Echangeur de chaleur

I. Technologie

1. Echangeur tubulaire simple

a. Qu'est-ce qu'un échangeur de chaleur ?

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.

Exemples : radiateur d'automobile, évaporateur de climatiseur, ...

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 (espace annulaire). Le transfert de chaleur du fluide chaud au fluide froid s'effectue à travers la paroi que constitue le tube intérieur :

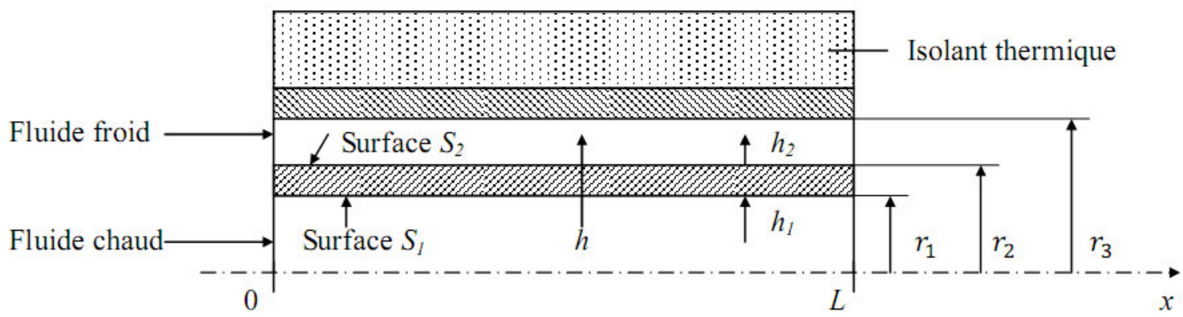


Figure 1: Schéma d'un échangeur tubulaire simple

❖ Hypothèses :

Dans les calculs qui suivent, les hypothèses suivantes sont à retenir :

- Pas de pertes thermiques : la surface de séparation est la seule surface d'échange.
- Pas de changement de phase au cours du transfert.

❖ Convention :

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 :

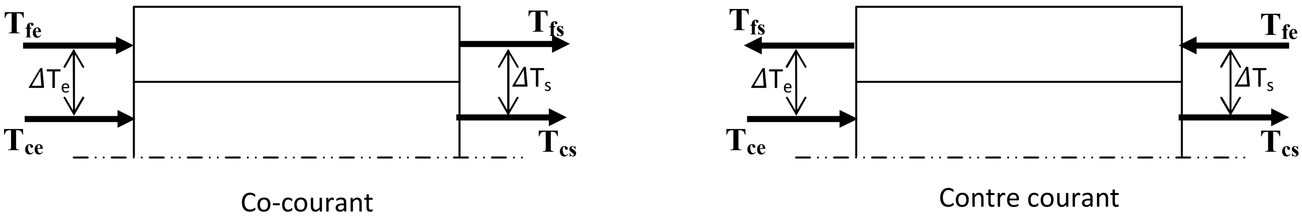


Figure 2: Schématisation des fonctionnements à co-courant et à contre-courant

b. Expression du flux échangé

Le 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.

$$\phi = \dot{m}_c Cp_c (T_{ce} - T_{cs}) = \dot{m}_f Cp_f \left(T_{fs} - T_{fe}\right)$$

Les produits $q_{cc} = \dot{m}_c Cp_c$ et $q_{cf} = \dot{m}_f Cp_f$ sont appelés les débits calorifiques des deux fluides.

Le flux de chaleur peut donc s'écrire :

$$\phi = q_{cc}(T_{ce} - T_{cs}) = q_{cf}\left(T_{fs} - T_{fe}\right)$$

Cette expression peut être écrite sous la forme :

$$\phi = U\, S_e \frac{\Delta T_s - \Delta T_e}{\ln \frac{\Delta T_s}{\Delta T_e}}$$

Avec :

$\begin{cases} \Delta T_s = T_{cs} - T_{fs} \\ \Delta T_e = T_{ce} - T_{fe} \end{cases}$ pour un fonctionnement co-courant et

$\begin{cases} \Delta T_s = T_{ce} - T_{fs} \\ \Delta T_e = T_{cs} - T_{fe} \end{cases}$ pour un fonctionnement contre courant

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

S_e : surface d'échange (m^2)

On pose :

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

Avec DTLM : c'est la Différence de Température Moyenne Logarithmique qui représente la moyenne logarithmique de la fonction ΔT entre l'entrée et la sortie de l'échangeur [°C].

Remarque :

- La distribution des températures des fluides le long de l'échangeur présente l'allure suivante :

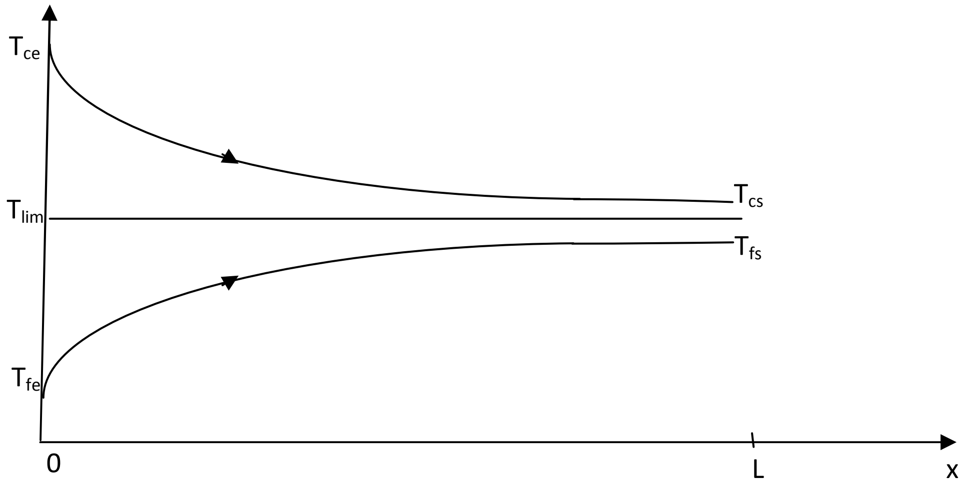


Figure 3: Evolution des températures dans un échangeur tubulaire fonctionnement co-courant

$$T_{lim} = \frac{q_{cc}T_{ce} + q_{cf}T_{fe}}{q_{cc} + q_{cf}}$$

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

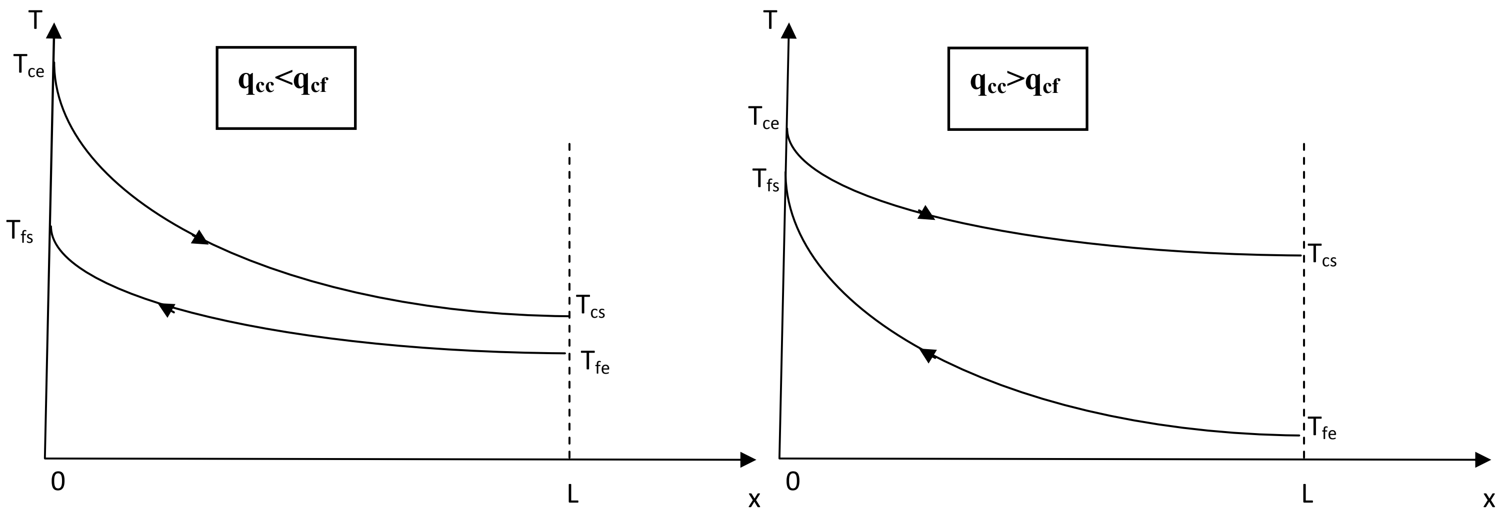
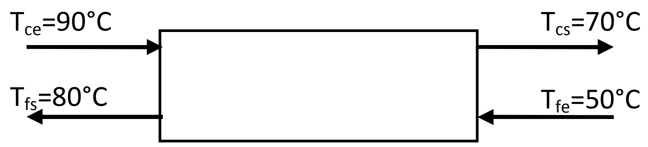


Figure 4: Evolution des températures dans un échangeur tubulaire fonctionnant à contre courant

- Si $q_{cc}<q_{cf}$: on dit que le fluide chaud commande le transfert.
- Si $q_{cc}>q_{cf}$: on dit que le fluide froid commande le transfert.

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

Exemple :



Il est par contre impossible d'obtenir T_{fs}>T_{cs} ou T_{fe}>T_{cs}.

- Comparaison de deux modes de fonctionnement :

Dans un échangeur tubulaire simple, le flux de chaleur transféré est toujours plus élevé avec un fonctionnement à contre courant car le DTLM est plus élevé.

Exemple :

Soient: T_{ce}= 90°C ; T_{cs}= 35°C ;T_{fe}= 20°C ; T_{fs}= 30°C

Co-courant	Contre-courant
$DTLM = \frac{(90-20)-(35-30)}{\ln\left(\frac{90-20}{35-30}\right)}$ $DTLM = 24,63°C$	$DTLM = \frac{(90-30)-(35-20)}{\ln\left(\frac{90-30}{35-20}\right)}$ $DTLM = 32,46°C$

$$DTLM)_{contre-courant} > DTLM)_{co-courant}$$

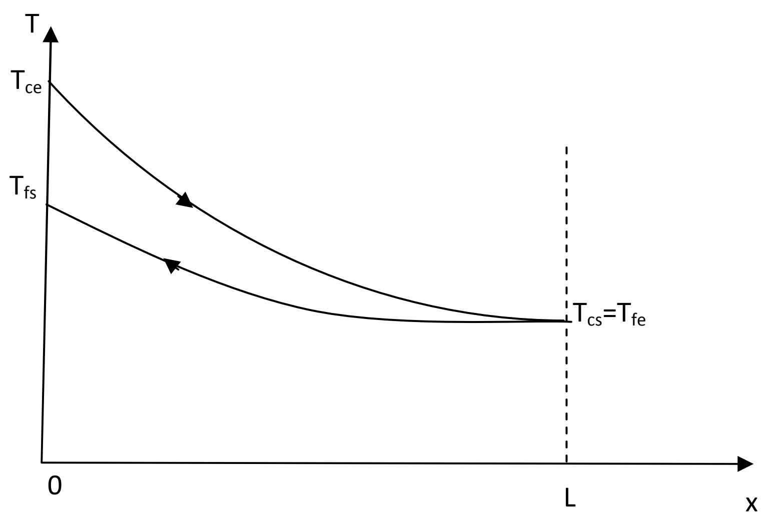
⇨ $\phi_{contre-courant} > \phi_{co-courant}$

c. Efficacité d'un échangeur

L'efficacité thermique, appelé aussi rendement thermique, d'un échangeur est le rapport du débit de chaleur échangé au débit maximal de chaleur échangeable.

$$\eta = \frac{\phi}{\phi_{max}} \quad ; \quad \left(\frac{\phi_{réel}}{\phi_{parfait}}\right); 0 \le \eta \le 1$$

1[er] cas : si $\begin{cases} q_{cc} < q_{cf} \\ T_{cs} = T_{fe} \end{cases}$, le fluide chaud commande le transfert. Ce cas correspond à un échangeur refroidissant parfaitement le fluide chaud.



Le débit de chaleur échangé est:

$$\phi = q_{cc}(T_{ce} - T_{cs})$$

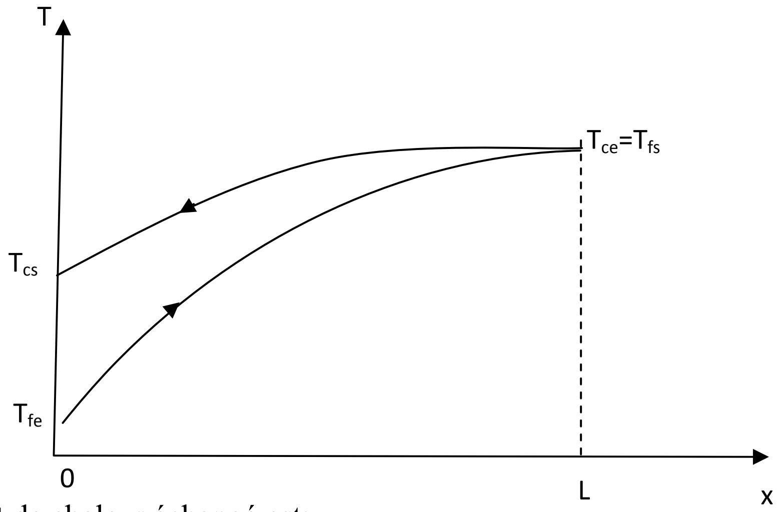
Le débit maximal de chaleur échangeable est dans ce cas :

$\phi_{max} = q_{cc}(T_{ce} - T_{fe})$ puisque $T_{cs} = T_{fe}$

$\Rightarrow \eta = \frac{q_{cc}(T_{ce}-T_{cs})}{q_{cc}(T_{ce}-T_{fe})} = \frac{T_{ce}-T_{cs}}{T_{ce}-T_{fe}} = \eta_r$

η_r: efficacité de refroidissement.

2ème cas : si $\begin{cases} q_{cc} > q_{cf} \\ T_{ce} = T_{fs} \end{cases}$, le fluide froid commande le transfert. Ce cas correspond à un échangeur réchauffant parfaitement le fluide froid.



Le débit de chaleur échangé est:

$$\phi = q_{cf}(T_{fs} - T_{fe})$$

Le débit maximal de chaleur échangeable est dans ce cas :

$\phi_{max} = q_{cf}(T_{ce} - T_{fe})$ puisque $T_{ce} = T_{fs}$

$\Rightarrow \eta = \frac{q_{cf}(T_{fs}-T_{fe})}{q_{cf}(T_{ce}-T_{fe})} = \frac{T_{fs}-T_{fe}}{T_{ce}-T_{fe}} = \eta_c$

η_c: efficacité de chauffage.

d. Nombre d'unités de transfert

Définition :

On appelle nombre d'unités de transfert noté NUT, le rapport adimensionnel $\frac{US}{q_c}$.

Le NUT est égal aussi à $\frac{T_{ce}-T_{fe}}{DTLM}$ pour le fluide chaud dans le cas d'un échangeur tubulaire simple.

$$NUT_C = \frac{US}{q_{cc}} = \frac{T_{ce} - T_{cs}}{DTLM}$$

NUT_c : nombre d'unités de transfert du côté chaud.

De même,

$$NUT_f = \frac{US}{q_{cf}} = \frac{T_{fs} - T_{fe}}{DTLM}$$

NUT_f : nombre d'unités de transfert du côté froid.

Remarque :

Le NUT est représentatif du pouvoir d'échange de l'échangeur.

$$NUT = \frac{US}{(q_c)_{min}} = \frac{US}{(\dot{m}Cp)_{min}}$$

Si $\dot{m}_c Cp_c > \dot{m}_f Cp_f$ alors $(\dot{m}Cp)_{min} = \dot{m}_f Cp_f$

Si $\dot{m}_c Cp_c < \dot{m}_f Cp_f$ alors $(\dot{m}Cp)_{min} = \dot{m}_c Cp_c$

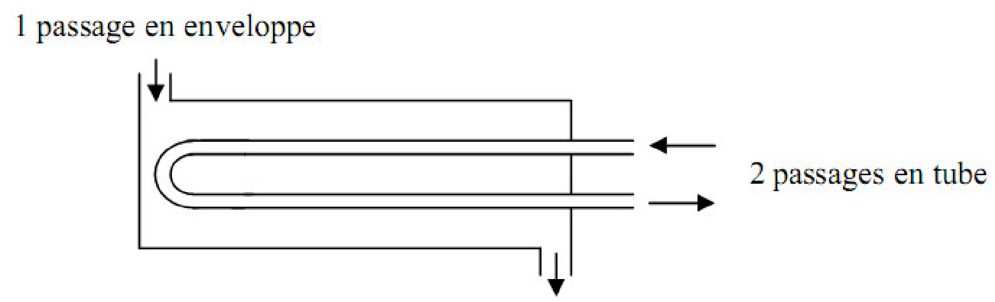
2. Echangeur à faisceaux complexes

Il est toutefois difficile avec l'échangeur tubulaire simple d'obtenir des surfaces d'échange importantes sans aboutir à des appareils très encombrants. C'est l'une des raisons qui a conduit à développer d'autres géométries d'échanges.

a. Echangeur 1-2

C'est l'échangeur à faisceau le plus simple : le fluide circulant dans l'enveloppe effectue un seul passage tandis que le fluide circulant dans le tube effectue 2 (ou 2H) passages.

Une passe en tube s'effectue à co-courant avec l'écoulement en calandre tandis que l'autre s'effectue à contre-courant (cf. figure 6.7). L'écoulement co-courant est moins efficace que l'écoulement à contre-courant, l'échangeur 1-2 a donc une efficacité comprise entre celle d'un échangeur tubulaire fonctionnant à co-courant et celle d'un échangeur tubulaire fonctionnant à contre-courant.



Comme pour l'échangeur tubulaire simple, il existe une relation reliant le nombre d'unités de transfert maximal NUTmax et l'efficacité η de l'échangeur :

$$NUT_{max} = -(1+z^2)^{-\frac{1}{2}} \ln\left[\frac{\frac{2}{\eta}-1-z-(1+z^2)^{\frac{1}{2}}}{\frac{2}{\eta}-1-z+(1+z^2)^{\frac{1}{2}}}\right]$$

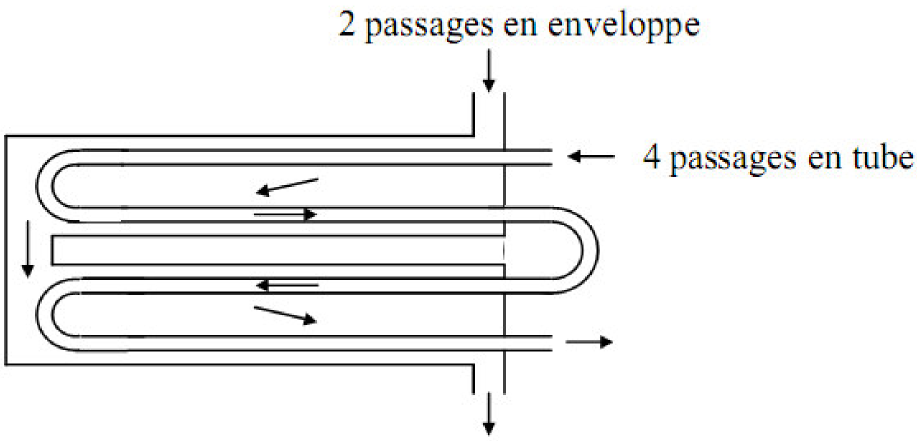
$$\eta_{1-2} = 2\left\{1+z+(1+z^2)^{\frac{1}{2}}\,\frac{1+exp\left[-NUT_{max}(1+z^2)^{\frac{1}{2}}\right]}{1-exp\left[-NUT_{max}(1+z^2)^{\frac{1}{2}}\right]}\right\}$$

On trouvera également en annexe A.6.1 les abaques établis à partir de cette relation. Le calcul d'un échangeur 1-2 s'effectue en appliquant la méthode du NUT telle qu'elle a été décrite pour les échangeurs tubulaires simples.

b. Echangeur 2-4

Lorsque l'échangeur 1-2 ne permet pas d'obtenir une efficacité supérieure à 0,75, on cherche à se rapprocher davantage de l'échangeur à contre-courant en effectuant 2 (ou plus) passages en calandre.

L'échangeur 2-4 comporte une chicane longitudinale de sorte que le fluide en enveloppe effectue 2 passages. Le fluide dans le tube effectue 4 (ou 4n) passages (cf. figure 6.8).

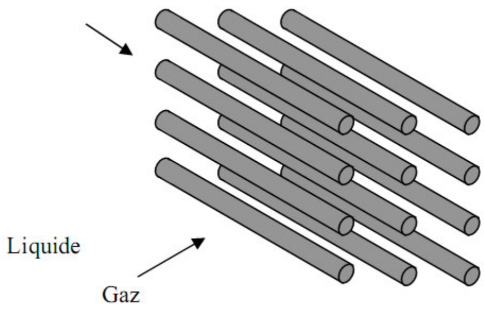


Comme pour l'échangeur tubulaire simple, il existe une relation reliant le nombre d'unités de transfert maximal NUTmax et l'efficacité η de l'échangeur.

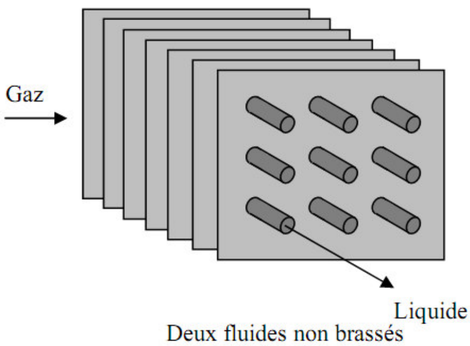
On trouvera en annexe A.6.1 les abaques établis à partir de cette relation. Le calcul d'un échangeur 2-4 s'effectue en appliquant la méthode du NUT telle qu'elle a été décrite pour les échangeurs tubulaires simples.

c. Echangeur à courants croisés

Les deux fluides s'écoulent perpendiculairement l'un à l'autre. Un fluide est dit non brassé s'il s'écoule dans une veine divisée en plusieurs canaux parallèles distincts et de faible section, il est dit brassé dans le cas contraire. Le brassage a pour effet d'homogénéiser les températures dans la section droite de la veine. Les échangeurs à courants croisés sont surtout utilisés pour des échangeurs entre un gaz circulant en calandre et un liquide circulant dans les tubes.



Un fluide brassé et un fluide non brassé



Deux fluides non brassés

Comme pour l'échangeur tubulaire simple, il existe une relation reliant le nombre d'unités de transfert maximal NUTmax et l'efficacité η de l'échangeur :

Deux fluides non brassés :

$$\eta = 1 - exp\left[\frac{exp(-z\,NUT_{max}{}^{0,78}) - 1}{z\,NUT_{max}{}^{-0,22}}\right]$$

Deux fluides brassés :

$$\eta = \left[\frac{1}{1-exp(-NUT_{max})} + \frac{z}{1-exp(-z\,NUT_{max})} - \frac{1}{NUT_{max}}\right]^{-1}$$

Un fluide non brassé :

Fluide commandant le transfert (qcmin) non brassé :

$$NUT_{max} = -ln\left[1 + \frac{1}{z}\,ln(1 - z\eta)\right]$$

$$\eta = \frac{1}{z}\{1 - exp[-z(1 - e^{-NUT_{max}})]\}$$

Fluide commandant le transfert (qcmin) brassé :

$$NUT_{max} = -\frac{1}{z}\,ln[1 + z\,ln(1 - z\eta)]$$

$$\eta = 1 - exp\left\{-\left(\frac{1}{z}\right)[1 - exp(-z\,NUT_{max})]\right\}$$

Le calcul d'un échangeur à courants croisés s'effectue en appliquant la méthode du NUT telle qu'elle a été décrite pour les échangeurs tubulaires simples. On trouvera en annexe A.6.1 des abaques représentant ces différentes formules.

d. Echangeurs frigorifiques

II. Calcul par méthode DTLM, NUT

Co-courant	Contre-courant
$NUT_{max} = \frac{-\ln[1-(1+z)\eta]}{1+z}$	$NUT_{max} = \frac{1}{z-1}\ln\left(\frac{\eta-1}{z\eta-1}\right)$
$\eta = \frac{1-\exp[-NUT_{max}(1+z)]}{1+z}$	$\eta = \frac{1-\exp[-NUT_{max}(1-z)]}{1-z\exp[-NUT_{max}(1-z)]}$

Avec : $NUT_{max} = \frac{h\,S}{q_{cmin}}$ et $z = \frac{q_{cmin}}{q_{cmax}}$

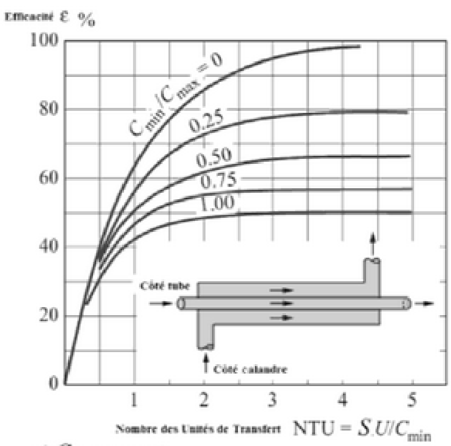
Le coefficient global de transfert h ayant été calculé, on connaît : q_{c1}, q_{c2}, T_{1e}, T_{1s}, T_{2e} et T_{2s}. On peut utiliser l'une des deux méthodes suivantes pour calculer S_2 :

Méthode MLDT :

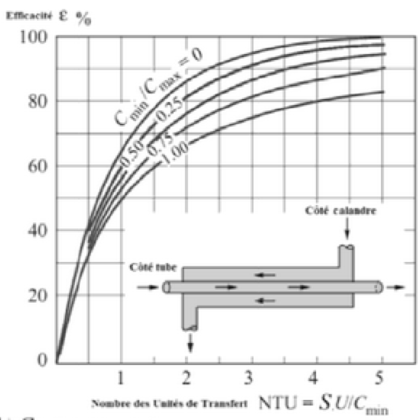
- On calcule $\varphi = q_{c1}\,(T_{1e} - T_{1s}) = q_{c2}\,(T_{2s} - T_{2e})$
- On calcule $\Delta T_m = \frac{\Delta T_s - \Delta T_e}{\ln\left(\frac{\Delta T_s}{\Delta T_e}\right)}$
- On en déduit $S_2 = \frac{\varphi}{h\,\Delta T_m}$

Méthode du NUT :

- On calcule η et $z = \frac{q_{cmin}}{q_{cmax}}$
- On détermine NUT_{max} par utilisation des formules (6.12) ou des abaques
- On en déduit $S_2 = NUT_{max}\frac{q_{cmin}}{h}$



a) Co-courant



b) Contre-courant

III. Echangeur avec changement de phase

IV. Méthode de KERN pour le dimensionnement

La méthode de KERN est très utilisée pour le dimensionnement des échangeurs thermiques du fait de sa simplicité et la rapidité de sa mise en œuvre. Elle donne des résultats satisfaisants dans la plupart des cas. Elle exige, cependant, une spécification préliminaire du type d'échangeur incluant la suggestion d'une géométrie interne. Cette étape préliminaire peut être conduite en prenant un coefficient global d'échange typique pour les deux fluides mis en contact dans la bibliographie (voir tablXXXXX).

Ayant formulé le calcul préliminaire, le coefficient global d'échange est ensuite calculé en évaluant le coefficient de transfert côté tube et le coefficient de transfert côté calandre. Finalement, les facteurs de Fouling sont considérés et le coefficient global d'échange permettant de mener un calcul réaliste de l'échangeur estimé.

1. Coefficient d'échange

a. Coefficient d'échange côté tube, hi (tube side)

Ce coefficient peut être calculé par deux voies :

1ère voie :

b. Coefficient d'échange côté calandre

2. Pertes de charge

a. Pertes de charge côté tubes

b. Pertes de charge côté calandre

3. Procédure de calcul du coefficient de transfert et de la perte de charge côté calandre par la méthode de KERN

Cas des échangeurs multitubulaires

Les étapes de calcul dans ce cas sont les suivantes :

a. Calcul du diamètre hydraulique équivalent côté calandre

b. Calcul de la section passante maximale As

c. Calcul du débit massique par unité de surface G

d. Calcul de la vitesse linéaire v_c

e. Calcul du nombre de Reynolds et du nombre de Prandtl

f. Pour la valeur de Reynolds côté calandre, on tire le j_H de l'abaque pour le % de coupure de chicane choisi (généralement pris à 25%) et l'arrangement des tubes et on calcule h_e.

g. Pour la valeur de Reynolds calculée côté calandre, on tire le j_F de l'abaque pour le % de coupure de chicane choisi (généralement pris à 25%) et l'arrangement des tubes et on calcule la perte de charge ΔP_c.