



|   |  |   |
|---|--|---|
| L3  | R505   |   |
|  | Thermodynamique Généralités<br>Echangeur thermique |  |

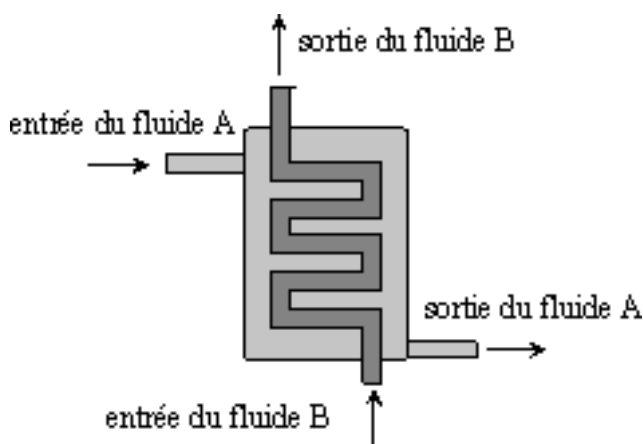
## 1. Introduction

Dans les installations industrielles, il est souvent nécessaire d'apporter une quantité de chaleur importante à une partie du système. Dans la majorité des cas, la chaleur est trans- mise à travers un échangeur de chaleur. On estime à 90% la part des transferts d'énergie réalisée par les échangeurs de chaleur dans l'industrie.

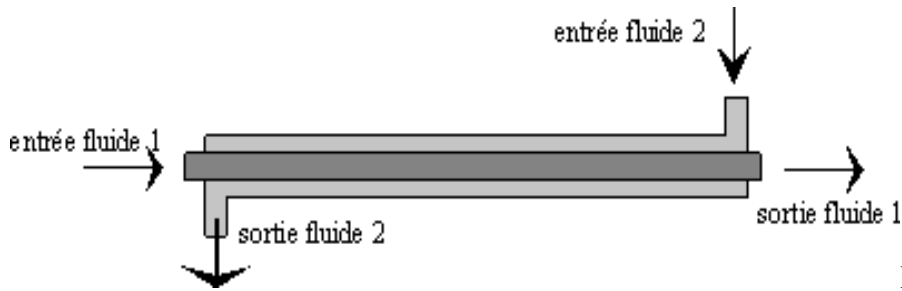
Le principe le plus général consiste à faire circuler deux fluides à travers des conduits qui les mettent en contact thermique. De manière générale, les deux fluides sont mis en contact thermique à travers une paroi qui est le plus souvent métallique ce qui favorise les échanges de chaleur. On a en général un fluide chaud qui cède de la chaleur à un fluide froid. En d'autres termes, le fluide chaud se refroidit au contact du fluide froid et le fluide froid se réchauffe au contact du fluide froid. Les deux fluides échangent de la chaleur à travers la paroi d'où le nom de l'appareil. On le voit, le principe général est simple mais il donne lieu à un grand nombre de réalisations différentes par la configuration géométrique. Le principal problème consiste à définir une surface d'échange suffisante entre les deux fluides pour transférer la quantité de chaleur nécessaire dans une configuration donnée. On vient de le dire, la quantité de chaleur transférée dépend de la surface d'échange entre les deux fluides mais aussi de nombreux autres paramètres ce qui rend une étude précise de ces appareils assez complexe. Les flux de chaleurs transférées vont aussi dépendre des températures d'entrée et des caractéristiques thermiques des fluides (chaleurs spécifiques, conductivité thermique) des fluides ainsi que des coefficients d'échange par convection. Ce dernier paramètre dépend fortement de la configuration des écoulements et une étude précise doit faire appel à la mécanique des fluides.

D'après ce qui précède, on voit bien qu'il y a différentes manières de traiter le problème. Une étude fine doit prendre en compte tous les paramètres et résoudre les problèmes de mécanique des fluides qui peuvent être très compliqués. Une telle approche est possible par des méthodes numériques à travers un logiciel approprié. Cette approche est très coûteuse mais tend à se répandre avec le développement des outils informatiques. Nous ne développerons pas cet aspect des choses et nous nous contenterons de donner quelques références pour le lecteur intéressé.

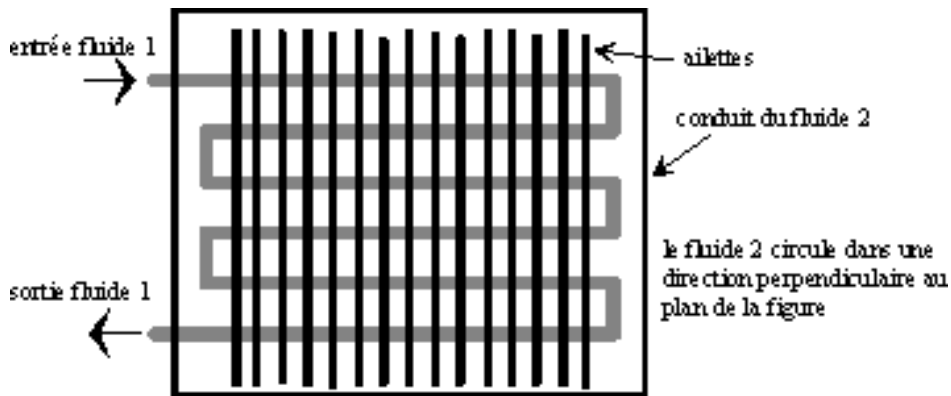
Par ailleurs, il existe des méthodes d'étude globales qui moyennant quelques hypothèses simples peuvent donner des résultats approximatifs qui seront suffisants dans la plupart des cas. Ces méthodes seront présentées ici de manière succincte.



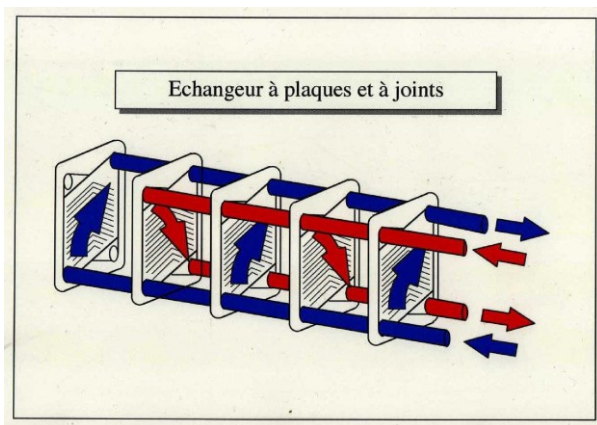
Echangeur à tubes et calandre



Échangeur à tubes coaxiaux



Echangeur à courants croisés



Échangeur à plaques

## 2. Calcul des échangeurs

### 1. Notion de débit :

Le débit caractérise la quantité de matière passant à travers une surface donnée en un temps donné. On distingue le débit volumique et le débit massique.

Si la masse  $\Delta m$  occupant le volume  $\Delta V$  passe à travers la surface pendant le temps  $\Delta t$  les débits

seront définis par débit volumique  $Dv = \frac{dV}{dt}$  ou débit massique  $Dm = \rho Dv = \frac{dm}{dt} = \dot{m}$

### 2. Calorimétrie

Dans un échangeur, aucun travail mécanique est reçu ou fourni

On rappelle que  $Q = \Delta H = mc_p(T_2 - T_1)$

### 3. Puissance

La puissance est la variation d'énergie au cours du temps.

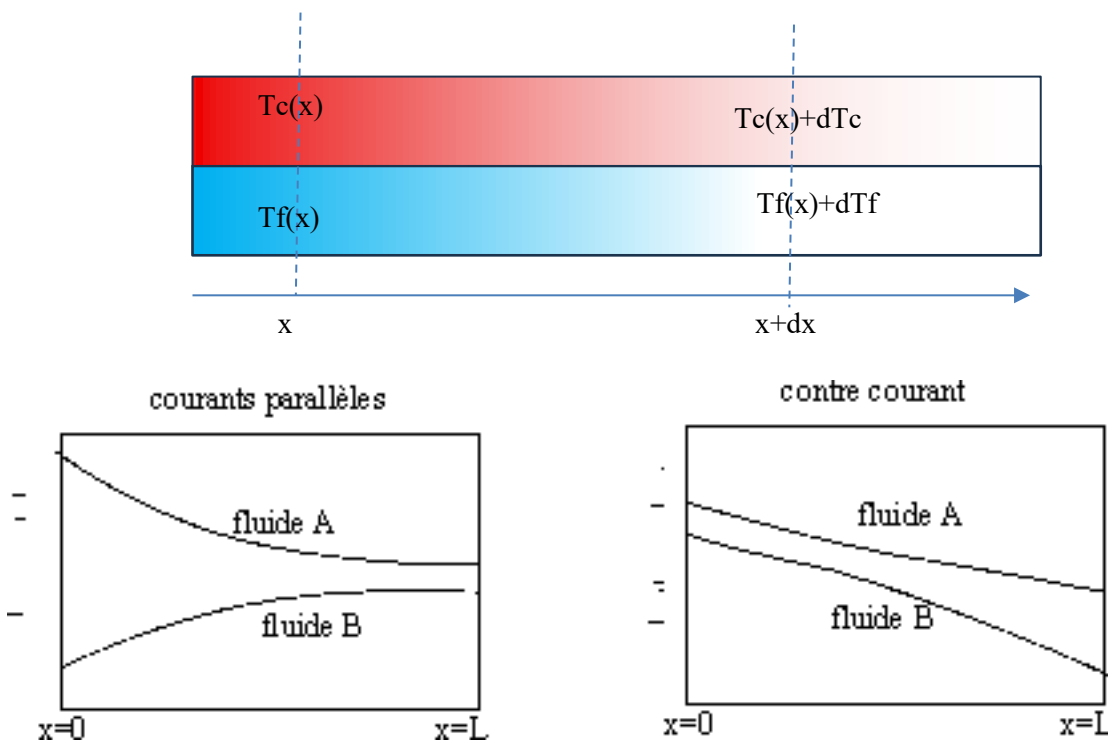
$$\frac{dQ}{dt} = \frac{dH}{dt} = \dot{m}c_p(T_2 - T_1)$$

### 3. Méthode de l'écart de température logarithmique moyen

Cette méthode s'applique aux échangeurs coaxiaux. Nous développerons le calcul pour le cas du co-courant. Le calcul se mène de manière similaire pour le cas du contre-courant et sera laissé en exercice pour le lecteur consciencieux.

Considérons Un échangeur coaxial fonctionnant en co-courant : le fluide chaud entre avec la température  $T_{ce}$  et ressort à la température  $T_{cs}$

De même, le fluide froid entre à la température  $T_{fe}$  pour ressortir à la température  $T_{fs}$



un profil de température typique pour ce type de fonctionnement

Tout au long de ce calcul, on notera  $\varphi$  le flux de chaleur passant du fluide chaud vers le fluide froid.

Il sera donc nécessairement positif dans ce cas. Par définition :  $\varphi = \frac{dQ_{c \rightarrow f}}{dt}$

Examinons le transfert de chaleur dans une portion d'échangeur de longueur  $dx$  entre les sections d'abscisse  $x$  et d'abscisse  $x + dx$

- Echange à travers la surface  $dS$ . Le flux est proportionnel à la différence de température entre les 2 fluides à cet endroit soit :  $d\varphi = K (T_c - T_f) dS$  où  $K$  est un coefficient global d'échange de chaleur qui dépend des caractéristiques de l'écoulement et des fluides.
- perte de chaleur par le fluide chaud entre les sections en  $x$  et  $x + dx$  :

$$= -\dot{m}_c c_c dT_c = -\dot{m}_c c_c (T_c(x + dx) - T_c(x))$$

- gain de chaleur par le fluide froid

$$d\varphi = -\dot{m}_f c_f dT_f = -\dot{m}_f c_f (T_f(x + dx) - T_f(x))$$

On en déduit que  $dT_c = -\frac{d\varphi}{\dot{m}_c c_c}$  et  $dT_f = \frac{d\varphi}{\dot{m}_f c_f}$

$$dT_c - dT_f = -d\varphi \left( \frac{1}{\dot{m}_c c_c} + \frac{1}{\dot{m}_f c_f} \right) = -K(T_c - T_f) \left( \frac{1}{\dot{m}_c c_c} + \frac{1}{\dot{m}_f c_f} \right) dS$$

Pour alléger le calcul, on pose  $M = \left( \frac{1}{\dot{m}_c c_c} + \frac{1}{\dot{m}_f c_f} \right)$  ainsi

$$dT_c - dT_f = -K(T_c - T_f)M dS = KM(T_c - T_f)p dx \text{ p est le périmètre du tube de l'échangeur}$$

Cette équation peut aussi s'écrire

$$\frac{d(T_c - T_f)}{(T_c - T_f)} = KMp dx$$

En intégrant l'équation et en prenant en compte les conditions aux limites

$$\ln \left( \frac{(T_{cs} - T_{fs})}{(T_{ce} - T_{fe})} \right) = KMpL = KMS \text{ ou S est la surface totale de l'échangeur}$$

### 1. Calcul du flux échangé.

On est maintenant en mesure de calculer le flux échangé en intégrant la première expression du flux puisqu'on connaît la variation de  $T_c - T_f$ . On a donc :

$$d\varphi = K(T_{ce} - T_{fe})e^{-KMpx}p dx$$

On peut intégrer la différentielle

$$\varphi(x) = \frac{1}{M} \left( (T_{ce} - T_{fe})e^{-KMpx} - (T_{ce} - T_{fe}) \right) \text{ Sur l'ensemble de l'échangeur de longueur L}$$

$$\varphi = \frac{1}{M} \left( (T_{ce} - T_{fe})e^{-KMpL} - (T_{ce} - T_{fe}) \right) \text{ d'autre part } \varphi = \frac{1}{M} \left( (T_{cs} - T_{fs}) - (T_{ce} - T_{fe}) \right)$$

En remplaçant M par son expression

$$\varphi = LpL \frac{((T_{cs} - T_{fs}) - (T_{ce} - T_{fe}))}{\ln \left( \frac{(T_{cs} - T_{fs})}{(T_{ce} - T_{fe})} \right)}$$

$$\varphi = KS\Delta T_{LM}$$

avec  $\Delta T_{LM}$  la différence de température logarithmique moyenne

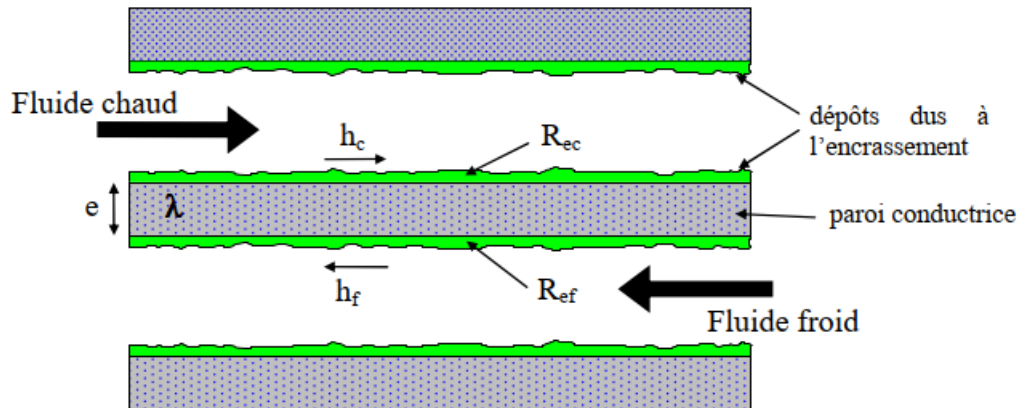
$$\Delta T_{LM} = \frac{((T_{cs} - T_{fs}) - (T_{ce} - T_{fe}))}{\ln(T_{cs} - T_{fs}) - \ln(T_{ce} - T_{fe})}$$

Dans le cas où l'échangeur fonctionne à contrecourant, la formule globale reste la même mais le calcul du  $\Delta T_{LM}$  est différent

$$\Delta T_{LM} = \frac{((T_{cs} - T_{fe}) - (T_{ce} - T_{fs}))}{\ln(T_{cs} - T_{fe}) - \ln(T_{ce} - T_{fs})}$$

## 2. Calcul du coefficient K

Le calcul du coefficient K résulte de la mise en série de résistance thermique entre les deux flux soit par conduction soit par convection

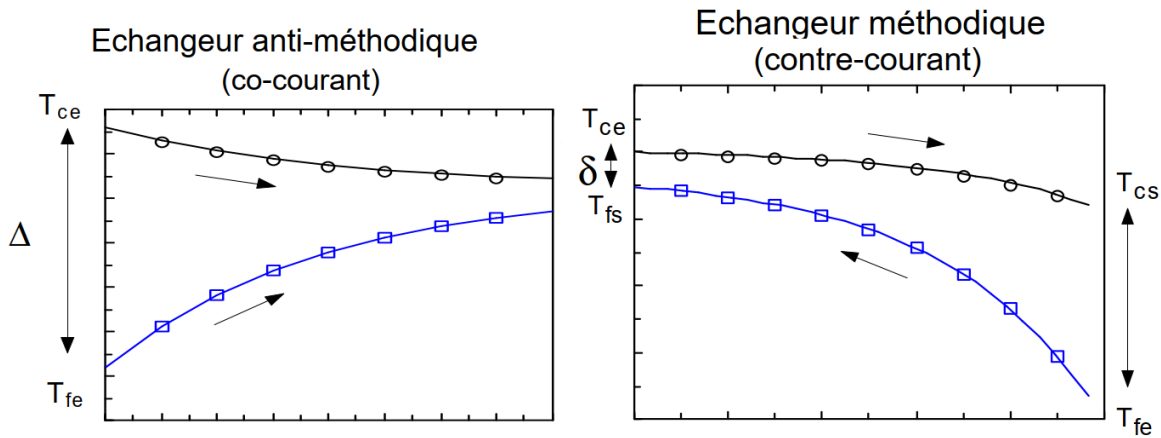


$$\frac{1}{K} = \frac{1}{h_c} + \frac{e}{\lambda} + \frac{1}{h_f} + R_{ec} + R_{ef}$$

$h_c$  et  $h_f$  sont calculés avec les formules de convection forcées pour des températures de fluides moyennes et  $R_{ec}$  et  $R_{ef}$  sont les résistances thermiques d'encrassement

## 3. Bilan

En résumé, l'analyse du système donne le résultat suivant :



Dans ces deux configurations, il est possible en faisant un bilan thermique sur une tranche élémentaire, puis en intégrant sur toute la longueur de l'échangeur, de calculer l'écart de température moyen entre les fluides chaud et froid. On trouve ainsi :

$$\Delta T_m = \frac{\delta - \Delta}{\ln(\delta) - \ln(\Delta)}$$

On appelle  $\Delta T_m$  l'écart logarithmique moyen et on le note DTLM.

$$P = K S \Delta T_m = \dot{m}_c C_c (T_{ce} - T_{cs}) = \dot{m}_f C_f (T_{fe} - T_{fs})$$

#### 4. Applications

##### EXERCICE 1 :

Calculer les surfaces d'échange pour des échangeurs à courants parallèles de même sens et de sens contraire avec les données suivantes :

$$T_{ce} = 110^{\circ}\text{C} \quad T_{cs} = 30^{\circ}\text{C} \quad \text{débit} = 5000\text{kg/h} \quad C_{pc} = 2100\text{J/kg K}$$

$$T_{fe} = 12^{\circ}\text{C} \quad T_{fs} = ? \quad \text{débit} = 12000\text{kg/h} \quad C_{pf} = 4180\text{J/kg K}$$

$$K = 300 \text{ W/m}^2 \text{ K} \quad S = ?$$

Réponse :  $S = 18,5 \text{ m}^2$  (anti-méthodique) et  $S = 34,8 \text{ m}^2$  (méthodique)

##### EXERCICE 2 :

Calculer la puissance de l'échangeur à contre-courant suivant :

$$T_{ce} = 110^{\circ}\text{C} \quad T_{cs} = ? \quad \text{débit} = 5000\text{kg/h} \quad C_{pc} = 4180\text{J/kg K}$$

$$T_{fe} = 10^{\circ}\text{C} \quad T_{fs} = ? \quad \text{débit} = 12000\text{kg/h} \quad C_{pf} = 4180\text{J/kg K}$$

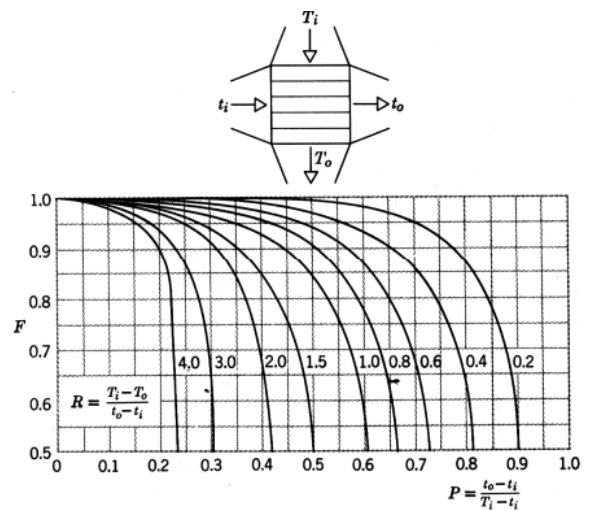
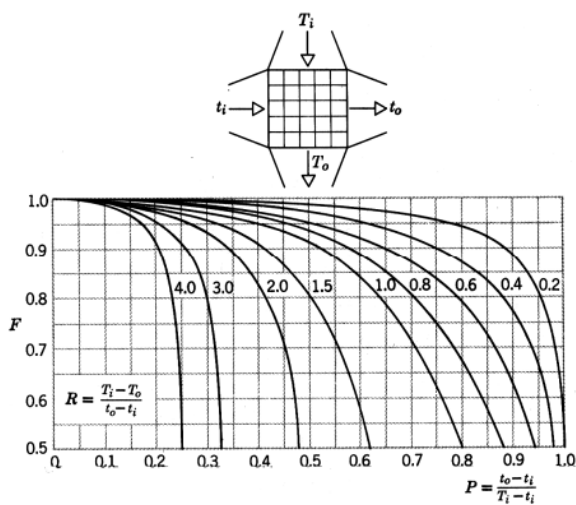
$$K = 300 \text{ W/m}^2 \text{ K} \quad S = 20 \text{ m}^2$$

Réponse :  $P = 340 \text{ kW}$  et  $T_{cs} = 51,4^{\circ}\text{C}$  ;  $T_{fs} = 34,4^{\circ}\text{C}$

Ces deux exercices illustrent les limites de la méthode du DTLM : dans l'exercice 1, qui correspond à un dimensionnement, le calcul est direct mais pour l'exercice 2, le calcul est obligatoirement itératif.

La méthode que nous venons de voir n'est valable que pour les échangeurs coaxiaux. Pour les autres types d'échangeurs, une méthode plus générale existe que nous allons décrire succinctement ci-dessous :

Dans ce cas  $\varphi = KFS\Delta T_{LM}$  Le coefficient F est calculé à partir d'abaques en voici deux exemples



## 1. Méthode du nombre d'unités de transfert (NUT)

Dans certains cas, la méthode du DTLM requiert un calcul itératif. La méthode des NUT permet par contre le plus souvent un calcul direct.

Elle repose sur la notion d'efficacité, notée  $\varepsilon$  et définie de la manière suivante :

$$\varepsilon = \frac{\text{Puissance réelle}}{\text{Puissance maximale}} = \frac{P}{P_{\max}} \text{ et } P_{\max} = C_{\min}(T_{ce} - T_{fe}) \text{ avec}$$

$$C_{\min} = \min(\dot{m}_c c_c; \dot{m}_f c_f) \text{ et } C_{\max} = \max(\dot{m}_c c_c; \dot{m}_f c_f) \text{ On pose alors } C = \frac{C_{\min}}{C_{\max}} \text{ et } NUT = \frac{KS}{C_{\min}}$$

Les expressions donnant l'efficacité dans différentes configurations sont résumées dans le tableau

|  |  |
|--|--|
| Courants parallèles et de même sens  | $\varepsilon = \frac{1 - \exp[-NUT(1+C)]}{1+C}$  |
| Courants parallèles et de sens contraires  | $\varepsilon = \frac{1 - \exp[-NUT(1-C)]}{1 - C \exp[-NUT(1-C)]}$  |
| Courants croisés : fluides non mixés (valeur approchée)                          | $\varepsilon = 1 - \exp\left\{\frac{1}{\eta C} [\exp[-NUT(\eta C)] - 1]\right\} \text{ avec } \eta = NUT^{-0,22}$                            |
| Courants croisés : fluides mixés   | $\varepsilon = NUT \left\{ \frac{NUT}{1 - \exp[-NUT]} + \frac{(NTU)(C)}{1 - \exp[-NUT(C)]} - 1 \right\}^{-1}$                                |
| Courants croisés : fluide $C_{\min}$ non mixé                                    | $\varepsilon = \frac{1}{C} \left\{ 1 - \exp[-C[1 - \exp(-NUT)]] \right\}$  |
| Courants croisés : fluide $C_{\max}$ non mixé                                    | $\varepsilon = 1 - \exp\left\{-\frac{1}{C}[1 - \exp[-NUT(C)]]\right\}$   |
| Echangeur tubulaire (coque et tubes) : 1 passe coté coque et 2 passes coté tubes | $\varepsilon = 2 \left\{ 1 + C + \frac{1 + \exp[-NUT(1+C^2)^{1/2}]}{1 - \exp[-NUT(1+C^2)^{1/2}]} \left( (1+C^2)^{1/2} \right) \right\}^{-1}$ |

### EXERCICE 2 :

Calculer la puissance de l'échangeur à contre-courant suivant avec la méthode des NUT

$T_{ce} = 110^\circ\text{C}$   $T_{cs} = ?$  débit = 5000kg/h  $C_{pc} = 4180\text{J/kg K}$

$T_{fe} = 10^\circ\text{C}$   $T_{fs} = ?$  débit = 12000kg/h  $C_{pf} = 4180\text{J/kg K}$

$K = 300\text{ W/m}^2\text{ K}$   $S = 20\text{ m}^2$

Réponse :  $P = 342\text{ kW}$  et  $T_{cs} = 51^\circ\text{C}$  ;  $T_{fs} = 34,4^\circ\text{C}$