

Chapitre I

Généralités sur les échangeurs de chaleur

Introduction

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. [5]

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.

I.1. Généralités sur les échangeurs de chaleur

I.1.1 Définition générale

Comme leur nom l'indique, les échangeurs thermiques sont des dispositifs destinés à favoriser l'échange thermique entre deux fluides, sans que les fluides ne se mélangent. [6]

Le principe le plus général consiste à faire circuler deux fluides à travers des conduits qui les mettent en contact thermique. De manière générale, les deux fluides sont mis en contact thermique à travers une paroi qui est le plus souvent métallique ce qui favorise les échanges de chaleur. On a en général un fluide chaud qui cède de la chaleur à un fluide froid.[5]

Généralement pour assurer efficacement cet échange de chaleur au moins un des fluides est mis en mouvement (pompe, ventilateur). Pour augmenter cet échange, et donc le transfert d'énergie, il peut être fait appel au changement de phase (condenseurs, évaporateurs, bouilleurs...) système utilisé couramment dans les machines thermiques ou le caloduc.

I.1.2 Aspect externe d'un échangeur de chaleur [7]

Vu de l'extérieur, un échangeur se présente comme une boîte noire pourvue, comme un quadripôle électrique, de deux entrées et de deux sorties. Il est bien commode de mesurer les caractéristiques essentielles du fonctionnement de l'échangeur à l'un de ces quatre pôles, plutôt que de faire des mesures forcément plus délicates à l'intérieur. C'est ainsi que nous établirons pour chacun des fluides 1 ou 2 des paramètres mesurables et mesurés à l'entrée et à la sortie de chacun des deux :

- l'état : liquide, gazeux ;
- le débit-masse, constant de l'entrée à la sortie ;

- la température, variable dans l'échangeur ;
- la pression, peu variable.

Il est entendu que l'on connaît par ailleurs les caractéristiques thermophysiques de chacun des deux fluides et notamment :

- la capacité thermique massique (chaleur massique) c_p ;
- la masse volumique ρ ;
- la conductivité thermique λ ;
- la viscosité μ ;

Ainsi que les lois de variation avec la pression, et surtout avec la température, de ces différents paramètres.

Pour les fluides C_p , μ et λ varient peu avec la pression p (pas du tout pour un gaz parfait). En revanche, les variations avec la température T sont souvent d'une grande amplitude.

Par ailleurs, et comme les différents paramètres qui gouvernent le fonctionnement de l'échangeur ont aux entrées-sorties des valeurs privilégiées parce que aisément mesurables, une théorie du fonctionnement interne visera donc à calculer pour chacun des fluides les paramètres essentiels de l'évolution en fonction précisément des valeurs aux entrées-sorties.

Le schéma de principe (figure 1) serait cependant fort incomplet s'il n'y était adjoint, extérieurement au quadripôle, deux pompes (ou ventilateurs) destinées à mettre en mouvement les fluides 1 et 2 à l'intérieur de l'échangeur, en générant pour chacun des fluides entre l'entrée et la sortie une différence de pression égale à la perte de pression visqueuse à l'intérieur de l'échangeur.

Cette perte de pression (perte de charge) dépend pour chacun des fluides :

- de la nature du fluide ;
- de sa température : le coefficient de viscosité qui gouverne cette perte de pression y est très sensible ;
- de son débit et de la géométrie interne de l'échangeur. Cette variation de pression pour le fluide considéré se fait autour d'une pression moyenne qui est la pression de service.

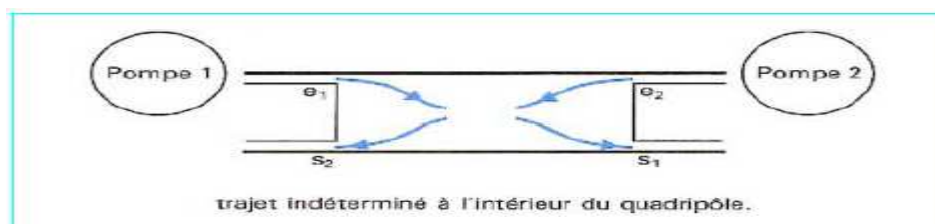


Fig.I.1. Schéma du quadripôle [7]

I.1.3 Aspect interne d'un échangeur de chaleur [7]

Que se passe-t-il à l'intérieur du quadripôle ? Il faut, pour le savoir, suivre l'évolution thermique d'un élément de volume dt d'un des fluides qui circule en trois dimensions (x, y, z) . Souvent, grâce aux notions de la température de mélange et de la vitesse de débit on pourra repérer l'élément par sa seule abscisse curviligne s depuis l'entrée jusqu'à la sortie après un trajet de longueur L .

L'évolution de ce fluide est évidemment couplée à celle du deuxième fluide et les deux calculs doivent donc être concomitants.

En général la section droite de passage A d'un fluide est constante de 0 à L en exceptant les zones de distribution ou de collectage du fluide au voisinage de l'entrée ou de la sortie.

Cette section A , éventuellement somme des différentes sections droites des canaux élémentaires si plusieurs de ceux-ci sont montés en parallèle, est limitée par un périmètre mouillé P_m du canal ou de l'ensemble des canaux...

La partie de ce périmètre qui se trouve sur la paroi d'échange qui sépare les deux fluides est appelée périmètre thermique P_t . Dans certains cas, le périmètre thermique est égal au périmètre mouillé.

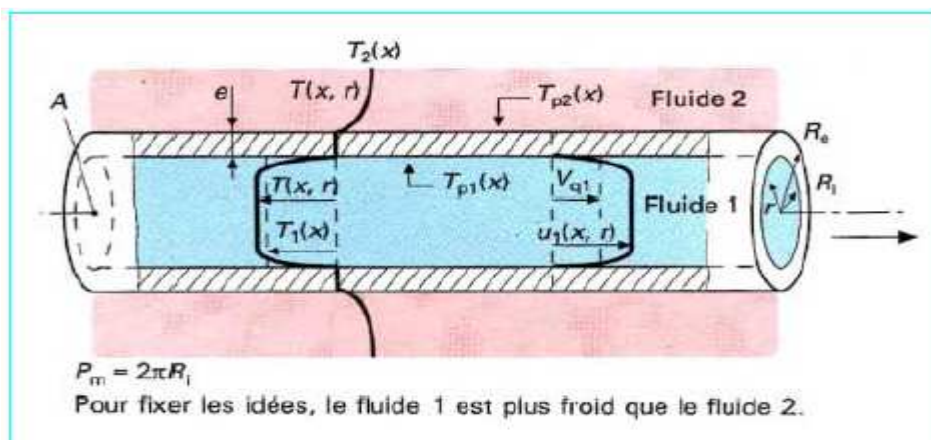


Fig.I.2 Profil de température et de vitesse dans un tube [7]

I.2 Critères de classification des échangeurs de chaleur

Il existe plusieurs critères de classification des échangeurs de chaleur dont les plus importants sont cités ci-dessous :

I.2.1. Classification selon la technologie

Les principaux types d'échangeurs rencontrés sont les suivants : [7]

- A tubes : monotubes, coaxiaux ou multitubulaires ;

- A plaques : à surface primaire ou à surface secondaire ;
- Autres types : contact direct, à caloducs ou à lit fluidisé.

I.2.2. 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.[7]

I.2.3. Classification suivant le procédé de transfert de chaleur

Suivant qu'il y a ou non stockage de chaleur, on définit un fonctionnement en récupérateur ou en régénérateur de chaleur :[9]

- Transfert sans stockage, donc en récupérateur, avec 2 ou n passages et un écoulement en général continu ;
- Transfert avec stockage, donc en régénérateur, avec un seul passage et un écoulement intermittent, la matrice de stockage étant statique ou dynamique

I.2.4. Classification fonctionnelle

Le passage des fluides dans l'échangeur peut s'effectuer avec ou sans changement de phase ; suivant le cas, on dit que l'on a un écoulement monophasique ou diphasique. On rencontre alors les différents cas suivants : [7]

- Les deux fluides ont un écoulement monophasique ;
- Un seul fluide à un écoulement avec changement de phase, cas des évaporateurs ou des condenseurs ;
- Les deux fluides ont un écoulement avec changement de phase, cas des évapo-condenseurs

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

On retiendra deux types de parois :[7]

- 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.

I.3 Principaux types d'échangeur de chaleur

On peut classer les échangeurs de chaleur en trois grandes familles qui sont énumérer ci-dessous : [8]

- Les échangeurs par mélange ou à contact direct

Fluide intimement mélangé

- Les désurchauffeurs de vapeur
- Les dégazeurs
- Les tours de refroidissement à convection naturelle ou forcée
- Les ballons de détente de purges

- Les régénérateurs ou les échangeurs discontinus

- La surface d'échange est alternativement mise en contact
- Avec le fluide froid et le fluide chaud
- Réchauffeurs d'air rotatifs

- Les échangeurs continus

Les deux fluides circulent de manière continue de part et d'autre de la surface d'échange

- Echangeurs tubulaires
- Echangeurs à plaques
- Echangeurs à ailettes

Mais dans ce qui suit on ne va s'intéressé qu'au cas des échangeurs continus constitués d'échangeurs tubulaires, à plaques ou à ailettes.

I.3.1. Echangeurs tubulaires

Un échangeur tubulaire simple est constitué de deux tubes cylindriques coaxiaux. Un fluide (généralement le chaud) circule dans le tube intérieur, l'autre dans l'espace compris entre les deux tubes. Le transfert de chaleur du fluide chaud au fluide froid s'effectue à travers la paroi qui constitue le tube intérieur. [9]

Ils sont constitués de tubes dont la paroi forme la surface d'échange. Ils comportent soit un tube unique (serpentin), soit deux tubes coaxiaux (échangeurs bitubes), soit un faisceau de tubes enferme dans une enveloppe appelée calandre. [10]

a. Echangeurs << double-tubes >>

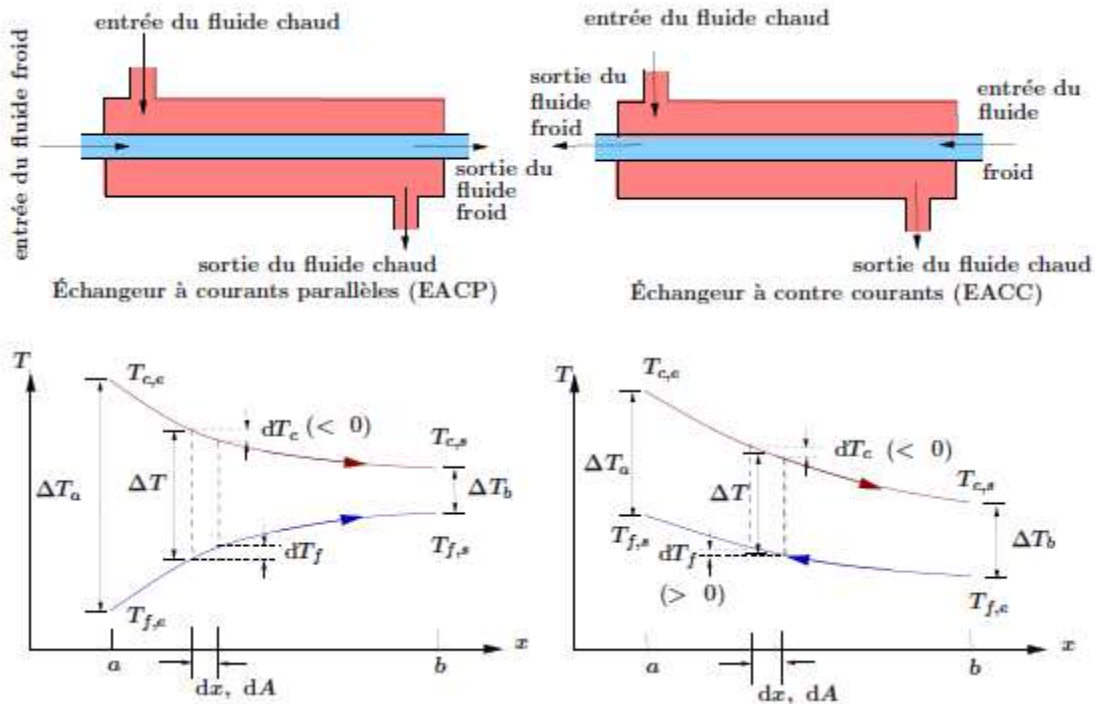


Fig.I.3. Schéma d'un échangeur bitube [8]

b. Echangeurs à faisceau tubulaires

En ce qui concerne les échangeurs à faisceau de tubes et calandre, on peut citer parmi les dispositions les plus courantes le faisceau rectiligne et le faisceau en U, ce dernier mieux adapté aux forts gradients de température puisqu'il permet une libre dilatation des tubes. L'implantation de chicanes transversales permet d'allonger le trajet du fluide en calandre et d'augmenter le flux échangé.

Il n'y a pas de règles générales pour fixer la disposition relative des circuits chaud et froid. On fera plutôt circuler le fluide chaud dans les tubes si on veut limiter les déperditions thermiques ; de même la circulation en tubes sera recommandée s'il s'agit d'un fluide agressif. Les matériaux employés pour la réalisation des tubes sont le plus souvent métalliques (acier, laiton). Les céramiques se développent dans la circulation des fluides à haute température. Les tubes en plastique (généralement de très petit diamètre) sont également utilisés, soit en faisceaux, soit intégrés dans des plaques minces qui leur servent de raidisseurs. [10]

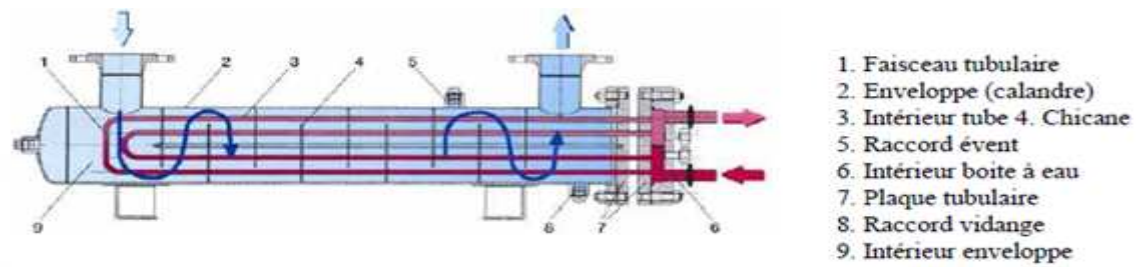


Fig. I.4. Schéma d'un échangeur à faisceau tubulaire [8]

c. Echangeur monotube

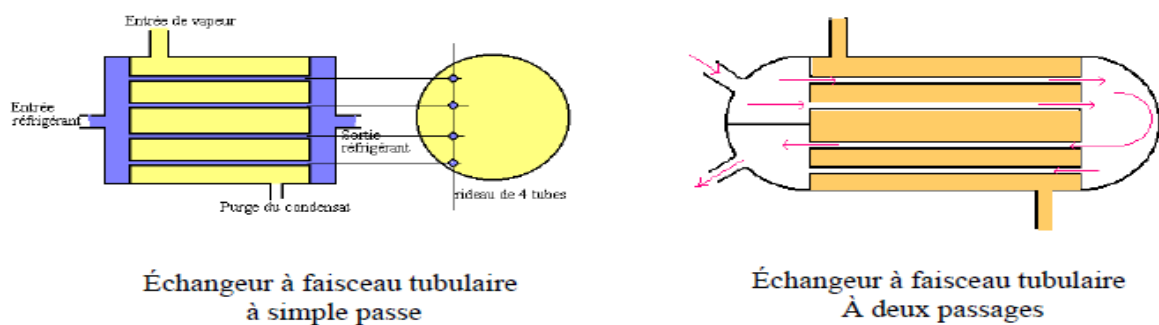


Fig. I.5. Schéma d'un échangeur monotube [8]

I.3.2. Echangeur à plaque

Les échangeurs à plaques sont constitués de plaques formées dont les alvéoles constituent les chemins empruntés par les fluides. Les plaques sont assemblées de façon que le fluide puisse circuler entre elles. La distribution des fluides entre les plaques est assurée par un jeu de joints de telle sorte que chacun des deux fluides soit envoyé alternativement entre deux espaces interplaques successifs.

Les fluides peuvent ainsi échanger de la chaleur à travers les plaques. L'avantage principal de ce type d'échangeur est la compacité. En effet, on voit bien que ce dispositif permet une grande surface d'échange dans un volume limité, ce qui est particulièrement utile lors des utilisations nécessitant des puissances importantes.

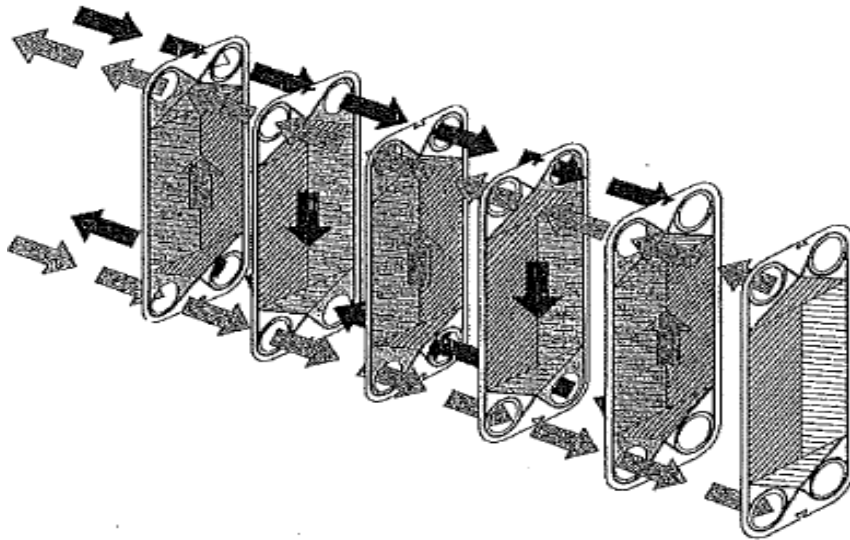


Fig. I.6. Echangeurs à plaques

I.3.3. Les échangeurs de chaleur à ailettes

Ces tubes permettent d'améliorer le coefficient d'échange thermique

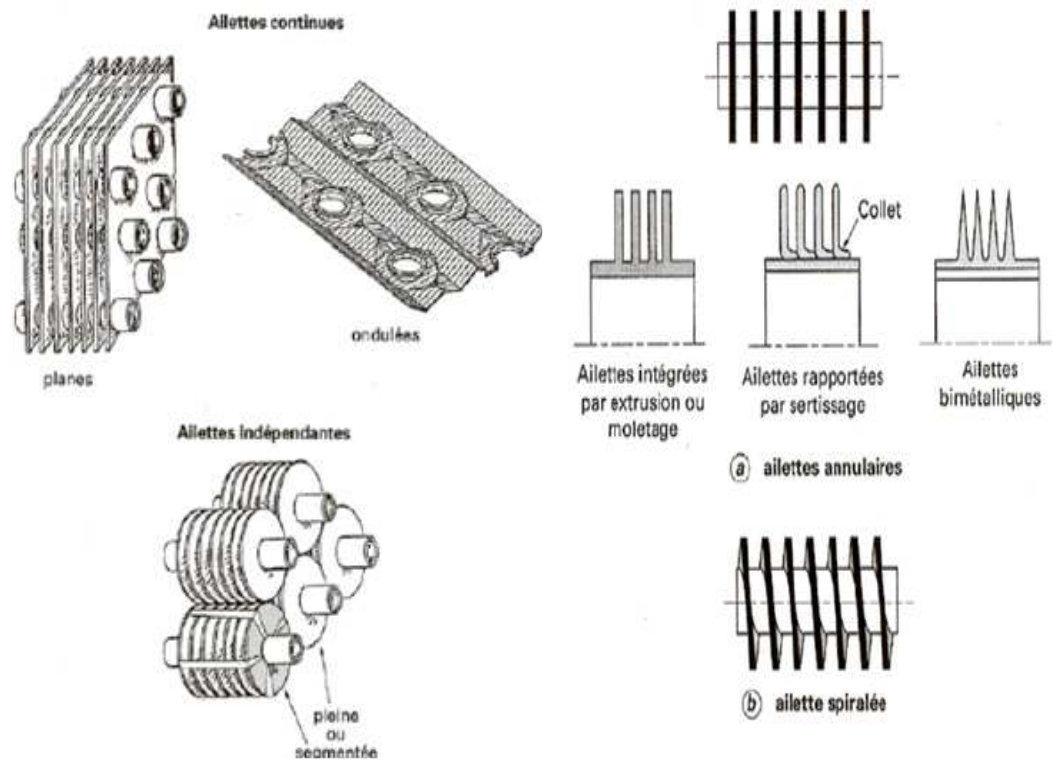


Fig. I.7. Schéma d'un échangeur à ailette [8]

I.3.4. Les échangeurs à changement de phase

Les échangeurs à changement de phase sont des échangeurs qui changent l'état physique du fluide. Ils sont au nombre de deux : le condenseur et l'évaporateur et sont dans la plupart des cas des échangeurs tubulaire

a. Condenseur :

Les condenseurs sont dans la plupart des cas des appareils faisceaux tubulaires. Construits selon les mêmes plans que les échangeurs, de sorte que toutes les caractéristiques géométriques de ces derniers resteront valables.

C'est un échangeur dans lequel le fluide frigorigène cède la chaleur dégagée par le changement de phase (la condensation) au fluide chargé d'évacuer cette chaleur : ce fluide peut être de l'air ou de l'eau. [11]

a.1. Le condenseur à air

Le fluide frigorigène parcourt un tube en serpentin balayé par le flux d'air de refroidissement.

L'échange de chaleur par convection étant limité :

- Le tube est muni d'ailettes qui en augmentent la surface d'échange ;
- Le flux d'air est pulsé par un ventilateur qui crée un écoulement turbulent favorable à la convection

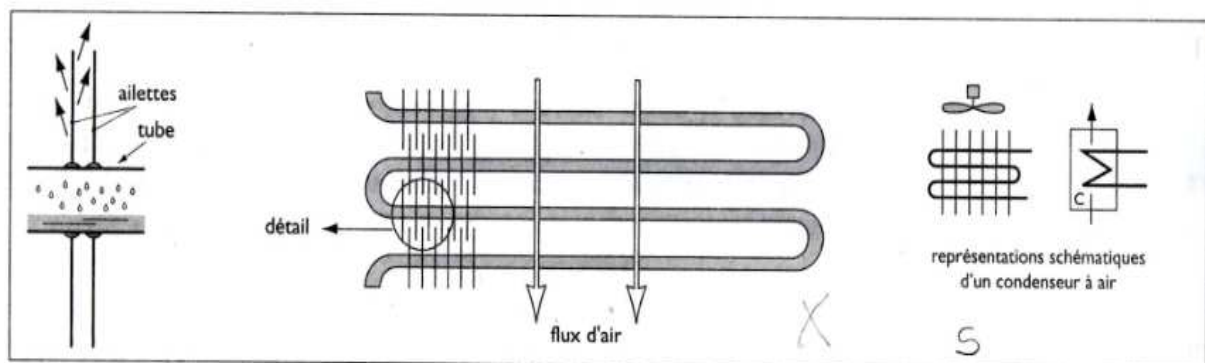


Figure I.8: condenseur à air [11]

Les condenseurs à air couvrent une gamme étendue de puissance, qui s'échelonne de quelques kilowatts à plusieurs centaines de kilowatts. L'implantation de ces appareils peut être limitée par leur niveau sonore élevé, chaque fois qu'un gêne pour le voisinage est à craindre.

a.2. Le condenseur à eau

L'échange de chaleur s'opère entre deux tubes concentriques : le tube intérieur est parcouru par le fluide frigorigène, le tube extérieur par de l'eau de refroidissement. Les deux tubes sont enroulés en spirale pour réduire l'encombrement.

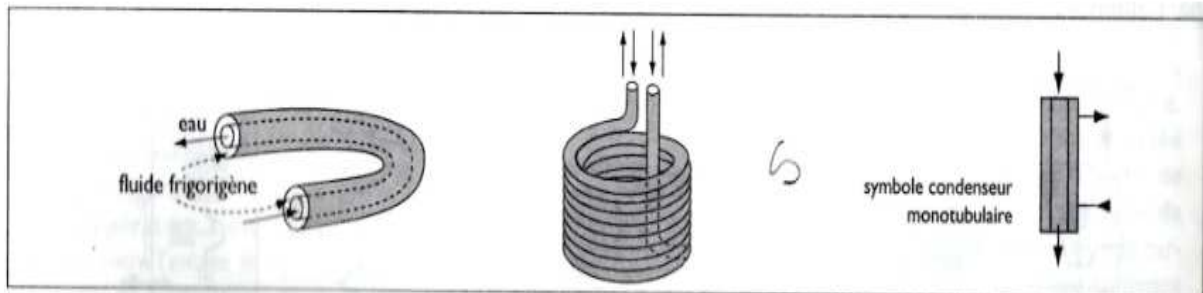


Figure I.9: condenseur à tubes concentriques [11]

Dans le condenseur multitubulaire le faisceau du tube est parcouru par l'eau de refroidissement. Le fluide frigorigène se condense à la surface des tubes, puis recueilli au fond de l'appareil en phase liquide.

L'eau utilisée pour évacuer la chaleur produite dans le condenseur par le changement d'état du fluide frigorigène peut être :

- De l'eau perdue en provenance d'une distribution publique ; c'est une solution coûteuse applicable à de petits appareils (quelques kW), qui est prescrite dans les régions à faible ressource en eau ;
- De l'eau recyclée qui cède la chaleur transmise : dans un aéroréfrigérant, aussi appelé tour de refroidissement, fonctionnant en circuit ouvert ou en circuit fermé, ou un échangeur sec (dry-cooler).

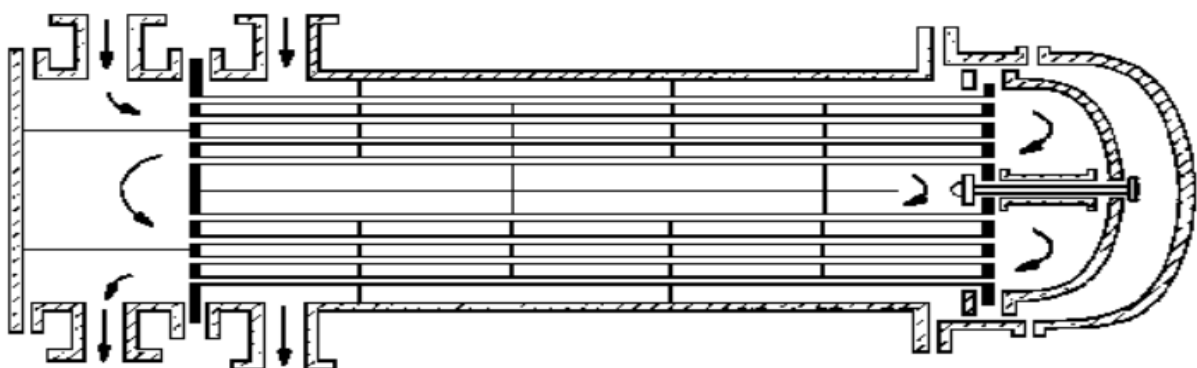


Figure I.10. : condenseur multitubulaire [11]

- **Circuit ouvert**

Le circuit de refroidissement communique avec l'air (circuit ouvert)

L'eau admise à la partie supérieure de l'aéroréfrigérant est pulvérisée sur le corps d'échange où elle ruisselle en cédant sa chaleur sensible au flux d'air ascendant.

L'évaporation d'une fraction de l'eau contribue à l'abaissement de température, en absorbant de la chaleur latente de vaporisation.

Le système présente l'inconvénient de transmettre au circuit de refroidissement les impuretés de l'air. Ce circuit est en outre soumis à une corrosion importante.

- **Circuit fermé**

Le circuit de refroidissement ne communique pas l'air (circuit fermé)

Le circuit à refroidir traverse un ensemble de tubes disposés dans le flux d'air. Il est exposé au ruissellement du second circuit, qui améliore l'échange de chaleur en permettant une évaporation d'une fraction du débit recyclé.

La présence du faisceau de tube abaisse le rendement du système par rapport au mode de fonctionnement ouvert, car il crée un écart de température entre l'air et le circuit de refroidissement.

b. L'évaporateur

C'est également un échangeur de chaleur qui prélève la chaleur véhiculée par le fluide à traiter, pour donner, après transfert au fluide frigorigène, la vaporisation de ce dernier. Il existe des évaporateurs à air et à eau. [11]

b.1 Évaporateur à air

Il est constitué par un tube en serpentin (faibles puissances), ou une batterie de tubes reliés à des collecteurs pour les puissances plus importantes. Les tubes sont disposés en quinconce selon des nappes successives. Des ailettes favorisent l'échange et assurent l'écoulement de l'eau produite par condensation de la vapeur d'eau présente dans l'air à traiter.

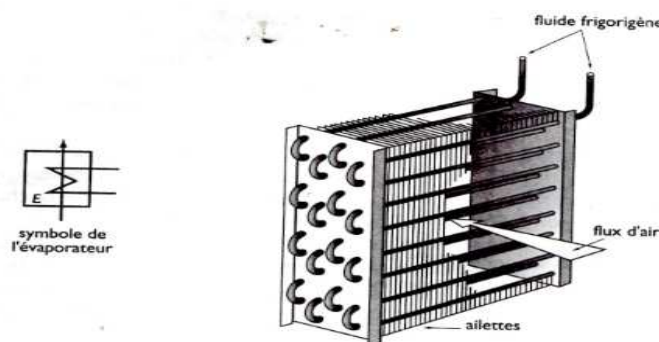


Figure I.13.: Evaporateur à air de faible puissance.[11]

b.2 Evaporateur à eau

Il est du type à faisceau tubulaire, parcouru :

- Soit par le fluide frigorigène ; dans ce cas le fluide à traiter circule dans l'enveloppe ;
- Soit par le fluide à traiter ; dans ce cas le fluide frigorigène circule dans l'enveloppe.

I.4 Caractéristiques géométriques des écoulements

En préalable à l'exposé des méthodes et des modèles de calcul, il est indispensable de présenter sommairement les principales dispositions géométriques qui sont retenues dans la réalisation des échangeurs de chaleur, car elles conditionnent évidemment la nature des écoulements et le calcul des transferts thermiques.

I.4.1. Disposition des écoulements

Dans les échangeurs à fluides séparés, les modes de circulation des fluides peuvent se ranger en deux grandes catégories : [10]

Ou bien les vecteurs vitesses des écoulements sont approximativement parallèles

- s'ils sont de même sens. les écoulements sont dit "co- courant"
- s'ils sont de sens contraire, les écoulements sont dit "contre -courant"-.

Ou bien les vecteurs vitesses sont en moyenne perpendiculaires l'un a l'autre : s'agit cette fois de courants croisés".

Dans ce dernier cas. L'un des fluides peut être "brassé"(ou mélangé) : sa veine est subdivisée en un certain nombre de chemins qui s'entrecroisent (par exemple lorsque l'écoulement est perpendiculaire à un faisceau de tubes). Le brassage a pour effet d'homogénéiser les températures et d'augmenter le transfert de chaleur.

En pratique, il n'est toujours pas évident que l'on se trouve dans l'une des trois configurations précédentes. Aussi, pour un calcul de dégrossissage, on se ramènera au cas qui paraîtra le plus proche du cas étudié.

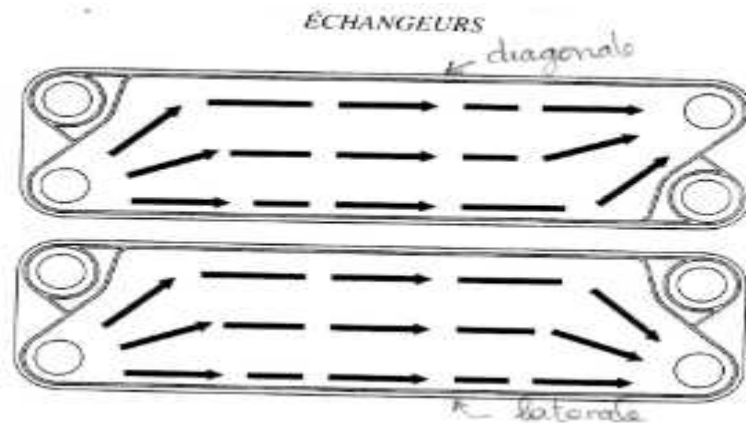


Fig. I.14. Echangeur à plaques : a- circulation diagonale
b- circulation latérale (d'après C.Roussel) [10]

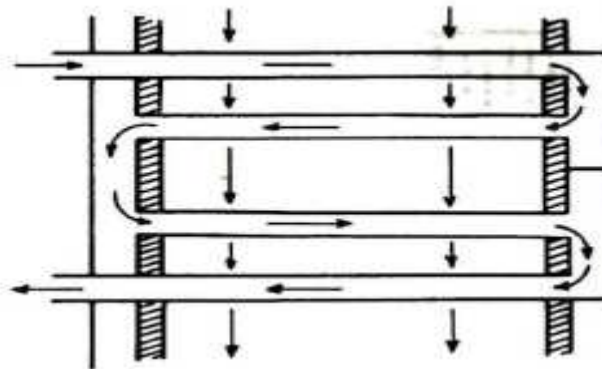


Fig. I.15. : Schéma d'échangeur tubulaire à courants croisés [10]

1. Aspect structurels dans la conception des échangeurs

Les géométries d'échangeurs sont très diverses ; chacune définit des circulations, parfois complexes pour les deux flux. [10]

Les cas simples qui servent de référence sont :

- Echangeur à flux parallèles à co-courant
- Echangeur à flux parallèles à contre-courant
- Echangeur à courant croisé

Sans entrer dans des considérations trop technologiques, on doit néanmoins citer les deux structures essentielles qui sont à la base de la conception des échangeurs : structure "à modules" et structure "à passes".

a. Echangeurs à modules

Un échangeur à modules est constitué de plusieurs cellules élémentaires identiques, et il se caractérise donc par une périodicité géométrique. On peut alors se limiter à l'étude d'une seule cellule, [assemblage de plusieurs modules permettant de reconstituer tout

l'appareil. Parmi les principaux modèles d'échangeurs modulaires, citons les appareils à méandres, les appareils à faisceau de tubes et chicanes, les appareils à spirales et les échangeurs à plaques. [10]

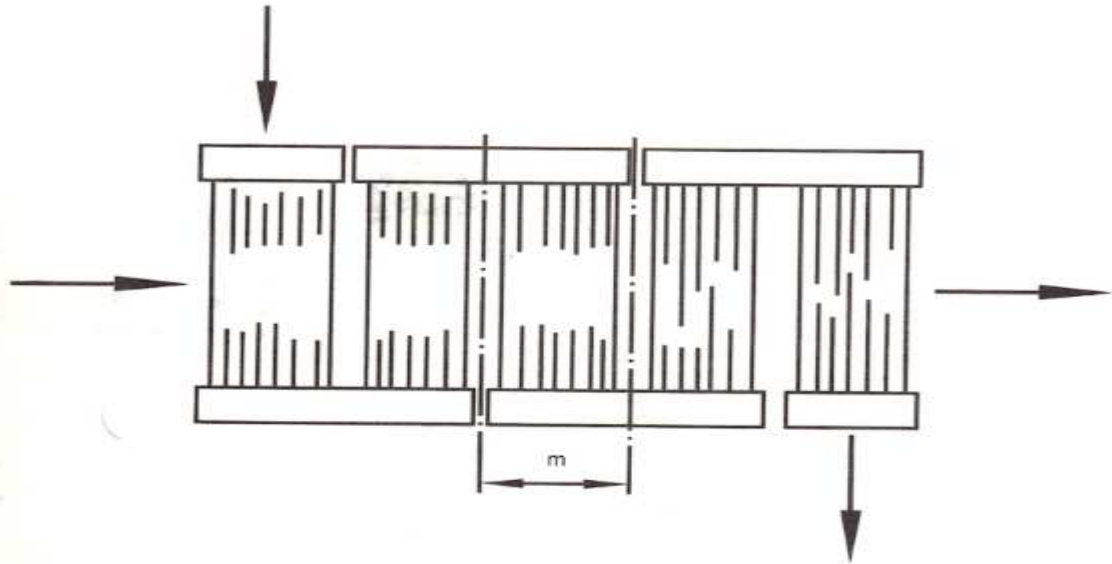


Fig. I.16. Schéma d'un échangeur à méandres a 5 modules (m : modules) [10]

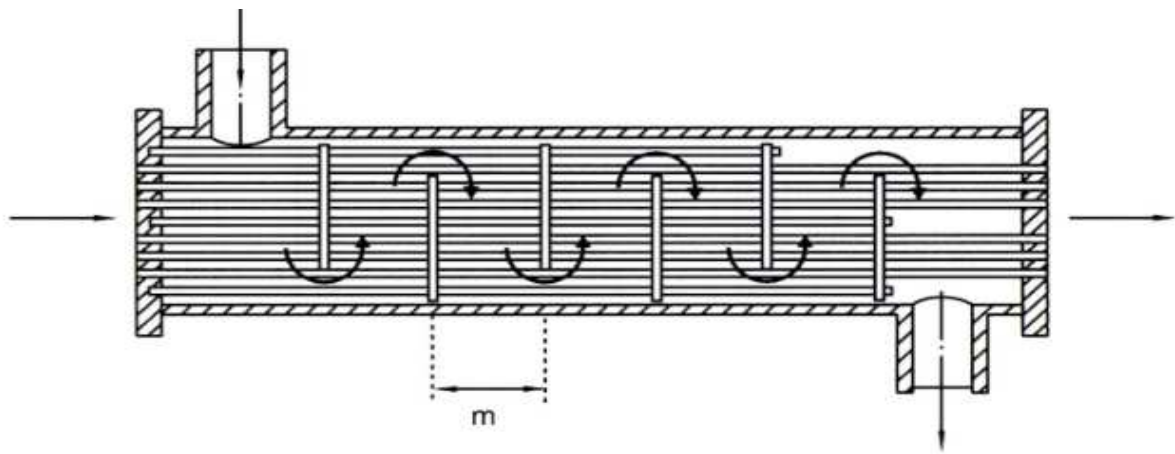


Fig. I.17. : Echangeur tubulaire à chicanes (m : module) [10]

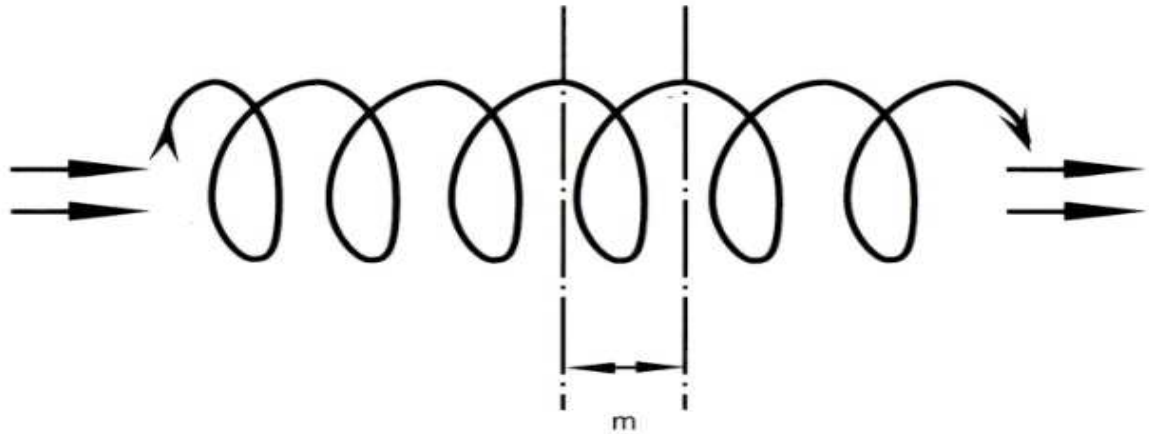


Fig. I.18. : Echangeur à tube en spirale (m : module) [10]

b. Echangeurs à passes

On désigne par "passe" une traversée de l'échangeur par l'un des fluides. Parmi les échangeurs à passes, la famille la plus représentative regroupe les modèles de type P-N. Ce sont en général des appareils à faisceau de tubes et calandre, dans lesquels chacun de deux fluides traverse une ou plusieurs fois le volume d'échange. Le fluide qui circule dans la calandre (donc à l'extérieur des tubes) passe P fois dans le volume d'échange, et le fluide contenu dans les tubes le traverse N fois (c'est-à-dire qu'il effectue $N/2$ aller retours). On dit que l'échangeur est à P passes coté calandre et à N passes coté tubes. A titre d'exemple la figure suivante représente un schéma d'échangeur 2-4. [10]

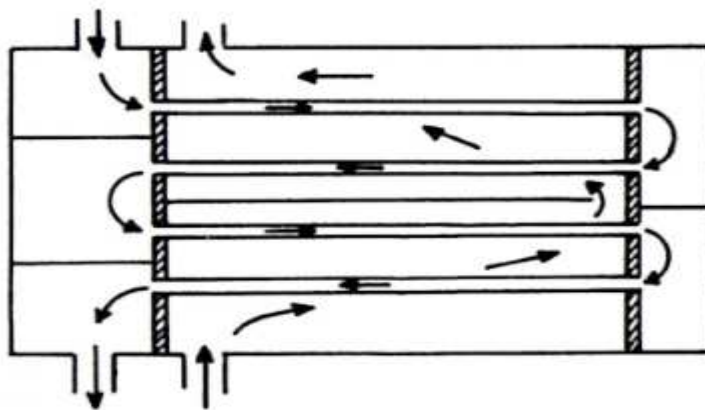


Fig. I.19. : Exemple d'échangeur P-N : P= 2, N= 4 (d'après A.Bouvenot) [10]

Le modèle P-N le plus courant est l'échangeur 1-N : le fluide situé coté calandre ne traverse celle-ci qu'une fois, tandis que le fluide qui circule dans les tubes la traverse N fois.

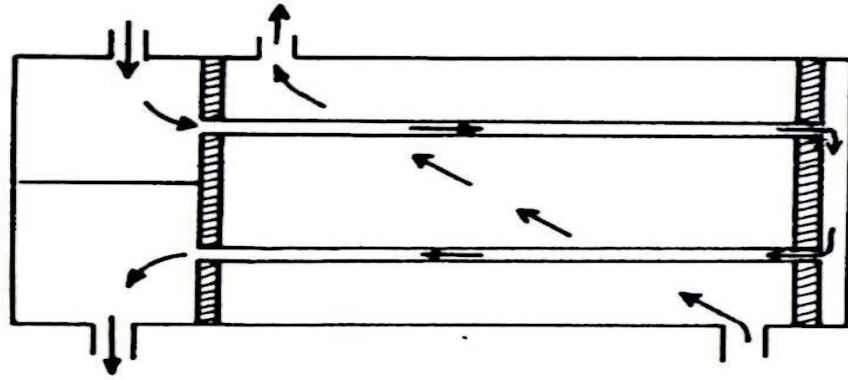


Fig. I.20. : Schéma d'échangeur 1-N ($N=2$) (d'après A.Bouvenot) [10]

La notion de passe s'applique également à d'autres modèles, et en particulier aux échangeurs à plaques dans lesquels on rencontre des configurations mono passes (avec distribution en U ou en Z) ou multi passes. Du point de vue thermique, on notera que la distribution en U est meilleure que la distribution en Z.

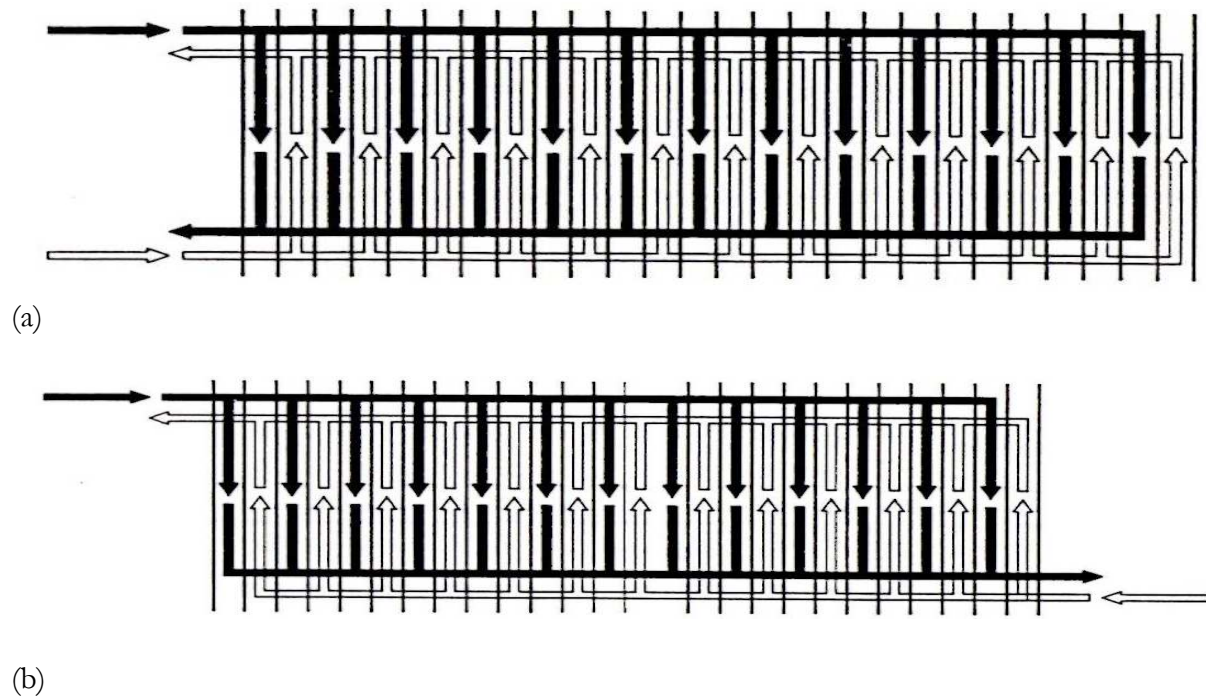


Fig. I.21. : Distributions mono passes dans un échangeur à plaques : [10]

a- distribution en U ; b- distribution en Z (d'après C.Roussel)

La distinction entre passes et modules est parfois un peu subtile, mais ces deux notions sont cependant bien utiles pour simplifier certains calculs. On peut dire que échangeurs modulaires et échangeurs P-N relèvent a priori de conceptions différentes, comme le montrent les exemples précédents : un échangeur à modules peut être de type P-N (comme par exemple l'échangeur tubulaire à chicanes) mais cela n'a rien de systématique. Inversement, un échangeur P-N n'est pas forcément constitué de modules identiques. Parfois, il peut y avoir recouvrement entre passe et module : [10]

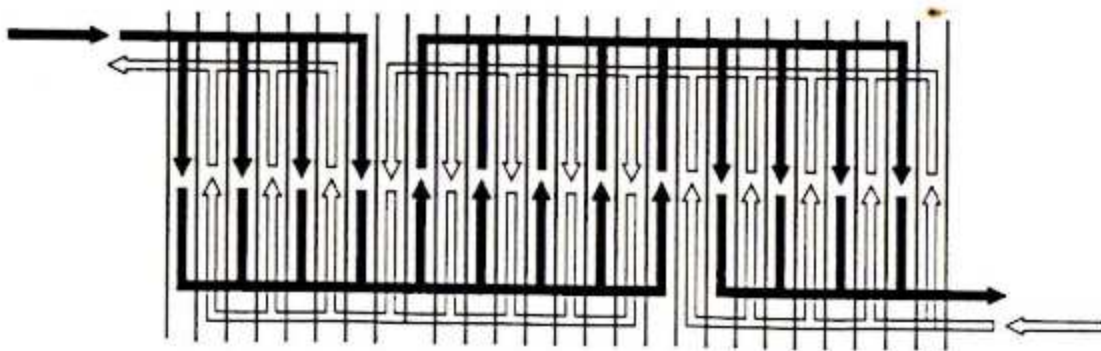


Fig. I.22. : Echangeur à plaques : exemple de distribution à 3 passes sur chaque fluide (d'après C.Roussel). [10]

Conclusion

Les échangeurs de chaleurs sont utilisés 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 utilisée permet un gain de rendement et d'énergie des procédés.

