

Chapitre 1 : Classification des échangeurs de chaleur.

Dans les sociétés industrielles, l'échangeur de chaleur est un élément essentiel de toute politique de maîtrise de l'énergie. Une grande part (90 %) de l'énergie thermique utilisée dans les procédés industriels transite au moins une fois par un échangeur de chaleur, aussi bien dans les procédés eux-mêmes que dans les systèmes de récupération de l'énergie thermique de ces procédés.

On les utilise principalement dans les secteurs de l'industrie (chimie, pétrochimie, sidérurgie, agroalimentaire, production d'énergie, etc.), du transport (automobile, aéronautique), mais aussi dans le secteur résidentiel et tertiaire (chauffage, climatisation, etc.). Le choix d'un échangeur de chaleur, pour une application donnée, dépend de nombreux paramètres : domaine de température et de pression des fluides, propriétés physiques et agressivité de ces fluides, maintenance et encombrement. Il est évident que le fait de disposer d'un échangeur bien adapté, bien dimensionné, bien réalisé et bien utilisé permet un gain de rendement et d'énergie des procédés.

Ils constituent donc un des dispositifs clé du thermicien, et sont un composant quasi inévitable dans la maîtrise de l'énergie. Compte-tenu de leurs multiples utilisations, les difficultés rencontrées par les utilisateurs d'échangeurs de chaleur sont diverses et variées.

1. Définition d'un échangeur de chaleur

Un échangeur de chaleur est un dispositif utilisé pour le transfert d'énergie (enthalpie) entre deux fluides ou plus, entre une surface solide et un fluide ou entre des particules solides et un fluide à des températures différentes et en contact thermique. Dans les échangeurs de chaleur, il n'y a pas de chaleur externe ou travail d'interactions.

Dans quelques échangeurs de chaleur, les fluides échangeant de la chaleur sont en contact direct et dans la plupart des échangeurs de chaleur, le transfert de chaleur entre les fluides se produit à travers une paroi (surface) de séparation.

Remarque ;

Les fluides peuvent conserver leur état physique (liquide ou gazeux) ou se présenter successivement sous les deux phases : c'est le cas des condenseurs, évaporateurs, bouilleurs, ou des tours de refroidissement.

Si aucun changement de phase ne se produit dans les fluides de l'échangeur, il est quelque fois référé à un échangeur de chaleur sensible.

Le transfert de chaleur dans les murs de séparation se produit généralement par conduction. Cependant, dans le tube chaud dans l'échangeur de chaleur, le tube chaud ne joue pas le rôle de mur de séparation, mais aussi facilite le transfert de chaleur par condensation, évaporation et conduction du fluide dans le tube chaud.

En générale, si les fluides sont non miscibles, le mur de séparation peut être éliminé et l'interface entre les fluides remplace la surface de transfert de chaleur comme dans l'échangeur de chaleur à contact direct.

La surface de l'échangeur de chaleur est une surface de l'échangeur central qui est en contact direct avec les fluides et à travers laquelle la chaleur se transmet par conduction. Cette surface est appelée primaire ou surface direct.

Pour augmenter le transfert de chaleur des surfaces annexes doivent être intimement connectées à la surface primaire ou direct. Ces éléments de surface étendue sont appelés ailettes. Ainsi la chaleur est transférée par conduction à travers l'ailette et elle est ensuite transférée par rayonnement ou par convection à partir de l'ailette (au fluide voisin) ou l'inverse ça dépend de l'ailette est chaude ou froide.

Comme résultat l'ajout des ailettes à la surface primaire réduit la résistance thermique et ainsi on augmente le transfert de chaleur à partir de la surface avec la même différence de température.

2. Classification des échangeurs de chaleur :

De nombreuses applications nécessitent l'utilisation d'un échangeur, ils peuvent être utilisés dans l'industrie pétrolière, transportation, conditionnement d'air, réfrigération, cryogénie, etc. On peut classer les échangeurs de chaleur de plusieurs manières (comme le montre la figure 1.1) suivante :

- • Procédé de transfert ;
- Type de construction ;•
- • Degré de compacité de surface ;
- • Arrangement des écoulements ;
- • Nombre de fluide;
- • Phase du fluide de procédé ;
- • Mécanisme de transfert de chaleur.

2.1. Classification selon leurs procédés de transfert thermique

Selon leurs procédés de transfert, les échangeurs de chaleur sont classés en deux types: à contact direct et à contact indirect.

2.1.1 Échangeurs à contact direct :

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

Exemples :

- les réchauffeurs d'eau (injection de vapeur d'eau sous pression).
- les dé réchauffeurs industriels et les condenseurs à injection (centrale thermique).

2.1.2 Échangeurs à contact indirect :

En principe, pour les échangeurs les plus répandus dans l'industrie, les deux fluides, désignés par 1 et 2, s'écoulent dans des espaces séparés par une paroi ou cloison, à faible inertie thermique. La chaleur que le fluide 1 cède à la paroi, par convection le long de la surface de

contact, traverse l'épaisseur de la paroi par conduction et est cédé au fluide 2 par convection le long de l'autre face.

Les processus de transfert présentent une réciprocity: convection (1) conduction (paroi), convection (2). le flux de chaleur échangé s'exprime par le produit d'une conductance globale constante le long de l'échangeur, et de la différence entre les températures moyennes T_1 et T_2 des fluides.

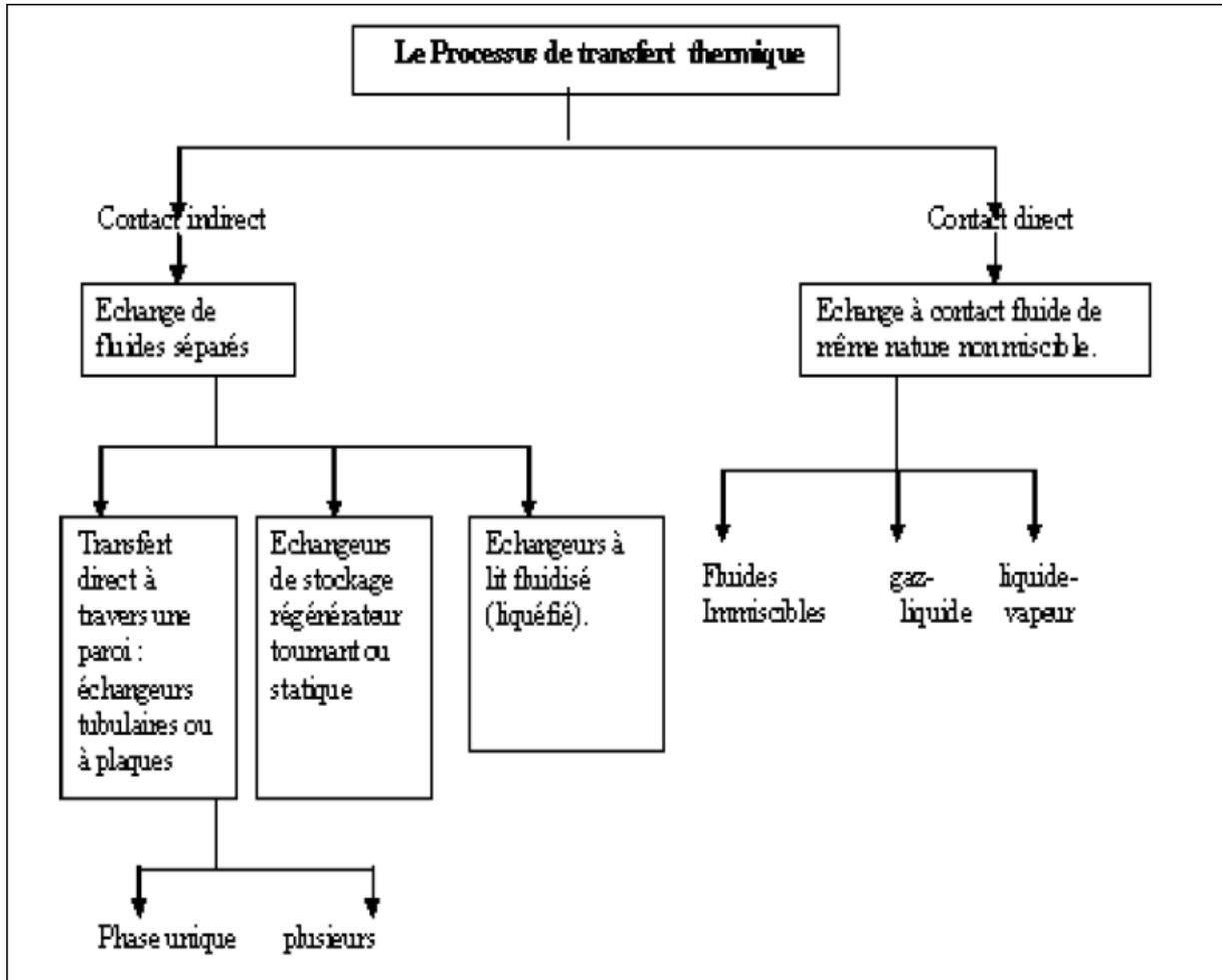


Figure 1.2 : Classification des échangeurs de chaleur selon le processus du transfert thermique.

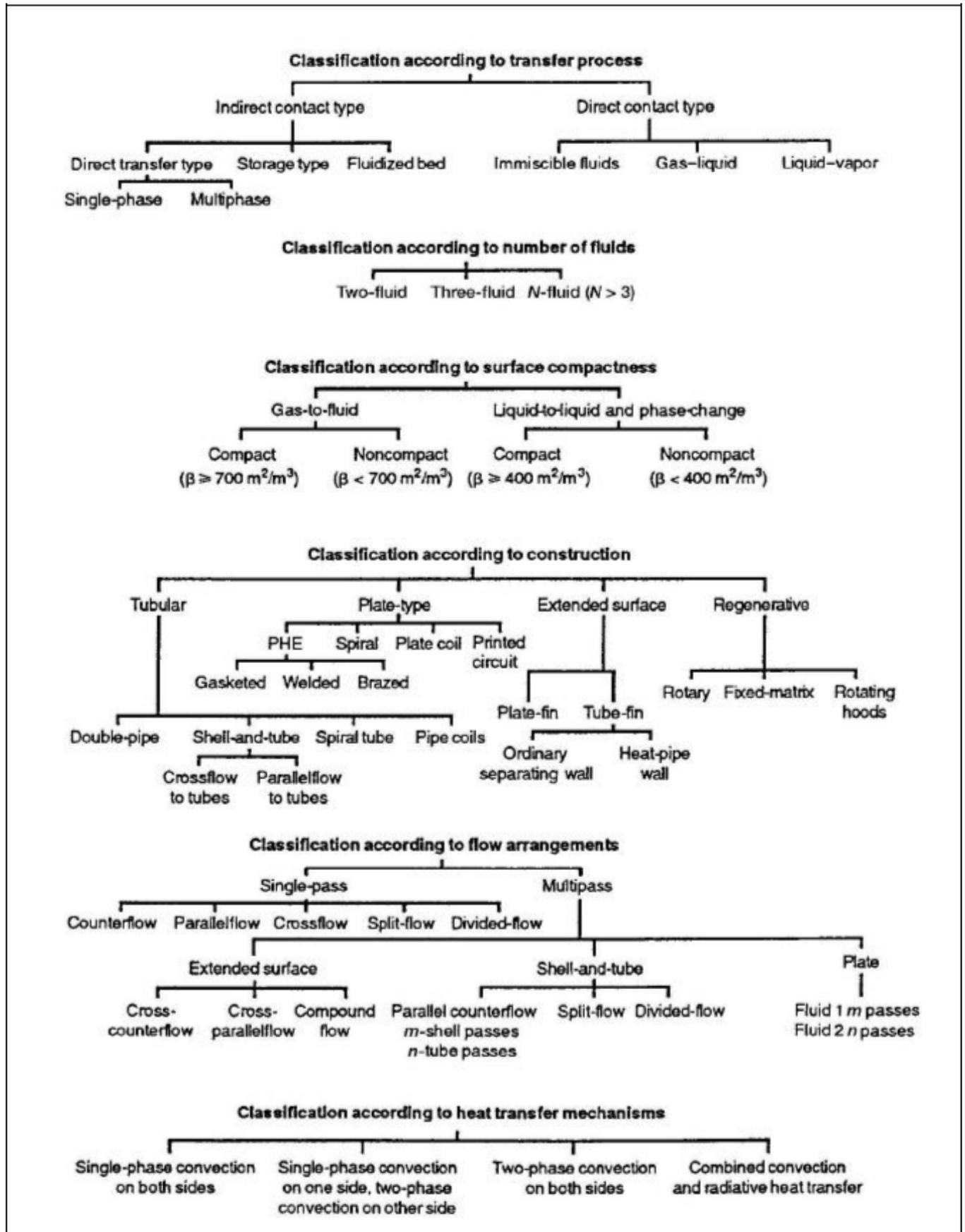


Figure 1.1 : Classification des échangeurs de chaleur.

2.2. Classification selon le nombre de fluides utilisés

La plupart des processus de chauffage, de refroidissement, récupération de la chaleur et rejection de la chaleur implique le transfert de chaleur entre deux fluides, en conséquence les échanges de chaleur à deux fluides sont les plus connus.

La classification des échangeurs de chaleur suivant le nombre de fluide est illustrée sur la figure 1.3.

Les échangeurs de chaleur à trois fluides sont généralement utilisés dans la cryogénie et dans quelques processus chimiques (système de séparation de l'air, liquéfaction et la purification de l'hydrogène, synthèse du gaz d'ammoniac).

Des échangeurs de chaleur avec plusieurs fluides comme 12 courants fluides ont été utilisés dans quelque application des processus chimiques.

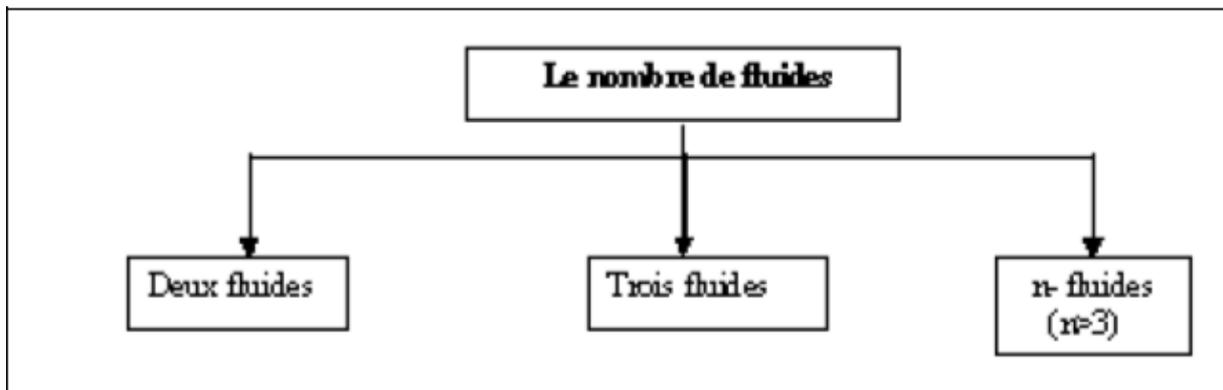


Figure 1.3 : Classification des échangeurs de chaleur suivant le nombre de fluides utilisés.

2.3. Classification selon le mode de transfert de chaleur :

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

La classification des échangeurs de chaleur suivant le mode de transfert de chaleur est illustrée sur la figure 1.4.

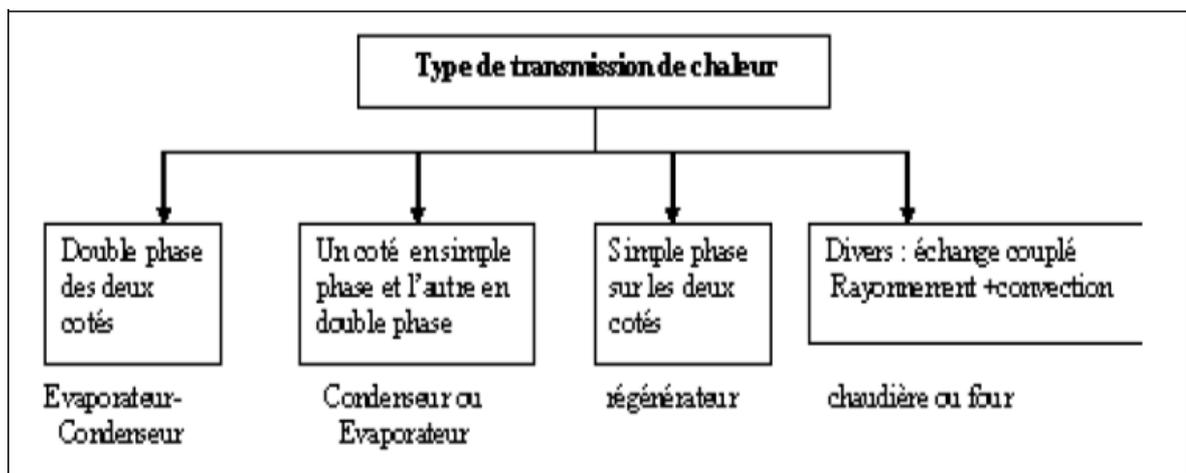


Figure 1.4 : Classification des échangeurs de chaleur suivant le mode de transfert de chaleur.

2.4. Classification selon le Classement technologique

Les principaux types d'échangeurs rencontrés sont les suivants :

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

2.5. Classification selon la nature du matériau de la paroi d'échange

On retiendra deux types de paroi :

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

2.6. Classification selon le sens d'écoulement :

Suivant cette distribution les échangeurs peuvent être classés en deux classes ; les échangeurs à simple passe et les échangeurs à multi passes comme le montre la figure 1.5.

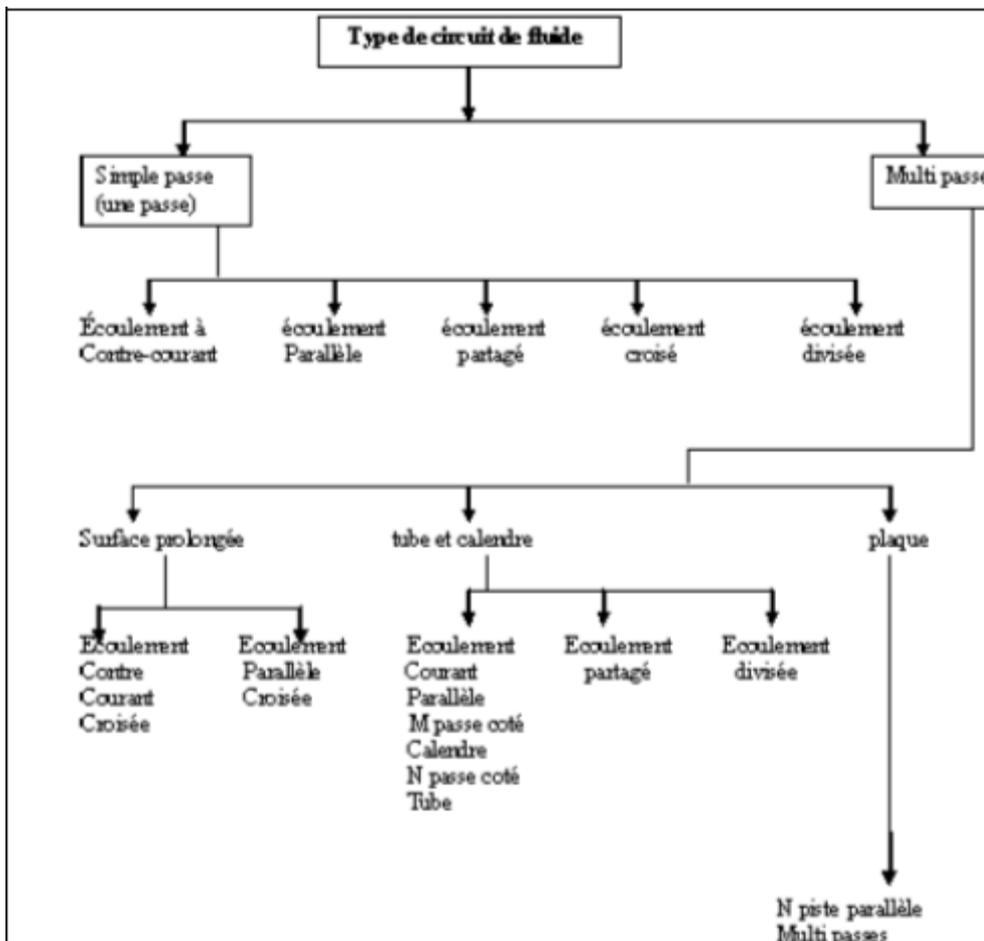


Figure 1.5: classification des échangeurs de chaleur suivant le sens d'écoulement.

2.6.1 Les échangeurs de chaleur à simple passe :

On peut distinguer plusieurs modes d'écoulement différents.

➤ **Écoulement des deux fluides parallèles et de même sens (ou à co-courant):**

Il s'agit d'échangeurs dits à co-courants où la température de fluide froid ne peut pas être supérieure à la température de sortie du fluide chaud. Les températures des fluides évoluent pendant leur traversée longitudinale de l'échangeur, à moins que l'un des fluides ne subisse un changement de phase, auquel cas sa température reste constante.

La Figure I.6 donne l'évolution qualitative de ces températures le long d'un échangeur tubulaire à co-courants très simple. La longueur de l'échangeur a été portée en abscisse et les températures sont repérées à l'aide d'indices e signifiant *entrée* et s *sortie*, 1 désignant le fluide *chaud* et 2 le fluide *froid*.

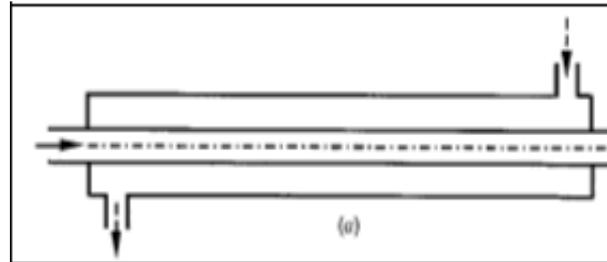


Figure I.6 : Echangeur de chaleur à double tube à co-courant.

La distribution de température dans ce type d'échangeur est illustrée sur la figure 1.7.

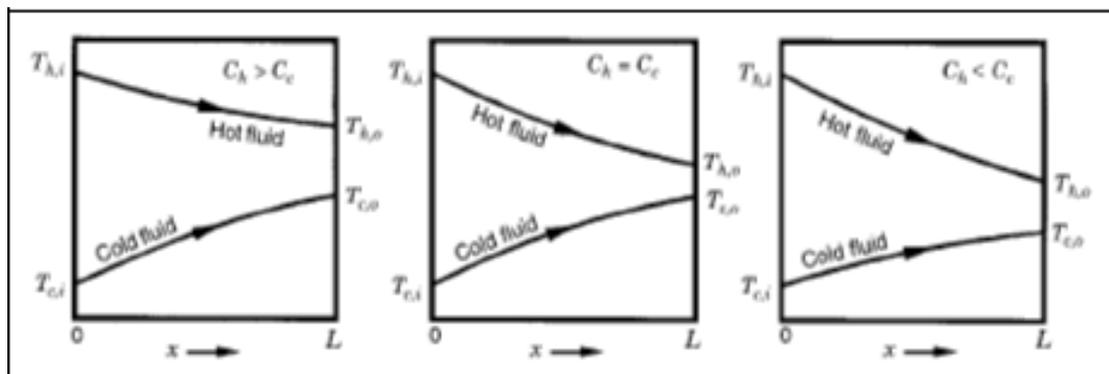


Figure 1.7: Evolution qualitative des températures dans un échangeur tubulaire co-courants.

➤ **Écoulement des deux fluides parallèles et de sens contraire (ou à contre courant):**

Il s'agit d'échangeurs à contre-courants où la température de sortie du fluide froid peut dépasser la température de sortie du fluide chaud. Cette disposition est l'une des plus favorables pour l'échange thermique. De la même façon que précédemment, la longueur de l'échangeur considéré a été portée en abscisse (Figure I.8). Les températures sont repérées à l'aide d'indices e signifiant *entrée* et s *sortie*

L'arrangement à contre courant est le plus efficace dans les arrangements des écoulements, il produit le plus grand changement de température pour chaque fluide comparé avec un autre arrangement à deux fluides.

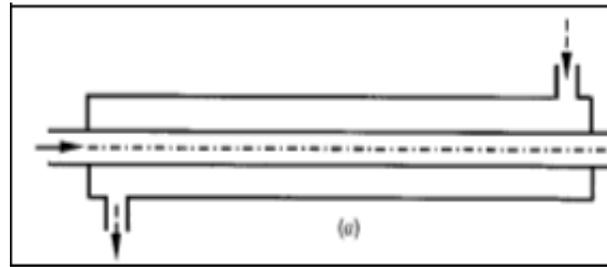


Figure 1.8 : Echangeur de chaleur à double tube à co-courant.

La distribution de température dans ce type d'échangeur est illustrée sur la figure 1.9.

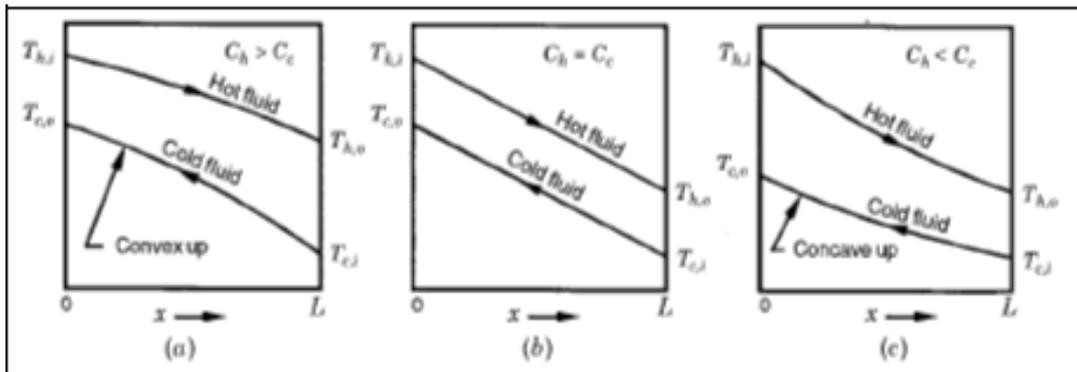


Figure 1.9: Evolution qualitative des températures dans un échangeur tubulaire contre-courants.



Écoulement des deux fluides croisés avec ou sans brassage:

Les deux fluides s'écoulent perpendiculairement l'un à l'autre (Figure I.10). Le fluide non brassé est canalisé : c'est celui dont la veine est divisée entre plusieurs canaux parallèles distincts et de faible section. L'autre fluide circule librement entre les veines et peut être considéré comme partiellement brassé du fait des tourbillons générés par les tubes. Le brassage a pour effet d'homogénéiser les températures dans les sections droites de la veine fluide. Sans cela, les températures varient non seulement avec la direction de l'écoulement, mais aussi dans la section de veine. Une représentation schématique d'échangeurs à courants croisés est donnée Figure I.10.

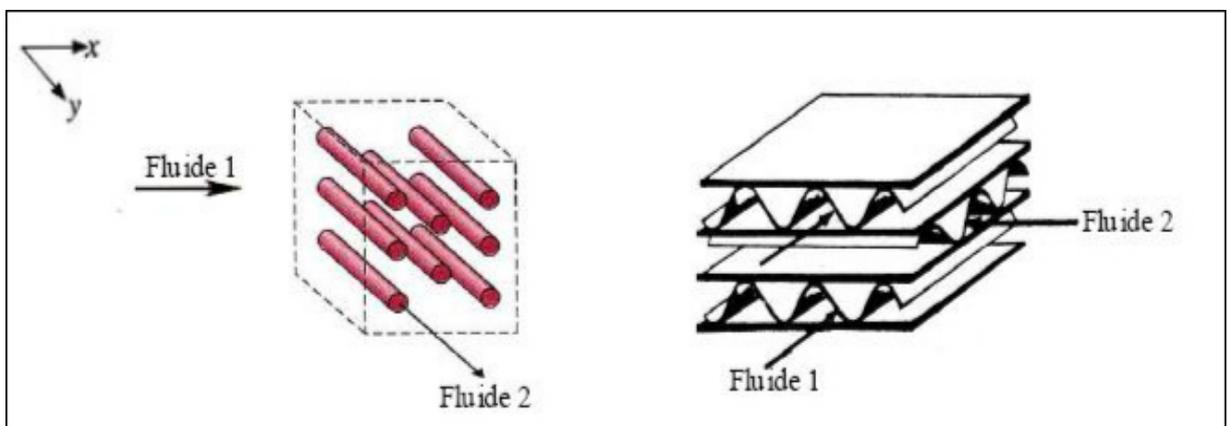


Figure 1.10: Exemples d'échangeurs à courants croisés

Les trois écoulements précédemment décrits, à co-courants, à contre-courants, à courants croisés sont rarement utilisés dans toute leur simplicité. En effet, un échangeur se réduit rarement à un tube unique ou deux plaques ; néanmoins, l'étude de ces cas élémentaires, dans le cadre d'une première approche, est nécessaire : l'échangeur industriel étant en général constitué par un grand nombre de tubes ou de plaques créant ainsi des problèmes supplémentaires.

Par ailleurs, la conception des échangeurs de chaleur introduit le choix entre deux géométries élémentaires principales :

- les tubes qui fixent l'espace dévolu seulement à l'un des deux fluides.
- les plaques, planes ou corruguées, choisies pour un fluide qui imposent la même géométrie pour l'autre.

Souvent, le choix des combinaisons entre différents types d'échangeurs dans les installations industrielles résulte de contingences technologiques et économiques.



Les échangeurs de chaleur à écoulement partagé TEMA G shell:

Dans ce type d'échangeur de chaleur illustré sur la figure 1.11, l'écoulement se divise en deux.

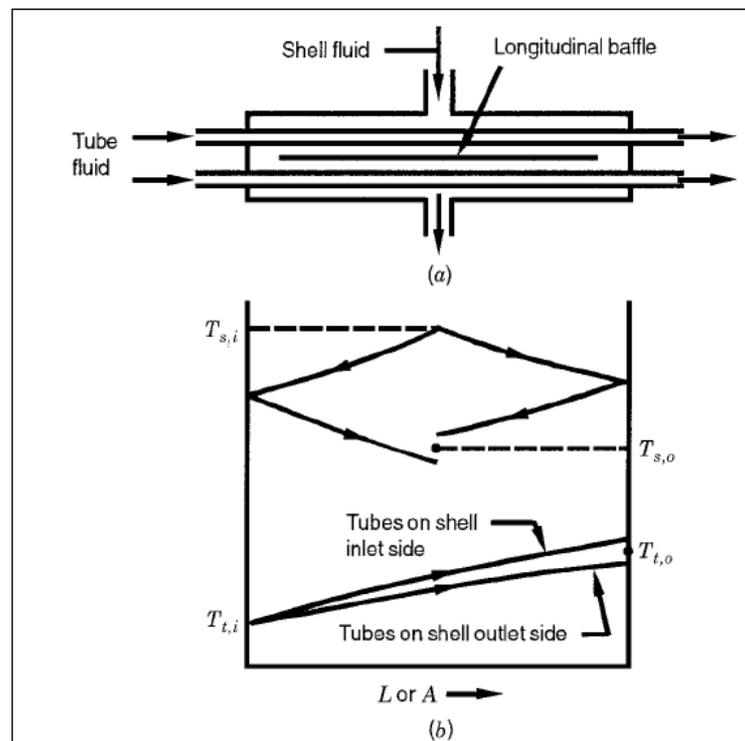


Figure 1.11 : L'échangeur de chaleur TEMA G shell(a) la distribution de température(b)



Les échangeurs de chaleur à écoulement divisé TEMA J shell:

Dans ce type d'échangeur de chaleur le fluide entre au centre de l'échangeur et se divise en deux et s'écoule longitudinalement le long de l'échangeur et quitte l'échangeur suivant deux ouvertures sur chaque côté. La distribution de température est donnée sur la figure 8.

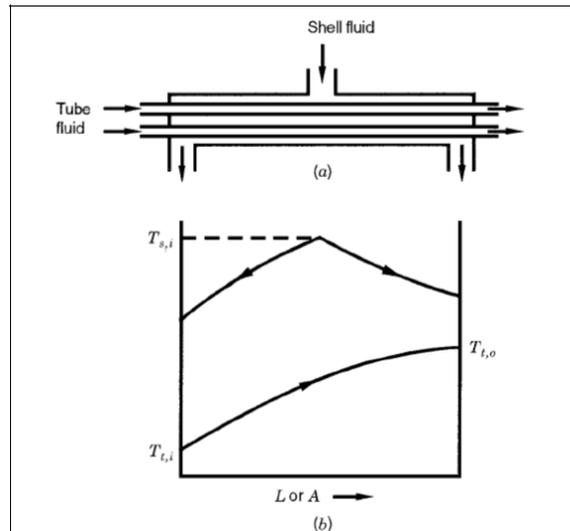


Figure 8 : L'échangeur de chaleur TEMA G shell (a) la distribution de température(b).

2.6.2. Les échangeurs de chaleur à multi passage :

Les échangeurs de chaleur de ces cinq arrangements d'écoulement basique de la section précédente peuvent être mise en série pour produire une unité multi passe. L'un des majeurs avantages du multiple passe est l'augmentation de l'efficacité de l'échangeur, mais avec l'augmentation de la pression du coté multi passe. Si la direction totale des deux fluides est choisie à contre courant l'échangeur approche celle de l'échangeur à contre courant. A titre d'exemple :

1. Les échangeurs de chaleur à courant croisé multi passage ; dans ce cas on peut retrouvé les exemples illustrés sut la figure 9.

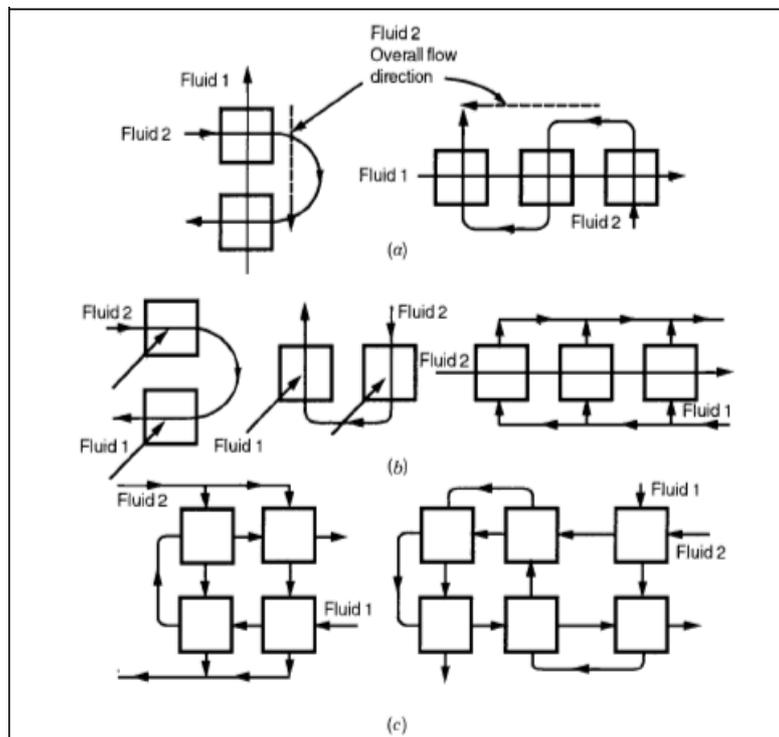


Figure 9 : L'échangeur de chaleur à courant croisé multi passage.

2. Les échangeurs tubes et calandre multi passage ; dans ce cas on peut retrouver :

- L'échangeur de chaleur parallèle contre courant TEMA E calandre représenté sur la figure 10.

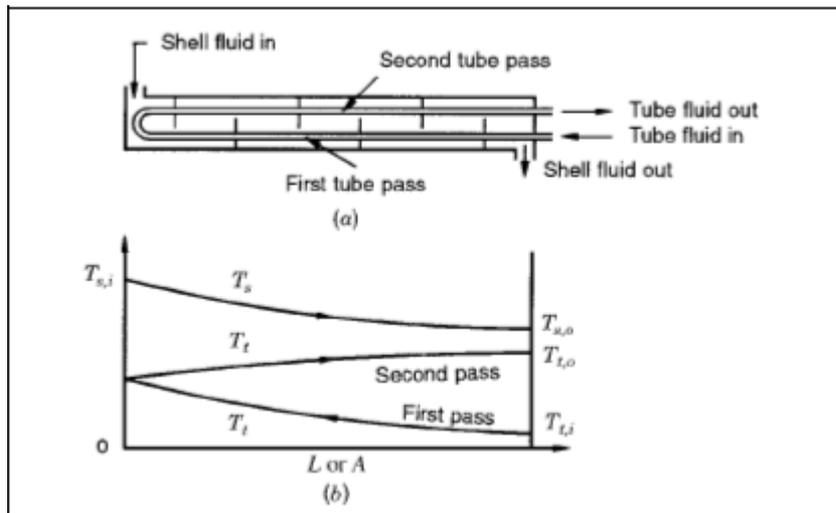


Figure 10 : (a) L'échangeur de chaleur TEMA E 1-2(1 une seule passage dans la calandre et 2 deux passages dans les tubes), (b) distribution des températures.

- Les échangeurs de chaleur 2-4 et 3-6 illustré sur la figure 11.

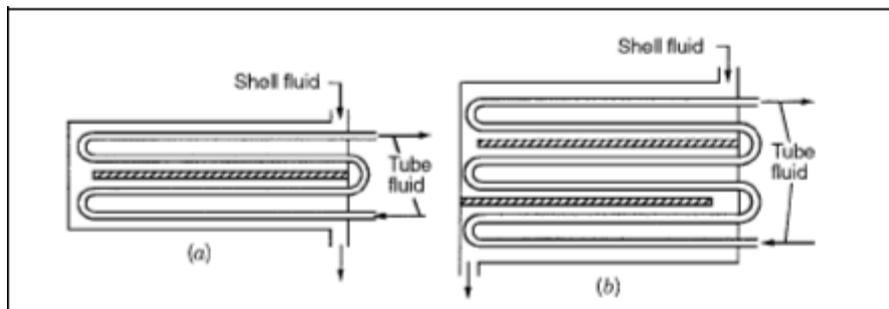


Figure 11 : (a) L'échangeur de chaleur 2-4(2 passages dans la calandre et 4 passages dans les tubes), (b) 3-6(3 passages dans la calandre et 6 passes dans les tubes).

- L'échangeur de chaleur partagé TEMA G calandre représenté sur la figure 12.
- L'échangeur de chaleur divisé TEMA J calandre représenté sur la figure 13

3. Les échangeurs de chaleur à plaques multi passage ; dans ce type d'échangeur, on peut retrouver les types illustrés sur la figure 14.

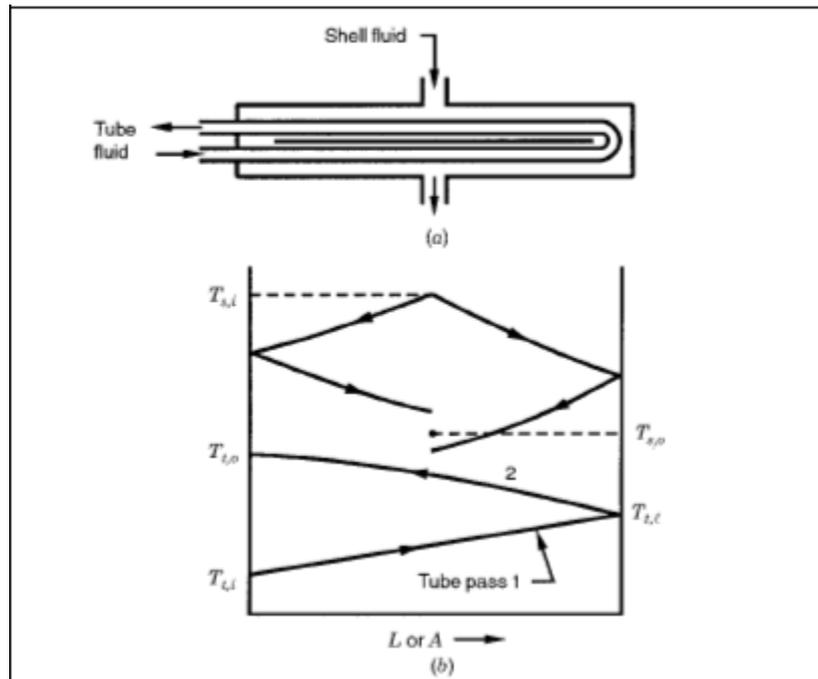


Figure 12 : (a) L'échangeur de chaleur TEMA G 1-2 partagé, (b) distribution des températures.

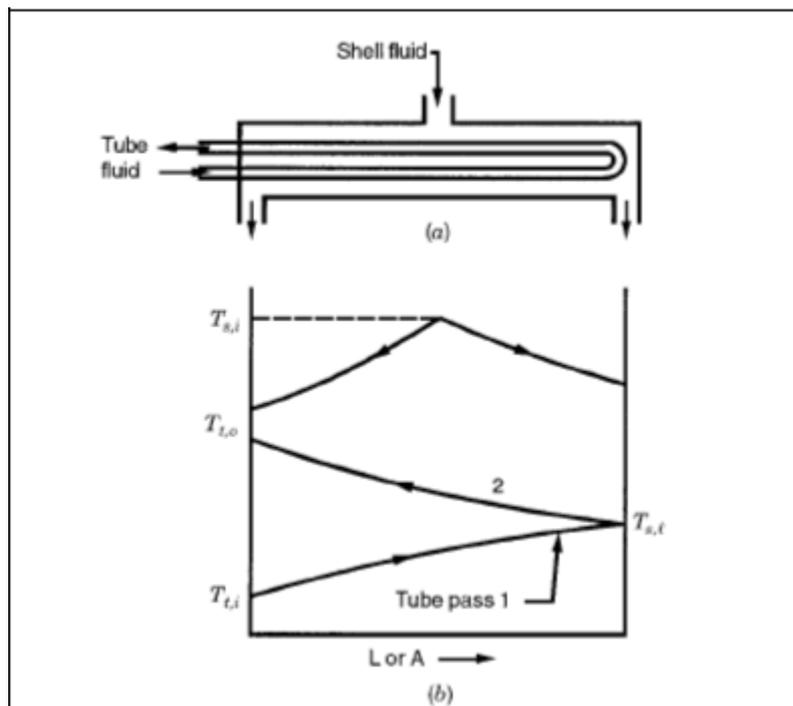


Figure 13 : (a) L'échangeur de chaleur TEMA J 1-2 partagé, (b) distribution des températures.

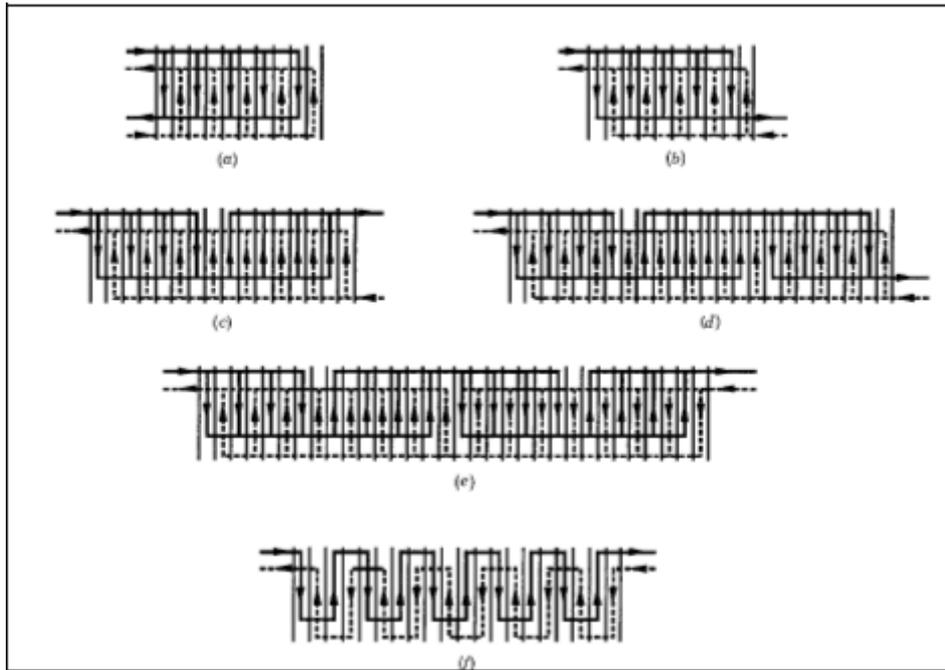


Figure 14 : L'échangeur de chaleur à plaques à un seul passage et multi passages. (a) arrangement en U, (b) arrangement en Z, (c) arrangement. Multi passages (c) 2 passages- 1 passage, (d) 3 passages- 1 passage, (e) 4 passages- 2 passages, (f) écoulement en serie.

2.7. Classification selon la compacité de la surface :

Comparé avec les échangeurs de chaleur de types schell and tube, les échangeurs de chaleur compact sont caractérisés par une large surface de transfert de chaleur par unité de volume de l'échangeur, résultant une réduction dans l'espace, dans le poids, énergie exigée et coût.

Un échangeur de chaleur gaz-fluide est référé comme échangeur de chaleur compact si il incorpore une surface de transfert de chaleur avec une densité supérieure à $700 \text{ m}^2/\text{m}^3$ ou un diamètre hydraulique $D_h < 6 \text{ mm}$ dans un courant gazeux et $400 \text{ m}^2/\text{m}^3$ ou plus dans un liquide ou un courant avec changement de phase comme le montre la figure 1.1.

Un spectre de densité de surface d'échangeur de chaleur est représenté sur la Fig. 15 sur la partie inférieure de la figure, deux échelles sont présentés: la densité de la surface de transfert $\beta \text{ (m}^2/\text{m}^3)$ et le diamètre hydraulique D_h , {(mm), Ce qui est appelé β Ce chiffre est soit β_1 ou β_2 , définies comme suit. Pour les échangeurs de chaleur à plaques, échangeurs à plaques à ailettes, et régénérateurs,

$$\beta_1 = \frac{A_h}{V_h} \quad \text{or} \quad \frac{A_c}{V_c}$$

Pour des échangeurs de tube à ailettes et des échangeurs tube et calendre.

$$\beta_2 = \frac{A_h}{V_{\text{total}}} \quad \text{or} \quad \frac{A_c}{V_{\text{total}}}$$

Le terme micro échangeur de chaleur est utilisé pour une densité de surface plus grande que $15\,000 \text{ m}^2/\text{m}^3$ ou $1 \mu\text{m} < D_h < 100 \mu\text{m}$.

Les échangeurs de chaleur tube et calandre possède une densité de surface moins de $100 \text{ m}^2/\text{m}^3$ dans un coté fluide avec tube simple, elle est de deux à trois fois plus grande avec des tubes avec ailettes.

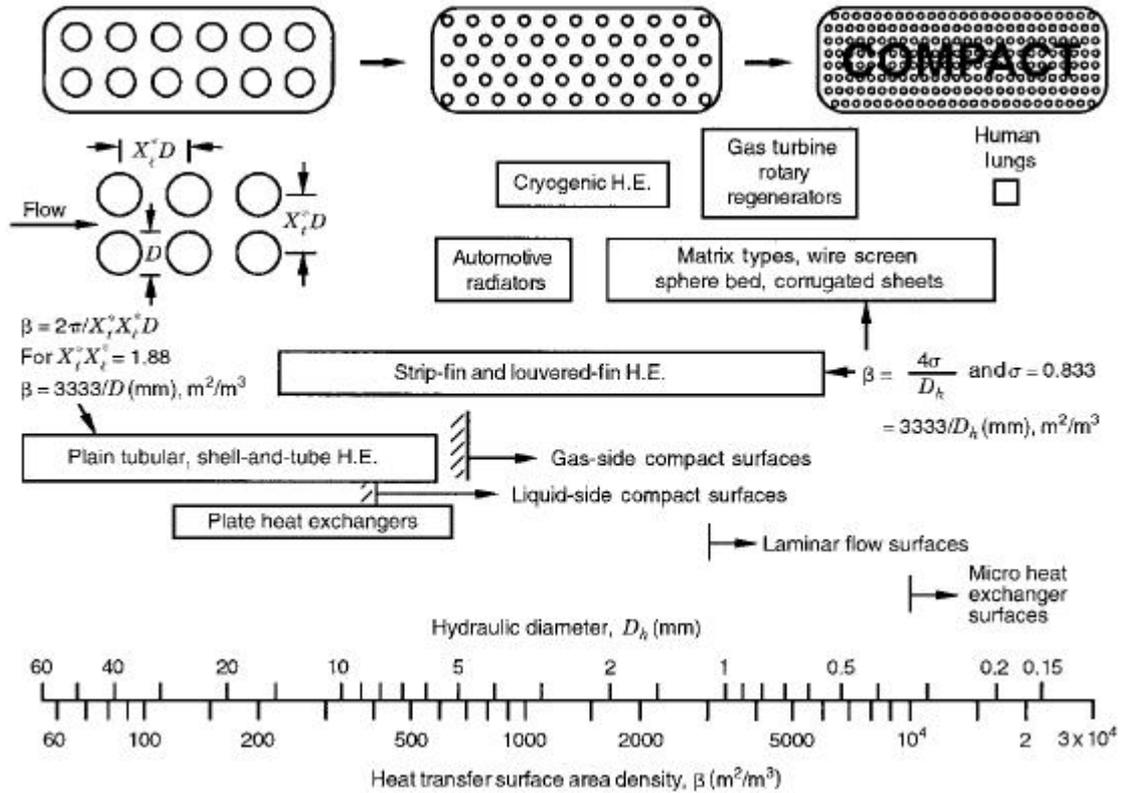


Figure 15 : Le spectre de la densité de surface d'échange de chaleur.