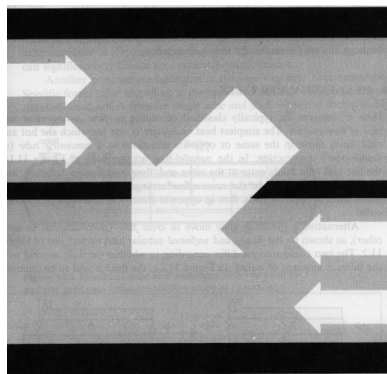


Département de Génie Civil

INSA Toulouse

# LES ECHANGEURS DE CHALEUR



B. Bourret

# TABLE DES MATIERES

<b>1. GENERALITES</b>	<b>3</b>
<b>2. THEORIE DES ECHANGEURS</b>	<b>4</b>
2.1. Echangeurs à courants parallèles	5
2.2. Echangeurs à courants croisés	7
2.3. Méthode des NUT	8
<b>3. APPLICATIONS</b>	<b>11</b>
3.1. Echangeur tubulaire	11
3.2. Echangeur à plaques	12
<b>4. BIBLIOGRAPHIE</b>	<b>18</b>

# ECHANGEURS

## 1. Généralités

- *Qu'est-ce qu'un échangeur ?*

Dispositif permettant de transférer de l'énergie thermique entre deux fluides, habituellement séparés par une paroi solide.

- *Pourquoi utilise-t-on des échangeurs ?*

- Chaque fois qu'on a besoin de réchauffer ou de refroidir un fluide à l'aide d'un autre fluide (batteries chaude ou froide, évaporateur ou condenseur, tour de refroidissement, etc.)

- Quand deux réseaux de distribution de fluides doivent être séparés pour des problèmes sanitaires ou de corrosion (chauffe-eau solaire, géothermie, etc..)

- Quand deux réseaux de distribution de fluides doivent être séparés pour des problèmes de pression (chauffage urbain).

- *Essai de classification*

- selon le type d'écoulement : courants parallèles de même sens ou de sens contraires  
courants croisés

- combinaison des deux types précédents

- selon les types de fluides utilisés : 2 fluides de caractéristiques thermiques voisines (eau/eau)

- 2 fluides de caractéristiques thermiques très différentes (eau/air)

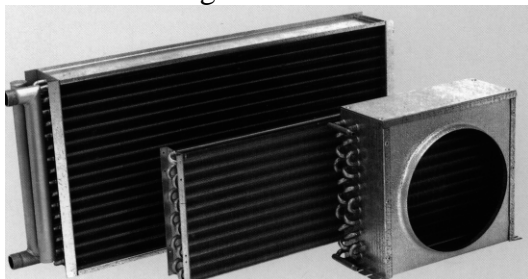
- selon la surface d'échange : paroi matérielle (plaque, tube, etc.)

- contact direct (aéroréfrigérant, tour de refroidissement)

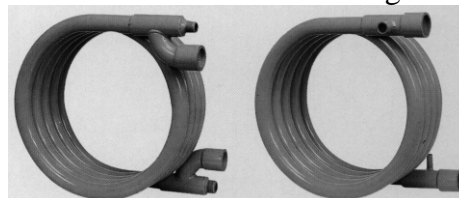
- *Cadre de l'étude* : nous ne considérerons ici que les échangeurs à fluides séparés où le transfert de chaleur se fait à travers une paroi matérielle.

- *exemples d'utilisation (schémas)*

**batterie chaude ou froide (serpentin) :**  
échange entre air et eau, gaz frigorigènes, solutions incongelables.

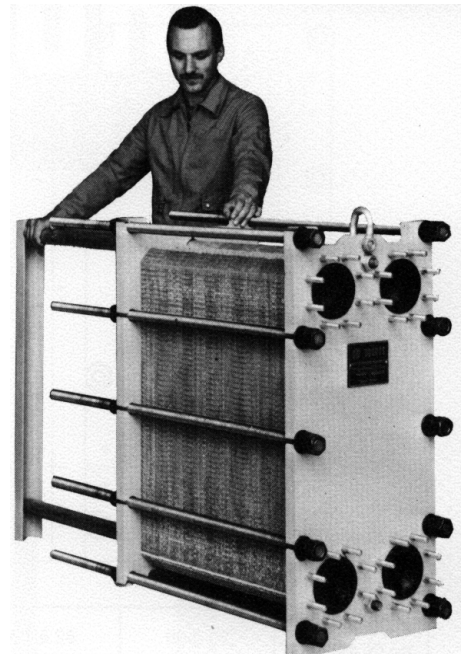
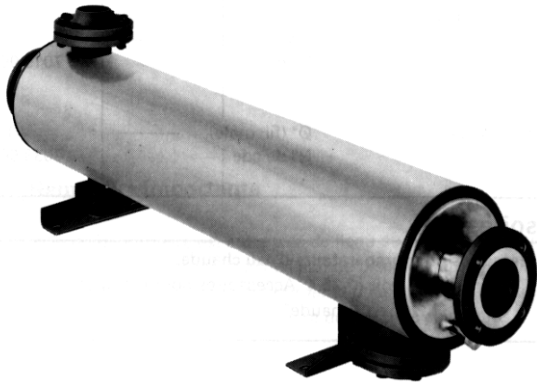


**échangeur coaxial :** évaporateurs, condenseurs pour pompes à chaleur, conditionnement d'air et réfrigération.

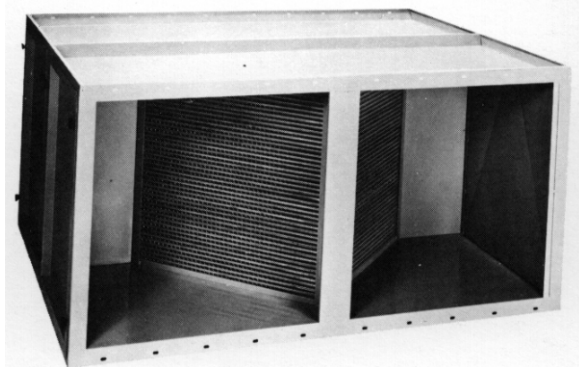


**échangeur tubulaire** : réseaux de chaleur à eau surchauffée ou vapeur, réchauffage d'eau de piscine, etc.

pâte à papier, agro-alimentaire, chauffage urbain, etc.)



**récupérateur de chaleur air/air**



**échangeur à plaques** : chauffage, réfrigération, récupération de chaleur dans de nombreux secteurs d'activité (chimie,

- *Dimensionnement*

Le dimensionnement des échangeurs repose principalement sur un calcul de bilan thermique mais également sur la prise en compte des pertes de charges.

La puissance  $P$  d'un échangeur peut s'écrire de la manière suivante :

$$P = K S \Delta T_m \quad (1)$$

$K$  est le coefficient de transmission thermique surfacique *moyen*,  $S$  la surface d'échange et  $\Delta T_m$  représente l'écart de température *moyen* entre les deux fluides. On est obligé de raisonner sur des valeurs moyennes de  $K$  et de  $\Delta T_m$  dans la mesure où les températures des deux fluides et le coefficient  $K$  varient d'un endroit à l'autre de l'échangeur.

## 2. Théorie des échangeurs

L'approche théorique est réalisée en régime permanent et en faisant les hypothèses suivantes :

- l'échangeur est parfaitement isolé de l'extérieur (pas de pertes), on néglige la conduction axiale,

- les coefficients  $K$  et  $C_p$  sont constants,

- la température de chaque fluide est homogène dans une section donnée.

L'équation (1) peut ainsi s'écrire :

$$P = K S \Delta T_m = \dot{m}_c C_{p_c} (T_{ce} - T_{cs}) = \dot{m}_f C_{p_f} (T_{fs} - T_{fe}) \quad (2)$$

où  $\dot{m}$  représente le débit massique (kg/s) et  $C_p$  la chaleur spécifique (J/kg K),

les indices  $f$  et  $c$  sont relatifs aux fluides froid et chaud et les indices  $s$  et  $e$  à l'entrée et à la sortie de l'échangeur.

La résolution de cette équation dépend du type d'échangeur considéré ; nous allons commencer par les plus simples, c'est à dire ceux à courants parallèles.

## 2.1. ECHANGEURS A COURANTS PARALLELES

On considère les cas des échangeurs à courants parallèles et de même sens (anti-méthodiques ou à co-courant) et ceux de sens contraire (méthodiques ou à contre-courant).

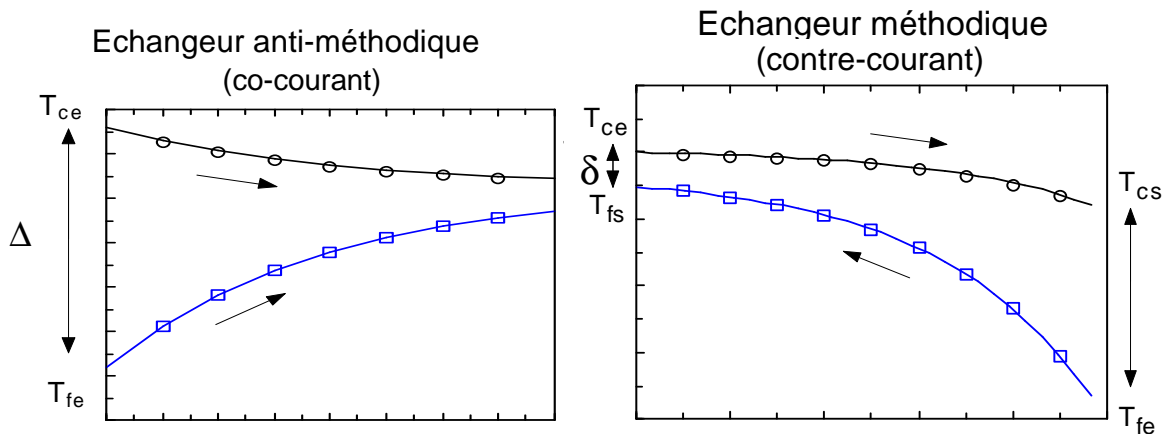


Figure1: Evolutions des températures le long d'échangeurs à courants parallèles

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 :

$$\Delta T_m = \frac{\delta - \Delta}{\ln\left(\frac{\delta}{\Delta}\right)} \quad (3)$$

$\delta$  et  $\Delta$  sont définis sur la figure 1.

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

Pour une puissance connue, si on fixe les débits et les températures d'entrée, on a 3 équations et 4 inconnues qui sont S, K,  $T_{fs}$  et  $T_{cs}$  ; il faut donc calculer séparément K.

### Calcul du coefficient K

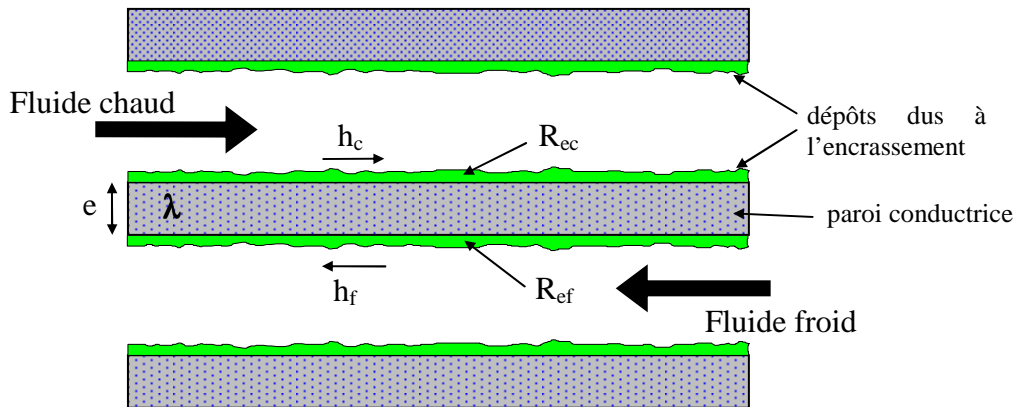


Figure 2 : Schéma de principe d'un échangeur de chaleur

Si on suppose que les transferts de chaleur entre le fluide et la paroi, d'épaisseur  $e$  et de conductivité thermique  $\lambda$ , se font essentiellement par convection, K peut s'écrire de la manière suivante :

$$\frac{1}{K} = \frac{1}{h_c} + \frac{e}{\lambda} + \frac{1}{h_f} + R_{ec} + R_{ef} \quad (4)$$

$h_c$  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 dont les valeurs typiques sont données dans le tableau 1.

FLUIDES	Valeurs moyennes <sup>1</sup> de $R_e$ ( $m^2 K/W$ )
eau de mer $T < 50^\circ C$	$10^{-4}$
eau de mer $T > 50^\circ C$	$2 \cdot 10^{-4}$
eau de rivière « sale »	10 à $20 \cdot 10^{-4}$
eau industrielle	$2 \cdot 10^{-4}$
vapeurs non grasses	$10^{-4}$
air industriel	$4 \cdot 10^{-4}$
liquide réfrigérant	4 à $6 \cdot 10^{-4}$
gas-oil	$2 \cdot 10^{-4}$

Tableau 1 : Résistances d'encrassement

<sup>1</sup>Dans le cas d'échangeurs à plaques, les valeurs recommandées sont beaucoup plus faibles (environ 10 fois)

Nous donnons dans le tableau 2 quelques valeurs typiques de coefficients d'échange.

Types de fluides	K en W/m <sup>2</sup> K
Eau/eau	800 - 2000
Eau/ huile	110 - 350
Vapeur/eau	1000 - 6000
batterie eau/air (serpentin)	25 - 50

Tableau 2 : Valeurs typiques de coefficients d'échange

### EXERCICE 1 :

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

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

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

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

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.

## 2.2. ECHANGEURS A COURANTS CROISES

Dans ce cas, le problème est beaucoup plus complexe car les températures de sortie sont variables selon la position du fluide dans l'échangeur. Plusieurs configurations sont possibles selon que chaque fluide est libre de se mélanger (fluide brassé) ou bien au contraire est canalisé (fluide non brassé).

Bien que l'expression de  $\Delta T_m$  ait été calculée pour certains cas, on utilise souvent des abaques donnant un coefficient correctif F tel que :

$$P = K S F \Delta T_m \quad (5)$$

F est donné par les abaques des figures 3 et 4 et  $\Delta T_m$  est calculé comme pour un échangeur à courant parallèle et de sens contraire.

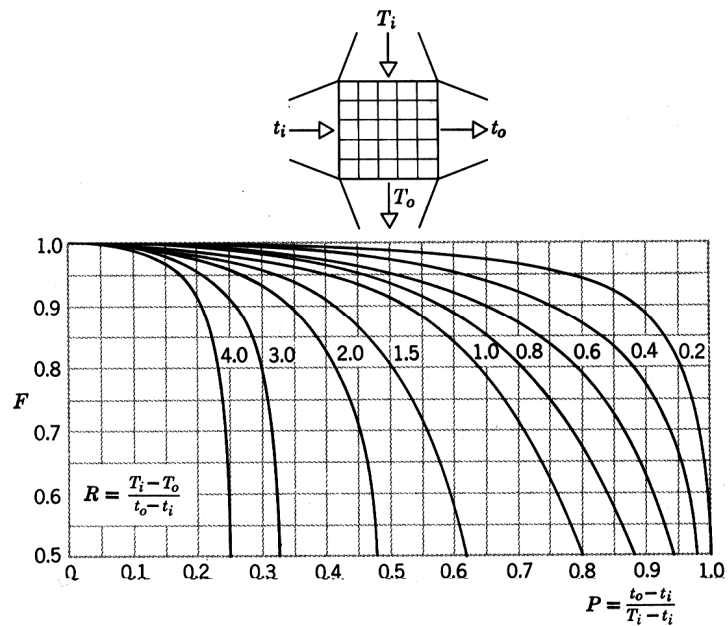


Figure 3 : Echangeur à courants croisés - 2 fluides brassés

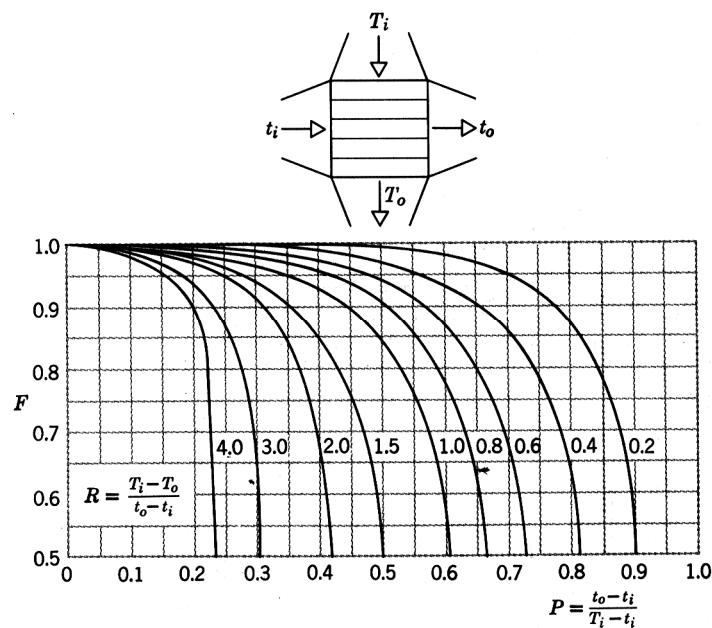


Figure 4 : Echangeur à courants croisés - 1 fluide brassé et 1 fluide non brassé

### 2.3. METHODE DES 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 :

$$\varepsilon = \frac{\text{puissance réelle}}{\text{puissance maximale}} = \frac{P}{P_{\max}} \quad (6)$$



La puissance maximale  $P_{\max}$  peut s'écrire :  $P = C_{\min} (T_{ce} - T_{fe})$  avec :

$$C_{\min} = \text{Min}(\dot{m}_c C_{p_c}, \dot{m}_f C_{p_f}) \quad (7)$$

$$\text{On trouve ainsi : } \varepsilon = \frac{\dot{m}_c C_{p_c} (T_{ce} - T_{cs})}{C_{\min} (T_{ce} - T_{fe})} \quad (8)$$

Dans le cas particulier des fluides et de débits identiques,

$$\varepsilon \approx \frac{(T_{ce} - T_{cs})}{(T_{ce} - T_{fe})} \quad \text{en supposant que } C_{p_f} = C_{p_c} \quad (9)$$

On démontre assez facilement que pour des échangeurs à courants parallèles, l'efficacité est essentiellement fonction de deux paramètres NUT et C définis de la manière suivante :

$$C = C_{\min} / C_{\max} \quad (10)$$

$$\text{NUT} = K S / C_{\min} \quad (11)$$

Les expressions donnant l'efficacité dans différentes configurations sont résumées dans le tableau 3.

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

Tableau 3 : Efficacité de quelques échangeurs [3]

L'efficacité n'est fonction que des caractéristiques physiques de l'échangeur et donc si on se fixe une surface, le calcul des températures de sortie est direct grâce à l'équation (8) ; l'exercice 2 peut ainsi être résolu directement par cette méthode.

On pourrait penser que cet avantage par rapport à la méthode du DTLM est mineur si on prend en considération le développement actuel du calcul formel et des solveurs de plus en

plus utilisés ; toutefois, l'expérience montre que ces outils ont souvent des difficultés avec la fonction DTLM, l'approche NUT étant plus stable.

On peut également utiliser des abaques qui donnent directement  $\epsilon$  en fonction de NUT (figures 5 et 6)

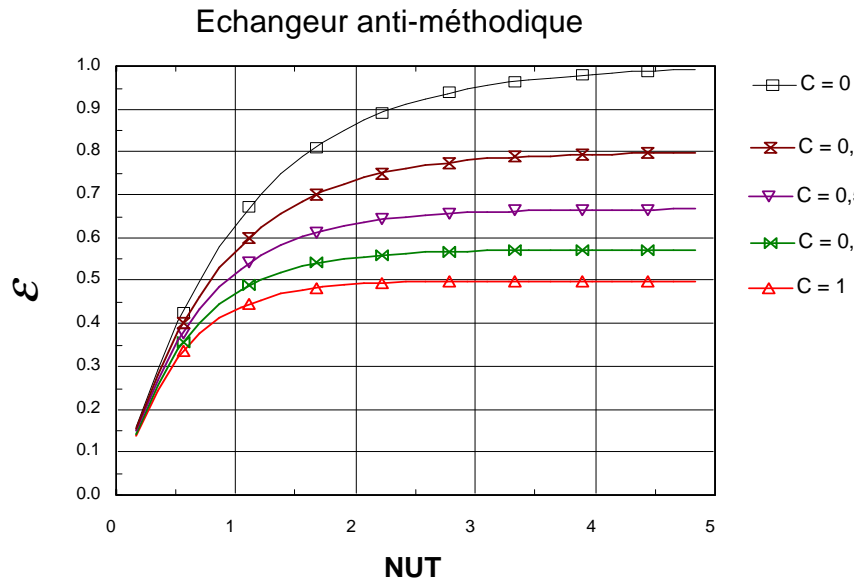


Figure 5 : Efficacité d'un échangeur à courant parallèle en fonction de NUT et de C

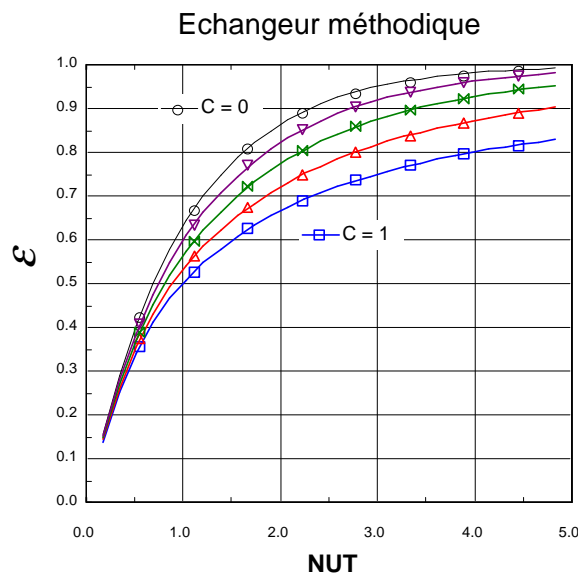


Figure 6 : Efficacité d'un échangeur à courants parallèles et de sens contraires en fonction de NUT et de C

**EXERCICE 3 :** Reprendre l'exercice 2 en utilisant la méthode des NUT.

On voit ainsi que dans ce cas, la méthode des NUT est beaucoup plus rapide que celle du DTLM.

### 3. Applications

Nous allons examiner plus particulièrement deux types d'échangeurs très répandus en Génie Climatique, les échangeurs tubulaires et les échangeurs à plaques

#### 3.1. ECHANGEUR TUBULAIRE

\* *Technologie*

Ces échangeurs sont utilisés depuis de nombreuses années dans les sous-stations de chauffage urbain (eau surchauffée ou vapeur), pour la production d'eau chaude sanitaire et pour de nombreuses applications industrielles nécessitant des pressions élevées ; ils sont toutefois de plus en plus concurrencés par les échangeurs à plaques décrits dans le paragraphe suivant.

Leur schéma de principe est décrit par la figure 7 : ils sont constitués soit d'un tube unique (serpentin), soit d'un faisceau de tubes branchés en parallèle enfermés dans une enveloppe appelée calandre (coque).

Des chicanes sont placées dans la calandre (coque) pour augmenter la turbulence et l'efficacité de l'échange.

Les tubes sont en général métalliques (acier, cuivre, inox, etc.) et le fluide chaud ou agressif passe en général dans les tubes afin de minimiser les pertes de chaleur.

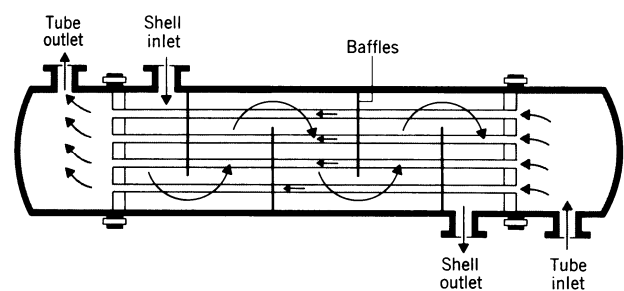


Figure 7 : Schéma de principe d'un échangeur tubulaire

\* *Dimensionnement*

Il s'agit d'échangeurs à courants croisés et leur dimensionnement peut se faire en suivant la méthode exposée dans le paragraphe 2.2 utilisant la formule (5) et les abaques des figures 8 et 9

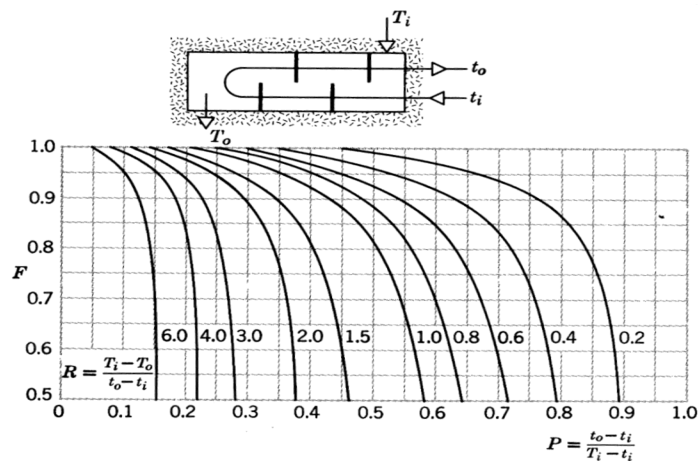
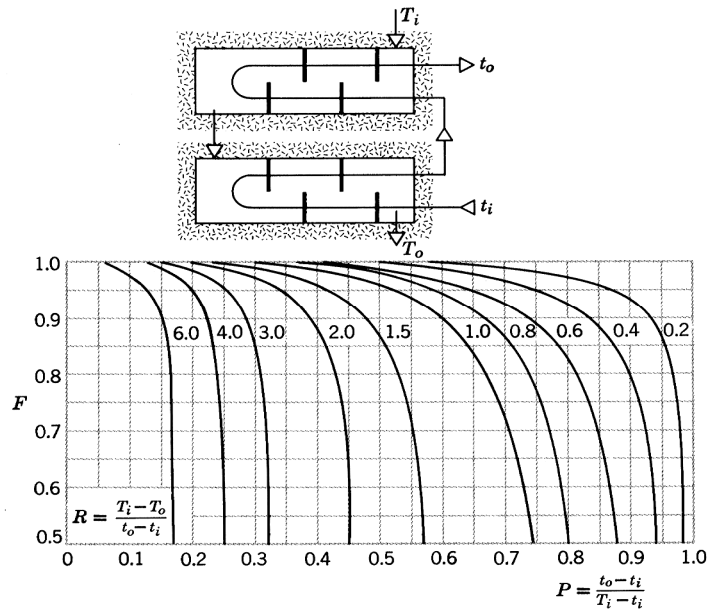


Figure 8 : Echangeur à calandres

Figure 9 : Echangeur à calandres (double parcours)

Toutefois, chaque fabricant utilisant son propre schéma d'écoulement (forme et nombre des chicanes, tubes à double parcours, etc...), il sera souvent plus précis d'utiliser les abaques fournis par chaque constructeur.



### 3.2. ECHANGEUR A PLAQUES

- *Technologie*

Ces échangeurs sont utilisés dans les industries agro-alimentaires depuis plus de 60 ans, mais leur développement dans le bâtiment est plus récent.

Ils se distinguent par une compacité remarquable due en partie à leur coefficient K élevé, une grande facilité de nettoyage et la possibilité d'ajuster leur surface à la demande.

Leur principe de fonctionnement est décrit par la figure 10.

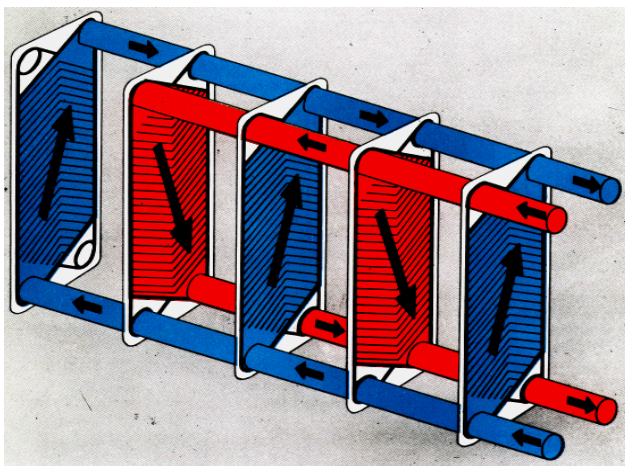


Figure 10 : Principe de fonctionnement d'un échangeur à plaques

<http://www.hvac.alfalaval.com/>

<http://www.alfalaval.se/>

Cet échangeur est constitué par un ensemble de plaques embouties équipées de joints et maintenues serrées entre 2 plateaux reliés par des tirants des serrage.

Les plaques sont en général en forme de chevron pour augmenter la turbulence et ménager des points d'appuis pour résister à la pression. Leur faible épaisseur permet d'utiliser des matériaux de bonne qualité ayant une bonne tenue à la corrosion (acier inox, titane, etc.).

Les joints en polymères assurent un double rôle :

- étanchéité,
- répartition des fluides dans l'échangeur.

Le même principe est utilisé pour les échangeurs à plaques brasées pour lesquels le joint est remplacé par une technique de brasage.

Le tableau 4 présente les domaines d'utilisation des échangeurs à plaques Alfa-Laval

Fluides	Pression maxi de service	Température maxi de service	Matériaux		Coefficient d'échange eau/eau	Surface maxi d'échange par appareil	Débit maxi par fluide
			Joints	Plaques			
Liquide/liquide ou Vapeur/liquide	25 bar	150°C à 200°C selon le type de joint <sup>2</sup>	Nitrile Viton Hypalon Téflon Néoprène	Inox Titane Titane-palladium	3500 à 7500 W/m <sup>2</sup> K	2200m <sup>2</sup>	3500 m <sup>3</sup> /h

Tableau 4 : Domaines d'utilisation des échangeurs à plaques Alfa-Laval

Le tableau 5 résume quelques caractéristiques des échangeurs à plaques et tubulaires.

Caractéristiques	Echangeur à plaques traditionnel	Echangeur tubulaire
croisement de température <sup>3</sup>	possible	impossible
approche de température	1°C	5°C
raccordements	dans un même plan	sur plusieurs plans
rapport des coefficients de transmission thermique	3 à 5	1
rapport des poids	1	3 à 10
volume de rétention	faible	élevé
rapport d'encombrement	1	2 à 5
soudures	aucune	appareil soudé
résistance aux vibrations	bonne résistance	sensible
détection des fuites	aisée (par l'extérieur)	difficile
temps nécessaire à l'ouverture	15 minutes avec outil pneumatique	60 à 90 minutes
réparation	joints et plaques remplaçables	implique le remplacement des tubes
modification	simple par ajout ou retrait de plaques	impossible

Tableau 5 : Comparaison entre un échangeur à plaques et un échangeur tubulaire

<sup>2</sup>225°C pour les échangeurs brasés

<sup>3</sup>Le terme «croisement» signifie ici que  $T_{fs}$  peut être supérieur à  $T_{cs}$

Remarque : La notion de croisement peut prêter à confusion. En effet dans certains ouvrages, (6), ce terme désigne la possibilité que les courbes de température représentées sur la figure 1 se croisent réellement. Ce phénomène, préjudiciable, ne peut concerner toutefois que les échangeurs à plusieurs passes.

\* *Evolutions technologiques récentes (schémas sur diapos ou transparents)*

- échangeur tubulaire à plaques : pour programmes asymétriques avec un rapport de débit de 2 à 1 pour des propriétés physiques et des pertes de charge identiques
- échangeur à plaques à canal large : pour des liquides chargés ou très visqueux
- échangeur à plaques à cassettes : pour des liquides agressifs
- échangeur à plaques à double paroi : dans le cas de 2 fluides dont le mélange peut s'avérer dangereux
- échangeur à plaques en graphite « Diabon F » : pour liquides trop agressifs pour les alliages habituels
- joints sans colle : facilitent la maintenance et minimisent les coûts d'entretien liés aux arrêts de production.

\* *Dimensionnement*

Il s'agit d'échangeurs à courants parallèles et de sens contraire, donc a priori leur dimensionnement ne devrait pas poser de problème particulier ; en fait il n'en est rien car très peu de fabricants donnent des informations concernant le calcul du coefficient K. La plupart en effet assurent eux-mêmes le dimensionnement à l'aide de logiciels propres à chaque marque.

Je vais exposer la méthode donnée par Alfa-Laval, seule société donnant à ce jour, des informations suffisantes pour mener à bien un dimensionnement.

Le coefficient K est donné par la formule (4) dans laquelle on prendra :

$$e/\lambda = 3.10^{-5} \text{ m}^2 \text{ K/W pour une plaque en inox (valeur moyenne)}$$

$h_c$  et  $h_f$  se calculent à partir de la formule expérimentale (12) en se fixant une perte de charge admissible  $\Delta P$  :

$$\frac{h}{\lambda} \text{Pr}^{-1/3} = 234 \left( \frac{\rho \Delta P}{\mu^2} \right)^{0,3275} \quad (12)$$

$\rho$  : la masse volumique en  $\text{kg/m}^3$                        $\Delta P$  : la perte de charge en kPa

$\mu$  : viscosité dynamique en cP (rappel :  $1 \text{ N s/m}^2 = 10^3$  centipoise)

On voit donc que pour un fluide et une température moyenne fixés, le coefficient  $h$  n'est fonction que de la perte de charge  $\Delta P$ .

En effet, à une valeur de  $\Delta P_{ce-cs}$  fixée correspond une valeur de vitesse de fluide et donc un coefficient  $h$  fixé et  $ce$ , quelque soit le nombre de plaques puisqu'on a une série de plaques en parallèle (si on néglige la perte de charge dans les distributeurs) comme indiqué sur la figure 11.

De plus, si on a le même fluide et les mêmes débits de part et d'autre on a :

$$\Delta P_{ce-cs} = \Delta P_{fe-fs}$$

Par ailleurs, l'évolution de  $K$  en fonction du  $\Delta P$  et pour différentes valeurs de températures est représentée sur le graphique de la figure 12. Ces résultats ont été obtenus pour un échangeur eau/eau, en supposant des débits d'eau égaux de part et d'autre de l'échangeur et en utilisant les valeurs de  $Re$  et  $e/\lambda$  recommandées par ALFA-LAVAL.

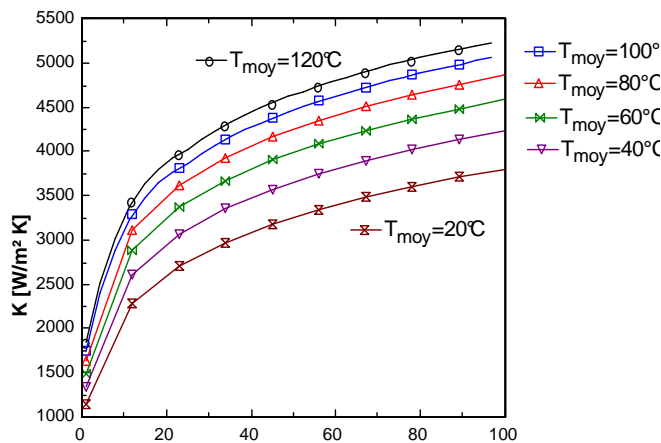
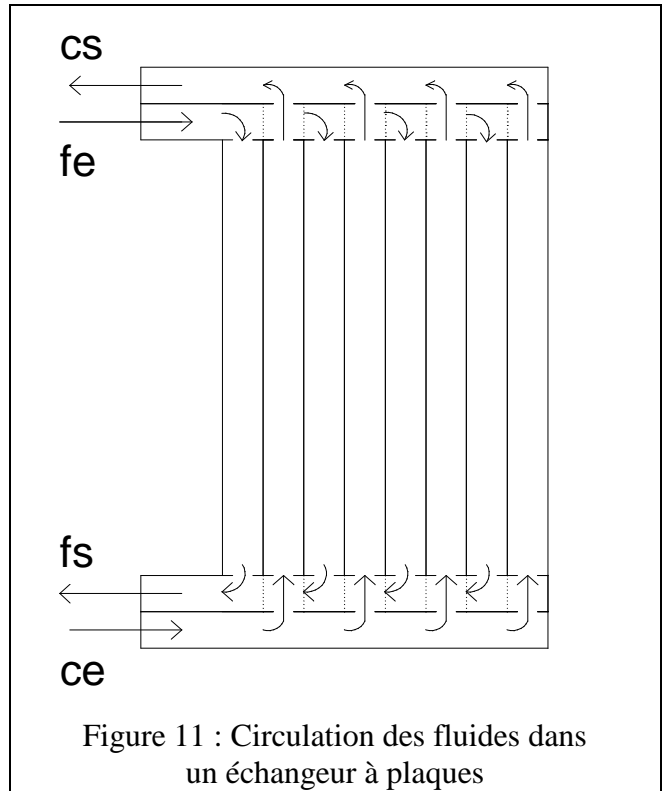


Figure 12 : Variation du coefficient  $K$  en fonction de  $\Delta P$  et de la température de l'eau

Après avoir ainsi calculé le coefficient  $K$  en se fixant une perte de charge maximale admissible, le dimensionnement se fait en calculant le DTLM puis en utilisant l'équation (2) pour obtenir la surface d'échange. On choisit ensuite le type de plaques en respectant les valeurs limites de débits et de NUT indiqués dans le tableau 6.

Type	Diamètre raccords (mm)	Débit maxi eau (m <sup>3</sup> /h)	Nombre d'unités de transfert mini/maxi	Surface d'échange d'une plaque (1 coté) (m <sup>2</sup> )	Surface maxi de l'échangeur (m <sup>2</sup> )
A45	450	4000	1,5/4	2,25	1600
AX35	350	2300	2/5	2,70	1900
A35	350	2300	0,6/1,8	2	1200
AX30-B	300	1700	1/4,2	1,61	1000
A20-B	200	750	1,5/4	1,07	640
AM20	200	750	0,4/1,2	0,79	400
AM20-B	200	750	0,6/2,9	0,89	540
AK20	200	750	0,3/0,8	0,50	230
A15-B	150	400	1,2/5,5	0,75	430
AM10	100	160	0,3/1	0,43	260
A10-B	100	160	1/2,8	0,24	100

Tableau 6 : Caractéristiques des différents modèles d'échangeurs à plaques

\* EXEMPLE

On veut dimensionner un échangeur à plaques avec les données suivantes :

fluide 1 : acide sulfurique, 436000 kg/h, 84/70°C

fluide 2 : eau, 150000 kg/h, 25/40°C

Pertes de charge maxi : 100kPa sur chaque fluide.

Propriétés physiques des fluides :

masse volumique (kg/m<sup>3</sup>)  $\rho_1 = 1780$   $\rho_2 = 993$

viscosité (cP)  $\mu_1 = 6,2$   $\mu_2 = 0,75$

chaleur spécifique (kJ/kg)  $C_{p1} = 1,53$   $C_{p2} = 4,16$

conductivité thermique (W/m K)  $\lambda_1 = 0,34$   $\lambda_2 = 0,62$

Calcul de DTLM :

$$\Delta T_m = \frac{(84 - 40) - (70 - 25)}{\ln\left(\frac{44}{45}\right)} = 44,5 \text{ K}$$

Estimation des pertes de charge : on va prendre  $\Delta P_1 = 100$  kPa coté acide (plus fort débit) et on va estimer les pertes de charge coté eau.

$$\text{Débit d'acide} = 436000/1780 = 245 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$\Delta P_2 = 100 (150/245)^2 = 37,5 \text{ kPa}$$



En fait,  $\Delta P_2 = 20\text{kPa}$  en tenant compte des différences de propriétés entre l'eau et l'acide.

*Calcul des coefficients d'échange  $h_1$  et  $h_2$*

$$\frac{h_1}{\lambda_1} Pr_1^{-1/3} = 234 \left( \frac{\rho_1 \Delta P_1}{\mu_1^2} \right)^{0,3275}$$

$$\frac{h_1}{0,34} 27,9^{-1/3} = 234 \left( \frac{1780 \times 100}{6,2^2} \right)^{0,3275} \Rightarrow h_1 = 3826 \text{ W / m}^2 \text{ K}$$

$$\frac{h_2}{0,62} 5^{-1/3} = 234 \left( \frac{993 \times 20}{0,75^2} \right)^{0,3275} \Rightarrow h_2 = 7657 \text{ W / m}^2 \text{ K}$$

*Calcul du coefficient d'échange global  $K$*

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

$$R_{ec} + R_{ef} = 0,6 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2 \text{ K/W}$$

$$\frac{1}{K} = \frac{1}{3826} + 3 \cdot 10^{-5} + \frac{1}{7657} + 0,6 \cdot 10^{-4} = 4,82 \cdot 10^{-4} \Rightarrow K = 2075 \text{ W / m}^2 \text{ K}$$

*Calcul de la surface d'échange*

$$P = K S \Delta T_m = \dot{m}_1 C_{p1} (T_{1e} - T_{1s}) = \frac{436000}{3600} \times 1,53 \times 14 = 2594 \text{ kW}$$

$$S = \frac{2594000}{2075 \times 44,5} = 28 \text{ m}^2$$

Pour calculer le nombre de plaques, il faut ensuite déterminer le type d'échangeur correspondant aux valeurs maxi de débit ( $345 \text{ m}^3/\text{h}$ ) et de NUT.

$$NUT = KS/C_{\min} = 2075 \cdot 28 / (150000 \cdot 4160 / 3600) = 0,335$$

L'échangeur type AM20 peut ainsi convenir et comme chaque plaque fait  $0,79 \text{ m}^2$ , il faut  $28/0,79 = 35,4$  soit 36 plaques de surface d'échange auxquelles il faut rajouter les 2 plaques terminales ; la solution est donc :

Echangeur type AM20 38 plaques.

## 4. Bibliographie

- (1) Incropera F.P., De Witt D.P., Fundamentals of heat and mass transfer, Wiley & Sons, 1990.
- (2) Parker J. D., MC Quiston F. C., Heating, Ventilating, and air conditioning - analysis and design, Ed. Wiley & Sons, 1994.
- (3) Kays W.M., London A.L., Compact heat exchangers, 3rd Ed., Mc Graw-Hill, New York, 1984.
- (4) Alfa-Laval, Les cahiers Alfa-Laval, Spécial Thermique, N°17, 1987.
- (5) Documentations techniques fabricants ( Mueller, Superchanger, Alfa-Laval).
- (6) Padet J., Echangeurs thermiques, Masson, 1993. (BIB'INSA)