



MEMOIRE DE FIN D'ETUDE MASTER ACADEMIQUE

Filière : Génie Mécanique

Spécialité : Energétique

Thème

ETUDE EXPERIMENTALE D'UN ECHANGEUR DE CHALEUR A AILETTES

Présenté par :

- ❖ BACHELILI Mohamed Abdelkamel
- ❖ MBAREK Sedik

Soutenu le 30/06/2020 devant le jury composé de :

Président	Pr. HOUAT Samir.	Université de Mostaganem UMAB
Examineur	Dr. MEDJAHED Bendida	Université de Mostaganem UMAB
Encadreur	Pr. RETIEL Noureddine.	Université de Mostaganem UMAB

Année Universitaire : 2019 / 2020

Remerciement

Nous tenons tout d'abord à remercier Dieu le tout puissant et miséricordieux, qui nous a donné la force et la patience d'accomplir ce Modeste travail.

Nous tenons à exprimer toute ma reconnaissance à notre encadreur Pr. RETIEL Noureddine. Nous le remercions de nous avoir encadré, de son précieux conseil et son aide durant toute la période du travail.

Nous adressons nos sincères remerciements aux membres du jury Pr. HOUAT Samir et Dr. MEDJAHED Bendida pour l'intérêt qu'ils ont porté à notre recherche en acceptant d'examiner notre travail et de l'enrichir par leurs propositions.

Nos vifs remerciements vont également à tous les professeurs de notre parcours licence et master

Nous remercions nos très chers parents, qui ont toujours été là pour nous . « Vous avez tout sacrifié pour vos enfants n'épargnant ni santé ni efforts. Vous nous avez donné un magnifique modèle de labeur et

de persévérance. Nous sommes redevables d'une éducation dont nous sommes fières ».

Nous remercions nos frères et sœurs pour leur encouragement.

Nos vifs remerciements et très spécialement à Mr Hamiti omar, Mr Benamour ahmed, qui ont toujours été là pour nous sans oublié Mr Mahdjoubi Ali qui nous a offert l'anémomètre pour nous aider à réaliser notre banc expérimental.

À tous ces intervenants, nous présentons nos remerciements, notre respect et notre gratitude.

Dédicaces

Nous dédions ce modeste travail qui représente de longues années d'études, et que nous espérons qu'il soit à la hauteur de nos efforts à toutes nos familles.

D'abord nos chers pères et nos tendres mères qui ont toujours signé présent à chaque instant de notre vie, aussi à nos sœurs et frères.

Nous dédions aussi ce projet à tous ce qui nous est très chers et qui nous ont apporté une aide précieuse que nous ne serions jamais oubliés.

Résumé

L'objectif de notre projet de fin d'études est la réalisation d'un banc d'essai d'un échangeur de chaleur à ailettes. Ce banc d'essai a été que partiellement réalisé car nous avons rencontré un problème d'accès au laboratoire en raison du confinement appliqué à cause de la pandémie que nous vivons en ce moment. Nous avons simulé des essais expérimentaux virtuels en supposant des relevés expérimentaux supposés et qui nous ont permis de déterminer les efficacités possibles de ce type d'échangeur à ailettes et l'influence du changement de quelques paramètres sur le phénomène d'échange de chaleur mis en jeu.

ملخص

الهدف من مشروع نهاية دراستنا هو تحقيق منصة اختبار لمبادل حراري ذو زعانف. تم الانتهاء من هذا الاختبار جزئياً ونقطاً لأننا واجهنا مشكلة في الوصول إلى المختبر بسبب الحبس المطبق بسبب الوباء الذي نواجهه حالياً. قمنا بمحاكاة الاختبارات التجريبية الافتراضية من خلال افتراض قراءات تجريبية مفترضة والتي سمحت لنا بتحديد الكفاءات الممكنة لهذا النوع من المبادلات ذات الزعانف وتأثير تغيير بعض المعاملات على ظاهرة التبادل الحراري داخل المبادل الحراري.

Summary

The objective of our end of studies project is the realization of a test bench for a finned heat exchanger. This test bench was only partially completed because we encountered a problem of access to the laboratory due to the confinement applied because of the pandemic that we are currently experiencing.

We simulated virtual experimental tests by supposing supposed experimental readings and which allowed us to determine the possible efficiencies of this type of finned exchanger and the influence of the change of some parameters on the phenomenon of heat exchange put in Game.

Liste des figures

Figure I.1: Echangeur Tube U	19
Figure I.2.: Echangeur à faisceau tubulaire horizontal	20
Figure I. 3: Echangeur à spirales	21
Figure I.4: échangeur à plaques	23
Figure I .5: Colonne de Bouhy	24
Figure I. 6: deux types d'échangeurs à bloc	25
Figure I. 7: Echangeur à ailettes	26
Figure II.8: Banc d'essai expérimental d'échangeur de chaleur à ailettes	30
Figure II.9: plaques en bois	30
Figure II.10: tôles en galvanisé	30
Figure II.11: caisson	31
Figure II.12: table	31
Figure II.13: ventilateur	31
Figure II.14: radiateur	31
Figure II.15: anémomètre	32
Figure II.16: débitmètre	32
Figure II.17: thermomètre digitale	32

Figure II.18: thermomètre a aiguille	32
Figure II.19: Pompe laboratoire	33
Figure II.20: tubes multicouches	33
Figure II.21: Té multicouches	33
Figure II.22: raccords multicouches	33
Figure II.23: lampes de signalisation	34
Figure II.24: disjoncteur	34
Figure II.25: résistance	34
Figure II.26: fils électrique	26
Figure II.27: schéma d'installation	35
Figure II.28: banc d'essai ET 300	37
Figure II.29: schéma de circuit du banc d'essai ET 300	39
Figure III.1: schéma co-courant	41
Figure III. 2: schéma contre-courant	42
Figure III. 3: abaque pour déterminer ϵ	42
Figure III.4: abaques pour déterminer l'efficacité des échangeurs thermiques	44
Figure III.5: Tableau des formules d'efficacité	45
Figure IV.1: dessin approximative du radiateur	48
Figure IV.2: Effet de l'efficacité sur la quantité de chaleur totale échangée	54
Figure IV. Effet de l'efficacité sur la température de sortie de l'air	55
Figure IV.4: Effet de l'efficacité sur la température de sortie de l'eau pour différents débits d'eau	55

Nomenclature

Te eau: Température d'entrer d'eau	[°C]
Te air: Température d'entrer d'air	[°C]
Ts eau: Température de sortie d'eau	[°C]
Ts air: Température de sortie d'air	[°C]
V eau : Débit d'eau	[m ³ /h]
V air : Débit d'air	[m ³ /h]
C eau: Débit de capacité thermique d'eau	[W/°C]
C air: Débit de capacité thermique d'air	[W/°C]
ρ_{eau} : Masse volumique d'eau	[kg/m ³]
ρ_{air} : Masse volumique d'air	[kg/m ³]
$c_{p,air}$: Capacité calorifique d'air	[J/kg.°C]
$c_{p,eau}$: Capacité calorifique d'eau	[J/kg.°C]
η : Efficacité énergétique	[/]
Cr: Rapport des débits de capacité thermique	[/]
U: Coefficient d'échange global	[W/(m ² .°C)]
\dot{Q} : Flux de chaleur global	[W]
Ts eau moy: Température moyenne pour chaque débit d'eau	[°C]
NUT: Nombre d'unité de transfert	[/]

Sommaire

CHAPITRE I: GENERALITES SUR LES ECHANGEURS ET LE TRANSFERT DE CHALEUR.

Introduction générale	14
I.1 Introduction au transfert thermique	14
I.1.1. Définition	14
I.1.1.1. Transfert de chaleur par conduction	15
I.1.1.2. Transfert de chaleur par convection	15
I.1.1.3 Transfert de chaleur par Rayonnement	16
I.2. Généralité sur les échangeurs de chaleur	
I.2.1. Définition	16
I.2.2. Principe de fonctionnement	17
I.2.3 Mode de transfert	18
I.2.4 Types d'échangeurs	18
I.2.4.1 Echangeur tube U	21
I.2.4.2 Echangeur à faisceau tubulaire horizontal	19
I.2.4.3 Echangeur à spirales	20
I.2.4.4 Echangeur à plaques	21
I.2.4.5 Colonne de Bouhy	23
I.2.4.6 Echangeur à bloc	24
I.2.4.7 Echangeur à ailettes	25

Chapitre II: Description et Caractéristiques techniques du banc expérimental

INTRODUCTION	28
II.1 Description de notre banc d'essai	29
II.2 Les constitutions de l'échangeur du banc d'essai utilisé	30
II.2.1 Les matériaux utilisés	31
II.2.2 Equipement réalisé	31
II.2.3 Equipement d'échangeur de chaleur	31
II.2.4 Les appareils de mesure	32
II.2.5 Les équipements de circulation	33
II.2.6 Les équipements électriques	34
II.3 Schématisation de l'installation	35
II.4 Fonctionnement du banc expérimental	36
II.5 Spécification	36
II.6 Description du banc d'essai ET-300	36
II.7 Spécification	38
II.8 Caractéristiques techniques	38
Chapitre III: La théorie des échangeurs de chaleur	
III. La théorie des échangeurs de chaleur	41
III.1. Flux de chaleur de fluide chaud	41
III.2. Flux de chaleur de fluide froid	41
III.3. Flux de chaleur globale	41
III.4. Le coefficient de transfert thermique K	41
III.5. La différence de température moyenne logarithmique ΔT_{LM}	41

• Pour circulation à co-courant	41
• Pour circulation à contre-courant	42
• Pour circulation à courant –croisé	42
III.6. Nombre d'unité de transfert NUT	42
• Pour circulation à contre –courant	43
• Pour circulation à co-courant	43
III.7. Rapport des débits de capacité thermique Cr	43
III.8. Efficacité d'un échangeur de chaleur	45
Chapitre IV: Calcul analytique et résultats expérimentaux estimés	
INTRODUCTION	47
IV. Calcul analytique et résultats	48
IV.1 Calcul d'efficacité énergétique ε	48
IV.2 Le nombre d'unités de transfert NUT	51
IV.3 La puissance de l'échangeur de chaleur	52
IV.4 Température de sortie de l'air $T_{e\text{ air}}$	52
IV.5 Température de sortie de l'eau $T_{e\text{ eau}}$	52
IV.6 Les résultats pour les autres débits d'eau sous formes de tableaux	52
IV.7 Les résultats sous forme graphique	54
CONCLUSION.	

Chapitre I

Généralités sur le transfert de chaleur et les échangeurs

Introduction générale

La chaleur est une forme particulière de l'énergie au niveau des molécules constituant un corps, elle se traduit par un état d'agitation plus ou moins intense selon que le corps se trouve sous une température plus ou moins élevée.

Le transfert de la chaleur est une science qui étudie la façon dont la chaleur se propage d'une région à une autre sous l'influence d'une différence de température.

Les phénomènes du transfert de chaleur sont très importants dans beaucoup de domaines technologiques, comme la conception des appareils thermiques dans l'industrie, le calcul thermique dans les constructions, les industries pétrochimiques, etc.

I. Introduction au transfert thermique

La thermodynamique permet de prévoir la quantité totale d'énergie qu'un système doit échanger avec l'extérieur pour passer d'un état d'équilibre à un autre. La thermique (ou thermocinétique) se propose de décrire quantitativement (dans l'espace et dans le temps) l'évolution des grandeurs caractéristiques du système, en particulier la température, entre l'état d'équilibre initiale l'état d'équilibre final.

I.1. Définition

La chaleur est une forme particulière de l'énergie au niveau des molécules constituant un corps, elle se traduit par un état d'agitation plus ou moins intense selon que le corps se trouve sous une température plus ou moins élevée.

Différents modes de transfert de chaleur: La théorie des échanges thermiques a pour objet l'étude de la propagation de la chaleur. Cette propagation se présente sous trois formes fondamentales qui sont la conduction, la convection et le rayonnement.

I.1.1 Transfert de chaleur par conduction

La conduction thermique est la propagation de la chaleur, de molécule en molécule, dans un corps ou dans plusieurs corps contigus et non réfléchissants, sans qu'il y ait mouvement du milieu ou que ce mouvement intervienne dans la transmission. Ce mode de transmission caractérise essentiellement les transferts de chaleur dans les solides où entre corps solides contigus. La conduction intervient également dans les liquides et les gaz mais, sauf dans le cas des liquides très visqueux ou des gaz emprisonnés dans des matériaux poreux, son effet, est marginal par rapport à celui de la convection

I.1.2 Transfert de chaleur par convection

La convection caractérise la propagation et le transport de la chaleur par des molécules en mouvement qui viennent se réchauffer au contact d'un corps chaud et véhiculent cette énergie calorifique pour la céder à un corps froid. Deux types de convection sont généralement distingués, la convection forcée et la convection libre. La convection est dite forcée quand il existe une cause du mouvement autre que les variations de températures du fluide, cette cause étant la seule à prendre en compte en raison de son importance relative. La convection naturelle est due au contact du fluide avec une paroi plus chaude ou plus froide et qui crée des différences de masse volumique, génératrice du mouvement au sein du fluide.

I.1.3 Transfert de chaleur par Rayonnement

Thermique Dans la transmission de chaleur par rayonnement, le transfert thermique s'effectue par des vibrations électromagnétiques qui se propagent en ligne droite sans aucun support de matière. Tout corps même placé dans le vide émet de l'énergie qui se transmet sous forme d'onde et tout corps placé sur son trajet absorbe toute ou une partie de cette énergie.[1]

II. Généralités sur les échangeurs de chaleur

II.1. Définition

La définition la plus générale que nous puissions donner d'un échangeur thermique est celle d'un appareil permettant de transférer la chaleur d'une source à un puits. La source et le puits peuvent être constitués d'un écoulement fluide (cas le plus fréquent) ou d'un fluide et d'un solide (cas fréquent en refroidissement électronique). Dans chacun des cas, le ou les fluides échangent de la chaleur avec une paroi d'échange qui peut être la paroi séparant les fluides ou la surface du solide en contact avec le fluide. Il existe aussi des échangeurs à contact direct entre les fluides.

Deux grandes classes peuvent être distinguées:

- les récupérateurs. Par ce terme, nous désignons les échangeurs dans lesquels la chaleur est instantanément transmise d'un fluide chaud à un fluide froid. On néglige donc l'inertie thermique des parois d'échanges ;
- les régénérateurs. Ce sont les échangeurs dans lesquels on utilise l'inertie thermique pour stocker la chaleur avant qu'elle soit transférée au milieu froid. Ce stockage peut être réalisé en utilisant la chaleur sensible d'un milieu, sa chaleur latente ou encore une réaction thermochimique réversible.

Les échangeurs à contact direct n'entrent dans aucune des catégories ci-dessus. Ce sont des échangeurs qui n'utilisent pas de paroi d'échange pour séparer deux fluides. Les fluides sont donc non miscibles [2].

II.2.Principe de fonctionnement

Un échangeur thermique ne mélange pas les deux fluides, il permet simplement le transfert de chaleur entre les deux. Pour cela, les deux fluides sont séparés par une paroi très conductrice (cuivre, aluminium, inox, acier). L'écart de température entre les deux fluides permettra le transfert de chaleur, la chaleur allant toujours du plus chaud vers le plus froid. De ce fait, au niveau de l'échangeur, le premier fluide entre chaud et ressort refroidi, tandis que le second fluide entre froid et ressort plus chaud.

Généralement, dans un échangeur thermique, les fluides évoluent à contre-courant (l'un entre haut et l'autre entre en bas) ou à courant croisé (l'un avance horizontalement, l'autre verticalement). Ce phénomène permet d'améliorer le transfert de chaleur par rapport à une évolution à co-courant (les deux fluides avancent dans le même sens).

La qualité du transfert de chaleur dépend donc de plusieurs caractéristiques: le type de paroi, le type de fluide, la vitesse du fluide (plus exactement s'il est en régime laminaire ou turbulent), l'écart de température entre les deux fluides. Pour améliorer l'échange, certains échangeurs augmentent la vitesse du fluide, par exemple en utilisant des ventilateurs pour augmenter la vitesse de l'air. On parle de convection forcée. Pour un radiateur classique, sans ventilateur, on parlera de convection naturelle [3].

II.3 Mode de transfert

-À courant parallèle: les deux fluides sont disposés parallèlement et vont dans le même sens.

-À contre-courant: idem, mais les courants vont dans des sens opposés.

-À courant croisé: les deux fluides sont situés perpendiculairement.

-À tête d'épingle: un des deux fluides fait un demi-tour dans un conduit plus large, que le deuxième fluide traverse. Dans cette configuration, nous pouvons comparer ce dernier à un échangeur à courant parallèle sur une distance identique à la moitié de l'échangeur, et pour l'autre moitié à un échangeur à contre-courant.

-A contact direct ou à mélange: les deux fluides peuvent être mis en contact comme c'est le cas dans les tours de refroidissement, l'air chaud monte de bas en haut dans une grande tour et des buses projetant de l'eau froide sortent des parois donnant la possibilité ainsi de refroidir l'air.

II.4 Types d'échangeurs

II.4.1 Echangeurs à tubes en U

Un échangeur tubulaire peut être reconnu comme l'échangeur de chaleur le plus simple: il consiste en 2 tubes concentriques. Un fluide circule dans le tube interne tandis que le second passe dans l'espace entre les 2 tubes. Facile à nettoyer ou à réparer, il sert à travailler avec des liquides à hautes pressions. Ne permet qu'un échange de chaleur limité et ne possède qu'une petite surface d'échange (maximum 50 m²).

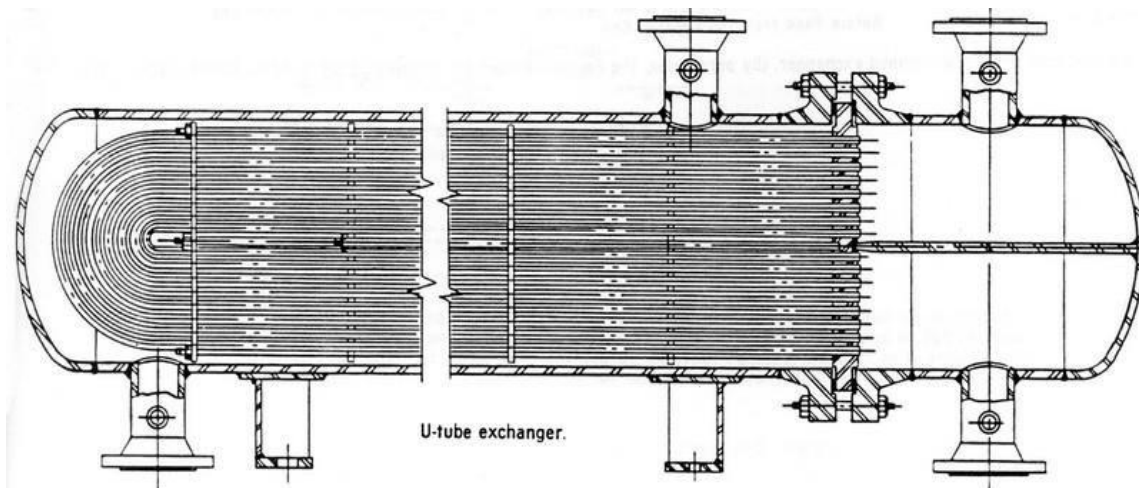


Figure1.1: Echangeur Tube U.

II.4.2 Echangeurs à faisceau tubulaire horizontal

Un schéma typique d'un échangeur tubes calandre (shell and tubes exchanger ou échangeur à tubes et virole) est présenté ci-dessous. L'appareil est constitué d'un faisceau de tubes, disposés à l'intérieur d'une enveloppe dénommée calandre. L'un des fluides circule au sein des tubes et l'autre au sein de la calandre, autour des tubes. On ajoute généralement des chicanes dans la calandre, qui jouent le rôle de promoteurs de turbulence et perfectionnent le transfert hors des tubes.

A chaque extrémité du faisceau sont fixées des boîtes de distribution qui assurent la circulation du fluide à l'intérieur du faisceau en une ou plusieurs passes. La calandre est elle aussi pourvue de tubulures d'entrée et de sortie pour le second fluide (qui circule hors des tubes) suivant le chemin imposé par les chicanes (voir figure).

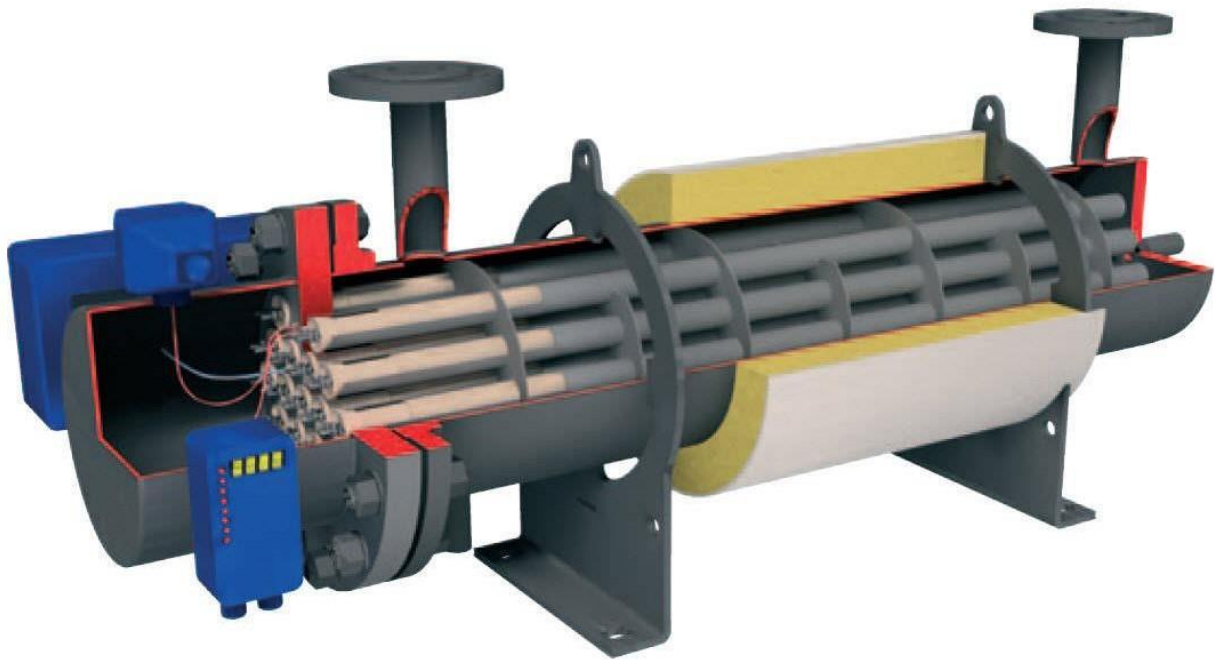


Figure 1.2: Echangeur à faisceau tubulaire horizontal.

II.4.3 Echangeurs à spirales :

Un échangeur à spirales consiste en 2 plaques de métal enroulées de manière hélicoïdale pour former une paire de canaux en spirale. Le diamètre de l'échangeur est assez grand avec une surface d'échange maximale d'environ 185 m² pour un diamètre de 1,5 m, ce qui le place dans la catégorie des échangeurs non-compacts. L'échange de chaleur n'est pas aussi bon que celui de l'échangeur à plaques, car la surface d'échange ne possède pas en règle générale de profil, mais pour une même capacité d'échange, un échangeur spiral nécessite 20% de moins de surface d'échange qu'un échangeur à faisceau tubulaire.

Utilisable pour les liquides visqueux ou pour les mélanges liquide-solide et possède une capacité auto-nettoyante lui donnant la possibilité un encrassement

réduit comparé à l'échangeur à faisceau tubulaire. Ne peut travailler qu'avec des différences de températures et de pression limitées.

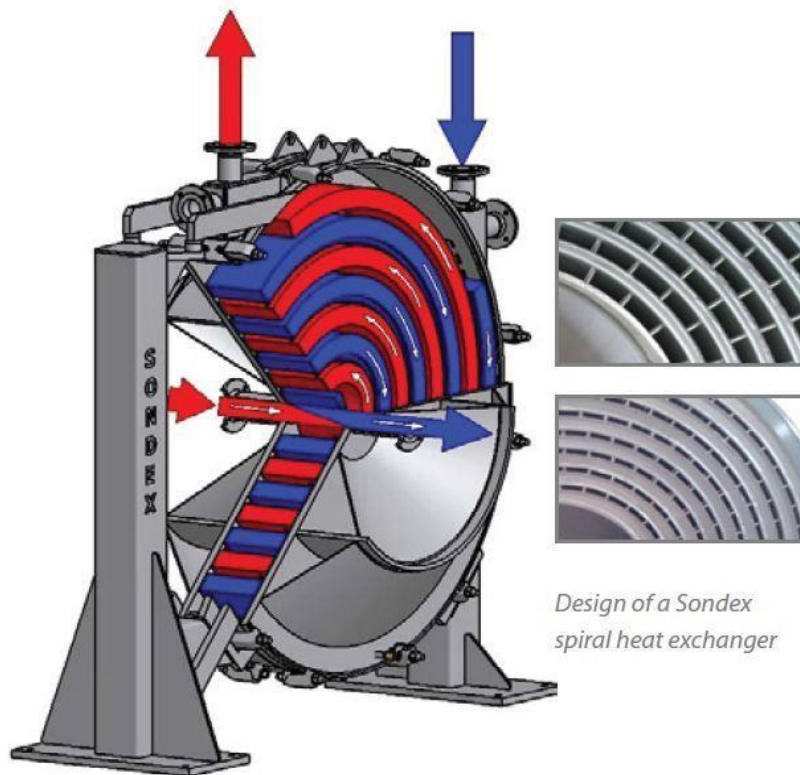


Figure 1.3: Echangeur à spirales.

II.4.4 Echangeurs à plaques :

L'échangeur à plaques est un type d'échangeur de chaleur qui connaît un usage croissant dans l'industrie. Il se compose de la plupart de plaques disposées en forme de millefeuilles et scindées les unes des autres d'un petit espace (quelques millimètres) où circulent les fluides. Le périmètre des plaques est bordé d'un joint qui permet par compression de la structure d'éviter les fuites.

Les plaques ne sont pas plates, mais possèdent une surface ondulée selon un schéma bien précis pour créer un flux turbulent synonyme d'un meilleur transfert de chaleur, mais permet aussi de canaliser les fluides se déplaçant à la surface vers les coins de la plaque. Le fluide se déplace, par exemple, du coin inférieur gauche

vers le coin supérieur droit de la plaque, où un orifice lié à un tuyau lui sert à passer de l'autre côté de la plaque et de sauter une couche du millefeuille (un espace entre 2 plaques) avant de s'écouler à nouveau le long de la plaque suivante. Ainsi chaque fluide ne circule parallèlement à une plaque que l'ensemble des 2 espaces.

Les avantages de ce type d'échangeur est sa simplicité qui est fait un échangeur peu coûteux et aisément adaptable par ajout/retrait de plaques afin d'augmenter/diminuer la surface d'échange suivant les besoins (Attention: la surface ne peut être augmentée de manière illimitée à cause de la perte de charge). La surface avec l'extérieur est réduite au minimum, ce qui sert à limiter les pertes thermiques et l'étrécissement de l'espace où circulent les fluides mais aussi le profil des plaques assurent un flux turbulent qui permet un excellent transfert de chaleur.

Cependant ces derniers paramètres entraînent une importante perte de charge qui limite le nombre de passage des fluides entre les plaques. Cette perte de charge ne peut être compensée par une pression d'entrée des fluides élevée (< 2.5 MPa) car une trop grande pression causerait des fuites au travers des joints positionnés entre les plaques. La différence de températures entre les 2 fluides ne doit pas être trop grande aussi pour éviter une déformation des plaques par dilatation/contraction de ces dernières qui empêcherait les joints entre les plaques d'être idéalement étanches.

La turbulence sert à diminuer l'encrassement de la surface d'échange de 10-25% comparé à un échangeur à faisceau tubulaire. Comparativement à un échangeur à faisceau tubulaire la surface d'échange est inférieure de 50% pour le même transfert de chaleur.



Figure1.4:échangeur à plaques.

II.4.5 Colonne de Bouhy:

Excellente alternative aux échangeurs à plaques dans les sécheurs d'air comprimé, la colonne de Bouhy est en fait un échangeur à tête d'épingle auquel a été ajouté un séparateur air/eau centrifuge dans la partie inférieure. Le système dispose de deux échangeurs coaxiaux, le premier permettant d'amener l'air en dessous de son point de rosée, le second permettant à ramener l'air à une température convenant

à son utilisation et en particulier à augmenter l'efficacité du refroidissement. Ce type d'échangeur se définit par une très faible perte en charge.

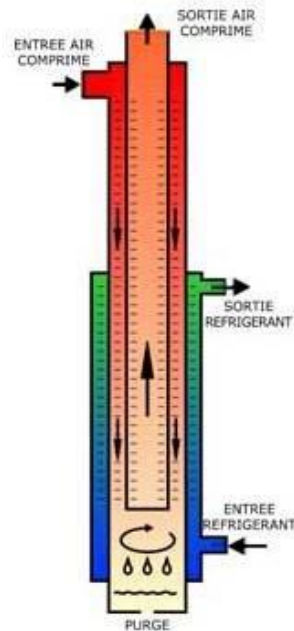


Figure1.5: Colonne de Bouhy

II.4.6 Echangeurs à bloc

L'échangeur à bloc est un type d'échangeur de chaleur réservé à des applications spécifiques. Il consiste en un bloc d'une matière thermiquement conductrice percé de multiples canaux dans lesquels circulent les 2 fluides. Le bloc est le plus fréquemment composé de graphite additionné quelquefois de polymères pour perfectionner les propriétés mécaniques de l'échangeur. Le bloc est positionné dans une structure qui assure la distribution des liquides dans les canaux.

Le bloc peut avoir différentes formes : cylindrique ou cubique. Il peut toujours être composé d'un seul bloc ou de plusieurs parties empilées de façon à permettre les fluides de passer d'une partie à l'autre. L'intérêt de ce type d'échangeur de chaleur est essentiellement sa résistance chimique aux liquides corrosifs mais aussi sa capacité modulaire : le bloc peut aisément être remplacé en cas de fuites.

Le fait que le rapport volume libre pour passage des fluides/volume du bloc est particulièrement petit crée une grande inertie dans les cas de changements de température : le bloc agit comme un réservoir et peut lisser les différences de température.

Les blocs sont cependant fragiles tant aux chocs qu'aux grands écarts de température (problème de dilatation non-uniforme pouvant conduire à des fissurations du bloc). Le prix est assez élevé comparé aux autres types d'échangeurs et le transfert de chaleur est généralement moyen: l'épaisseur de la paroi d'échange est plus grande que pour une surface d'échange en métal pour cause de fragilité, ce qui augmente la résistance au transfert.

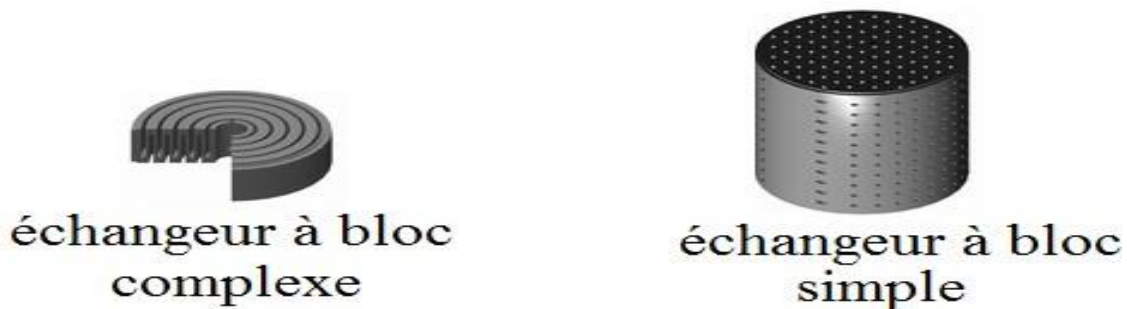


Figure1.6: deux types d'échangeurs à bloc

II.4.7 Echangeurs à ailettes

Un échangeur à ailettes est un échangeur assez simple: il consiste en un conduit cylindrique ou rectangulaire sur lequel sont fixées des lames métalliques de différentes formes. Le fluide de refroidissement est généralement l'air ambiant.

La chaleur est transférée du fluide chaud circulant dans le conduit principal aux lames métalliques par conduction thermique; ces lames se refroidissent au contact de l'air. Ce type d'échangeur est utilisé pour le chauffage dans les bâtiments: de l'eau est chauffée dans l'installation de chauffage et circule dans des radiateurs qui sont des échangeurs à ailettes. On utilise aussi ce type d'installation pour refroidir les moteurs de voiture ou encore les moteurs en tout genre. Dans ce dernier cas, la chaleur due aux frottements ainsi qu'à l'induction magnétique (cas d'un moteur électrique) est directement transférée à la protection extérieure du moteur qui possède des ailettes fixées à sa surface. Le transfert thermique est limité surtout du côté du fluide de refroidissement par manque d'un dispositif de circulation: l'air circule essentiellement par convection naturelle autour de l'échangeur. Cette limitation peut cependant être supprimée par ajout d'un dispositif de ventilation. Cet échangeur est particulièrement simple et peut prendre des formes spécifiques, ce qui le rend intéressant dans l'électronique [4].



Figure1.7: Echangeur à ailettes.

Chapitre II

Description et Caractéristiques techniques du banc expérimental

Introduction

Au laboratoire d'énergétique du département de génie mécanique, existe plusieurs bancs d'essai en transfert d'énergie thermique. Parmi ces bancs d'essai on peut inventorier des bancs d'essai d'échangeurs de chaleur à double tubes et un échangeur de chaleur à faisceau de tubes et calandre. L'absence de banc d'essai d'échangeur de chaleur à ailettes nous a motivé à nous engager à en réaliser un.

Dans ce chapitre nous allons présenter notre banc d'essai qui a été partiellement réalisé car nous avons rencontré un problème d'accès au laboratoire en raison du confinement appliqué à cause de la pandémie que nous vivons en ce moment (Corona virus, Covid-19), ce qui nous a empêché d'acquérir l'ensemble d'instrumentation nécessaires au banc expérimental, ce qui a eu des conséquences sur la réalisation du montage ainsi que les essais qui devraient être effectués. Pour contourner cette difficulté, nous avons pris en considération les caractéristiques techniques d'un banc d'essai commercialisé par Gunt(ET300), qui est similaire au notre, et nous les avons utilisés pour simuler des essais expérimentaux virtuels. Avec des relevés

expérimentaux supposés nous déterminons les efficacités possibles de ce type d'échangeur à ailettes et l'influence du changement de quelques paramètres sur le phénomène d'échange de chaleur mis en jeu.

II.1. Description de notre banc d'essai:

Notre banc d'essai a pour but de réaliser une étude expérimentale d'un échangeur de chaleur à ailettes en utilisant comme fluides caloporteurs de l'eau chaude et de l'air froid. Pour permettre un échange de chaleur entre ces deux fluides nous avons équipé notre banc d'essai par un ventilateur pour assurer une circulation de l'air froid à travers l'échangeur de chaleur suivant un courant croisé par rapport à l'écoulement de l'eau chaude. A la sortie du ventilateur, l'air traverse un convergent ensuite une tuyère avant de passer à travers l'échangeur de chaleur qui est logé dans un caisson calorifugé pour assurer l'isolation thermique avec le milieu extérieur (Figure II.8).



Figure II.8: Banc d'essai expérimental d'échangeur de chaleur à ailettes

II.2 Les éléments constituant le banc d'essai

II.2.1 Les matériaux utilisés:

- 1- Contre-plaqué en bois est utilisé pour monter la table
- 2- Tôle en acier galvanisé est utilisé pour la fabrication du caisson



Figure II.9: plaques en bois

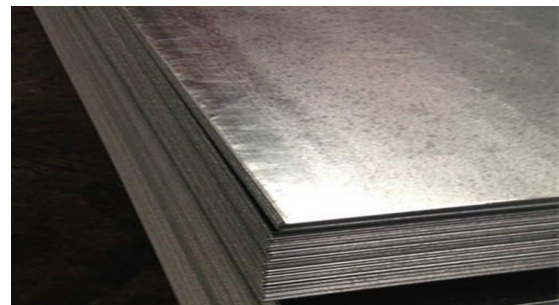


Figure II.10: tôles en galvanisé

II.2.2 Equipement réalisé

- Caisson fabriqué en acier galvanisé pour assurer une isolation thermique de l'échangeur de chaleur et le ventilateur avec le milieu extérieur.
- Table fabriquée avec des dimensions correspondant à l'encombrement du banc d'essai.



Figure II.11: caisson



Figure II.12: table

II.2.3 Equipement d'échangeur de chaleur:

- Ventilateur: C'est le générateur de l'air froid modifié de telle façon qu'on peut le contrôler à distance avec un commutateur sur le tableau.
- L'échangeur de chaleur:l'élément principal du banc expérimental.



Figure II.13: ventilateur



Figure II.14: radiateur

II.2.4 Les appareils de mesure (instrumentation)

- Anémomètre: il nous permet de mesurer la vitesse de l'écoulement de l'air pour le calcul du débit d'air avec la connaissance de la section de passage. Nous avons utilisé ce procédé à cause de l'indisponibilité d'un débitmètre de gaz.
- débitmètre de liquide: il nous permet de mesurer le débit d'eau chaude à l'entrée de l'échangeur de chaleur.



Figure II.15: anémomètre

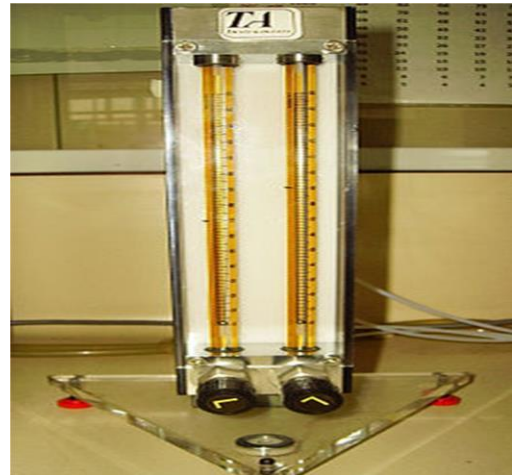


Figure II.16: débitmètre

- Thermomètres digital: Il nous permet de mesurer la température d'entrer d'air froid à l'entrée et à la sortie de l'échangeur de chaleur.
- Thermomètres à aiguille: Il nous permet de mesurer la température d'eau chaude à l'entrée et à la sortie de l'échangeur de chaleur.



Figure II.17: thermomètre digitale



Figure II.18: thermomètre a aiguille

II.2.5 Les équipements de circulation du fluide caloporteur liquide

- Pompe à eau: Elle permet de faire circuler l'eau dans le banc expérimental dans un circuit fermé.
- Tubes multicouches: Ce type de tubes permet l'interconnexion entre l'échangeur de chaleur, la pompe et le réservoir d'eau chaude.



Figure II.19: Pompe laboratoire



Figure II.20: tubes multicouches

- Té multicouches: Il permet de raccorder les tubes multicouches avec un thermomètre a aiguille.
- Raccord multicouches: Il permet de raccorder les tubes multicouches.



Figure II.21: Té multicouches



Figure II.22: raccords multicouches

II.2.6 Les équipements électriques:

- Lampes de signalisations: signalisation de marche et arrêt.
- Disjoncteur: coupure d'électricité en cas de court-circuit.



Figure II.23: lampes de signalisation



Figure II.24: disjoncteur

- Résistance électrique: Il permet le chauffage de l'eau dans le réservoir avec un thermostat limité à 80°C.



Figure II.25: résistance électrique

II.3 Schématisation de l'installation :

Le schéma symbolique de notre banc expérimental est représenté par la figure II.27. L'air ambiant à la température du laboratoire d'environ 20°C, est aspiré à partir d'un ventilateur (4) et refoulé vers un échangeur de chaleur à ailettes (5), pour le traverser transversalement. L'air absorbe de la chaleur à partir de l'eau chaude qui circule à l'intérieur des tubes de l'échangeur de chaleur et dont l'écoulement en circuit fermé est assuré par une pompe (3) à partir d'un réservoir. Le réservoir est muni d'une résistance électrique (2) pour assurer une température chaude de l'eau à l'entrée de l'échangeur de chaleur. Cette température est limitée à 80°C à partir d'un thermostat.

Le banc expérimental est équipé d'instruments pour mesurer les températures et des débits des écoulements des fluides caloporteurs. Ces instruments ne sont pas représentés sur le schéma symbolique.

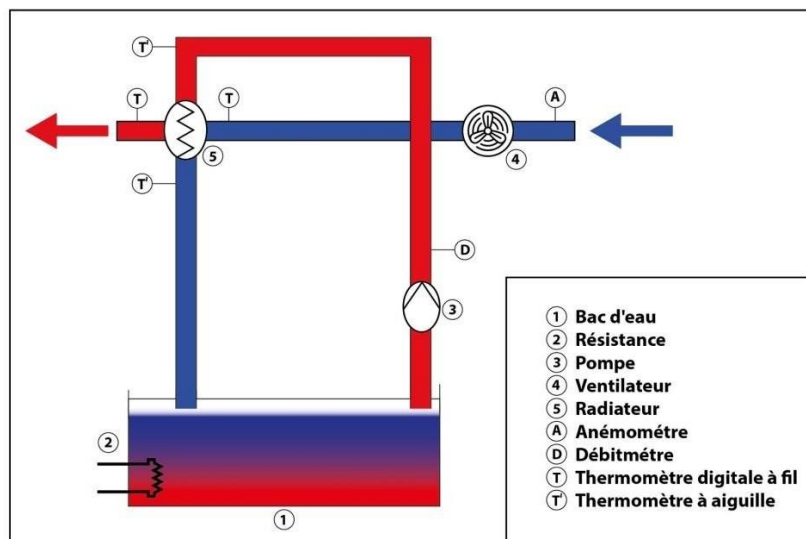


Figure II.27: schéma d'installation

II.4 Fonctionnement du banc expérimental:

Le fluide caloporteur chaud qui est l'eau s'écoule en circuit fermé entre le réservoir et l'échangeur de chaleur à ailettes à l'aide d'une pompe hydraulique. La température chaude de l'eau dans le réservoir est assurée par une résistance électrique chauffante et un thermostat pour limiter la température à 80 °C au maximum. Au démarrage de la pompe l'eau chaude commence à circuler et entre dans l'échangeur de chaleur à ailettes à travers un tube en cuivre en forme de serpent à épingle. En même moment le ventilateur commence à aspirer de l'air ambiant aux conditions normales (1 atm, 20°C). L'eau chaude va céder une certaine quantité de chaleur vers l'air froid en fonction du coefficient global d'échange de chaleur et de la surface d'échange de l'échangeur de chaleur muni d'ailettes du côté de l'air. Cette quantité de chaleur peut être déterminée en connaissant soit le coefficient d'échange global ou l'efficacité de l'échangeur de chaleur. Les appareils de mesures tel que débitmètre, anémomètre, thermomètres nous permettent d'atteindre cet objectif.

II.5 Spécification:

- 1- échangeur de chaleur à ailettes pour l'étude du transfert de chaleur convectif entre l'eau et l'air.
- 2- fonctionnement de l'échangeur de chaleur comme chauffeur d'air ou refroidisseur d'eau.
- 3- circuit d'eau chaude fermé avec dispositif de chauffage électrique.
- 4- écoulement d'eau et écoulement d'air ajustables.

II.6 Description du banc d'essai ET-300:

Suite aux difficultés rencontrées pour la réalisation de notre banc expérimental nous nous sommes intéressés à un banc d'essai commercialisé par Gunt sous la

référence ET-300 et qui est similaire au notre afin d'utiliser ses caractéristiques techniques.

Le banc d'essai ET-300 est utilisé pour réaliser des études quantitatives sur un échangeur de chaleur à ailettes utilisant comme fluides de l'eau chaude et de l'air froid. L'élément central du banc d'essai est un conduit d'air avec ventilateur, dans lequel est installé un échangeur de chaleur à ailettes.

Le banc d'essai dispose d'un circuit d'eau chaude fermé composé des éléments suivants: réservoir d'eau avec dispositif de chauffage, pompe, débit ajustable, capteur de débit électromagnétique et échangeur de chaleur à ailettes. Le débit peut être ajusté par une soupape.



FigureII.28: banc d'essai ET 300

1 ventilateur, 2 conduits d'air avec points de mesure de la température, 3 échangeur de chaleur, 4 débitmètre, 5 capteur de pression, 6 réservoir d'eau, 7 pompe, 8 dispositif de chauffage avec thermostat, 9 éléments d'affichage et de commande.

II.7 Spécification :

1- échangeur de chaleur à ailettes pour l'étude du transfert de chaleur convectif entre l'eau et l'air.

2- fonctionnement de l'échangeur de chaleur comme chauffeur d'air ou refroidisseur d'eau.

3- circuit d'eau chaude fermé avec dispositif de chauffage électrique, thermostat, réservoir d'eau et pompe.

4- écoulement d'eau et écoulement d'air ajustables.

5- détermination du débit volumétrique de l'air en se servant de la pression différentielle au niveau de la tuyère de mesure.

6- affichage numérique des températures, débits et pression.

II.8 Caractéristiques techniques:

Échangeur de chaleur à ailettes

- Matériau: Cu/Al
- Surface de transfert moyenne: $2,80\text{m}^2$ (côté air)
- Puissance: 2kW
- Température de l'eau: 70°C Pompe
- Puissance absorbée: 470W
- débit de refoulement max: $4,2\text{m}^3/\text{h}$
- hauteur de refoulement max: 20,5m Ventilateur
- puissance absorbée: 0,25kW

Chapitre II : Description et Caractéristiques techniques du banc expérimental

- débit de refoulement max: $13\text{m}^3/\text{min}$
- différentiel de pression max: 430Pa , Réservoir d'eau: 28L , Dispositif de chauffage: 2kW Thermostat: max. 80°C
- Plages de mesure température: $4 \times 0 \dots 100^\circ\text{C}$
- débit: eau $0 \dots 6\text{m}^3/\text{h}$
- pression: eau $0 \dots 4\text{bar abs.}$
- débit massique: air $0 \dots 250\text{g/s}$ 230V ,

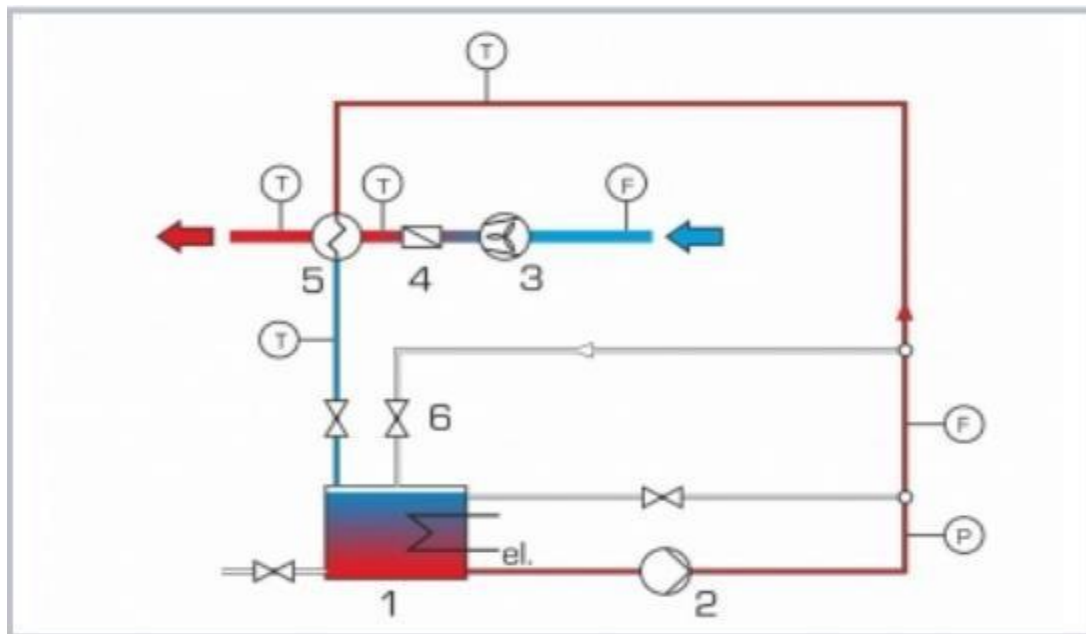


Figure II.29: schéma de circuit du banc d'essai ET 300

1 réservoir d'eau avec dispositif de chauffage, 2 pompe, 3 ventilateur, 4 vanne papillon, 5 échangeur de chaleur, 6 soupapes pour l'ajustage de l'essai (échangeur de chaleur ou caractéristique de la pompe); F débit, P pression, T température [5].

Chapitre III

La théorie des échangeurs de chaleur

III. La théorie des échangeurs de chaleur:

La théorie des échangeurs de chaleur propose de nombreuses formules parce qu'ils sont différents selon la disposition des débits, le type de construction et le sens déplacements des fluides, citons quelques formules:

III.1. Flux de chaleur de fluide chaud:

$$\dot{Q}_c = -\dot{m}_c c_{p_c} (T_{cs} - T_{ce})$$

III.2. Flux de chaleur de fluide froid:

$$\dot{Q}_f = -\dot{m}_f c_{p_f} (T_{fs} - T_{fe})$$

III.3. Flux de chaleur globale:

$$\dot{Q} = K S \Delta TLM$$

III.4. Le coefficient de transfert thermique K:

$$K = \frac{1}{\frac{1}{h_{a1}} + \frac{\delta}{\lambda} + \dots + \frac{1}{h_{a2}}}$$

III.5. La différence de température moyenne logarithmique ΔTLM:

- Pour circulation à co-courant :

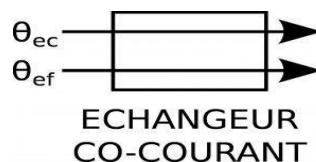


Figure I. 11: schéma co-courant

$$\Delta TLM = \frac{(T_{a1} - T_{b1}) - (T_{a2} - T_{b2})}{\ln \frac{(T_{a1} - T_{b1})}{(T_{a2} - T_{b2})}}$$

- Pour circulation à contre-courant:

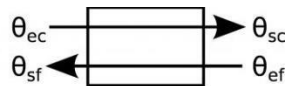


Figure I. 12: schéma d'un échangeur à contre-courant

$$\Delta TLM = \frac{(T_{ce} - T_{fs}) - (T_{cs} - T_{fe})}{\ln \frac{(T_{ce} - T_{fs})}{(T_{cs} - T_{fe})}}$$

- Pour circulation à courant -croisé :

$$\Delta TLM_{c-cr} = (\Delta TLM_{c-c}) \cdot \epsilon$$

$$P = \frac{T_{fs} - T_{fe}}{T_{ce} - T_{fe}} ; R = \frac{T_{ce} - T_{cs}}{T_{fs} - T_{fe}}$$

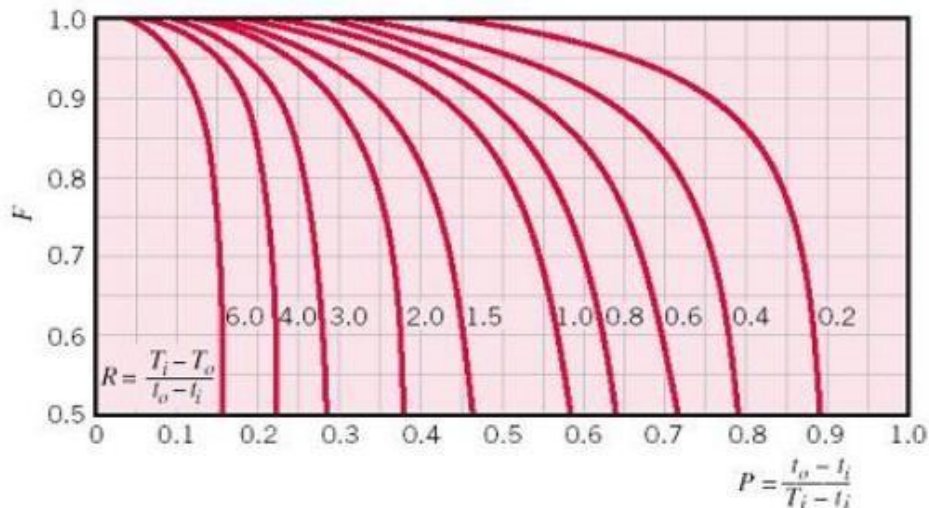


Figure III. 3: abaque pour déterminer ϵ [6]

III.6. Nombre d'unité de transfert NUT:

- Pour circulation à contre -courant:

$$NUT = \frac{1}{R - 1} \ln \left(\frac{R - 1}{R - \epsilon} \right)$$

- Pour circulation à co-courant:

$$\epsilon = \frac{-\ln [1 - (1 + Cr) \theta] 1 + Cr}{Cr}$$

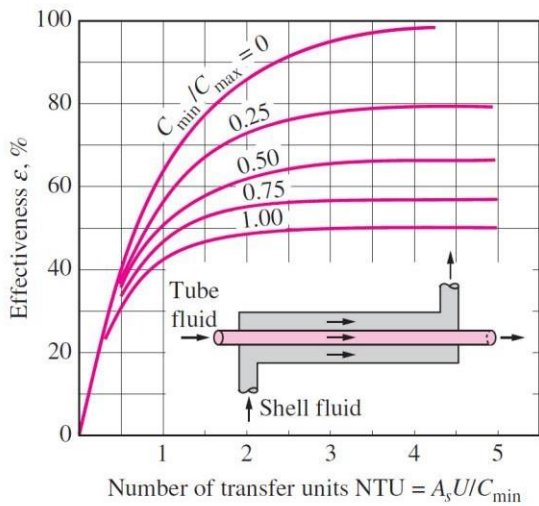
NUT: nombre d'unités de transfert qui est représentatif du pouvoir d'échange de l'échangeur:

$$NUT = \frac{UA}{C_{min} \Delta T_m}$$

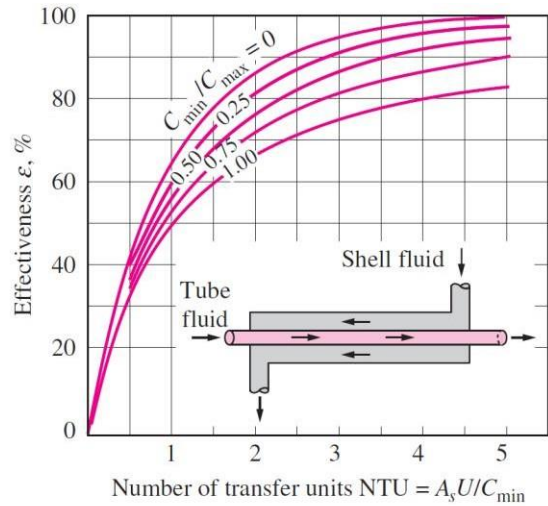
III.7. Rapport des débits de capacité thermique Cr:

$$Cr = \frac{C_{max}}{C_{min}}$$

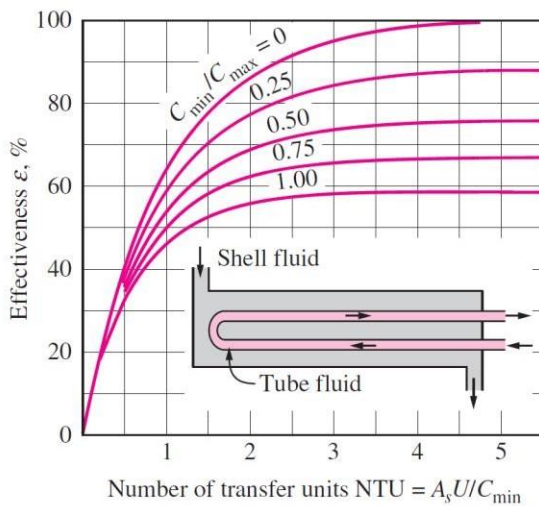
Il existe des abaques pour déterminer l'efficacité de l'échangeur thermique en fonction des valeurs NUT et pour la plupart des configurations courantes.



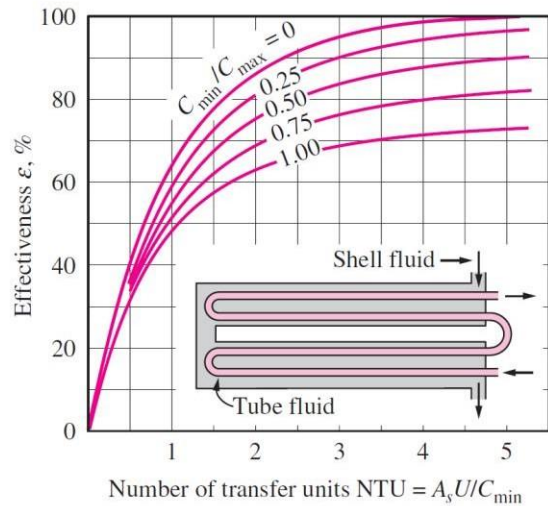
(a) Parallel-flow



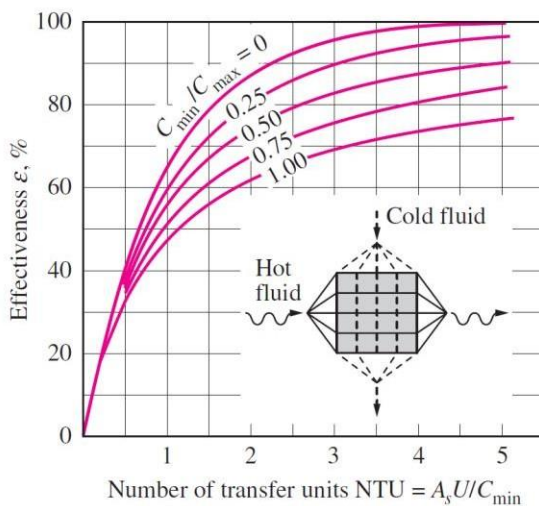
(b) Counter-flow



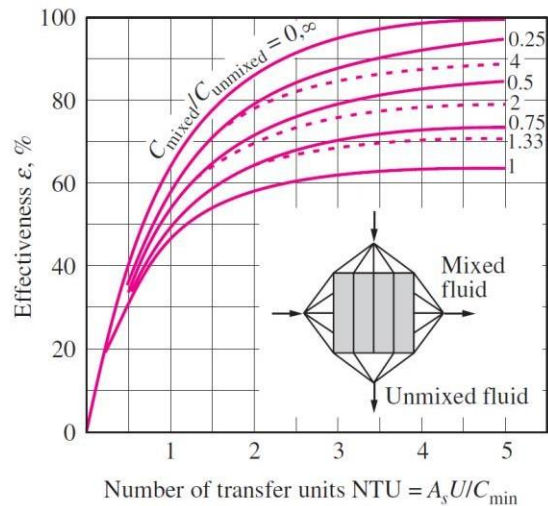
(c) One-shell pass and 2, 4, 6, ... tube passes



(d) Two-shell passes and 4, 8, 12, ... tube passes



(e) Cross-flow with both fluids unmixed



(f) Cross-flow with one fluid mixed and the other unmixed

Figure III.4: abaques pour déterminer l'efficacité des échangeur thermiques [7]

III.8. Efficacité d'un échangeur de chaleur:

Effectiveness relations for heat exchangers: $NTU = UA_s/C_{min}$ and $c = C_{min}/C_{max} = (\dot{m}C_p)_{min}/(\dot{m}C_p)_{max}$ (Kays and London, Ref. 5.)

Heat exchanger type	Effectiveness relation
1 <i>Double pipe:</i>	
Parallel-flow	$\epsilon = \frac{1 - \exp[-NTU(1 + c)]}{1 + c}$
Counter-flow	$\epsilon = \frac{1 - \exp[-NTU(1 - c)]}{1 - c \exp[-NTU(1 - c)]}$
2 <i>Shell and tube:</i>	
One-shell pass 2, 4, . . . tube passes	$\epsilon = 2 \left\{ 1 + c + \sqrt{1 + c^2} \frac{1 + \exp[-NTU\sqrt{1 + c^2}]}{1 - \exp[-NTU\sqrt{1 + c^2}]} \right\}^{-1}$
3 <i>Cross-flow (single-pass)</i>	
Both fluids unmixed	$\epsilon = 1 - \exp \left\{ \frac{NTU^{0.22}}{c} [\exp(-c NTU^{0.78}) - 1] \right\}$
C_{max} mixed, C_{min} unmixed	$\epsilon = \frac{1}{c} (1 - \exp \{1 - c[1 - \exp(-NTU)]\})$
C_{min} mixed, C_{max} unmixed	$\epsilon = 1 - \exp \left\{ -\frac{1}{c} [1 - \exp(-c NTU)] \right\}$
4 <i>All heat exchangers with $c = 0$</i>	$\epsilon = 1 - \exp(-NTU)$

Figure III.5: Tableau des formules d'efficacité [8]

Chapitre IV

Calcul analytique et résultats expérimentaux estimés

Introduction

Dans ce chapitre nous allons faire une étude théorique de l'échangeur a ailettes. Commençant par déterminer l'intervalle probable de son efficacité et c'est l'expérience qui aurait pu la déterminer précisément si le banc d'essai aurait été réalisé, ensuite nous allons se focalisé sur un paramètre essentiel qui a une grande influence sur l'échange thermique ce sont les débits des fluides caloporteurs et de suivre les résultats lors de variation de ces paramètres avec la représentation de ces résultats sous forme de tableaux et de graphes. Nous interprétons ces résultats pour analyser l'effet des débits sur le coefficient global d'échange de chaleur et sur l'efficacité de l'échangeur de chaleur à ailettes.

IV. Calcul analytique et résultats :

IV.1 Calcul d'efficacité énergétique ϵ :

$$\epsilon = \frac{Q_{\text{air}}}{Q_{\text{eau}}} = \frac{Q_{\text{air}} \rho_{\text{air}} (T_{\text{air}} - T_{\text{air}})}{Q_{\text{eau}} (\rho_{\text{eau}} - \rho_{\text{air}})} \quad \epsilon = \frac{Q_{\text{air}}}{Q_{\text{eau}}} = \frac{Q_{\text{air}} \rho_{\text{air}} (T_{\text{air}} - T_{\text{air}})}{Q_{\text{eau}} (\rho_{\text{eau}} - \rho_{\text{air}})}$$

On suppose que lors de l'expérience nous chauffons l'eau jusqu'à 80°C dans un réservoir d'eau chauffé avec une résistance électrique équipé d'un thermostat.

Avec les pertes thermiques entre le réservoir d'eau chaude et l'entrée de l'échangeur de chaleur, débit nous supposons que l'eau entre à 70°C, avec un qui peut varier de 1 m³/h à 4,2 m³/h et nous aspirons l'air ambiant à 20°C donc $T_{\text{air}}=20^\circ\text{C}$. Nous fixons le débit d'air a 13 m³/min d'après les caractéristiques du banc d'essai ET 300 donc on peut faire varier le débit volumique de l'eau de 1 à 4 m³/h avec une variation de $\Delta V = 0,5 \text{ m}^3/\text{h}$

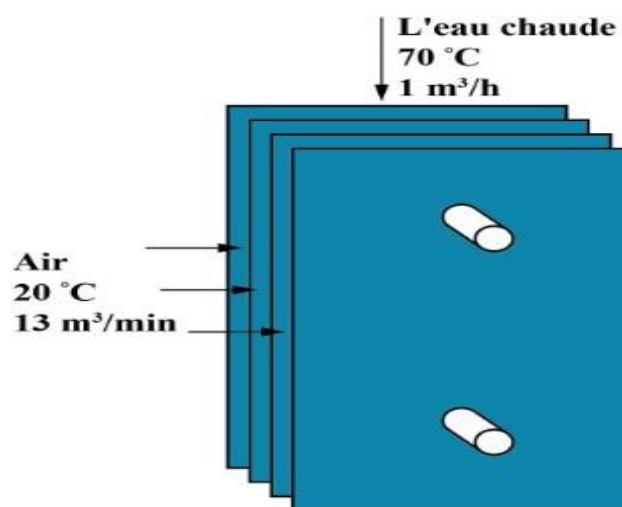


Figure IV.1: dessin approximative du radiateur.

CHAPITRE IV : CALCUL ANALYTIQUE ET RESULTATS EXPERIMENTAUX ESTIMES

Calcul de \dot{Q}_{air} :

$$\dot{Q}_{\text{air}} = \dot{m}_{\text{air}} c_{p,\text{air}} \Delta T_{\text{air}} = 9775 \times \frac{1}{3600} \times 4190 = 11377 \text{ W/}^\circ\text{C}$$

$$\dot{Q}_{\text{eau}} = \dot{m}_{\text{eau}} c_{p,\text{eau}} \Delta T_{\text{eau}} = 1204 \times \frac{13}{60} \times 1007 = 2627 \text{ W/}^\circ\text{C}$$

Donc \dot{Q}_{air} sera toujours celui de l'air

$$\dot{Q}_{\text{air}} = \dot{Q}_{\text{eau}} = 2627 \text{ W/}^\circ\text{C}$$

$$\varepsilon = \frac{\dot{Q}_{\text{air}}}{\dot{Q}_{\text{air,max}}} = \frac{\dot{m}_{\text{air}} c_{p,\text{air}} (T_{\text{air,sortie}} - T_{\text{air,entree}})}{\dot{m}_{\text{air}} c_{p,\text{air}} (T_{\text{air,sortie}} - T_{\text{air,entree}})} = \frac{\dot{m}_{\text{eau}} c_{p,\text{eau}} (T_{\text{eau,sortie}} - T_{\text{eau,entree}})}{\dot{m}_{\text{air}} c_{p,\text{air}} (T_{\text{air,sortie}} - T_{\text{air,entree}})} = \frac{(T_{\text{eau,sortie}} - T_{\text{eau,entree}}) (T_{\text{air,sortie}} - T_{\text{air,entree}})}{(T_{\text{air,sortie}} - T_{\text{air,entree}}) (T_{\text{air,sortie}} - T_{\text{air,entree}})}$$

$$\varepsilon = \frac{(T_{\text{eau,sortie}} - 20)}{(70 - 20)} = \frac{T_{\text{eau,sortie}} - 20}{50}$$

Donc nous pouvons déterminer l'efficacité de l'échangeur à ailettes soit en mesurant la température de sortie de l'air soit celle de l'eau. C'est l'expérience qui aurait pu la déterminer si le banc d'essai aurait été réalisé.

$T_{\text{air,sortie}}$	ε (%)	Observation
25	10 %	Peu probable
30	20 %	Peu probable
35	30 %	Peu probable
40	40 %	Peu probable
45	50 %	Peu probable
50	60 %	Probable
55	70 %	Probable
60	80 %	probable
65	90 %	Peu probable

On peut aussi calculer l'efficacité de l'échangeur en utilisant la deuxième formule:

$$\varepsilon = \frac{\dot{Q}_{\text{air}}}{\dot{Q}_{\text{air,max}}} = \frac{\dot{m}_{\text{air}} c_{p,\text{air}} (T_{\text{air,sortie}} - T_{\text{air,entree}})}{\dot{m}_{\text{air}} c_{p,\text{air}} (T_{\text{air,sortie}} - T_{\text{air,entree}})} = \frac{\dot{m}_{\text{eau}} c_{p,\text{eau}} (T_{\text{eau,sortie}} - T_{\text{eau,entree}})}{\dot{m}_{\text{air}} c_{p,\text{air}} (T_{\text{air,sortie}} - T_{\text{air,entree}})}$$



CHAPITRE IV : CALCUL ANALYTIQUE ET RESULTATS EXPERIMENTAUX ESTIMES

$$T = \frac{977,5 \times \frac{\dot{Q}_{\text{eau}}}{3600} \times 4190(70 - T)}{262,7(70 - 20)} = 0,086616 \times \dot{Q}_{\text{eau}} \times (70 - T_{\text{eau}})$$

Seulement dans cette formule il y a deux grandeurs qui peuvent varier dans le banc d'essai, le débit volumique d'eau et la température de l'eau à la sortie que l'expérience aurait pu la déterminer si le banc d'essai aurait été réalisé

3	$\frac{\dot{Q}_{\text{eau}}}{\text{m}^3/\text{s}}$	$\frac{\dot{Q}_{\text{air}}}{\text{m}^3/\text{s}}$	$\frac{\dot{Q}_{\text{air}}}{\text{m}^3/\text{s}}$	$\frac{\dot{Q}_{\text{air}}}{\text{m}^3/\text{s}}$	$\frac{\dot{Q}_{\text{air}}}{\text{m}^3/\text{s}}$	$\frac{\dot{Q}_{\text{air}}}{\text{m}^3/\text{s}}$	$\frac{\dot{Q}_{\text{air}}}{\text{m}^3/\text{s}}$
$\frac{\dot{Q}_{\text{air}}}{\text{m}^3/\text{s}} = \frac{\dot{Q}_{\text{eau}}}{\text{m}^3/\text{s}}$	43,31	64,96	86,62	108,27	129,93	151,58	173,24
$\frac{\dot{Q}_{\text{air}}}{\text{m}^3/\text{s}} = \frac{\dot{Q}_{\text{eau}}}{\text{m}^3/\text{s}}$	86,62	129,93	173,24	216,55	259,86	303,16	346,47
$\frac{\dot{Q}_{\text{air}}}{\text{m}^3/\text{s}} = \frac{\dot{Q}_{\text{eau}}}{\text{m}^3/\text{s}}$	129,93	194,89	259,86	324,82	389,78	454,75	519,71
$\frac{\dot{Q}_{\text{air}}}{\text{m}^3/\text{s}} = \frac{\dot{Q}_{\text{eau}}}{\text{m}^3/\text{s}}$	173,24	259,86	346,47	433,09	519,71	606,33	692,95
$\frac{\dot{Q}_{\text{air}}}{\text{m}^3/\text{s}} = \frac{\dot{Q}_{\text{eau}}}{\text{m}^3/\text{s}}$	216,55	324,82	433,09	541,37	649,64	757,91	866,18
$\frac{\dot{Q}_{\text{air}}}{\text{m}^3/\text{s}} = \frac{\dot{Q}_{\text{eau}}}{\text{m}^3/\text{s}}$	259,86	389,78	519,71	649,64	779,57	909,49	1039,42
$\frac{\dot{Q}_{\text{air}}}{\text{m}^3/\text{s}} = \frac{\dot{Q}_{\text{eau}}}{\text{m}^3/\text{s}}$	303,16	454,75	606,33	757,91	909,49	1061,08	1212,66
$\frac{\dot{Q}_{\text{air}}}{\text{m}^3/\text{s}} = \frac{\dot{Q}_{\text{eau}}}{\text{m}^3/\text{s}}$	346,47	519,71	692,95	866,18	1039,42	1212,66	1385,89
$\frac{\dot{Q}_{\text{air}}}{\text{m}^3/\text{s}} = \frac{\dot{Q}_{\text{eau}}}{\text{m}^3/\text{s}}$	389,78	584,67	779,57	974,46	1169,35	1364,24	1559,13

L'efficacité en rouge est impossible car les rapports des capacités calorifiques sont trop élevés ($C_{\text{max}}/C_{\text{min}} = C_{\text{eau}}/C_{\text{air}} = 4,33-17,32$) pour que l'eau ayant un grand débit et une grande capacité calorifique soit refroidit avec un écart de température élevé avec de l'air qui a une capacité calorifique faible.

CHAPITRE IV : CALCUL ANALYTIQUE ET RESULTATS EXPERIMENTAUX ESTIMES

Donc on peut retenir des rendements de notre échangeur à ailettes entre 65% jusqu'à 85% qui peut être déterminé avec exactitude à partir des essais sur le banc d'essai s'il aurait été réalisé.

A partir de cela on peut déterminer le coefficient global d'échange de chaleur U pour une efficacité déterminée expérimentalement à partir des relevés des températures de l'entrée et de la sortie de l'eau et de l'air.

$$U = \frac{\dot{Q}_{eau} \rho_{eau} \Delta T_{eau}}{\rho_{air} (\Delta T_{air})} = \frac{\dot{Q}_{air} \rho_{air} \Delta T_{air}}{\rho_{eau} \rho_{air} \Delta T_{air}} = \frac{(\rho_{eau} - \rho_{air})}{(\rho_{eau} - \rho_{air})}$$

Ou

$$U = \frac{\dot{Q}_{eau} \rho_{eau} \Delta T_{eau}}{\rho_{air} (\Delta T_{air})} = \frac{\dot{Q}_{air} \rho_{air} \Delta T_{air}}{\rho_{eau} \rho_{air} \Delta T_{air}}$$

Pour un débit d'eau 1 m³/h

$$C_{min}/C_{max}=0,231$$

Notre échangeur est un échangeur à écoulement croisé avec simple passe côté air mais c'est multi-passes côté eau donc c'est le cas 4 (All heatexchangers -Figure I.15)

IV.2 Le nombre d'unités de transfert NUT:

Pour une efficacité de notre échangeur de chaleur $\epsilon=0,65$

$$NUT = -\ln(1 - \epsilon) = -\ln(1 - 0,65) = 1,05$$

$$NUT = \frac{UA}{C_{min}} \Rightarrow U = NUT \times \frac{C_{min}}{A}$$

CHAPITRE IV : CALCUL ANALYTIQUE ET RESULTATS EXPERIMENTAUX ESTIMES

on prend la surface de l'échangeur de chaleur côté air utilisé dans le banc d'essai de ET 300 $A=2,8 \text{ m}^2$,. Il faut noter que cette valeur doit être remplacé par la valeur réelle de l'échangeur de chaleur montée sur notre banc expérimental.

$$q = \frac{m_{\text{air}}}{\rho} \times \rho_{\text{air}} = 1,05 \times \frac{262,7}{2,8} = 98,5 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$$

IV.3 La puissance de l'échangeur de chaleur:

$$q = \frac{Q_{\text{air}}}{S_{\text{air}}} = \frac{Q_{\text{eau}}}{S_{\text{eau}}}$$

$$Q = Q_{\text{air}} = Q_{\text{eau}} = m_{\text{eau}} \times c_{\text{eau}} \times (T_{\text{eau,entree}} - T_{\text{eau,sortie}})$$

$$Q = 0,65 \times 262,7 \times (70 - 20) = 8537,75 \text{ W}$$

IV.4 Température de sortie de l'air Tsair:

$$Q = m_{\text{air}} \times c_{\text{air}} \times (T_{\text{air,entree}} - T_{\text{air,sortie}}) = m_{\text{eau}} \times c_{\text{eau}} \times (T_{\text{eau,entree}} - T_{\text{eau,sortie}}) \Rightarrow T_{\text{air,sortie}} = T_{\text{air,entree}} + \frac{Q}{m_{\text{air}} \times c_{\text{air}}}$$

$$T_{\text{air,sortie}} = 20 + \frac{8537,75}{1204 \times \frac{1,3}{60} \times 1007} = 52,5^\circ\text{C}$$

IV.5 Température de sortie de l'eau Tc eau:

$$Q = m_{\text{air}} \times c_{\text{air}} \times (T_{\text{air,entree}} - T_{\text{air,sortie}}) = m_{\text{eau}} \times c_{\text{eau}} \times (T_{\text{eau,entree}} - T_{\text{eau,sortie}}) \Rightarrow T_{\text{eau,sortie}} = T_{\text{eau,entree}} - \frac{Q}{m_{\text{eau}} \times c_{\text{eau}}}$$

Pour un débit d'eau $m_{\text{eau}} = 2 \text{ kg/s}$

$$T_{\text{eau,sortie}} = T_{\text{eau,entree}} - \frac{Q}{m_{\text{eau}} \times c_{\text{eau}}} = 70 - \frac{8537,75}{2 \times 4190} = 65,9775 \times$$

IV.6 Les résultats pour les autres débits d'eau:

	ϵ	$\frac{NU}{T}$	U	q	T_{Sai} r	T_{Seau}
$\frac{Q_{\text{air}}}{S_{\text{air}}} = \frac{Q_{\text{eau}}}{S_{\text{eau}}}$	65 %	1,05 0	98,51	8537,75	52,5 0	62,50
	70 %	1,20 4	112,9 6	9194,50	55,0 0	61,92
	75 %	1,38 6	130,0 4	9851,25	57,5 0	61,34
	80	1,60	150,9	10508,0	60,0	60,76

	%	9	6	0	0	
	85	1,89	177,9	11164,7	62,5	60,19
	%	7	8	5	0	

CHAPITRE IV : CALCUL ANALYTIQUE ET RESULTATS EXPERIMENTAUX ESTIMES

	ε	NU T	U	q	T _{Sai} r	T _{Seau}
$\dot{m}_{\text{eau}} = 0,022 /$	65 %	1,05 0	98,51	8537,75	52,5 0	65,00
	70 %	1,20 4	112,9 6	9194,50	55,0 0	64,61
	75 %	1,38 6	130,0 4	9851,25	57,5 0	64,23
	80 %	1,60 9	150,9 6	10508,0 0	60,0 0	63,84
	85 %	1,89 7	177,9 8	11164,7 5	62,5 0	63,46

2

	ε	NUT	U	q	T _{Sai} r	T _{Sea} u
$\dot{m}_{\text{eau}} = 0,022 /$	65 %	1,050	98,51	8537,75	52,5 0	66,25
	70 %	1,204	112,96	9194,50	55,0 0	65,96
	75 %	1,386	130,04	9851,25	57,5 0	65,67
	80 %	1,609	150,96	10508,00	60,0 0	65,38
	85 %	1,897	177,98	11164,75	62,5 0	65,09

	ε	NU T	U	q	T _{Sai} r	T _{Seau}
$\dot{m}_{\text{eau}} = 0,022 /$	65 %	1,05 0	98,51	8537,75	52,5 0	67,00
	70 %	1,20 4	112,9 6	9194,50	55,0 0	66,77
	75 %	1,38 6	130,0 4	9851,25	57,5 0	66,54
	80 %	1,60 9	150,9 6	10508,0 0	60,0 0	66,31
	85 %	1,89 7	177,9 8	11164,7 5	62,5 0	66,07

	ε	NU T	U	q	T _{Sai} r	T _{Seau}
$\dot{m}_{\text{eau}} = 0,022 /$	65 %	1,05 0	98,51	8537,75	52,5 0	67,50
	70	1,20	112,9	9194,50	55,0	67,31

	%	4	6		0	
	75	1,38	130,0	9851,25	57,5	67,11
	%	6	4		0	
	80	1,60	150,9	10508,0	60,0	66,92
	%	9	6	0	0	
	85	1,89	177,9	11164,7	62,5	66,73
	%	7	8	5	0	

	ε	NU T	U	q	T_{Sai} r	T_{Seau}
h_{0,00} = 0,020 /	65	1,05	98,51	8537,75	52,5	67,86
	%	0			0	
	70	1,20	112,9	9194,50	55,0	67,69
	%	4	6		0	
	75	1,38	130,0	9851,25	57,5	67,53
	%	6	4		0	
	80	1,60	150,9	10508,0	60,0	67,36
	%	9	6	0	0	
	85	1,89	177,9	11164,7	62,5	67,20
	%	7	8	5	0	

CHAPITRE IV : CALCUL ANALYTIQUE ET RESULTATS EXPERIMENTAUX ESTIMES

	ε	$\frac{NU}{T}$	U	q	T_{sai} r	T_{Seau}
$\frac{q}{\rho C_p \Delta T} = \frac{U}{T}$	65 %	1,05 0	98,51	8537,75	52,5 0	68,12
	70 %	1,20 4	112,9 6	9194,50	55,0 0	67,98
	75 %	1,38 6	130,0 4	9851,25	57,5 0	67,84
	80 %	1,60 9	150,9 6	10508,0 0	60,0 0	67,69
	85 %	1,89 7	177,9 8	11164,7 5	62,5 0	67,55

IV.7 Les résultats sous forme graphique :

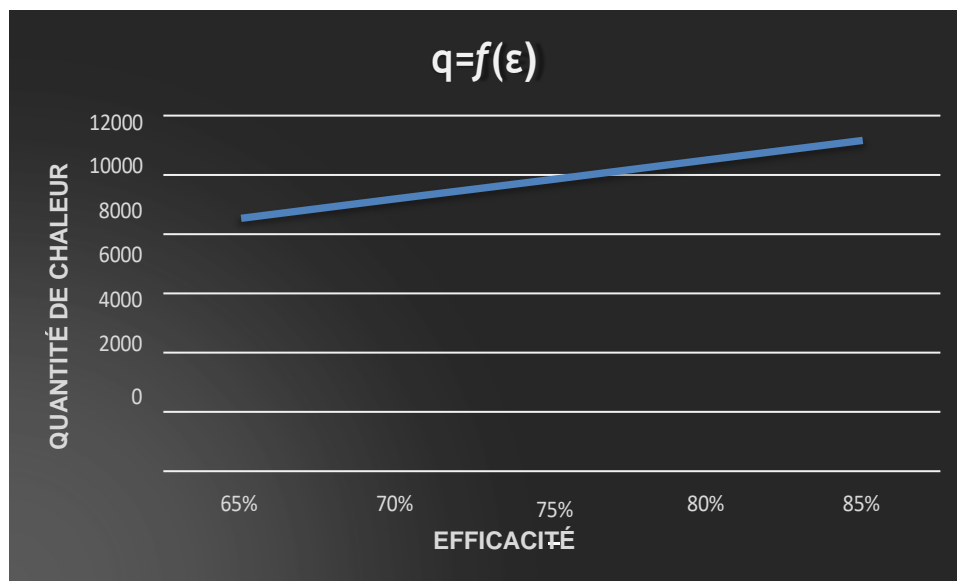


Figure IV.2: Effet de l'efficacité sur la quantité de chaleur totale échangée

La figure IV.2 est la représentation graphique de l'évolution de l'efficacité ε en fonction de la quantité de chaleur transférée dans l'échangeur de chaleur. Nous pouvons remarquer que les courbes sont régulièrement croissantes car un meilleur transfert de chaleur q traduit forcément une meilleure efficacité et cela est applicable pour tous les débits de sortie d'eau car les tableaux donnent les mêmes résultats donc même courbe pour chaque débit.



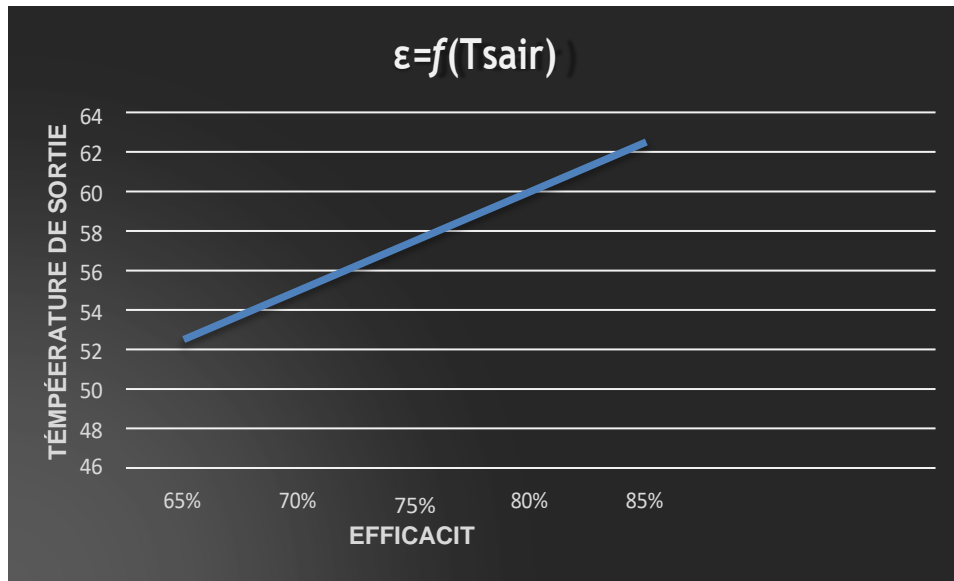


Figure IV.3 Effet de l'efficacité sur la température de sortie de l'air

La courbe de graphe 02 est la représentation graphique de l'évolution de l'efficacité ϵ en fonction de la température de sortie d'air $T_{s_{air}}$ pour un débit d'eau égale à $1 \text{ m}^3/\text{h}$ et elle a une relation directe sur ce que nous avons cité lors du commentaire de graphe précédent ci-dessus, car l'augmentation de la température à la sortie est liée directement à la quantité de chaleur transférer à l'air et donc une meilleur efficacité et cella aussi applicable pour tous les débits de sortie d'eau car les tableaux donnent les mêmes résultats donc même courbe pour chaque débit.

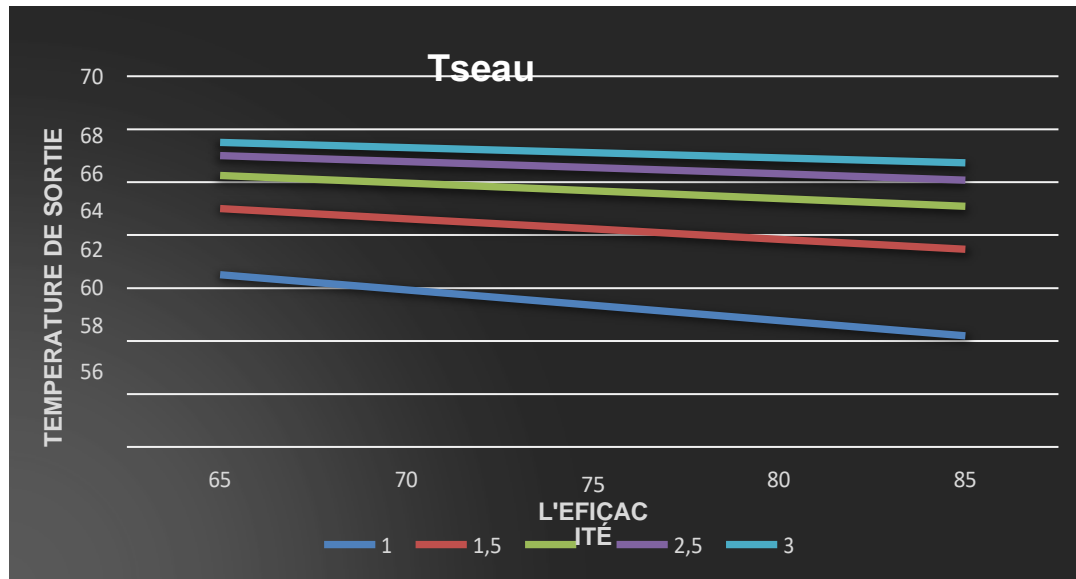


Figure IV.4: Effet de l'efficacité sur la température de sortie de l'eau pour différents débits d'eau

Les courbes de graphe 03 est la représentation graphique de l'évolution del'efficacité ϵ en fonction de la température de sortie d'eau T_{seu} pour différents débits d'eau \dot{V} . Cette variation de débit a un effet sur les deux autres paramètres comme on l'observe sur le graphe car l'augmentation du débit implique l'augmentation de la vitesse d'écoulement donc le fluide ne séjourne pas assez longtemps dans l'échangeur de chaleur pour céder sa chaleur malgré que l'augmentation de vitesse favorise l'amélioration du coefficient d'échange convectif. C'est pour cela qu'on remarque que l'augmentation du débit et accompagnée par une augmentation de température de sortie d'eau chaude, donc l'eau chaude ne donne cède pas une quantité de chaleur importante à l'air et puisque l'efficacité énergétique désigne le rapport entre l'énergie utile produite parle système et l'énergie totale consommée on constate l'augmentation aussi de l'efficacité.

Conclusion

D'après le calcul théorique et analytique que nous avons effectué à travers ce projet, nous avons conclu que l'efficacité de ce genre d'échangeur de chaleur dépend d'un facteur essentiel c'est les débits des fluides caloporteurs qui peuvent être liés au type de conception de l'échangeur de chaleur et du coefficient global d'échange de chaleur. Nous avons mis en évidence par les calculs qu'il y'a une relation proportionnelle entre le débit d'eau chaude à travers l'échangeur de chaleur et la température d'eau chaude à la sortie et cela influence forcément sur l'efficacité de ce dernier car cette variation de température à la sortie c'est des énergies mises en jeu et qui varie. Cette variation implique une variation de l'efficacité énergétique et c'était notre but de déterminer cette efficacité à travers notre banc d'essai qui malheureusement n'a pas pu être réalisé pour des raisons hors de notre volonté (confinement sanitaire).

Bibliographie

[1] UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA thème Analyse thermique des ailettes détermination des profils de températures et des rendements de quelques formes géométriques simple 2018, P2.

[2] Technique de l'ingénieur Reference internet BE9515, 2014.

[3] <https://chauffage.ooreka.fr/astuce/voir/603519/echangeur-thermique>

[4] Ramesh K. Shah¹, Alfred C. Mueller, "Heat Exchange" in Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry, Wiley-VCH, DOI: 10.1002/14356007.b03_02, 15 juin 2000, 114 p.

[5] G.U.N.T Gerätebau GmbH, Hanskampring 15-17, D-22885 Barsbüttel 2018

[6] Medjahedbendida, cour échangeur de chaleur université de Mostaganem 2019.

[7] Ton epi espace pour ingénieur,

<http://tonepi.com/systemesenergetiques/methode-du-nombre-dunite-de-transfert-nut.html>

[8] Kays, W. M., and A. L. London, Compact Heat Exchangers, 3rd ed,

McGraw-Hill, New York, 1984.

