

Université de Med Boudiaf (M'sila)
Département de Génie Mécanique
Option : Energétique

Année universitaire 2017/2018
Année d'Etude : 2^{ème} année Master

Chapitre 2 : Les types standards des échangeurs de chaleur.

2.1 Introduction :

Un **échangeur de chaleur** est un dispositif établi pour rendre efficace le transfert thermique d'un milieu à l'autre, si les médias sont séparés par un mur plein de sorte qu'ils ne se mélangent jamais, ou les médias sont en contact direct. Ils sont employés couramment dedans chauffage d'espace, réfrigération, climatisation, centrales électriques, usines chimiques, usines pétrochimiques, raffineries de pétrole, et traitement de gaz naturel. Un exemple commun d'un échangeur de chaleur est radiateur dans une voiture.

2.2 Classification des échangeurs de chaleur :

La classification des échangeurs de chaleur par type de construction comprend **quatre principales constructions** : *tubulaire, à plaques, à ailettes et les régénératifs* (ou *échangeurs régénératifs*).

Il existe d'autres types de constructions disponibles, mais ceux-ci sont les principaux et les seuls abordés dans ce chapitre.

2.2.1 Les échangeurs tubulaires :

Les échangeurs tubulaires représentent encore près de la moitié des échangeurs thermiques vendus en France et en Europe. Ils présentent un certain nombre d'avantages : en particulier ils sont faciles à fabriquer, relativement bon marché, de maintenance aisée et surtout ils peuvent être utilisés à des pressions élevées et à de fortes températures. Leur robustesse et leur fiabilité contrebalancent leur encombrement.

Ces échangeurs sont généralement des tubes circulaires, elliptiques ou rectangulaires. Leur design est relativement très flexible dû à la grande variabilité des paramètres primaires de ces échangeurs, soit le diamètre et l'épaisseur des tubes, leur longueur et leur configuration. Ils sont utilisables pour des applications à haute pression par rapport à l'environnement et entre les fluides.

Ils sont principalement utilisés pour des applications liquide-liquide et liquide-changement de phase. Ils sont également utilisés dans des applications gaz-liquide et gaz-gaz lorsque la température et/ou la pression d'opération sont élevées. On les regroupe en trois principales catégories : *serpentin en tube, doubles tubes et tubes et calandre*.

1. L'échangeur à tube unique (mono tubulaire) ;

Les échangeurs tubulaires de type serpentin en tube constituent un enroulement de tuyau dans un réservoir. Le taux de transfert de chaleur est ainsi augmenté relativement à un tube droit. De plus, on retrouve une surface de contact considérable pour un volume donné. Le

principal problème de ces échangeurs est la difficulté du nettoyage dû à la géométrie restreinte et les petits espaces entre chaque pièce. La figure 2.1 montre un type d'échangeur en serpentin.

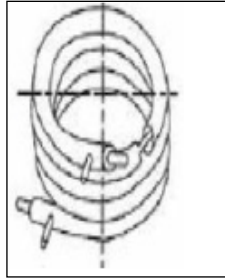


Figure 2.1 : E changeur de chaleur mono tubulaire.

2. Echangeur à double tube :

Les échangeurs de chaleur tubulaires à doubles tubes consistent généralement en deux tuyaux concentriques dont le tuyau interne peut être sans ou avec ailettes. La figure 2.2 montre un schéma de cet échangeur. Un fluide circule dans le tuyau intérieur et l'autre fluide dans l'espace entre les deux tuyaux dans la direction contraire pour une plus haute performance par unité de surface de contact. C'est probablement le plus simple des échangeurs envisageables.

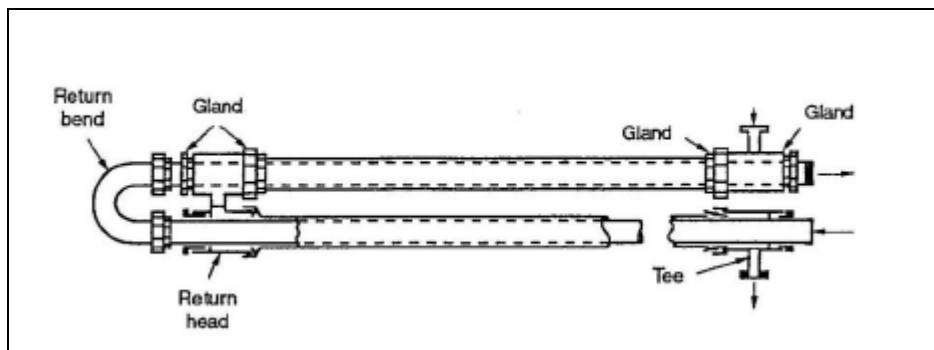


Figure 2.2 : E changeur de chaleur mono tubulaire.

La distribution des écoulements est simple et le nettoyage peut facilement être fait en désassemblant l'échangeur. C'est également un excellent échangeur si un ou les deux fluides sont à haute pression, car le coût des tuyaux est beaucoup moindre qu'un réservoir ayant un grand diamètre.

Ces échangeurs sont généralement utilisés pour de petites applications ayant une surface d'échange de chaleur est moins de 50 m², car leur coût par unité de surface est élevé. Les avantages et inconvénients de ces échangeurs de chaleur sont présentés dans le tableau 4.1.

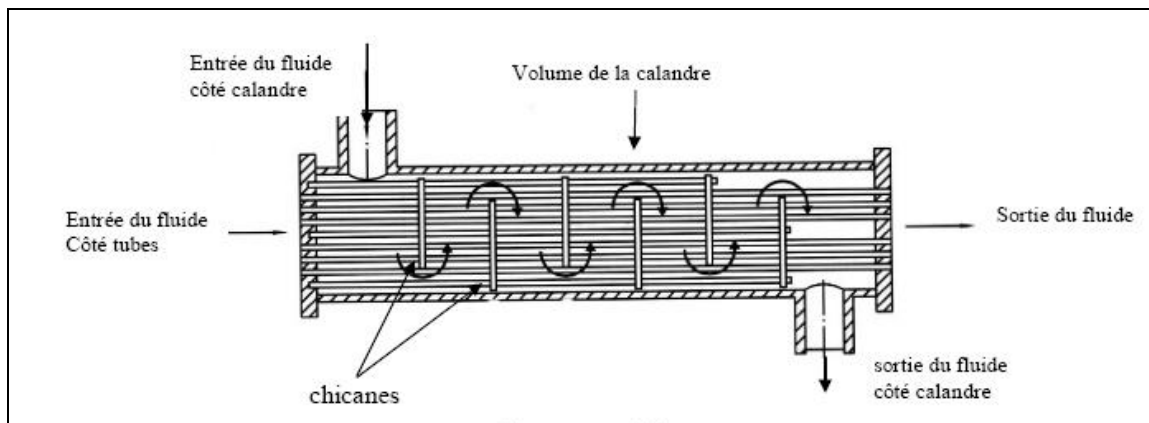
Les tubes sont généralement en acier et les longueurs courantes sont de 3,6 - 4,5 ou 6 m. On utilise également quelquefois des tubes en verre et en graphite.

<u>Avantages</u>	<u>Inconvénients</u>
Prix relativement bas	Puissance limitée
Fiable et simple	Risque de « claquement » si le diamètre du trou est petit (< 50 mm) et si la longueur est grande
Très bon coefficient de transmission thermique	

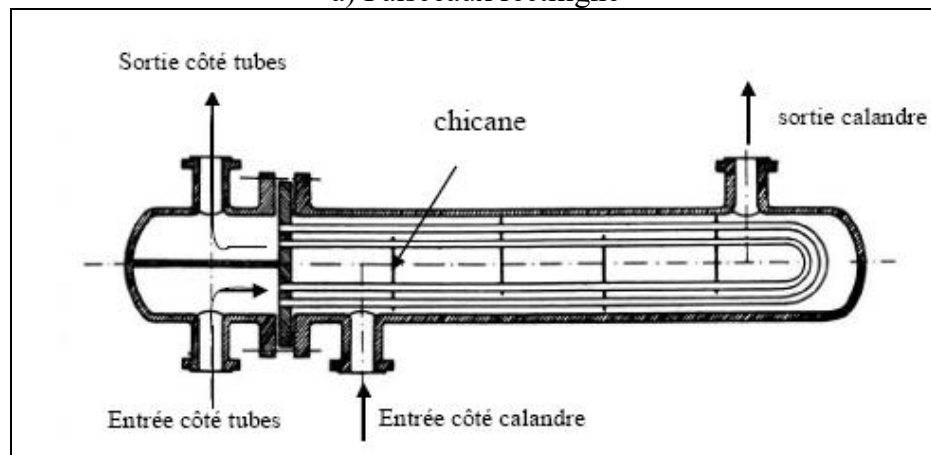
Tableau 2.1 : Avantages et inconvénients d'un échangeur de chaleur à doubles tube.

3. Echangeur de chaleur à tubes et calandre :

Les échangeurs de chaleur à tube et calandre comportent une quantité de tubes insérés dans un réservoir de plus grande dimension nommé enveloppe (« shell »). Un fluide circule dans l'enveloppe tandis que l'autre dans les tubes. La figure 2.3 illustre deux configurations possibles de ce type d'échangeur de chaleur tubulaire. Il existe de nombreuses autres configurations possibles selon le besoin de transfert de chaleur, les pertes de pression maximales, la prévention des fuites, la facilité d'entretien, possibilité de contenir des fluides sous pression, de contrôler la corrosion et encore plus. Les avantages et inconvénients de ces deux échangeurs de chaleur sont présentés dans les tableaux 4.2 et 4.3.



a) Faisceaux rectiligne



b) faisceau en U.

Figure 2.3 : Echangeurs du type cylindre et tube.

<u>Avantages</u>	<u>Inconvénients</u>
Résiste aux fortes pressions	Sensible aux vibrations
Toutes les puissances	Difficulté d'entretien
Coût relativement bas	Contraintes dans les tubes
Accepte un grand écart de température	

Tableau 2.2 : Avantages et inconvénients des échangeurs de chaleur à calandre et faisceaux tubulaires horizontaux

<u>Avantages</u>	<u>Inconvénients</u>
Résiste aux fortes pressions	Encombrement
Large gamme de puissance disponible	Coût d'investissement élevé
Libre dilatation des tubes et du corps	Entretien difficile
	Aucune utilisation de vapeur

Tableau 2.3 : Avantages et inconvénients des échangeurs de chaleur à calandre et passage de tube en U.

Ce type d'échangeurs est de loin le plus répandu dans les unités de transformations des industries chimiques et pétrochimiques. Quelques-unes des applications possibles sont le chauffage de l'eau, les condenseurs, les rebouilleurs et les fours multitubulaires. Il sert le plus souvent dans des opérations ne s'appliquant pas directement à un produit alimentaire car l'enveloppe et les tubes peuvent être difficiles à inspecter.

Ce genre de disposition est la plus utilisée pour les échangeurs liquide -liquide. La compacité maximum (surface d'échange par mètre cube) obtenue avec cette configuration est de l'ordre de $500\text{m}^2/\text{m}^3$.

Tous les éléments entrant dans la construction de ces échangeurs ont fait l'objet d'une normalisation, tant par la T.E.M.A. (Tubular Exchangers Manufacturer's Association) que l'A.S.M.E. (American Society of Mechanical Engineers) ou l'A.P.I. (American petroleum institute). A titre d'exemple TEMA a développé un système de notation pour désigner les majeurs types d'échangeurs shell and tube, dans lequel chaque échangeur est désigné par trois lettres combinées, la première indique le type de la boîte de distribution à l'entrée « front-end head », le deuxième présente le type de cylindre (le type d'enveloppe) et le dernier le type de la deuxième boîte de distribution « rear-end head ». Ils sont illustrés sur la Figure 2.4. Quelques échangeurs shell and tubes sont AES, AEP, CFU, HKT et AJW.

Notons qu'il existe d'autres types d'échangeurs spéciaux disponibles commercialement qui ont les boîtes de distribution différentes de celle notée sur la figure 2.4, ils ne sont pas identifiés par la désignation TEMA.

La calandre est généralement réalisée en acier au carbone et les brides portant les boîtes de distribution et le couvercle sont soudées. Les tubes du faisceau répondent à des spécifications très sévères. Le choix du matériau dépend de l'utilisation :

- acier au carbone pour usage courant.
- laiton amirauté pour les appareils travaillant avec l'eau de mer.
- aciers alliés pour les produits corrosifs et les températures élevées.
- aluminium et cuivre pour les très basses températures.

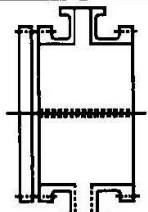
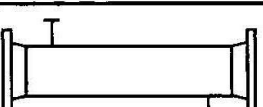
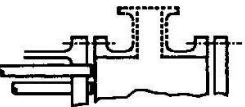
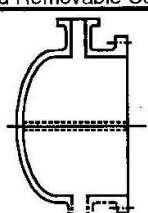
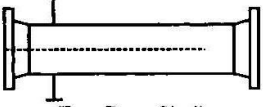
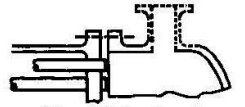
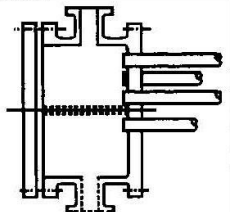
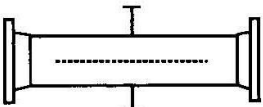
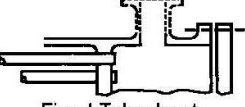
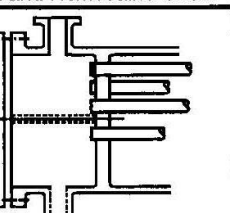
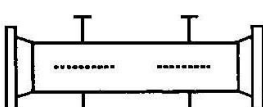
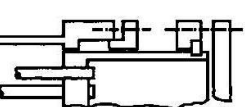
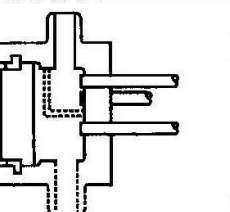
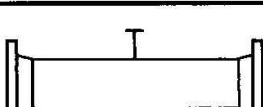
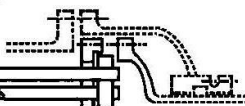
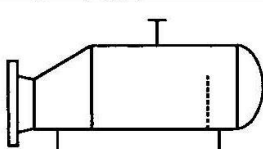
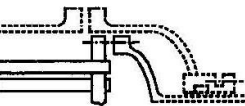
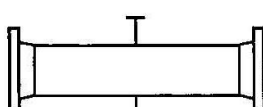
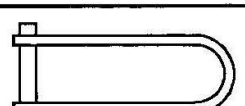
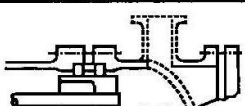
Front-End Stationary Head Types		Shell Types		Rear-End Head Types	
A	 Channel and Removable Cover	E	 One-Pass Shell	L	 Fixed Tubesheet Like "A" Stationary Head
B	 Bonnet (Integral Cover)	F	 Two-Pass Shell with Longitudinal Baffle	M	 Fixed Tubesheet Like "B" Stationary Head
C	 Channel Integral with Tube-Sheet and Removable Cover	G	 Split Flow	N	 Fixed Tubesheet Like "N" Stationary Head
N	 Channel Integral with Tube-Sheet and Removable Cover	H	 Double Split Flow	P	 Outside Packed Floating Head
D	 Special High-Pressure Closure	J	 Divided Flow	S	 Floating Head with Backing Device
		K	 Kettle Type Reboiler	T	 Pull-through Floating Head
		X	 Crossflow	U	 U-Tube Bundle
				W	 Externally Sealed Floating Tubesheet

Figure 2.4 : Les types standard des shell et des boîtes de distribution des échangeurs de chaleur tubes calandre.

Le faisceau est monté en deux plaques en communication avec des boîtes de distribution qui assurent la circulation du fluide à l'intérieur du faisceau en plusieurs passes. Le faisceau muni de chicanes est logé dans une calandre possédant des tubulures d'entrée et de sortie pour le deuxième fluide circulant à l'extérieur des tubes du faisceau selon un chemin imposé par les chicanes (Figure 2.5). Il est appelé aussi condenseur par surface, il est utilisé généralement dans les applications pour chauffage, refroidissement, condensation ou évaporation.

On désigne par *pass*e une traversée de l'échangeur par l'un des fluides. Ce sont en général des appareils à faisceau de tubes et calandre, dans lesquels chacun des deux fluides traverse une ou plusieurs fois le volume d'échange. Si le fluide qui circule dans la calandre (à l'extérieur des tubes) passe P fois dans le volume d'échange, et le fluide contenu dans les tubes le traverse N fois ($N/2$ aller et retours).

On dit que l'échangeur est à P passe côté calandre et N passes côté tubes (échangeur type $P-N$) : un exemple illustratif est représenté sur la figure 2.4, (a) représente l'échangeur à un passe côté calandre et 2 passes côté tubes (échangeur type 1-2) et (b) représente l'échangeur à deux passe côté calandre et 4 passes côté tubes (échangeur type 2-4).

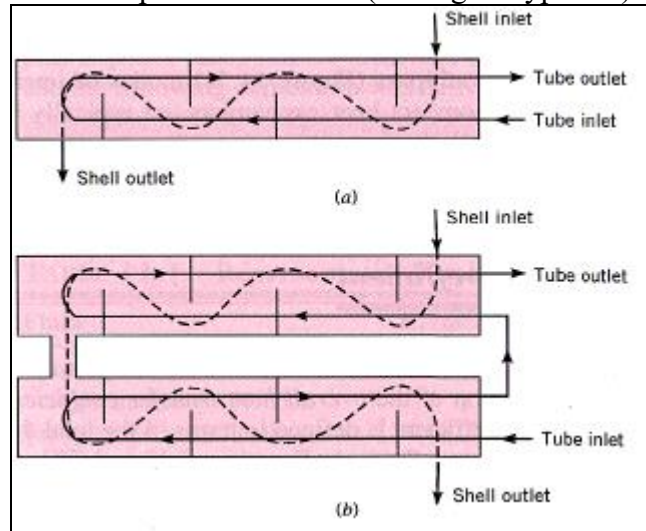


Figure 2.5 : Type d'échangeurs calandre et tube.

Les tubes sont fixés dans les plaques par mandrinage et la perforation des trous dans les plaques est réalisée selon une disposition normalisée, soit au pas triangle, soit au pas carré. Le pas triangle permet de placer environ 10 % de plus de tubes que le pas carré sur une plaque tubulaire de diamètre donné, mais, en contre partie, la disposition des tubes rend difficile le nettoyage des tubes par insertion de grattoirs.

Les boîtes de distribution et de retour sont cloisonnées. Ce cloisonnement permet au fluide de traverser successivement plusieurs sections du faisceau, ce qui a pour objet d'accroître la vitesse du fluide et d'augmenter le coefficient de transfert à l'intérieur des tubes. Cette disposition correspond toujours à un nombre pair de passages (ou passes) dans le faisceau.

Les chicanes qui permettent d'allonger le chemin du fluide circulant dans la calandre sont souvent constituées par un disque de diamètre légèrement inférieur à celui de la calandre comportant une section libre représentant 20 à 45 % de la section. Il existe plusieurs types regroupés dans la figure 2.6.

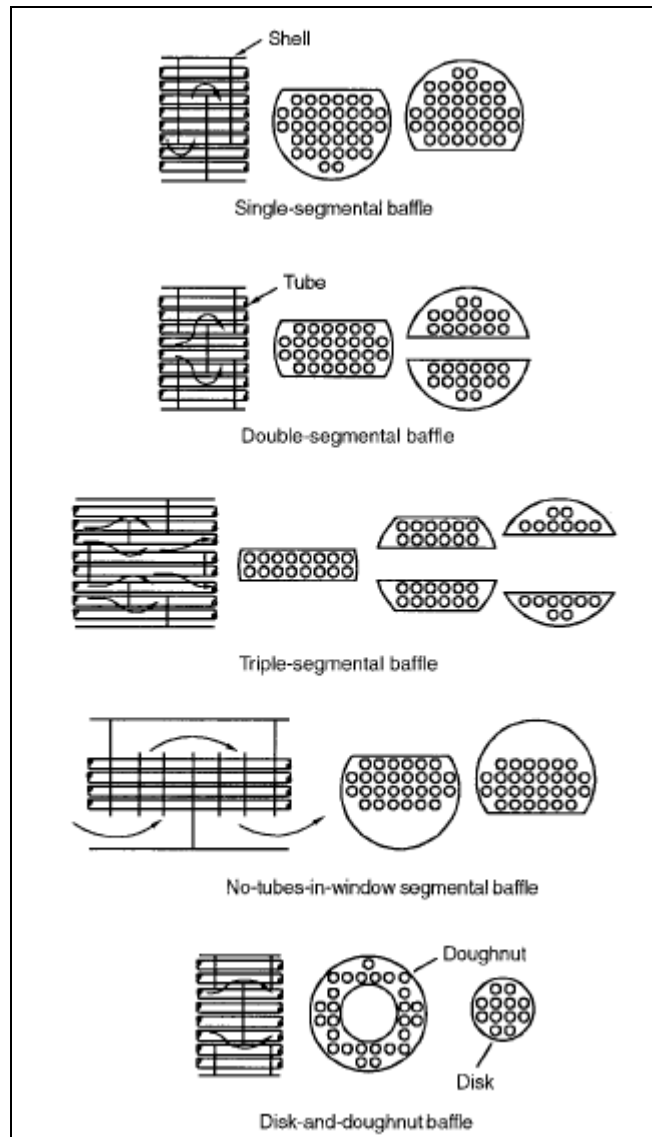


Figure 2.6 : Les types de chicanes rencontrés dans les échangeurs de chaleur tubes calandre.

On note donc l'utilisation de chicanes qui permettent d'augmenter le transfert thermique en multipliant le croisement des deux fluides. La multiplication des chicanes (figure 2.7) a pour conséquence négative d'augmenter les pertes de charges; à débit donné il faudra donc fournir une puissance plus élevée pour faire circuler le fluide.

Ils sont particulièrement adaptés à un échange vapeur-liquide. La vapeur circulant autour des tubes et le liquide dans les tubes. Ils sont donc aussi utilisés comme condenseur et comme évaporateur.

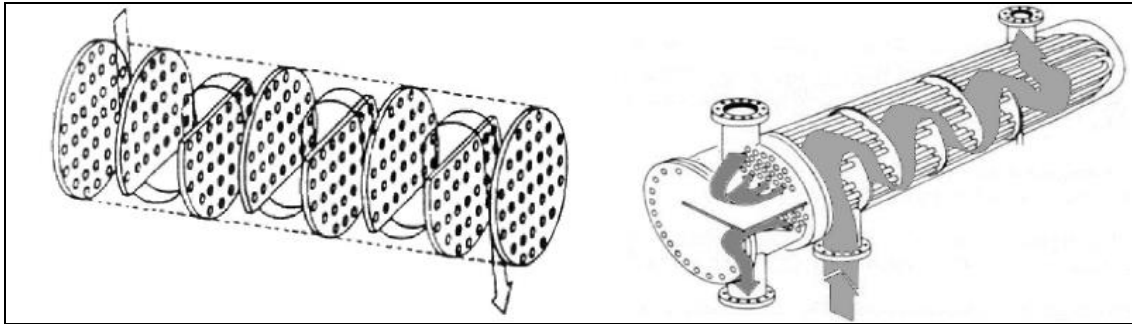


Figure 2.7: Les chicanes dans l'échangeur calandre tube.

2.2.2. Echangeur à plaques :

Les échangeurs à plaques sont généralement conçus de nombreuses plaques minces. Généralement, ces échangeurs de chaleur ne peuvent pas résister à de hautes pressions ou températures ni à de hautes différences de pression et température. Les principaux types de ces échangeurs sont désignés comme échangeurs à joint étanche, soudé, à plaques hélicoïdales, à lamelles, à circuits imprimés et à serpentin à plaque externe.

1. Échangeurs à joints étanches

Les échangeurs à plaques à joint étanche consistent en un nombre de minces plaques de métal scellé par un joint étanche sur le pourtour et jointes ensemble par un bâti. La figure 2.8 montre un échangeur de chaleur à plaques avec joint étanche typique.

Les plaques sont fabriquées en étampant ou en brossant un patron sur une feuille de métal. De chaque côté de la plaque, on retrouve des rainures de différents modèles sur toute la surface. La figure 2.9 montre quelques patrons typiques. Ces patrons sont conçus de manière à renforcer la structure, de garder la distance désirée entre chaque plaque et de rehausser les transferts de chaleur.

Les joints d'étanchéité entre les plaques sont fabriqués d'élastomère d'environ 5 mm d'épaisseur et ajustés de manière à suivre la rainure périphérique. Les joints d'étanchéité sont conçus pour être compressés environ 25 % de leur épaisseur pour ne pas déformer les plaques métalliques. Il existe également des joints doubles afin d'éviter le mélange des fluides en cas de bruit. Le tableau 2.4 montre les principaux matériaux utilisés dans l'industrie pour la fabrication des joints d'étanchéité.

Le tableau 2.5 montre les paramètres de dimensions et de performances typiques d'échangeurs de chaleur à plaque avec joint d'étanchéité. Les métaux pouvant être travaillés à froid sont propices à la fabrication d'échangeurs de chaleur à plaques. Les plus utilisés sont l'acier inoxydable (AISI 304 ou 316) et le titane. Les alliages Incoloy 825, Inconel 625 et Hastelloy C-276 sont également largement répandus. Le nickel et le cuivre sont rarement

utilisés. L'acier carbone n'est jamais utilisé dû à sa faible résistance à la corrosion. Le graphite et les polymères sont utilisés dans la fabrication des plaques pour les applications avec des fluides corrosifs.

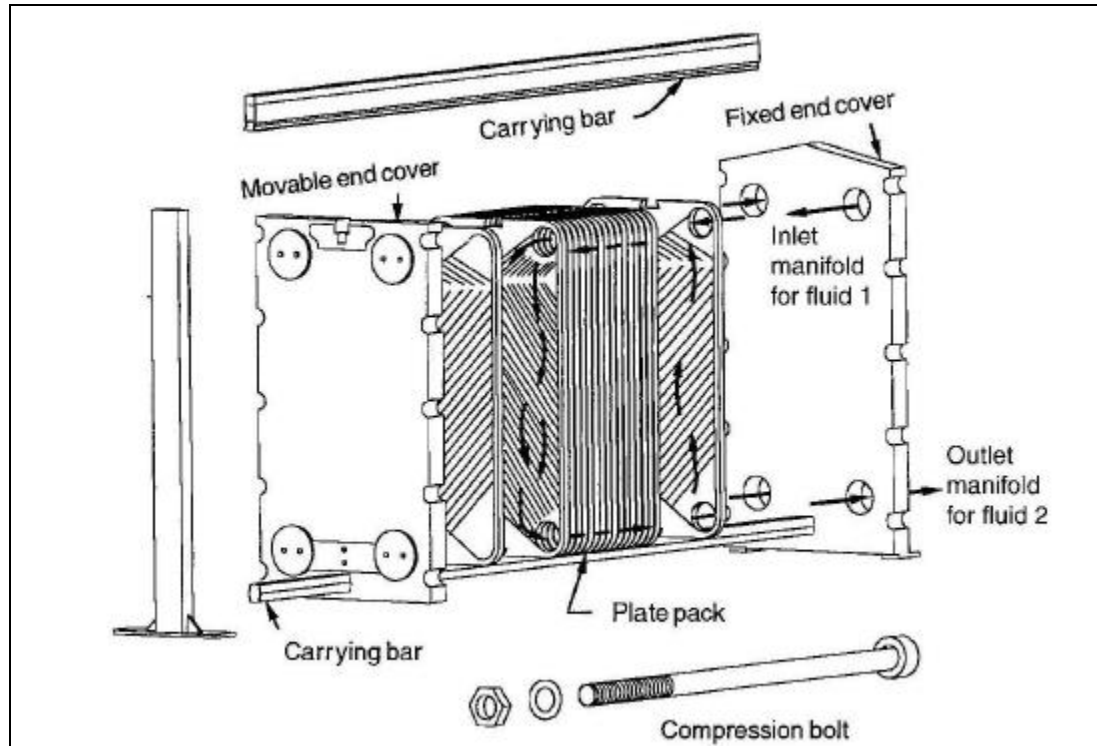


Figure 2.8 : Échangeur de chaleur à plaques avec joint étanche et son bâti

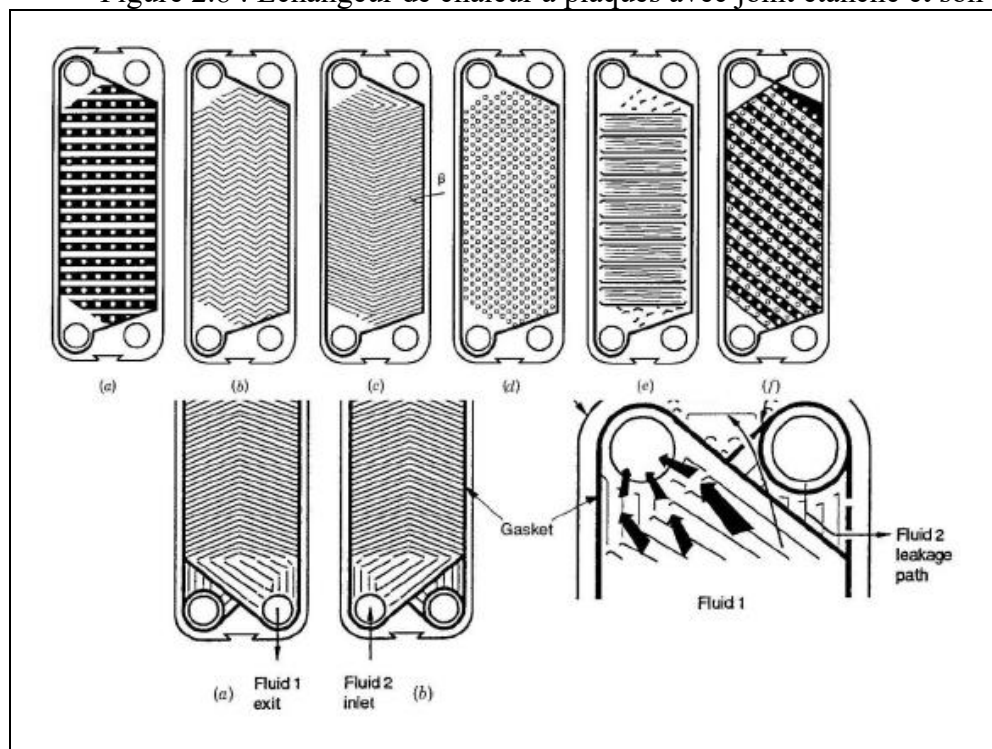


Figure 2.9 : Patrons de plaques communs

Matériau	Nom générique	Température d'opération maximale (°C)	Applications	Commentaire
Caoutchouc naturel	Cis-1,4-polyisoprène	70	Solvants oxygénés, acides, alcools	
SBR (styrène butadiène)		80	Milieux aqueux, alcalins, acides et solvants oxygénés	Faible résistance au gras
Néoprène	Trans-1,4-polychloroprène	70	Alcools, alcalins, acides, solvants d'hydrocarbure aliphatique	
Nitrile		100-140	Produits laitiers, jus de fruits, breuvages, pharmaceutiques et biochimiques, huile, essence, huiles végétales et animales, alcalins, solvants organiques aliphatiques	Résistant aux matières grasses; Excellent pour la crème
Butyl		120-150	Alcalins, acides, huiles végétales et animales, aldéhydes, acétone, phénols et esters	Faible résistance aux gras; résiste aux solutions chimiques inorganiques jusqu'à 150 °C
Caoutchouc d'éthylène propylène		140	Alcalins, solvants oxygénés	Inadéquat pour des liquides gras
Caoutchouc de silicone	Polydiméthyl siloxane	140	Basse température, alcools, hypochlorite de sodium	
Caoutchouc fluorant		175	Aqueux à haute température, huiles minérales, essence, solvants organiques, huiles végétales et animales	
Fibre d'amiante		200-260	Solvants organiques, hautes températures	

Tableau 2.4 : Matériaux utilisés pour des joints d'étanchéité des échangeurs de chaleur.

Unité		Opération	
Surface maximale	2500 m ²	Pression	0.1 – 3.0 MPa
Nombre de plaques	3 à 700	Température	-40 - 260 °C
Grandeur d'entrée	Jusqu'à 400 mm	Vitesse d'entrée maximale	6 m/s
		Écoulements des rainures	0.05 – 12.5 m ³ /h
		Débit maximal	2500 m ³ /h

Plaques		Performance	
Épaisseur	0.5 – 1.2 mm	Différence de température	Aussi bas que 1 °C
Dimensions	0.03 – 3.6 m ²	Efficacité	Jusqu'à 93 %
Espace	1.5 – 7 mm	Coefficients de transfert de chaleur eau-eau	3000 - 8000 W/m ² K
Largeur	70 – 1200 mm		
Longueur	0.4 – 5 m		
Diamètre hydraulique	2 – 10 mm		
Surface par plaque	0.02 – 5 m ²		

Tableau 2.5 : Points d'opérations et géométries typiques d'échangeur de chaleur à plaques

Les échangeurs de chaleur à plaques avec joint d'étanchéité ont comme avantage d'être faciles à désassembler ce qui les rend faciles à nettoyer. La surface de transfert de chaleur peut facilement être changée ou réorganisée pour des applications différentes ou pour des changements anticipés de charges. L'air utilisé est entre la moitié et le tiers d'un échangeur de chaleur à tube et calandre pour une certaine quantité de chaleur à extraire, ce qui réduit le coût, le volume total et l'espace requis. De plus, son poids est d'environ le sixième d'un échangeur à tube et calandre. La seule raison pour laquelle les deux fluides seraient mélangés serait qu'une des plaques serait perforée. Autrement, les fuites coulent à l'extérieur de l'échangeur de chaleur. Il n'y a aucun endroit chaud ou froid dans l'échangeur qui pourrait mener à une détérioration des fluides sensibles à la chaleur. Le volume du fluide à l'intérieur de l'échangeur est petit, ce qui est très important pour des fluides dispendieux, pour une réponse plus rapide et pour un meilleur contrôle du procédé. Finalement, une haute performance thermique peut être atteinte dans ce type d'échangeur. Pour un écoulement à contre-courant, les températures peuvent se rapprocher jusqu'à 1 °C. L'efficacité peut atteindre 93 % ce qui facilite le recouvrement économique de l'investissement. Par contre, les échangeurs à plaques avec joints d'étanchéité peuvent être utilisés à des pressions allant jusqu'à 3 MPa (435 psig), mais sont généralement opérés en dessous de 1.0 MPa (150 psig). La température d'opération maximale est de 260 °C, mais dépasse rarement 150 °C pour éviter l'utilisation de joints d'étanchéité dispendieux. La durée de vie des joints d'étanchéités est limitée, ce qui implique un remplacement possible fréquent de ceux-ci pour certaines applications. Les échangeurs de chaleur à plaques avec joint d'étanchéité ne sont pas conseillés pour des applications avec des fluides contenant des fibres ou des matières abrasives, ceci abîme les joints. Les fluides très visqueux peuvent apporter des problèmes de mauvaise répartition, spécialement lors de refroidissement. Ils ne devraient pas être utilisés pour des fluides toxiques dus à la possibilité de fuite des joints d'étanchéité.

Les principales applications des échangeurs de chaleur à plaques avec joint d'étanchéité est la pasteurisation du lait, des applications liquide-liquide avec une viscosité inférieure à 10 pascals secondes, les produits laitiers, les jus, les breuvages, les alcools, l'industrie alimentaire et l'industrie pharmaceutique, l'industrie du caoutchouc, les pâtes et papiers, les systèmes de refroidissement des centrales pétrochimiques et encore plus. Ils ne sont pas souhaités pour des applications gaz-gaz.

2. Échangeurs à plaques soudées

Une des limitations des échangeurs à plaques avec joints d'étanchéité est la présence des joints d'étanchéité, ce qui amène une restriction quant au choix des fluides, ils ne doivent pas être corrosifs, et limite la température et la pression d'opération. Afin d'éliminer ces problèmes, certains échangeurs à plaques ont les surfaces des plaques soudées les unes aux autres sur un ou des deux côtés des fluides.

Afin de réduire le coût de soudage, les plaques sont généralement plus larges que normalement. Le principal désavantage encouru par cette technique est la perte de la possibilité de désassembler les échangeurs, ce qui les rend plus difficiles à nettoyer.

3. Échangeurs à plaques hélicoïdales

Un échangeur de chaleur à plaques hélicoïdales consiste à deux feuilles de métal relativement longues reliées par des tiges métalliques pour garder un espacement qui sont

roulées autour d'un mandrin pour former une paire de canaux hélicoïdaux pour deux fluides. La figure 2.10 en montre un exemple. Un embout est ajouté aux extrémités afin de garder les fluides dans leurs canaux respectifs. Ces embouts peuvent être soudés ou fixés avec des vis en ayant un joint étanche entre les plaques hélicoïdales et chaque embout afin de garder l'échangeur de chaleur étanche. Les principaux métaux utilisés pour les plaques sont l'acier inoxydable, le titane, l'Hastelloy, l'Incoloy et des alliages à haute densité de nickel.

Les fluides peuvent circuler de trois manières différentes dans l'échangeur : à contre-courant en spirale, un fluide en spirale et l'autre transversalement, un fluide en spirale et l'autre en une combinaison de spirale et transversale. Les avantages et inconvénients des échangeurs de chaleur à plaques hélicoïdales sont résumés dans le tableau 2.6.

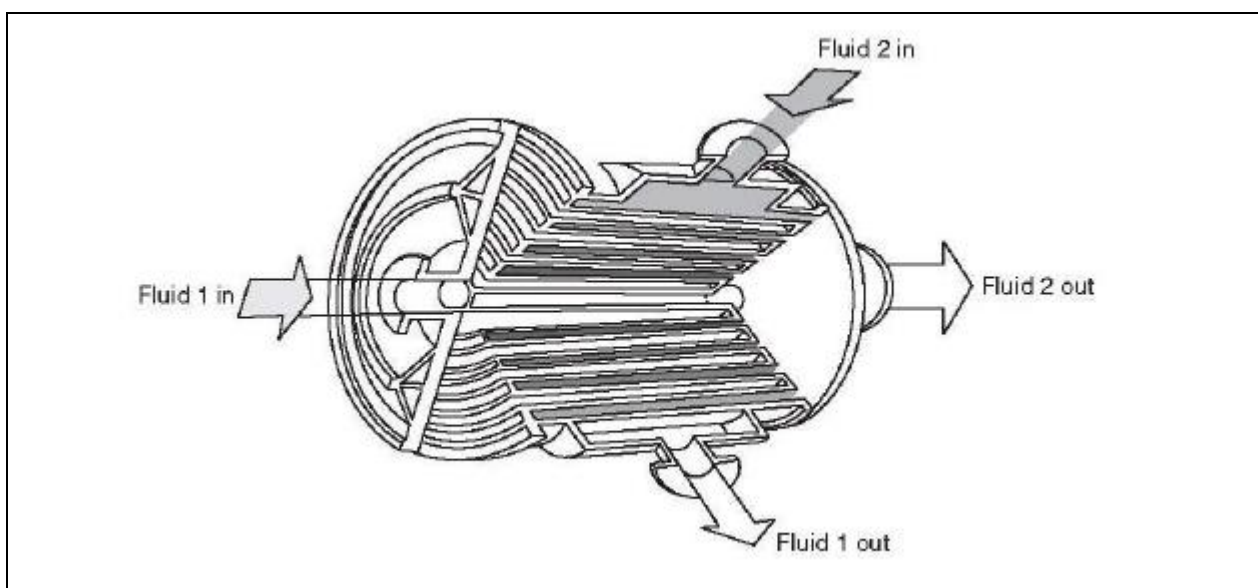


Figure 2.10 : Échangeur de chaleur à plaques hélicoïdales.

<u>Avantages</u>	<u>Inconvénients</u>
Liquides visqueux possibles	Puissances limitées
Liquides avec particules	Pression maximale de 2.5 MPa
Encrassement réduit	Température maximale de 500 °C avec joint d'étanchéité en amiante
Aucun isolant nécessaire	Température maximale générale de 200 °C
	Difficulté d'entretien et de réparation

Tableau 2.6 : Avantages et inconvénients des échangeurs de chaleurs à plaques hélicoïdales

4. Échangeurs à lamelles

Les échangeurs de chaleur à lamelles consistent en une enveloppe extérieure tubulaire dans laquelle un grand nombre d'éléments, appelés lamelles, sont introduits. Ces lamelles sont généralement des tubes aplatis selon différents ratios. La figure 2.11 montre un exemple de ce type d'échangeur et de lamelles.

L'ouverture des lamelles va de 3 à 10 mm et l'épaisseur de 1,5 à 2 mm. Les lamelles sont insérées dans le tube et refermées avec un joint d'étanchéité pour prévenir les fuites. L'écoulement est généralement à contre-courant afin d'augmenter le transfert thermique entre les deux fluides. Cet échangeur de chaleur est utilisé dans les procédés chimiques l'industrie des pâtes et papiers et pour toutes autres applications pouvant utiliser un échangeur à tubes et calandres.

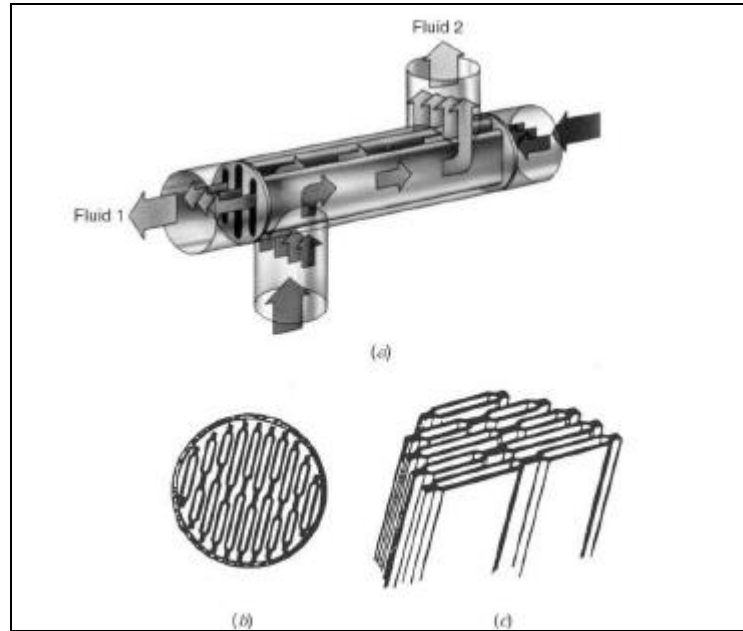


Figure 2.11 : Échangeur de chaleur à lamelle (a), Section coupée de lamelles (b), Lamelles (c)

5. Échangeurs à circuits imprimés

Les échangeurs à circuits imprimés n'ont qu'une seule surface d'échange de chaleur comme les échangeurs à plaques, la figure 2.12 montre un exemple. De petits canaux sont fabriqués dans une plaque avec la même technique que dans la fabrication de circuits imprimés. Les différentes plaques ainsi formées sont soudées les unes aux autres pour former un échangeur de chaleur. La profondeur des canaux va de 0,1 à 2 mm. Il est possible d'atteindre une haute densité de surface de contact, 650 à 1300 m²/m³, pour des pressions de 50 à 100 MPa et des températures de 150 à 800 °C. De nombreux matériaux sont utilisés dans leur fabrication, notamment l'acier inoxydable, le titane, le cuivre, le nickel et ses alliages. Ils sont couramment utilisés dans des plateformes pétrolières en haute mer comme refroidisseur de compresseur, récupérateur de chaleur d'eaux usées, dans des procédés cryogéniques et encore plus. Avec la petite dimension des canaux, la perte de charge peut être importante pour des applications à basse et moyenne pression. Cependant, ils ont les avantages d'avoir une résistance à la pression élevée, une bonne flexibilité dans le design et une excellente efficacité.

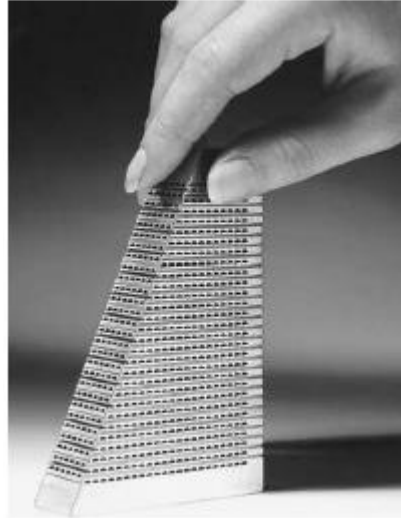


Figure 2.12 : Échangeur à circuits imprimés de Heatric

6. Échangeurs à serpentín à plaque externe

L'élément principal est nommé un serpentín à plaque externe et est illustré à la figure 2.13. Ces échangeurs de chaleurs sont faciles à fabriquer et peu dispendieux. Leur géométrie permet de les introduire dans la plupart des systèmes, d'une conduite à une large cuve en passant par un milieu ambiant selon que l'on désire réchauffer ou refroidir le fluide caloporteur. Les matériaux les plus courants dans la fabrication des échangeurs de chaleur à serpentín à plaque externe sont l'acier carbone, l'acier inoxydable, le titane, le nickel et ses alliages et le monel (Nom d'une marque déposée d'un alliage de cuivre et de nickel ayant une grande résistance à la Corrosion). La pression d'opération maximale varie de 1,2 à 1,8 MPa selon le matériau de fabrication et la géométrie.



Figure 2.13 : Plaque à serpentín d'un échangeur à serpentín à plaque externe

2.2.3. Echangeur à surface augmentée

Les échangeurs tubulaires et à plaques utilisent seulement la surface primaire pour échanger la chaleur entre les fluides. Leur efficacité est normalement de 60 % ou moins et la surface de transfert de chaleur inférieure à $700 \text{ m}^2/\text{m}^3$. Dans certaines applications, une

efficacité de plus de 95 % est essentielle afin de limiter le volume et la masse. Les échangeurs de chaleur entre gaz et certains liquides ont un coefficient de transfert de chaleur très bas. Ceci implique une surface d'échange très grande. Une méthode afin d'augmenter la surface d'échange est d'ajouter des ailettes sur un ou les deux côtés. Cet ajout permet d'augmenter de 5 à 12 fois la surface d'échange. Les échangeurs à plaques et ailettes et les échangeurs à tube et ailettes sont les plus communs.

1. Échangeurs à plaques avec ailettes

Ce type d'échangeur de chaleur consiste à ajouter des ailettes ondulées entre des plaques parallèles. Les ailettes sont généralement de forme triangulaire ou rectangulaire. La figure 2.14 montre un exemple. Parfois, les ailettes sont incorporées dans un tube plat avec des arrondis, ce qui élimine le besoin de barres de soutien. D'autres géométries sont possibles selon le type d'échangeur de chaleur à plaques.

Dans des applications gaz-liquide, les ailettes sont généralement utilisées seulement du côté gaz de l'échangeur. Les échangeurs à plaques avec ailettes sont regroupés en trois catégories : ailettes non coupées, comme triangulaires ou rectangulaires, ailettes non coupées avec courbe et ailettes interrompues. La figure 2.15 montre des configurations courantes d'ailettes.

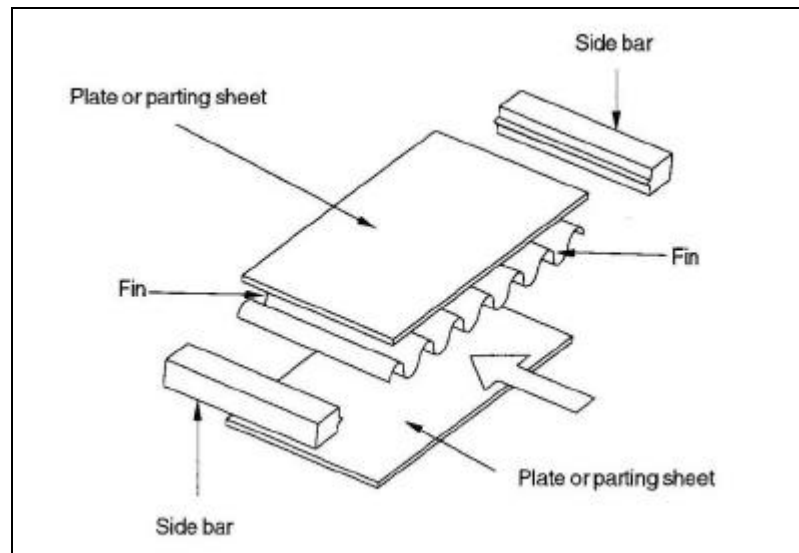


Figure 2 .14 : Composantes de base d'un échangeur de chaleur à plaques avec ailettes

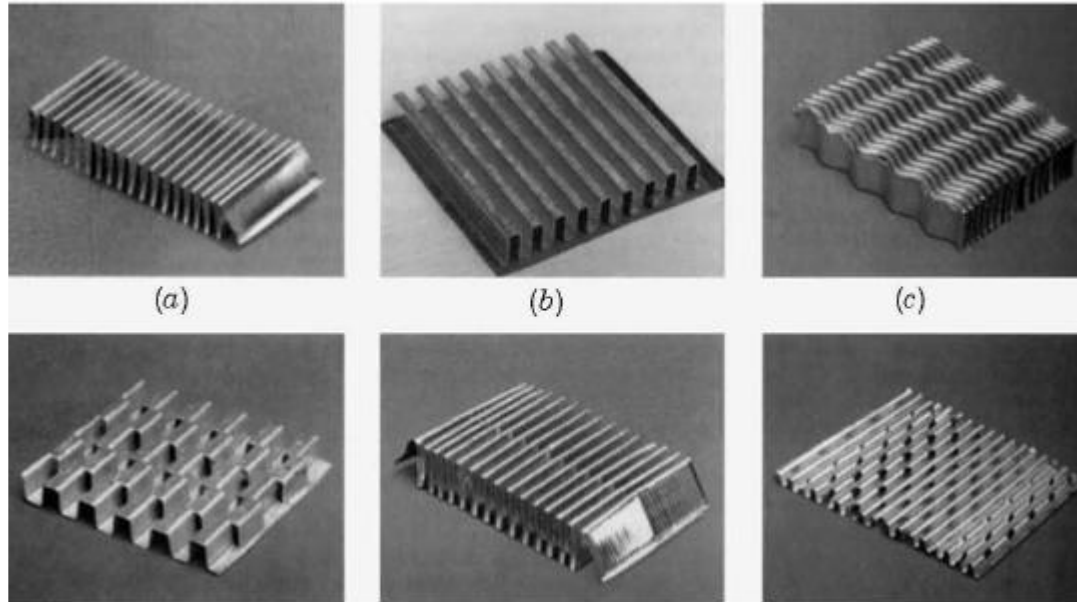


Figure 2.15 : Géométries d'ailettes ondulées pour échangeur de chaleur à plaques : (a) triangulaire; (b) rectangulaire; (c) ondulé; (d) bandes décalées; (e) multiples événements; (f) trouées

2. Échangeurs tubulaires avec ailettes

On retrouve deux catégories de tubes à ailettes : les tubes conventionnels et les tubes de spécialité. Dans un tube conventionnel, le transfert de chaleur entre les fluides se fait par conduction à travers la paroi du tube. Dans un échangeur de spécialité, le transfert de chaleur se fait par l'intermédiaire d'un tube dans lequel un liquide passe de gaz à liquide avec un effet convectif, on nomme ce tube caloduc.

1) Échangeurs tubulaires à ailettes :

Dans un échangeur liquide-gaz, le coefficient de transfert du côté du liquide est généralement plus grand que du côté du gaz. Afin d'obtenir une conductance balancée des deux côtés pour un échangeur de chaleur le plus petit possible, des ailettes sont ajoutées du côté gaz de l'écoulement. De plus, si la pression est haute pour un fluide, il est généralement économique d'utiliser des tubes.

Les tubes les plus communs sont ronds ou rectangulaires, par contre, des tubes elliptiques sont aussi utilisés. Les ailettes sont généralement placées sur l'extérieur du tube et sont fixées mécaniquement, collées, soudées, brasées ou extrudées. Dépendamment du type d'ailettes, les échangeurs de chaleur tubulaires à ailettes sont regroupés dans les trois catégories suivantes : tube simple à ailettes (figure 2.16a et 2.17), tubes à ailettes continues (figure 2.16b et 2.18) et tubes longitudinaux (figure 2.19). Il existe également des tubes avec ailettes internes (figure 2.20).

Un échangeur de chaleur refroidi à l'air consiste en un tube avec ailettes dans lequel un fluide chaud circule et l'air ambiant circule sur la surface externe.

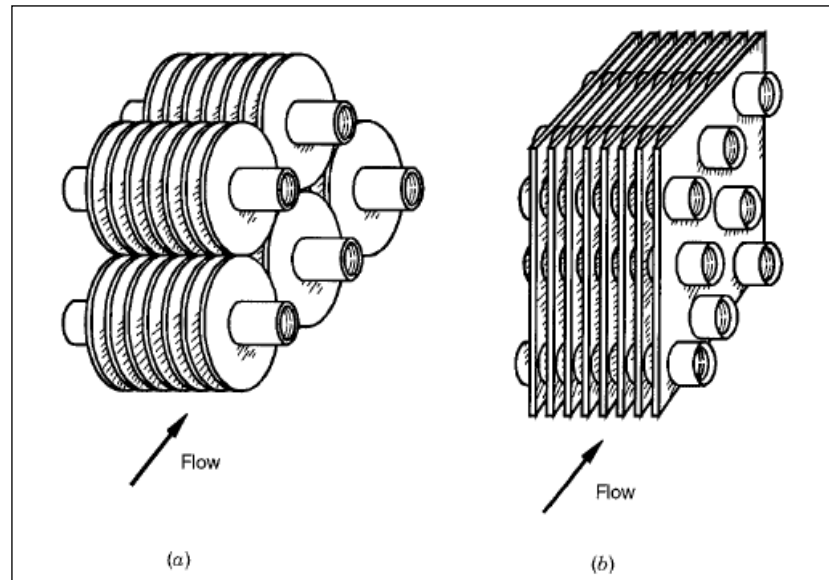


Figure 2.16 : (a) Tubes à ailettes simples; (b) ailettes plaques autour de tubes. Les ailettes sont plates, mais pourraient être ondulées, coupées ou à événements.

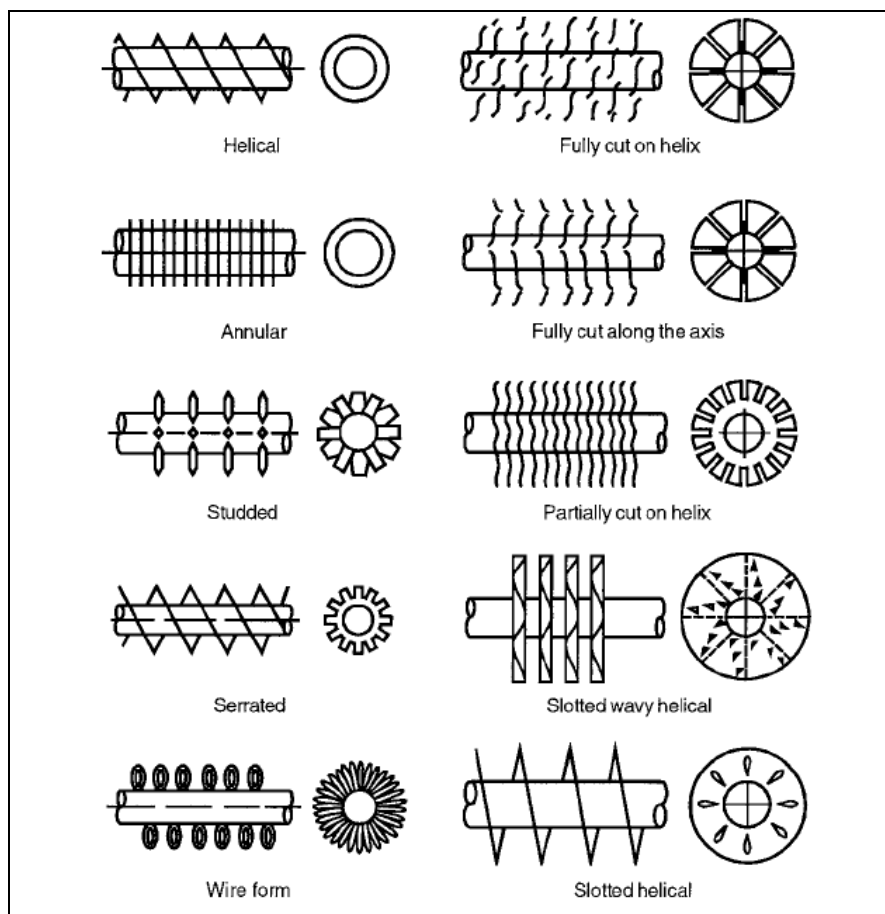


Figure 2.17 :: Tubes à ailettes simples.

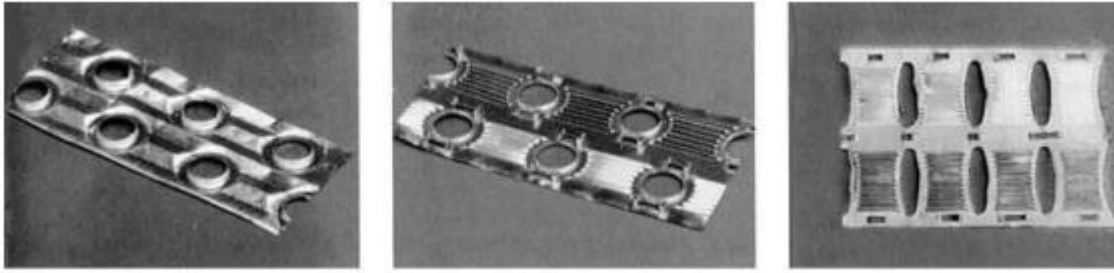


Figure 2 .18 : *Trois configurations d'ailettes continues*

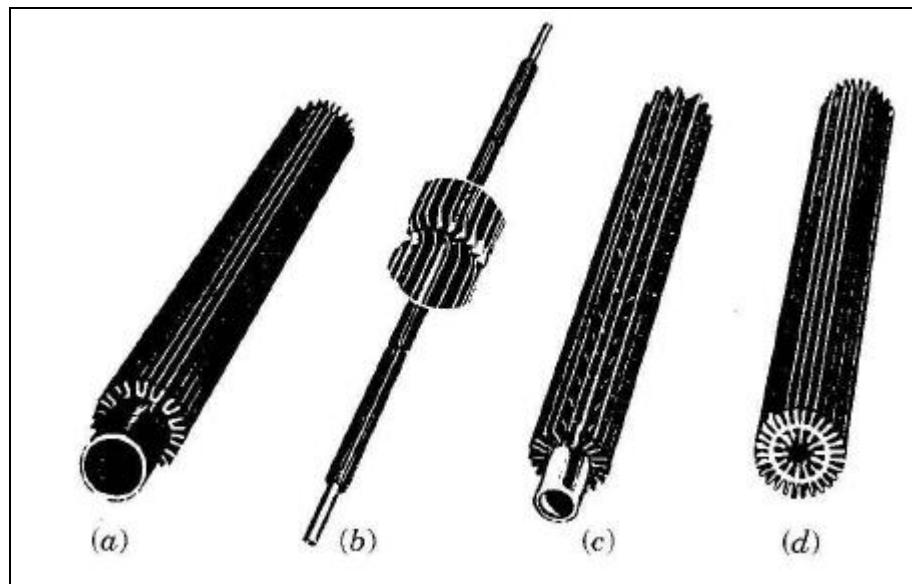


Figure 2 .19 : *Tubes à ailettes longitudinaux*

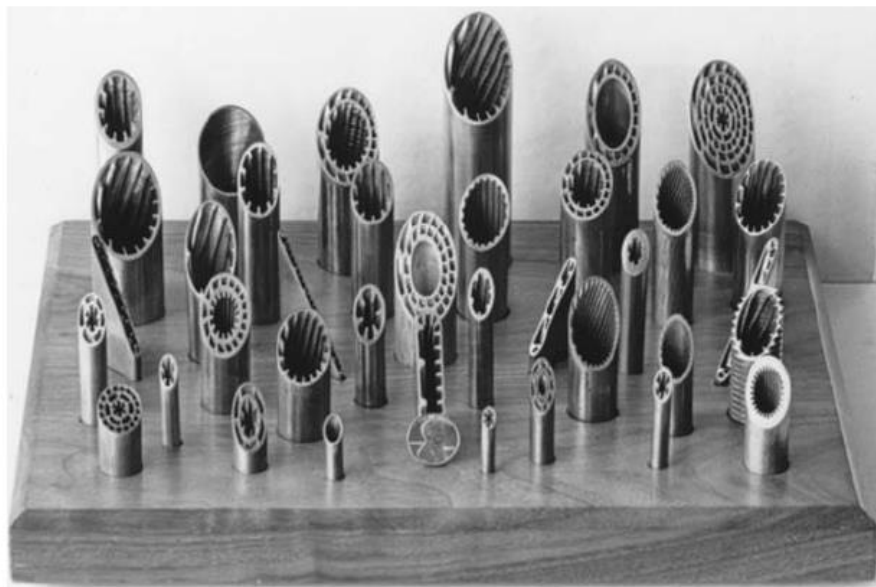


Figure 2 .20 : *Tubes avec ailettes internes.*

2) Échangeurs de chaleur à caloducs :

Ce type d'échangeur est similaire à un tube à ailettes à l'exception que le tube est un caloduc. Le fluide froid circule d'un côté et le fluide chaud de l'autre. La figure 2.21 montre un échangeur de chaleur à caloducs. Le principe de fonctionnement d'un caloduc est que l'une des extrémités est chauffée par une source extérieure, laissant s'évaporer le fluide interne. La pression interne du caloduc augmente puis se dirige vers le côté froid où il se condense et se dépose sur les parois. Avec la hausse de pression, la condensation retourne vers l'évaporateur par capillarité lorsque le caloduc est bien dimensionné. La figure 4.20 illustre ce principe. Ce type d'échangeur est généralement utilisé pour des applications air-air dans la récupération de chaleur perdue.

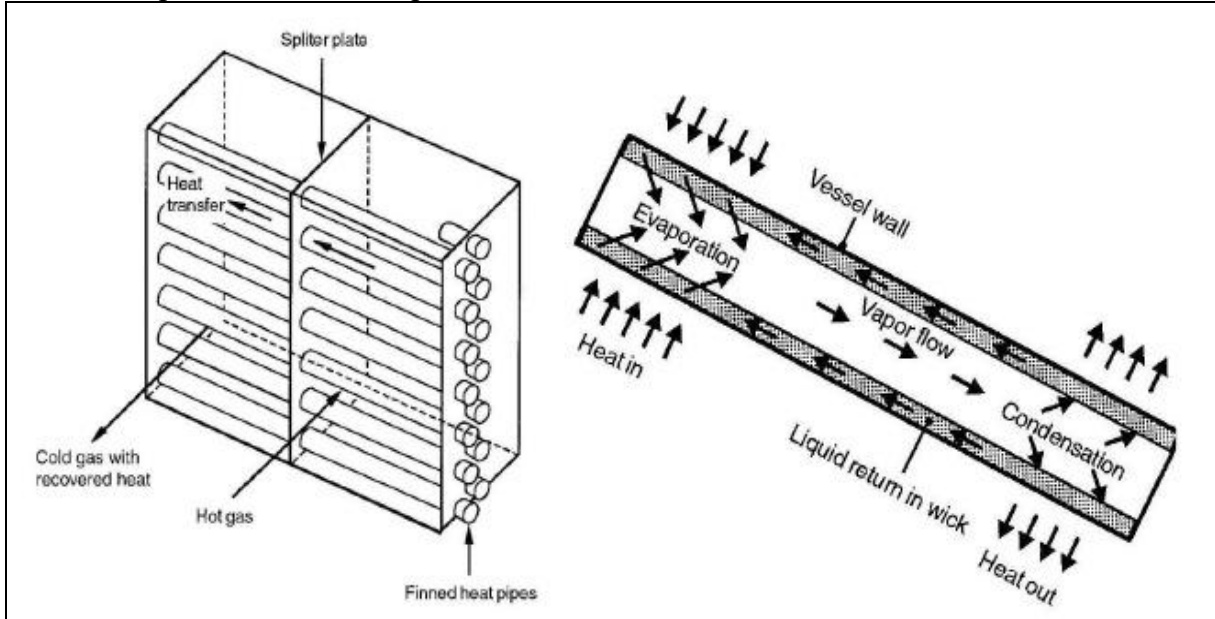


Figure 2 .21 : Échangeur de chaleur à caloducs et son principe.

2.2.4.Échangeurs de chaleur régénératifs rotatifs

L'échangeur thermique rotatif régénératif, communément connu sous le nom de préchauffeur d'air ou réchauffeur de gaz, a été inventé par l'ingénieur suédois Frederick Ljungstrom en 1922. Peu après, Howden et Ljungstrom se sont associés pour commercialiser cette technologie pour l'utiliser dans l'industrie de la production d'énergie électrique.

Dans un échangeur thermique rotatif (figure 2.22), la chaleur est transférée d'un gaz chaud à un gaz froid à travers un cylindre rotatif de feuilles de métal densément assemblées, appelées des lamelles. Ces lamelles sont assemblées dans des conteneurs et tournent lentement dans un flux gazeux et dans l'autre.

Un gaz chaud fluit sur la surface des lamelles métalliques, élevant leur température. Lorsque le rotor tourne, à environ 1 tr/min., les lamelles chauffées se déplacent dans le flux de gaz froid, accroissant sa température.

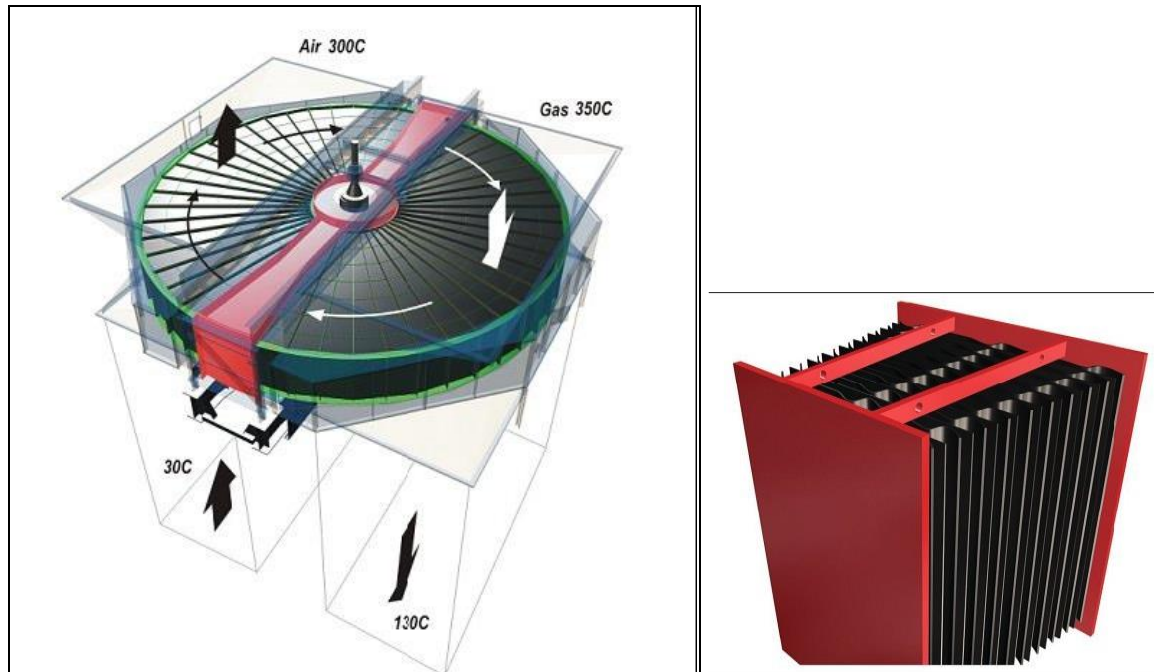


Figure 2 .22 : Schéma d'un échangeur thermique rotatif régénératif (à gauche) et panier de lamelles (à droite)

Les échangeurs thermiques rotatifs sont produits dans diverses tailles selon l'application, mais peuvent avoir un diamètre allant jusqu'à 20 mètres, pour un poids de plus de 800 tonnes. Diverses lamelles sont spécifiquement conçues pour des carburants particuliers ou des applications spéciales, avec des rendements reflétant un équilibre entre la résistance à l'érosion ou à l'encrassement et l'efficacité du transfert thermique.

Dans un préchauffeur d'air rotatif, une perte de gaz à pression supérieure dans le flux gazeux de pression plus basse est inévitable, car des écarts de fonctionnement réduits sont nécessaires entre le rotor et l'enveloppe.

Dans les cas de traitement de grandes quantités de gaz ou d'air, les échangeurs thermiques régénératifs sont une solution extrêmement efficace et compacte. La raison de ceci est que les deux surfaces de chaque élément sont utilisées simultanément pour le transfert thermique lorsqu'elles tournent à travers les côtés de l'air et du gaz de l'échangeur thermique.

Ce type des échangeurs thermiques est destiné pour des applications à grande échelle (grande taille de projet). Il existe trois applications principales pour les échangeurs thermiques rotatifs :

- Chaudières à usage général et industrielles - Préchauffeurs d'air
- Usine de désulfuration de gaz de combustion - Réchauffeurs de gaz
- Installation de "Traitement final" RSC DeNOx - Préchauffeurs de gaz

Pour cette raison, nous excluons la possibilité d'utiliser les échangeurs régénératifs associées au système JEDSAC.

2.3 Fabricants

Le marché des échangeurs de chaleur est bien développé. Afin de simplifier les recherches, le tableau 4.7 montre plusieurs fabricants ainsi que le type d'échangeurs qu'ils fabriquent.

<i>Fabricants</i>	<i>Produits</i>
Allegheny Bradford Corp	Tubes et calandre
Bowman [BOW]	Tubes et calandre Échangeurs à plaques
Caron et fils [CAR]	Tubes et calandre Serpentins
DDI [DDI]	Tubes et calandre
Enerfin [ENE]	Tubes à ailettes extrudées Serpentins industriels Tubes et calandre Systèmes refroidisseurs
Thermodin [THE]	Échangeurs à plaques et joints Échangeurs à plaques brasées Tubes à ailettes extrudés Tubes pour caloducs Serpentins Tube et calandre
Tranter [TRA]	Échangeurs à plaques
WCR [WCR]	Échangeurs à plaques Tubes et calandre

Tableau 2.6 : *Fabricants d'échangeurs de chaleur*

2.4 Échangeurs avec un fluide changeant de phase

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

2.4.1 Évaporateurs tubulaires

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

Il existe deux types d'évaporateurs, qui sont :

Évaporateurs à l'intérieur de tubes

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

a) Évaporations à tubes verticaux

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

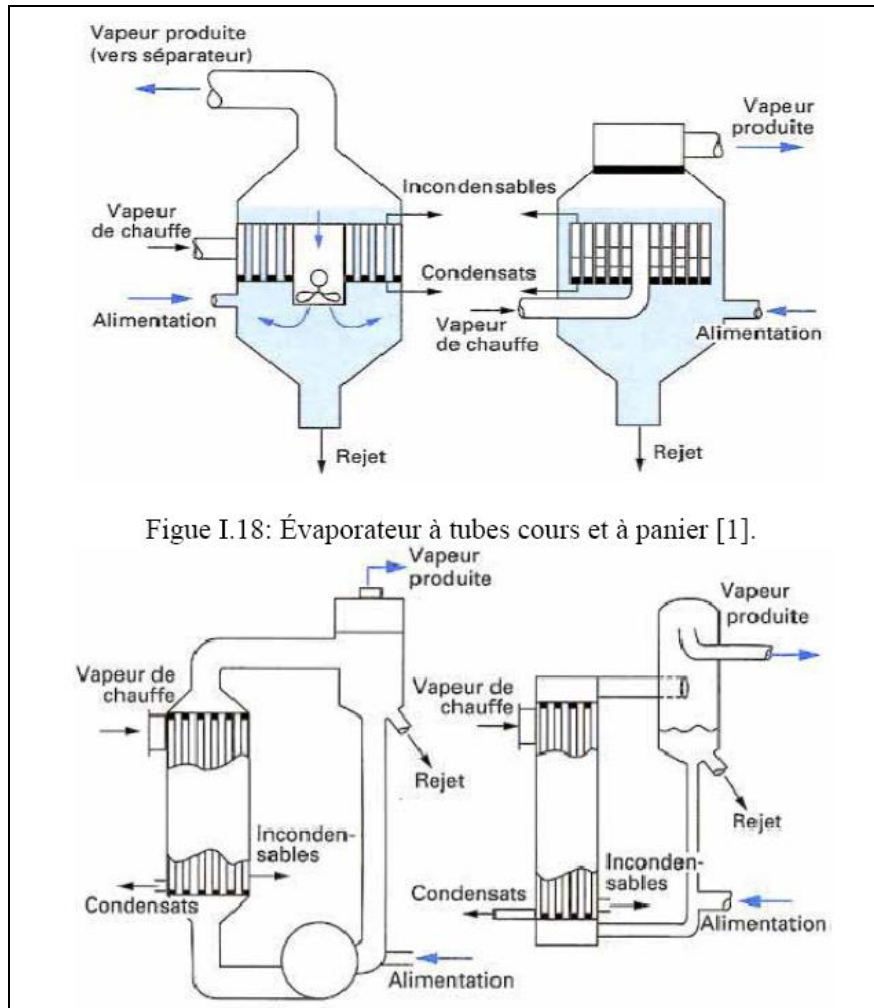


Figure I.18: Évaporateur à tubes courts et à panier [1].

Figure 2 .23 : Évaporateur à longs tubes verticaux et à grimpage .

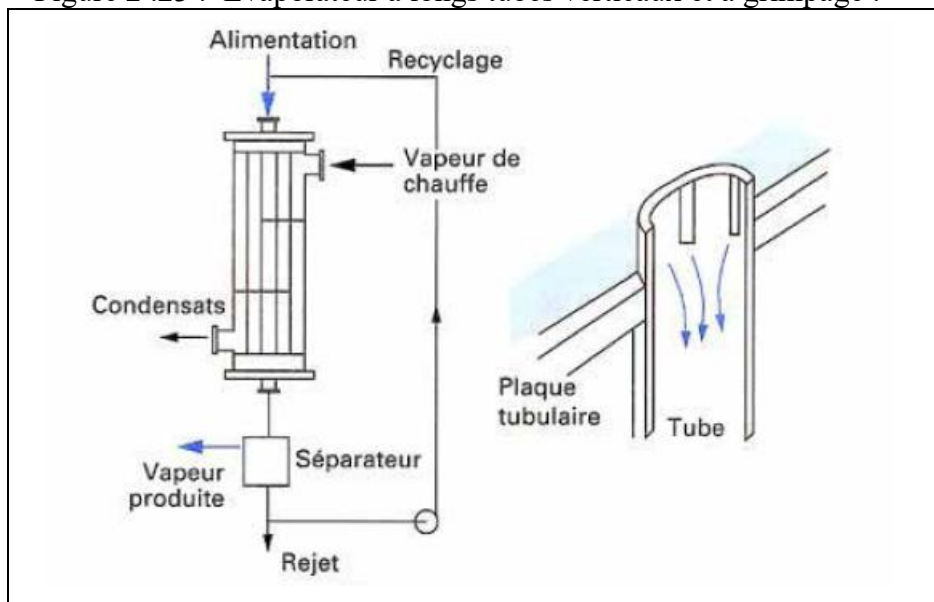


Figure 2 .24 Évaporateur à tube tombant.

b) Évaporateurs à tubes horizontaux

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

Évaporation à l'extérieur de tubes

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

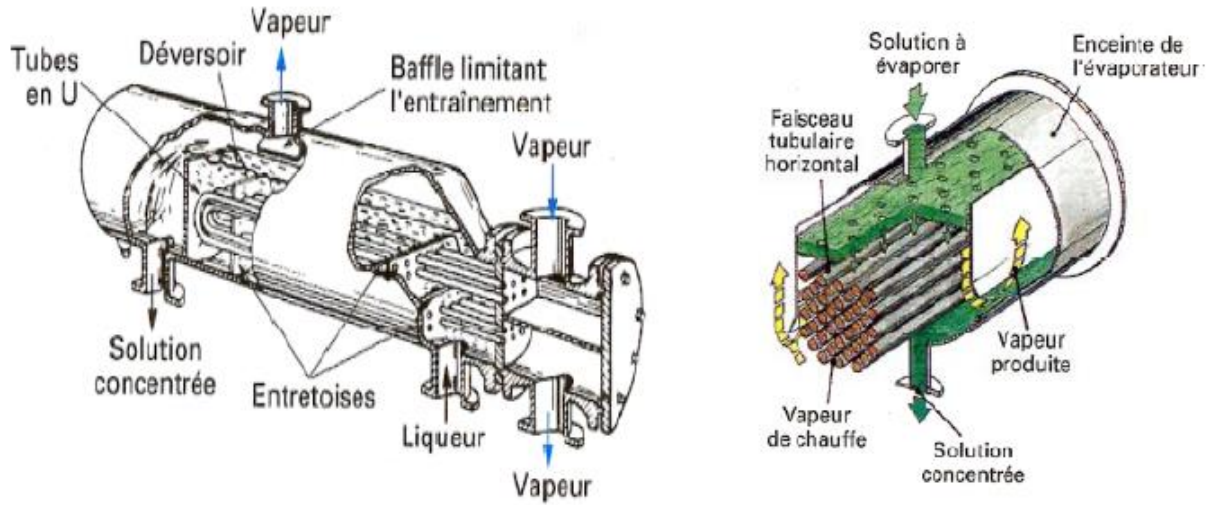


Figure 2.24 : Évaporateur noyés et arrosés.

2.4.2 Condenseurs tubulaires

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

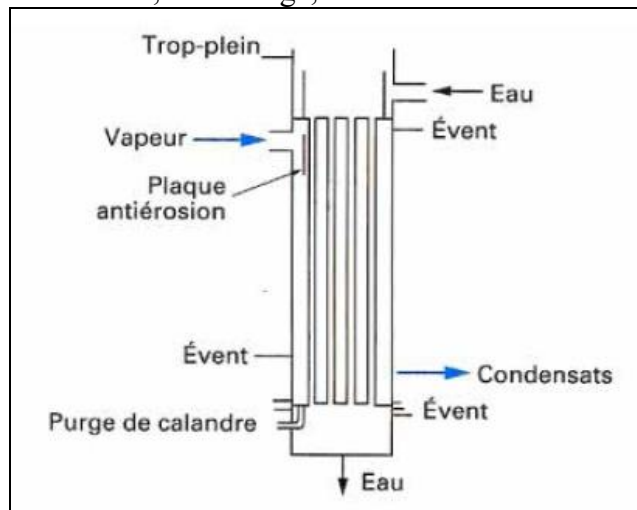


Figure 2.25 : Condensation extérieure aux tubes

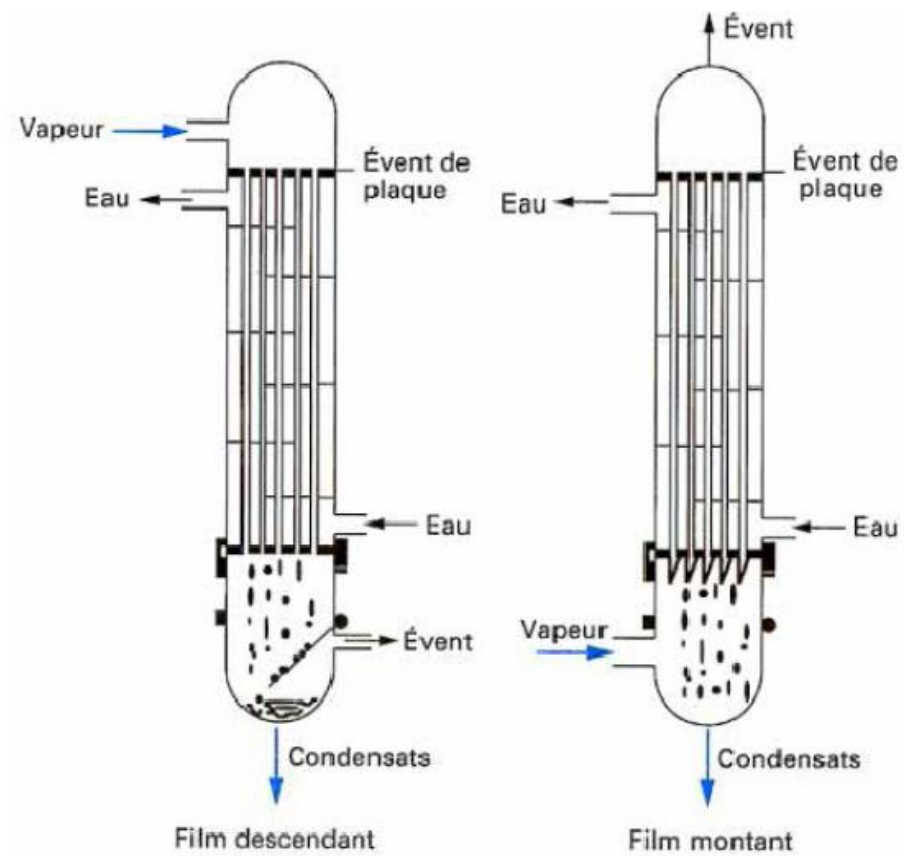


Figure 2 .26 : Condensation intérieur aux tubes