

Chapitre 3 : Méthodes DTM et NUT- ϵ .

3.1 La distribution de température dans un échangeur de chaleur:

Le transfert de chaleur du fluide chaud vers le fluide froid cause un changement de température de l'un ou des deux fluides circulant dans l'échangeur de chaleur (figure (3.1)).

A partir des distributions de température des divers types d'échangeurs de chaleur les observations communes sont :

- 1- Dans l'échangeur à contre-courant, l'augmentation de la température du fluide froid est presque égale à la chute de température du fluide chaud.
- 2- Dans tous les cas la différence de température entre les fluides chaud et froid varie avec la position le long du chemin du fluide chaud.

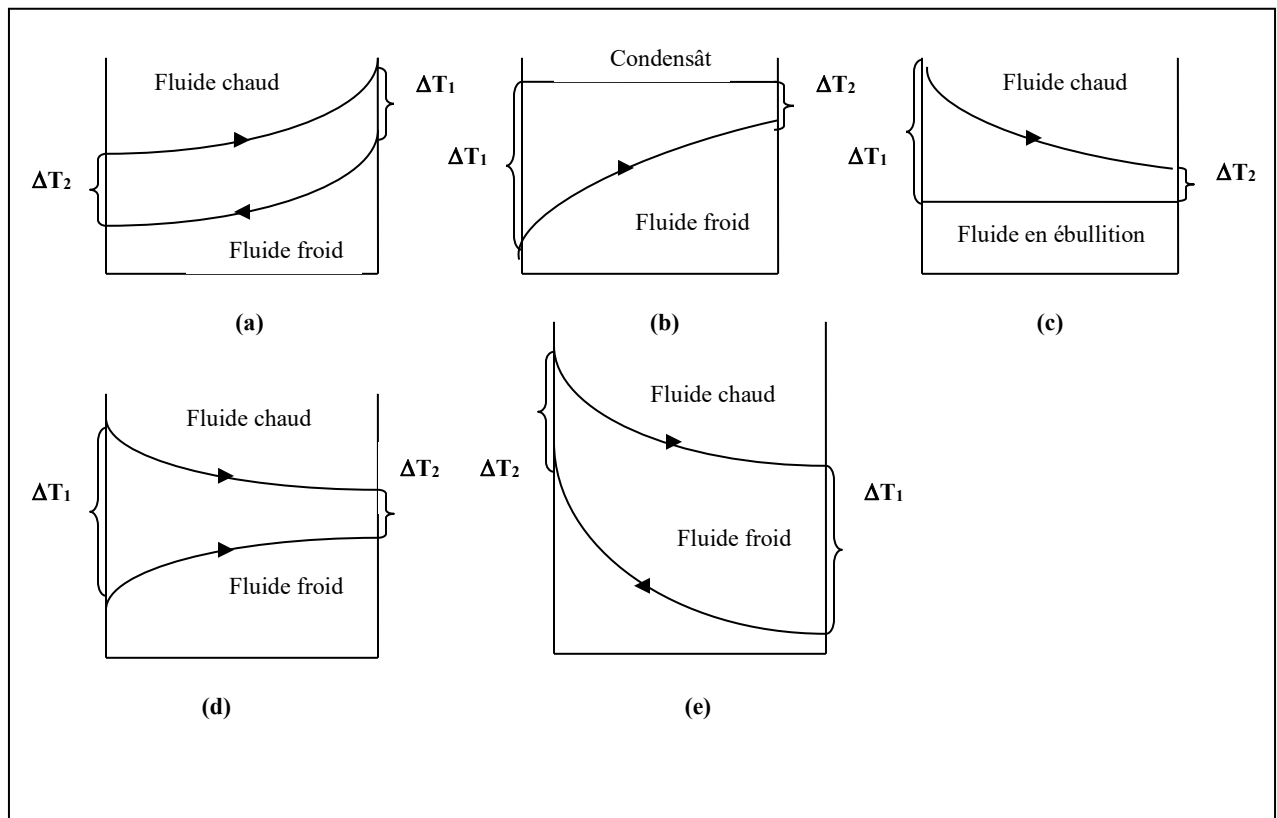


Figure (3.1) : La distribution de température dans les échangeurs de chaleur :

- 1- Différence de température uniforme ou flux de chaleur uniforme ;
- 2- Condenseur ;
- 3- Bouilleur ;

- 4- A co-courant ;
5- A contre-courant.

3.2 Le coefficient global d'échange (U) ou (K_G):

Si on considère un échangeur de chaleur constitué de deux conduites dans lesquelles s'écoulent deux fluides tel qu'illustré sur la figure (3.2) (a) et (b).

Nous avons trois résistances au transfert :

Sur la paroi interne du tube, convection h_i

Dans l'épaisseur du tube conduction, k

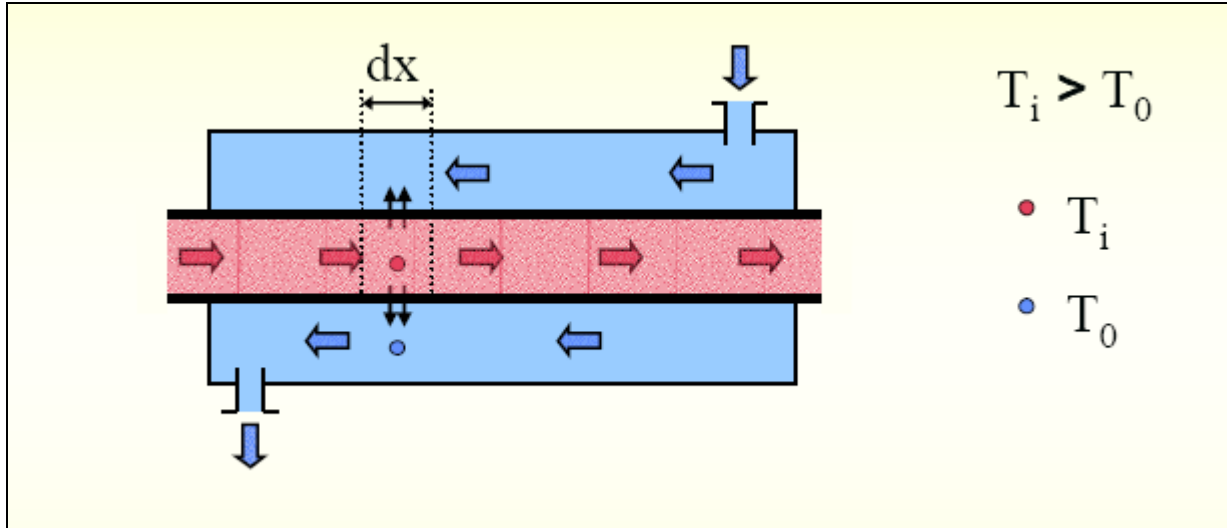
Sur la paroi externe du tube, convection h_e .

En régime permanent, le flux de chaleur s'exprime :

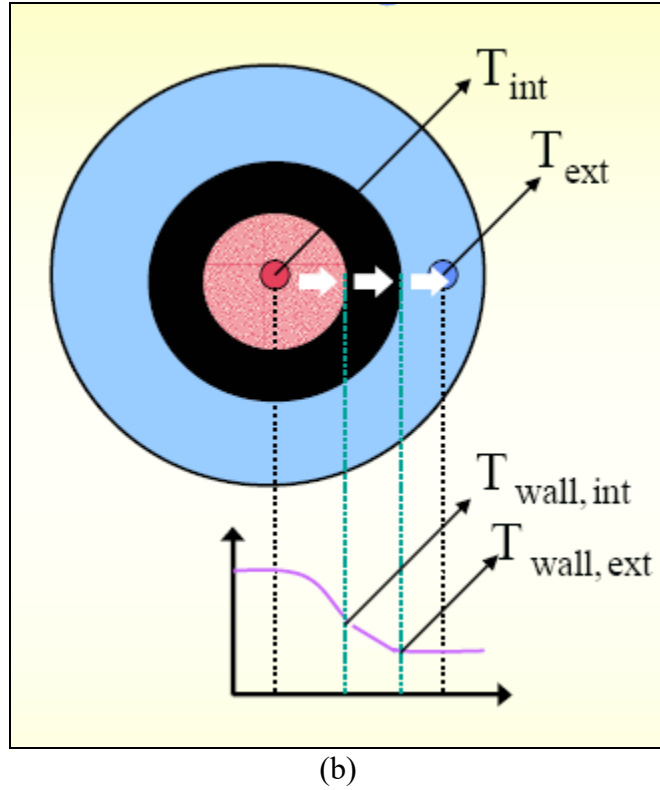
$$\Phi = \frac{T_i - T_e}{\frac{1}{h_i S_i} + \frac{\ln\left(\frac{r_e}{r_i}\right)}{2\pi k L} + \frac{1}{h_e S_e}} \quad (3-1)$$

On introduit le coefficient global d'échange U ou k_G , le flux s'écrit :

$$\Phi = k_G S \Delta T_{moyenne} \quad (3-2)$$



(a)



(b)
Figure (3.2) : Echangeur de chaleur entre deux conduites :
(a) Représentation des conduites ;
(b) Vue de coup de l'échangeur.

Le coefficient de transfert est basé sur l'utilisation de la surface externe ou interne de la conduite selon le choix de l'utilisateur.

-Si la surface interne est utilisée alors le coefficient global d'échange et le flux de chaleur s'exprime :

$$\Phi = \frac{T_i - T_e}{\frac{1}{h_i} + \frac{S_i \ln\left(\frac{r_e}{r_i}\right)}{2\pi k L} + \frac{S_i}{h_e S_e}} \quad (3-3a)$$

$$\Phi = k_{Gi} S_i \Delta T_{moyenne} \quad (3-3b)$$

-Si la surface externe est utilisée alors le coefficient global d'échange et le flux de chaleur s'exprime :

$$\Phi = \frac{T_i - T_e}{\frac{S_e}{S_i h_i} + \frac{S_e \ln\left(\frac{r_e}{r_i}\right)}{2\pi k L} + \frac{1}{h_e}} \quad (3-4a)$$

$$\Phi = k_{Ge} S_e \Delta T_{moyenne} \quad (3-4b)$$

La détermination du flux de chaleur nécessite la détermination d'une différence de température moyenne.

Remarque :

L'expression précédente ne tient pas compte des problèmes d'encrassement (Fouling), exemple le dépôt du tartre sur les conduites d'eau. Le dépôt du tartre dans ou sur les tubes provoque une résistance thermique supplémentaire.

On introduit une résistance d'encrassement interne R_f^{int} et une résistance d'encrassement externe R_f^{ext} .

3.3 Evaluation des performances thermiques d'un échangeur en régime permanent :

Dans l'étude d'un échangeur de chaleur, on cherche à atteindre la puissance d'échange nécessaire avec la plus faible surface possible. L'aspect thermique de l'étude consiste en fait évaluer principalement les performances thermiques c'est-à-dire le flux de chaleur dégagé.

3.3.1 Hypothèses de calcul :

Les hypothèses admises sont :

- ◆ La chaleur massique des fluides caloporteurs est constante ;
- ◆ Le coefficient d'échange global est constant tout le long de la surface d'échange ;
- ◆ L'échange est sans perte.

3.3.2 Méthode de la moyenne logarithmique ΔT_{LM} :

A) Cas d'un échangeur à courant parallèle :

Considérons un élément de surface dS appartenant à la surface d'échange d'un échangeur simple passe à courant parallèle (figure 3.3).

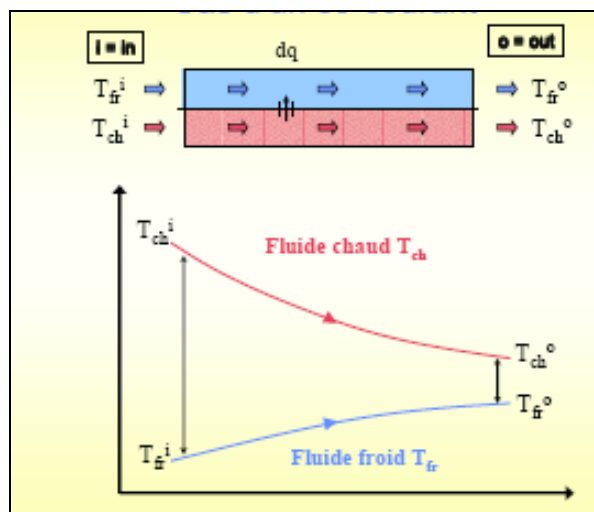


Figure (3.3) : Distribution de la température dans un échangeur simple à co-courant.

Le flux de chaleur échangé entre les deux fluides à travers la surface dS est :

$$d\phi = K_G dS (T_c - T_f) \quad (3.5)$$

D'autre part, le flux de chaleur perdu par le fluide chaud est donné par :

$$d\phi = -\dot{m}_c C_{pc} dT_c \quad (3.6a)$$

Avec :

$d\phi$: le flux de chaleur perdu par le fluide chaud ;

C_{pc} : la chaleur massique du fluide chaud ;

dT_c : la variation élémentaire de la température du fluide chaud ($dT_c < 0$) voir la figure(3-3).

De même pour le fluide froid le flux de chaleur gagné est donné par:

$$d\phi = \dot{m}_f C_{pf} dT_f \quad (3.6b)$$

Avec :

$d\phi$: le flux de chaleur gagné par le fluide froid ;

C_{pf} : la chaleur massique du fluide froid ;

dT_f : la variation élémentaire de la température du fluide froid ($dT_f > 0$) voir la figure(3-3).

A partir des équations (3.6a) et (3.6b), nous avons :

$$dT_c = -\frac{d\phi}{\dot{m}_c C_{pc}} \quad (3.7a)$$

$$dT_f = \frac{d\phi}{\dot{m}_f C_{pf}} \quad (3.7b)$$

D'où ;

$$dT_c - dT_f = -\frac{d\phi}{\dot{m}_c C_{pc}} - \frac{d\phi}{\dot{m}_f C_{pf}} \quad (3.8)$$

Remplaçant le flux de chaleur par ça valeur, on aura : (3.9)

$$\frac{d(T_c - T_f)}{(T_c - T_f)} = -K_G dS \left(\frac{1}{\dot{m}_c C_{pc}} + \frac{1}{\dot{m}_f C_{pf}} \right) \quad (3.10)$$

Puisque les chaleurs massiques des deux fluides sont constantes et le coefficient d'échange global est de même, intégrant entre l'entrée (e et s).

$$\ln \left(\frac{T_{cs} - T_{fs}}{T_{ce} - T_{fe}} \right) = -K_G S \left(\frac{1}{\dot{m}_c C_{pc}} + \frac{1}{\dot{m}_f C_{pf}} \right) \quad (3.11)$$

A partir des relations (3.6a) et (3.6b), on remplace le produit du débit massique et la chaleur massique en fonction du flux de chaleur des deux fluides, on obtient :

$$\ln \left(\frac{T_{cs} - T_{fs}}{T_{ce} - T_{fe}} \right) = K_G S \left(\frac{T_{cs} - T_{ce} + T_{fe} - T_{fs}}{\phi} \right) \quad (4.12)$$

$$\ln \left(\frac{T_{ce} - T_{fe}}{T_{cs} - T_{fs}} \right) = K_G S \left(\frac{T_{ce} - T_{fe} - T_{cs} + T_{fs}}{\phi} \right) \quad (3.13)$$

Donc, le flux de chaleur est donné par la relation suivante :

$$\phi = K_G S \frac{[(T_{ce} - T_{fe}) - (T_{cs} - T_{fs})]}{\ln \left[\frac{T_{ce} - T_{fe}}{T_{cs} - T_{fs}} \right]} \quad (3.14)$$

On introduit les indices suivants :

$$\Delta T = T_c - T_f \quad (3.15)$$

a et b sont des indices d'entrée et de sortie de l'échangeur. Nous aurons :

$$d\phi = K_G S \Delta T_{LM} \quad (3.16)$$

Avec :

$$\Delta T_{LM} = \frac{\Delta T_a - \Delta T_b}{\ln \frac{\Delta T_a}{\Delta T_b}} \quad (3.17)$$

ΔT_{LM} étant la température logarithmique de la différence de température globale entre les deux fluides.

$$\text{La différence de température à l'entrée } \Delta T_a = T_{ce} - T_{fe} \quad (3.18a)$$

$$\text{La différence de température à la sortie } \Delta T_b = T_{cs} - T_{fs} \quad (3.18b)$$

B) Cas d'un échangeur à contre courant :

De la même façon que le co-courant (figure 3.4) on trouve que :

$$d\phi = K_G S \Delta T_{LM} \quad (3.19)$$

Avec :

$$\Delta T_{LM} = \frac{\Delta T_a - \Delta T_b}{\ln \frac{\Delta T_a}{\Delta T_b}} \quad (3.20)$$

Avec :

$$\text{La différence de température à l'entrée } \Delta T_a = T_{ce} - T_{fs} \quad (3.21a)$$

$$\text{La différence de température à l'entrée } \Delta T_b = T_{cs} - T_{fe} \quad (3.21b)$$

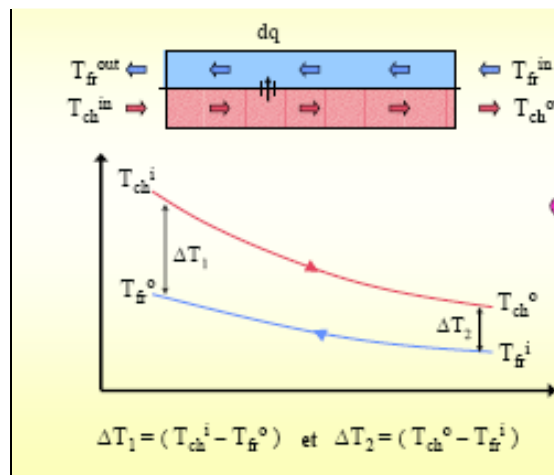


Figure (3.4) : Distribution de la température dans un échangeur simple à contre courant.

C) Cas d'un condenseur :

La distribution de température est donnée sur la figure (4.3b), la température du condensât (fluide chaud) reste constante. Donc, les différences de températures peuvent être utilisées avec² les équations (3.16) et (3.17):

$$\Delta T_a = T_c - T_{fe} \quad (3.22a)$$

$$\Delta T_b = T_c - T_{fs} \quad (3.22b)$$

D) Cas d'un évaporateur :

La distribution de température est donnée sur la figure (4.3c), la température du fluide froid (vapeur) reste constante. Donc, la différence de température moyenne logarithmique peut être calculer on utilisant équations (3.17) avec:

$$\Delta T_a = T_{ce} - T_s \quad (3.23a)$$

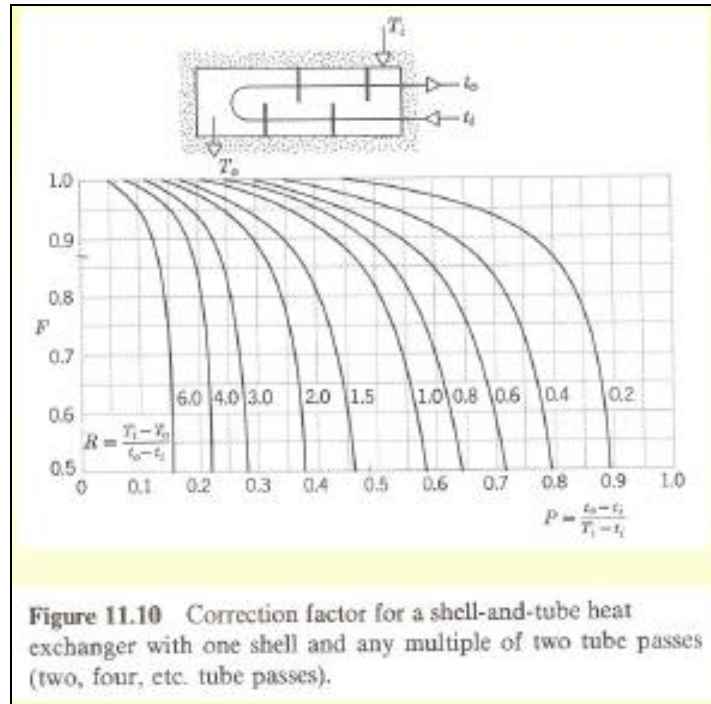
$$\Delta T_b = T_{ce} - T_f \quad (3.23b)$$

E) Cas d'autre configuration : courants croisés, configuration mixtes,ect.....:

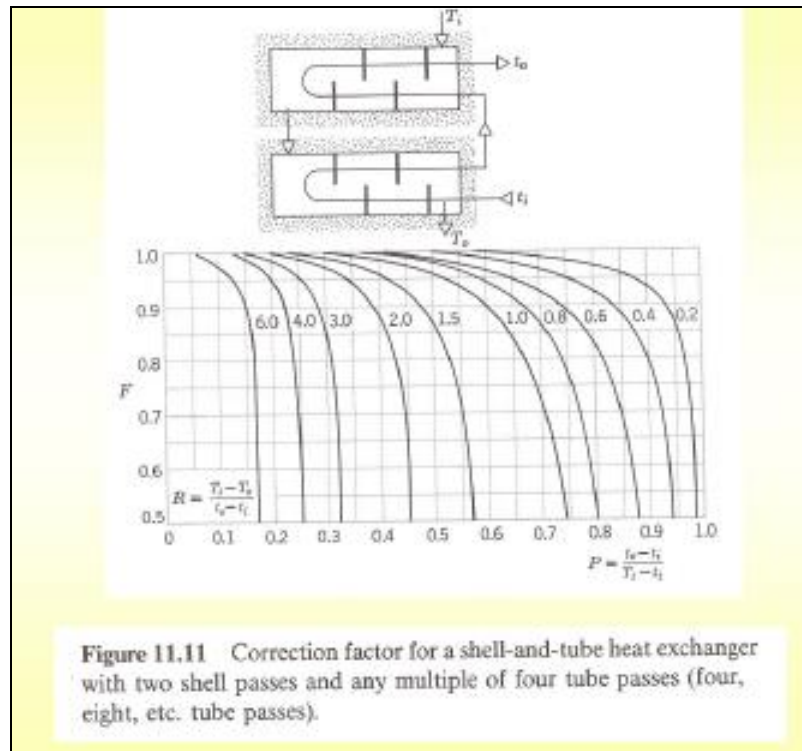
Pour les échangeurs à courants croisés ou autres, la quantité ΔT_{LM} ne présente plus la différence de température logarithmique moyenne réelle. On introduit alors un facteur de correction F (inférieur à l'unité) fourni par des abaques (figure(3.5a,b,c)) et traduisant la nature de l'écoulement tel que :

$$d\phi = FK_G S \Delta T_{LM} \quad (3.24)$$

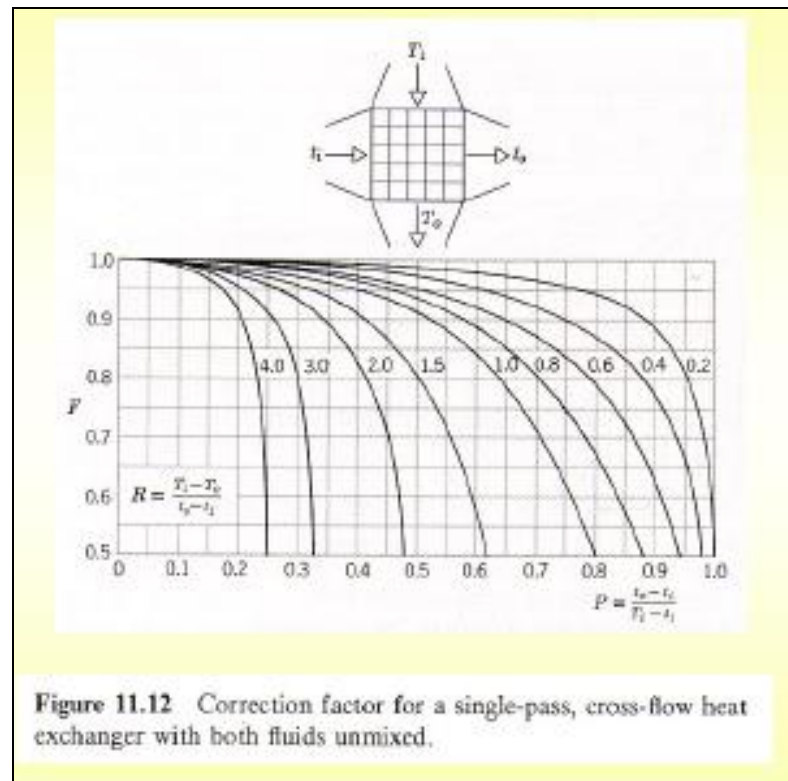
ΔT_{LM} est obtenue à partir de l'analyse effectuée pour le cas contre-courant.



(a)



(b)



©

Figure (3.5) : Facteur correctif F pour quelques types d'échangeur à courants croisés.

3.3.3 La méthode NUT (Efficacité d'un échangeur) :

La méthode de DTLM est basée sur la connaissance des températures des deux fluides aux extrémités de l'échangeur de chaleur (entrée et sortie). Comme on n'a pas souvent accès à ces températures, il serait intéressant de pouvoir évaluer l'échange thermique entre les deux fluides en partant des températures à l'entrée de l'échangeur uniquement. Ceci est envisageable en utilisant la méthode NUT (Nombre d'Unité de Transfert qui sera exposée ci-après).

A) L'efficacité d'un échangeur de chaleur :

Elle est définie comme le rapport de la puissance thermique réellement échangée à la puissance d'échange maximum théoriquement possible avec les mêmes conditions d'entrée des fluides dans l'échangeur (mêmes fluides, débits et températures d'entrée).

$$\varepsilon = \frac{\Phi_{\text{réel}}}{\Phi_{\text{maximum}}} \quad (3.24)$$

$$\phi_{\text{réel}} = \dot{m}_c C_{pc} (T_{ce} - T_{cs}) \quad (3.25a)$$

$$\phi_{\text{réel}} = \dot{m}_f C_{pf} (T_{fc} - T_{fe}) \quad (3.25b)$$

$$\phi_{\text{max}} = (\dot{m} C_p)_{\min} (T_{ce} - T_{cs}) \quad (3.26)$$

Donc, l'efficacité :

$$\text{Pour un fluide chaud : } \varepsilon = \frac{\left(\dot{m}_c C_{pc} (T_{ce} - T_{cs}) \right)}{(\dot{m} C_p)_{\min} (T_{ce} - T_{fe})} \quad (3.27a)$$

Pour un fluide froid

$$\phi = \varepsilon C_{\min} (T_{ce} - T_{fe}) \quad (3.28)$$

L'efficacité d'un échangeur de chaleur à courant parallèle :

$$\varepsilon = \frac{1 - \exp\left(NUT \left(1 - \frac{C_{\min}}{C_{\max}} \right) \right)}{1 + \frac{C_{\min}}{C_{\max}}} \quad (3.29a)$$

L'efficacité d'un échangeur de chaleur à contre courants :

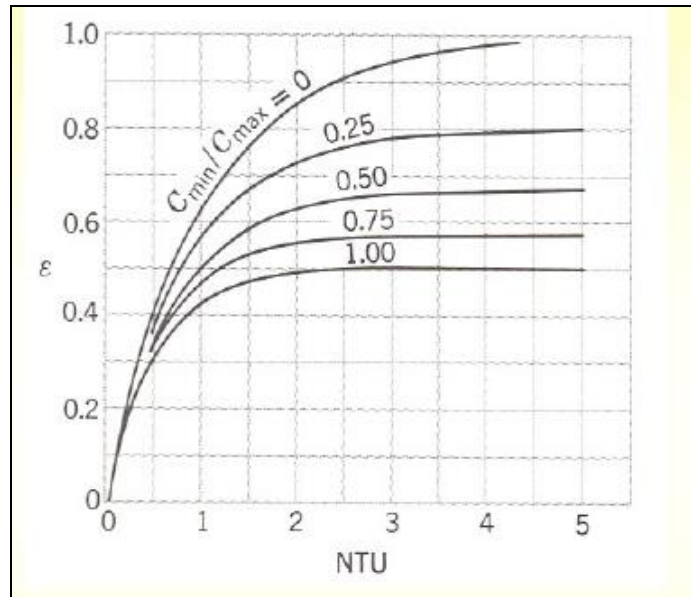
$$\varepsilon = \frac{1 - \exp\left(NUT \left(1 - \frac{C_{\min}}{C_{\max}} \right) \right)}{1 - \frac{C_{\min}}{C_{\max}} \exp(-N(1-C))} \quad (3.29b)$$

B) NUT :

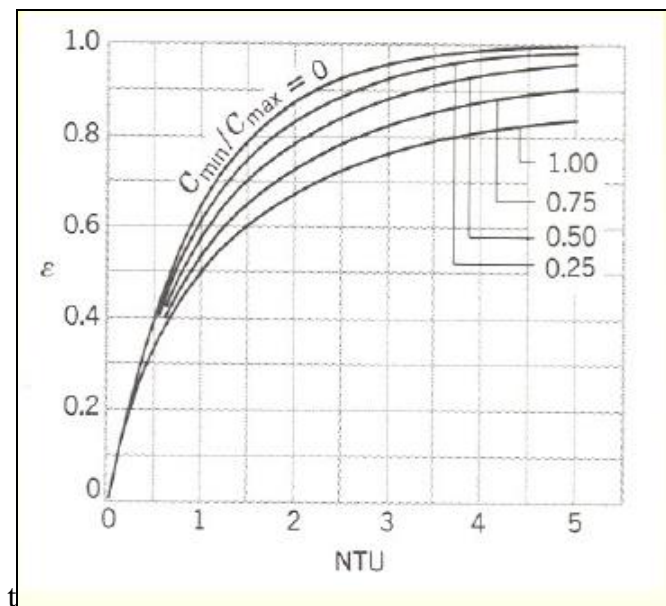
C'est un groupement à dimensionnelle, il est appelé nombre d'unité de transfert en abrégé NUT, il représente le pouvoir d'échange de l'appareil.

$$NUT = \frac{UA}{C_{\min}} \quad (3.29)$$

Des abaques fournissent l'efficacité à partir du NUT et du rapport $C_{\min}/C_{\max}$ ont été dressés pour la plupart de configurations courantes d'écoulements.



Figure(3.6a) : L'efficacité d'un échangeur à courants parallèles.



Figure(3.6b) : L'efficacité d'un échangeur à contre-courants.

Ainsi la méthode de calcul d'un échangeur par la méthode NUT revient à évaluer dans l'ordre :

- ◆ U le coefficient d'échange global
- ◆ C_f C_c et C_{min}/C_{max}
- ◆ E à partir des abaques du type $E=f(Nut, C_{min}/C_{max}, \text{configuration})$
- ◆ ϕ par l'équation(4.28).