



# ECHANGEURS DE CHALEUR

# Echangeurs de chaleurs

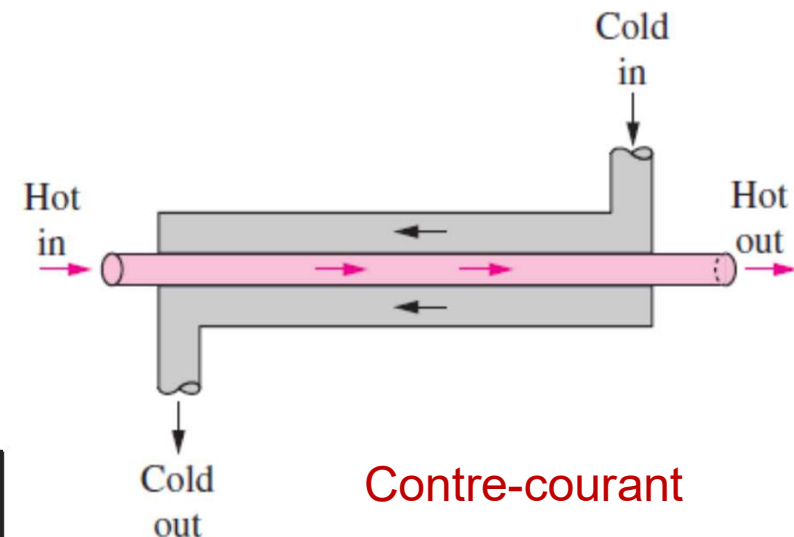
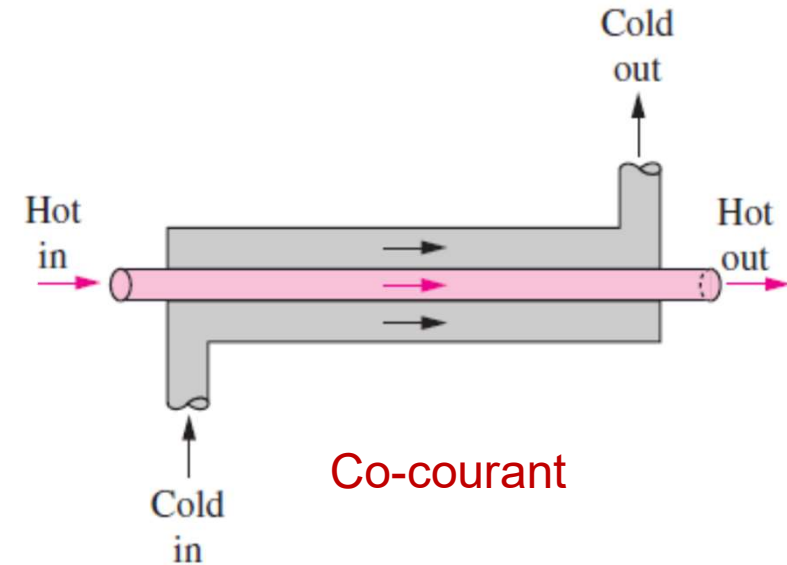
**Echangeur de chaleur:** appareil destiné au transfert de chaleur entre deux fluides

- Les fluides se trouvent à une température différente
- En général, il n’y a pas de contact direct entre les deux fluides (les fluides ne se mélangent pas!)
- Le transfert de chaleur a lieu:
  - Par convection dans chacun des fluides
  - Par conduction à travers la paroi qui les sépare

# Echangeur à double tube

Adapté pour des faibles débits et des gros écarts de température

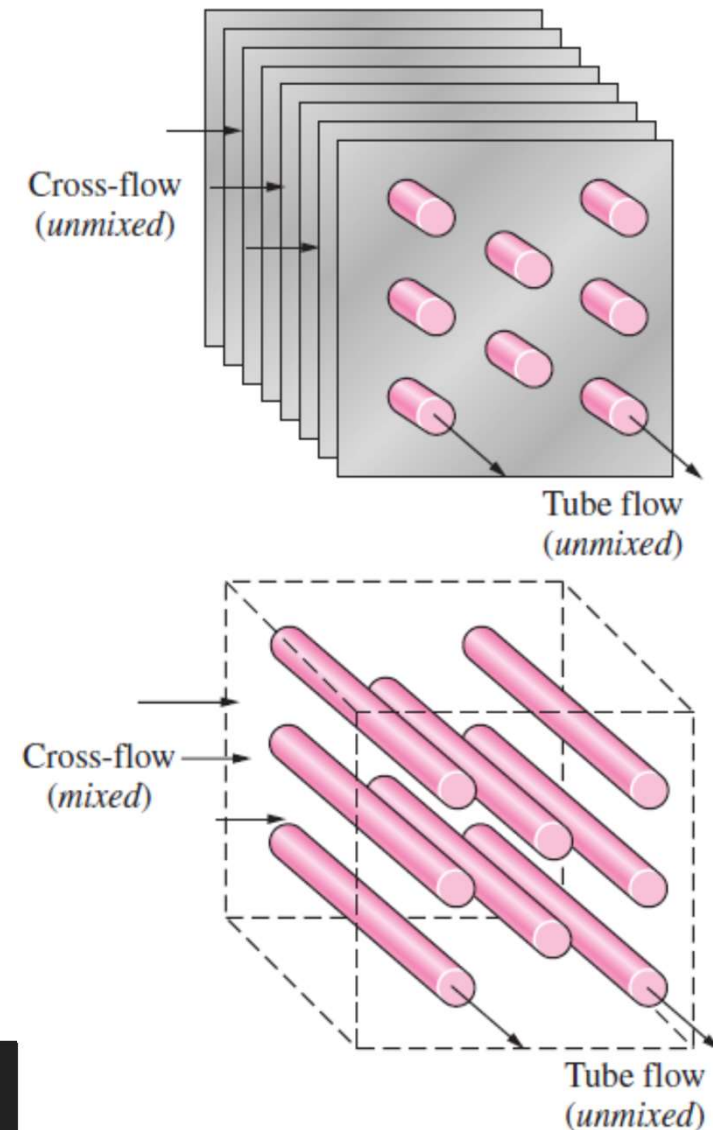
- + Réparation facile
- Long et encombrant
- Difficile à nettoyer



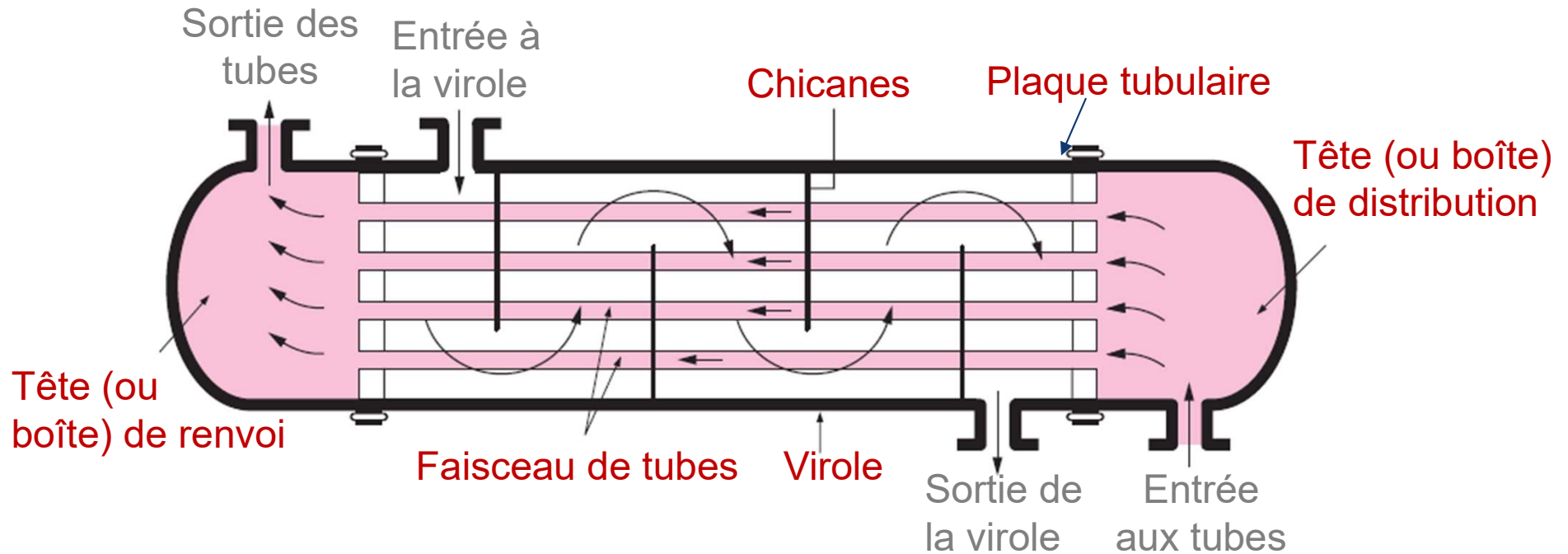
# Echangeur à ailette

Adaptés pour le transfert de chaleur entre deux gaz ou entre un gaz et un liquide

Fonctionnement en **courants croisés**, avec des fluides **brassés** ou **non**

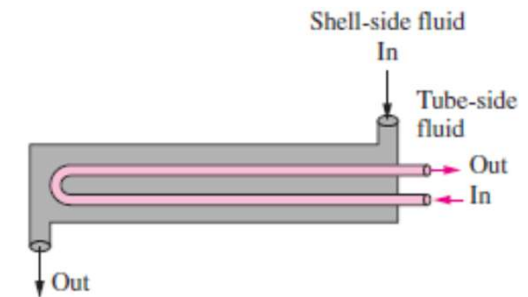


# Echangeur tubulaire



**Faisceau en U:** 1 seule plaque tubulaire

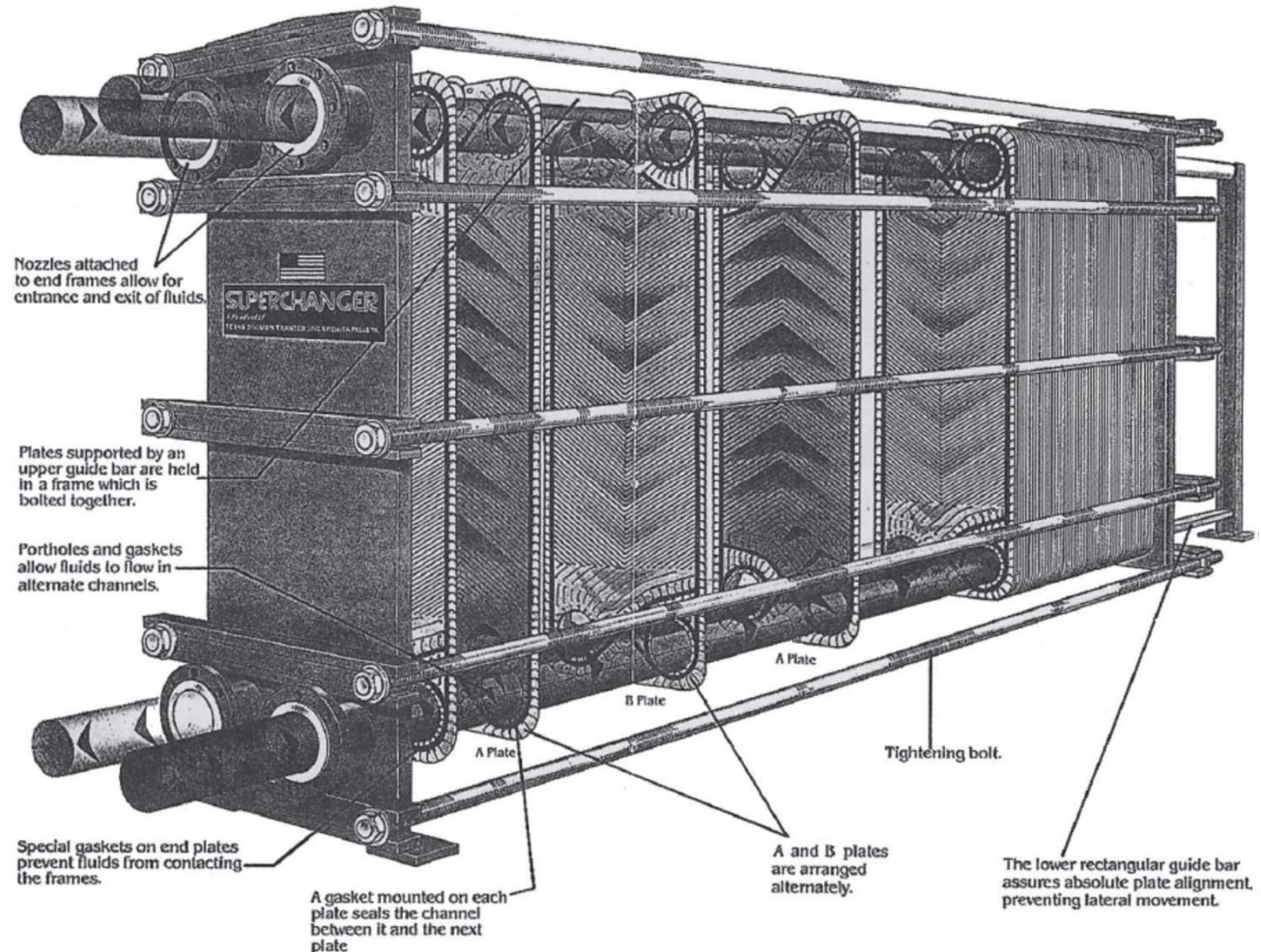
**Faisceau droit:** 2 plaques tubulaires



# Echangeur à plaques

Adapté au transfert de chaleur entre deux liquides, s'ils ont des pressions proches

- + encombrement
- + performance
- + nettoyage
- + réparation
- risque de fuites



# Coefficients de transfert globaux

Representative values of the overall heat transfer coefficients in heat exchangers

| Type of heat exchanger                        | $U, \text{W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}^*$ |
|---|--|
| Water-to-water                                | 850–1700                                 |
| Water-to-oil                                  | 100–350                                  |
| Water-to-gasoline or kerosene                 | 300–1000                                 |
| Feedwater heaters                             | 1000–8500                                |
| Steam-to-light fuel oil                       | 200–400                                  |
| Steam-to-heavy fuel oil                       | 50–200                                   |
| Steam condenser                               | 1000–6000                                |
| Freon condenser (water cooled)                | 300–1000                                 |
| Ammonia condenser (water cooled)              | 800–1400                                 |
| Alcohol condensers (water cooled)             | 250–700                                  |
| Gas-to-gas                                    | 10–40                                    |
| Water-to-air in finned tubes (water in tubes) | 30–60 <sup>†</sup>                       |
|   | 400–850 <sup>†</sup>                     |
| Steam-to-air in finned tubes (steam in tubes) | 30–300 <sup>†</sup>                      |
|   | 400–4000 <sup>‡</sup>                    |

\*Multiply the listed values by 0.176 to convert them to  $\text{Btu/h} \cdot \text{ft}^2 \cdot ^\circ\text{F}$ .

<sup>†</sup>Based on air-side surface area.

<sup>‡</sup>Based on water- or steam-side surface area.

# Encrassement des échangeurs

## Causes:

- Précipitation de solides
- Corrosion
- Développement d'algues

Representative fouling factors (thermal resistance due to fouling for a unit surface area)

(Source: Tubular Exchange Manufacturers Association.)

| Fluid  | $R_f, \text{m}^2 \cdot \text{°C/W}$ |
|--|-------------------------------------|
| Distilled water, sea water, river water, boiler feedwater: |                                     |
| Below 50°C   | 0.0001                              |
| Above 50°C   | 0.0002                              |
| Fuel oil   | 0.0009                              |
| Steam (oil-free)   | 0.0001                              |
| Refrigerants (liquid)                                      | 0.0002                              |
| Refrigerants (vapor)                                       | 0.0004                              |
| Alcohol vapors   | 0.0001                              |
| Air  | 0.0004                              |

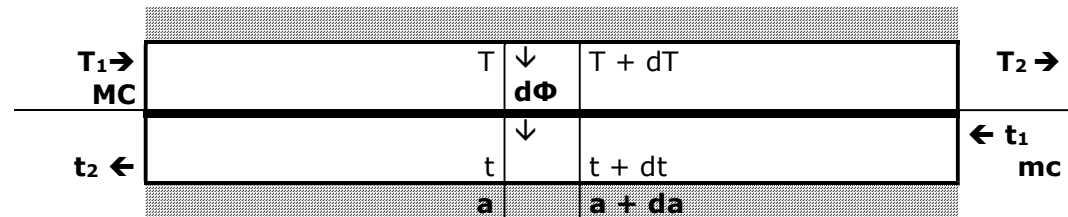


# Echangeur contre-courant (« méthodique »)

$$d\Phi = U \cdot da \cdot (T - t)$$

$$d\Phi = -mc \cdot dt$$

$$d\Phi = -MC \cdot dT$$



Débits de capacité thermique: MC, mc

Donc,

$$d(T - t) = dT - dt = \frac{d\Phi}{mc} - \frac{d\Phi}{MC} = U \cdot \left( \frac{1}{mc} - \frac{1}{MC} \right) \cdot (T - t) \cdot da$$

$$\ln \left( \frac{T_2 - t_1}{T_1 - t_2} \right) = UA \cdot \left( \frac{1}{mc} - \frac{1}{MC} \right) = UA \cdot \left( \frac{t_2 - t_1}{\Phi} - \frac{T_1 - T_2}{\Phi} \right)$$

$$\Phi = UA \cdot \Delta\theta_{ln}$$

Température logarithmique moyenne :  $\Delta\theta_{ln} = \frac{(T_2 - t_1) - (T_1 - t_2)}{\ln \left( \frac{T_2 - t_1}{T_1 - t_2} \right)} = \frac{\Delta T_a - \Delta T_b}{\ln \frac{\Delta T_a}{\Delta T_b}}$

# Echangeur co-courant (« anti-méthodique »)

$$d\Phi = U \cdot da \cdot (T - t)$$

$$d\Phi = +mc \cdot dt$$

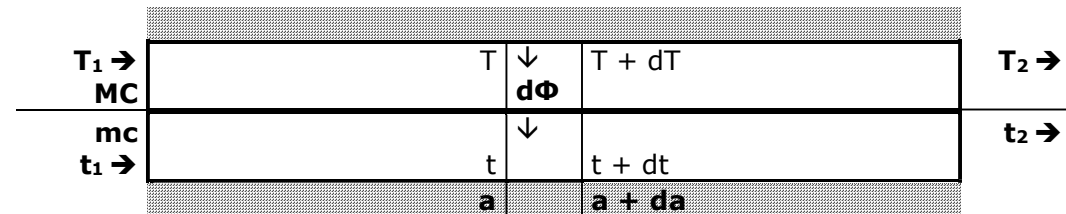
$$d\Phi = -MC \cdot dT$$

Donc,

$$d(T - t) = -U \cdot \left( \frac{1}{mc} + \frac{1}{MC} \right) \cdot (T - t) \cdot da$$

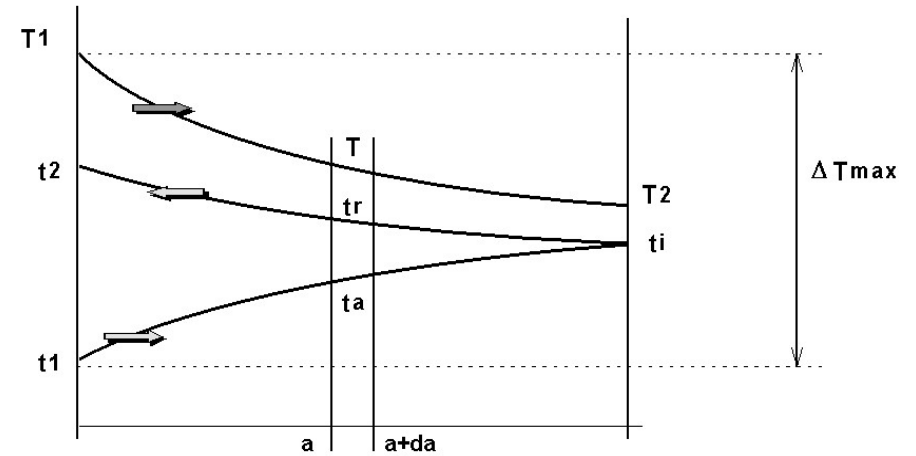
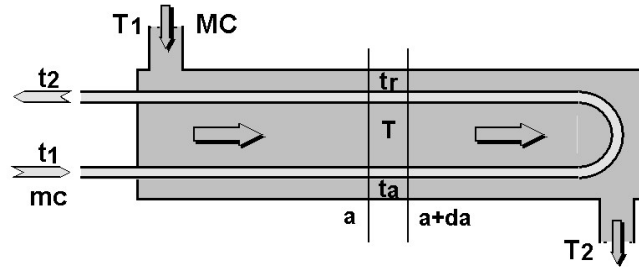
$$\ln \left( \frac{T_2 - t_2}{T_1 - t_1} \right) = -UA \cdot \left( \frac{1}{mc} + \frac{1}{MC} \right)$$

$$\Phi = UA \cdot \Delta\theta_{ln}$$



Température logarithmique moyenne :  $\Delta\theta_{ln} = \frac{(T_2 - t_2) - (T_1 - t_1)}{\ln \left( \frac{T_2 - t_2}{T_1 - t_1} \right)} = \frac{\Delta T_a - \Delta T_b}{\ln \frac{\Delta T_a}{\Delta T_b}}$

# Echangeurs tubulaires



$$\Phi = UA \cdot \Delta\theta_{ln} = UA \cdot F(\Delta\theta_{ln})_{\text{contre-courant}}$$

**Facteur correctif,  $F$ :** 
$$F = \frac{(\Delta\theta_{ln})}{(\Delta\theta_{ln})_{\text{contre-courant}}}$$

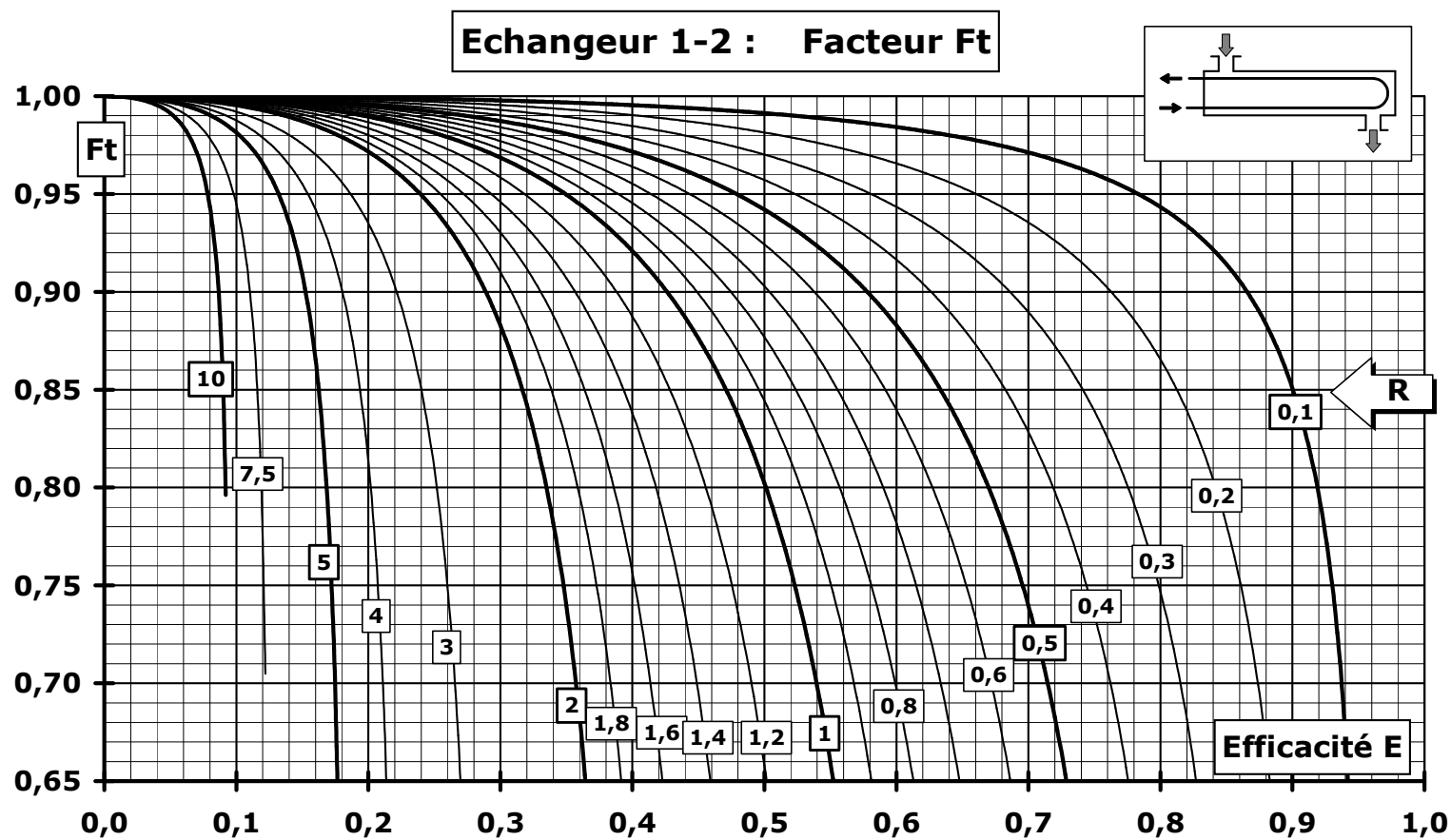
$F$  est donné par deux paramètres:

- L'**efficacité**,  $E_f = \frac{t_2 - t_1}{T_1 - t_1}$
- Le **facteur de déséquilibre**,  $R_f = \frac{mc}{MC}$

définis ici pour le fluide froid

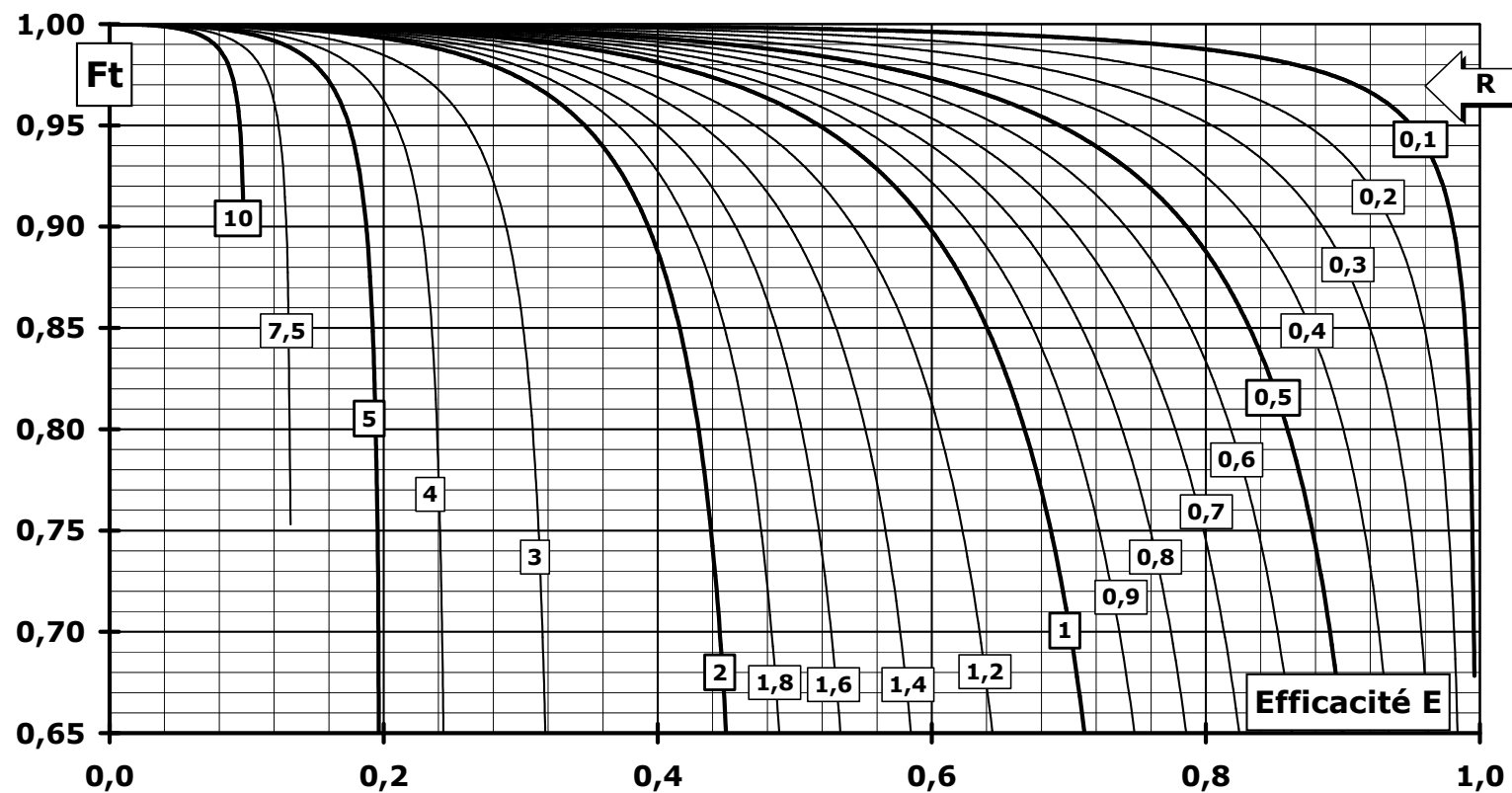
Il est possible aussi de définir ces grandeurs en utilisant plutôt le fluide chaud:  $E_c = \frac{T_1 - T_2}{T_1 - t_1}$  et  $R_c = \frac{MC}{mc}$

# Echangeur 1-2



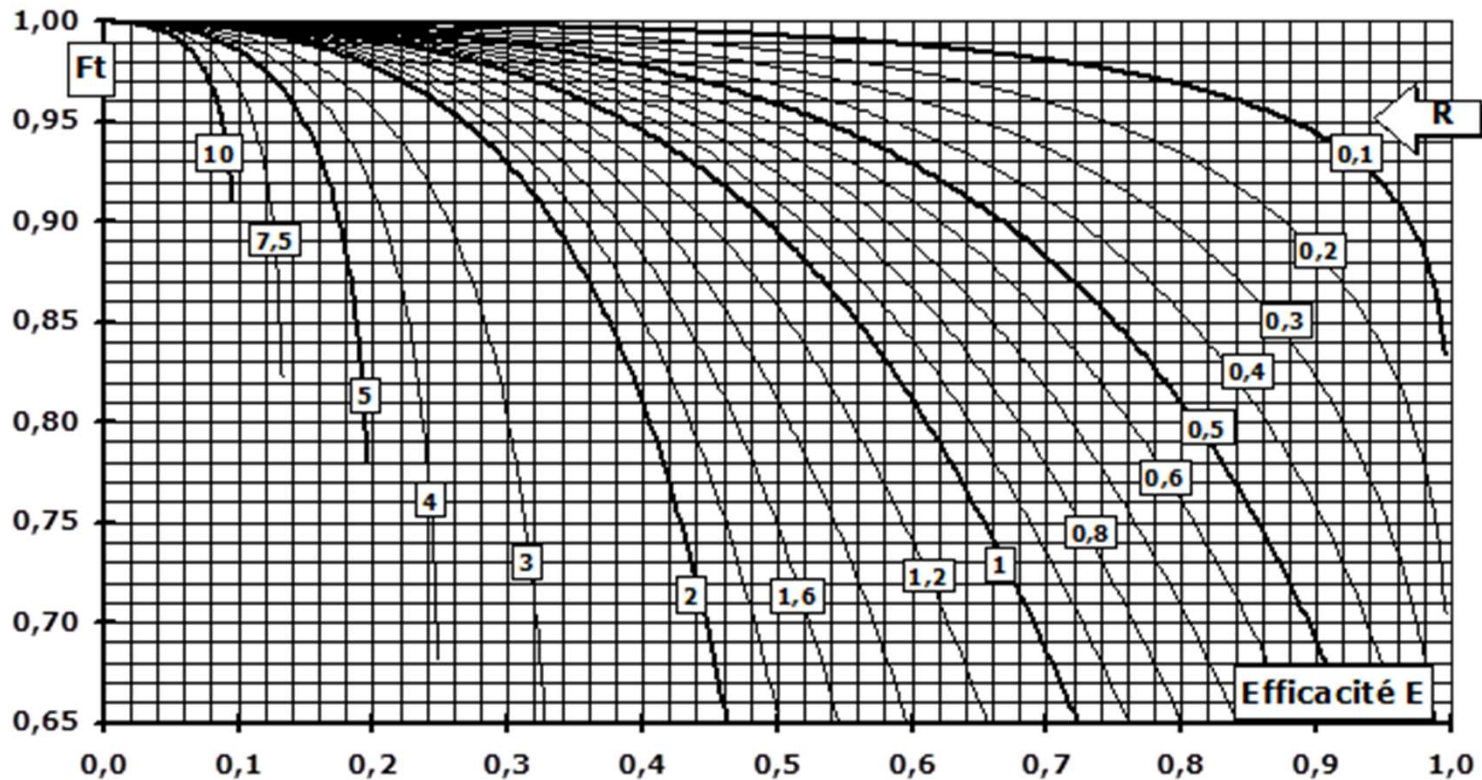
# Echangeur 2-4

Echangeur 2-4 : Facteur Ft



# Echangeur à flux croisés (2 fluides non brassés)

Echangeur flux croisés (2 fluides non mélangés) : Facteur Ft



# Efficacité d'un échangeur

$$\Phi = mc(t_2 - t_1) = MC(T_1 - T_2)$$

$$\Phi_{max} = mc(T_1 - t_1) \text{ si } MC > mc$$

$$\Phi_{max} = MC(T_1 - t_1) \text{ si } MC < mc$$

$$\Phi_{max} = mc(T_1 - t_1) = MC(T_1 - t_1) \text{ si } MC = mc$$

$$\text{Donc } \Phi_{max} = MC_{min}(T_1 - t_1)$$

## Efficacité de l'échangeur

$$E = \frac{\Phi}{\Phi_{max}} = \begin{cases} \frac{t_2 - t_1}{T_1 - t_1} & \text{si } MC > mc \\ \frac{T_1 - T_2}{T_1 - t_1} & \text{si } MC < mc \\ \frac{t_2 - t_1}{T_1 - t_1} = \frac{T_1 - T_2}{T_1 - t_1} & \text{si } MC = mc \end{cases}$$

$$0 \leq E \leq 1$$

## Facteur de déséquilibre de l'échangeur

$$R = \frac{MC_{min}}{MC_{max}}$$

$$0 \leq R \leq 1$$

# Nombre d'Unités de Transfert

## Nombre d'Unités de Transfert (NUT)

$$NUT = \frac{UA}{MC_{min}}$$

$$NUT_c = \frac{UA}{MC}$$

$$NUT_f = \frac{UA}{mc}$$



## Efficacité d'un échangeur contre-courant si $MC < mc$

On avait vu que  $\left(\frac{T_2 - t_1}{T_1 - t_2}\right) = \exp\left(UA \cdot \left(\frac{1}{mc} - \frac{1}{MC}\right)\right)$

Donc

$$\left(\frac{T_2 - t_1}{T_1 - t_2}\right) = \exp\left(\frac{UA}{MC} \cdot \left(\frac{MC}{mc} - 1\right)\right)$$

$$\left(\frac{T_2 - t_1}{T_1 - t_2}\right) = \exp(NUT \cdot (R - 1))$$

Par définition  $E = \frac{T_1 - T_2}{T_1 - t_1}$

On obtient finalement  $E = \frac{1 - \exp(NUT \cdot (R - 1))}{1 - R \cdot \exp(NUT \cdot (R - 1))}$



# Fonctions d'efficacité

Si l'un des fluides subit un changement de phase:  $R = 0$  alors  $E = 1 - \exp(-NUT)$  pour tout type d'échangeur

| TYPE D'ÉCHANGEUR  | RELATION $E = f(NUT, R)$  |
|---|---|
| Echangeur contre-courant  | $E = \frac{1 - \exp[NUT (R - 1)]}{1 - R \exp[NUT (R - 1)]}$   |
| Echangeur co-courant  | $E = \frac{1 - \exp[-NUT (1 + R)]}{1 + R}$  |
| Echangeur tubes-calandre type 1-2N (1-2, 1-4, 1-6, ...)                                     | $E = \frac{2}{1 + R + \sqrt{1+R^2} \frac{1 + \exp[-NUT \sqrt{1+R^2}]}{1 - \exp[-NUT \sqrt{1+R^2}]}}$                              |
| Echangeur courants croisés 2 fluides mélangés   | $E = \frac{1}{\frac{1}{1 - \exp(-NUT)} + \frac{R}{1 - \exp(-R.NUT)} - \frac{1}{NUT}}$   |
| Echangeur courants croisés 1 seul fluide non mélangé<br>E par rapport au fluide NON MELANGE | $E = \frac{1}{R} (1 - \exp[-R \{1 - \exp(-NUT)\}])$<br>R, NUT et E définis par rapport à $MC_{Non\ Mélangé}$                      |
| Echangeur courants croisés 1 seul fluide non mélangé<br>E par rapport au fluide MELANGE     | $E = 1 - \exp\left(-\frac{1}{R} [1 - \exp(-R.NUT)]\right)$<br>R, NUT et E définis par rapport à $MC_{mélangé}$                    |
| Echangeur courants croisés 2 fluides non mélangés   | $E = 1 - \exp\left(\frac{1}{R} NUT^{0,22} \cdot [\exp(-R.NUT^{0,78}) - 1]\right)$<br>E, NUT et R définis par rapport à $MC_{min}$ |



# Fonctions réciproques

Si  $R = 0$  alors

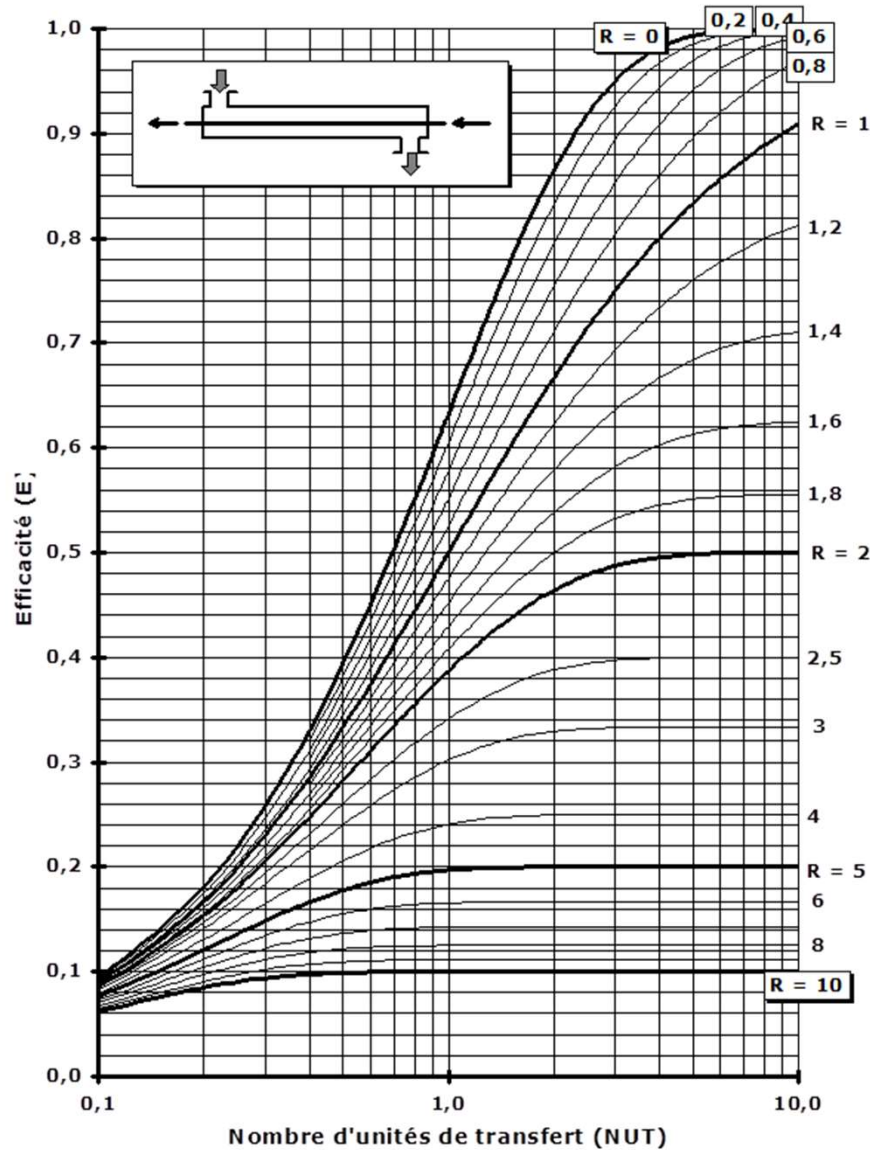
$$NUT = -\ln(1 - E)$$

pour tout type d'échangeur

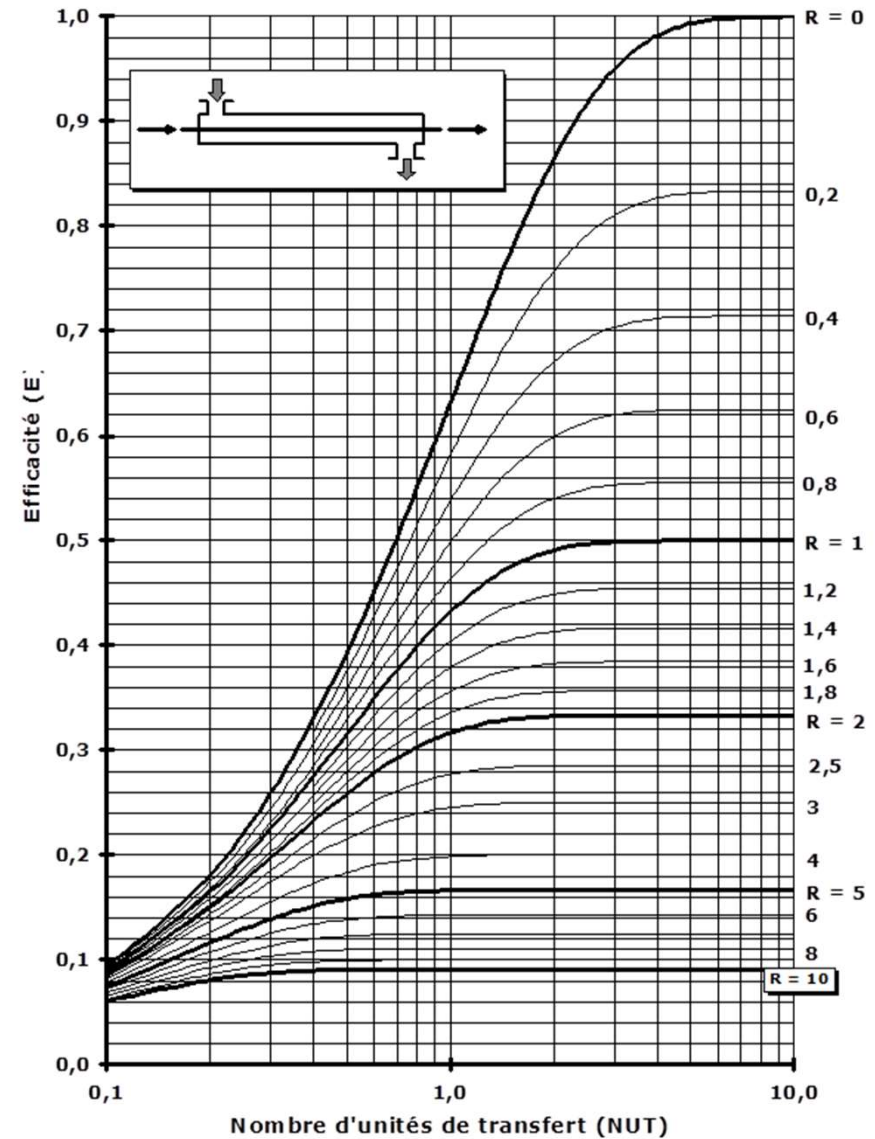
| TYPE D'ÉCHANGEUR  | Relation $NUT = f(E, R)$   |
|---|--|
| Echangeur contre-courant  | $NUT = \frac{1}{R - 1} \ln\left(\frac{1 - E}{1 - ER}\right)$   |
| Echangeur co-courant  | $NUT = \frac{-\ln(1 - E [1 + R])}{1 + R}$  |
| Echangeur tubes-calandre type 1-2N (1-2, 1-4, 1-6, ...)                                       | $NUT = \frac{1}{\sqrt{1+R^2}} \ln\left(\frac{\frac{2}{E} - 1 - R + \sqrt{1+R^2}}{\frac{2}{E} - 1 - R - \sqrt{1+R^2}}\right)$ |
| Echangeur courants croisés 2 fluides mélangés   |  |
| Echangeur courants croisés 1 seul fluide non mélangé<br>NUT par rapport au fluide NON MELANGE | $NUT = -\ln\left(1 + \frac{1}{R} \ln[1 - R.E]\right)$<br>E, R et NUT définis par rapport à $MC_{\text{Non Mélangé}}$         |
| Echangeur courants croisés 1 seul fluide non mélangé<br>NUT par rapport au fluide MELANGE     | $NUT = -\frac{1}{R} \ln[1 + R.\ln(1 - E)]$<br>E, R et NUT définis par rapport à $MC_{\text{Mélangé}}$                        |
| Echangeur courants croisés fluides non mélangés   |  |



EFFICACITE DE L'ECHANGEUR  
"Contre-Courant"

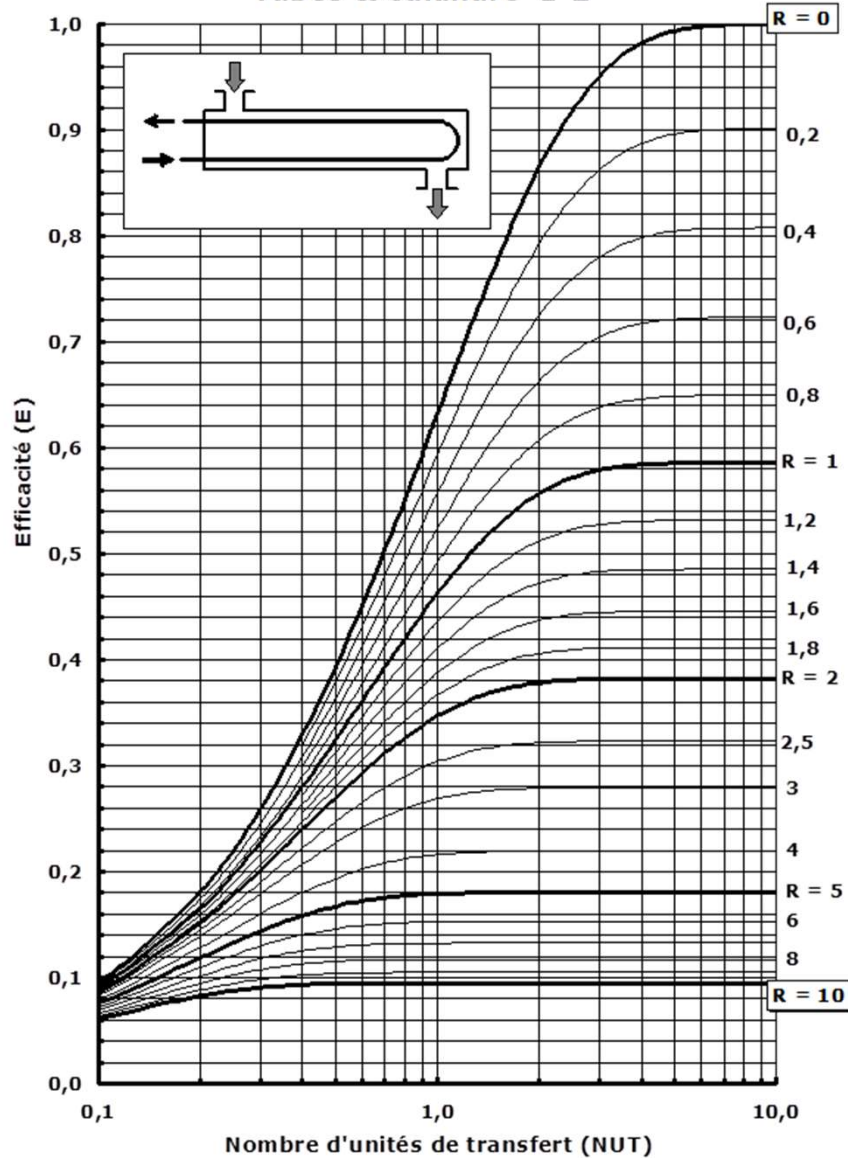


EFFICACITE DE L'ECHANGEUR  
"Co-Courant"





EFFICACITE DE L'ECHANGEUR  
"Tubes & Calandre 1-2"



EFFICACITE DE L'ECHANGEUR  
"Courants-croisés Non-mélangés"

