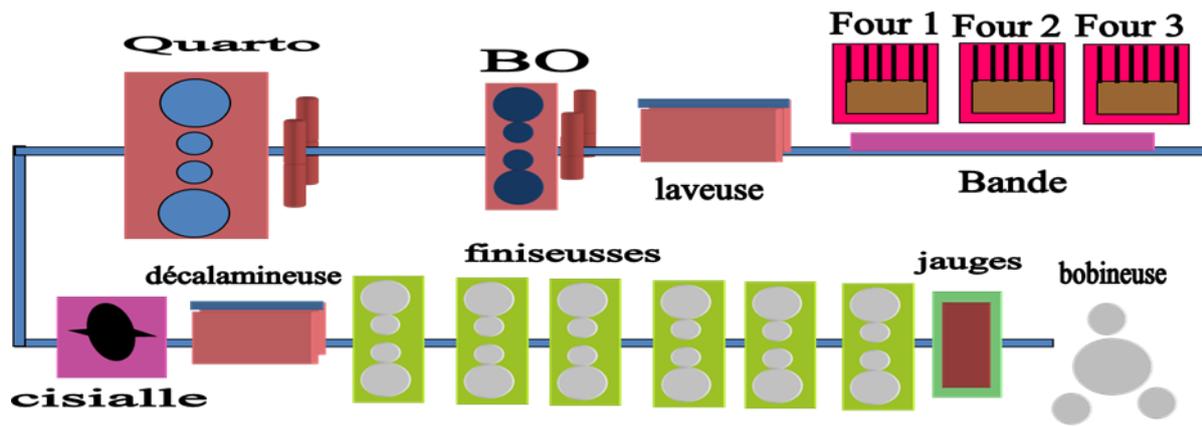


Figure 23. Le laminage

Après enfournement d'une brame sur la voie à rouleaux elle passe par la laveur pour éliminer la calamine qui existe sur brame par une pression de 140 bar d'eau.

En suite la bobine passe par la brise oxyde pour éliminer la couche d'oxyde former sur la brame avec une petite réduction d'épaisseur (faible réduction). Après cette opération cette dernière subit une diminution d'épaisseur par quarto a plusieurs passe de 5 à 7 passe, ou on obtient une bobine, en suite cette dernière passe par le cisaille pour couper la tête et la queue, Après une décalaminisation par la décalamineuse, pour éliminer la calamine après la bobine entrée dans le train finisseur, pour nous donne une épaisseur et largeur demander (du point de vue finition). Puis la bobine passe par une unité de mesure appelé jauge de mesure (épaisseur, profil, largeur, planéité) la bobine maintenant appelée « bobine » en suite la bobine passe par la douche pour diminuer la température à 600 °C en suite la bobine sera bobinée par une des 3 bobineuses

III.2.2.4 Problème et objectif d'étude

L'unité contenant le laminage à chaud (LAC) utilisent un échangeur tubulaire, qui est très performant mais présente le problème d'arrêt soudain avec l'élévation de la température surtout en été, ce qui affecte la production et du complexe et réduit son rendement. Les échangeurs tubulaires présentent effectivement l'inconvénient de ne pas supporter les températures élevées, en raison de plusieurs limitations liées à leur conception et aux matériaux utilisés.

- **Limitations liées aux matériaux**

Les tubes et le caisson des échangeurs tubulaires sont généralement en acier au carbone, en acier inoxydable ou en alliages non ferreux (cuivre, aluminium, etc.). Ces matériaux ont des températures maximales d'utilisation limitées, au-delà desquelles ils peuvent subir une détérioration rapide (ramollissement, corrosion accélérée, fluage, etc.).

- **Contraintes thermiques**

Les gradients thermiques élevés dans les tubes et le caisson peuvent entraîner des contraintes thermiques importantes, pouvant conduire à des déformations, des fissures ou une rupture prématurée. Ces contraintes sont particulièrement critiques aux points de jonction entre les tubes et les plaques tubulaires.

- **Problèmes d'étanchéité**

À haute température, les joints et les garnitures d'étanchéité peuvent se dégrader rapidement, entraînant des fuites. Les dilatations thermiques différentielles peuvent également compromettre l'étanchéité des joints.

- **Limitations liées aux fluides**

Certains fluides, comme les fluides corrosifs, peuvent devenir plus agressifs à haute température, accélérant la dégradation des matériaux de l'échangeur.

Pour ces raisons, les échangeurs tubulaires sont généralement limités à des applications à température modérée (jusqu'à environ 400-500°C). De ce fait, d'autres types d'échangeurs, comme les échangeurs à plaques soudées ou les échangeurs à faisceau tubulaire, sont mieux adaptés grâce à l'utilisation de matériaux réfractaires spéciaux.



Figure 24. L'échangeur tubulaire et la bobine de l'échangeur à plaques du complexe Sider El Hadjar

Donc, les cadres du complexe Sider sont entrain de remplacer l'échangeur tubulaire par un échangeur à plaques « Alpha Lavale M15 » afin d'améliorer les performances l'unité du laminage à chaud LAC. Les échangeurs à plaques sont conçus pour maximiser la surface de transfert de chaleur tout en minimisant la perte de charge. Cela nous a poussé à étudier l'échangeur à plaques, dont on cherche à analyser son efficacité thermique, sa capacité de transfert de chaleur, et à optimiser ses performances pour répondre aux besoins spécifiques de l'application.

Cette étude a pour objectif le dimensionnement de l'échangeur à plaques qui garantit un fonctionnement efficace de l'unité du laminage à chaud en se basant sur les données fournies par l'ingénieur du LAC lors de la période de stage.

III.3 Méthode de dimensionnement de l'échangeur à plaques**III.3.1 Les données caractéristiques des fluides**

Au niveau du LAC, l'échangeur utilisé est traversés par deux fluides : l'eau de refroidissement et l'huile Quintolubric 865-68 qui est le fluide hydraulique HFD-U résistant au feu.

Tableau 2. Les données caractéristiques des fluides (eau et Huile)

Les paramètres	T° d'entrée T _e	T° de sortie T _s	C _p	Q _v	Q _m	ρ _v
L'eau	28°C	33°C	4180 J/Kg	488 L/min	8.09 Kg/s	995.7 kg/m ³
L'huile	45°C	-	2060 J/kg	430 L/min	6.59 kg/s	920kg/m ³

III.3.2 Détermination de la surface d'échange

Comme il ne s'agit pas de mélanger les deux fluides, le transfert de chaleur est organisé au travers d'une paroi de séparation que l'on appelle la "surface d'échange". Pour un échangeur à plaques, elle est composée de plaques métalliques ondulées équipées de joints, serrées les unes contre les autres pour maximiser la surface d'échange thermique.

Elle est déterminée selon l'équation ci-après :

$$Q = U \times S \times \Delta TLM \quad (01)$$

Donc :

$$S = \frac{Q}{U \Delta TLM} \quad (02)$$

Avec :

S : Surface d'échange

Q : Quantité de chaleur

ΔTLM : différence de température logarithmique moyenne

- **La quantité de chaleur ϕ**

En général, le flux échangé à travers une surface n'est pas uniforme sur toute la surface. On définit alors une densité de flux de chaleur, ϕ , qui correspond à un flux de chaleur par unité de surface, il est calculé selon la formule suivante :

$$Q_e = m \times Cp \times \Delta T \quad (03)$$

Dans notre cas, on doit calculer d'abord la température de sortie de l'huile T_s selon l'équation suivante :

$$Q_e = Q_h \quad (04)$$

Avec :

$$m_e \times Cp_e \times (T_s - T_e) = m_h \times Cph \times (T_e - T_s) \quad (05)$$

Ce qui donne :

$$T_s = T_e - \frac{m_e \times Cp_e \times (T_s - T_e)}{m_h \times Cph} \quad (06)$$

Cela nous donne une température de l'huile équivalente à : $T_s = 32.54^\circ\text{C}$

- **La différence de température logarithmique moyenne ΔTLM**

Les températures des fluides, dans un échangeur de chaleur, ne sont pas en générale constantes, mais elles varient d'un point à un autre à mesure que la chaleur s'écoule du fluide le plus chaud vers le fluide le plus froid.

Cette valeur sera normalement calculée à partir des différences de température de fluide à l'entrée et à la sortie de l'échangeur. La différence de température « moyenne logarithmique » ne s'applique qu'au transfert de chaleur sensible en vrai flux à co-courant ou à contre-courant (courbes linéaires température-enthalpie).

Elle est calculée selon l'équation :

$$\Delta TLM = \frac{(T_{eh} - T_{se}) - (T_{sh} - T_e)}{\ln\left(\frac{T_{eh} - T_{se}}{T_{sh} - T_e}\right)} \quad (07)$$

Dans notre cas, il faut d'abord déterminer les paramètres suivants :

▪ **Le nombre d'unité de transfert NUT**

Le nombre d'unité de transfert NUT pour un problème posé où l'on connaît les différentes températures aux bornes de l'échangeur caractérise le service thermique demandé. Pour une circulation à simple passe. L'échangeur de chaleur a un nombre d'unité de transfert trop petit ($NUT < 1$), l'échangeur est peu efficace, quel que soit le sens de circulation et le rapport C_{\min}/C_{\max} (le rapport de débits de capacité calorifique du fluide caloporteur/ celle du produit. Et si le nombre d'unité de transfert est assez grand ($NUT =$ de 5 à 10), l'échange de chaleur est très efficace. Ce nombre est défini par :

$$NUT_1 = \frac{\Delta T_1}{\Delta TLM} \quad (08)$$

Avec :

$$\Delta T = (T_s - T_e) \quad (09)$$

▪ **La perte de charge**

La perte de charge totale qui apparaît lors de l'écoulement d'un fluide à travers un échangeur à plaques se décompose en deux parties : pertes de charge dans les plaques et pertes de charge dans les tubulures d'alimentation. En général on considère que les dimensions des tubulures sont suffisamment importantes pour que les pertes de charges y soient négligeables devant celles des plaques. La perte de charge d'un fluide en écoulement isotherme dans une plaque (ΔP) entre les collecteurs d'entrée et de sortie, dépend de nombreux paramètres tels que la densité, la viscosité, la vitesse du fluide, ainsi que la géométrie des plaques. Elle est déterminée selon l'équation ci-après :

$$\Delta P_1 = 4f \times \frac{\rho v^2}{2} \times \frac{L}{Dh} \quad (10)$$

Pour la calculer on a besoin de calculer aussi :

- Le coefficient de frottement f :

Géométrie	Corrélation	Gamme de Reynolds
Lisse	$f = \frac{24}{Re}$	Re < 2000
	$f = 0.079 Re^{-0.25}$	Re > 10000
$\alpha = 30^\circ$	$f = 23.33 Re^{-0.809}$	40 < Re < 500
	$f = 0.557 Re^{-0.211}$	500 < Re < 17000
$\alpha = 60^\circ$	$f = 47.45 Re^{-0.680}$	20 < Re < 140
	$f = 3.917 Re^{-0.175}$	140 < Re < 4500
$\alpha = 90^\circ$	$f = 63.8 Re^{-0.809}$	40 < Re < 180
	$f = 4.82 Re^{-0.312}$	180 < Re < 700

Figure 25. Les valeurs du coefficient de frottement en relation avec la valeur de Reynolds

Les nombres de Nusselt, Prandt et Reynolds caractérisent respectivement l'échange thermique, les propriétés thermiques du liquide et le régime d'écoulement du liquide. L'expérience est alors utilisée pour déterminer la fonction F, c'est-à-dire une corrélation mathématique liant ces nombres. Cette relation est bien entendu empirique et on détermine les paramètres des nombres à une température moyenne entre l'entrée et la sortie des géométries considérées.

Il faut d'abord calculer le nombre de Reynolds :

$$Re = \frac{\rho \times V \times D}{\eta} \tag{11}$$

On calcule la vitesse V :

$$Qv = V \times s \tag{12}$$

$$V = \frac{Qv}{s} \tag{13}$$

On calcule ainsi la surface s :

$$s = \frac{\pi d^2}{4} \tag{14}$$

Le nombre de Prandtl Pr aussi :

$$Pr = \frac{c_p \times \eta}{\lambda} \quad (15)$$

Avec :

$$\eta = 0.722 \times 10^{-3} Pa.s$$

$$\lambda = 0.612 w/m.s$$

○ **Le coefficient d'échange U**

Le coefficient global est l'inverse de la résistance globale au transfert de chaleur, qui est la somme de plusieurs résistances individuelles. Pour l'échange de chaleur à travers un échangeur à plaques est donnée par :

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{h^1} + \frac{1}{h^2} + \frac{e}{\lambda} \quad (16)$$

La valeur des coefficients de convection individuels dépendra de la nature du processus de transfert de chaleur (conduction, convection, condensation, ébullition ou rayonnement), des propriétés physiques des fluides, des débits de fluide et de la disposition physique du surface de transfert de chaleur.

○ **Le coefficient de film h_1 et h_2**

Le coefficient d'échange de chaleur h est une caractéristique de l'échange global entre deux fluides ou deux surfaces isothermes de température T_1 et T_2 tel que $T_1 > T_2$. Dans cette définition générale on ne fait toujours par référence à un type de transfert particulier. L'intérêt de ce coefficient est de pouvoir s'appliquer à plusieurs processus différents de transfert entre les deux surfaces (Conduction, convection ou Rayonnement).

Les valeurs de h_1 et h_2 se calculent alors à partir de la formule expérimentale suivante :

$$\frac{h_i}{\lambda_i} \times Pr^{-0.33} = 2.34 \left(\frac{\Delta P_i \times \rho_i}{Np \times \eta^2} \right)^{0.3275} \quad (17)$$

III.3.3 Détermination de l'efficacité de l'échangeur

L'efficacité d'un échangeur de chaleur est définie comme étant le rapport du flux de chaleur réel d'un échangeur donné au flux maximum d'échange de chaleur possible.

L'efficacité de l'échangeur ε est le rapport entre le taux de transfert de chaleur réel et le taux de transfert de chaleur min possible. Pour définir l'efficacité d'un échangeur de chaleur, nous devons d'abord déterminer le taux de transfert de chaleur maximum possible, Q_{\min} , pour l'échangeur de chaleur, selon les relations suivantes :

$$\varepsilon = \frac{Q}{Q_{\min}} \quad (18)$$

Avec :

$$Q_{\min} = C_{\min} \times (Th_e - Te_e) \quad (19)$$

Et :

$$Q = C_c \times (Ts_e - Te_e) \quad (20)$$

$$mC_c = m^1 C_p^1 = 33816.2 \text{ w}/^\circ\text{K} \quad (21)$$

$$Ch = mh \times C_{ph} = C_c \times \left(\frac{Ts_e - Te_e}{Th_s - Th_e} \right) \quad (22)$$

III.4 Résultats du dimensionnement de l'échangeur à plaques**III.4.1 Détermination de la surface d'échange**

L'application de l'ensemble des équations déjà détaillé au-dessus nous a permet d'obtenir une surface d'échange pour l'échangeur à plaques M15 :

$$S = 12.77m^2$$

Tableau 3. Résultats des calculs de la surface d'échange

Les paramètres	L'eau	L'huile
Quantité de chaleur (J/s)	169081	169149.484
ΔTLM (°C)	7.69	
Le nombre d'unité NUT	0.65	1.62
Le nombre de Prandtl Pr	4.93	771.69
Le nombre de Reynolds	219619.42	1788.48
Le coefficient de frottement f	3.64×10^{-3}	0.0134
Perte de charge ΔP (Pa)	823.348	1061.19
Le coefficient de film h ($w/m^2 \cdot ^\circ C$)	24061.076	1972.7626
Le coefficient global U ($w/m^2 \cdot ^\circ C$)	1720.63	
La surface d'échange S (m^2)	12.77	

ΔTLM (Différence de Température Logarithmique Moyenne) calculée est égale à 7,69°C et indique une différence de température relativement faible entre les fluides, ce qui est typique des échangeurs à plaques efficaces. Les valeurs de nombre d'unités de transfert (NUT) trouvés indiquent que l'huile a une plus grande capacité de transfert thermique que l'eau dans cet échangeur. Ainsi, la grande différence dans le nombre de Prandtl (Pr) montre que l'huile a une diffusivité thermique beaucoup plus faible que l'eau. Le nombre de Reynolds montre que l'eau présente un écoulement turbulent, et un écoulement laminaire ou transitoire pour l'huile, ce qui explique en partie la différence d'efficacité de transfert thermique. Les valeurs de la perte de charge (ΔP) sont relativement faibles, ce qui est avantageux pour l'efficacité énergétique du système. Le coefficient global de transfert thermique (U) exprime une valeur typique pour un échangeur à plaques efficace. On peut déduire que la bonne

surface d'échange trouvé induit la bonne performance de l'échangeur. Ainsi, l'écoulement turbulent de l'eau contribue à son excellent coefficient de film, compensant en partie la faible performance de l'huile. Cependant, la grande surface d'échange compense la différence de performance entre l'eau et l'huile.

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, une paroi qui est le plus souvent métallique ce qui favorise les échanges de chaleur.

Les deux fluides qui traversent l'appareil s'écoulent sous l'effet d'un potentiel mesuré par la différentielle de pression ΔP entre l'entrée et la sortie, que l'on appelle la perte de charge. La valeur de cette perte de charge est fonction de la vitesse de circulation, coefficient global d'échange thermique et la quantité de chaleur.

Donc, ce dispositif permet le transfert de chaleur entre les deux fluides à des températures différentes. Ils doivent présenter une grande surface d'échange de chaleur pour une grande efficacité thermique. La surface d'échange est en relation avec la vitesse des fluides, la valeur d'une surface d'échange faible signifie que la vitesse des fluides est élevée « pompe ». Ainsi, si la surface d'échange est grande, la vitesse des fluides est faible.

Cette surface est affectée par plusieurs paramètres :

- Plus la différence de température est grande, plus la surface d'échange nécessaire à l'échange thermique sera petite.
- Plus il y a de plaques, plus la surface d'échange est grande et plus l'échangeur est efficace, ils sont conçus afin de créer un flux turbulent synonyme d'un transfert de chaleur plus performant et de répartir les fluides sur toute la surface d'échange.
- Il existe une compétition entre l'effet d'augmentation de la surface externe d'échange et l'effet d'augmentation de l'épaisseur. Suivant que l'un ou l'autre de ces deux effets l'emporte, le flux de chaleur augmente ou diminue.
- Le nombre d'unité de transfert NUT est en relation de corrélation directe avec la surface d'échange.

Cependant, l'avantage des échangeurs de chaleur à plaques qu'ils permettent d'obtenir un ratio surface d'échange / volume très élevé, ce qui contribue à leur rendement et efficacité. Cependant, après un certain temps d'utilisation, il se produit des dépôts d'encrassement qui constituent des résistances au transfert de chaleur de sorte que la surface d'échange diminue et devient insuffisante pour assurer l'échange.

L'encrassement est la formation d'une couche mince à travers la surface d'échange, ce processus conduit à la diminution de la puissance thermique échangée entre les deux fluides considérés ainsi que leur efficacité. Son ampleur sur la surface d'échange thermique, pour un fluide donné, dépend de la vitesse d'écoulement, la température, la nature de surface et des matériaux de fabrication, ainsi que de la nature de la charge.

En effet, l'encrassement des surfaces d'échange a des conséquences néfastes à savoir la réduction du coefficient d'échange de chaleur et la réduction des débits d'air, une réduction de l'efficacité des appareils avec diminution de leurs performances.

III.4.2 Détermination de l'efficacité de l'échangeur

Tableau 4. Résultats des calculs de l'efficacité de l'échangeur à plaques

Le paramètre	Résultats des calculs
$C_{\min} (W/^{\circ}K)$	13569.90
$Q_{\min} (W)$	230688.3
$Q (W)$	169081
$\varepsilon (\%)$	73.29

La valeur de C_{\min} est de 13569,90 W/ $^{\circ}$ K qui représente la capacité thermique du fluide ayant le plus faible débit calorifique. C'est un paramètre important car il limite le transfert de chaleur maximal possible dans l'échangeur. Ainsi, Q_{\min} est calculé à 169081 W qui représente le transfert de chaleur maximal théorique qui pourrait être réalisé si l'échangeur était parfait (c'est-à-dire avec une surface d'échange infinie). La quantité réelle de chaleur transférée Q (169081 W) est inférieure à Q_{\min} (230688,3 W), ce qui est normal et attendu. Cela indique que

l'échangeur transfère une quantité significative de chaleur, mais n'atteint pas le maximum théorique.

L'efficacité de l'échangeur (ϵ) est calculée à 73,29%. Cela signifie que l'échangeur transfère 73,29% de la chaleur maximale théorique possible.

La performance d'un échangeur est évaluée à partir de deux nombres adimensionnels suivants : le rapport des capacités calorifiques, le nombre d'unité de transfert et l'efficacité de l'échangeur. Le nombre d'unité de transmission de chaleur NUT permet d'évaluer le transfert de chaleur d'un échangeur, plus le nombre d'unité de transmission de la chaleur est grand, plus l'échangeur de chaleur se rapproche de sa limite thermodynamique.

- Si l'échangeur a un nombre d'unités de transfert trop petit ($NUT < 1$), l'échange est peu efficace.
- Si le nombre d'unités de transfert NUT est assez grand ($NUT > 1$), l'échange est très efficace et l'échangeur est largement dimensionné pour le débit de produit.

L'efficacité d'un échangeur est définie par le facteur entre la puissance thermique réellement échangée et la puissance maximale, c'est une notion similaire à celle d'un rendement, et est très utile pour caractériser la performance d'un échangeur. Lorsqu'on cherche à transférer de l'énergie d'un fluide vers un autre, l'échangeur idéal est celui qui permet l'échange maximal de l'énergie.

La valeur calculée lors de ce dimensionnement (73,29%), est une valeur relativement élevée, indiquant que l'échangeur fonctionne de manière assez efficace et suggère que l'échangeur est bien conçu et fonctionne de manière satisfaisante. Afin de mieux optimiser cette efficacité, il faut :

- Augmenter la surface d'échange (plus de plaques ou plaques plus grandes)
- Modifier la configuration des flux (contre-courant vs co-courant)
- Ajuster les débits des fluides
- Améliorer l'isolation thermique de l'échangeur

CONCLUSION

ET

PERSPECTIVES

Conclusion et perspectives

La présente recherche a pour objectif le dimensionnement de l'échangeur à plaques « Alpha Lavale M15 » et l'évaluation de ses performances par la détermination de sa surface d'échange et de son efficacité thermique.

Les résultats du dimensionnement montrent que l'échangeur à plaques possède une grande efficacité de 73,29% parallèle à une surface d'échange de 12.77 m², ce qui est une valeur très satisfaisante. Cela signifie que l'échangeur transfère près des trois quarts de la puissance thermique maximale théorique possible entre les fluides. Cette haute efficacité est rendue possible grâce à la conception avantageuse des échangeurs à plaques qui maximisent la surface d'échange tout en minimisant les pertes de charge.

De plus, les matériaux réfractaires spéciaux utilisés permettront de résoudre les problèmes de limitations en température rencontrées avec l'ancien échangeur tubulaire. L'échangeur à plaques supportera bien mieux les conditions de hautes températures régnant dans l'unité de laminage, évitant ainsi les arrêts soudains pénalisants la production.

Bien que fonctionnant déjà de manière très performante, un suivi et un entretien régulier devront également être mis en place pour limiter l'encrassement qui réduirait la surface d'échange effective au fil du temps.

Dans l'ensemble, le choix de cet échangeur à plaques de dernière génération, couplé aux mesures d'optimisation proposées, permettra d'assurer un fonctionnement fiable, efficient et durable de l'unité de production stratégique du laminage à chaud.

Pour conclure, le remplacement de l'ancien échangeur tubulaire par le nouvel échangeur à plaques "Alpha Laval M15" s'avère être un excellent choix pour améliorer les performances et la fiabilité de l'unité de laminage à chaud du complexe sidérurgique.

Ces résultats nous incitent à réfléchir sur plusieurs perspectives. De nouvelles améliorations des matériaux, de la géométrie des plaques et des techniques de nettoyage pourraient encore accroître l'efficacité thermique déjà élevée. Coupler l'échangeur à un système de récupération de chaleur résiduelle permettrait également de valoriser l'énergie perdue. Ainsi, cette technologie haute performance pourrait aussi représenter une solution

avantageuse pour d'autres industries confrontées à des besoins critiques en échange de chaleur.

REFERENCES
BIBLIOGRAPHIQUES

Références bibliographiques

Adil Ridha, 2009. « Transfert de Chaleur et de Masse », Université de Caen.

Alain B, Serge C. 1997. Caloducs. *Techniques de l'ingénieur*

Alpha Lavale, 2018. Les échangeurs thermiques. Disponible sur : www.alfalaval.com.

Arsenyeva, O., Tovazhnyansky, L., Kapustenko, P., & Khavin, G. (2011). "Optimal Design of Plate-and-Frame Heat Exchangers for Efficient Heat Recovery in Process Industries". *Energy*, 36(8), 4588-4598.

Bansal, B., Chen, X. D., & Müller-Steinhagen, H. (2000). "Analysis of 'Classical' Deposition-Removal Fouling Models for Heat Exchangers". *Chemical Engineering and Processing*, 39(6), 507-522.

Bengacemi ilyes el houari, 2018. Laminage à chaud, Mémoire fin d'étude, Université d'ANNABA,

Bontemps André, Alain Garrigue, Charles Goubier, Jacques Huetz, Christophe Marvillet, Pierre Mercier, Roland Vidil, 1995. « Description des échangeurs », *technique de l'ingénieur* [B 2 341].

Boudaoud Sabrina Amina, El Haci Aicha, 2019. Etude d'un échangeur à plaques. Université Abdel Hamid Ben Badis – Mostaganem

Brau J., (2006). Transferts de masse et échangeur de chaleur, INSA LYON,

Carlson, K. (2011). "Types of Heat Exchangers". In *Handbook of Heat Exchangers: Selection, Design, and Operation*. Butterworth-Heinemann.

Chaudourne S. 1982; Echangeurs à caloducs pour la récupération de chaleur dans les processus industriels. *RevPhysAppl* (Paris) 17:625–32. <https://doi.org/10.1051/rphysap:01982001709062500>.

Christophe M, Christophe W. 2014. Technologie des échangeurs et dimensionnement simple. *e-book- TOME 1* –

Chung Seo Yoon, Sung Hyung Jin, (2003). Direct numerical simulation of turbulent concentric annular pipe flow, Part 2: Heat transfer, *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 24 399–411.

Diaz, S., Faia, R., Pinto, T., Vale, Z., & Corchado, J. M. (2020). "Intelligent Energy Management in the Metallurgical Industry Using Plate Heat Exchangers". *Energies*, 13(15), 4006.

Gut, J. A. W., & Pinto, J. M. (2003). "Modeling of Plate Heat Exchangers with Generalized Configurations". *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 46(14), 2571-2585.

Hamouzi Nihal, Bouchareb Fatima, 2015. Etude comparative des différents appareils d'échange de chaleur pour le refroidissement des condensats, mémoire de l'université de Badji Mokhtar Annaba.

Hesselgreaves, J. E. (2001). "Compact Heat Exchangers: Selection, Design and Operation". *Pergamon*.

Incropera, F. P., Dewitt, D. P., Bergman, T. L., & Lavine, A. S. (2007). "Fundamentals of Heat and Mass Transfer" (6th ed.). *Wiley*.

Kakaç, S., Liu, H., & Pramuanjaroenkij, A. (2012). "Heat Exchangers: Selection, Rating, and Thermal Design" (3rd ed.). *CRC Press*.

Klemeš, J. J., Arsenyeva, O., Kapustenko, P., & Tovazhnyanskyy, L. (2015). "Compact Heat Exchangers for Energy Transfer Intensification". *CRC Press*.

Lewis, M. J., & Deeth, H. C. (2009). "Heat Treatment of Milk". In A. Y. Tamime (Ed.), *"Milk Processing and Quality Management"*. *Wiley-Blackwell*.

Ma, L., Wang, L., & Sundén, B. (2019). "Optimization of Plate Heat Exchanger with Polymeric Material". *Applied Thermal Engineering*, 163, 114404.

Mayer, M., Bucko, J., & Benzinger, W. (2013). "Fouling Mitigation in Plate Heat Exchangers by Surface Modification". *Applied Thermal Engineering*, 57(1-2), 180-187.

Menidjel A., (2009). « Exploitation des échangeurs à faisceaux et calandre », I.AP/ SPA. SKIKDA

Minvielle Zoé, Nadia Caney, Patrice Clément, Philippe Bandelier, Philippe Marty, Jean Antoine Gruss, Claude Roussel. 2021 Échangeurs à plaques, Échangeurs de chaleur – Description

Muley, A., & Manglik, R. M. (1999). "Experimental Study of Turbulent Flow Heat Transfer and Pressure Drop in a Plate Heat Exchanger with Chevron Plates". *Journal of Heat Transfer*, 121(1), 110-117.

Ougana A., 2019. « Etude et dimensionnement d'un système de refroidissement Tchou-lait, Candia », Mémoire fin d'étude pour l'obtention du diplôme de master, département de génie mécanique, université de Bejaia

Pakkanen, J. (2015). "Gasket Materials for Plate Heat Exchangers". *Chemical Engineering Transactions*, 45, 991-996.

Palm, B., & Claesson, J. (2006). "Plate Heat Exchangers: Design and Application of Brazed Plate Heat Exchangers". *Journal of Heat Transfer*, 128(1), 92-103.

Reay DA, Kew PA, McGlen RJ. 2014. Heat pipes: theory, design and applications. *Sixth edition. Amsterdam: Butterworth-Heinemann, an imprint of Elsevier;*

Reppich, M., & Stephan, S. (2007). "Detection of Leaks in Plate Heat Exchangers". In S. Kakac et al. (Eds.), "Heat Exchangers: Selection, Rating, and Thermal Design" (3rd ed.). *CRC Press.*

Seligman, R. (1934). "The Plate Heat Exchanger". *Journal of the Royal Society of Arts*, 82(4247), 537-545.

Shah, R. K., & Sekulić, D. P. (2003). "Fundamentals of Heat Exchanger Design". *Wiley.*

Slimi A., Zediri A., 2019. Etude d'encrassement des échangeurs de chaleur à faisceau et calandre. Mémoire de l'université de Kasdi Merbah. Ouargla. 86p

Timothy J. Rennie, Vijaya G.S. Raghavan. (2007). Thermally dependent viscosity and non Newtonian flow in a double-pipe helical heat exchanger, *International Journal of Thermal Sciences*, Canada.27:862–868.

TOTAL, 2007. Les équipements, Les échangeurs, Cours EXP-PR-EQ120, Révision 0.1, Support de formation, TOTAL, France.

Wang, L., Sundén, B., & Manglik, R. M. (2007). "Plate Heat Exchangers: Design, Applications and Performance". *WIT Press*.

Wuithier P. 1987. Raffinage et génie chimique, (tome I).