

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENTSUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF DEM'SILA



Faculté des Sciences de la technologie
Département de Génie Mécanique



Projet de fin d'études

En vue de l'obtention du diplôme Licence

Filière : Génie Mécanique

Spécialité : Energétique

THEME

Les Echangeurs de Chaleur

Présenté Par :

- Arbaoui Bouzid

Proposé et dirigé par :

M^{me} Benkherbache S

Année Universitaire 2022 /2023

Sommaire

Liste des figures	i
Introduction	ii
Chapitre1	
Les transferts de chaleur	
1.1. Introduction	1
1.2. La conduction thermique	1
1.3. La convection thermique	2
1.4. Le rayonnement thermique	3
1.5. Conclusion	4
Chapitre 2	
Les échangeurs de chaleur	
2.1. Introduction	5
2.2. Caractéristiques des échangeurs	5
2.2.1. Principaux types des échangeurs de chaleurs	5
2.3. Expression du flux échangé dans un échangeur tubulaire simple	6
2.3.1. Calcul de la puissance totale de l'échangeur	7
2.4. Efficacité d'un échangeur	10
3.5 Méthode du nombre d'unités de transfert (NUT)	11
3.6 Calcul d'un échangeur	12
3. Conclusion	14
Références	15

Liste des figures

Chapitre 1

Les transferts de chaleurs

Figure. 1: La conduction de la chaleur	2
Figure. 2: La convection thermique	3
Figure. 3: Le rayonnement thermique	4
Figure. 4: Les différents types de transfert de chaleur	4

Chapitre 2

Les échangeurs de chaleur

Figure.1 : Echangeur Bitube.	5
Figure .2 : Echangeur de chaleur tubulaire	6
Figure .3 : Echangeur de chaleur à plaques.	6
Figure .4 : Schéma d'un échangeur tubulaire simple	7
Figure .5 : Schématisation des fonctionnements à co-courant et à contre-courant.	7
Figure.6 : Evolution des températures dans un échangeur tubulaire fonctionnement co-courant.	9
Figure .7 : Evolution des températures dans un échangeur tubulaire fonctionnant à contre-courant.	9
Figure .8 : Echangeur à faisceau de type 1-2	12
Figure .9 : Echangeur à courants croisés.	13

Introduction

L'échange de chaleur qui se produit entre deux corps qui sont à des températures différentes peut se faire selon trois modes:

- **La conduction:** La chaleur se propage de proche en proche à travers la matière sans qu'il n'ait de transfert de cette dernière. **La conduction** assure un bon transfert de chaleur à travers les solides.
- **La convection:** Dans un fluide les différences de températures produisent des différences de densité pouvant amener à des mouvements de la matière dits mouvement de **convection**.
- **Le rayonnement:** Les corps émettent de l'énergie par leur surface sous forme de radiations. C'est le moyen qui n'a pas besoin de support matériel on le rencontre donc dans le vide. Tous les corps transparents permettent à la chaleur de se propager.

Dans les installations industrielles, il est souvent nécessaire d'apporter une quantité de chaleur importante à une partie du système. Dans la majorité des cas la chaleur est transmise à travers un échangeur de chaleur. On estime à 90% de la part des transferts d'énergie réalisée par les échangeurs de chaleur dans l'industrie.

Chapitre 1

Les transferts de chaleur

Chapitre 1

Les transferts de chaleur

1.1 Introduction

Les échanges de chaleur sont une partie importante de la thermodynamique et jouent un rôle crucial dans de nombreux processus physiques et chimiques. Les molécules dans leur mouvement constant ont une certaine quantité d'énergie cinétique, qui est essentiellement l'énergie de leur mouvement. Cette énergie cinétique peut être transférée entre les molécules lorsqu'elles entrent en collision les unes avec les autres.

Les échanges de chaleur se manifestent sous diverses formes (rayonnement, conduction et convection),

1.2. La Conduction thermique:

La conduction thermique est le processus par lequel la chaleur se propage à travers un matériau en raison des mouvements des molécules qui le composent. Dans les solides, les molécules sont étroitement liées les unes aux autres, ce qui rend la conduction thermique particulièrement efficace. Lorsque la température d'une partie d'un matériau solide augmente, les molécules qui le composent commencent à vibrer et à se déplacer plus rapidement. Ces mouvements agitent les molécules adjacentes, transférant de l'énergie cinétique et donc de la chaleur à ces molécules. Ce processus de transfert d'énergie se poursuit à travers le matériau, créant un flux de chaleur du point chaud au point froid. La vitesse à laquelle la chaleur se propage dépend de la conductivité thermique du matériau, qui est une mesure de sa capacité à conduire la chaleur. Les matériaux ayant une conductivité thermique élevée, tels que les métaux, conduisent la chaleur plus rapidement que les matériaux ayant une conductivité thermique plus faible, tels que les plastiques ou les bois. Des exemples courants de conduction thermique incluent le chauffage d'une casserole sur une plaque chauffante, la transmission de la chaleur à travers les murs d'une maison et la dissipation de la chaleur d'un ordinateur à travers un dissipateur thermique.

La conduction thermique est le processus de transfert de chaleur à travers un matériau solide ou un fluide stagnant, par lequel l'énergie thermique se déplace de molécule en molécule. Les conducteurs thermiques sont des matériaux tels que les métaux, qui sont de bons conducteurs, tandis que les isolants thermiques sont des matériaux tels que le verre ou la laine minérale, qui sont de mauvais conducteurs.

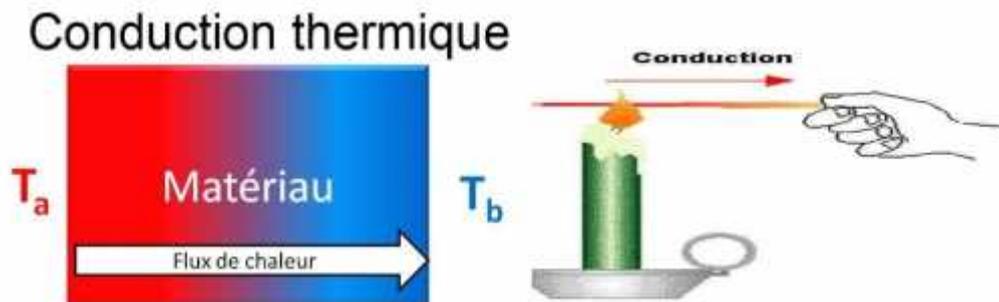


Figure. 1: La conduction de la chaleur

1.3. La convection thermique

La convection thermique- est le processus de transfert de chaleur qui se produit lorsque des fluides, tels que des gaz ou des liquides, sont chauffés et se déplacent. Ce processus de transfert de chaleur peut être divisé en deux types principaux : la convection naturelle et la convection forcée. La convection naturelle se produit lorsque le fluide est chauffé et se dilate, ce qui le rend moins dense et donc plus léger que le fluide environnant. Le fluide chaud monte alors vers le haut, créant des mouvements de convection qui transfèrent la chaleur de la source de chaleur à d'autres parties du fluide. Cela peut être observé dans des situations telles que la circulation de l'air chaud dans une pièce ou la montée de l'eau chaude dans une casserole. La convection forcée, en revanche, est créée par un dispositif externe, tel qu'une pompe ou un ventilateur, qui déplace le fluide. Dans ce cas, le fluide est forcé de circuler, ce qui entraîne un transfert de chaleur plus rapide et plus efficace. Des exemples courants de convection forcée incluent le refroidissement d'un moteur de voiture à l'aide d'un ventilateur et la circulation d'eau chaude dans un système de chauffage central. En général, la convection est un moyen efficace de transférer la chaleur, en particulier pour les fluides, car elle permet un transfert rapide et homogène de la chaleur. C'est pourquoi il est utilisé dans de nombreux processus industriels, tels que la cuisson, la réfrigération et la production d'énergie.



Figure. 2: La convection thermique

1.4. Le rayonnement thermique

Le rayonnement thermique est un processus de transfert de chaleur qui se produit sans avoir besoin de contact direct ou de substance intermédiaire. Il est produit lorsque les corps chauds émettent de l'énergie sous forme de rayonnement électromagnétique, comme la lumière visible, les rayons X, les ondes radio et la chaleur infrarouge. Tout corps qui possède une température supérieure à zéro absolu émet du rayonnement thermique. Plus la température du corps est élevée, plus l'énergie rayonnée est importante. Cela peut être observé dans la vie quotidienne, par exemple lorsqu'une plaque chauffante émet de la chaleur infrarouge pour chauffer une casserole. Le rayonnement thermique peut être absorbé, réfléchi ou transmis par les objets avec lesquels il entre en contact. Les objets qui absorbent le rayonnement thermique deviennent plus chauds, tandis que ceux qui le reflètent ou le transmettent peuvent rester à une température plus basse. Par exemple, un miroir réfléchit le rayonnement thermique, ce qui empêche le miroir de devenir chaud. Le rayonnement thermique est utilisé dans de nombreux domaines, comme le chauffage, la cuisson, la stérilisation, la détection thermique et la production d'énergie solaire. C'est également un élément important du bilan énergétique de la Terre, car l'énergie solaire est absorbée par la surface de la Terre et renvoyée sous forme de rayonnement thermique dans l'atmosphère.



Figure. 3: Le rayonnement thermique

1.5. Conclusion

Les échanges de chaleur sont omniprésents dans notre vie quotidienne et dans de nombreuses applications industrielles, et ils sont à la base de nombreux processus tels que le chauffage, la climatisation, la production d'électricité, la cuisson, la stérilisation, la production d'énergie solaire et bien d'autres encore.

La convection thermique est le processus de transfert de chaleur par le mouvement d'un fluide, comme l'air ou l'eau. La convection peut être naturelle, comme la circulation de l'air chaud dans une pièce, ou forcée, comme dans un système de climatisation. La convection thermique est essentielle pour concevoir des systèmes de chauffage, de ventilation et de climatisation plus efficaces et plus durables.

Le rayonnement thermique est le processus de transfert de chaleur par émission et absorption de rayonnement électromagnétique. C'est le processus à l'origine du chauffage solaire et des fours à micro-ondes. Le rayonnement thermique est essentiel pour concevoir des systèmes de production d'énergie solaire plus efficaces et plus rentables. La compréhension des différents processus de transfert de chaleur est essentielle pour concevoir des technologies plus efficaces et durables, afin de répondre aux défis énergétiques actuels et futurs. Les échanges de chaleur sont un domaine important de la physique, avec de nombreuses applications pratiques et une grande importance dans la recherche en matière d'énergie.

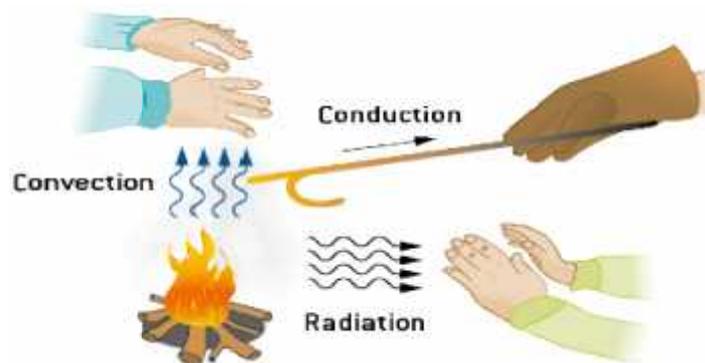


Figure. 4: Les différents types de transfert de chaleur

Chapitre 2

Echangeurs de chaleur

Chapitre 2

Les échangeurs de chaleur

2.1. Introduction :

Un échangeur de chaleur est un système qui permet un flux de chaleur d'un fluide chaud vers un fluide froid à travers une barrière (une paroi) sans contact direct entre les deux fluides. Le mécanisme de transmission thermique à l'intérieur de la paroi séparatrice est la conduction, et les phénomènes de convection prédominent sur chacune des deux surfaces de contact avec les fluides. Les exemples incluent un radiateur automobile, un évaporateur de climatisation, etc.

2.2. Caractéristiques géométriques des échangeurs :

Il existe plusieurs types d'échangeurs de chaleur selon le procédé de transfert thermique, l'écoulement des fluides et surtout la conception technologique. Les quatre principales catégories utilisées dans les systèmes énergétiques sont les échangeurs tubulaires, à tube et calandre, à ailettes et les échangeurs à plaques.

La catégorie la plus importante, en raison de ses nombreuses applications industrielles est celle des échangeurs continus où les deux fluides circulent de manière continue de part et d'autre de la surface d'échange. Selon la géométrie de cette surface d'échange, on distingue les **échangeurs tubulaires** et les **échangeurs à plaques**.

2.2.1 Principaux types des échangeurs de chaleurs :

✓ Echangeurs tubulaires :

Les deux fluides circulent dans le même sens ou dans des sens opposés de part et d'autre de la paroi. La mise en œuvre technologique peut prendre la forme de dispositifs tubulaires dits à double-tube (Fig.4.1) : constitués de deux tubes alignés concentriquement avec un fluide circulant dans le tube intérieur et l'autre dans la section annulaire.

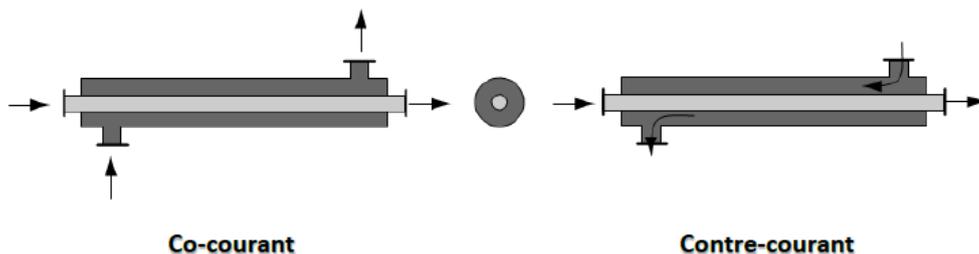


Figure.1 : Echangeur Bitube.

- des appareils à *calandre et faisceau* : un fluide passe à travers des tubes parallèles pour former un faisceau dans une calandre cylindrique, tandis que l'autre passe à l'extérieur des tubes, comme le montre la figure .2 :

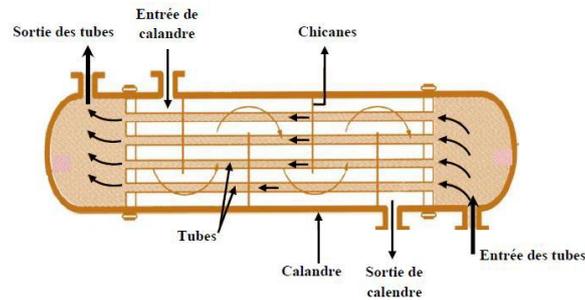


Figure .2 : Echangeur de chaleur tubulaire

✓ Echangeurs à plaques

En raison de leur développement favorisé par leurs performances thermiques appréciables, on les trouve aujourd'hui dans divers secteurs de l'industrie. Selon la conception de la surface des plaques on distingue les échangeurs à surface primaire (les plus communs) et les échangeurs à surface secondaire (on ajoute des ailettes plissées ou ondulées entre les plaques). Dans d'autres configurations, les plaques peuvent aussi être brasées ou soudées entre elles. (Fig.3).

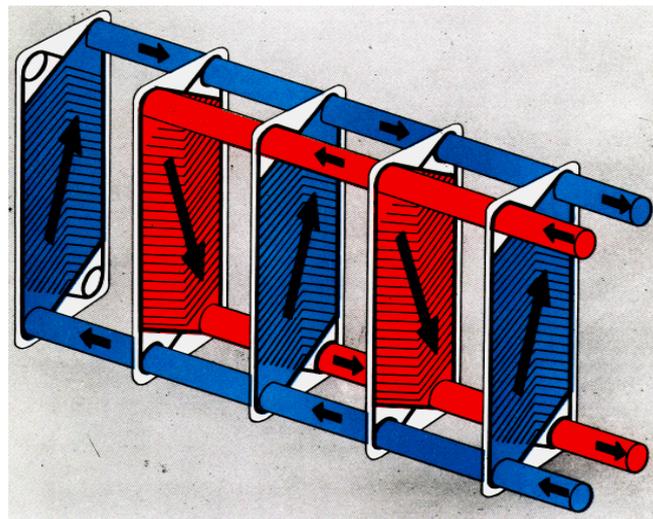


Figure .3 : Echangeur de chaleur à plaques.

2.3. Expression du flux échangé dans un échangeur tubulaire simple :

Un simple échangeur tubulaire est composé de deux tubes cylindriques coaxiaux. Un fluide (généralement chaud) circule à l'intérieur du tube, tandis que l'autre circule entre les deux tubes (espace annulaire). Le transfert de chaleur d'un fluide chaud vers un fluide froid s'effectue à travers la paroi qui constitue le tube intérieur :

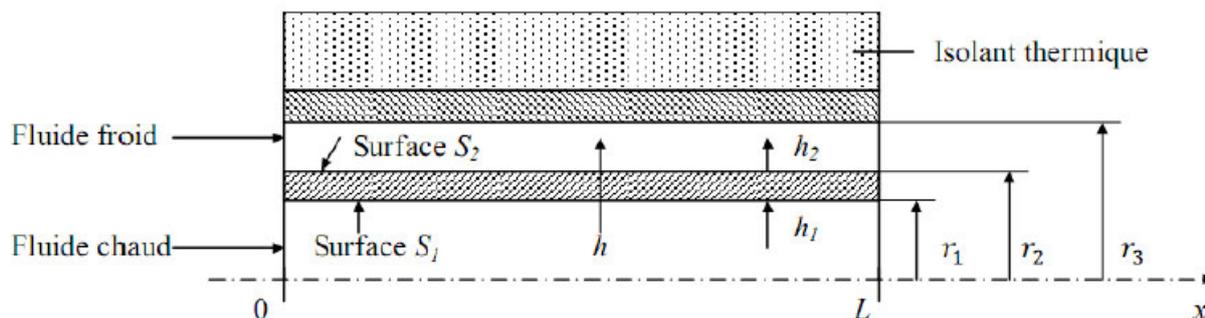


Figure .4 : Schéma d'un échangeur tubulaire simple

a) **Hypothèses :**

Dans le calcul simple des échangeurs de chaleur, les plus importantes hypothèses retenues sont :

- Pas de changement de phase au cours du transfert thermique.
- Pas de pertes thermiques : la surface de séparation est la seule surface d'échange.

b) **Conventions :**

Les températures d'entrée et de sortie des deux fluides chaud et froid sont définies conventionnellement comme suit :

- Fluide chaud : T_{ce} : Température d'entrée, T_{cs} : Température de sortie.
- Fluide froid : T_{fe} : Température d'entrée, T_{fs} : Température de sortie.

Deux modes de fonctionnement sont réalisables :

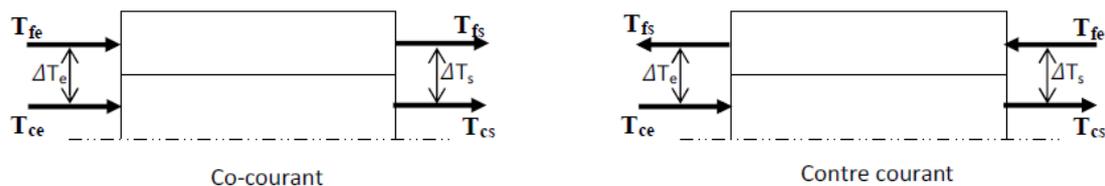


Figure .5 : Schématisation des fonctionnements à co-courant et à contre-courant.

2.3.1. Calcul de la puissance totale de l'échangeur :

Le flux de chaleur qui traverse un échangeur peut être calculé en écrivant qu'il est égal au flux de chaleur perdu par le fluide chaud et au flux de chaleur gagné par le fluide froid lors de son passage dans l'échangeur.

$$\Phi = \dot{m}_c \cdot cp_c \cdot (T_{ce} - T_{cs}) = \dot{m}_f \cdot cp_f \cdot (T_{fs} - T_{fe})$$

Avec : $q_{cc} = \dot{m}_c \cdot cp_c$ et $q_{cf} = \dot{m}_f \cdot cp_f$

q_{cc} et q_{cf} représentent les débits calorifiques des deux fluides.

Le flux de chaleur peut donc finalement s'écrire :

$$\Phi = q_{cc} \cdot (T_{ce} - T_{cs}) = q_{cf} \cdot (T_{fs} - T_{fe})$$

L'expression précédente peut alors se mettre sous la forme :

$$\Phi = U \cdot S_e \cdot \frac{\Delta T_s - \Delta T_e}{\ln\left(\frac{\Delta T_s}{\Delta T_e}\right)}$$

Avec ;

$$\begin{cases} \Delta T_s = T_{cs} - T_{fs} \\ \Delta T_e = T_{ce} - T_{fe} \end{cases} \text{ pour un fonctionnement co-courant}$$

$$\begin{cases} \Delta T_s = T_{ce} - T_{fs} \\ \Delta T_e = T_{cs} - T_{fe} \end{cases} \text{ pour un fonctionnement contre-courant}$$

S_e : surface d'échange (m^2)

Le coefficient global de transfert U d'un échangeur de chaleur s'écrit donc :

$$U = \left(\frac{r_2}{h_1 r_1} + \frac{r_2 \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{\lambda} + \frac{1}{h_2} + R_{en} \right)^{-1}$$

Avec ;

R_{en} : Résistance thermique d'encrassement (due à entartrage, dépôts, corrosion...).

Les valeurs du coefficient global de transfert U de divers types d'échangeurs sont représentés dans le tableau suivant :

Nature des fluides	Coefficient global de transfert U ($Wm^{-2}C^{-1}$)
Liquide-liquide	100-2000
Liquide-gas	30-300
Condenseur	500-5000

Tableau.1 : valeurs du coefficient global de transfert U.

On pose :

$$DTLM = \frac{\Delta T_s - \Delta T_e}{\ln\left(\frac{\Delta T_s}{\Delta T_e}\right)}$$

$DTLM$: La *Différence de Température Moyenne Logarithmique* représentant la moyenne logarithmique (ΔT) entre l'entrée et la sortie de l'échangeur ($^{\circ}C$).

Remarque :

- La figure ci-dessus montre la variation des températures des fluides le long de l'échangeur :

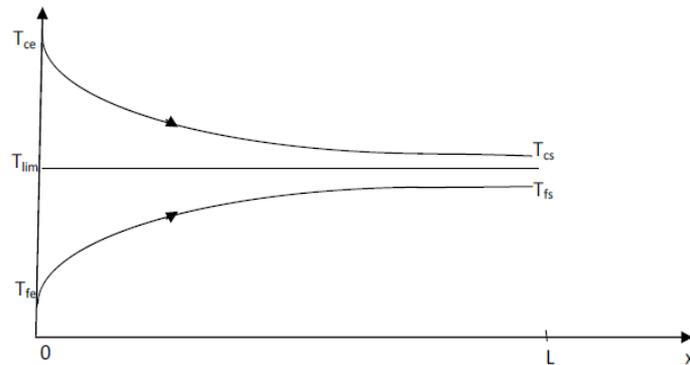


Figure.6 : Evolution des températures dans un échangeur tubulaire fonctionnement co-courant.

$$T_{lim} = \frac{q_{cc} \cdot T_{ce} + q_{cf} \cdot T_{fe}}{q_{cc} + q_{cf}}$$

- La distribution des températures dans un échangeur à contre-courant présente l'une des allures suivantes :

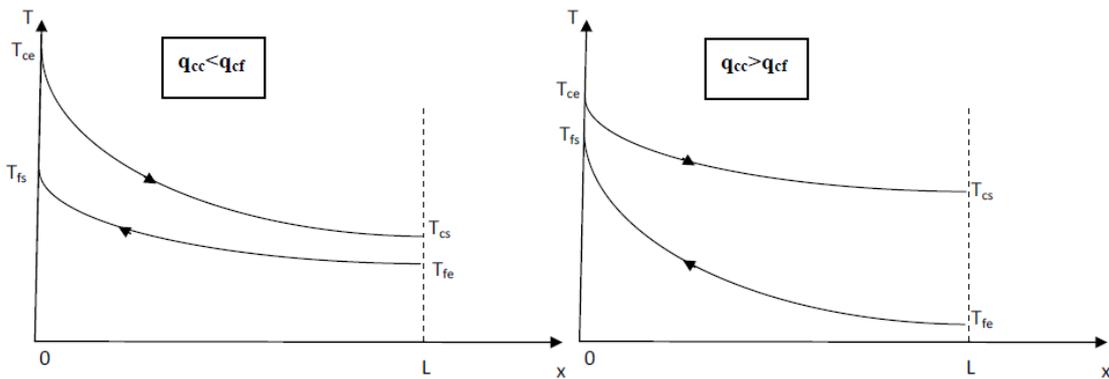


Figure .7 : Evolution des températures dans un échangeur tubulaire fonctionnant à contre-courant.

La distribution des températures dans un échangeur à contre-courant présente l'une des allures suivantes :

$q_{cc} < q_{cf}$: Le fluide chaud commande le transfert.

$q_{cc} > q_{cf}$: Le fluide froid commande le transfert.

Remarque :

- ✓ On peut obtenir $T_{fs} > T_{cs}$ dans un échangeur de chaleur fonctionnant à contre-courant.

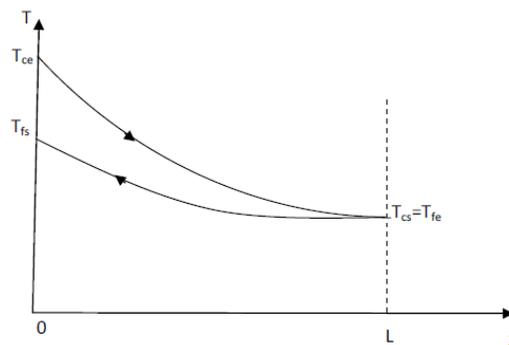
✓ Il est par contre impossible d'obtenir $T_{fs} > T_{ce}$ ou $T_{ce} > T_{fs}$.

2.4. Efficacité d'un échangeur :

L'efficacité thermique d'un échangeur, également appelé rendement thermique, est le rapport du flux de chaleur émise à le flux de chaleur maximale émise.

$$\eta = \frac{\Phi}{\Phi_{\max}}$$

❖ Cas où $q_{cc} < q_{cf}$, le fluide chaud commande le transfert : Si $T_{cs} = T_{fe}$, Ce cas correspond à un échangeur refroidissant parfaitement le fluide chaud.

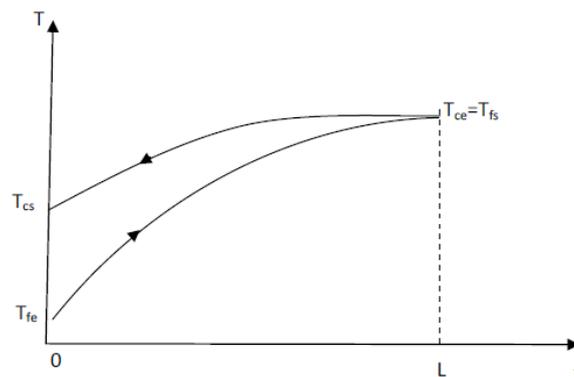


D'où : $\Phi_{\max} = q_{cc} (T_{ce} - T_{fe})$ et $\Phi = q_{cc} (T_{ce} - T_{cs})$

On définit alors une efficacité de refroidissement :

$$\eta_r = \frac{T_{ce} - T_{cs}}{T_{ce} - T_{fe}}$$

❖ Cas où $q_{cc} > q_{cf}$, le fluide chaud commande le transfert : Si $T_{ce} = T_{fs}$, Ce cas correspond à un échangeur refroidissant parfaitement le fluide froid.



Le débit de chaleur échangé est:

$$\Phi = q_{cf} (T_{fs} - T_{fe})$$

Le débit maximal de chaleur échangeable est dans ce cas : $\Phi_{\max} = q_{cf} (T_{ce} - T_{fe})$ puisque $T_{ce} = T_{fs}$

$$\eta = \frac{q_{cf} (T_{fs} - T_{fe})}{q_{cf} (T_{ce} - T_{fe})} = \frac{T_{fs} - T_{fe}}{T_{ce} - T_{fe}} = \eta_c$$

η_c : efficacité de chauffage

3.5 Méthode du nombre d'unités de transfert (NUT) :

On appelle nombre d'unité de transfert noté NUT le rapport adimensionnel $U \cdot S / q_c$ qui est aussi

égal à $\frac{T_{ce} - T_{fe}}{DTLM}$

Pour le fluide chaud dans le cas d'un échangeur tubulaire simple :

$$NUT_c = \frac{US}{q_{cc}} = \frac{T_{ce} - T_{cs}}{DTLM}$$

NUT_c : nombre d'unité de transfert coté chaud.

De même :

$$NUT_f = \frac{US}{q_{cf}} = \frac{T_{fs} - T_{fe}}{DTLM}$$

NUT_f : nombre d'unité de transfert coté froid.

Remarque : NUT représente le pouvoir d'échange de l'échangeur.

$$NUT = \frac{US}{(q_c)_{\min}} = \frac{US}{(\dot{m} \cdot cp)_{\min}}$$

Si $\dot{m}_c \cdot cp_c \succ \dot{m}_f \cdot cp_f$ alors $(\dot{m} \cdot cp)_{\min} = \dot{m}_f \cdot cp_f$

Si $\dot{m}_c \cdot cp_c \prec \dot{m}_f \cdot cp_f$ alors $(\dot{m} \cdot cp)_{\min} = \dot{m}_c \cdot cp_c$

3.6 Calcul d'un échangeur :

Echangeur à faisceaux complexes :

a. Echangeur 1-2 :

Il s'agit de l'échangeur à faisceau le plus simple : le fluide dans l'enveloppe circule en un seul passage, tandis que le fluide dans le tube circule en deux (ou 2H) passages.

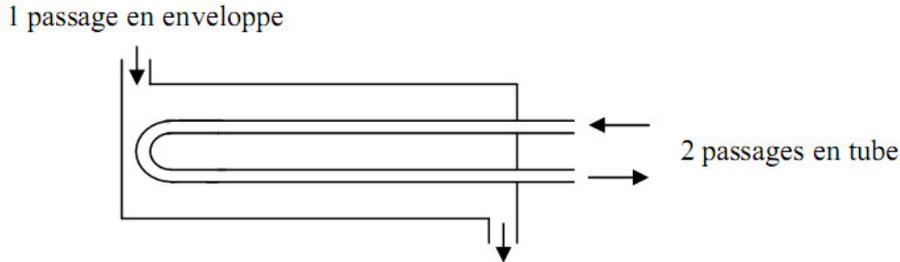


Figure .8 : Echangeur à faisceau de type 1-2

Comme pour l'échangeur tubulaire simple, il existe une relation reliant le nombre d'unités de transfert maximal NUT_{\max} et l'efficacité η de l'échangeur :

$$NUT_{\max} = -(1+z^2)^{-1/2} \ln \left[\frac{\frac{2}{\eta} - 1 - z - (1+z^2)^{1/2}}{\frac{2}{\eta} - 1 - z + (1+z^2)^{1/2}} \right]$$

$$\eta_{1-2} = 2 \left\{ 1 + z + (1+z^2)^{1/2} \frac{1 + \exp \left[-NUT_{\max} (1+z^2)^{1/2} \right]}{1 - \exp \left[-NUT_{\max} (1+z^2)^{1/2} \right]} \right\}$$

b. Echangeur à courants croisés :

Les deux fluides s'écoulent perpendiculairement l'un à l'autre. Si un fluide s'écoule dans une veine divisée en plusieurs canaux parallèles de faible section, il est dit non brassé ; s'il s'écoule dans une veine divisée en plusieurs canaux parallèles de section élevée, il est dit brassé. Le brassage a pour effet d'homogénéiser les températures dans la section droite de la veine.

L'application la plus courante des échangeurs à courant croisé est l'échange d'un gaz dans la calandre avec un liquide dans les tubes.

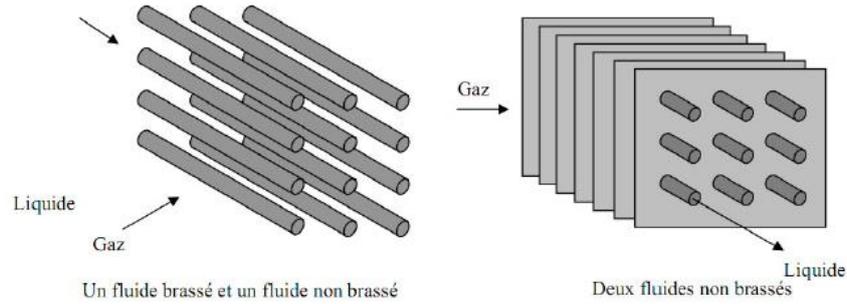


Figure .9 : Echangeur à courants croisés.

Deux fluides non brassés :

$$\eta = 1 - \exp \left[\frac{\exp(-z \cdot NUT_{\max}^{0.78}) - 1}{z \cdot NUT_{\max}^{-0.22}} \right]$$

Deux fluides brassés :

$$\eta = \left[\frac{1}{1 - \exp(-NUT_{\max})} + \frac{z}{1 - \exp(-NUT_{\max})} - \frac{1}{NUT_{\max}} \right]^{-1}$$

Un fluide non brassé :

Fluide commandant le transfert ($q_{c\min}$) non brassé :

$$NUT_{\max} = -\ln \left[1 + \frac{1}{z} \ln(1 - z\eta) \right]$$

$$\eta = \frac{1}{z} \left\{ 1 - \exp \left[-z \left(1 - \exp(-NUT_{\max}) \right) \right] \right\}$$

Fluide commandant le transfert ($q_{c\min}$) brassé :

$$NUT_{\max} = -\frac{1}{z} \ln \left[1 + z \ln(1 - z\eta) \right]$$

$$\eta = 1 - \exp \left[-\frac{1}{z} \left(1 - \exp(-z \cdot NUT_{\max}) \right) \right]$$

3. Conclusion

Le flux thermique total transféré dépend directement de la surface de transfert. C'est pourquoi on utilise différentes géométries de parois visant à augmenter la surface de transfert.

Le transfert de chaleur se fait en trois étapes: le transfert de chaleur convectif du fluide chaud en direction de la paroi, la conduction thermique à travers la paroi, et le transfert de chaleur convectif de la paroi vers le fluide froid. Le transfert de chaleur convectif du fluide vers la paroi et de la paroi vers le fluide dépend entre autres du type de matière, de la vitesse d'écoulement et des états physiques des fluides. La conduction thermique dans la paroi dépend de son épaisseur et du matériau qui la constitue. La conduction thermique est décrite par le coefficient global de transfert de chaleur k ou le coefficient global de transfert de chaleur en fonction de la longueur.

Dans la pratique, les échangeurs de chaleur sont dimensionnés, recalculés ou évalués. Le dimensionnement consiste à calculer la capacité de transfert avec des flux de matière et des températures connus, ce qui permet de déterminer la géométrie d'un échangeur de chaleur optimal.

Le recalcul d'échangeurs de chaleur existants est également fréquent pour réaliser une comparaison avec les données de mesure réelles. L'évaluation permet de se renseigner sur le surdimensionnement ou le sous-dimensionnement de l'échangeur de chaleur choisi en cas d'intégration dans le procédé. Lors de l'évaluation d'un échangeur de chaleur, on observe ses données géométriques ainsi que toutes les données de procédé.

Références

- [1] P. DeWitt. Introduction to Heat Transfer. 4th ed. New York: John Wiley& Sons, 2002.
- [2] Incropera F.P., De Witt D.P., Fundamentals of heat and mass transfer, Wiley & Sons, 1990.
- [3] Parker J. D., MC Quiston F. C., Heating, Ventilating, and air conditioning - analysis and design, Ed. Wiley & Sons, 1994.
- [4] A. Bontemps, A. Garrigue, C. Goubier, J. Huetz, C. Marvillet, P. Mercier et R. Vidil. Echangeurs de chaleur. Définitions et architecture générale. Techniques del'ingénieur, traité Génie énergétique. B2340
- [5] J. P. Holman. Heat Transfer. 9th ed. New York: McGraw-Hill, 2002.
- [6] A. Bontemps, A. Garrigue, C. Goubier, J. Huetz, C. Marvillet, P. Mercier et R. Vidil. Echangeurs de chaleur. Problèmes de fonctionnement. Techniques de l'ingénieur, traité Génie énergétique. 2344.
- [7] B. Lagourette. Cours de transferts de chaleur, Etude des échangeurs. UPPA.
- [8] J. P. Holman. Heat Transfer. 9th ed. New York: McGraw-Hill, 2002
- [9] . P. Incropera and D. P. DeWitt. Introduction to Heat Transfer. 4th ed. NewYork: John Wiley& Sons, 2002.
- [10] Padet J., Echangeurs thermiques, Masson, 1993. (BIB'INSA)
- [11] Documentations techniques fabricants (Mueller, Superchanger, Alfa-Laval).
- [12] Alfa-Laval, Les cahiers Alfa-Laval, Spécial Thermique, N°17, 1987.
- [13] Kays W.M., London A.L., Compact heat exchangers, 3rd Ed., Mc Graw-Hill, New York, 1984.