

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République algérienne démocratique et populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche
scientifique
جامعة عين تموشنت بلحاج بوشعيب
Université–Ain Temouchent- Belhadj Bouchaib
Faculté des Sciences et de Technologie
Département Génie Mécanique



Projet de Fin d'Études
Pour l'obtention du diplôme de Master en : Génie Mécanique
Domaine : Sciences et Technologie
Filière : Génie Mécanique
Spécialité : Construction Mécanique
Thème

Étude et dimensionnement d'un réchauffeur

Présenté Par :

- 1) Mr Benderbal Aymen
- 2) Mr Benmeddah Imad Eddine

Devant le jury composé de :

Pr BenzeninehamidouPr	UAT.B.B (Ain Temouchent)	Président
Dr Dorbaneabdelhakim	MCAUAT.B.B (Ain Temouchent)	Examineur
Dr Bahram kaddour	MCAUAT.B.B (Ain Temouchent)	Encadrant

Année Universitaire 2023/2024

Remerciements

Remerciements

Nous tenons tout d'abord à exprimer notre profonde gratitude à Dieu Tout-Puissant, qui nous a guidés et protégés tout au long de nos études. Ensuite, nous adressons nos plus sincères remerciements à notre encadreur, Dr. Bahram Kaddour, pour sa bienveillance, son professionnalisme, sa disponibilité et ses conseils avisés qui ont été précieux pour la réalisation de ce mémoire.

Nous remercions également Pr. Benzine Hamidou d'avoir accepté de présider ce jury et Dr. Dorbane Hakim d'avoir accepté d'examiner ce mémoire. Leur expertise et leurs remarques constructives ont contribué de manière significative à l'amélioration de notre travail.

Enfin, nous tenons à exprimer notre reconnaissance envers nos familles et amis pour leur soutien moral et leurs encouragements constants tout au long de cette période de travail intense.

Benmeddah Imad Eddine

Remerciements

Je rends grâce à Dieu, le Sage et le Savant, qui m'a permis, guidé et donné la force durant ces cinq années d'études.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à toutes les personnes qui ont contribué à la réalisation de ce mémoire. Un merci particulier à mon directeur de mémoire, Dr. Bahram Kaddour, dont les conseils avisés et l'expertise ont été d'une aide inestimable.

Nous remercions également Pr. Benzine Hamidou d'avoir accepté de présider ce jury et Dr. Dorbane Hakim d'avoir accepté d'examiner ce mémoire. Leur expertise et leurs remarques constructives ont contribué de manière significative à l'amélioration de notre travail.

Je remercie également les membres du jury pour leur temps et leurs précieuses remarques qui ont enrichi ce travail. Mes sincères remerciements vont à mes camarades de classe pour leur soutien et les moments partagés durant ces années d'étude.

Un remerciement spécial à ma famille et à mes amis pour leur soutien indéfectible, leur encouragement constant et leur foi en mes capacités. Sans leur appui, ce travail n'aurait pas été possible.

Enfin, je remercie l'Université Belhadj Bouchaib pour avoir fourni les ressources nécessaires à la réalisation de ce mémoire.

Benderbal Aymen

Dédicace

Dédicace

Je dédie ce mémoire à :

Mes parents, dont le soutien inestimable m'a accompagné tout au long de mes études. Leur encouragement constant, tant sur le plan mental qu'émotionnel, a été une source inépuisable de force et de motivation. Ils ont toujours cru en moi, même dans les moments les plus difficiles, et leur confiance m'a permis de surmonter de nombreux obstacles. Leurs sacrifices, faits sans hésitation, ont été essentiels pour que je puisse poursuivre mes ambitions académiques. Leur amour et leur dévouement m'emplissent d'une profonde et infinie gratitude. Sans eux, ce travail n'aurait pas été possible. Leur exemple de persévérance et de générosité continue d'inspirer mon parcours de vie.

Benmeddah Imad Eddine

Dédicace

À mes parents frères et sœurs, qui m'ont soutenu tout au long de ce parcours académique est crû en moi, et à mes professeurs, qui ont partagé leur savoir et leur passion avec moi.

Votre encouragement et vos conseils ont été inestimables.

À mes amis et camarades de classe, pour les moments de rire, de stress et de réussite que nous avons partagés ensemble. Vous avez rendu ce voyage mémorable.

Enfin, à moi-même, pour avoir persévéré et atteint ce jalon important. Que ce mémoire soit le reflet de mon travail acharné et de ma passion pour le domaine.

Benderbal Aymen

Résumé

Résumé en arabe

يتمحور هذا الأطروحة حول دراسة وتحديد حجم مبادل حراري أنبوبي، بهدف تطوير منهجية دقيقة لتصميم هذا النوع من المبادلات الحرارية بكفاءة في سياق صناعي محدد. تشمل المحاور البحثية الرئيسية استعراضاً شاملاً للمراجع العلمية حول المبادلات الحرارية، بما في ذلك أنواع مختلفة والابتكارات الحديثة، بالإضافة إلى استخدام برنامج SolidWorks للنمذجة والتحليل. تُجرى محاكاة حرارية ثابتة وديناميكية بناءً على الديناميكا الحسابية للسوائل (CFD) لتحقيق التصميم المقترح وتحليل سلوك النظام تحت ظروف تشغيل مختلفة. الهدف هو تحسين الأداء الحراري للمبادل الحراري مع الحد الأدنى من تكاليف التشغيل، وتقديم توصيات محددة لتعزيز كفاءة وموثوقية هذه المعدات الصناعية الأساسية.

الكلمات الرئيسية: مبادل حراري أنبوبي، منهجية التصميم، SolidWorks، محاكاة حرارية، الديناميكا الحسابية للسوائل (CFD)، الأداء الحراري.

Résumé en français

Ce mémoire se concentre sur l'étude et le dimensionnement d'un échangeur de chaleur tubulaire, visant à développer une méthodologie rigoureuse pour la conception efficace de ce type d'échangeur dans un contexte industriel spécifique. Les principaux axes de recherche comprennent une revue de littérature approfondie sur les échangeurs de chaleur, incluant divers types et innovations récentes, ainsi que l'utilisation du logiciel SolidWorks pour la modélisation et l'analyse. Des simulations thermiques statiques et dynamiques basées sur la CFD sont réalisées pour valider la conception proposée et analyser le comportement du système sous différentes conditions de fonctionnement. L'objectif est d'optimiser les performances thermiques de l'échangeur tout en minimisant les coûts d'exploitation, en fournissant des recommandations spécifiques pour améliorer l'efficacité et la fiabilité de ces équipements industriels essentiels.

Mots clés: *échangeur de chaleur tubulaire, méthodologie de conception, SolidWorks, simulations thermiques, Dynamique des Fluides Numérique (CFD), performances thermiques.*

Résumé en anglais

This thesis focuses on the study and sizing of a tubular heat exchanger; aiming to develop a rigorous methodology for the efficient design of such exchangers in a specific industrial context. Key research areas include an in-depth literature review on heat exchangers, covering various types and recent innovations, as well as the use of SolidWorks software for modeling and analysis. Static and dynamic thermal simulations based on Computational Fluid Dynamics (CFD) are conducted to validate the proposed design and analyze system behavior under different operating conditions. The objective is to optimize the heat exchanger's thermal performance while minimizing operational costs, providing specific recommendations to enhance the efficiency and reliability of these essential industrial equipment.

Keywords: *tubular heat exchanger, design methodology, SolidWorks, thermal simulations, Computational Fluid Dynamics (CFD), thermal performance.*

Liste des figures

Liste des figures

Figure 1 Échangeur de chaleur	26
Figure 2 Dynamique des Fluides dans les Échangeurs Thermiques	27
Figure 3 Échangeurs a tubes co-axiaux	28
Figure 4 Les échangeurs multitubulaires.....	32
Figure 5 Les échangeurs à plaques	32
Figure 6 Les échangeurs à courants partagés.....	34
Figure 7 Les échangeurs à spirale.....	36
Figure 8 Réacteurs doubles enveloppe simples	38
Figure 9 Réacteur avec serpentín interne (serpentín hélicoïdal)	39
Figure 10 Répartition des Revenus selon les Types d'Échangeurs sur le Marché Global de l'Échange Thermique	40
Figure 11 évolution des températures dans un échangeur à co-courant.....	43
Figure 12 évolution des températures dans un échangeur à co-courant.....	44
Figure 13 les deux types du courant croisé	44
Figure 14 Configuration d'écoulements des échangeurs de chaleur [5]	45
Figure 15 Transfert thermique par conduction.....	47
Figure 16 transfert thermique par rayonnement	48
Figure 17 Transfert thermique par convection	49
Figure 18 Évolution des températures du fluide chaud et du fluide froid le long d'un échangeur à Co-courant	50
Figure 19 Évolution des températures du fluide chaud et du fluide froid le long d'un échangeur à contre-courant.....	52
Figure 20 Température moyenne (acier doux).....	64
Figure 21 Température moyenne (acier inoxydable)	64
Figure 22 Température moyenne (acier inoxydable + cuivre)	65
Figure 23 variation de la température moyenne dans le plan (xy) médiane	65
Figure 24 coupe au niveau de l'entrée chaude.....	66
Figure 25 coupe au niveau de sortie froide	66
Figure 26 coupe au niveau de l'entrée froide.....	66
Figure 27 coupe au niveau de la sortie chaude.....	67
Figure 28 variation de la pression dans le plan (x y) médiane.....	68
Figure 29 coupe au niveau de l'entrée chaude.....	68
Figure 30 coupe au niveau de l'entrée froide.....	68
Figure 31 coupe au niveau de l'entrée froide.....	69
Figure 32 coupe au niveau de la sortie chaude.....	69
Figure 33 Figure 23 variation de la vitesse moyenne dans le plan médiane.....	70
Figure 34 variation de la vitesse moyenne	70
Figure 35 Figure 23 variation de la vitesse moyenne (XYZ)	71

Liste des tableaux

Liste des tableaux

Tableau 1 paramètres de l'étude..... 58
Tableau 2 priorités des aciers doux 62
Tableau 3 Tableau 2 priorités des aciers inoxydables..... 62
Tableau 4 propriétés des cuivres 63

Nomenclature

Nomenclature

Q	Quantité de chaleur	J
T	Température	K ou °C
P	La puissance	W
S	Surface d'échange	m ²
D	Diamètre extérieur de tube	M
L	La longueur du tube	M
A _{tube}	la Surface de contact tube du le fluide chaud	m ²
N _{tube}	nombre de tube	---
H	le coefficient de convection thermique	W·m ⁻² ·K ⁻¹
λ	la conductivité thermique	W·m ⁻¹ ·K ⁻¹
Q _{mc,qmf}	Débit massique des fluides respectivement chaud et froid	kg/s
U	coefficient global d'échange de chaleur	W/(m ² . K)
H ₀	coefficient de transfert de chaleur coté extérieur	---
H ₁	Coefficient de transfert de chaleur coté intérieur	---
K	Conductivité thermique de matériaux de l'échangeurs	---
ΔT _c , ΔT _f	Écart de température des fluides respectivement chaud et froid	K ou °C
T _{ec}	Températures d'entrée des fluides respectivement chaud	---
T _{ef}	Températures d'entrée des fluides respectivement froid	---
T _{sc}	Température de sortie des fluides respectivement chaud	---
T _{sf}	Températures de sortie des fluides respectivement froid	---
T _f	Variation de température du fluide froid	---
T _e	Température des entrées du fluide	---
T _s	Température de la sortie du fluide	---
Préél	puissance thermique réellement échangée d'un échangeur	W

Table des matières

Table des matières

Remerciements	1
Dédicace	4
Dédicace	6
Résumé en arabe	9
Résumé en français	10
Résumé en anglais	11
Liste des figures.....	12
Liste des tableaux	14
Nomenclature.....	167
Chapitre I	
1. Définition	25
2. Principe de fonctionnement des échangeurs de chaleur.....	26
Évolution des Tendances de Marché des Échangeurs Thermiques.....	28
3. Classification des échangeurs de chaleur	29
3.1. Type de contact :	29
3.2. Type d'échange :	29
3.3. Disposition des écoulements :	30
3.4. Classification fonctionnelle :	29
3.5. Compacité de l'échangeur :	30
4. Type des échangeurs de chaleur	30
4.1. Échangeurs a tubes co-axiaux	30
4.2. Les échangeurs multitubulaires	32
4.3. Les échangeurs à plaques	32
4.4. Les échangeurs à courants croisés.....	35
4.5. Les échangeurs à courants partagés	36

4.6. Les échangeurs à spirale.....	37
4.7. Les échangeurs de chaleur et les réacteurs.....	39
5. Diversité des Fluides dans les Échangeurs Thermiques	41
6. Variété des Matériaux dans la Construction des Échangeurs de Chaleur	42
7. Disposition des Écoulements dans les Échangeurs de Chaleur	43
8. Les modes de transfert thermique	45
8.1. La conduction.....	46
8.2. Le rayonnement.....	47
8.3. La convection	48
9. Méthode De Différence De Température Logarithmique Moyenne (Dtlm).....	50
10. Méthode du Nombre d'Unités de Transfert (NUT)	53

Chapitre II

1. Étude de cas.....	58
2. Les calculs	59
2.1. Calcul du Coefficient global de transfert de chaleur :.....	59
2.2. Calcul de la charge thermique :.....	59
2.3. Calcul de surface de Transfert.....	60
2.4. Calcul de la surface de contact du tube	61
2.5. Calcul du nombre de tube.....	61

Conclusion.....	73
-----------------	----

References bibliographiques.....	76
----------------------------------	----

Annexe.....	78
-------------	----

Introduction générale

Introduction générale

Les échangeurs de chaleur, étant des instruments fondamentaux dans le domaine du génie thermique, permettent de contrôler la température d'un système ou d'un produit en facilitant l'échange de chaleur entre deux milieux[1]. Leur utilité est omniprésente dans de multiples applications telles que le chauffage, la climatisation, la réfrigération, le refroidissement électronique, ainsi que dans le génie des procédés et la production d'énergie[2, 3].

Dans le cadre des échangeurs de chaleur classiques, un fluide chaud cède une partie de son énergie à un fluide froid, constituant ainsi un échange de chaleur. Comprendre les principes et les paramètres de ces échangeurs est essentiel pour leur dimensionnement efficace et pour appréhender les phénomènes thermiques qui les régissent[4, 5].

L'amélioration des performances des échangeurs de chaleur se concentre de plus en plus sur les mécanismes d'intensification des transferts convectifs. Cela se reflète dans un nombre croissant d'études portant sur des techniques telles que l'insertion d'éléments dans les espaces tubulaires[6], offrant ainsi de nouvelles possibilités de conception pour les équipements thermiques et permettant d'optimiser les aspects économiques liés à l'exploitation des réseaux de transfert de chaleur[6-8].

Le but principal de notre travail est l'étude et le dimensionnement d'un échangeur tubulaire de chaleur, visant à fournir une méthodologie rigoureuse pour la conception efficace de ce type d'échangeur, en tenant compte des spécificités du procédé industriel concerné et en maximisant ses performances thermiques tout en optimisant les coûts d'exploitation[9, 10].

Ce travail englobe les parties suivantes :

- Une étude bibliographique sur les échangeurs de chaleur et leurs différents types, permettant de comprendre les principes fondamentaux et les innovations récentes dans ce domaine.
- Une étude et un dimensionnement réalisés en utilisant le logiciel SolidWorks, qui offre des outils avancés pour la modélisation et l'analyse des échangeurs de chaleur, permettant ainsi d'optimiser leur conception et leurs performances.

- Des simulations thermiques, à la fois en statique et en dynamique, en utilisant la technique de la CFD (Dynamique des Fluides Numérique), afin de valider la conception proposée et d'analyser le comportement du système dans différentes conditions de fonctionnement.

Chapitre I
Généralités Sur Les Échangeurs De Chaleur

1. Définition

Un échangeur de chaleur est un élément essentiel dans de nombreux processus industriels et systèmes de chauffage ou de refroidissement. Sa fonction principale est de transférer la chaleur d'un fluide chaud à un fluide froid, tout en maintenant une séparation entre les deux. Cette séparation peut être assurée par une paroi bien adaptée ou dimensionnée, qui permet aux deux fluides de circuler à proximité l'un de l'autre sans se mélanger[11].

Ce transfert de chaleur est influencé par plusieurs facteurs :

- **Températures d'entrée** : Les températures initiales des fluides chaud et froid déterminent la quantité de chaleur à transférer et la direction du flux thermique.
- **Caractéristiques thermiques des fluides** : Les propriétés intrinsèques des fluides, telles que leur chaleur spécifique et leur conductivité thermique, influent sur leur capacité à absorber ou à libérer de la chaleur lors du processus d'échange.
- **Coefficients d'échange par convection** : Ces coefficients décrivent l'efficacité du transfert de chaleur entre la paroi de l'échangeur et les fluides en mouvement. Ils dépendent de facteurs tels que la vitesse d'écoulement des fluides, la nature de la paroi et les propriétés thermiques des fluides.

En combinant ces éléments, un échangeur de chaleur peut ajuster efficacement la température des fluides en circulation, qu'il s'agisse de les refroidir ou de les chauffer, dans une variété d'applications industrielles, domestiques et commerciales. Son conception et sa sélection appropriées sont cruciales pour garantir des performances thermiques optimales et une efficacité énergétique maximale dans les systèmes où il est intégré.



Figure 1 Échangeur de chaleur

2. Principe de fonctionnement des échangeurs de chaleur

Les échangeurs thermiques constituent des éléments fondamentaux dans de nombreuses industries et applications, jouant un rôle crucial dans le transfert efficace de chaleur entre deux fluides à différentes températures. Leur principe de fonctionnement repose sur la mise en place de réseaux parallèles à travers lesquels ces fluides circulent.

Au cœur de cet échangeur se trouve une paroi spécialement conçue pour permettre un transfert thermique efficace entre les deux fluides sans qu'ils se mélangent. Cette paroi est sélectionnée pour ses capacités conductrices optimales, favorisant ainsi un échange thermique efficace tout en minimisant les pertes d'énergie.

L'écart de température entre les deux fluides est essentiel pour initier et maintenir le transfert de chaleur. En effet, le fluide chaud, porteur d'une plus grande quantité d'énergie thermique, cède naturellement de la chaleur au fluide plus froid à travers la paroi. Ce processus se poursuit jusqu'à ce que les deux fluides atteignent un équilibre thermique, où leurs températures se stabilisent[11].

Lorsque le fluide chaud entre dans l'échangeur, il commence immédiatement à transférer de la chaleur au fluide plus froid. Ce dernier, à son tour, absorbe cette chaleur et se réchauffe. En sortie de l'échangeur, le fluide primaire est ainsi refroidi, tandis que le fluide

secondaire est réchauffé, prêt à être utilisé dans le processus ou le système pour lequel il est destiné.

Ce processus de transfert de chaleur est indispensable dans de nombreuses applications industrielles, telles que les systèmes de chauffage, de climatisation, de production d'énergie et de traitement des fluides, contribuant ainsi à l'efficacité et à la fiabilité des processus industriels et des systèmes de chauffage et de refroidissement.

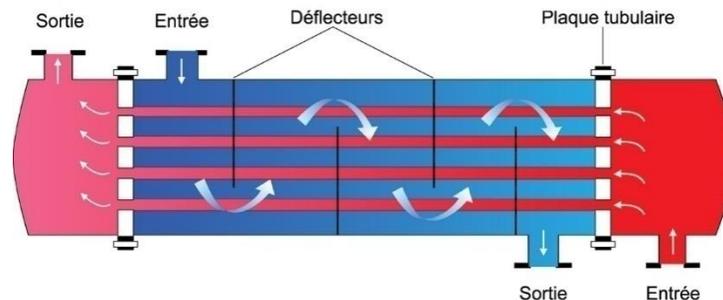


Figure 2 Dynamique des Fluides dans les Échangeurs Thermiques

Les échangeurs thermiques peuvent être utilisés avec une diversité de fluides, chacun ayant ses propres caractéristiques et avantages. Parmi les fluides les plus couramment utilisés, on trouve l'eau, les liquides caloporteurs, l'air, l'huile et la vapeur d'eau.

L'évolution des fluides à l'intérieur des échangeurs thermiques peut varier considérablement en fonction de la conception et des exigences du processus. Les différents modes de circulation incluent [11]:

- **Flux à contrecourant** : Dans cette configuration, les fluides se déplacent dans des directions opposées l'un par rapport à l'autre à travers l'échangeur thermique. Cela favorise un transfert de chaleur efficace et est souvent privilégié pour sa performance thermique supérieure.
- **Flux à courants parallèles ou à cocourant** : Ici, les deux fluides évoluent dans la même direction à travers l'échangeur. Bien que moins courant, ce mode de circulation peut être utilisé dans certaines applications spécifiques.

- **Flux à courants croisés** : Cette configuration implique une combinaison de flux à contrecourant et à courants parallèles, où les fluides se déplacent à la fois dans la même direction et dans des directions opposées. Cela offre une alternative efficace aux flux à contrecourant et peut être avantageux dans certaines situations.

Le flux à courants croisés et à contrecourant sont généralement préférés pour leur efficacité thermique supérieure par rapport au flux à courants parallèles. En conséquence, la plupart des échangeurs thermiques sont conçus pour permettre ces modes de circulation, offrant ainsi des performances optimales en matière de transfert de chaleur.

Évolution des Tendances de Marché des Échangeurs Thermiques

La classification des échangeurs comprend deux principales catégories : les échangeurs tubulaires et les échangeurs compacts. En 1998, les échangeurs tubulaires, tels que les échangeurs à tubes et calandre ou coaxiaux, dominaient largement le marché européen, représentant près de 50 % des parts. Cependant, les échangeurs compacts, tels que les échangeurs à plaques et joints, ont connu une croissance significative dans les années 90, ce qui a conduit à une diminution de la part de marché des échangeurs tubulaires. Malgré cette tendance, la grande polyvalence des échangeurs tubulaires, en termes de résistance à la pression et à la température, ainsi que leur diversité de matériaux, rend difficile leur remplacement par d'autres technologies.

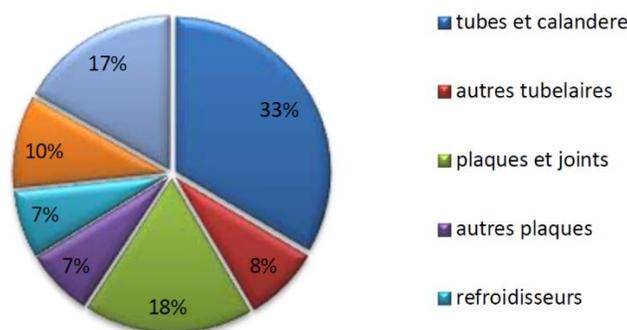


Figure 3 Répartition des Revenus selon les Types d'Échangeurs sur le Marché Global de l'Échange Thermique

3. Classification des échangeurs de chaleur

La classification des échangeurs de chaleur est un domaine complexe qui repose sur une multitude de critères permettant de les différencier et de les catégoriser. Chaque critère offre une perspective unique sur le fonctionnement et la conception des échangeurs thermiques.

3.1.Type de contact :

Cette classification se concentre sur le mode d'interaction entre les fluides ou les pièces à l'intérieur de l'échangeur. On distingue ainsi deux types principaux :

- ***Échangeurs à contact direct*** : Dans ce type d'échangeur, les fluides entrent en contact direct les uns avec les autres, permettant un transfert de chaleur direct. Par exemple, un récipient où deux liquides se mélangent et atteignent une température finale commune.
- ***Échangeurs à contact indirect*** : À l'opposé, ces échangeurs maintiennent les fluides séparés par une paroi, évitant ainsi tout mélange direct. Les échanges de chaleur se font à travers cette paroi, assurant une isolation entre les deux fluides.

3.2.Type d'échange :

Cette classification se base sur la nature des transformations thermiques qui se produisent à l'intérieur de l'échangeur. On distingue principalement :

- ***Échangeurs sans changement de phase*** : Dans ces échangeurs, les fluides échangent de la chaleur sans subir de transition de phase, c'est-à-dire sans passer d'un état liquide à un état gazeux ou inversement. Par exemple, un radiateur domestique.
- ***Échangeurs avec changement de phase*** : Ici, au moins l'un des fluides subit une transition de phase pendant le processus d'échange thermique. Cela peut se produire dans des évaporateurs, où un liquide se transforme en vapeur, ou dans des condenseurs, où la vapeur se condense en liquide.

3.3. Disposition des écoulements :

Cette classification examine la direction des flux de fluides à l'intérieur de l'échangeur.

On peut les classer en :

- *Co-courants* : Les fluides circulent dans la même direction à travers l'échangeur.
- *Contre-courant* : Les fluides circulent en sens opposé, maximisant ainsi le transfert de chaleur.
- *Courant croisé* : Les vecteurs de vitesse des fluides sont perpendiculaires les uns aux autres, offrant une autre configuration de flux.

3.4. Classification fonctionnelle :

Cette classification se concentre sur les caractéristiques fonctionnelles de l'échangeur, telles que la présence ou l'absence de changement de phase dans les deux fluides.

3.5. Compacité de l'échangeur :

La compacité de l'échangeur, qui évalue son efficacité spatiale en termes de surface d'échange par rapport à son volume, offre une autre dimension de classification.

En explorant ces différents critères, on peut mieux comprendre la diversité des échangeurs de chaleur et leurs applications spécifiques dans divers domaines industriels et domestiques.

4. Type des échangeurs de chaleur

4.1. Échangeurs à tubes co-axiaux :

Les échangeurs à tubes co-axiaux, également appelés échangeurs de chaleur coaxiaux, sont des dispositifs couramment utilisés pour transférer la chaleur entre deux fluides. Leur conception simple et efficace les rend idéaux pour diverses applications, notamment dans les systèmes de réfrigération, les pompes à chaleur, et les industries chimiques et pharmaceutiques. Un échangeur à tubes co-axiaux est composé de deux tubes, l'un à l'intérieur de l'autre. Le fluide chaud circule dans un tube (généralement le tube intérieur) tandis que le fluide froid circule dans l'autre tube (généralement le tube extérieur). La chaleur est transférée à travers la paroi du tube intérieur, ce qui permet aux deux fluides d'échanger de la chaleur sans se mélanger.

— *Avantages des Échangeurs à Tubes Co-axiaux*

Compacité: Leur conception co-axiale permet de réduire l'encombrement par rapport à d'autres types d'échangeurs de chaleur.

Efficacité Thermique: Le contact direct entre les deux fluides sur une grande surface augmente l'efficacité du transfert de chaleur.

Maintenance Facile: Ces échangeurs sont généralement faciles à démonter et à nettoyer.

Durabilité: Ils sont souvent fabriqués avec des matériaux résistants à la corrosion, augmentant leur durée de vie.

Polyvalence: Adaptés à une large gamme d'applications et de conditions de fonctionnement, y compris des températures et pressions élevées.

— *Applications Courantes*

Réfrigération et Climatisation: Utilisés pour évaporer ou condenser les fluides frigorigènes.

Pompes à Chaleur: Transfèrent la chaleur entre l'eau et le fluide frigorigène.

Industrie Chimique: Utilisés dans les procédés nécessitant des échanges thermiques entre différents réactifs ou solvants.

Traitement des Eaux: Pour le chauffage ou le refroidissement de l'eau dans divers procédés industriels.



Figure 4 Échangeurs a tubes co-axiaux

4.2. Les échangeurs multitubulaires :

Les échangeurs multitubulaires, également appelés échangeurs à faisceau de tubes, sont des dispositifs utilisés pour transférer la chaleur entre deux fluides, largement utilisés dans diverses industries grâce à leur capacité à gérer des volumes importants de fluides et à fonctionner à des températures et pressions élevées. Un échangeur multitubulaire est constitué d'un grand nombre de tubes, disposés parallèlement les uns aux autres, contenus dans une coque. Le fluide chaud circule à l'intérieur des tubes, tandis que le fluide froid circule à l'extérieur des tubes, dans la coque. La chaleur est transférée à travers les parois des tubes, permettant ainsi aux fluides d'échanger de la chaleur sans se mélanger[11].

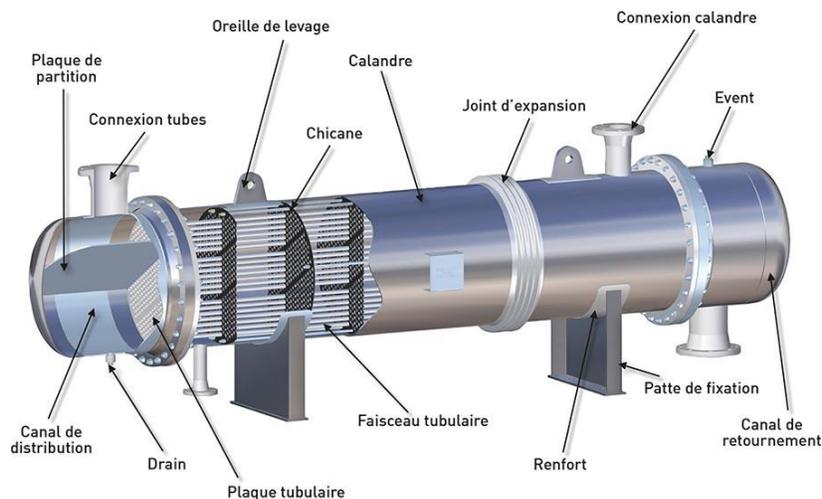


Figure 5 Les échangeurs multitubulaires

— *Avantages des Échangeurs Multitubulaires*

Les échangeurs multitubulaires présentent plusieurs avantages significatifs. Leur conception permet une grande surface de transfert de chaleur, ce qui augmente l'efficacité thermique. Ils peuvent également gérer des débits élevés de fluide et fonctionner sous des conditions de température et de pression extrêmes. De plus, ils sont modulaires et peuvent être facilement adaptés ou étendus pour répondre à des besoins spécifiques. Leur conception robuste les rend durables et fiables, nécessitant généralement moins de maintenance par rapport à d'autres types d'échangeurs de chaleur[11].

— *Applications Courantes*

Les échangeurs multitubulaires sont utilisés dans de nombreuses applications industrielles. Dans l'industrie pétrolière et gazière, ils sont essentiels pour le refroidissement et le chauffage des hydrocarbures. Dans les centrales électriques, ils jouent un rôle crucial dans la récupération de chaleur et la régulation de la température. Dans l'industrie chimique, ils sont utilisés pour des réactions nécessitant des échanges thermiques précis entre réactifs. De plus, dans les industries alimentaires et pharmaceutiques, ils sont employés pour le chauffage, le refroidissement et la pasteurisation des produits sensibles.

4.3. Les échangeurs à plaques :

Les échangeurs à plaques sont des dispositifs utilisés pour transférer la chaleur entre deux fluides au moyen de plaques métalliques. Leur conception repose sur un arrangement de plaques superposées, généralement en acier inoxydable ou en titane, avec des joints qui créent des canaux pour les fluides. Lorsque les fluides chaud et froid circulent alternativement à travers ces canaux, la chaleur est transférée de l'un à l'autre à travers les plaques, grâce à la différence de température et à l'effet de turbulence créé par leur configuration[11, 12].

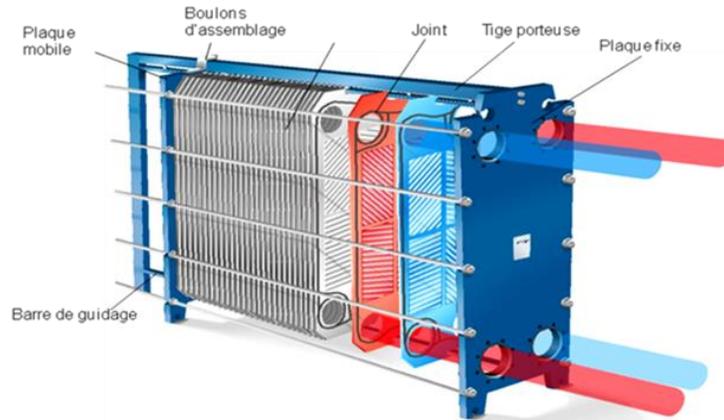


Figure 6 Les échangeurs à plaques

— *Avantages*

Les échangeurs à plaques offrent plusieurs avantages par rapport à d'autres types d'échangeurs de chaleur. Tout d'abord, leur conception compacte et légère permet une utilisation efficace de l'espace et une installation aisée, ce qui les rend particulièrement adaptés aux applications où l'espace est limité. De plus, leur efficacité thermique élevée résulte de la grande surface de transfert de chaleur offerte par les plaques, ce qui permet des échanges thermiques rapides et efficaces. Ils sont également modulables, facilitant l'ajustement de la capacité thermique selon les besoins spécifiques de chaque application. En plus, leur entretien est relativement simple grâce à leur conception modulaire, ce qui réduit les temps d'arrêt et les coûts de maintenance[12].

— *Applications Courantes*

Les échangeurs à plaques sont largement utilisés dans de nombreuses industries pour diverses applications. Dans l'industrie alimentaire et des boissons, ils sont employés pour le chauffage et le refroidissement des produits liquides tels que le lait, le jus de fruit et les boissons gazeuses. Dans le secteur HVAC (chauffage, ventilation et climatisation), ils sont utilisés pour le chauffage et le refroidissement de l'air dans les systèmes de climatisation et de chauffage domestiques et commerciaux. De plus, dans l'industrie chimique et pharmaceutique, ils sont utilisés pour le contrôle précis des températures dans les procédés de fabrication et pour le refroidissement des réacteurs chimiques. Enfin, dans le domaine

de l'énergie, ils sont utilisés dans les centrales électriques pour le refroidissement des générateurs et des turbines[12].

4.4. Les échangeurs à courants croisés :

Les échangeurs à courants croisés sont des dispositifs utilisés pour transférer la chaleur entre deux fluides en les faisant circuler perpendiculairement l'un par rapport à l'autre. Leur principe de fonctionnement repose sur le contact direct entre les deux fluides à travers une paroi, généralement en métal. Lorsque les fluides chaud et froid circulent dans des passages adjacents mais séparés, la chaleur est transférée de l'un à l'autre à travers la paroi, en raison de la différence de température entre les deux fluides. Ce type d'échangeur permet un transfert thermique efficace grâce à la grande surface de contact entre les deux fluides, ce qui favorise une meilleure efficacité énergétique[11].

— Avantages

Les échangeurs à courants croisés présentent plusieurs avantages par rapport à d'autres types d'échangeurs de chaleur. Tout d'abord, leur conception permet un transfert de chaleur efficace avec un encombrement minimal, ce qui les rend adaptés aux applications où l'espace est limité. De plus, ils offrent une grande flexibilité en termes de capacité thermique et peuvent être facilement adaptés pour répondre aux besoins spécifiques de chaque application. Leur efficacité énergétique élevée résulte de la configuration qui permet une récupération efficace de la chaleur entre les deux fluides. Enfin, ils sont souvent plus économiques à l'achat et à l'installation que d'autres types d'échangeurs de chaleur, ce qui en fait un choix attrayant pour de nombreuses applications.

— Applications Courantes

Les échangeurs à courants croisés sont utilisés dans une variété d'applications industrielles et commerciales. Dans le secteur de l'énergie, ils sont utilisés pour le refroidissement des turbines et des générateurs dans les centrales électriques. Dans l'industrie chimique et pétrochimique, ils sont employés pour le refroidissement des réacteurs et des procédés de

distillation. Dans le secteur HVAC (chauffage, ventilation et climatisation), ils sont utilisés pour le chauffage et le refroidissement de l'air dans les bâtiments commerciaux et résidentiels. Enfin, dans l'industrie alimentaire, ils sont utilisés pour le refroidissement des produits liquides tels que le lait et le jus de fruit, ainsi que pour le chauffage et la pasteurisation des produits.

4.5. Les échangeurs à courants partagés :

Les échangeurs à courants partagés, également connus sous le nom de split flow, sont des dispositifs utilisés pour transférer la chaleur entre deux fluides en divisant le flux de l'un des fluides en plusieurs courants. Leur principe de fonctionnement repose sur la division du flux du fluide chaud en plusieurs courants, qui sont ensuite dirigés à travers des canaux parallèles, permettant ainsi un échange thermique efficace avec le fluide froid. Cette configuration favorise une meilleure utilisation de la surface d'échange de chaleur et une amélioration de l'efficacité thermique de l'échangeur[13].

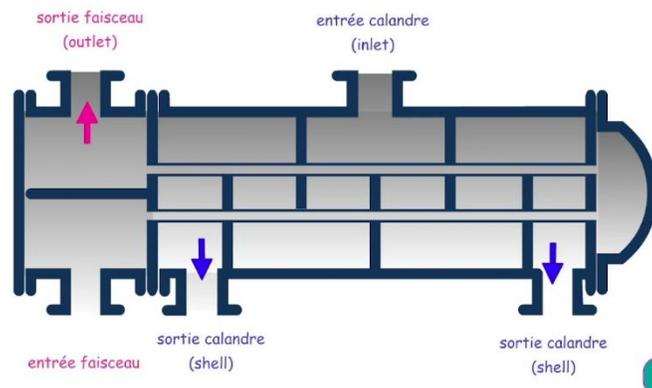


Figure 7 Les échangeurs à courants partagés

— Avantages

Les échangeurs à courants partagés offrent plusieurs avantages par rapport à d'autres types d'échangeurs de chaleur. Tout d'abord, leur conception permet une réduction des pertes de charge, ce qui améliore l'efficacité énergétique globale du système. De plus, ils offrent une meilleure répartition de la chaleur sur la surface d'échange, ce qui permet d'éviter les points chauds et froids et d'assurer un transfert thermique uniforme. Ils sont également plus compacts que certains autres types d'échangeurs de chaleur, ce qui les rend adaptés aux applications où l'espace est limité. Enfin, leur capacité à gérer des débits

variables et à s'adapter à des conditions de fonctionnement changeantes en fait un choix polyvalent pour une variété d'applications[12].

— *Applications Courantes*

Les échangeurs à courants partagés sont utilisés dans de nombreuses industries pour diverses applications. Dans l'industrie chimique et pétrochimique, ils sont utilisés pour le refroidissement des réacteurs et des colonnes de distillation. Dans le secteur de l'énergie, ils sont employés pour le refroidissement des générateurs et des turbines dans les centrales électriques. Dans le domaine de l'industrie alimentaire, ils sont utilisés pour le refroidissement et la pasteurisation des produits liquides. Enfin, dans le secteur HVAC (chauffage, ventilation et climatisation), ils sont utilisés pour le chauffage et le refroidissement de l'air dans les bâtiments commerciaux et résidentiels.

4.6. Les échangeurs à spirale :

Les échangeurs à spirale sont des dispositifs innovants utilisés pour transférer la chaleur entre deux fluides de manière efficace. Leur conception unique consiste en une série de spirales superposées, formées à partir d'un matériau conducteur de chaleur tel que l'acier inoxydable ou le titane. Le principe de fonctionnement de ces échangeurs repose sur le passage alternatif des deux fluides à travers les canaux de la spirale. L'un des fluides circule à l'intérieur de la spirale tandis que l'autre circule à l'extérieur, créant ainsi un échange thermique à travers la paroi de la spirale. Cette configuration favorise un transfert thermique efficace grâce à la grande surface de contact entre les deux fluides et à l'effet de turbulence généré par la spirale, ce qui améliore l'efficacité globale de l'échangeur.

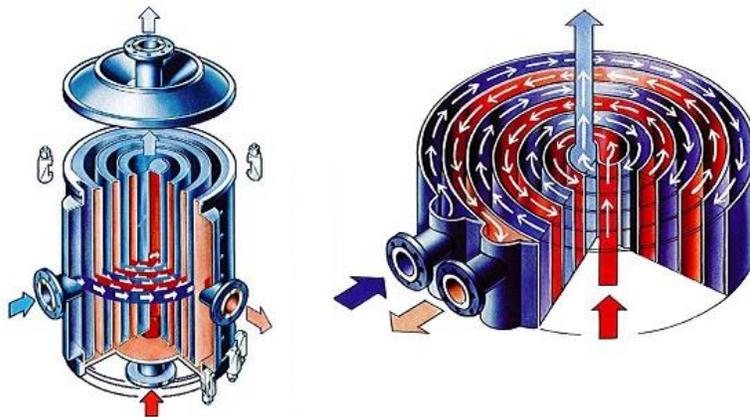


Figure 8 Les échangeurs à spirale

— Avantages

Les échangeurs à spirale offrent plusieurs avantages significatifs. Leur conception compacte permet une utilisation efficace de l'espace, ce qui les rend adaptés aux applications où l'espace est limité. De plus, leur efficacité thermique élevée résulte de la grande surface de transfert de chaleur offerte par les spirales, ce qui permet des échanges thermiques rapides et efficaces. Ils sont également modulaires et peuvent être facilement adaptés pour répondre aux besoins spécifiques de chaque application. En outre, leur construction robuste assure une durabilité et une fiabilité accrues, nécessitant généralement moins de maintenance par rapport à d'autres types d'échangeurs de chaleur.

— Applications Courantes

Les échangeurs à spirale sont utilisés dans une variété d'applications industrielles et commerciales. Dans le secteur alimentaire, ils sont employés pour le refroidissement et la pasteurisation des produits liquides tels que le lait et le jus de fruit. Dans l'industrie chimique et pétrochimique, ils sont utilisés pour le refroidissement des réacteurs et des procédés de distillation. Dans le domaine de l'énergie, ils sont utilisés pour le refroidissement des générateurs et des turbines dans les centrales électriques. Enfin, dans le secteur HVAC (chauffage, ventilation et climatisation), ils sont utilisés pour le chauffage et le refroidissement de l'air dans les bâtiments commerciaux et résidentiels.

4.7. Les échangeurs de chaleur et les réacteurs :

Les échangeurs de chaleur et les réacteurs sont des équipements essentiels dans de nombreuses industries où des réactions chimiques nécessitant un contrôle précis de la température sont réalisées. Leur fonctionnement repose sur le transfert de chaleur entre un fluide chaud et un fluide froid pour maintenir une température constante dans le réacteur. Les échangeurs de chaleur, souvent intégrés aux réacteurs, peuvent prendre différentes formes, telles que des échangeurs à plaques, à tubes, ou à spirales. Le fluide chaud circule à travers les canaux internes de l'échangeur, transférant sa chaleur à travers les parois de l'échangeur vers le fluide froid circulant à l'extérieur. Ce transfert de chaleur permet de

maintenir une température optimale pour la réaction chimique, assurant ainsi son efficacité et sa sécurité.

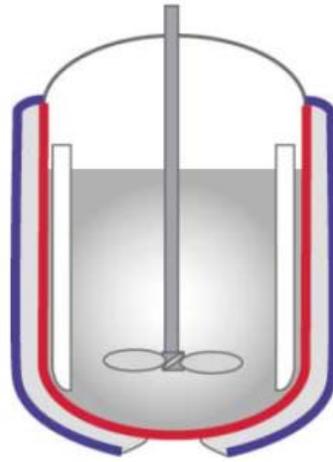


Figure 9 Réacteurs doubles enveloppe simples

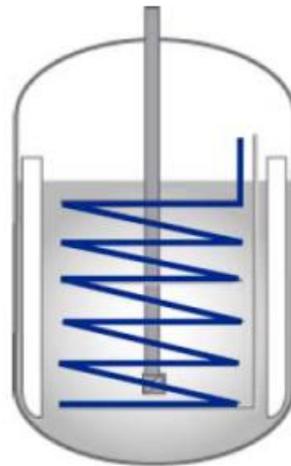


Figure 10 Réacteur avec serpentin interne (serpentin hélicoïdal)

— *Avantages*

Les échangeurs de chaleur intégrés aux réacteurs offrent plusieurs avantages significatifs. Tout d'abord, ils permettent un contrôle précis de la température dans le réacteur, ce qui est essentiel pour garantir le bon déroulement des réactions chimiques. De plus, ils améliorent l'efficacité énergétique du processus en récupérant la chaleur résiduelle du fluide chaud

pour préchauffer le fluide froid entrant. Ils contribuent également à réduire les coûts de production en optimisant les conditions de réaction et en minimisant les pertes de chaleur. En outre, leur conception intégrée réduit l'encombrement et simplifie l'installation, ce qui les rend adaptés à une large gamme d'applications industrielles.

— *Applications Courantes*

Les échangeurs de chaleur intégrés aux réacteurs sont largement utilisés dans de nombreuses industries pour diverses applications. Dans l'industrie chimique et pétrochimique, ils sont utilisés pour le refroidissement et le chauffage des réacteurs dans les procédés de synthèse chimique. Dans l'industrie pharmaceutique, ils sont utilisés pour contrôler la température dans les réacteurs lors de la fabrication de médicaments. Dans le domaine de l'énergie, ils sont utilisés pour le refroidissement des réacteurs nucléaires et des turbines dans les centrales électriques. Enfin, dans l'industrie alimentaire, ils sont utilisés pour le chauffage et le refroidissement des réacteurs dans la fabrication de produits alimentaires.

5. Diversité des Fluides dans les Échangeurs Thermiques

Les échangeurs thermiques sont adaptés à une grande variété de fluides, chacun ayant ses propres caractéristiques thermiques et physiques. Cette diversité de fluides permet aux échangeurs thermiques de répondre à une multitude d'applications dans divers secteurs industriels. Voici un aperçu des types de fluides couramment utilisés dans les échangeurs thermiques :

- ***Eau*** : L'eau est l'un des fluides les plus couramment utilisés dans les échangeurs thermiques en raison de sa disponibilité, de sa facilité de manipulation et de ses excellentes propriétés thermiques. Elle est largement utilisée dans les systèmes de chauffage, de climatisation, de refroidissement et dans les applications de traitement des eaux.
- ***Liquides caloporteurs*** : Les liquides caloporteurs, tels que l'antigel à base d'éthylène glycol ou de propylène glycol, sont utilisés dans les systèmes de chauffage et de refroidissement où des températures de fonctionnement extrêmes

sont requises. Ils offrent une excellente stabilité thermique et une résistance à la corrosion.

- **Air** : L'air est utilisé comme fluide de refroidissement dans de nombreux systèmes de refroidissement, tels que les échangeurs air-air ou les radiateurs de voiture. Son utilisation est courante dans les applications où une dissipation efficace de la chaleur est nécessaire.
- **Huile** : Les huiles thermiques, telles que l'huile de silicone ou l'huile minérale, sont utilisées dans les systèmes de chauffage et de refroidissement à haute température. Leurs propriétés lubrifiantes et leur haute résistance thermique en font des choix populaires dans les applications industrielles.
- **Vapeur d'eau** : La vapeur d'eau est utilisée comme fluide de transfert de chaleur dans les applications de chauffage et de production d'énergie. Elle offre une densité énergétique élevée et peut être utilisée pour alimenter des turbines à vapeur dans les centrales électriques.

Chaque type de fluide présente des avantages et des limitations spécifiques en fonction de l'application et des exigences du processus. Le choix du fluide approprié est crucial pour assurer des performances optimales et une efficacité énergétique maximale de l'échangeur thermique.

6. Variété des Matériaux dans la Construction des Échangeurs de Chaleur

Les échangeurs de chaleur sont conçus à partir d'une grande diversité de matériaux, chacun étant sélectionné en fonction des conditions de service spécifiques telles que la température, la pression et le degré de corrosivité du milieu. Le choix des matériaux pour les différentes composantes de l'échangeur est donc crucial pour assurer sa durabilité et sa performance optimale.

Dans la plupart des cas, la température de service des échangeurs de chaleur reste dans les limites d'utilisation des aciers au carbone, qui varient généralement de -30°C à 475°C .

Cependant, d'autres matériaux sont également largement utilisés en fonction des exigences spécifiques de chaque application.

Les tubes des échangeurs de chaleur sont généralement fabriqués à partir de matériaux métalliques tels que l'acier et le laiton, en raison de leur robustesse et de leur capacité à résister aux conditions de service rigoureuses. Pour les applications nécessitant une résistance élevée aux températures élevées, les céramiques sont de plus en plus utilisées, offrant une excellente résistance à la chaleur et à la corrosion.

Dans certains cas, des tubes en plastique, souvent de très petits diamètres, sont également utilisés, soit individuellement en faisceaux, soit intégrés dans des plaques minces qui agissent comme des raidisseurs. Ces tubes en plastique offrent une alternative légère et économique pour certaines applications spécifiques, mais leur utilisation est limitée par leurs propriétés mécaniques et leur résistance à la chaleur.

7. Disposition des Écoulements dans les Échangeurs de Chaleur

La manière dont les fluides circulent à l'intérieur des échangeurs de chaleur est un aspect crucial de leur conception et de leur efficacité. Cette disposition de circulation peut varier selon plusieurs schémas, chacun ayant un impact significatif sur les performances thermiques de l'échangeur. Explorons plus en détail ces différents schémas d'écoulement :

- **Schéma Co-courant** : Dans ce schéma, les fluides primaire et secondaire entrent du même côté de l'échangeur, suivent un trajet parallèle à travers celui-ci et sortent également du même côté. Ce schéma offre une simplicité de conception et de fabrication, mais il peut présenter des inefficacités en termes de transfert de chaleur, car les deux fluides atteignent rapidement une température d'équilibre.

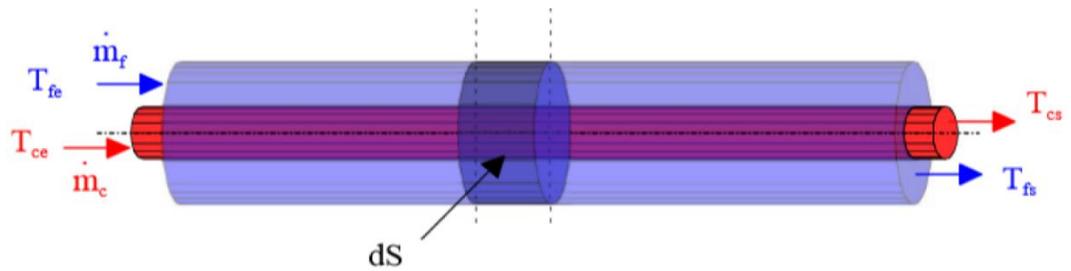


Figure 11 évolution des températures dans un échangeur à co-courant

— **Schéma Contre-courant** : À l'opposé, dans ce schéma, les fluides entrent par des extrémités opposées de l'échangeur et circulent en sens inverse l'un de l'autre à travers celui-ci. Cette disposition permet un transfert de chaleur plus efficace car elle maintient un gradient thermique plus élevé le long de l'échangeur, favorisant ainsi un échange thermique plus complet entre les fluides.

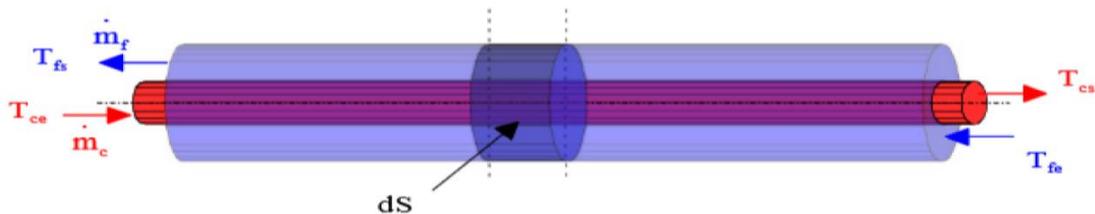


Figure 12 évolution des températures dans un échangeur à co-courant

— **Schéma Courant Croisé** : Dans cette configuration, les deux fluides circulent perpendiculairement l'un par rapport à l'autre à l'intérieur de l'échangeur. Cette disposition présente deux variantes. Dans le premier cas, appelé non brassé, l'un des fluides s'écoule dans une veine divisée en plusieurs canaux parallèles distincts et de faible section. Dans le second cas, appelé brassé, les fluides se mélangent davantage. Le brassage a pour effet d'uniformiser les températures dans la section transversale de la veine.

Les échangeurs à courant croisé sont largement utilisés pour les échanges entre gaz (dans la calandre) et un liquide (dans les tubes). Cette configuration offre un compromis entre les schémas co-courant et contre-courant en termes d'efficacité de transfert de chaleur et de

complexité de conception, ce qui en fait un choix populaire dans de nombreuses applications industrielles.

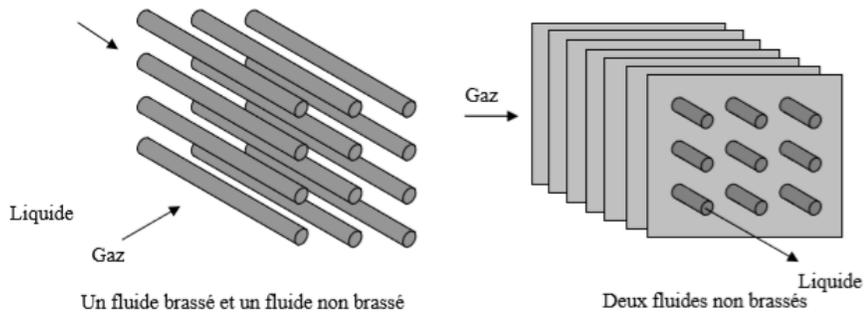
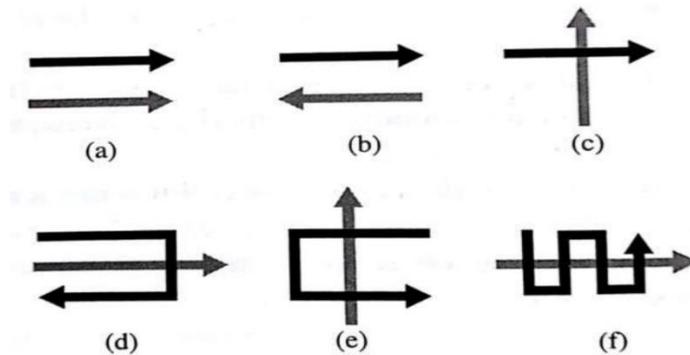


Figure 13 les deux types du courant croisé

— **Schéma Courant Mixte** : Ce schéma implique des changements multiples de direction ou de sens d'écoulement d'un fluide par rapport à l'autre. Il peut être utilisé pour optimiser le transfert de chaleur dans des situations où les schémas co-courant, contre-courant ou croisé ne sont pas idéaux.

Le choix du schéma d'écoulement approprié dépend de plusieurs facteurs, notamment les exigences de performance thermique, les contraintes de conception, les coûts de fabrication et les propriétés des fluides utilisés. Une analyse approfondie est souvent nécessaire pour déterminer le schéma le plus adapté à une application spécifique, garantissant ainsi un transfert de chaleur efficace et une conception optimisée de l'échangeur de chaleur.



8. Les modes de transfert thermique

Le transfert de chaleur est l'un des modes de transfert d'énergie interne entre deux systèmes, l'autre étant le travail. Il s'agit d'un transfert d'énergie thermique qui se produit hors de l'équilibre thermodynamique. Il existe trois types de transfert thermique qui peuvent se manifester simultanément :

- **Conduction** : Ce type de transfert est dû à la diffusion progressive de l'agitation thermique à travers la matière.
- **Convection** : Il s'agit d'un transfert thermique accompagné par le mouvement macroscopique de la matière.
- **Rayonnement** : Ce transfert se fait par la propagation de photons (radiation).

La quantité de chaleur Q représente l'énergie échangée par ces trois types de transferts et s'exprime en joules (J). Par convention, $Q > 0$ indique que le système reçoit de l'énergie.

La thermodynamique utilise le concept de chaleur pour formuler le premier et le deuxième principe de la thermodynamique. Cependant, le terme « chaleur » peut prêter à confusion, notamment par rapport à la température. Bien que les transferts thermiques spontanés se produisent des zones à haute température vers les zones à basse température, il est possible d'effectuer un transfert thermique d'un corps froid vers un corps chaud en utilisant une machine thermique comme un réfrigérateur. De plus, lors d'un changement d'état, comme l'ébullition, un corps pur ne change pas de température bien qu'il échange de l'énergie sous forme de chaleur.

8.1. La conduction :

Le transfert par conduction (Figure I.9) est un mode d'échange d'énergie qui se produit sans mouvement de matière, ce qui concerne principalement les solides et les fluides immobiles.

Ce type de transfert peut se produire à l'intérieur d'un même matériau ou par contact direct entre deux matériaux. L'énergie thermique, résultant des vibrations des atomes autour de leur position d'équilibre dans le solide, se transmet progressivement de proche en proche, un processus connu sous le nom de diffusion. Les cristaux possèdent un mécanisme supplémentaire de transfert thermique lié aux vibrations de leur réseau cristallin.

Dans le cas le plus simple d'une paroi solide d'épaisseur donnée, avec une différence de température homogène $T_1 - T_2$ entre ses deux surfaces, le flux thermique dépend de la conductivité thermique λ des matériaux (exprimée en $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$).

$$\Phi_{1-2} = \lambda \cdot s \cdot \frac{T_1 - T_2}{e} = \frac{T_1 - T_2}{R_{th}} \quad 1$$

R_{th} : est la résistance thermique de conduction. Pour une étude plus approfondie, il faut exploiter la loi de Fourier :

$$\vec{\varphi} = -\lambda \vec{g}_{rad} T \quad 2$$

Cette loi de diffusion est analogue à la loi de Fick, qui décrit la diffusion de la matière.

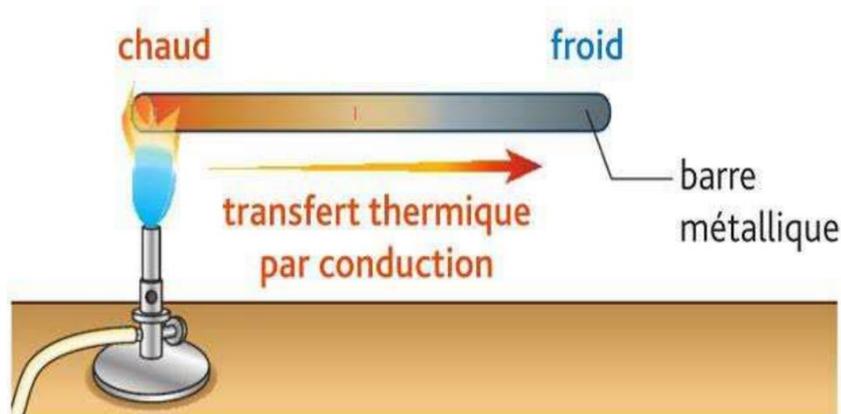


Figure 15 Transfert thermique par conduction

8.2. Le rayonnement :

Le rayonnement thermique (Figure I.10) est un rayonnement électromagnétique, souvent associé aux infrarouges car cette partie du spectre est généralement prédominante dans les échanges thermiques. Tout corps, quelle que soit sa température, émet un rayonnement, dont l'intensité et la longueur d'onde dépendent de cette température. Par exemple, le

rayonnement thermique émis par le soleil est principalement dans le spectre visible, tandis que des corps plus froids, comme les mammifères, émettent principalement dans l'infrarouge.

Ce mode de transfert est unique en ce qu'il peut se produire dans le vide, comme dans le cas du rayonnement solaire arrivant sur Terre, mais il peut aussi se produire dans des matériaux transparents. Le rayonnement thermique devient particulièrement important à prendre en compte à des températures élevées ou en l'absence de conduction et de convection.

Un corps noir est un modèle théorique qui absorbe entièrement le rayonnement qu'il reçoit et respecte la loi de Planck et la loi de déplacement de Wien, qui déterminent son spectre d'émission en fonction de sa température. Le flux thermique surfacique émis par un corps noir est décrit par la loi de Stefan-Boltzmann.

$$\varphi = \varepsilon\sigma T^4 \quad 3$$

Avec :

σ : constante de Stefan-Boltzmann ($5,6703 \times 10^{-8} \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-4}$)

ε : émissivité, qui vaut 1 pour un corps noir et varie entre 0 et 1 en fonction de l'état de surface du matériau (sans dimension)

T : température du corps (K)

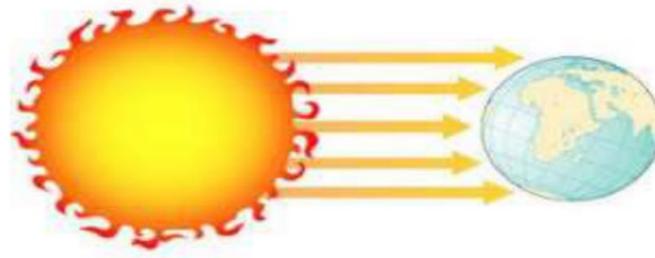


Figure 16 transfert thermique par rayonnement

8.3. La convection :

Le transfert thermique par convection (Figure I.11) résulte du mouvement des molécules, qui entraîne un déplacement d'énergie thermique. Ce processus se produit dans les fluides (liquides ou gaz) ainsi qu'à l'interface entre un solide et un fluide. En se déplaçant, ces molécules transfèrent leur énergie thermique à d'autres parties du système.

Il existe deux types de convection :

Convection naturelle (ou libre) : Elle est causée par les différences de densité entre les particules du fluide. Les particules dans les zones chaudes, ayant une densité plus faible, montent et sont remplacées par des particules plus froides. Ces dernières absorbent de l'énergie thermique, ce qui augmente leur température et les pousse à se déplacer vers des zones plus chaudes.

— **Convection forcée** : Ce type de convection est provoqué par une force externe, comme un ventilateur, qui met le fluide en mouvement. Ce mouvement accélère le transfert thermique.

Pour une paroi solide de surface S ayant une température homogène T_1 , en contact avec un fluide dont la température à une grande distance de la paroi est T_2 , le flux thermique est déterminé par le coefficient de convection thermique h du matériau (exprimé en $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$) :

$$\Phi_{1-2} = hS(T_1 - T_2) = \frac{T_1 - T_2}{R_{th}} \quad 4$$

R_{th} est la résistance thermique de convection. Autrement écrit :

$$\varphi = h(T_1 - T_2) \quad 5$$

Le transfert thermique peut être décrit par la loi de refroidissement de Newton, qui stipule qu'il est proportionnel à la différence de température entre l'objet et son environnement

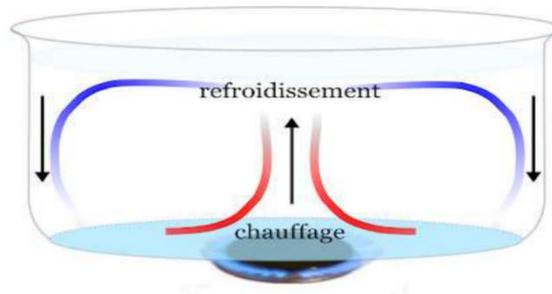


Figure 17 Transfert thermique par convection

Il existe deux types de convection :

- **Convection naturelle (ou libre)** : Ce phénomène résulte des différences de densité entre les particules du fluide. Dans les zones chaudes, les particules, ayant une densité plus faible, montent et sont remplacées par des particules plus froides. Ces dernières absorbent de l'énergie thermique, ce qui réduit leur température et les incite à se déplacer vers des zones plus chaudes.
- **Convection forcée** : Ce type de convection est provoqué par une force externe, telle qu'un ventilateur, qui met le fluide en mouvement. Ce mouvement accélère le transfert thermique.

9. Méthode De Différence De Température Logarithmique Moyenne (Dtlm)

La Méthode de la différence logarithmique des températures (DTLM) est l'une des méthodes de dimensionnement des échangeurs qui permet de déterminer la surface de l'échangeur et ne s'applique que dans des conditions strictes :

- Le coefficient d'échange global est supposé constant,
- Les échangeurs sont à circulation parallèle (Co ou contre-courant) ou corrigé d'un facteur F si ce n'est pas le cas,
- Les capacités thermiques massiques des fluides sont supposées constantes tout au long du processus.
- **Cas Co-courant :**

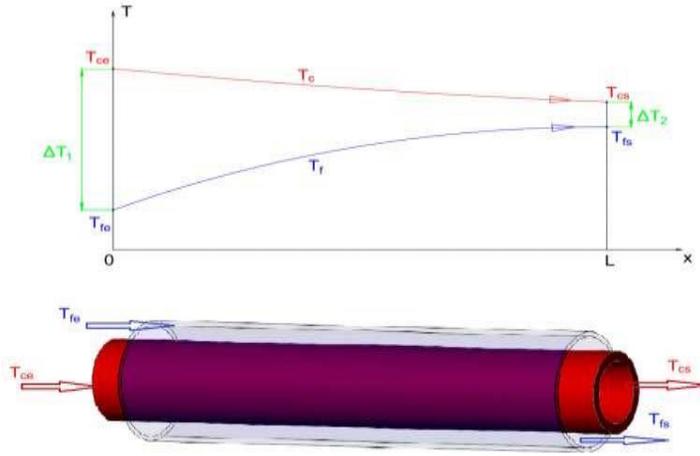


Figure 18 Évolution des températures du fluide chaud et du fluide froid le long d'un échangeur à Co-courant

L'étude de la différence moyenne de température dans un appareil s'effectuera en supposant que le coefficient global de transfert est constant en tout point, ainsi que les chaleurs spécifiques des fluides et qu'il n'y a ni pertes thermiques, ni changement de phases au cours du transfert.

Dans ces conditions l'expression de la puissance thermique et du flux de chaleur transférer du fluide chaud au fluide froid à travers l'élément dS seront respectivement exprimées par :

$$\phi = qtc(Tec - Tsc) = qtf(Tef - Tsf) \quad 6$$

$$d\phi = -qtc.dTc = qtf.dTf \quad 7$$

Où : $q = \dot{m}C_p$ et C_p : capacité calorifique.

$$dTc = -\frac{d\phi}{qtc} \quad \text{et} \quad dTf = \frac{d\phi}{qtf} \quad 8$$

$$dTc - dTf = d(Tc - Tf) = -\left(\frac{1}{qtc} + \frac{1}{qtf}\right) \cdot k \cdot (Tc - Tf) \cdot dS \quad 9$$

$$\frac{d(Tc - Tf)}{Tc - Tf} = -\left(\frac{1}{qtc} + \frac{1}{qtf}\right) \cdot k \cdot dS \quad 10$$

Comme k a été supposé constant depuis le début du problème. Alors l'intégration de (10) de $S = 0$ à S donne :

o A l'entrée de l'échangeur (x=0) $T_c - T_f = T_{ec} - T_{ef}$
 A la sortie de l'échangeur (x=S) $T_c - T_f = T_{sc} - T_{sf}$

$$\frac{\ln(T_{sc}-T_{sf})}{T_{ec}-T_{ef}} = -\left(\frac{1}{q_{tc}} + \frac{1}{q_{tf}}\right) \cdot k \cdot S \quad 11$$

A partir des

$$\frac{\ln(T_{sc}-T_{sf})}{T_{ec}-T_{ef}} = [(T_{sc} - T_{sf}) - (T_{ec} - T_{ef})] \cdot \frac{k \cdot S}{\phi} \quad 12$$

On obtient finalement :

$$\phi = k \frac{(T_{sc}-T_{sf})-(T_{ec}-T_{ef})}{\ln \frac{T_{sc}-T_{sf}}{T_{ec}-T_{ef}}} \quad 13$$

Or la puissance thermique d'un échangeur à faisceau et calandre est caractérisée par :

$$\phi = k \cdot S \cdot DTLM \quad 14$$

Donc :

$$DTLM = \frac{(T_{sc}-T_{sf})-(T_{ec}-T_{ef})}{\ln \frac{T_{sc}-T_{sf}}{T_{ec}-T_{ef}}} \quad 15$$

Soit :

$$DTLM = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln \frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}} \quad 16$$

La différence de température logarithmique moyenne (DTLM) est définie de la manière suivante :

$$DTLM = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln \frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}} \quad 17$$

T_{ec}, T_{ef} : Températures d'entrée des fluides respectivement chaud et froid.

T_{sc}, T_{sf} : Températures de sortie des fluides respectivement chaud et froid.

— **Cas contre-courant:**

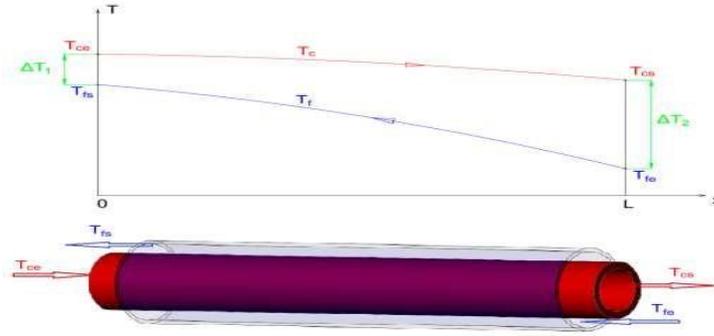


Figure 19Évolution des températures du fluide chaud et du fluide froid le long d'un échangeur à contre-courant

La variation de température T_f du fluide froid quand on augmente la surface d'échange de dS , devient négative. Dans ces conditions, la relation (II.5) s'écrit :

$$d\phi = -q_{tc} \cdot dT_c = -q_{tf} \cdot dT_f \quad 18$$

Le calcul et les considérations restent idem qu'au cas de l'échangeur Co-courant.

On obtient comme résultat final :

$$DTLM = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln \frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}} \quad 19$$

En essayant de bien regarder cette dernière formule on constate qu'elle est identique au cas d'un échangeur Co-courant.

D'où en générale la différence de température logarithmique moyenne entre les deux fluides est exprimée par :

$$DTLM = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln \frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}} \quad 20$$

Il existe un abaque donnant directement la valeur du DTLM en fonction de ΔT_1 et ΔT_2 (Figure II.3).

10. Méthode du Nombre d'Unités de Transfert (NUT)

La méthode du Nombre d'Unité de Transfert (NUT) repose sur le calcul des performances d'un échangeur thermique. En effet, cette méthode permet [12] :

- D'évaluer le nombre d'unités de transfert ;

- De calculer l'efficacité de l'échangeur à partir des équations numériques ou des abaques ;
- De déterminer les températures de sortie des fluides dans le cas où l'efficacité est connue.

L'efficacité d'un échangeur est définie comme le rapport de la puissance thermique réellement échangée $p_{réel}$ à la puissance maximum qu'il est théoriquement possible d'échanger p_{max} si l'échangeur est parfait.

$$E = \frac{Préel}{Pmax}$$

21

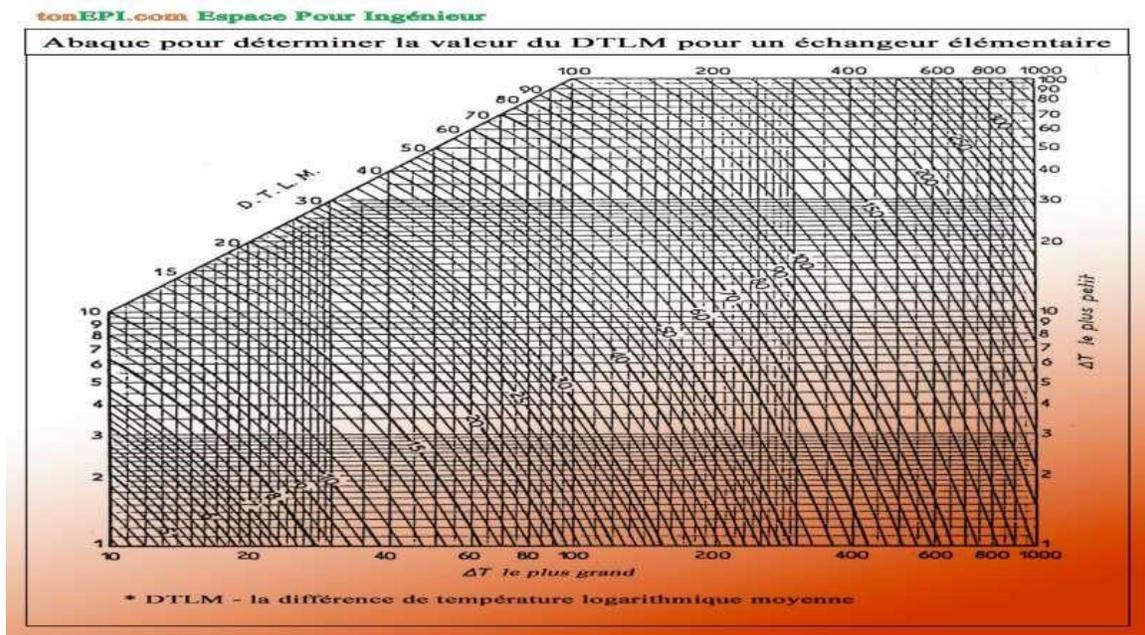


figure II.3: Abaque pour déterminer la valeur de la DTLM pour un échangeur élémentaire

La puissance thermique réellement échangée d'un échangeur $p_{réel}$, [W] :

$$Préel = q_{mc} \cdot C_{pc} \cdot \Delta T_c = -q_{mf} \cdot C_{pf} \cdot \Delta T_f \quad 22$$

Où :

q_{mc} , q_{mf} : Débit massique des fluides respectivement chaud et froid en kg/s.

ΔT_c , ΔT_f : Écart de température des fluides respectivement chaud et froid, en K ou en °C ;

$$\Delta T_c = T_{ce} - T_{cs} \quad 23$$

$$\Delta T_f = T_{fe} - T_{fs} \quad 24$$

T_{ce} Et T_{fe} : Températures d'entrée des fluides respectivement chaud et froid, en K ou en °C

T_{cs} Et T_{fs} : Températures de sortie des fluides respectivement chaud et froid, en K ou en °C

La puissance d'échange maximum théoriquement possible p_{max} est le produit du débit de capacité thermique le plus faible d'un fluide C_{min} , [W/K] et de la température égale à l'écart maximal existant dans l'échangeur soit ($T_{ce} - T_{fe}$)

$$p_{max} = C_{min} * (T_{ce} - T_{fe}) \quad 25$$

Le débit de capacité thermique massique minimale C_{min} est le produit du débit massique (q_m) par la chaleur spécifique (C_p) du fluide :

$$C_{min} = \min(q_{mc} * c_{pc} ; q_{mf} * c_{pf}) = \min(C_c ; C_f) \quad 26$$

L'efficacité de l'échangeur thermique s'écrit :

Si le côté chaud présente le produit ($q_m * C_p$) minimum:

$$E = \frac{Préel}{Pmax} = \frac{C_c * (T_{ce} - T_{cs})}{C_c * (T_{ce} - T_{fe})} = \frac{(T_{ce} - T_{cs})}{(T_{ce} - T_{fe})} = \frac{\Delta T_c}{\Delta T_{max}} \quad 27$$

Où :

Si le côté froid présente le produit ($q_m * C_p$) minimum:

$$E = \frac{Préel}{Pmax} = \frac{C_f * (T_{fs} - T_{fe})}{C_f * (T_{ce} - T_{fe})} = \frac{(T_{fs} - T_{fe})}{(T_{ce} - T_{fe})} = \frac{\Delta T_f}{\Delta T_{max}} \quad 28$$

Lorsque les températures de sortie des fluides sont inconnues (ce qui est souvent le cas dans le cadre d'une simulation), l'efficacité d'un échangeur se détermine par les équations suivantes :

Pour une circulation des fluides à contre-courants :

$$E = \frac{1 - e^{-Nut(1-c)}}{1 - c * e^{-Nut(1-c)}} \quad 29$$

Pour une circulation des fluides à Co-courants :

$$E = \frac{1 - e^{-NUT(1+c)}}{1+c} \quad 30$$

En déduisant NUT des équations ci-dessus on peut avoir les relations suivantes :

Pour une circulation des fluides à contre-courants :

$$NUT = \frac{1}{c-1} * \ln\left(\frac{E-1}{C*E-1}\right) \quad 31$$

Pour une circulation des fluides à Co-courants :

$$NUT = \frac{-\ln[1-(1+c)*E]}{1+c} \quad 32$$

Où :

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

$$NUT = \frac{U*S}{C_{min}} \quad 33$$

U : coefficient global d'échange de chaleur qui dépend des caractéristiques de l'écoulement et des fluides, en W/ (m². K)

S : Surface d'échange, en m²

C : rapport des débits de capacité thermique ;

$$C = \frac{C_{min}}{C_{max}} \quad 34$$

Cas particuliers :

Pour tous les types d'échangeurs : si C = 0

$$E = 1 - e^{-NUT} \quad (II.33)$$

Pour l'échangeur à contre-courant : si $C = 1$

$$E = \frac{NUT}{NUT+1}$$

35

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

Chapitre II

Dimensionnement et conception du l'échangeur de chaleur

1. Étude de cas

Dans notre étude, nous nous sommes intéressés au dimensionnement et à la conception d'un échangeur de chaleur visant à exploiter une source thermique naturelle chaude pour le chauffage de l'eau domestique. L'objectif principal est de transférer efficacement la chaleur de la source chaude, à une température initiale de 150°C, à l'eau domestique, qui commence à une température de 20°C. Le débit massique de la source chaude est de 0,138 kg/s, tandis que celui de la source froide, représentant l'eau domestique, est de 0,277 kg/s. La conception de l'échangeur doit maximiser le transfert thermique tout en maintenant la fiabilité et l'efficacité du système.

Tableau 1 paramètres de l'étude

Paramètre	Valeur
Débit massique de la source chaude	0,138 kg/s
Température de la source chaude	150°C
Débit massique de la source froide	0,277 kg/s
Température de la source froide	20°C
Longueur du tube	1,8 m
Température souhaitée à la sortie	80°C

Notre objectif principal dans ce travail était de réaliser le dimensionnement et la conception d'un échangeur de chaleur. Cependant, pour atteindre cet objectif, nous avons dû d'abord effectuer une étude thermique approfondie. Cette étude visait à déterminer avec précision le nombre de tubes à utiliser, la longueur des tubes étant conditionnée par la demande du client en raison de problèmes d'encombrement. Les calculs thermodynamiques et les paramètres de conception, tels que la surface d'échange et la configuration des tubes, ont été optimisés pour assurer un transfert de chaleur adéquat, garantissant que l'eau domestique atteigne la température souhaitée de manière constante et durable.

Nous avons également utilisé plusieurs hypothèses simplificatrices pour faciliter notre étude. Ces hypothèses incluent des simplifications sur les propriétés thermo physiques des fluides, la constance des débits massiques, et l'isolation idéale des parois de l'échangeur pour minimiser les pertes de chaleur. De plus, nous avons utilisé la méthode DTLM (Différence de Température Logarithmique Moyenne) pour le calcul des échanges

thermiques, ce qui nous a permis d'estimer avec précision les performances de l'échangeur. Cette étude inclut l'analyse des pertes de chaleur, des matériaux à utiliser et des conditions opérationnelles pour assurer une performance optimale de l'échangeur de chaleur.

2) Les calculs

2.1. Calcul du Coefficient global de transfert de chaleur :

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{h_1} + \frac{t}{K} + \frac{1}{h_0}$$

Avec :

h_0 : coefficient de transfert de chaleur coté extérieur

h_1 : Coefficient de transfert de chaleur coté intérieur

K : conductivité thermique de matériaux de l'échangeurs

t : épaisseur du matériau

Application numérique

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{700} + \frac{0,02}{20} + \frac{1}{100}$$

$$\frac{1}{U} = 0,01292$$

$$U = 77.34 \text{ w}$$

2.2. Calcul de la charge thermique :

$$Q_1 = m_1 C_1 \Delta T_{DTLM}$$

m_1 : Débit massique du fluide 1

C_1 : La chaleur Spécifique du fluide 1

Avec

$$DTLM = \left(\frac{T_{ce} + T_{fs}}{2} \right) - \left(\frac{T_{cs} + T_{fe}}{2} \right)$$

T_s : la température de la sortie du fluide

T_e : La température des entrées du fluide

Il reste à déterminer

Nous avons supposé dans l'élanes de l'étude que nous supposant qu'il ne y'a pas de perte de chaleur, se aussi signifie que

$Q_1 = Q_2$ et par conséquent

$$DTLM \quad DTLM = \frac{\Delta T1 - \Delta T2}{\ln \frac{\Delta T1}{\Delta T2}} = 85,05 \text{ } ^\circ\text{C}$$

2.3. Calcul de surface de Transfert :

$$Q1 = U.A.DTLM$$

$$A = \frac{Q1}{U \quad DTLM}$$

$$A = \frac{34,6269}{77.34 \quad 85,05}$$

$$A = \frac{34,6269}{6577,767}$$

$$A = 5,264 \text{ m}^2$$

2.4. Calcul de la surface de contact du tube

$$A_{tube} = \pi L D$$

Avec :

A_{tube} : est la Surface de contact tube du le fluide chaud

L : est la longueur du tube

D : Diamètre extérieur de tube

$$A_{tube} = \pi 1,8$$

$$A_{tube} = 0,11304 \text{ m}^2$$

2.5. Calcul du nombre de tube

$$N_{tube} = \frac{A}{A_{tube}}$$

$$N_{tube} = \frac{5,264}{0,11304}$$

$$N_{tube} = 46,56 \text{ tubes}$$

Donc Le nombre de tube à Utiliser dans La conception de l'échangeur est de 48 tubes

Après avoir déterminé le nombre de tubes et les conditions d'encombrement imposées par le client, nous avons commencé la conception et la modélisation de chaque composant de l'échangeur de chaleur à l'aide du logiciel SolidWorks, suivies de l'assemblage des différentes pièces constitutives (voir figure plans et figures détaillées dans l'annexe) .

Une fois le travail principal de dimensionnement et la conception de notre échangeur de chaleur terminé, nous avons commencé la phase suivante : effectuer des simulations CFD pour valider les résultats obtenus et apporter des modifications aux matériaux constitutifs afin d'atteindre une bonne efficacité thermique.

Nous avons choisi trois matériaux : l'acier doux, l'acier inoxydable 302, et une combinaison avec une coque en acier inoxydable et un faisceau de tubes en cuivre.

Le cuivre, avec une conductivité thermique très élevée de 385-400 W/m·K, une bonne résistance à la corrosion, une densité de 8.96 g/cm³, et une grande ductilité et malléabilité, est extrêmement efficace pour le transfert de chaleur mais coûteux.

L'acier doux, bien que moins efficace thermiquement avec une conductivité de 50 W/m·K et sujet à la corrosion, est économique et facilement formable, avec une densité de 7.85 g/cm³.

L'acier inoxydable 302, offrant une excellente résistance à la corrosion et une densité de 7.9 g/cm^3 , présente une conductivité thermique faible de $16 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ mais est plus facile à former et souder que l'acier doux.

Propriété	Valeur
Densité	7870 Kg/m^3
Chaleur Spécifique	$472 \text{ J/(Kg}\cdot\text{K)}$
Type de conductivité	Isotopique
Conductivité thermique	$51.9 \text{ W/(m}\cdot\text{k)}$
Conductivité électrique	Conducteur
Résistivité	$1.74\text{e-}07 \text{ Ohm}\cdot\text{m}$
Température	1673.15K

Tableau 2 priorités des aciers doux

Propriété	Valeur
Nom	Acier inoxydable 302
Commentaire	Cr18/Ni8
Densité	7900 Kg/m^3
Chaleur Spécifique	$500 \text{ J/(Kg}\cdot\text{K)}$
Type de conductivité	Isotopique
Conductivité thermique	$16.29999 \text{ W/(m}\cdot\text{k)}$
Conductivité électrique	Conducteur
Résistivité	$7.2\text{e-}07 \text{ Ohm}\cdot\text{m}$
Température	1673.15K

Tableau 3 propriétés des aciers inoxydables

Propriété	Valeur
Densité	8960 Kg/m^3
Chaleur Spécifique	(Tableau)
Type de conductivité	Isotopique
Conductivité thermique	(Tableau)
Conductivité électrique	Conducteur
Température	1356.2K

Tableau 4 propriétés des cuivres

Cette combinaison de matériaux nous permet de maximiser l'efficacité thermique tout en répondant aux contraintes économiques et de durabilité.

Afin de déterminer quel matériau ou combinaison de matériaux est le plus approprié pour satisfaire les exigences de température de sortie demandées par le client, qui est de 80°C, nous avons procédé à trois simulations CFD. Ces simulations visaient à identifier le matériau offrant le meilleur rendement. Les figures 20, 21 et 22 présentent les variations des températures moyennes pour les trois configurations testées :

- Échangeur entièrement en acier doux.
- Échangeur entièrement en acier inoxydable 302.
- Échangeur mixte avec calandre en acier inoxydable 302 et faisceau tubulaire en cuivre.

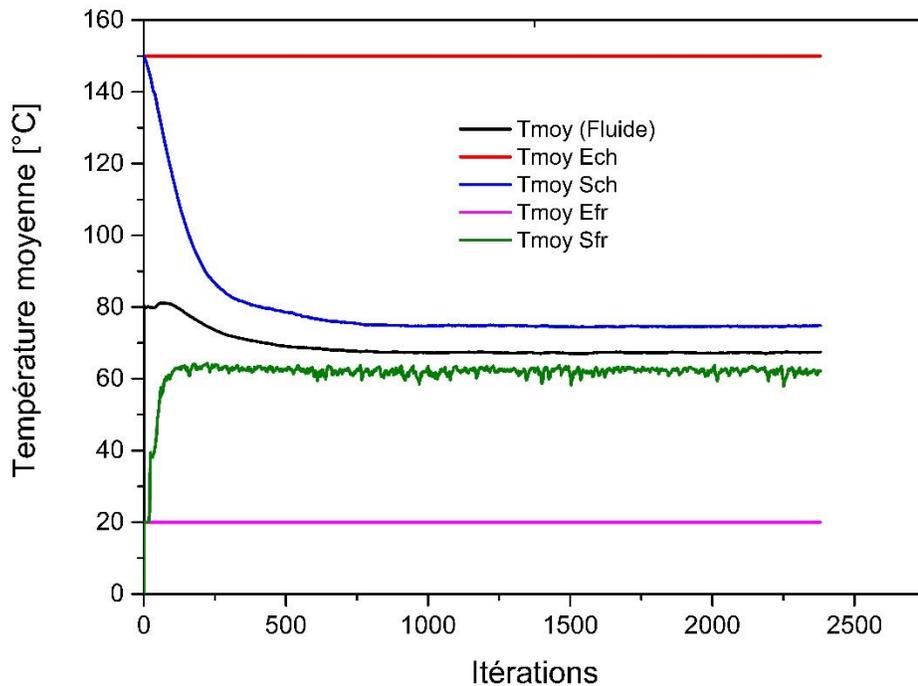


Figure 20 Température moyenne (acier doux)

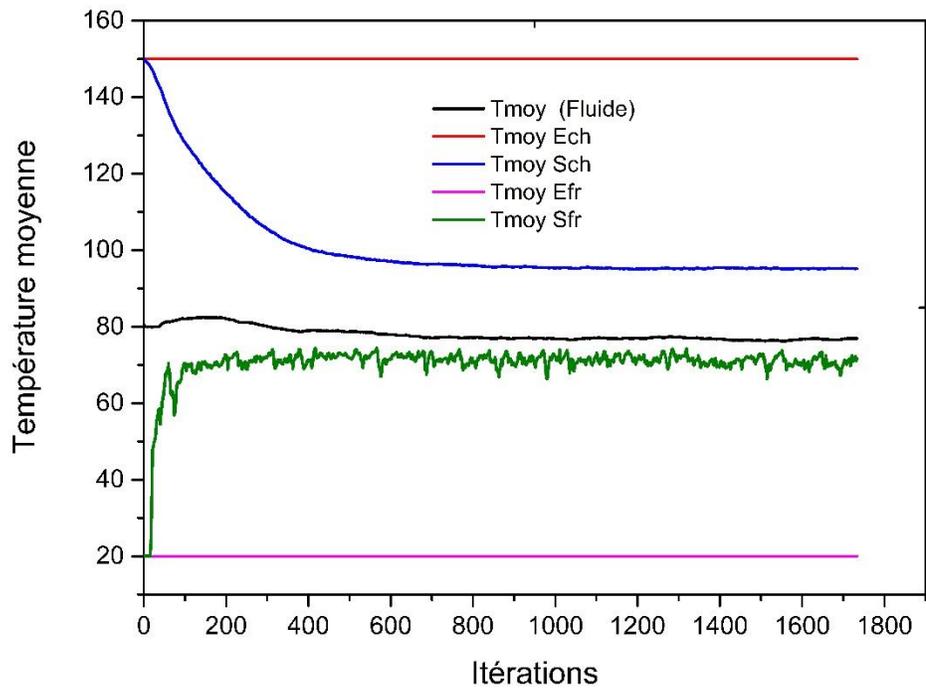


Figure 21 Température moyenne (acier inoxydable)

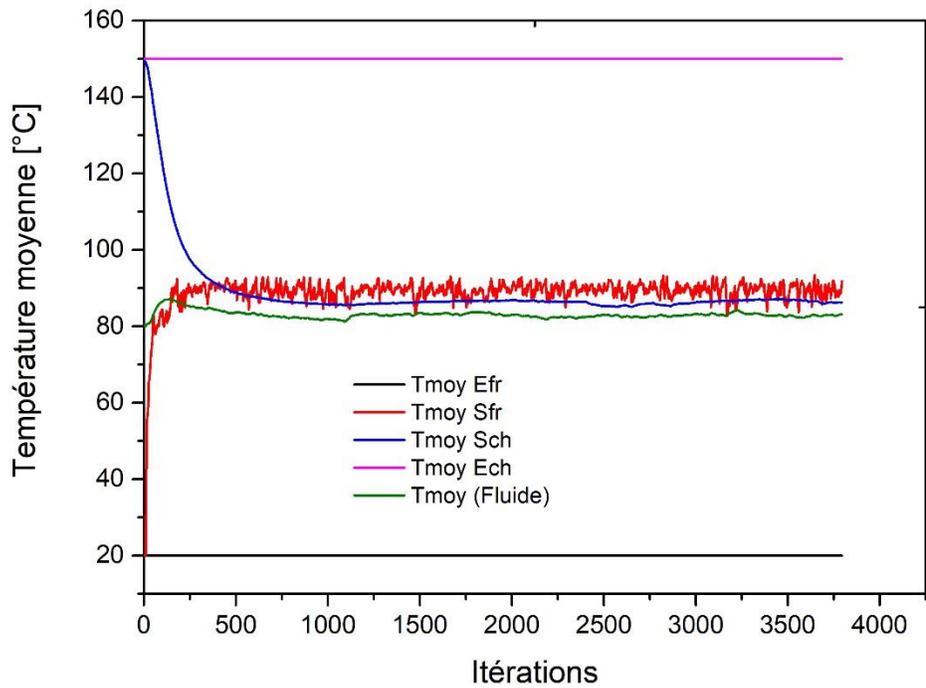


Figure 22 Température moyenne (acier inoxydable + cuivre)

.3. Variation de la température moyenne cas Acier inoxydable plus cuivre

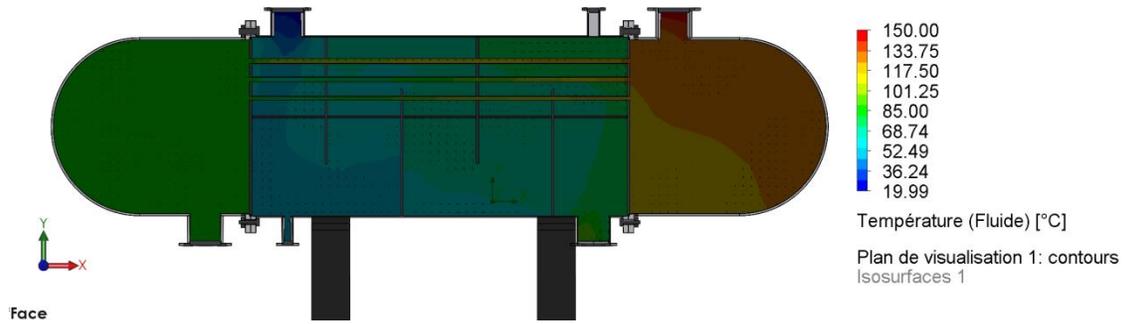


Figure 23 variation de la température moyenne dans le plan (xy) médiane

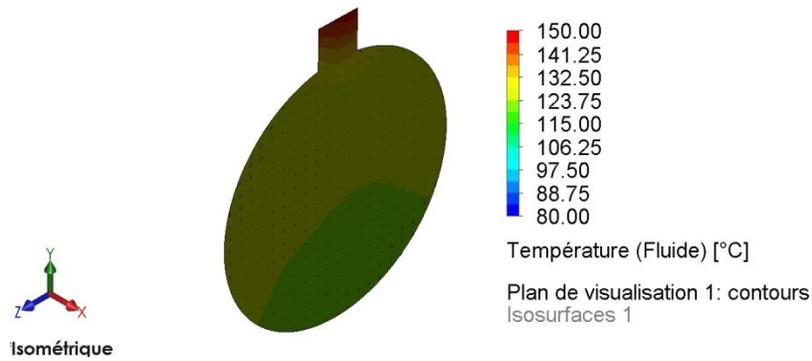


Figure entrée chaude

Figure 24 coupe au niveau de l'entrée chaude

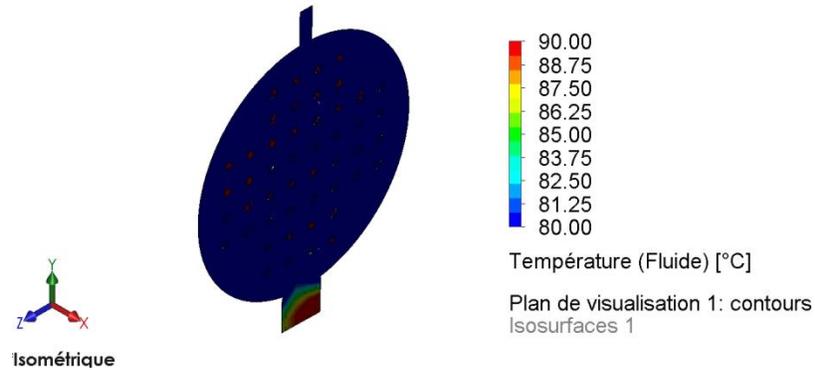


Figure sortie froide

Figure 25 coupe au niveau de sortie froide

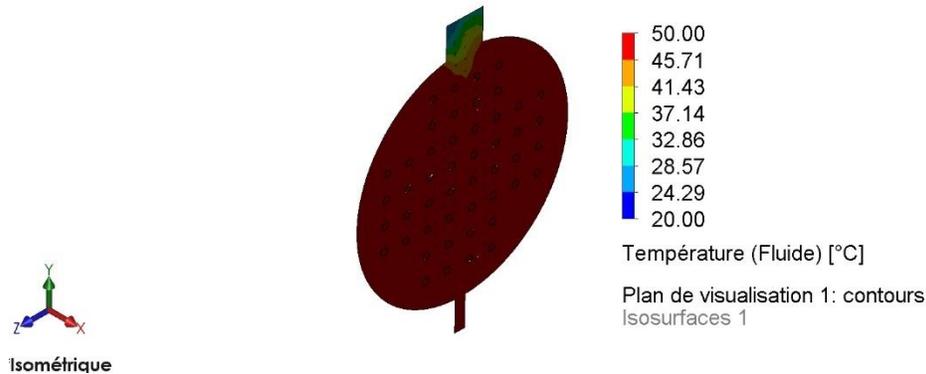


Figure 26 coupe au niveau de l'entrée froide

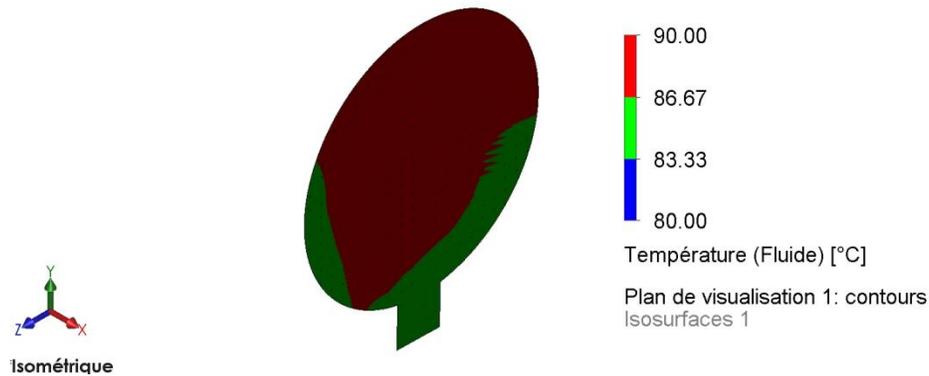


Figure 27 coupe au niveau de la sortie chaude

.4. Variation de la pression moyenne cas Acier inoxydable plus cuivre

La figure 28 présente une analyse détaillée de la pression moyenne à l'intérieur d'un échangeur de chaleur tubulaire, où les valeurs varient de 92,660.28 Pa à 103,230.33 Pa le long de la hauteur de l'échangeur. Cette variation de pression peut être expliquée par plusieurs facteurs dynamiques et de conception spécifiques à l'échangeur.

Tout d'abord, la gravité joue un rôle prépondérant dans cette répartition de pression. Dans un échangeur vertical, les fluides chauds, ayant une tendance naturelle à monter, créent une pression hydrostatique plus élevée à la base de l'échangeur. Cette pression diminue progressivement à mesure que le fluide monte, influencée par la hauteur de la colonne liquide et les effets gravitationnels sur la distribution de la pression.

Ensuite, la résistance au flux à travers les tubes de l'échangeur contribue également à cette variation de pression. Le fluide en circulation rencontre une résistance due aux parois des tubes et à d'autres composants internes, provoquant des pertes de charge qui entraînent une légère diminution de la pression le long du parcours ascendant à travers l'échangeur. Cependant, même avec cette perte de charge, l'effet de la gravité sur la pression reste significatif, surtout dans les échangeurs de grande hauteur.

Cette observation est cruciale pour la compréhension de la performance et de l'efficacité de l'échangeur de chaleur, car elle affecte directement les conditions de transfert thermique et la circulation des fluides à l'intérieur du système.

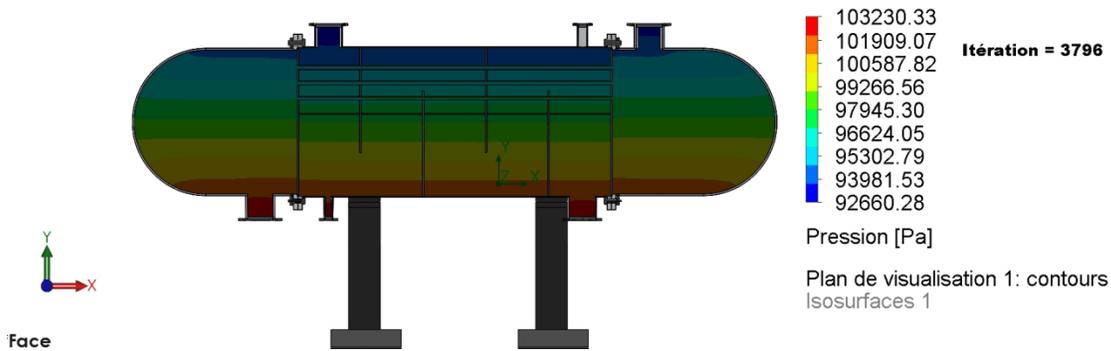


Figure 28 variation de la pression dans le plan (x y) médiane

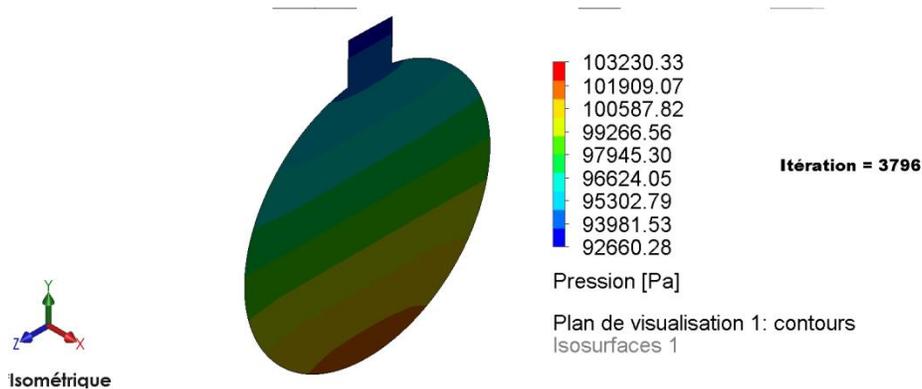


Figure 29 coupe au niveau de l'entrée chaude

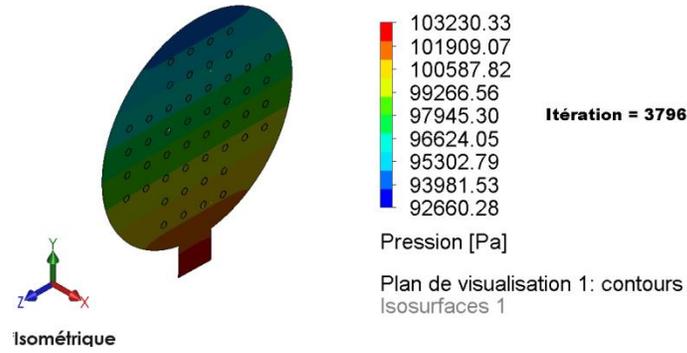


Figure 30 coupe au niveau de l'entrée froide

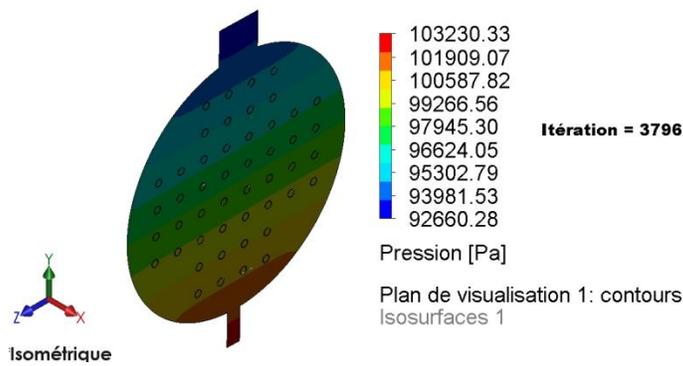


Figure 31 coupe au niveau de l'entrée froide

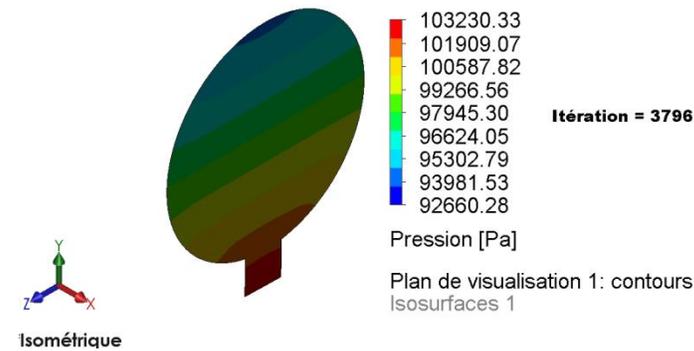


Figure sortie chaude

Figure 32 coupe au niveau de la sortie chaude

.5. Variation de la vitesse moyenne cas Acier inoxydable plus cuivre

La vitesse moyenne totale, représentée par la courbe magenta, montre une augmentation rapide initiale, atteignant une valeur stable aux alentours de 0,030 m/s. Cette courbe semble représenter la vitesse résultante ou la magnitude de la vitesse globale du fluide, Toutefois, cette vitesse moyenne totale est principalement influencée par les composantes du flux dans les directions x et y, car les vitesses dans ces directions sont dominantes comparées à celles dans la direction z.

L'augmentation initiale rapide de la vitesse moyenne totale suggère que le fluide s'accélère rapidement lorsqu'il commence à contourner les chicanes, trouvant un nouveau chemin à travers les obstacles. Une fois que cette réorganisation initiale du flux est terminée, la vitesse moyenne totale se stabilise autour de 0,030 m/s. Cela indique que le fluide a atteint un équilibre dynamique où les effets des chicanes sont compensés par les nouvelles trajectoires du flux.

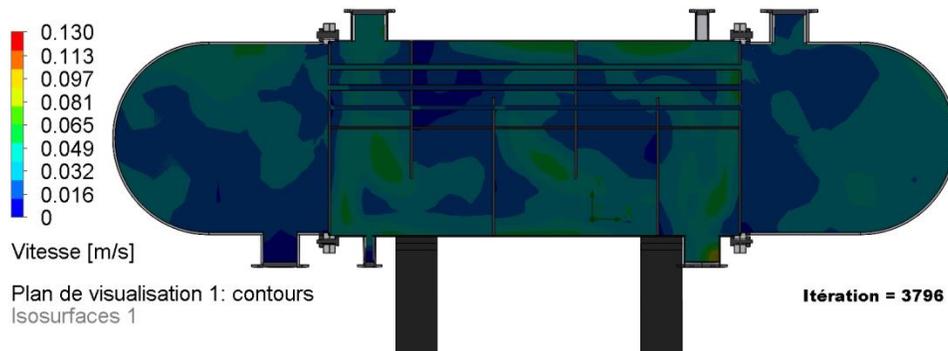


Figure 33 variation de la vitesse moyenne dans le plan médiane

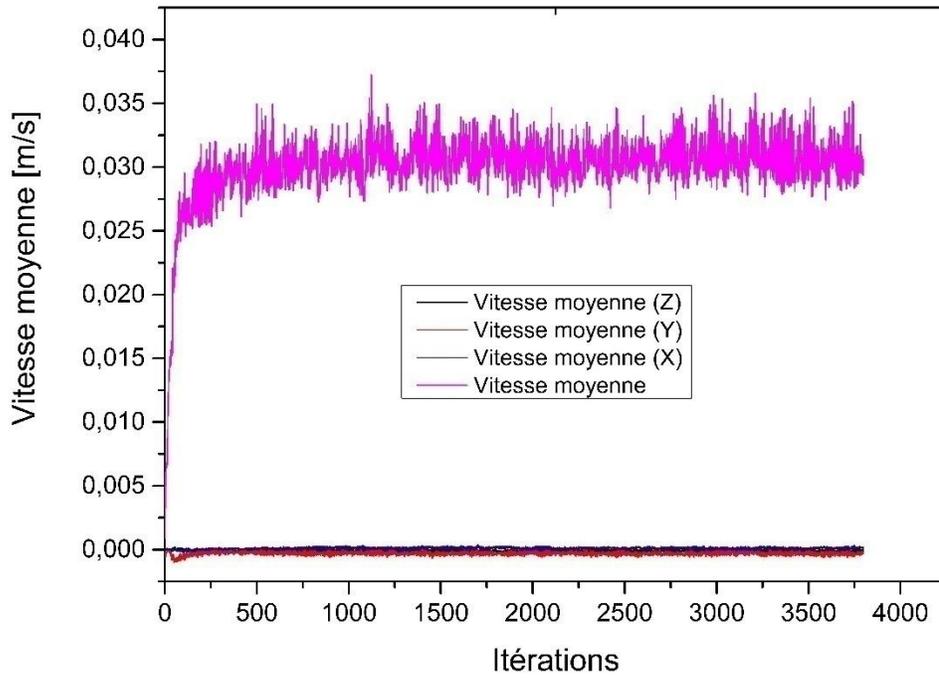


Figure 34 variation de la vitesse moyenne et les vitesses moyenne (X ,Y et Z)

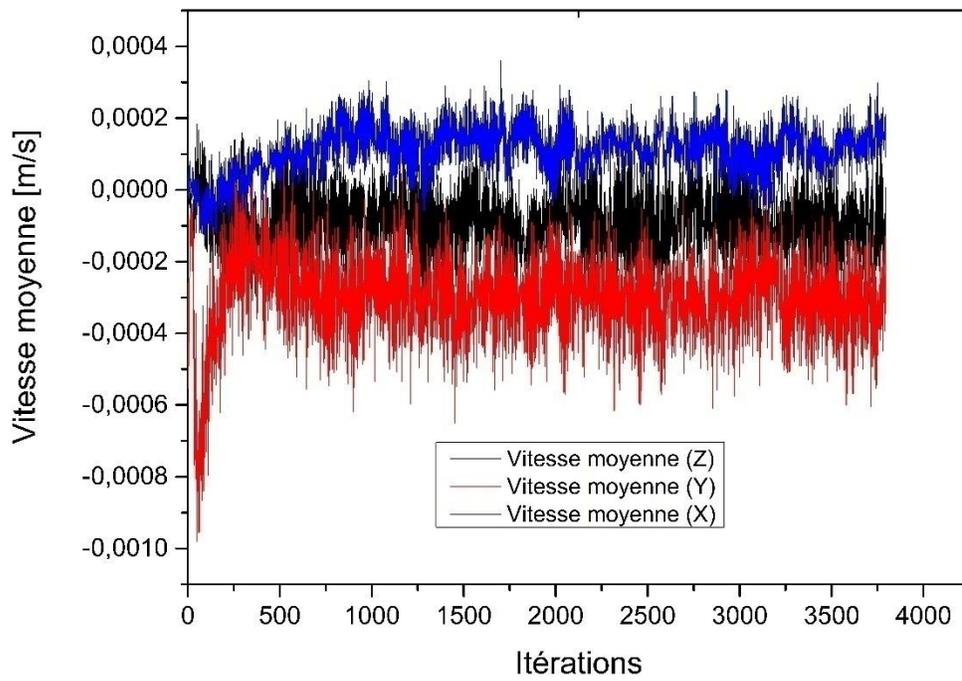


Figure 35 Figure 23 variation de la vitesse moyenne (XYZ)

La figure 35 montre l'effet des chicane sur les vitesses moyennes dans les directions x , et z . Les chicane sont des obstacles placés dans le chemin du fluide pour perturber le flux. Lorsque l'eau rencontre une chicane, elle doit contourner cet obstacle, ce qui cause une accélération du fluide, probablement responsable de l'augmentation rapide de la vitesse moyenne observée au début des itérations. La présence de chicane cause également un changement de direction du fluide, ce qui pourrait expliquer les petites fluctuations autour de zéro dans les directions x , y , et z . Autour des chicane, il peut y avoir des zones de stagnation, où le fluide ralentit considérablement avant de contourner l'obstacle. Ces zones de stagnation peuvent contribuer aux fluctuations observées dans les vitesses moyennes des trois directions. Les vortex, ou tourbillons créés lorsque le fluide contourne un obstacle, induisent également des fluctuations dans la vitesse moyenne, car le fluide change continuellement de direction et de vitesse. La courbe des vitesses moyennes dans les directions x , y , et z indique que les chicane perturbent le flux, causant des fluctuations de la vitesse autour de zéro dans chaque direction. La vitesse moyenne totale montre une augmentation initiale rapide, atteignant une valeur stable, suggérant que le fluide s'accélère lorsqu'il contourne les chicane et atteint ensuite un régime stable de vitesse moyenne. Les zones de stagnation et les vortex jouent un rôle crucial dans la dynamique du fluide autour des chicane, contribuant aux fluctuations observées.

Conclusion

Conclusion

Ce travail a permis d'explorer et d'approfondir la compréhension des échangeurs de chaleur à travers une approche multidisciplinaire intégrant une étude bibliographique, un dimensionnement avancé via SolidWorks, et des simulations thermiques utilisant la Dynamique des Fluides Numérique (CFD).

La recherche s'est concentrée sur trois matériaux différents : l'acier doux, l'acier inoxydable 302 et une combinaison de coque en acier inoxydable avec faisceau de tubes en cuivre, chacun offrant des avantages distincts en termes de conductivité thermique, résistance à la corrosion et coût.

Les résultats des simulations CFD ont révélé que l'intégration de chicanes dans l'échangeur de chaleur perturbe le flux du fluide, générant des zones de stagnation et des vortex qui influencent les fluctuations de vitesse et la répartition de la pression. Ces phénomènes ont un impact direct sur la performance thermique de l'échangeur. En particulier, le cuivre s'est avéré être le matériau le plus efficace pour le transfert de chaleur, atteignant la température de sortie requise de 80°C, malgré son coût élevé.

L'analyse de la pression moyenne à l'intérieur de l'échangeur a mis en évidence l'importance de la répartition de la pression hydrostatique et des pertes de charge dues à la résistance du flux à travers les tubes. Ces facteurs sont cruciaux pour optimiser la conception et assurer une performance efficace de l'échangeur.

Plusieurs pistes de recherche et d'amélioration peuvent être envisagées suite à ce travail : une étude plus approfondie sur la forme, la taille et l'agencement optimal des chicanes pourrait conduire à des performances encore meilleures ; explorer d'autres matériaux ou alliages qui offrent un meilleur compromis entre coût, conductivité thermique et résistance à la corrosion pourrait améliorer l'efficacité et la durabilité des échangeurs de chaleur ; investir dans des technologies de fabrication avancées, comme l'impression 3D pour les composants complexes, pourrait réduire les coûts de production et permettre des conceptions plus innovantes et efficaces ; compléter les simulations CFD par des tests expérimentaux sur des prototypes réels permettrait de valider les modèles numériques et

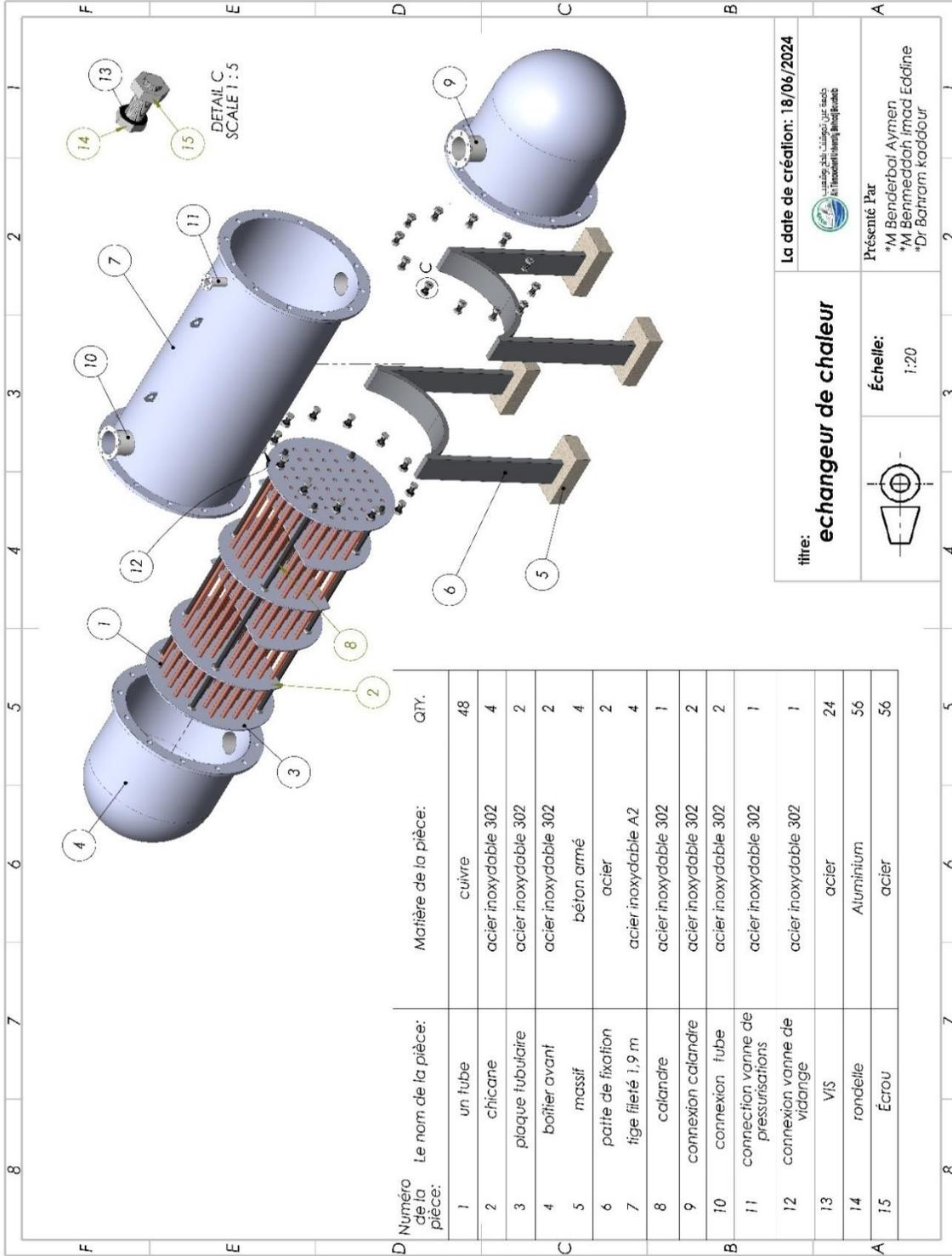
d'affiner les paramètres de conception pour des conditions de fonctionnement réelles ; utiliser des techniques d'intelligence artificielle et de machine learning pour analyser les données de simulation et optimiser les paramètres de conception pourrait permettre des gains significatifs en termes d'efficacité énergétique et de réduction des coûts.

References bibliographies

References bibliographies

1. Yan, S.-R., et al., *Energy efficiency optimization of the waste heat recovery system with embedded phase change materials in greenhouses: a thermo-economic-environmental study*. Journal of Energy Storage, 2020. **30**: p. 101445.
2. Klemeš, J.J., et al., *Heat transfer enhancement, intensification and optimisation in heat exchanger network retrofit and operation*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2020. **120**: p. 109644.
3. Du, R., et al., *An experimental investigation of CuO/water nanofluid heat transfer in geothermal heat exchanger*. Energy and Buildings, 2020. **227**: p. 110402.
4. Ali, A.R.I. and B. Salam, *A review on nanofluid: preparation, stability, thermophysical properties, heat transfer characteristics and application*. SN Applied Sciences, 2020. **2**(10): p. 1636.
5. Kaur, I. and P. Singh, *State-of-the-art in heat exchanger additive manufacturing*. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2021. **178**: p. 121600.
6. Freisleben, V. and Z. Jegla, *Conceptual Design Method for Energy Retrofit of Waste Gas-to-Energy Units*. Journal of Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems, 2022. **10**(2): p. 1-18.
7. Rafi, S., C. Sivarajan, and M. Ch. *Optimization of helical coil tube heat exchanger: a systematic review*. in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020. IOP Publishing.
8. Zayed, M.E., et al., *Recent progress in phase change materials storage containers: Geometries, design considerations and heat transfer improvement methods*. Journal of Energy Storage, 2020. **30**: p. 101341.
9. Rao, R.V., et al., *Design optimization of heat exchangers with advanced optimization techniques: a review*. Archives of computational methods in engineering, 2020. **27**: p. 517-548.
10. Wang, B., et al., *Heat exchanger network retrofit with heat exchanger and material type selection: A review and a novel method*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2021. **138**: p. 110479.
11. Raouf, S., B.R. Nadir, and M.B. Noureddine, *Etude théorique et par simulation de l'influence des chicanes sur les performances d'un échangeur de chaleur tube-calandre*.
12. Toufiq, S., *Modélisation des échangeurs géothermiques peu profonds: application dans le site de Biskra*.
13. teggour, r., *étude numérique de l'influence de l'ondulation des tubes sur les performances d'un échangeur de chaleur de type tubes et calandre*, 2022, Université Ibn Khaldoun-Tiaret-.

Annexes



titre: **échangeur de chaleur**

La date de création: 18/06/2024


 Présenté Par
 *M Banderbal Aymen
 *M Benmeddoh Imad Eddine
 *Dr Bahram Kaddour

Échelle: 1:20

Numéro de la pièce:	Le nom de la pièce:	Matière de la pièce:	QTY:
1	un tube	cuivre	48
2	chicane	acier inoxydable 302	4
3	plaque tubulaire	acier inoxydable 302	2
4	boîtier avant massif	acier inoxydable 302	2
5		béton armé	4
6	patte de fixation	acier	2
7	tige fileté 1,9 m	acier inoxydable A2	4
8	calandre	acier inoxydable 302	1
9	connexion calandre	acier inoxydable 302	2
10	connexion tube	acier inoxydable 302	2
11	connexion vanne de pressurisations	acier inoxydable 302	1
12	connexion vanne de vidange	acier inoxydable 302	1
13	VIS	acier	24
14	rondelle	Aluminium	56
15	Écrou	acier	56

