

Échangeurs de Chaleur

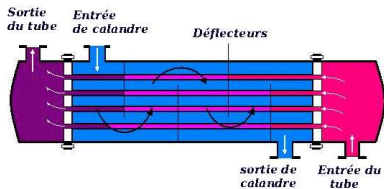
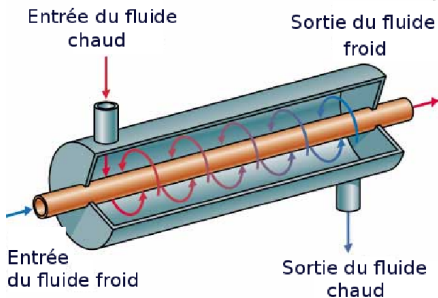
Objectifs

- ▶ Fournir des notions de base caractérisant les échangeurs thermiques
- ▶ Présenter 'grossièrement' les différentes classe des échangeurs thermiques
- ▶ Analyser des échangeurs type de transferts directs
- ▶ Présenter et appliquer les méthodes de dimensionnement des échangeurs

Généralités

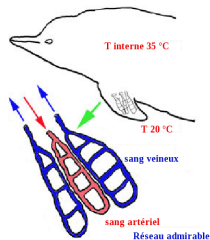
- ▶ **Échangeur de chaleur** : Il s'agit de tout dispositif permettant l'échange de chaleur entre deux fluides à des températures différentes sans qu'ils soient mélangés.
- ▶ **Il existe en gros trois classes d'échangeurs de chaleurs** :
 1. Échangeurs à transferts directs
 2. Échangeurs de stockage thermique
 3. Échangeurs à contacts directs

Échangeurs à transferts directs



- ▶ **Échangeurs à transferts directs** : Il s'agit de tout échangeur de chaleur dans lequel les fluides chaud et froid s'y écoulent simultanément avec la chaleur échangée à travers la paroi séparant les deux conduits d'écoulements.
- ▶ La température du fluide chaud s'abaisse alors, tandis que celle du fluide froid s'accroît.
- ▶ L'échange thermique a lieu à travers la paroi de séparation.

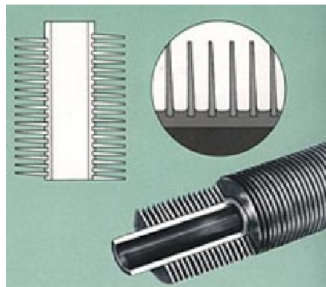
Exemples d'échangeurs de chaleur à transferts directs



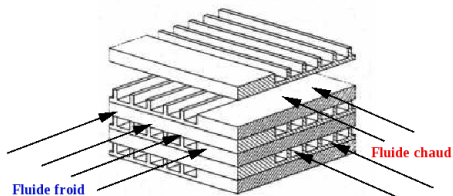
Thermorégulation du sang de dauphins



Ventilateur à tubes ailettés pour carte vidéo

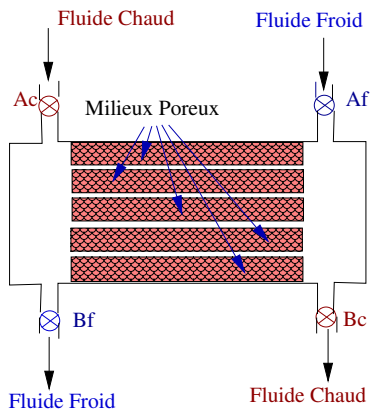


Tube ailetté



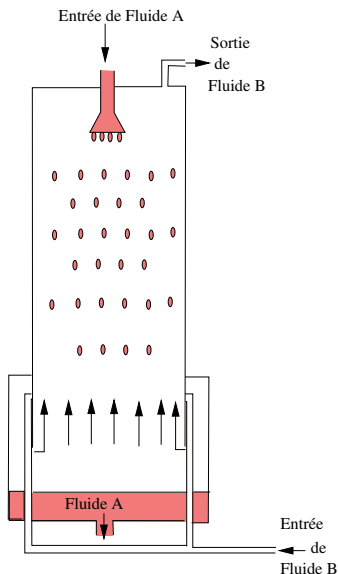
Échangeur à courants croisés

Échangeurs à stockage d'énergie



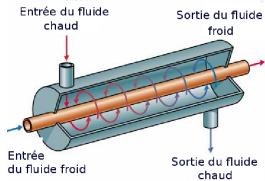
- ▶ **Échangeurs à stockage d'énergie** : Il s'agit de tout échangeur de chaleur dans lequel le transfert de chaleur du fluide chaud au fluide froid a lieu par l'intermédiaire d'un milieu du couplage sous la forme d'un milieu à matrice poreuse.
- ▶ Les fluides chaud et froid y circulent alternativement.
- ▶ Avec les soupapes *Ac* et *Bc* ouvertes, *Af* et *Bf* fermées, le fluide chaud sert à apporter l'énergie à stocker dans le milieu à matrice poreuse.
- ▶ Avec les soupapes *Ac* et *Bc* fermées, *Af* et *Bf* ouvertes, le fluide froid sert à évacuer l'énergie stockée (dans le milieu à matrice poreuse).

Échangeurs à contact direct

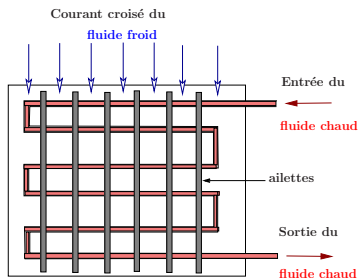


- ▶ **Échangeurs à contact direct** : Il s'agit de tout échangeur de chaleur dans lequel le transfert de chaleur du fluide chaud au fluide froid a lieu par contact direct entre les deux fluides, les deux fluides n'étant pas séparés.
- ▶ Supposons que la chaleur est à échanger entre un gaz (fluide B) et un liquide (fluide A).
- ▶ Alors, le transfert peut avoir lieu soit par passant le gaz sous forme des bulles dans le liquide ou soit en pulvérisant le liquide sous forme des gouttelettes dans le milieu gazeux comme illustré ci-contre.

Coefficient global d'échange thermique, U



Principe de l'échangeur tubulaire



Principe de l'échangeur à courants croisés

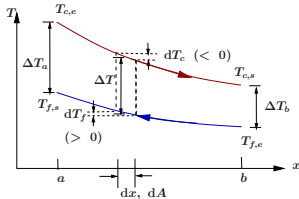
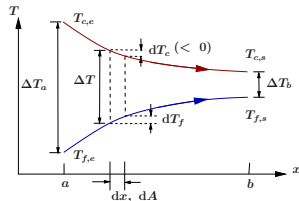
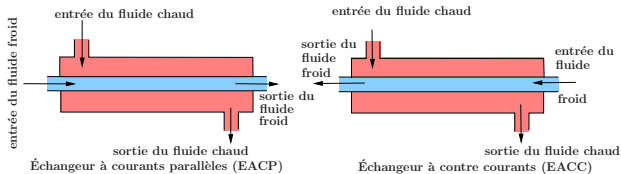
- ▶ Déterminer un coefficient global de l'échange thermique, U , constitue l'un des aspects incertains d'échangeur thermique.
- ▶ Cela provient de la dégradation continue de l'échangeur.
- ▶ On définit U en fonction de la résistance thermique totale à l'échange thermique entre les deux fluides :

$$\begin{aligned} \frac{1}{UA} &= \frac{1}{U_f A_f} = \frac{1}{U_c A_c} \\ &= \frac{1}{(\eta_0 hA)_f} + \frac{R_f''}{(\eta_0 A)_f} + R_{\text{paroi}} \\ &\quad + \frac{R_c''}{(\eta_0 A)_c} + \frac{1}{(\eta_0 hA)_c} \end{aligned} \quad (1)$$

- ▶ Les indices c et f désignent respectivement les fluides chauds et fluides froids, et :
 - ▶ A : l'aire de la surface d'échange thermique
 - ▶ η_0 : efficacité globale de surface de la surface ailetée, $\phi = \eta_0 hA(T_{\text{base}} - T_{\infty})$
 - ▶ R'' : résistance thermique, pour une unité de surface, provoquée par des défauts dans les fluides ainsi que dans les surfaces d'échange.
 - ▶ R_{paroi} : résistance thermique due à la conduction thermique à travers les parois d'échanges

Étude d'échangeurs tubulaires coaxiaux

Pour une puissance d'échange thermique donnée, on cherche à minimiser à la fois la surface d'échange et la perte de charge.



- ▶ T_c = la température du fluide chaud
- ▶ T_f = la température du fluide froid
- ▶ U = le coefficient globale d'échange entre les deux fluides, pouvant varier le long de l'échangeur, $W/m^2.K$
- ▶ \dot{m}_c = le débit massique du fluide chaud, kg/s
- ▶ \dot{m}_f = le débit massique du fluide froid, kg/s
- ▶ $c_{p,c}$ et $c_{p,f}$ = les chaleurs massiques à pression constante pour les fluides chaud et froid respectivement, $J/kg.K$

Étude d'un échangeur tubulaire - Analyse

- Premier principe appliqué à un fluide en écoulement stationnaire :

$$\left[h + \frac{1}{2} v^2 + gz \right]_1^2 = q_{12} + w_{m12}$$

- $h \equiv$ l'enthalpie massique.
- Contributions de l'énergie cinétique, potentielle et du travail sont négligeables.
- Alors, le flux thermique échangé :
 $\Phi = \dot{m}(h_2 - h_1) = \dot{m}c_p(T_2 - T_1)$
- \dot{m} = débit massique
- c_p = capacité (calorifique) massique à pression constante
- Alors, si c , e et s désignent respectivement les indices pour le fluide chaud, l'entrée et la sortie du fluide :

$$\Phi = \dot{m}_c(h_{c,e} - h_{c,s}) = \dot{m}_c c_{p,c}(T_{c,e} - T_{c,s}) \quad (2)$$

- Si f dénote le fluide froid :

$$\Phi = \dot{m}_f(h_{f,s} - h_{f,e}) = \dot{m}_f c_{p,f}(T_{f,s} - T_{f,e}) \quad (3)$$

- D'ici dorénavant h désignera le coefficient d'échange thermique par convection
- On admettra que la déperdition thermique soit nulle.
- Le bilan énergétique pour EACP à travers un élément de surface dA , de longueur dx :

$$d\Phi = U dA (T_c - T_f) \quad (4)$$

$$= -\dot{m}_c c_{p,c} dT_c, \quad dT_c < 0, \quad (5)$$

$$= \dot{m}_f c_{p,f} dT_f, \quad dT_f > 0, \quad (6)$$

- Alors, on tire :

$$dT_c = -\frac{d\Phi}{\dot{m}_c c_{p,c}} \quad (7)$$

$$dT_f = \frac{d\Phi}{\dot{m}_f c_{p,f}} \quad (8)$$

- D'où :

$$d(T_c - T_f) = -d\Phi \left(\frac{1}{\dot{m}_c c_{p,c}} + \frac{1}{\dot{m}_f c_{p,f}} \right) \quad (9)$$

Continue : Analyse d'un échangeur EACP

- ▶ Continu : $d\Phi = U \, dA (T_c - T_f)$,

$$d(T_c - T_f) = -d\Phi \left(\frac{1}{\dot{m}_c c_{p,c}} + \frac{1}{\dot{m}_f c_{p,f}} \right)$$

- ▶ En éliminant $d\Phi$:

$$\frac{d(T_c - T_f)}{(T_c - T_f)} = -U \, dA \left(\frac{1}{\dot{m}_c c_{p,c}} + \frac{1}{\dot{m}_f c_{p,f}} \right) \quad (10)$$

- ▶ ou

$$\frac{d\Delta T}{\Delta T} = -U \left(\frac{1}{C_c} + \frac{1}{C_f} \right) dA \quad (11)$$

- ▶ $C_c = \dot{m}_c c_{p,c}$, $C_f = \dot{m}_f c_{p,f}$

- ▶ $\Delta T = (T_c - T_f)$,

- ▶ $(\Delta T)_{x=0} = \Delta T_a$, $(\Delta T)_{x=L} = \Delta T_b$

- ▶ Si U reste constante le long de l'échangeur :

$$\int_a^b \frac{d\Delta T}{\Delta T} = -U \left(\frac{1}{C_c} + \frac{1}{C_f} \right) \int_a^b dA$$

- ▶ D'où

$$\ln \frac{\Delta T_b}{\Delta T_a} = -U A \left(\frac{1}{C_c} + \frac{1}{C_f} \right) \quad (12)$$

- ▶ Soit

$$\begin{aligned} \ln \left(\frac{T_{c,s} - T_{f,s}}{T_{c,e} - T_{f,e}} \right) \\ = -U A \left(\frac{1}{\dot{m}_c c_{p,c}} + \frac{1}{\dot{m}_f c_{p,f}} \right) \end{aligned} \quad (13)$$

- ▶ Mais :

$$\Phi = C_c (T_{c,e} - T_{c,s}) = C_f (T_{f,s} - T_{f,e}) \quad (14)$$

- ▶ Alors (13) se réécrit sous la forme :

$$\Phi = U A \frac{(T_{c,s} - T_{f,s}) - (T_{c,e} - T_{f,e})}{\ln \left(\frac{T_{c,s} - T_{f,s}}{T_{c,e} - T_{f,e}} \right)} \quad (15)$$

- ou

$$\Phi = U A \frac{\Delta T_b - \Delta T_a}{\ln \left(\frac{\Delta T_b}{\Delta T_a} \right)} \quad (16)$$

Analyse - Échangeur à contre courants

- ▶ Pour EACC, $dT_f < 0$ dans le sens des x positives.

- ▶ Alors

$$d\Phi = -\dot{m}_c c_{p,c} dT_c = -\dot{m}_f c_{p,f} dT_f \quad (17)$$

- ▶ D'où :

$$d(T_c - T_f) = - \left(\frac{1}{\dot{m}_c c_{p,c}} - \frac{1}{\dot{m}_f c_{p,f}} \right) d\Phi \quad (18)$$

- ▶ De la même manière que pour EACP, on élimine $d\Phi$ de (4), $d\Phi = U dA (T_c - T_f)$, et (18) :

$$\frac{d(T_c - T_f)}{(T_c - T_f)} = -U dA \left(\frac{1}{\dot{m}_c c_{p,c}} - \frac{1}{\dot{m}_f c_{p,f}} \right) \quad (19)$$

- ▶ En intégrant pour U constant :

$$\ln \left(\frac{T_{c,s} - T_{f,e}}{T_{c,e} - T_{f,s}} \right) = -U A \left(\frac{1}{\dot{m}_c c_{p,c}} - \frac{1}{\dot{m}_f c_{p,f}} \right) \quad (20)$$

- ▶ Finalement,

$$\Phi = U A \frac{(T_{c,e} - T_{f,s}) - (T_{c,s} - T_{f,e})}{\ln \left(\frac{T_{c,e} - T_{f,s}}{T_{c,s} - T_{f,e}} \right)} \quad (21)$$

- ▶ Avec $\Delta T = T_c - T_f$, (15) et (21) s'écrivent sous la même forme :

$$\begin{aligned} \Phi &= U A \Delta T_{LM} \\ &= U A \frac{\Delta T_a - \Delta T_b}{\ln \left(\frac{\Delta T_a}{\Delta T_b} \right)} \end{aligned} \quad (22)$$

- ▶ ΔT_{LM} = Moyenne Logarithmique de la Différence des Températures, appelée **Différence de Température Logarithmique Moyenne, DTLM**.

- ▶ **Remarques :**

- ▶ On peut déterminer DTLM si T_e et T_s sont connues ou peuvent être déterminées
- ▶ Si seulement T_e 's sont connues, la méthode DTLM requiert un procédé itératif.
- ▶ Dans ce cas il est préférable d'utiliser la méthode d'efficacité - NUT.

Efficacité d'un échangeur - Définition

- ▶ Efficacité, $\varepsilon = \frac{\text{Flux réel échangé}}{\text{Flux maximum possible}} = \frac{\Phi_{\text{réel}}}{\Phi_{\text{max}}}$
- ▶ Φ_{max} serait possible, seulement pour EACC, ssi $L \rightarrow \infty$

▶ Posons $C = \dot{m}c_p$

▶ Pour EACC : le cas $C_f < C_c$:

▶ Compte tenu de :

$$dT_c = -\frac{d\Phi}{\dot{m}_c c_{p,c}}, \quad dT_f = -\frac{d\Phi}{\dot{m}_f c_{p,f}},$$

▶ on déduit $|dT_f| > |dT_c|$

▶ Alors, $L \rightarrow \infty \implies T_{f,s} = T_{c,e}$

▶ Donc, $\Phi = \dot{m}(h_2 - h_1) = \dot{m}_c(T_2 - T_1)$,

▶ implique $\Phi_{\text{max}} = C_f(T_{c,e} - T_{f,e})$

▶ Le cas $C_c < C_f$:

▶ De la même manière :

$$L \rightarrow \infty \implies T_{c,s} = T_{f,e}$$

▶ implique $\Phi_{\text{max}} = C_c(T_{c,e} - T_{f,e})$

▶ Ces deux résultats s'expriment alors comme :

$$\Phi_{\text{max}} = C_{\min}(T_{c,e} - T_{f,e})$$

▶ Il vient alors de $\varepsilon = \frac{\Phi_{\text{réel}}}{\Phi_{\text{max}}}$, $0 \leq \varepsilon \leq 1$

▶ que $\varepsilon = \frac{C_c(T_{c,e} - T_{c,s})}{C_{\min}(T_{c,e} - T_{f,e})}$ si $C_f < C_c$,

▶ ou $\varepsilon = \frac{C_f(T_{f,s} - T_{f,e})}{C_{\min}(T_{c,e} - T_{f,e})}$ si $C_c < C_f$

▶ Si ε , $T_{c,e}$ et $T_{f,e}$ sont connus :

$$\Phi_{\text{réel}} = \varepsilon C_{\min}(T_{c,e} - T_{c,s})$$

▶ On peut montrer que^a :

$$\varepsilon = f\left(\text{NUT}, \frac{C_{\min}}{C_{\max}}\right), \quad \text{NUT} \equiv \frac{UA}{C_{\min}}$$

▶ où $C_{\min}/C_{\max} = C_f/C_c$ si $C_f < C_c$, ou
 $C_{\min}/C_{\max} = C_c/C_f$ si $C_c < C_f$.

▶ NUT \equiv Nombre d'Unités du Transfert

^aKay, W. M., and A. L. London, *Compact Heat Exchangers*, 3rd ed., McGraw-Hill, New York, 1984.

Un exemple de relation pour l'Efficacité-NUT pour un EACP, $NUT = \frac{UA}{C_{min}}$

- $f\left(NUT, \frac{C_{min}}{C_{max}}\right)$, avec $C_{min} = C_c$:

$$\varepsilon = \frac{(T_{c,e} - T_{c,s})}{(T_{c,e} - T_{f,e})} \quad (23)$$

- De $\Phi = \dot{m}_c c_{p,c}(T_{c,e} - T_{c,s}) = \dot{m}_f c_{p,f}(T_{f,s} - T_{f,e})$:

$$C_r \equiv \frac{C_{min}}{C_{max}} = \frac{\dot{m}_c c_{p,c}}{\dot{m}_f c_{p,f}} = \frac{(T_{f,s} - T_{f,e})}{(T_{c,e} - T_{c,s})} \quad (24)$$

- Alors,

$$\begin{aligned} \ln\left(\frac{T_{c,s} - T_{f,s}}{T_{c,e} - T_{f,e}}\right) &= -UA \left(\frac{1}{\dot{m}_c c_{p,c}} + \frac{1}{\dot{m}_f c_{p,f}}\right) \\ &= -\frac{UA}{C_{min}} (1 + C_r) \quad (25) \end{aligned}$$

- Alors, $\frac{T_{c,s} - T_{f,s}}{T_{c,e} - T_{f,e}} = \exp[-NUT(1 + C_r)]$

- En réarrangeant avec $T_{f,s}$ obtenue de (24) :

$$\begin{aligned} \frac{T_{c,s} - T_{f,s}}{T_{c,e} - T_{f,e}} &= \frac{T_{c,s} - T_{c,e} + T_{c,e} - T_{f,s}}{T_{c,e} - T_{f,e}} \\ &= \frac{(T_{c,s} - T_{c,e}) + (T_{c,e} - T_{f,e}) - C_r(T_{c,e} - T_{c,s})}{T_{c,e} - T_{f,e}} \end{aligned}$$

- Alors, en utilisant (23) :

$$\begin{aligned} \frac{T_{c,s} - T_{f,s}}{T_{c,e} - T_{f,e}} &= -\varepsilon + 1 - C_r \varepsilon \\ &= 1 - \varepsilon(1 + C_r) \end{aligned}$$

- Finalement, en résolvant (25) pour ε :

$$\varepsilon = \frac{1 - \exp\{-NUT[1 + C_r]\}}{1 + C_r}$$

- De la même façon, on obtient pour un EACC :

$$\varepsilon = \frac{1 - \exp\{-NUT[1 - C_r]\}}{1 - C_r \exp\{-NUT[1 - C_r]\}}$$

Méthodologie pour évaluer Φ d'un échangeur de chaleur

- ▶ La méthode DTLM requiert la connaissance des températures des fluides chaud et froid à l'entrée et à la sortie, nécessaires pour calculer ΔT_{LM}
- ▶ Si seulement $T_{c,e}$ et $T_{f,e}$ sont connues, ΔT_{LM} devrait être calculée par un procédure itératif
- ▶ Pour la méthode NUT on procède à évaluer les éléments d'analyse dans l'ordre suivant :

1. U

2. C_{\min}, C_{\max}

3. $NUT = \frac{UA}{C_{\min}}$

4. calcul de ε à l'aide de $\varepsilon = f(NUT, C_r)$

5. finalement, calcul de Φ par $\Phi = \varepsilon C_{\min}(T_{c,e} - T_{f,e})$

TAB.: Relations pour l'efficacité d'échangeurs de chaleur

Arrangement de l'écoulement	Relation
Tubes concentriques	
Courants parallèles	$\varepsilon = \frac{1 - \exp \{-NUT [1 + C_r]\}}{1 + C_r} \quad (26)$
Contres courants	$\varepsilon = \frac{1 - \exp \{-NUT [1 - C_r]\}}{1 - C_r \exp \{-NUT [1 - C_r]\}} \quad (27)$
Tubes et Calandre	
Un passage au calandre (2,4, ... passages aux tubes)	$\varepsilon_1 = 2 \left\{ 1 + C_r + (1 + C_r^2)^{1/2} \times \frac{1 + \exp \left[-NUT((1 + C_r^2)^{1/2}) \right]}{1 - \exp \left[-NUT((1 + C_r^2)^{1/2}) \right]} \right\}^{-1} \quad (28)$
n passages au calandre (2n,4n, ... passages aux tubes)	$\varepsilon = \frac{\left(\frac{1 - \varepsilon_1 C_r}{1 - \varepsilon_1} \right)^n - 1}{\left(\frac{1 - \varepsilon_1 C_r}{1 - \varepsilon_1} \right)^n - C_r} \quad (29)$

TAB.: Relations pour l'efficacité d'échangeurs de chaleur - continue

Arrangement de l'écoulement	Relation	
Écoulement croisé, un seul passage :		
Fluides non brasés	$\varepsilon = 1 - \exp \left\{ \left(\frac{1}{C_r} \right) (\text{NUT})^{0,22} \left[\exp \left[-C_r (\text{NUT})^{0,78} \right] - 1 \right] \right\}$	(30)
C_{\max} (brasé)		
C_{\min} (non brasé)	$\varepsilon = \left(\frac{1}{C_r} \right) \{ 1 - \exp [-C_r (1 - \exp [-\text{NUT}])] \}$	(31)
C_{\max} (non brasé)		
C_{\min} (brasé)	$\varepsilon = 1 - \exp \left\{ \left(\frac{1}{C_r} \right) [1 - \exp (-C_r \text{NUT})] \right\}$	(32)
Tous échangeurs ($C_r = 0$)	$\varepsilon = 1 - \exp(-\text{NUT})$	(33)

TAB.: Relations pour le NUT d'échangeurs de chaleur

Arrangement de l'écoulement	Relation
Tubes concentriques	
Courants parallèles	$\text{NUT} = - \frac{\ln [1 - \varepsilon (1 + C_r)]}{1 + C_r} \quad (34)$
Contres courants	$\text{NUT} = \frac{1}{C_r - 1} \ln \left(\frac{\varepsilon - 1}{\varepsilon C_r - 1} \right) \quad (35)$
Tubes et Calandre	
Un passage au calandre (2,4, ... passages aux tubes)	$\text{NUT} = - \left(1 + C_r^2\right)^{-1/2} \ln \left(\frac{E - 1}{E + 1} \right) \quad (36)$
	$E = \frac{2/\varepsilon_1 - (1 + C_r)}{(1 + C_r^2)^{1/2}} \quad (37)$
n passages au calandre (2n,4n, ... passages aux tubes)	Utiliser les équations (36) et (37) avec
	$\varepsilon_1 = \frac{F - 1}{F - C_r}, \quad F = \left(\frac{\varepsilon C_r - 1}{\varepsilon - 1} \right)^{1/n} \quad (38)$

TAB.: Relations pour le NUT d'échangeurs de chaleur - continue

Arrangement de l'écoulement	Relation
Écoulement croisé, un seule passage :	
$C_{\max}(\text{brasé}), C_{\min}(\text{non brasé})$	$\text{NUT} = -\ln \left[1 + \left(\frac{1}{C_r} \right) \ln(1 - \varepsilon C_r) \right]$ (39)
$C_{\min}(\text{brasé}), C_{\max}(\text{non brasé})$	$\text{NUT} = -\left(\frac{1}{C_r} \right) \ln [C_r \ln(1 - \varepsilon) + 1]$ (40)
Tous échangeurs ($C_r = 0$)	$\text{NUT} = -\ln(1 - \varepsilon)$ (41)

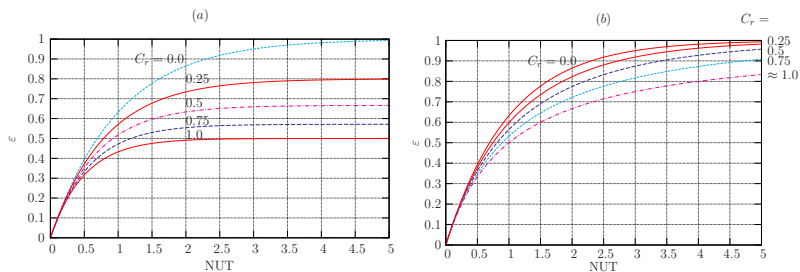


FIG.: Efficacité d'échangeurs de chaleurs : (a) à courants parallèles, (b) à contres courants.

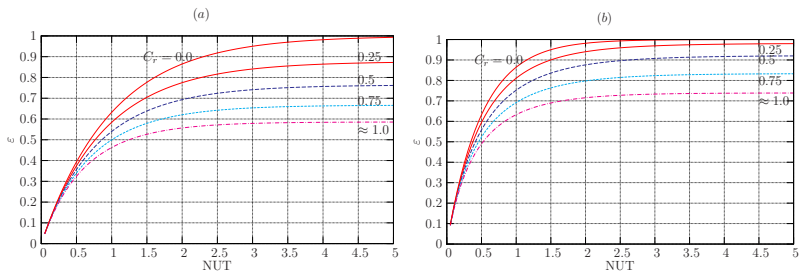


FIG.: Efficacité d'échangeurs de chaleurs à tubes et Calandre : (a) un calandre à passages multiples aux tubes (deux, quatre, etc., passages), équation (28), (b) un calandre à passages multiples de quatre à n tubes, (29).

Valeurs représentatives pour les facteurs d'encrassement (fouling factors), $R_f''^1$

Fluide	R_f'' (m ² .K/W)
Eau de mer ou traitée pour chaudière (< 50°C)	0,0001
Eau de mer ou traitée pour chaudière (> 50°C)	0,0002
Eau de rivière (< 50°C)	0,0002–0,001
Huile carburant	0,0009
Liquides frigorigènes	0,0002
Vapeur (roulements sans huile)	0,0001

Valeurs représentatives de coefficient d'échange globale

Combinaison des fluides	U (W/m ² .K)
Eau/eux	850–1700
Eau/huile	110–350
Condensateur à vapeur (eau en tubes)	1000–6000
Condensateur à l'ammoniac (eau aux tubes)	800–1400
Condensateur à l'alcool (eau aux tubes)	250–700
Échangeur aux tubes ailetés (eau aux tubes, air d'écoulement croisé)	25–50

¹Standards of the Tubular Exchanger Manufacturers Association, 6th ed., Tubular Exchanger Manufacturers Association, New York, 1978