

CHAPITRE II : LES ECHANGEURS DE CHALEUR**1. Définition**

Un échangeur de chaleur est un système qui permet de transférer un flux de chaleur d'un fluide chaud à un fluide froid à travers une paroi sans contact direct entre les deux fluides.

Par exemples : radiateur d'automobile, évaporateur de climatiseur, ...

2. Principaux types des échangeurs de chaleur

Les principaux types des échangeurs de chaleur sont :

2.1 Échangeurs tubulaires

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.

Echangeurs 1-1

Une passe dans la calandre

Une passe dans les tubes

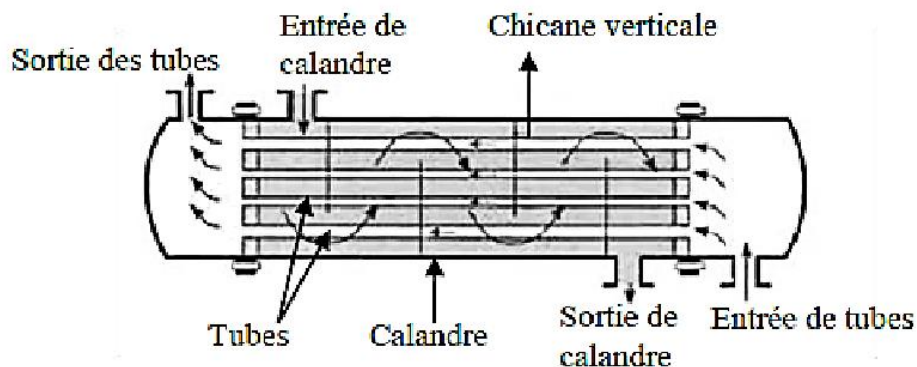


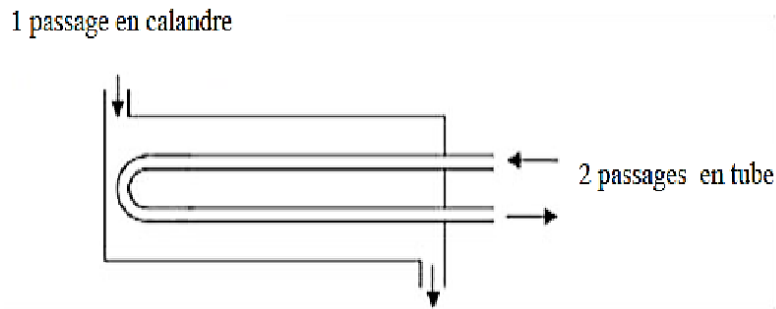
Figure II.1 : échangeurs (1-1) à faisceau de tubes et calandre

En ce qui concerne les échangeurs à faisceau de tubes et calandre, l'implantation de chicanes transversales permet d'allonger le trajet du fluide dans la calandre, et d'augmenter le flux échangé.

Echangeurs 1-2

Une passe dans la calandre

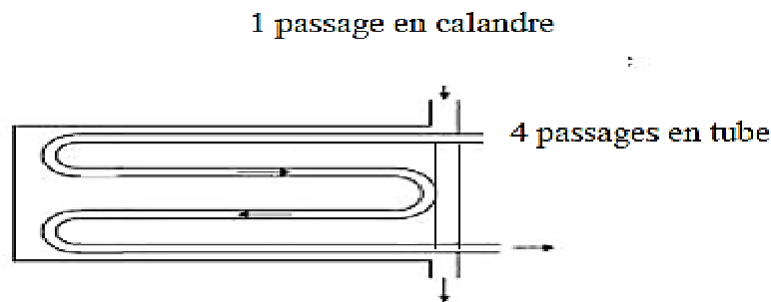
Deux passes dans les tubes



Echangeurs 1-4

Une passe dans la calandre

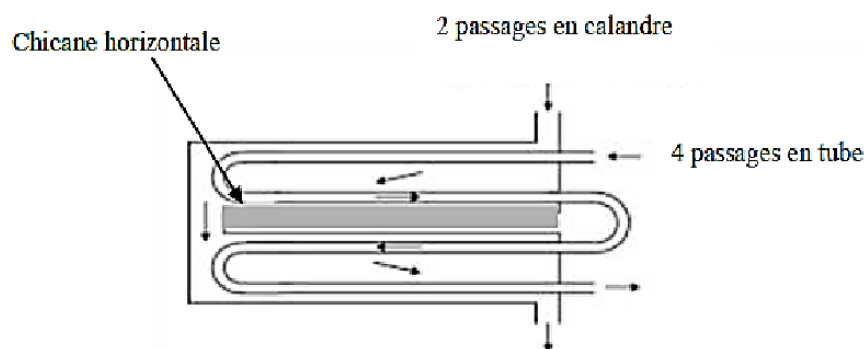
Quatre passes dans les tubes



Echangeurs 2-4

Deux passes dans la calandre

Quatre passes dans les tubes



2.2 Échangeurs à plaques

Les échangeurs à plaques sont constitués par un assemblage de plaques métalliques équipées de joints d'étanchéité à leur périmètre ; les fluides s'écoulent entre ces plaques dans des canaux plats où la circulation peut être soit diagonale ou latérale.

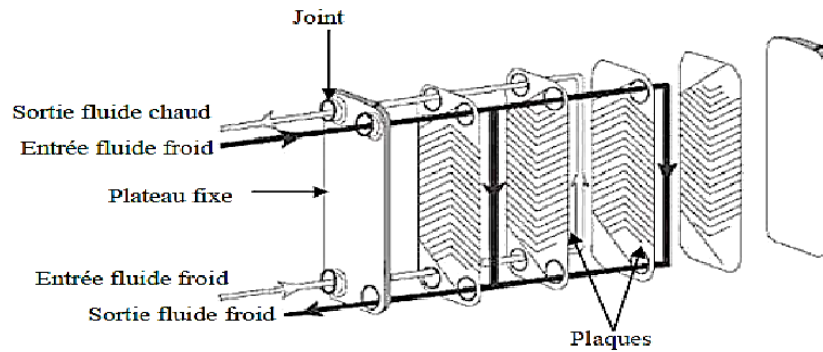


Figure II.2 : échangeurs à plaques

3. Classification selon les écoulements

3.1 Courants parallèles

✚ Co-courants (anti-méthodiques)

Les deux fluides circulent parallèlement et dans le même sens. Dans un échangeur co-courant la température de sortie du fluide froid est nécessairement moins élevée que la température de sortie du fluide chaud.

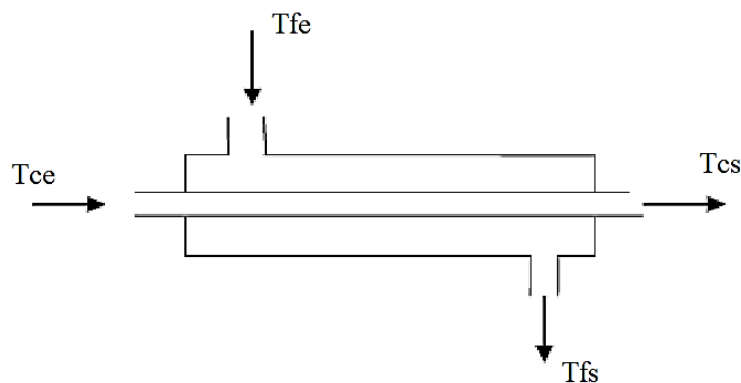


Figure II.3 : Schéma d'un échangeur de chaleur à Co-courants (anti-méthodiques)

✚ Contre-courant (méthodiques)

Les deux fluides circulent parallèlement mais dans les sens opposés. Dans un échangeur à contre-courant, le coefficient d'échange est sensiblement supérieur à celui d'un échangeur à co-courant et la température de sortie du fluide froid peut être plus élevée que la température de sortie du fluide chaud.

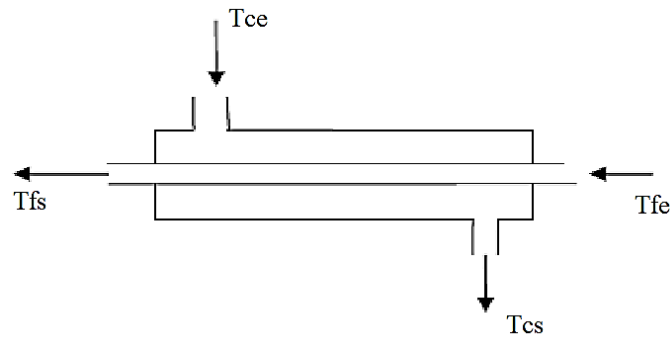


Figure II.4 : Schéma d'un échangeur de chaleur à contre-courants (méthodiques)

3.2 Courants croisés

Les échangeurs à courants croisés sont utilisés pour des échanges entre gaz circulant en calandre et liquide circulant dans les tubes. L'écoulement autour des tubes est presque perpendiculaire au faisceau de tubes.

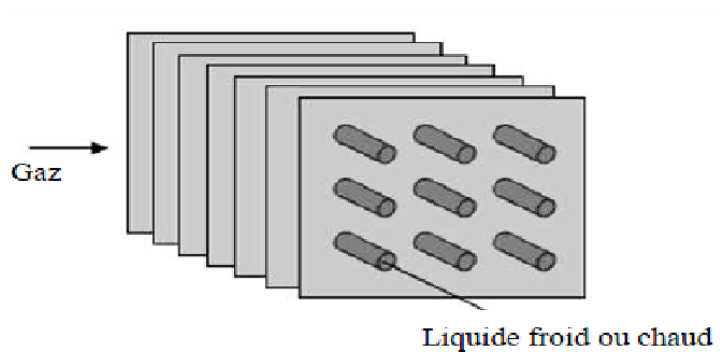


Figure II.5 : Schéma d'un échangeur de chaleur à courants croisés

4. Étude d'un échangeur

Dans les calculs qui suivent, les hypothèses suivantes sont conservées :

- Pas de pertes thermiques : la surface de séparation est la seule surface d'échange.
- Pas de changement de phase au cours du transfert.
- Le fluide chaud entre dans l'échangeur à la température T_{ce} et en sort à T_{cs} .
- Le fluide froid entre à T_{fe} et sort à T_{fs} .

Deux modes de fonctionnement sont réalisables :

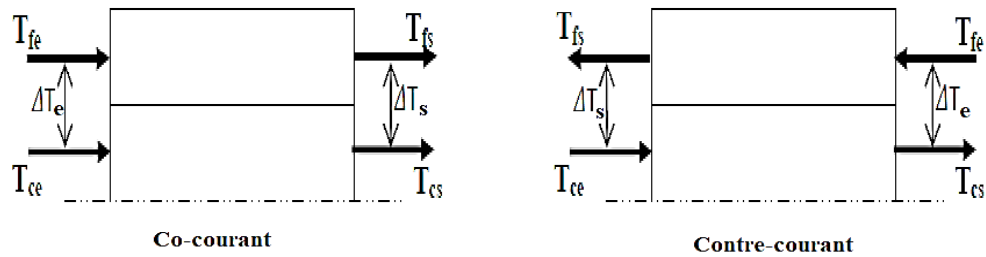


Figure II.6 : Schématisation des fonctionnements à co-courant et à contre-courant

4.1 Expression de la puissance échangée

La puissance échangée (flux de chaleur transféré) dans un échangeur peut être déterminé en écrivant qu'il est égal aux flux de chaleur perdu par le fluide chaud et au flux de chaleur gagné par le fluide froid pendant leur traversée dans l'échangeur.

$$Q = (\dot{m}c_p)_{chaud} \cdot (T_{ce} - T_{cs}) = (\dot{m}c_p)_{froid} \cdot (T_{fs} - T_{fe})$$

Q : Puissance échangée en W

\dot{m} : Débit massique en kg/s

C_p : Capacité thermique à pression constante

Les produits $C_c = (\dot{m}c_p)_{chaud}$ et $C_f = (\dot{m}c_p)_{froid}$ sont appelés les débits thermiques des deux fluides.

La puissance échangée peut donc s'écrire :

$$Q = C_c \cdot (T_{ce} - T_{cs}) = C_f \cdot (T_{fs} - T_{fe})$$

Cette expression peut être écrite sous la forme :

$$Q = U \cdot A \cdot \frac{\Delta T_s - \Delta T_e}{\ln \frac{\Delta T_s}{\Delta T_e}}$$

Avec :

U : coefficient global d'échange (W/m^2K)

A : surface d'échange (m^2)

$$\left. \begin{aligned} \Delta T_s &= T_{cs} - T_{fs} \\ \Delta T_e &= T_{ce} - T_{fe} \end{aligned} \right\} \text{Pour le fonctionnement co-courant}$$

$$\left. \begin{aligned} \Delta T_s &= T_{ce} - T_{fs} \\ \Delta T_e &= T_{cs} - T_{fe} \end{aligned} \right\} \text{Pour le fonctionnement contre-courant}$$

On pose :

$$DTLM = \frac{\Delta T_s - \Delta T_e}{\ln \frac{\Delta T_s}{\Delta T_e}}$$

Donc :

$$Q = U \cdot A \cdot DTLM$$

DTLM : Différence de Température Moyenne Logarithmique, représente la moyenne logarithmique de la fonction ΔT entre l'entrée et la sortie de l'échangeur [$^{\circ}\text{C}$].

Remarque

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

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_c} + \frac{1}{h_f}}$$

Et dans le cas d'encrassement des surfaces d'échange s'écrit comme suit :

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_c} + \frac{1}{h_f} + R_{enc}}$$

Avec :

U: coefficient global d'échange ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$)

h_c : Le coefficient de transfert de chaleur par convection sur le côté chaud

h_f : Le coefficient de transfert de chaleur par convection sur le côté froid

R_{enc} : Résistance thermique due à l'encrassement des surfaces d'échange

4.2 Distribution des températures dans un échangeur

❖ Échangeur à co-courant

La distribution des températures des fluides dans un échangeur à co-courant présente l'allure suivante :

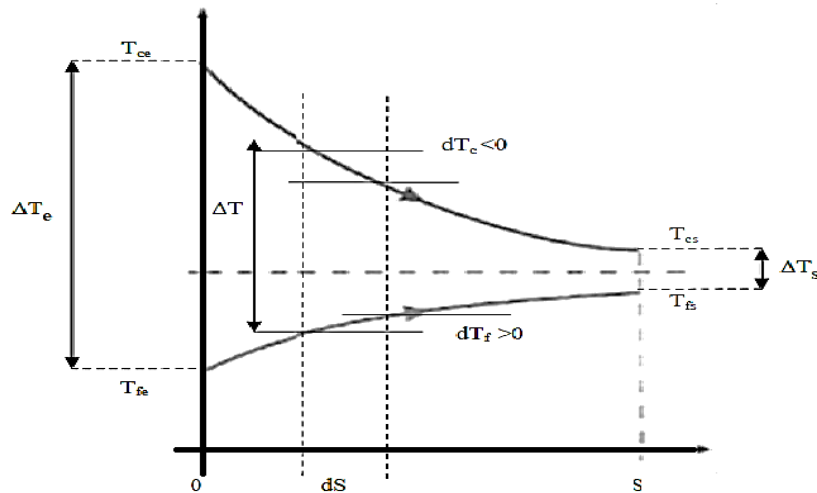


Figure II.7 : Distribution des températures dans un échangeur à co-courant

✚ Remarque

En aucun cas on ne peut avoir $T_{fs} > T_{cs}$

❖ Échangeur à contre-courant

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

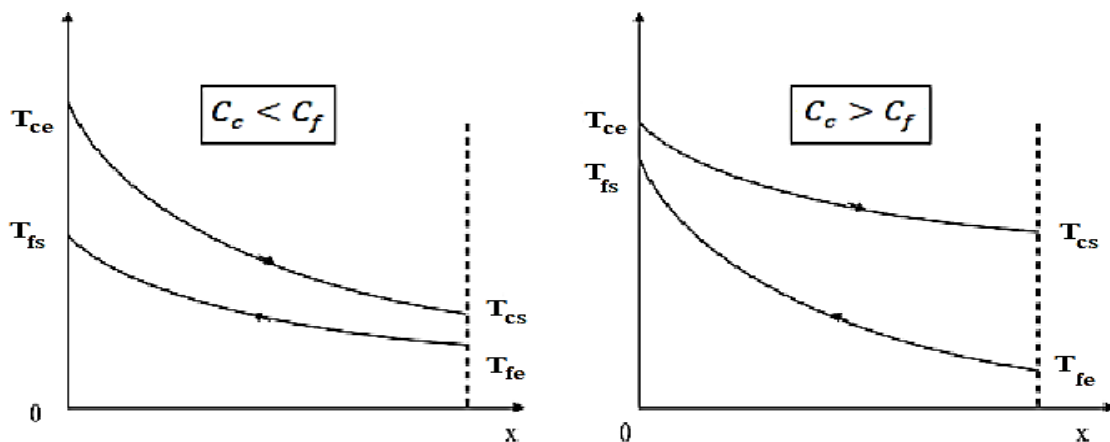


Figure II.8 : Distribution des températures dans un échangeur à contre-courant

Remarque

Si $C_c < C_f$: On dit que le fluide chaud commande le transfert.

Si $C_c > C_f$: On dit que le fluide froid commande le transfert.

- Dans un fonctionnement à contre-courant, il est possible d'obtenir $T_{fs} > T_{cs}$.

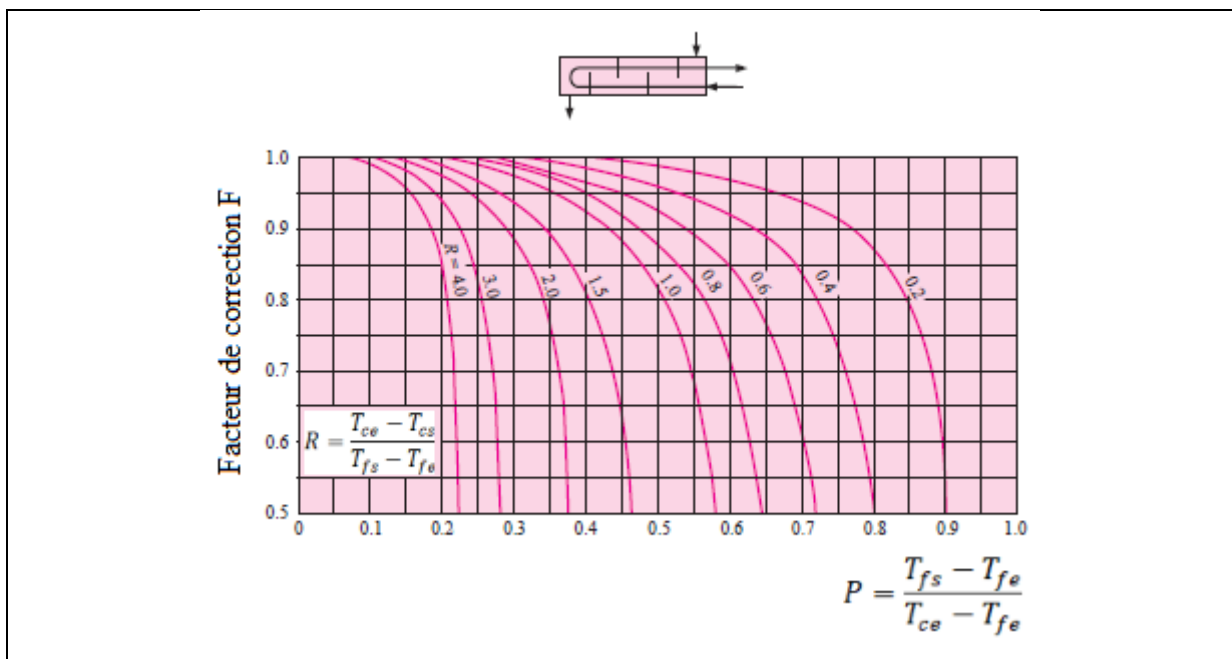
4.3 Facteur de correction de DTLM

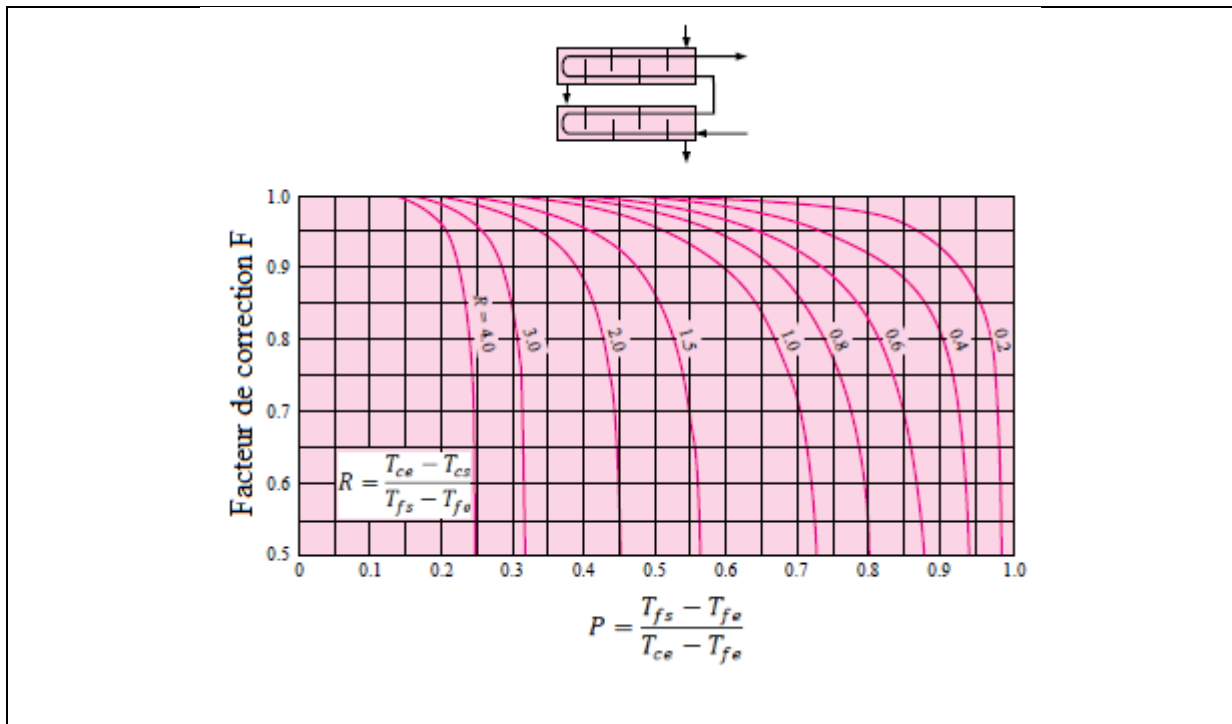
Dans le cas d'un échangeur plus complexe (échangeurs tubulaires tube et calandre), on modifie le résultat de DTLM en introduisant un facteur F, qui dépend de la géométrie de l'échangeur de chaleur et les températures d'entrée et de sortie des flux de fluide chaud et froid. Et on aura :

$$Q = F \cdot U \cdot A \cdot DTLM$$

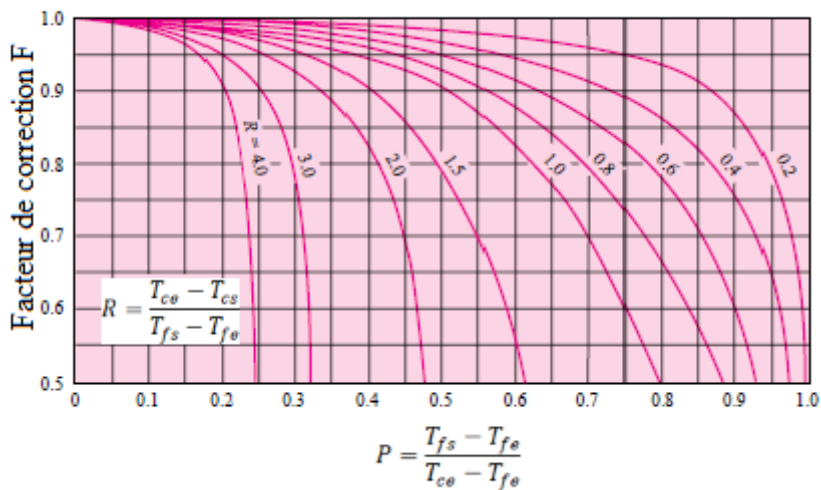
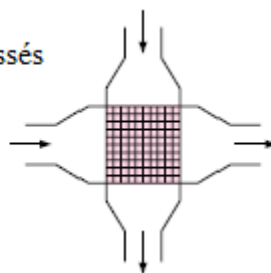
Où F est donné par des abaques en fonction de P et R :

$$P = \frac{T_{fs} - T_{fe}}{T_{ce} - T_{fe}} \quad \text{et} \quad R = \frac{T_{ce} - T_{cs}}{T_{fs} - T_{fe}}$$





Courant croisé :
Deux fluides non brassés



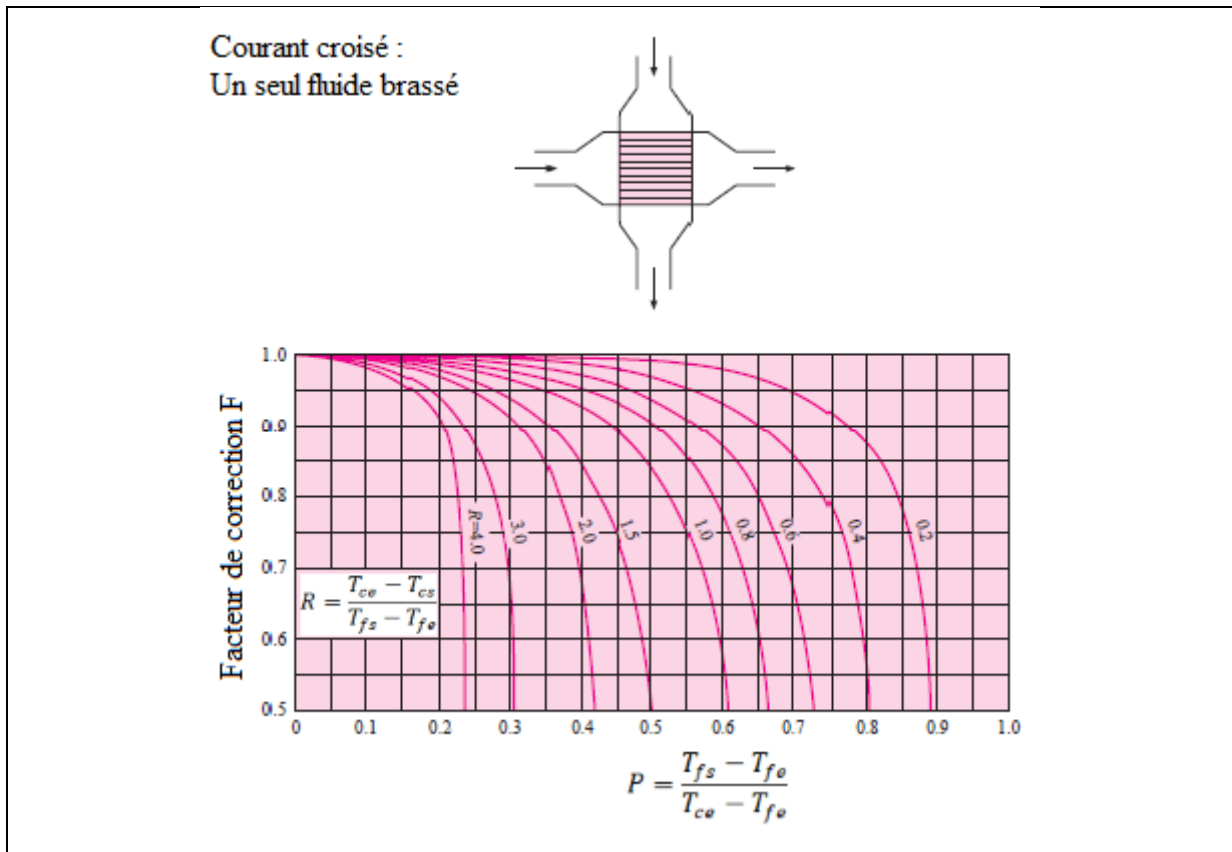


Figure II.9 : Abaques de facteur de correction en fonction de P et R

4.4 Efficacité d'un échangeur

On définit l'efficacité d'un échangeur (appelé aussi rendement thermique) comme le rapport de la puissance thermique réellement échangée à la puissance échangée maximum théoriquement possible. L'efficacité est évidemment sans dimension :

$$E = \frac{Q}{Q_{\max}} = \frac{\text{Puissance thermique réellement échangée}}{\text{Puissance échangée maximum théoriquement possible}}$$

Avec :

$$0 \leq E \leq 1$$

La puissance thermique réellement échangée dans un échangeur de chaleur peut être déterminée à partir d'un bilan énergétique sur les fluides chauds ou froids et peut être exprimé comme suit :

$$\left\{ \begin{array}{l} Q = (\dot{m}c_p)_{\text{chaud}} \cdot (T_{ce} - T_{cs}) = (\dot{m}c_p)_{\text{froid}} \cdot (T_{fs} - T_{fe}) \\ \text{Ou} \\ Q = C_c \cdot (T_{ce} - T_{cs}) = C_f \cdot (T_{fs} - T_{fe}) \end{array} \right.$$

Pour déterminer la puissance échangée maximum théoriquement possible dans un échangeur de chaleur, nous devons d'abord reconnaître que la différence de température maximale dans un échangeur de chaleur est la différence entre les températures d'entrée des fluides chaud et froid. C'est-à-dire :

$$\Delta T_{max} = T_{ce} - T_{fe}$$

Par conséquent, la puissance échangée maximum théoriquement possible dans un échangeur de chaleur est le suivant :

$$Q_{max} = C_{min} \cdot (T_{ce} - T_{fe})$$

Où C_{min} est le plus petit de $C_c = (\dot{m}c_p)_{chaud}$ et $C_f = (\dot{m}c_p)_{froid}$

4.5 Nombre d'unité de transfert (NUT)

Le nombre d'unités de transfert représente le pouvoir d'échange de l'appareil, ce nombre est relatif au fluide qui possède le plus petit débit thermique unitaire $q_{c\ min}$ est habituellement désigné par NUT (sans unité) :

$$NUT = \frac{U \cdot A}{C_{min}} = \frac{U \cdot A}{(\dot{m}c_p)_{min}}$$

Dans l'analyse d'un échangeur de chaleur, il est également utile de définir une autre quantité sans dimension, appelée le rapport de capacité C , comme suit :

$$C = \frac{C_{min}}{C_{max}}$$

4.6 Relation entre NUT et l'efficacité (E-NUT) :

Des relations d'efficacité ont été développées pour un grand nombre d'échangeurs de chaleur, et les résultats sur les échangeurs à double tube et les échangeurs à calandre et tube sont donnés comme suit :

Dans le cas d'un échangeur double tube à co-courant :

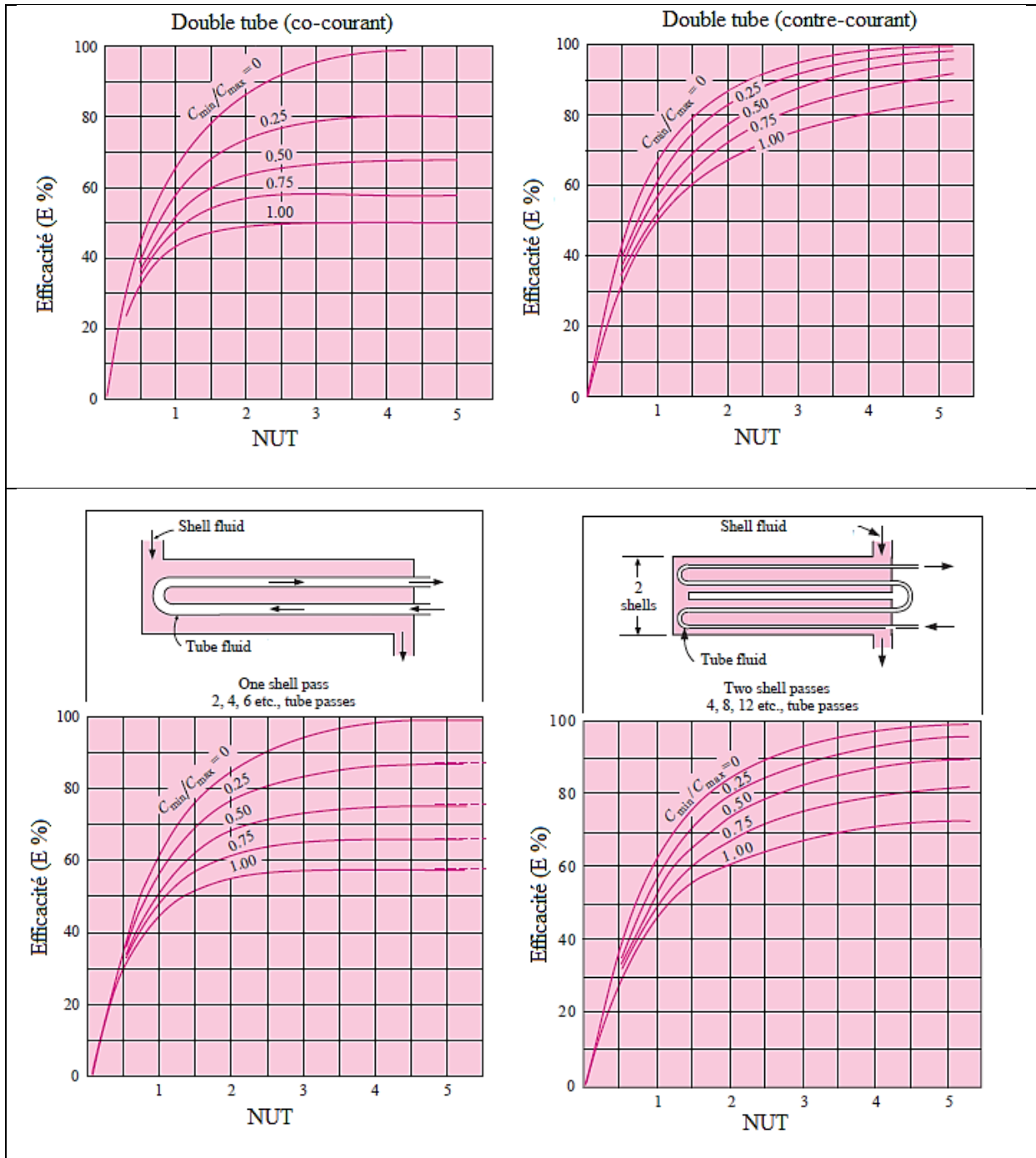
$$E = \frac{1 - e^{[-(1+C)NUT]}}{1 + C}$$

Dans le cas d'un échangeur double tube à contre-courant :

$$E = \frac{1 - e^{-(1-C)NUT}}{1 - C e^{-(1-C)NUT}}$$

Dans le cas d'un échangeur à calandre et tube : Une passe coté calandre et 2, 4, ... passes coté tube.

$$E = 2 \left\{ 1 + C + \sqrt{1 + C^2} \frac{1 + e^{[-NUT\sqrt{1+C^2}]}^{-1}}{1 - e^{[-NUT\sqrt{1+C^2}]}} \right\}^{-1}$$



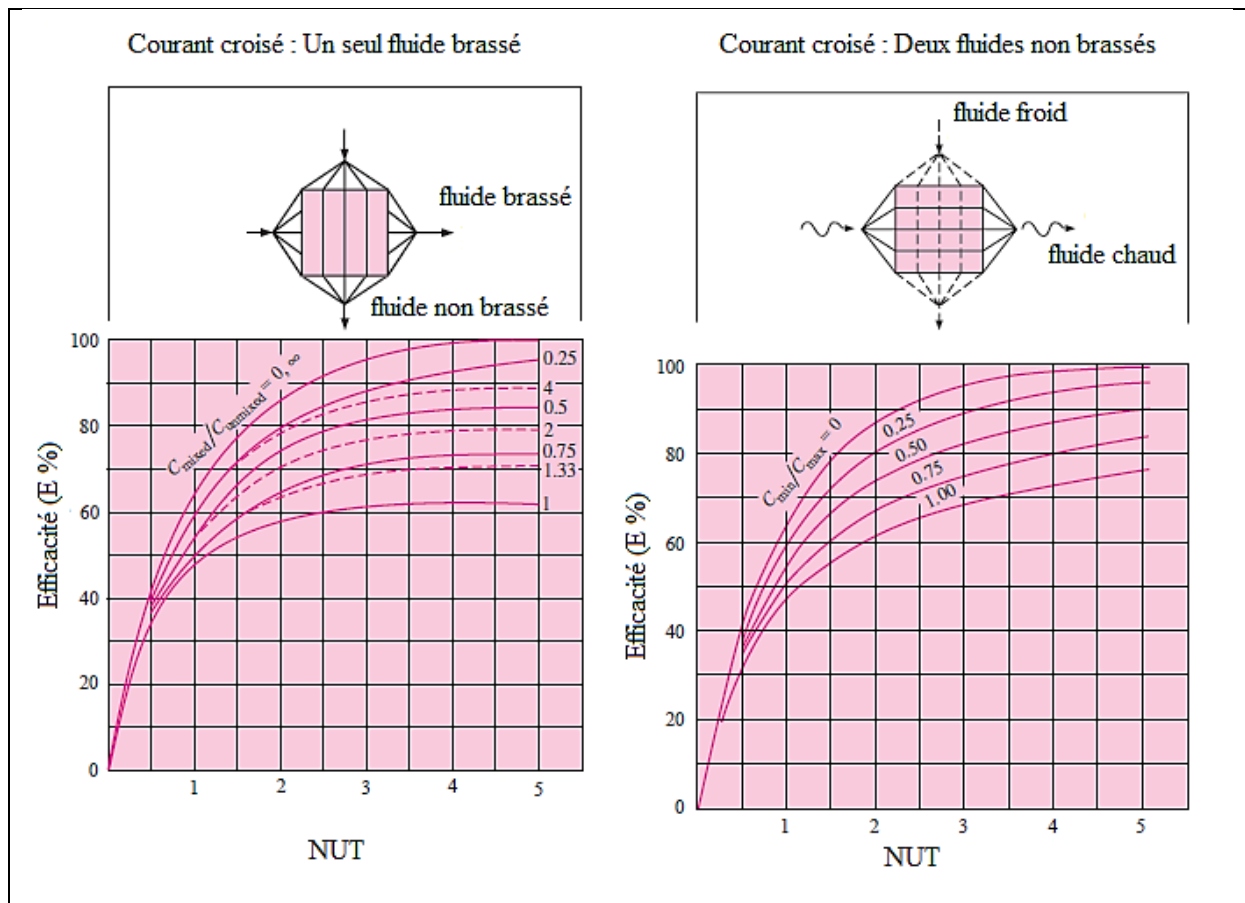


Figure II.10 : Efficacité en fonction de $C = \frac{C_{min}}{C_{max}}$ et NTU