

Chapitre 1

CARACTÉRISTIQUES GÉOMÉTRIQUES DES ÉCHANGEURS

Pascal combattait ses maux de tête par la géométrie. Moi, je combattais la géométrie en faisant semblant d'avoir mal à la tête.

Tristan BERNARD

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, car elles conditionnent évidemment la nature des écoulements et le calcul des transferts thermiques. Par contre, nous laissons de côté les aspects technologiques, pour lesquels on consultera avec profit certains des ouvrages cités en bibliographie.

1.1. – ÉCHANGEURS À FLUIDES SÉPARÉS : LES GRANDES FAMILLES

Nous ne considérons ici que les échangeurs à fluides séparés, où le transfert de chaleur s'effectue à travers une paroi matérielle, ce qui exclut donc les échangeurs dits « à contact direct ». Dans ces appareils dominent deux grandes familles : les échangeurs tubulaires et les échangeurs à plaques.

1.1.1. – Échangeurs tubulaires

♣ Comme leur nom l'indique, les échangeurs tubulaires 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 enfermé dans une enveloppe appelée calandre.

◆ En ce qui concerne les échangeurs à faisceau de tubes et calandre, on peut citer parmi les dispositions les plus courantes le faisceau rectiligne (fig. 1.5) et le faisceau en U (ou « en épingle »), ce dernier mieux adapté aux forts gradients de température puisqu'il permet une libre dilatation des tubes (fig. 1.1). L'implantation de chicanes transversales permet d'allonger le trajet du fluide dans la 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.

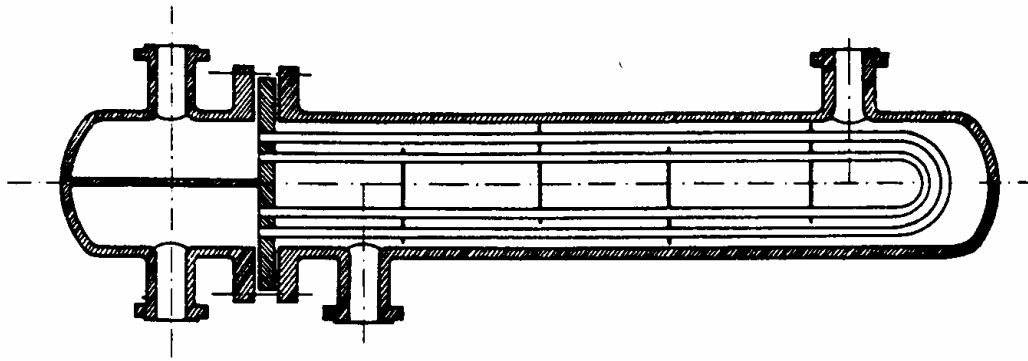


FIG. 1.1. – Échangeur tubulaire à faisceau en U (en épingle)

♥ Les matériaux employés pour la réalisation des tubes sont le plus souvent métalliques (acier, laiton...). Les céramiques se développent dans les échangeurs où transitent des fluides à haute température. Les tubes en plastique (généralement des microcanaux) sont également utilisés, soit en faisceaux, soit intégrés dans des plaques minces qui leur servent de raidisseurs.

1.1.2. – Échangeurs à plaques

Les échangeurs de la deuxième famille sont constitués par un empilement de plaques garnies de joints d'étanchéité à leur périphérie ; les fluides s'écoulent entre ces plaques dans des canaux plats où la circulation peut être soit diagonale (fig. 1.2a) soit latérale (fig. 1.2b). Il y a évidemment alternance du fluide froid et du fluide chaud d'un canal au suivant (fig. 1.9 et 1.10). Globalement, la distribution des fluides entre les différents canaux se fait en U, en Z, ou selon un schéma multipasses (§ 1.3.2).

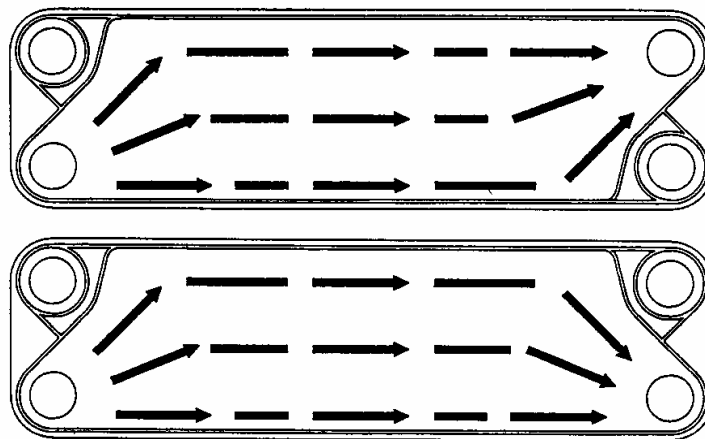


FIG. 1.2. – Échangeurs à plaques. En haut : circulation diagonale ; en bas : circulation latérale

1.2. – DISPOSITION DES ÉCOULEMENTS

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

♣ Ou bien les vecteurs vitesses des écoulements sont approximativement parallèles :

- s'ils sont de même sens, les écoulements sont « *co-courant* »
- s'ils sont de sens contraire, les écoulements sont « *à contre-courant* ».

◆ Ou bien les vecteurs vitesses sont en moyenne perpendiculaires l'un à l'autre : il s'agit cette fois de « *courants croisés* » (fig. 1.3).

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 pas toujours 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.

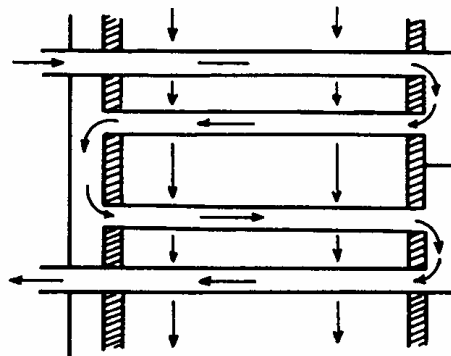


FIG. 1.3 – Schéma d'échangeur tubulaire à courants croisés

1.3. – ASPECTS STRUCTURELS DANS LA CONCEPTION DES ÉCHANGEURS

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* ».

1.3.1. – Échangeurs 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, l'assemblage de plusieurs modules permettant de reconstituer tout l'appareil. Parmi les principaux modèles d'échangeurs modulaires, citons les appareils à méandres

(fig.1.4), les appareils à faisceau de tubes et chicanes (fig. 1.5), les appareils à spirales (fig.1.6) et les échangeurs à plaques (fig. 1.9). Les trois types d'appareils représentés sur les figures 4, 5 et 6 sont à courants croisés, avec un fluide brassé.

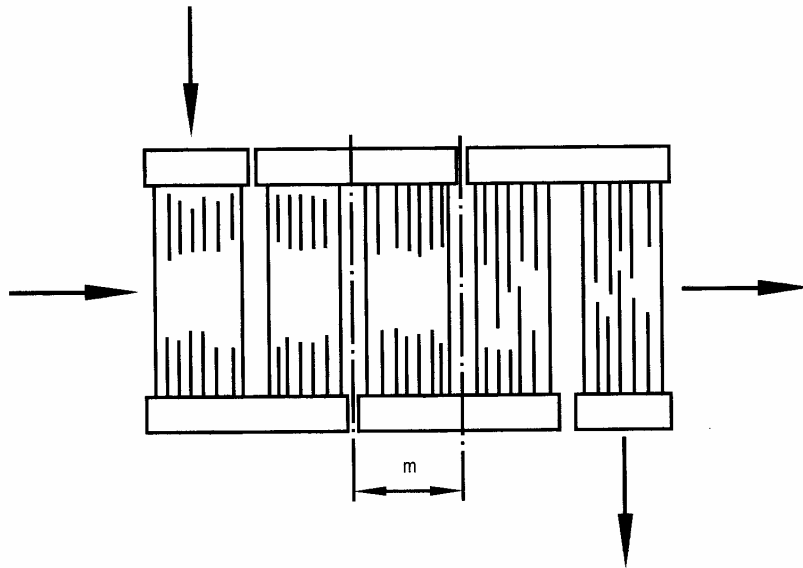


FIG. 1.4 – Schéma d'un échangeur à méandres de 5 modules ($m = \text{module}$)

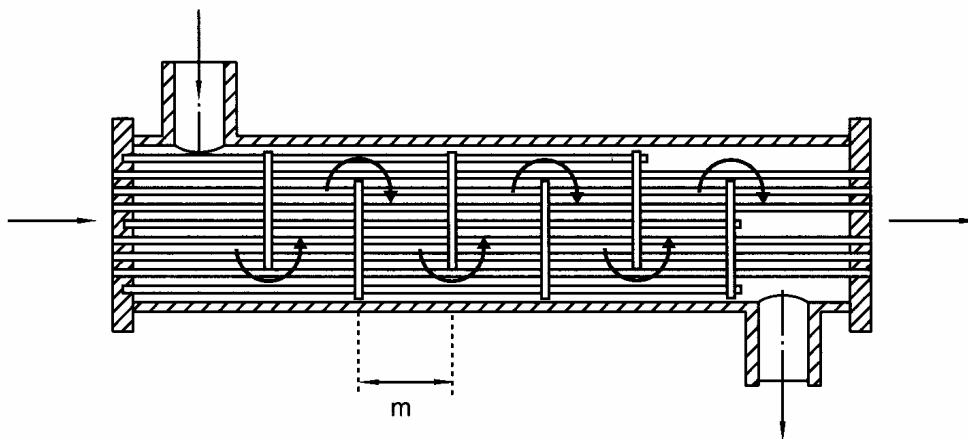


FIG. 1.5 – Échangeur tubulaire à chicanes ($m = \text{module}$)

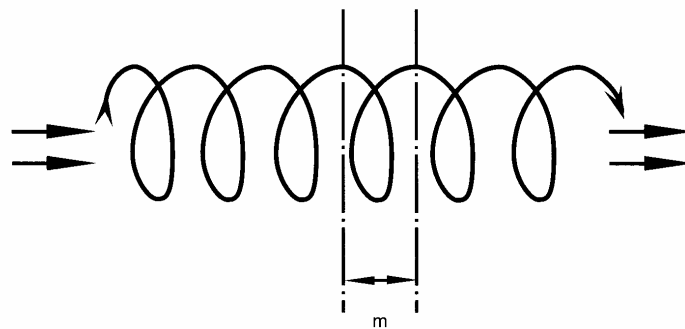


FIG. 1.6 – Échangeur à tube en spirale ($m = \text{module}$)

1.3.2. – Échangeurs à passes

On désigne par « *pass*e » 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 des 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-retour). On dit que *l'échangeur est à P passes côté calandre et à N passes côté tubes*. A titre d'exemple, la figure 1.7 représente un schéma d'échangeur 2-4.

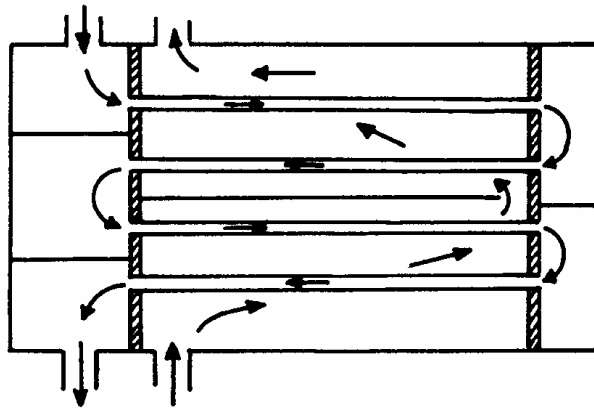


FIG. 1.7. – Exemple d'échangeur P-N : $P = 2$, $N = 4$

Le modèle P-N le plus courant est l'échangeur 1-N : le fluide situé côté calandre ne traverse celle-ci qu'une fois, tandis que le fluide qui circule dans les tubes la traverse N fois (fig.1.8).

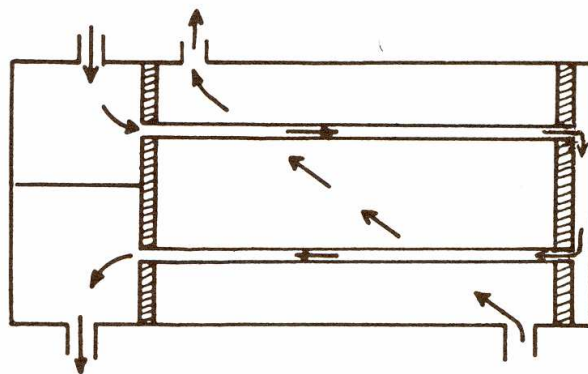
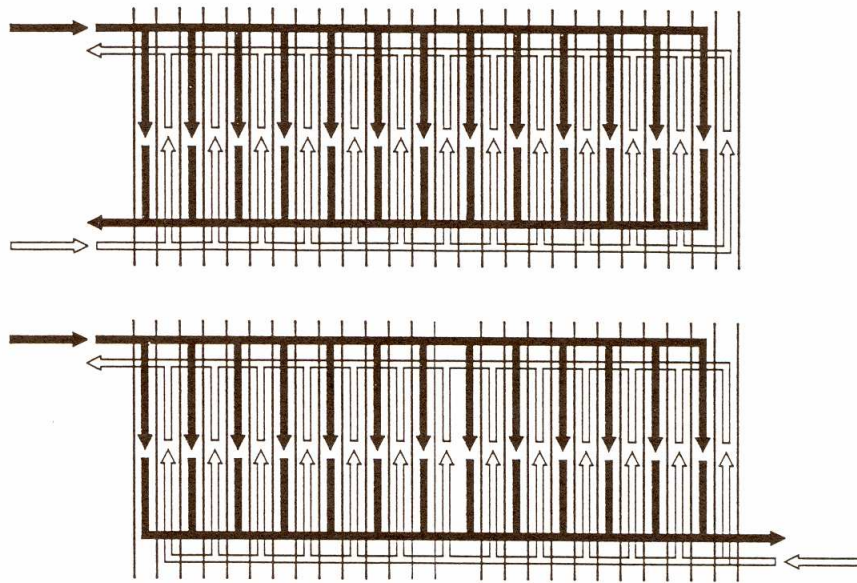
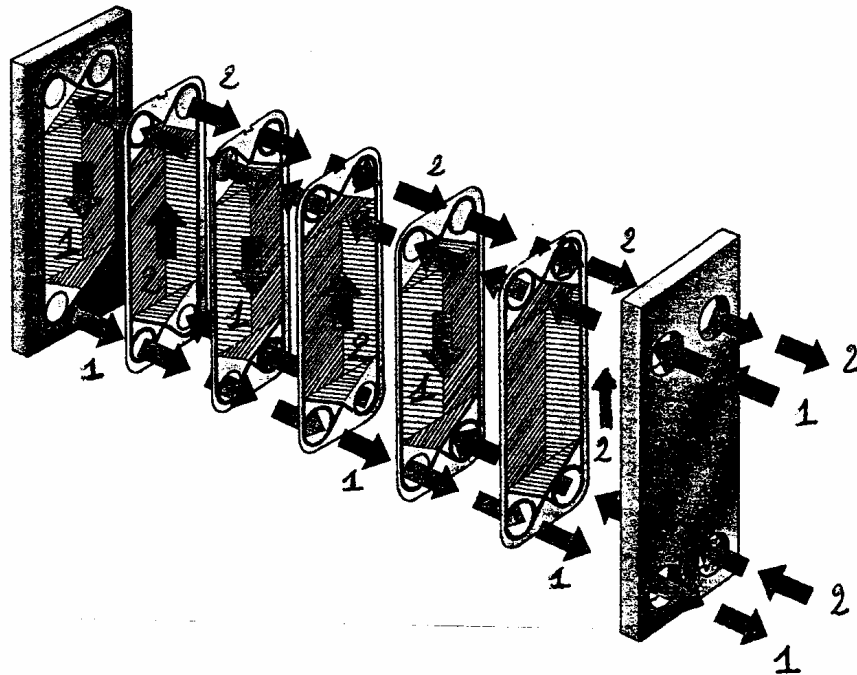


FIG. 1.8. – Schéma d'échangeur 1-N ($N = 2$)

La notion de passe s'applique également à d'autres modèles, et en particulier aux échangeurs à plaques dans lesquels on rencontre des configurations monopasses (avec distributions en U ou en Z, fig. 1.9) ou multipasses (ex. fig. 1.10 avec trois passes sur chaque fluide). Du point de vue thermique, on notera que la distribution en U est meilleure que la distribution en Z.



a), b)



c)

FIG. 1.9 – Distributions monopasses dans un échangeur à plaques :
 a) distribution en U ; b) distribution en Z ; c) détail d'une distribution en U

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 module peut être de type P-N (par

exemple, fig. 1.5, l'échangeur est de modèle 7-1) 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 : ainsi, sur l'exemple de la figure 1.10, on est en droit de considérer les trois passes comme trois modules composés eux-mêmes de sous-modules.

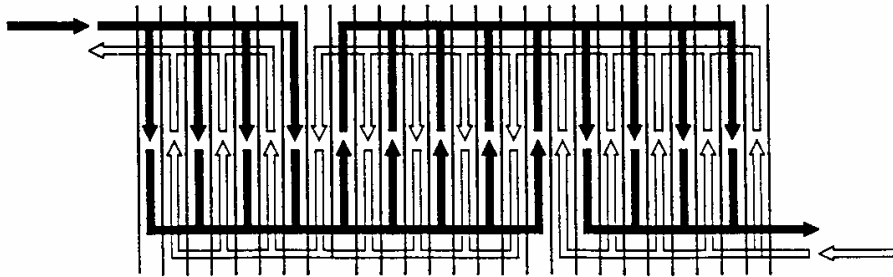


FIG. 1.10 – Échangeur à plaques : exemple de distribution à 3 passes sur chaque fluide

1.4. – DONNÉES D'AVANT-PROJET

Dans le cadre de cette monographie, nous envisageons essentiellement les calculs d'ingénierie ; de tels calculs sont destinés à fournir une estimation des performances d'un échangeur, et l'on n'exige pas d'eux une précision exemplaire.

Selon le programme à exécuter, les données d'avant-projet peuvent être extrêmement diverses. Contentons-nous ici de dresser une liste des principaux paramètres à prendre en compte, qui sont :

- la puissance calorifique totale à échanger
- les débits massiques des deux fluides
- les températures d'entrée des fluides
- les températures de sortie
- les coefficients de convection sur les deux faces de la paroi d'échange, d'où l'on déduira un coefficient global moyen
- la surface totale d'échange
- les conditions aux limites thermiques vers l'extérieur
- le type d'échangeur que l'on prévoit d'utiliser et la disposition des écoulements
- les pertes de charge à travers l'appareil, qui conditionnent la puissance à installer pour faire circuler les fluides

Chacun de ces paramètres pourra être à tour de rôle une donnée ou une inconnue du problème.

Quant à la solution, elle ne sera généralement pas unique : il y aura donc lieu ensuite de conduire un calcul d'optimisation thermique *et économique*. Quelques aspects de cette question seront examinés au chapitre 3 (§ 3.7) ou dans les exercices de la seconde partie.