

SOMMAIRE

I	PRESENTATION	3
II	INFORMATIONS GENERALES	4
II.1	IDENTIFICATION.....	4
II.2	CONDITIONS D'UTILISATION	4
II.3	INFORMATIONS VIS-A-VIS DE LA SECURITE	4
II.3.1	Prévention contre les risques électriques	4
II.3.2	Prévention contre les risques liés à un défaut.....	4
II.3.3	Prévention contre les risques liés à des avaries de transport	5
II.4	DECLARATION DE CONFORMITE CE	5
II.5	DESCRIPTIF	6
II.5.1	Schéma de principe	6
II.5.2	Nomenclature	6
II.5.3	Photos	7
II.6	INSTALLATION ET RACCORDEMENTS.....	8
II.6.1	Manutention	8
II.6.2	Mise en place	8
II.6.3	Raccordement au réseau d'eau.....	8
II.6.4	Raccordement au réseau électrique	9
II.7	MISE EN SERVICE	9
II.7.1	Remplissage en eau	9
II.7.2	Mise en route.....	9
II.8	MISE A L'ARRÊT	9
II.9	OPERATIONS DE MAINTENANCE	9
III	THEORIE	10
III.1	DIFFERENTS TYPES D'ECHANGEURS.....	10
III.2	DISTRIBUTION DES TEMPERATURES	13
III.2.1	Relations de base	13
III.2.2	Cas du fonctionnement en régime co-courant	13
III.2.3	Cas du fonctionnement en régime à contre courant	14
III.3	DETERMINATION DE LA PUISSANCE	16
III.4	FLUX THERMIQUE ET EFFICACITE THERMIQUE.....	17
III.4.1	Flux thermique.....	17
III.4.2	Efficacité thermique	17
III.5	COEFFICIENTS D'ECHANGE GLOBAL	18
III.5.1	Introduction.....	18
III.5.2	Cas général de la conduction et de la convection	18
III.5.3	Transfert au travers d'un paroi plane	19
III.5.4	Transfert au travers d'une paroi cylindrique	19
III.6	LES NOMBRES SANS DIMENSION	20
III.6.1	Introduction.....	20
III.6.2	Nombre de REYNOLDS	20
III.6.3	Nombre de PRANTL.....	20
III.6.4	Nombre de NUSSELT	21
III.6.5	Nombre de PECLET	21
III.6.6	Nombre de MARGOULIS ou STANTON	21
III.6.7	Nombre de GRASHOF.....	21
III.7	CORRELATIONS DE CONVECTION UTILES	21
III.7.1	Introduction.....	21
III.7.2	Ecoulement à l'intérieur d'un tube	22
III.7.3	Ecoulement en conduit annulaire	22
III.8	METHODE DES NUTS (notions)	23
IV	TRAVAUX PRATIQUES	25
IV.1	Présentation du banc	25
IV.2	Mise en service	26

IV.3	Travaux pratiques	26
IV.3.1	Mode opératoire	26
IV.3.2	Travaux pratiques proposés	26
IV.4	Présentation des résultats expérimentaux	29
V	ANNEXES	36

I PRESENTATION

Les transferts thermiques sont, dans le cadre des formations énergétiques et génie des procédés, des éléments de connaissance indispensables. Ces transferts sont présents dans de la plupart des secteurs de l'industrie (énergie, pétrochimie, chimie, agro-alimentaire, papier carton, sidérurgie....)

Le rôle d'un échangeur thermique est d'échanger une puissance thermique entre une source froide et une source chaude. Ces sources peuvent être de nature liquide, solide ou gazeuse et ces sources peuvent être de natures différentes et échanger entre elles. Dans de nombreux procédés industriels les fluides utilisés ne doivent pas être mélangés, on utilise alors des échangeurs à surface.

La conception de ces échangeurs suppose :

- le choix d'une architecture et des matériaux
- un dimensionnement optimisé selon des critères multiples
- la résolution de problèmes technologiques

Dans nos sociétés industrielles modernes, ces échangeurs thermiques sont omniprésents, et l'on peut considérer globalement que la presque totalité de l'énergie thermique produite transite par des échangeurs.

La connaissance et la maîtrise des transferts de chaleur sont indispensables dans la démarche de conception de ces échangeurs. Les difficultés de calculs sont liées d'une part à la complexité des formes (problème hydraulique) et à la nature des fluides (problème thermique). Les problèmes de la corrosion et de l'encrassement engendrent une perte de performance dont il faut tenir compte à la conception (problème de maintenance).

Le manuel se découpe en trois parties :

- Informations liées l'utilisation de la machine
- Théorie (générale et appliquée à l'échangeur à tubes concentriques)
- Travaux pratiques

Bibliographie ayant servie à la rédaction de la partie théorique de la notice :

TRANSFERTS DE CHALEUR de A.BOUVENOT dans la collection technologies (éditions MASSON)

ECHANGEURS THERMIQUES de J.PADET dans la collection technologies (éditions MASSON)

AIDE MEMOIRE DU THERMICIEN (éditeur ELSEVIER)

II INFORMATIONS GENERALES

II.1 IDENTIFICATION

Cette notice concerne l'équipement "Banc d'étude de deux échangeurs thermiques" à vocation pédagogique, de référence BCET 12SP, année de fabrication 2007.

Le constructeur de cet équipement est la société ERIDÈS. Aussi pour toute information de quelque nature qu'elle soit, merci de contacter ses services aux coordonnées suivantes :

ERIDÈS

10 rue de la Creuse

Le Fay

42 650 SAINT JEAN BONNEFONDS

France

Tél : + (0/33) 477 530 530

Fax : + (0/33) 477 532 583

Courriel : info@erides.fr

II.2 CONDITIONS D'UTILISATION

L'équipement est conçu et fabriqué pour un usage de formation et d'apprentissage. Il répond à ce titre à des exigences de robustesse, de sécurité. Cependant, il ne doit être utilisé par les étudiants, qu'en présence d'une personne enseignante responsable. C'est cette personne qui doit veiller à ce que les règles de sécurité – relatives au paragraphe II.3 soient respectées.

Le "Banc d'étude de deux échangeurs thermiques" BCET 12SP est d'utilisation simple. Il permet d'étudier deux types d'échangeurs de température eau/eau : l'échangeur à tubes concentriques et l'échangeur à plaques. Par les mesures possibles grâce à une instrumentation adaptée, il est possible de quantifier les échanges d'énergie entre l'eau chaude et l'eau froide circulant dans l'échangeur. L'échangeur à tubes concentriques constitue un modèle d'étude sur lequel on peut appliquer des lois de corrélation connues.

N'utiliser pour le fonctionnement du banc que de l'eau propre provenant du réseau.

Le remplissage du bac se fait manuellement avec un contrôle visuel du niveau.

L'alimentation en eau froide doit être maintenue en permanence durant les essais.

II.3 INFORMATIONS VIS-A-VIS DE LA SECURITE

II.3.1 Prévention contre les risques électriques

L'équipement est destiné à être utilisé dans les établissements techniques dont les réseaux électriques ne sont pas connus. Pour cette raison, la société ERIDÈS installe en tête de chaque équipement un disjoncteur différentiel de 30 mA afin de prévenir tout défaut quelque soit le régime de neutre.

La partie électrique est composée d'un coffret sur lequel est fixé l'ensemble des afficheurs, voyants et boutons des commandes.

L'accès de coffret est verrouillé par une serrure à clé. Il est équipé d'un disjoncteur différentiel.

ATTENTION : toute mise sous tension coffret ouvert, en actionnant l'interrupteur sectionneur ne peut se faire que par des techniciens qualifiés et habilités, conscients des risques électriques.

Si une fuite d'eau est détectée, surtout si elle a lieu à proximité de composants électriques, doit être réparée avant de continuer l'utilisation.

II.3.2 Prévention contre les risques liés à un défaut

L'équipement ne présente pas de gros risques de fonctionnement liés à une éventuelle détérioration de l'installation.

- Le défaut principal qu'il faut éviter est un fonctionnement sans eau de l'installation. Ce défaut peut entraîner la détérioration de la pompe et du thermoplongeur. Ce risque est contrôlé par un capteur de niveau d'eau dans le bac. Lorsqu'il est actionné, il a pour effet de couper la pompe et le chauffage. Il est signalé par un voyant rouge (défaut).
- Le défaut de température est géré par une sécurité température sur le régulateur, mais également par un thermostat placé dans l'armoire qui a pour effet de couper le chauffage. Il est signalé par le même voyant rouge de défaut.
- Dans tous les cas, n'utiliser l'équipement qu'en parfait état. En cas de défaut, mettre immédiatement l'équipement hors service. Ne laisser faire des réparations que par un personnel qualifié. Ne pas négliger, court-circuiter ou interrompre les dispositifs de sécurité.
- ERIDÈS ne prend en charge aucune responsabilité pour les dégâts dus : à des modifications techniques, à un maniement non conforme, ou à une utilisation de l'équipement sans respect des consignes d'utilisation.

II.3.3 Prévention contre les risques liés à des avaries de transport

Contrôler lors du déballage, que l'équipement n'a subi aucun dommage, ni qu'aucun composant ne présente d'avarie visible. Si cela se présentait, prendre contact avec la société ERIDÈS qui seule peut prendre des initiatives vis à vis du transporteur.

En aucun cas ne mettre l'équipement endommagé en route avant d'avoir réparé le dommage, de s'être assuré des conséquences qu'entraîne ce défaut (sur la sécurité des personnes et de la machine).

II.4 DECLARATION DE CONFORMITE CE

La société ERIDÈS déclare que le matériel désigné ci-dessous est conforme aux dispositions des directives européennes suivantes :

- Directives Basse Tension, Directive 73/23/CE
- Directive Compatibilité Electromagnétique, Directive 89/336/CE

Désignation du matériel : **Banc d'étude d'un échangeur à tubes concentriques**

Référence : **BCET 12SP**

N° de série : **190366**

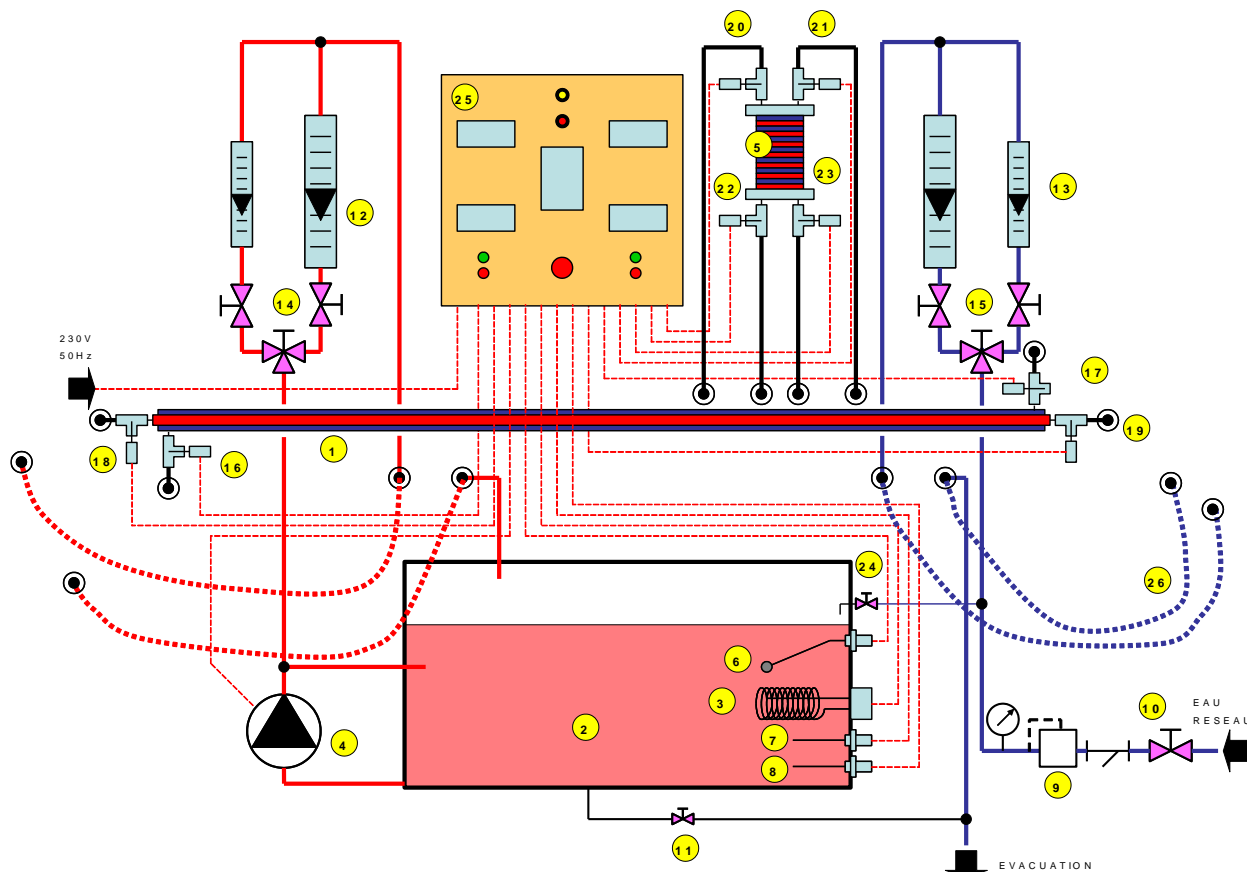
Année de fabrication : **2007**

Pour la société ERIDES, située au
10, rue de la Creuse – Le Fay – 42650 Saint Jean Bonnefonds, Michel ROPERS



II.5 DESCRIPTIF

II.5.1 Schéma de principe



II.5.2 Nomenclature

- 1 - Echangeur à tubes concentriques en inox 304L
 - tube extérieur 26,9mm épaisseur 1,6mm
 - tube intérieur 17,2mm épaisseur 1,6mm
 - Longueur d'échange 1500mm
- 2 - Réservoir eau chaude 60L
- 3 - Thermoplongeur 4 kW
- 4 - Pompe centrifuge monocellulaire en inox 0,37kW
- 5 - Echangeur à plaques et joints
- 6 - Détecteur de niveau bas
- 7- Sonde Pt100 (régulation température eau dans le réservoir)
- 8- Sonde Pt100 (Thermostat de sécurité)
- 9 - Détendeur
- 10 - Vanne d'entrée d'eau
- 11 - Vanne de vidange du réservoir
- 12 - Débitmètres de débit d'eau chaude
 - 1 débitmètre 0 - 80l/h pour faible débit
 - 1 débitmètre 60 - 630 l/h pour fort débit équipés d'une vanne de réglage

- 13 - 12 - Débitmètres de débit d'eau chaude
- 1 débitmètre 0 - 90l/h pour faible débit
- 1 débitmètre 60 - 630 l/h pour fort débit
- équipés d'une vanne de réglage
- 14, 15 - Vanne 3 voies en L pour sélection du débitmètre (petit ou gros débit)
- 16, 17, 18, 19 - Sonde Pt 100 sur échangeur monotube
- 20, 21, 22, 23 - Sonde Pt 100 sur échangeur à plaques
- 24 - Vanne de remplissage du bac
- 25 - Armoire électrique
- 26 - Flexibles munis de raccords rapides à raccorder sur échangeur étudié

II.5.3 Photos



Vue de face de l'équipement



Vue arrière de l'équipement

II.6 INSTALLATION ET RACCORDEMENTS

II.6.1 Manutention

L'équipement est constitué d'un châssis en profilés aluminium, monté sur roulettes. Il peut être déplacé en le faisant rouler, cette opération devient plus difficile (mais reste possible) lorsque le réservoir est plein.

Si l'équipement doit être déplacé par un engin de manutention de type chariot élévateur, cela est possible en portant une attention particulière à l'emplacement des fourches de levage sous le châssis. Veiller à ce qu'aucun câble, élément de tuyauterie ou autre composant, ne s'intercale et ne supporte la masse de l'équipement.

II.6.2 Mise en place

Il est préférable d'installer l'équipement dans un endroit éclairé, de surface plane et relativement lisse (carrelage, dalle de ciment).

Eviter les surfaces qui craignent les projections d'eau (plancher par exemple), qu'une éventuelle fuite ou projection d'eau pourrait endommager.

Ne pas laisser l'équipement dans un endroit susceptible de geler (sauf s'il est entièrement purgé).

En cours d'utilisation, les roulettes doivent être tournées vers l'intérieur et freinées.

II.6.3 Raccordement au réseau d'eau

Raccorder l'équipement au réseau d'eau :

- côté alimentation par l'intermédiaire du tuyau transparent (diamètre intérieur 16, diamètre extérieur 22) longueur 5m livré avec le banc.
- Côté évacuation par l'intermédiaire du tuyau transparent (diamètre intérieur 19, diamètre extérieur 26) longueur 5m livré avec le banc.

Pour fonctionner, le banc doit rester branché en permanence au réseau d'eau.

II.6.4 Raccordement au réseau électrique

La porte du coffret électrique étant fermée, s'assurer que l'interrupteur sectionneur est en position OFF/O et relier l'équipement au réseau électrique monophasé 230 VAC / 50Hz par le câble et la prise calibre 32A.

II.7 MISE EN SERVICE

II.7.1 Remplissage en eau

Vérifier que les vannes de réglage de débit (en dessous des débitmètres) soient fermées. Ouvrir la vanne d'alimentation 24 (la vanne 10 étant ouverte) et remplir le bac sur les $\frac{3}{4}$ de la hauteur (contrôle visuel).

II.7.2 Mise en route

Enlever le cadenas et tourner l'interrupteur sectionneur, le voyant sous-tension s'allume, ainsi que les afficheurs numériques (à conditions que tous les disjoncteurs soient en position ON) On peut alors commander la chauffe de l'eau (bouton poussoir "marche chauffage") et la pompe (bouton poussoir "marche pompe").

II.7.3 Intervention sur le circuit hydraulique

N'effectuer les interventions sur le circuit hydraulique (changement du type d'échangeur, changement du sens de circulation) qu'une fois la pompe arrêtée et l'eau du réseau coupée afin d'éviter les projections d'eau (risque de brûlures).

II.8 MISE A L'ARRÊT

Arrêt normal : Mettre à l'arrêt la pompe (bouton poussoir "arrêt pompe") et le chauffage ((bouton poussoir "arrêt chauffage"). Tourner L'inter-sectionneur (mettre en position "0"). Verrouiller l'interrupteur sectionneur à l'aide d'un cadenas (fourni avec la machine). Si l'arrêt est prolongé, débrancher la machine du secteur et vidanger le réservoir d'eau (voir opérations de maintenance).

Arrêt d'urgence : Appuyer le coup de poing rouge. Remise en route par la clé

II.9 OPERATIONS DE MAINTENANCE

Afin de prolonger le bon état de la machine, il est recommandé de vidanger l'eau régulièrement (environ toutes les 2 semaines et plus si l'eau a tendance à se colorer).

On utilise pour cela la vanne de vidange 11.

Le nettoyage complet du bac se fait 2 fois par an en démontant la plaque supérieure du bac à l'aide d'un outil et en utilisant une éponge.

Faire une inspection générale pour détecter d'éventuelles anomalies (paragraphe II.3 concernant la sécurité).

III THEORIE

NOTATIONS UTILISEES DANS CE MANUEL

Symbole	Unité	Désignation
d	m	diamètre intérieur d'un tube
h	W/ m ² K	coefficient d'échange par convection
k	W/ m ² K	coefficient local d'échange à travers la paroi
q	m ³ /s	débit volume
q _m	kg/s	débit masse
q _t	W/K	débit thermique unitaire
C _p	J/kg.K	capacité calorifique à pression constante
D	m	diamètre extérieur du tube
D _h	m	diamètre hydraulique
E	Sans dimension	efficacité thermique
E _c , E _f	Sans dimension	efficacités relatives (côté chaud ou froid)
L	m	longueur d'un tube
NUT	Sans dimension	nombre d'unités de transfert
Pe	Sans dimension	nombre de PECLET
Pr	Sans dimension	nombre de PRANDTL
R	Sans dimension	facteur de déséquilibre
Re	Sans dimension	nombre de REYNOLDS
S	m ²	surface d'échange (varie de 0 à Σ)
St	Sans dimension	nombre de STANTON
T	K	température
V	m/s	vitesse débitante
λ	W/m.K	conductivité thermique
η	Pa.s	viscosité dynamique
ν	m ² /s	viscosité cinématique
ρ	kg/ m ³	masse volumique
Σ	m ²	surface totale d'échange
Φ	W	flux total, puissance thermique

INDICES UTILISES (ils accompagnent le symbole)

Fluide chaud : indice c

Fluide froid : indice f

Entrée : indice e

Sortie : indice s

III.1 DIFFERENTS TYPES D'ECHANGEURS

On classe généralement les échangeurs suivants plusieurs critères :

- Leur domaine d'application (gaz, liquide, mono ou multiphasique), on parle ainsi d'échangeur :

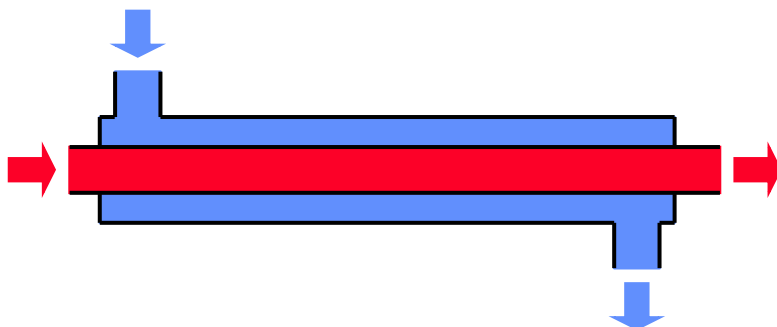
- liquide – liquide
- gaz – gaz
- gaz – liquide
- cas où un des deux fluides est diphasiques (cas d'évaporateurs ou condenseurs)

- Leur type d'écoulement et on parle alors :

- d'échangeurs à courants parallèles de mêmes sens
- d'échangeurs à courants parallèles de sens opposés
- d'échangeurs à courants croisés

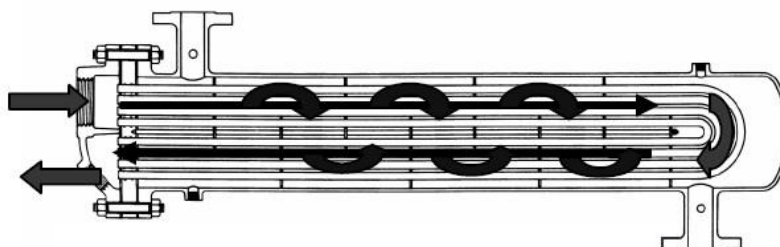
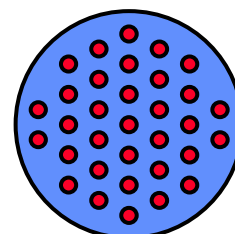
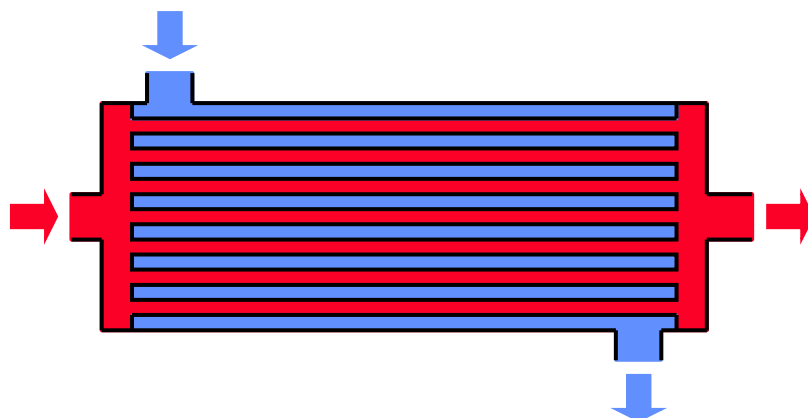
- Leur conception et l'on retrouve alors (pour les principaux types) :

- des échangeurs à tubes concentriques

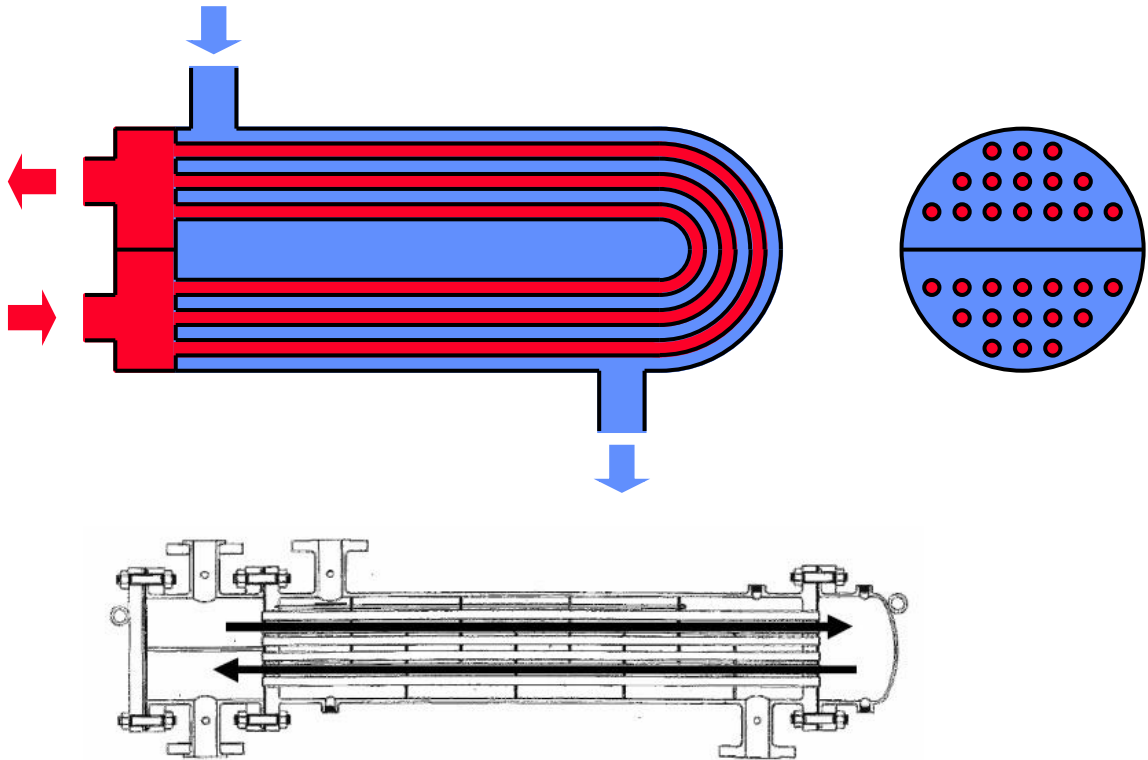


C'est un échangeur que l'on retrouve plus souvent sous la forme d'un échangeur coaxiaux en serpentins comme le montre la photo de droite.

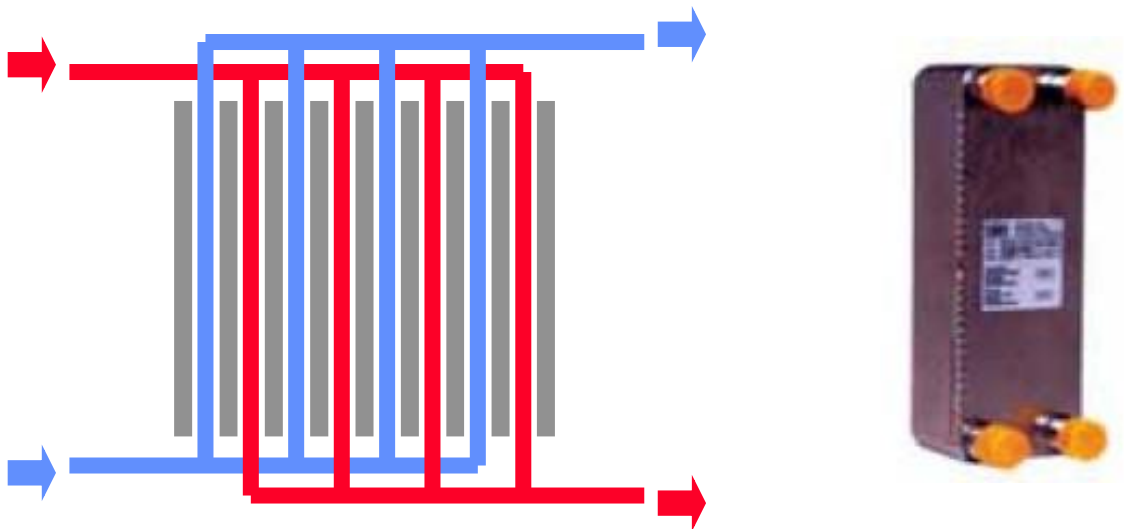
- des échangeurs à faisceaux tubulaires à tubes droits



- des échangeurs à faisceaux tubulaires à tubes en U



- des échangeurs à plaques



- des échangeurs à spirale
-

III.2 DISTRIBUTION DES TEMPERATURES

III.2.1 Relations de base

Expression du **débit thermique unitaire** :

$$q_t = q_m C_p$$

Flux unitaire $d\Phi$ à travers une surface dS :

$$d\Phi = k(T_c - T_f)dS$$

Dans cette expression, on retrouve k qui est le **coefficient d'échange global** à travers la paroi que l'on cherchera à déterminer par la suite.

III.2.2 Cas du fonctionnement en régime co-courant

(Le fluide froid et le fluide chaud ont le même sens d'écoulement)

- pour le fluide chaud :

$$d\Phi = -q_{mc} C_{pc} dT_c$$

- pour le fluide froid :

$$d\Phi = q_{mf} C_{pf} dT_f$$

On intègre ces relations en supposant k constant dans l'échangeur et on trouve les relations suivantes :

Relation entre T° fluide froid et T° fluide chaud :

$$\frac{T_c - T_f}{T_{ce} - T_{fe}} = \exp \left[- \left(\frac{1}{q_{tc}} + \frac{1}{q_{tf}} \right) k S \right]$$

Variation de température du fluide chaud :

$$\frac{T_c - T_{ce}}{T_{ce} - T_{fe}} = - \frac{q_{tf}}{q_{tc} + q_{tf}} \left\{ 1 - \exp \left[- \left(\frac{1}{q_{tc}} + \frac{1}{q_{tf}} \right) k S \right] \right\}$$

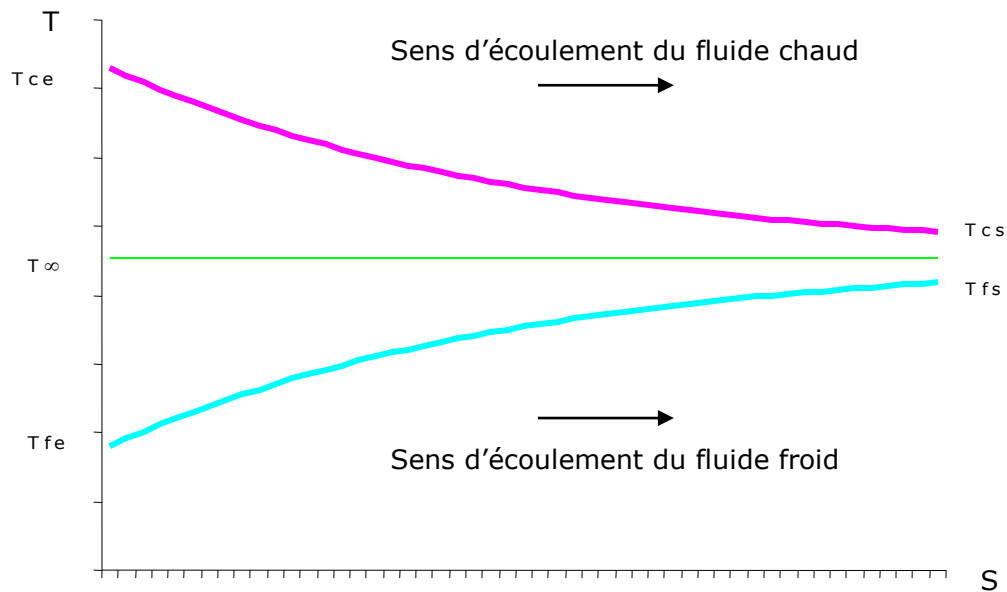
Variation de température du fluide froid :

$$\frac{T_f - T_{fe}}{T_{ce} - T_{fe}} = \frac{q_{tc}}{q_{tc} + q_{tf}} \left\{ 1 - \exp \left[- \left(\frac{1}{q_{tc}} + \frac{1}{q_{tf}} \right) k S \right] \right\}$$

Température pour une longueur infinie d'échangeur :

$$T_\infty = \frac{q_{tc} T_{ce} + q_{tf} T_{fe}}{q_{tc} + q_{tf}}$$

Sous forme graphique, voici l'évolution des températures T_c et T_f de l'entrée à la sortie de l'échangeur (abscisse S) :



ECHANGEUR CO-COURANT – EVOLUTION DE T_c ET T_f

III.2.3 Cas du fonctionnement en régime à contre courant

(Le fluide froid et le fluide chaud ont des sens d'écoulement opposés)

- pour le fluide chaud :

$$d\Phi = -q_{m,c} C_{p,c} dT_c$$

- pour le fluide froid :

$$d\Phi = -q_{m,f} C_{p,f} dT_f$$

On intègre ces relations en supposant k constant dans l'échangeur et on trouve les relations suivantes :

Relation entre T° fluide froid et T° fluide chaud :

$$\frac{T_c - T_f}{T_{ce} - T_{fe}} = \exp \left[- \left(\frac{1}{q_{tc}} - \frac{1}{q_{tf}} \right) k S \right]$$

Variation de température du fluide chaud :

$$\frac{T_c - T_{ce}}{T_{ce} - T_{fs}} = \frac{q_{tf}}{q_{tf} - q_{tc}} \left\{ \exp \left[- \left(\frac{1}{q_{tc}} - \frac{1}{q_{tf}} \right) k S \right] - 1 \right\}$$

Variation de température du fluide froid :

$$\frac{T_f - T_{fs}}{T_{ce} - T_{fs}} = \frac{q_{tc}}{q_{tf} - q_{tc}} \left\{ \exp \left[- \left(\frac{1}{q_{tc}} - \frac{1}{q_{tf}} \right) k S \right] - 1 \right\}$$

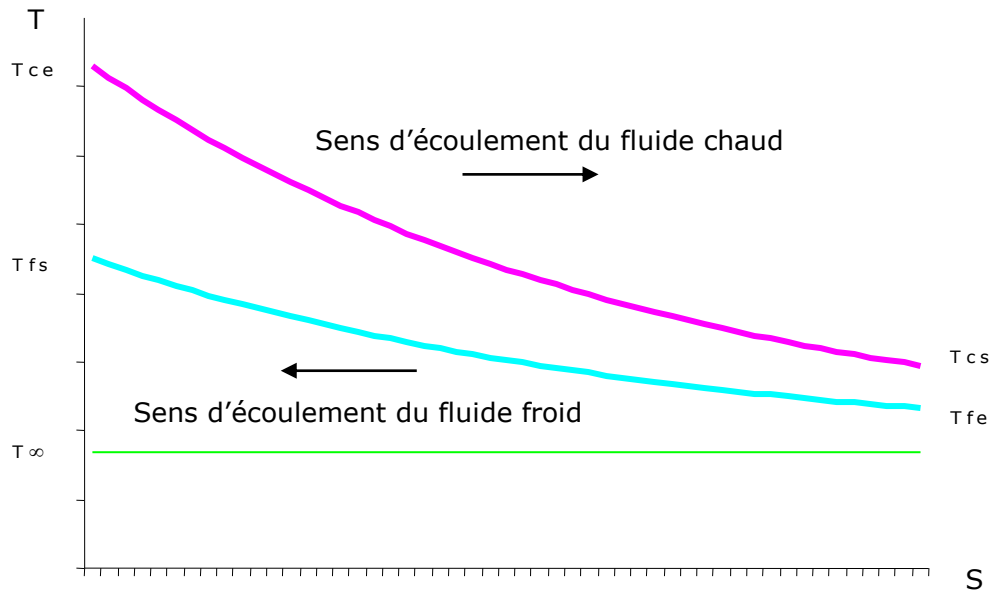
Il apparaît 3 cas de fonctionnement qui dépendent des débits q_{tc} et q_{tf}

1) Cas où : $q_{tc} < q_{tf}$ (on dit que le fluide chaud commande le transfert) alors :

Température pour une longueur infinie d'échangeur :

$$T_{\infty} = \frac{q_{tf} T_{fs} - q_{tc} T_{ce}}{q_{tf} - q_{tc}} < T_{fe}, T_{cs}$$

Evolution des températures T_c et T_f de l'entrée à la sortie de l'échangeur (abscisse S) :



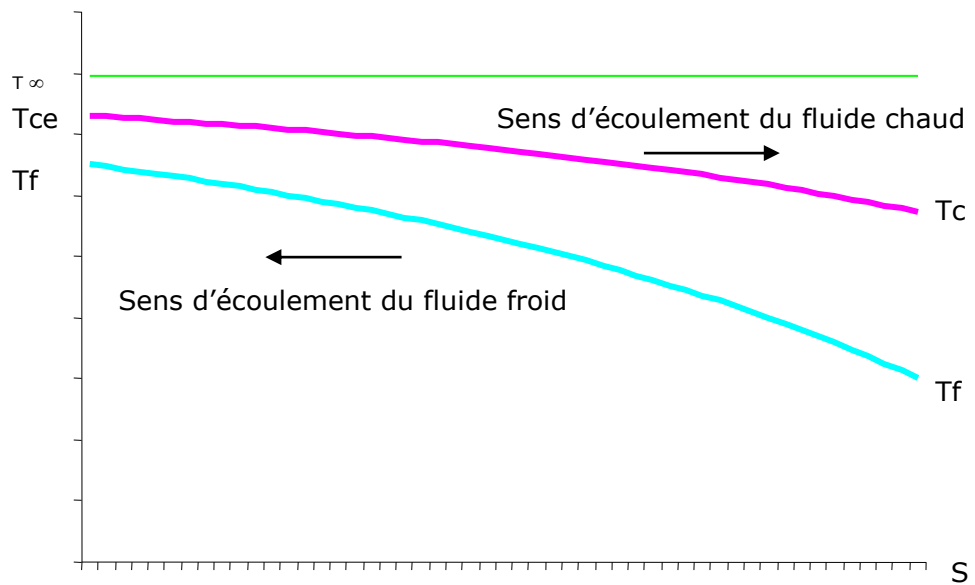
**ECHANGEUR CONTRE-COURANT - EVOLUTION DE Tc ET Tf
CAS ou $Q_{tc} < Q_{tf}$**

2) Cas où : $q_{tf} < q_{tc}$ (On dit que le fluide froid commande le transfert) alors :

Température pour une longueur infinie d'échangeur :

$$T_{\infty} = \frac{q_{tf}T_{fs} - q_{tc}T_{ce}}{q_{tf} - q_{tc}} > T_{ce}, T_{fs}$$

L'évolution des températures est représentée ci-dessous :



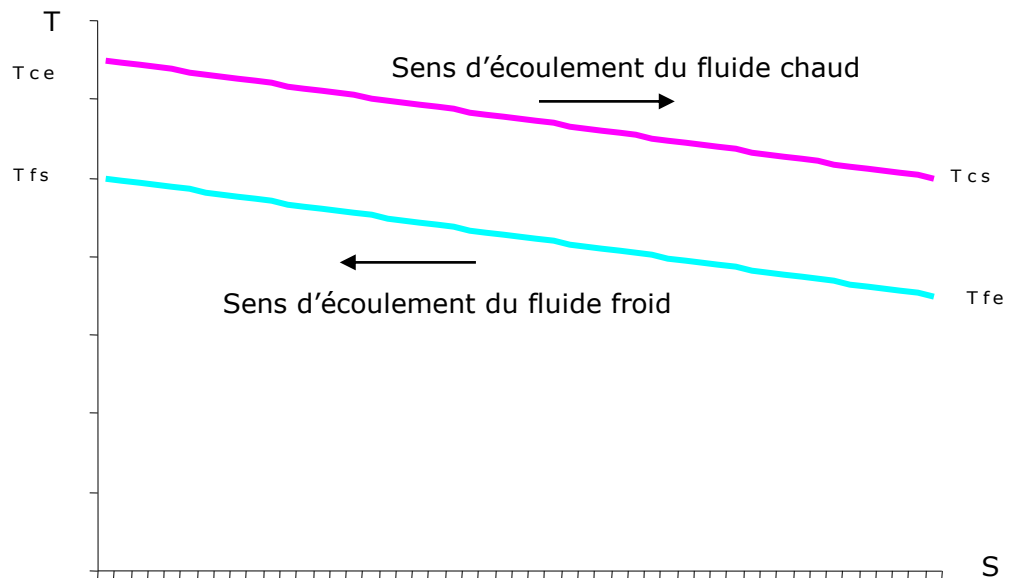
**ECHANGEUR CONTRE-COURANT - EVOLUTION DE Tc ET Tf
CAS ou $Q_{tc} < Q_{tf}$**

3) Cas où : $q_{tf} = q_{tc}$ alors :

Variations de températures des fluides :

$$\frac{T_c - T_{ce}}{T_{ce} - T_{fs}} = \frac{T_f - T_{fs}}{T_{ce} - T_{fs}} = - \frac{kS}{q_t}$$

L'évolution des températures est représentée ci-dessous :



**ECHANGEUR CONTRE-COURANT - EVOLUTION DE Tc ET Tf
CAS ou Qtc=Qtf**

III.3 DETERMINATION DE LA PUISSANCE

On utilise l'expression du flux unitaire $d\Phi$ (II.2.1) à travers une surface dS et on suppose k constant dans l'échangeur, on obtient le **flux total** :

à $S=0$ $T_c - T_f = \Delta T_a$; à $S=\Sigma$ $T_c - T_f = \Delta T_b$

$$\Phi = \frac{\Delta T_a - \Delta T_b}{\frac{1}{k\Sigma} \ln \frac{\Delta T_a}{\Delta T_b}}$$

Qui s'écrit habituellement :

$$\Phi = k\Sigma \Delta T_{LM}$$

Dans cette expression, on fait intervenir la **différence de température logarithmique moyenne** qui est égale à :

$$\Delta T_{LM} = \frac{\Delta T_a - \Delta T_b}{\ln(\Delta T_a / \Delta T_b)}$$

III.4 FLUX THERMIQUE ET EFFICACITE THERMIQUE

III.4.1 Flux thermique

En supposant les pertes externes nulles :

$$\Phi = q_{tc}(T_{ce} - T_{cs}) = q_{tf}(T_{fs} - T_{fe})$$

Le **flux maximum** transférable s'écrit :

$$\Phi_{max} = q_{tmin}(T_{ce} - T_{fe})$$

ou q_{tmin} est le minimum des deux débits thermiques du fluide froid et du fluide chaud.

III.4.2 Efficacité thermique

$$E = \frac{\Phi}{\Phi_{max}} = \frac{q_{tc}(T_{ce} - T_{cs})}{q_{tmin}(T_{ce} - T_{fe})} = \frac{q_{tf}(T_{fs} - T_{fe})}{q_{tmin}(T_{ce} - T_{fe})}$$

On peut aussi distinguer :

- L'efficacité relative côté fluide chaud : $E_c = \frac{T_{ce} - T_{cs}}{T_{ce} - T_{fe}}$

- L'efficacité relative côté fluide froid : $E_f = \frac{T_{fs} - T_{fe}}{T_{ce} - T_{fe}}$

Et le **facteur de déséquilibre**

$$R = \frac{q_{tmin}}{q_{tmax}}$$

On peut exprimer E et R dans les deux cas qui peuvent se présenter :

Premier cas : le débit thermique minimum pour le fluide chaud $q_{tmin} = q_{tc}$, alors :

$$E = E_c = \frac{T_{ce} - T_{cs}}{T_{ce} - T_{fe}} = \frac{1}{R} E_f \quad \text{et} \quad R = \frac{E_f}{E_c} = \frac{T_{fs} - T_{fe}}{T_{ce} - T_{cs}}$$

Deuxième cas : le débit thermique minimum pour le fluide froid $q_{tmin} = q_{tf}$, alors :

$$E = E_f = \frac{T_{fs} - T_{fe}}{T_{ce} - T_{fe}} = \frac{1}{R} E_c \quad \text{et} \quad R = \frac{E_c}{E_f} = \frac{T_{ce} - T_{cs}}{T_{fs} - T_{fe}}$$

D'où on tire une autre expression du **flux thermique** :

$$\Phi = E q_{tmin}(T_{ce} - T_{fe})$$

III.5 COEFFICIENTS D'ÉCHANGE GLOBAL

III.5.1 Introduction

Pour le calcul des coefficients d'échange il faut faire intervenir les caractéristiques thermophysiques des fluides et celles-ci sont généralement thermodépendantes, puisque les écoulements sont anisothermes, il y a une répercussion directe sur les champs vitesse et température dans l'échangeur. On adopte de manière conventionnelle, une température de référence pour évaluer les caractéristiques thermophysiques.

Le transfert de chaleur entre deux corps se fait suivant trois modes de transmission (dans cette présentation on néglige l'encrassement qui intervient normalement comme un résistance thermique supplémentaire) :

- **La conduction**
C'est la propagation de la chaleur dans les solides
- **Le rayonnement**
C'est la transmission de la chaleur sous la forme de radiations électromagnétiques
- **La convection**
C'est le mode de transmission de la chaleur des fluides (liquides ou gaz) ou les échanges thermiques sont dus au mouvement du fluide

Dans le fonctionnement d'un échangeur liquide-liquide comme ceux présentés sur le banc d'échanges thermiques, le transfert fait intervenir essentiellement la convection (entre le fluide et les parois) et la conduction (dans la paroi de l'échangeur), le rayonnement n'intervient pas de manière significative car les surfaces en regard sont à des températures proches et peu élevées.

III.5.2 Cas général de la conduction et de la convection

Loi de convection : **Loi de NEWTON**

$$\Phi = h \Sigma \Delta T$$

Le calcul de h se fait à partir des corrélations de convection que l'on verra par la suite.

Loi de la conduction : **Loi de FOURIER** :

- modèle du mur :

$$\Phi = -\lambda \frac{T_2 - T_1}{e} S$$

- modèle du cylindre :

$$\Phi = -\lambda \frac{T_2 - T_1}{\ln(R_1 / R_2)} 2 \pi L$$

III.5.3 Transfert au travers d'un paroi plane

On pratique une extension de la loi de FOURIER utilisée pour la conduction dans un solide pour exprimer les coefficients de convection thermique.

Le transfert de chaleur se passe en trois temps :

- par convection dans le fluide à la température T_c

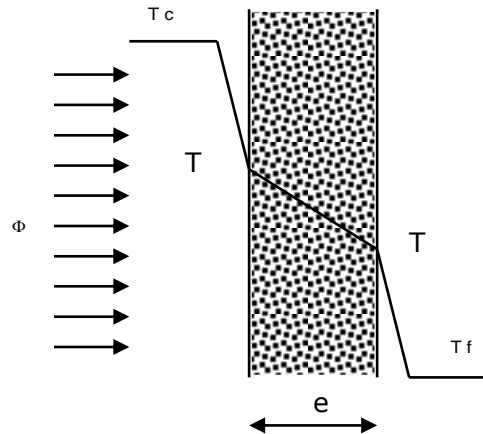
$$\Phi = h_c S (T_c - T_1)$$

- par conduction dans la paroi

$$\Phi = \frac{\lambda}{e} S (T_1 - T_2)$$

- par convection dans le fluide à la température T_f

$$\Phi = h_f S (T_2 - T_f)$$



Le flux à travers la paroi s'écrit alors :

$$\Phi = k S (T_c - T_f) \text{ avec } \frac{1}{k} = \frac{1}{h_c} + \frac{e}{\lambda} + \frac{1}{h_f}$$

k est appelé **coefficient global de transmission thermique** de l'échangeur

Cette formulation n'est valable que pour des parois planes

III.5.4 Transfert au travers d'une paroi cylindrique

Le transfert de chaleur se passe en trois temps :

- par convection dans le fluide intérieur à la température T_c

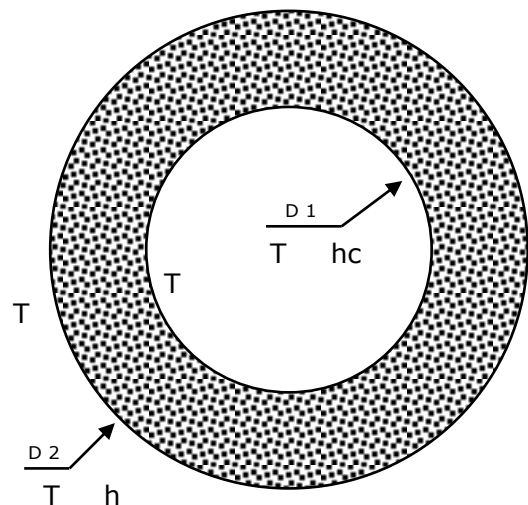
$$\Phi = h_c \pi D_1 L (T_c - T_1)$$

- par conduction dans la canalisation

$$\Phi = \frac{2 \pi L \lambda}{\ln \frac{D_2}{D_1}} (T_1 - T_2)$$

- par convection dans le fluide extérieur à la température T_f

$$\Phi = h_f \pi D_2 L (T_2 - T_f)$$



Le flux à travers la paroi cylindrique s'écrit alors :

$$\Phi = k S (T_c - T_f) \quad \text{avec} \quad \frac{1}{k} = \frac{1}{h_c} + \frac{D_1 \ln \frac{D_2}{D_1}}{2 \lambda} + \frac{1}{h_f} \frac{D_1}{D_2}$$

k est appelé coefficient global de transmission thermique de l'échangeur rapporté à la surface interne du tube.

Si l'on prend la surface externe comme référence, on aura :

$$\frac{1}{k} = \frac{1}{h_c} \frac{D_2}{D_1} + \frac{D_2 \ln \frac{D_2}{D_1}}{2 \lambda} + \frac{1}{h_f}$$

k est appelé **coefficient global de transmission thermique** de l'échangeur rapporté à la surface externe du tube.

III.6 LES NOMBRES SANS DIMENSION

III.6.1 Introduction

Il existe 4 principaux nombres sans dimension qui sont utilisés dans les corrélations de convection : REYNOLDS, PRANDTL, NUSSELT, GRASHOF, les deux autres nombres signalés ici (PECLET, MARGOULIS) sont des relations entre ces 4 nombres.

Certains de ces nombres sans dimension font apparaître le paramètre D, dans le cas d'un cylindre, il s'agit du diamètre mais lorsque l'on a à faire à des sections non cylindrique, on parle alors de diamètre hydraulique qui est égal à :

$$D_h = \frac{4 s_0}{p_m}$$

s_0 section occupée par le fluide
 p_m le périmètre mouillé.

III.6.2 Nombre de REYNOLDS

$$Re = \frac{\rho V D}{\eta}$$

Rapport des forces d'inertie et les forces de viscosité. Critère pour la détermination du type d'écoulement laminaire ou turbulent

III.6.3 Nombre de PRANTL

$$Pr = \frac{\eta C_p}{\lambda}$$

Caractéristique intrinsèque du fluide permettant de passer de la couche limite hydraulique à la couche limite thermique.

III.6.4 Nombre de NUSSELT

$$Nu = \frac{hD}{\lambda}$$

Rapport entre le gradient de température à la paroi et le gradient de température moyen.

III.6.5 Nombre de PECLET

$$Pe = \frac{\rho V D C_p}{\lambda}$$

$$Pe = Re Pr$$

III.6.6 Nombre de MARGOULIS ou STANTON

$$Ma = St = \frac{h}{\rho V C_p}$$

$$Ma = St = \frac{Nu}{Re Pr}$$

III.6.7 Nombre de GRASHOF

$$Gr = \beta g \frac{\Delta T \rho^2 L^3}{\eta^2}$$

Relation entre les forces de poussée et les forces de viscosité en convection naturelle. Action identique à Re en convection forcée.

III.7 CORRELATIONS DE CONVECTION UTILES

III.7.1 Introduction

Le problème majeur avant le calcul du flux consiste à déterminer k qui dépend d'un nombre important de paramètres : caractéristiques du fluide, de l'écoulement, de la température, de la forme de la surface d'échange

Il est donc nécessaire d'utiliser les variables réduites et faire apparaître entre celles-ci les corrélations théoriques qui existent en vue d'une détermination (essentiellement expérimentale) de la forme mathématique et des coefficients numériques qui relient ces nombres sans dimension.

On trouve dans la littérature de très nombreuses formules semi-empiriques appelées corrélations qui correspondent à une grande diversité de situations concrètes, certaines de ces formules ont été établies dans des conditions spécifiques et ne peuvent donc avoir de prétentions globalisantes. Ils existent entre elles une différence entre les résultats numériques qui peut aller jusqu'à 15%, il faut donc être prudent qu'en à leur utilisation et à la signification des valeurs que l'on obtient.

Pour notre application, nous retiendrons 2 cas qui nous seront utiles dans les calculs :

- L'écoulement à l'intérieur d'un tube
- L'écoulement en conduite annulaire

III.7.2 Ecoulement à l'intérieur d'un tube

Les caractéristiques du fluide sont prises à la température moyenne (cas des liquides) entre l'entrée et la sortie sauf pour la viscosité (on tient compte la viscosité à la paroi μ_p)

Dimensions caractéristiques :

D_h : diamètre intérieur pour un tube circulaire ou le diamètre hydraulique pour une section quelconque

L : longueur du canal

Cas d'un régime laminaire :

$$Re < 2100 \text{ et } Re \cdot Pr \cdot \frac{D_h}{L} > 10$$

$$Nu = 1,86 \left(Re \cdot Pr \cdot \frac{D_h}{L} \right)^{1/3} \left(\frac{\eta}{\eta_p} \right)^{0,14}$$

$$2100 < Re < 10000 \text{ et } 0,5 < Pr < 500$$

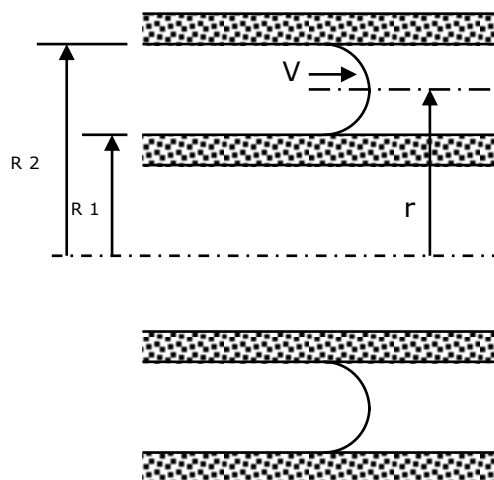
$$Nu = 0,116 \left(Re^{2/3} - 125 \right) Pr^{1/3} \left(1 + \left(\frac{D_h}{L} \right)^{1/3} \right) \left(\frac{\eta}{\eta_p} \right)^{0,14}$$

Cas d'un régime turbulent (formule de M.ADAMS) :

$$10^4 < Re < 10^6 \text{ et } 0,5 < Pr < 500$$

$$Nu = 0,023 Pr^{1/3} Re^{0,8} \left(\frac{\eta}{\eta_p} \right)^{0,14} \left(1 + \left(\frac{D_h}{L} \right)^{0,7} \right)$$

III.7.3 Ecoulement en conduit annulaire



Le diamètre hydraulique s'écrit :

$$D_h = 2(R_2 - R_1)$$

Le nombre de REYNOLDS :

$$R_e = 2V(R_2 - R_1) / \nu$$

Cas d'un régime laminaire :

Paroi extérieure isolée, température sur paroi intérieure uniforme

$Re < 2000 ; Pr > 0,5$

R2/R1	20	10	4	2	1
Nu	17.46	11.56	7.34	5.74	4.86

$$St = \frac{Nu}{Pe} \left(\frac{\mu}{\mu_p} \right)^{0.14}$$

St, Pe, μ à T_m

μ_p à la température de la paroi intérieure

Cas d'un régime turbulent (formule de M.ADAMS) :

$Re > 2000 ; Pr > 0,7$

$$St = 0.023 \left(\frac{R_2}{R_1} \right)^{0.14} Re^{-0.2} Pr^{-0.6}$$

III.8 METHODE DES NUTS (notions)

Dans le cadre des échanges thermiques, il est intéressant de signaler une méthode de calcul appelée méthode NUT (Nombre d'Unités de Transfert) largement répandue. Dans cette méthode, l'échangeur est considéré comme une boîte noire dont le coefficient global d'échange est donné.

C'est un nombre sans dimension défini par :

$$NUT = \frac{k \Sigma}{q_{t \text{ min}}}$$

A partir de la valeur du NUT et du rapport R, on peut calculer l'efficacité de l'échangeur dans la configuration ou on l'utilise (co-courant, contre-courant,...), on aura par exemple :

Expression de l'efficacité d'un échangeur co-courant en fonction de R et NUT :

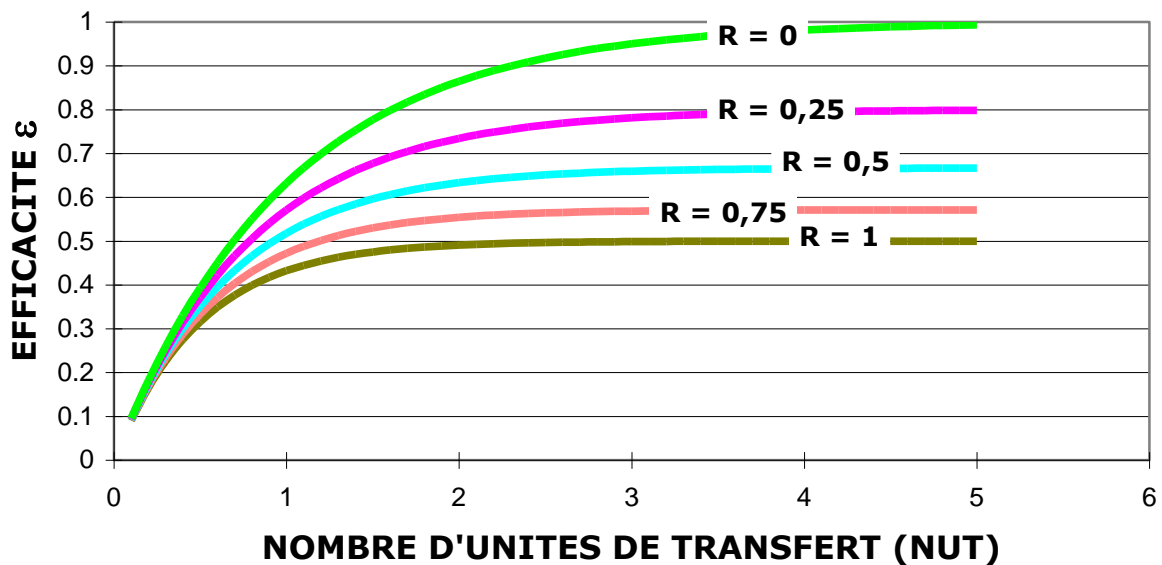
$$E = \frac{1 - \exp[-(1 + R)NUT]}{1 + R} \quad \text{(Voir courbes page suivante)}$$

Expression de l'efficacité d'un échangeur à contre courant en fonction de R et NUT :

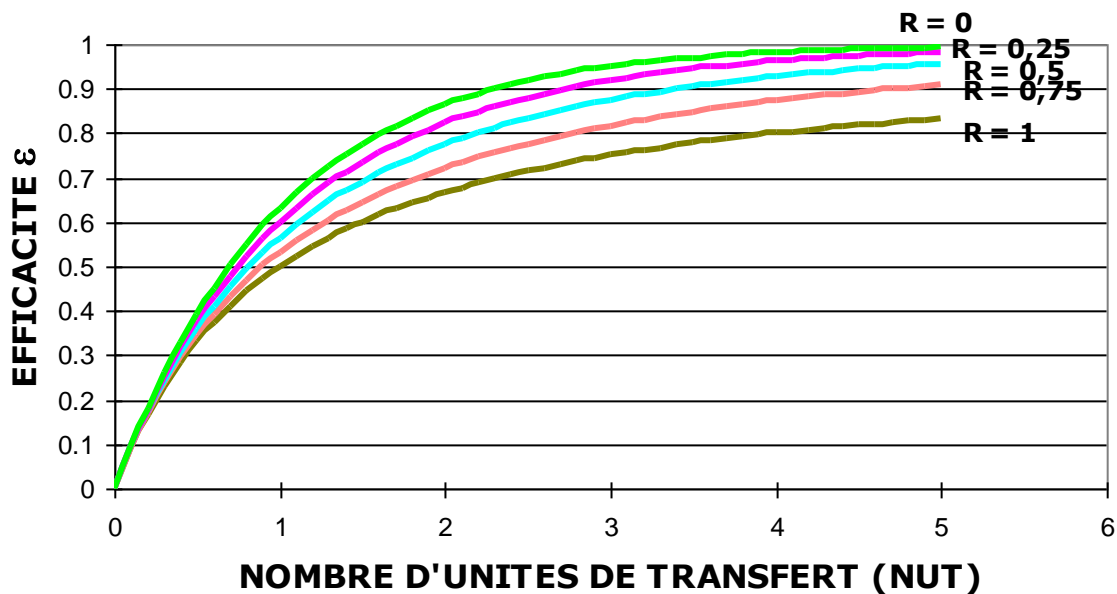
$$E = \frac{1 - \exp[-(1 - R)NUT]}{1 - R \exp[-(1 - R)NUT]} \quad (\text{Voir courbes page suivante})$$

A partir de E on peut alors calculer, sous réserve de connaître les débits des fluides et une des deux températures (entrée ou sortie) sur chacun des fluides, la puissance échangée et les deux autres températures.

LOI $\varepsilon = f(NUT, R)$ en circulation antiméthodique (co-courant)



LOI $\varepsilon = f(NUT, R)$ en circulation méthodique (contre-courant)



IV TRAVAUX PRATIQUES

IV.1 Présentation du banc

échangeurs :

Il y a deux échangeurs de technologies différentes ayant des surfaces d'échange du même ordre de grandeur.

Premier échangeur :

Echangeur à tubes concentriques à courants parallèles.

Fonctionnements possibles :

- courants de mêmes sens : co-courant (ou antiméthodique)
- courants de sens opposés : contre courant (ou méthodique).

Il a les caractéristiques suivantes :

Tube intérieur : $\varnothing 17,2$ mm ép : 1,6 mm, inox 304L

Tube extérieur : $\varnothing 26,9$ mm ép : 1,6 mm, inox 304L

L : longueur du canal 1,4m (on néglige les extrémités ou il y a peu de circulation)

Surface d'échange (surface externe du tube intérieur) : $0,0750\text{m}^2$

Second échangeur :

Echangeur à plaques et joints.

Les caractéristiques suivantes :

16 plaques (mais seulement 15 qui servent à l'échange)

Surface d'échange des plaques : environ $0,0050\text{ m}^2$

circuits hydrauliques :

- Le circuit d'eau chaude est en circuit fermé sur un bac de stockage, le fluide circule grâce à une pompe centrifuge.
- Une vanne trois voies en L permet de sélectionner le débitmètre suivant le type d'essai (petit ou gros débit)
- Le circuit d'eau froide est de type à eau perdue.
- Une vanne trois voies en L permet de sélectionner le débitmètre suivant le type d'essai (petit ou gros débit)
- Les flexibles munis de raccords rapides permettent de connecter l'échangeur étudié suivant la configuration retenue (co-courant ou contre courant)

chauffage :

On dispose d'un thermoplongeur délivrant une puissance de 4 kW. Le bain est régulé en boucle fermée (sonde Pt 100) par un régulateur PID.

La sécurité sur la température maximum de l'eau (70°) est doublée :

- le régulateur possède sa propre sécurité (entrée alarme)
- un thermostat situé dans l'armoire et dont la sonde Pt 100 est placée sur le bac d'eau chaude, assure une sécurité indépendante (ne pas le dérégler).

grandeurs mesurées :

- débits :
Les deux circuits sont équipés de deux débitmètres pour les essais en régimes laminaire et turbulent.

- température de l'eau :
Il y a 4 points de mesure de température par sonde Pt100 sur chacun des échangeurs (2 à chaque extrémité des échangeurs). Suivant la position du commutateur placé sur la porte de l'armoire électrique (échangeur monotube / échangeur à plaques) les températures affichées correspondront à celles de l'un ou l'autre des échangeurs.

IV.2 Mise en service

Pour la mise en service de l'équipement, se reporter aux indications du paragraphe II.7

La sécurité intégrée à la machine en cas de manque d'eau provoque :

- l'arrêt de la pompe
- l'arrêt du chauffage

Le régulateur assure également une limitation à 70°C du chauffage de l'eau, il est doublé d'une sécurité par thermostat situé dans l'armoire électrique.

Lorsque la mise en service est faite (mise en route de la pompe et du chauffage), on peut alors passer aux travaux pratiques.

IV.3 Travaux pratiques

IV.3.1 Mode opératoire

1 – Pompe à l'arrêt, eau froide fermée (vanne 10). Connecter les flexibles sur l'échangeur à étudier et dans le sens de circulation choisi (co ou contre courant).

ATTENTION : NE MANŒUVRER LES COUPLEURS RAPIDES QU'UNE FOIS LA POMPE ARRETÉE POUR EVITER LES PROJECTION D'EAU CHAUDE

2 – Alimenter le circuit en eau froide (ouvrir la vanne 10).

3 – Il y a deux débitmètres sur chacun des réseaux (eau froide et eau chaude) qui permettent d'explorer les forts débits (régime turbulent) et les faibles débits (régime laminaire). Orienter les vannes trois voies 14 et 15 vers le débitmètre choisi.

4 - Régler les débits aux valeurs voulues par les vannes de marque TA à poignée rouge (sur les débitmètres gros débit) et par les vannes pointeau fixées (sur les débitmètres de faible débit).

4 – Attendre quelques minutes l'établissement d'un régime permanent (stabilisation des températures) et procéder aux relevés (2 débits, 4 températures).

IV.3.2 Travaux pratiques proposés

IV.3.2.1 Schéma hydraulique :

Tracer le schéma de l'installation en repérant chaque composant.

IV.3.2.2 Manipulations

Choisir un type d'échangeur et le type de configuration (co-courant ou contre-courant) à l'aide des flexibles munis de raccords rapides. Utiliser la feuille de résultats en annexe.

- **Procéder aux mesures** de T_{ce} , T_{cs} , T_{fe} , T_{fs} , en faisant varier q_{ec} , q_{ef} , (utiliser la feuille de résultats ci-jointe). Fixer un débit constant et faire varier l'autre sur toute sa plage.
- **Calculer** : les températures moyennes T_{fmoy} , T_{cmoy}
- **Choisir** les valeurs de C_p et ρ dans le tableau des caractéristiques de l'eau que l'on trouvera en annexe à partir des valeurs moyennes des températures

- **Calculer les différents éléments :**

Les débits massiques q_{mf} , q_{mc}

Les débits thermiques q_{tf} , q_{tc}

Les puissances transférées Φ_f , Φ_c , (elles sont sensiblement égales les écarts sont à la précision de la prise des mesures, les conditions d'essais, la précision des appareils, les échanges thermiques parasites)

On en déduit les caractéristiques de l'échangeur :

La puissance transférée (moyenne côté chaud et côté froid)

La différence de température logarithmique moyenne ΔT_{lm}

Le coefficient d'échange global k

On peut aussi calculer :

Le flux maximum transférable Φ_{max}

Efficacité de l'échangeur E

Facteur de déséquilibre R

- **Tracer l'évolution des températures dans l'échangeur**

Pour chaque type de branchement (co-courant, contre-courant), représenter graphiquement l'évolution de la température de l'eau dans l'échangeur. Comparaison par rapport aux courbes théoriques.

- **Courbes de l'efficacité et du coefficient d'échange global**

Tracer les courbes d'efficacité et d'échange global en fonction des débits.

IV.3.2.3 Calcul théorique du coefficient d'échange global de l'échangeur à tubes concentriques

On retiendra le cas de l'échangeur à tubes concentriques pour lequel il existe des corrélations de convection exploitables.

Choisir un (ou plusieurs) point(s) de fonctionnement qui a (ont) été testé(s) lors des manipulations (afin de pouvoir comparer les résultats théoriques avec la pratique).

En utilisant les formules de la partie théorique :

- calculer le coefficient par convection de l'eau avec le tube intérieur

- calculer le coefficient d'échange par conduction dans le tube intérieur
- calculer le coefficient d'échange par convection du tube intérieur avec l'eau de la section annulaire
- en déduire le coefficient d'échange global de l'échangeur.

Rappels des caractéristiques de l'échangeur :

Tube intérieur : $\varnothing 17,2$ mm ép : 1,6 mm, inox 304L

Tube extérieur : $\varnothing 26,9$ mm ép : 1,6 mm, inox 304L

L : longueur du canal 1,4m

Surface d'échange (surface externe du tube intérieur) : 0,075m²

IV.3.2.4 Observations

A partir des relevés expérimentaux et des calculs théoriques.

IV.3.2.5 Comparaison des puissances transmises dans les échangeurs

Les échangeurs ayant des surfaces d'échange comparables, il est intéressant de comparer les efficacités de ces deux types d'échangeurs.

Les calculs théoriques sur l'échangeur à plaques ne sont pas possibles car les corrélations de convection pour ce type d'échangeur ne sont pas connues.

IV.4 Présentation des résultats expérimentaux

FEUILLE DE RESULTATS (voir aussi en annexe)

FONCTIONNEMENT : CONTRE COURANT ECHANGEUR : MONOTUBE

q_{ec}(l/h)	Lecture sur débitmètre	160	40	280
T_{ce}(°C)	Lecture sur afficheur	68.4	68.9	69.2
T_{cs}(°C)	Lecture sur afficheur	52.9	44.8	58.2
T_{cmoy}(°C)	$= \frac{T_{ce} - T_{cs}}{2}$	60.65	56.85	63.7
C_p(J/kg.K)	Lecture sur table de l'eau (valeurs à T _{cmoy})	4179	4178	4180
ρ(kg/m³)	Lecture sur table de l'eau (valeurs à T _{cmoy})	983	984	981
q_{mc}(kg/s)	$= \frac{q_{ec}}{3600} \cdot \frac{\rho}{1000}$	0.04369	0.01093	0.0763
q_{tc}(W/K)	= q _{mc} C _p	182.576	45.6795	318.934
Φ_c(W)	= q _{tc} (T _{ce} - T _{cs})	2829.93	1100.88	3508.27

q_{ef}(l/h)	Lecture sur débitmètre	400	160	280
T_{fe}(°C)	Lecture sur afficheur	18.1	18.5	18.5
T_{fs}(°C)	Lecture sur afficheur	24.9	24.8	29.4
T_{fmoy}(°C)	$= \frac{T_{fe} - T_{fs}}{2}$	21.5	21.65	23.95
C_p(J/kg.K)	Lecture sur table de l'eau (valeurs à T _{fmoy})	4175	4175	4174
ρ(kg/m³)	Lecture sur table de l'eau (valeurs à T _{fmoy})	998	998	997
q_{mf}(kg/s)	$= \frac{q_{ef}}{3600} \cdot \frac{\rho}{1000}$	0.11089	0.04436	0.07754
q_{tf}(W/K)	= q _{mf} C _p	462.961	185.184	323.671
Φ_f(W)	= q _{tf} (T _{fs} - T _{fe})	3148.14	1166.66	3528.01

Φ(W)	$= \frac{\Phi_c + \Phi_f}{2}$	2989.03	1133.77	3518.14
ΔT_{lm}	$= \frac{\Delta T_a - \Delta T_b}{\ln(\Delta T_a / \Delta T_b)}$	38.9884	34.4367	39.75
K (W/ m²K)	$= \frac{\Phi}{\Sigma \Delta T_{LM}}$	946.478	406.46	1092.68

Φ_{max} (W)	Φ _{max} = q _{t min} (T _{ce} - T _{fe})	20120	2016	14196
E	$= \frac{\Phi}{\Phi_{max}}$	0.148	0.562	0.247
R	$= \frac{q_{t min}}{q_{t max}}$	0.4	0.25	1

FONCTIONNEMENT : CONTRE COURANT ECHANGEUR : A PLAQUES

q_{ec}(l/h)	Lecture sur débitmètre	160	40	280
T_{ce}(°C)	Lecture sur afficheur	65.8	61.3	61.5
T_{cs}(°C)	Lecture sur afficheur	39	29.5	46.3
T_{cmoy}(°C)	$= \frac{T_{ce} - T_{cs}}{2}$	52.4	45.4	53.9
C_p(J/kg.K)	Lecture sur table de l'eau (valeurs à T _{cmoy})	4180	4180	4180
ρ(kg/m³)	Lecture sur table de l'eau (valeurs à T _{cmoy})	1000	1000	1000
q_{mc}(kg/s)	$= \frac{q_{ec}}{3600} \cdot \frac{\rho}{1000}$	0.04444	0.01111	0.07778
q_{tc}(W/K)	$= q_{mc} C_p$	185.778	46.4444	325.111
Φ_c(W)	$= q_{tc}(T_{ce} - T_{cs})$	4978.84	1476.93	4941.69

q_{ef}(l/h)	Lecture sur débitmètre	400	160	280
T_{fe}(°C)	Lecture sur afficheur	17.9	18.8	18.4
T_{fs}(°C)	Lecture sur afficheur	29.6	27.4	35.2
T_{fmoy}(°C)	$= \frac{T_{fe} - T_{fs}}{2}$	23.75	23.1	26.8
C_p(J/kg.K)	Lecture sur table de l'eau (valeurs à T _{cmoy})	4180	4180	4180
ρ(kg/m³)	Lecture sur table de l'eau (valeurs à T _{cmoy})	1000	1000	1000
q_{mf}(kg/s)	$= \frac{q_{ef}}{3600} \cdot \frac{\rho}{1000}$	0.11111	0.04444	0.07778
q_{tf}(W/K)	$= q_{mf} C_p$	464.444	185.778	325.111
Φ_f(W)	$= q_{tf}(T_{fs} - T_{fe})$	5434	1597.69	5461.87

Φ(W)	$= \frac{\Phi_c + \Phi_f}{2}$	5206.42	1537.31	5201.78
ΔT_{lm}	$= \frac{\Delta T_a - \Delta T_b}{\ln(\Delta T_a / \Delta T_b)}$	27.974	20.1184	27.0921
K (W/ m²K)	$= \frac{\Phi}{\Sigma \Delta T_{LM}}$	2297.73	943.371	2370.41

Φ_{max} (W)	$\Phi_{max} = q_{tmin}(T_{ce} - T_{fe})$	19160	1700	12068
E	$= \frac{\Phi}{\Phi_{max}}$	0.271	0.904	0.431
R	$= \frac{q_{tmin}}{q_{tmax}}$	0.4	0.25	1

a) Schéma hydraulique :

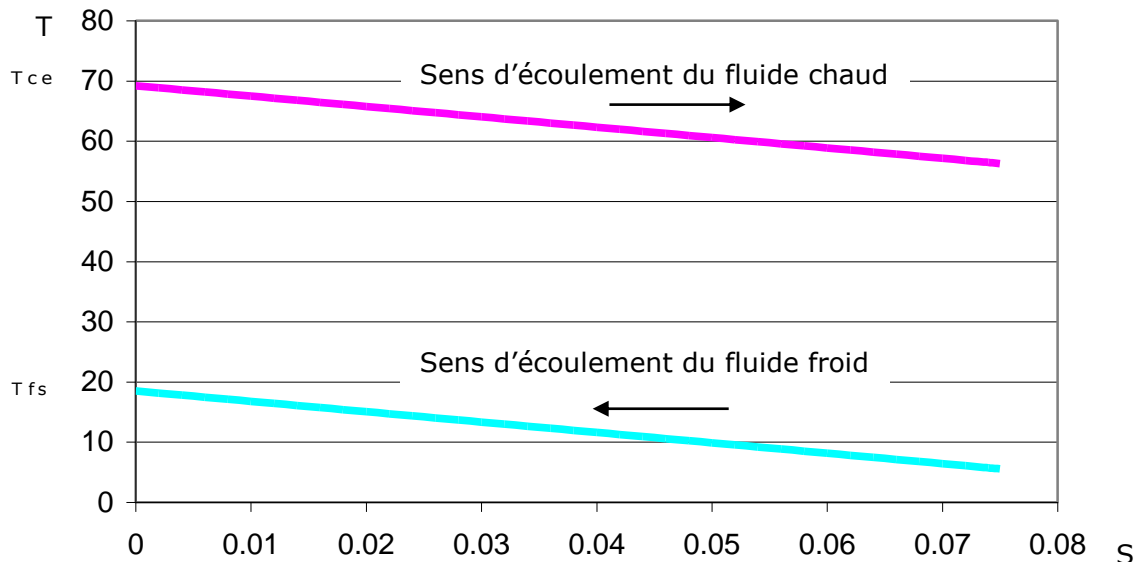
Voir II.4.1

b) Manipulations

Relevés : Utiliser la feuille de résultats proposée et la table des caractéristiques thermodynamique de l'eau.

L'installation permet de mesurer les puissances transmises sur chacun des fluides chaud et froid. On mettra en évidence l'écart qu'il peut y avoir (le quantifier en pourcentage) et les raisons qui sont susceptibles d'expliquer ces pertes (isolation, précision des mesure, limites du système...).

Courbe obtenue à partir des formules théoriques (valeur des températures, débits et coefficient d'échange thermique global expérimentaux).



Si on multiplie les essais, on pourra par exemple tracer les courbes d'efficacité et d'échange global en fonction des débits et en fonction du mode de fonctionnement (co-courant et contre courant).

c) Calcul théorique du coefficient d'échange global

Le but est de comparer la valeur de k mesurée et celle obtenu par calcul, on choisit pour cela un essai expérimental de référence.

Nous prendrons ici l'essai sur fond grisé dans la feuille de résultats.

Les transferts de chaleur au niveau de l'échangeur sont les suivants :

- convection forcée entre l'eau et le tube.
- conduction dans le tube intérieur de l'échangeur
- convection forcée entre le tube intérieur et l'eau
- conduction dans le tube extérieur et l'isolant
- rayonnement entre la surface extérieure de l'isolant et les parois du local

De ces transferts on ne retiendra que les 3 premiers et l'on considèrera que les deux derniers sont nuls en faisant l'hypothèse d'une isolation parfaite de l'échangeur.

Détail de ces différents échanges :

convection forcée entre l'eau et le tube intérieur :

On utilise la corrélation de convection indiquée dans la partie théorique du manuel.

Les caractéristiques du fluide sont prises à la température moyenne entre l'entrée et la sortie (y compris pour la viscosité qui varie peu dans le cas de l'eau), soit le point de fonctionnement choisi :

$$T_{ce} = 69,2^\circ$$

$$T_{cs} = 58,2^\circ$$

$$q = 0,280 \text{ m}^3/\text{h}$$

Les dimensions caractéristiques sont les suivantes :

Tube intérieur : $\varnothing 17,2 \text{ mm}$ ép : $1,6 \text{ mm}$, inox 304L

D_h : diamètre hydraulique ici (Φ intérieur du tube) = $17,2 - 1,6 \times 2 = 14 \text{ mm} = 0,014 \text{ m}$

L : longueur du canal $1,4 \text{ m}$

d'où :

$$T_{\text{cmoy}} = \frac{T_{ce} + T_{cs}}{2} = \frac{69,2 + 58,2}{2} = 63,70^\circ \text{C}$$

$$V = \frac{q}{S} = \frac{0,28 \times 4}{3600 \times \pi \times \phi^2} = \frac{0,28 \times 4}{3600 \times \pi \times 0,014^2} = 0,505 \text{ m/s}$$

A partir de la table des caractéristiques de l'eau, pour $T_{\text{cmoy}} = 64^\circ$, on a les valeurs de la capacité thermique massique C_p , la masse volumique ρ , la viscosité cinématique ν , la conduction thermique λ (pour plus de précision, on interpole linéairement entre deux valeurs consécutives de la table)

$$C_p = 4180,46 \text{ J/kg.K}$$

$$\rho = 981,13 \text{ kg/m}^3$$

$$\nu = 0,471 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$$

$$\lambda = 0,644 \text{ W/m.K}$$

calcul des différents nombres :

rappel : $\nu = \frac{\eta}{\rho}$

$$Re = \frac{\rho V D_h}{\eta} = \frac{V D_h}{\nu} = \frac{0,505 \times 0,014}{0,471 \times 10^{-6}} = 15010$$

$$Nu = \frac{h D_h}{\lambda} = \frac{h \times 0,014}{0,644} = 0,0217 \times h$$

$$Pr = \frac{\eta C_p}{\lambda} = \frac{0,471 \times 10^{-6} \times 981,13 \times 4180,46}{0,644} = 3$$

On se trouve donc en régime turbulent puisque : $Re = 24472 > 10000$

on remplit aussi la condition : $0,5 < Pr < 500$

On applique donc la corrélation de convection suivante (M.ADAMS):

$Nu = 0,023 \cdot Pr^{1/3} \cdot Re^{0,8} \cdot \left(\frac{\eta}{\eta_p}\right)^{0,14} \cdot \left(1 + \left(\frac{D_h}{L}\right)^{0,7}\right)$ l'eau étant bon conducteur de la chaleur, on estimera le rapport $\frac{\eta}{\eta_p}$ égal à 1

$$\Leftrightarrow 0,0217 \times h = 0,023 \times 3^{1/3} \times 15010^{0,8} \times (1)^{0,14} \times \left(1 + \left(\frac{0,014}{1,4}\right)^{0,7}\right) \Leftrightarrow h = 3486 \text{ W / m}^2 \text{ K}$$

conduction dans le tube intérieur de l'échangeur :

$$h = \frac{2 \lambda}{D_2 \ln \frac{D_2}{D_1}}$$

exprimé par rapport au diamètre extérieur du tube

avec :

$D_1 = 0,014 \text{ m}$
 $D_2 = 0,0172 \text{ m}$
 $\lambda = 16 \text{ W/m.K}$ (valeur pour l'inox)
 $e = 0,0016 \text{ m}$

d'où :

$$h = \frac{2 \times 16}{0,0172 \ln \left(\frac{0,0172}{0,014}\right)} = 9037,87 \text{ W / m}^2 \text{ K}$$

convection forcée entre le tube intérieur et l'eau :

On utilise la corrélation de convection indiquée dans la partie théorique du manuel.

Les caractéristiques du fluide sont prises à la température moyenne entre l'entrée et la sortie (y compris pour la viscosité qui varie peu dans le cas de l'eau), soit le point de fonctionnement choisi :

$T_{fe} = 18,5^\circ$
 $T_{fs} = 29,4^\circ$
 $q = 0,28 \text{ m}^3/\text{h}$

Les dimensions caractéristiques sont les suivantes :

Tube extérieur : $\varnothing 26,9 \text{ mm}$ ép : 1,6 mm
 Tube intérieur : $\varnothing 17,2 \text{ mm}$ ép : 1,6 mm

$$D_h = 2(R_2 - R_1) = 2 \times \left(\frac{23,7}{2} - \frac{17,2}{2}\right) = 6,5 \text{ mm} = 0,0065 \text{ m}$$

L : longueur du canal 1,4m

d'où :

$$T_{f\text{moy}} = \frac{T_{fe} + T_{fs}}{2} = \frac{18,5 + 29,4}{2} = 23,95 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$V = \frac{q}{S} = \frac{0,28 \times 4}{3600 \times \pi \times (D_2^2 - D_1^2)} = \frac{0,28 \times 4}{3600 \times \pi \times (0,0237^2 - 0,0172^2)} = 0,372 \text{ m/s}$$

A partir de la table des caractéristiques de l'eau, pour $T_{\text{moy}}=24^\circ$ on a les valeurs de la capacité thermique massique C_p , la masse volumique ρ , la viscosité cinématique ν , la conduction thermique λ (pour plus de précision, on peut interpoler linéairement entre deux valeurs consécutives de la table)

$$C_p = 4174,19 \text{ J/kg.K}$$

$$\rho = 997,32 \text{ kg/m}^3$$

$$\nu = 0,917 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$$

$$\lambda = 0,604 \text{ W/m.K}$$

Calcul des différents nombres :

$$\text{rappel : } \nu = \frac{\eta}{\rho}$$

$$Re = \frac{\rho V D_h}{\eta} = \frac{V D_h}{\nu} = \frac{0,372 \times 0,0065}{0,917 \times 10^{-6}} = 2636$$

$$Pr = \frac{\eta C_p}{\lambda} = \frac{0,917 \times 10^{-6} \times 997,32 \times 4174,19}{0,604} = 6,32$$

$$Ma = St = \frac{h}{\rho V C_p} = \frac{h}{997,32 \times 0,372 \times 4184,89} = \frac{h}{1552607}$$

On se trouve donc en régime turbulent puisque : $Re = 2636 > 2000$

On remplit aussi la condition : $Pr = 6,32 > 0,7$

On applique la corrélation de convection suivante :

$$St = 0,023 \cdot \left(\frac{R_2}{R_1} \right)^{0,14} Re^{-0,2} Pr^{-0,6}$$

L'eau étant bonne conductrice de la chaleur, on estimera le rapport $\frac{\eta}{\eta_p}$ égal à 1

$$\frac{h}{1552607} = 0,023 \cdot \left(\frac{0,01185}{0,0086} \right)^{0,14} 2636^{-0,2} 6,32^{-0,6}$$

$$\Leftrightarrow \frac{h}{1552607} = 0,00164 \quad \Leftrightarrow h = 2556,59 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$$

coefficient d'échange global :

$$\frac{1}{k} = \frac{1}{h_c D_1} + \frac{D_2 \ln \frac{D_2}{D_1}}{2\lambda} + \frac{1}{h_f} = \frac{1}{3486,3} + \frac{0,0172}{0,0140} + \frac{1}{9037,87} + \frac{1}{2556,59} = 0,000854 \quad \Leftrightarrow k = 1171 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$$

d) Observations

La valeur théorique calculée du coefficient d'échange global de k (1171 W/m^2) est proche de la valeur mesurée ($1092 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$). Les corrélations de convection utilisées semblent bien adaptées à notre cas pratique.

Ceci s'explique aussi par le fait que nous avons effectué le calcul en ayant la connaissance des températures du fluide (valeurs obtenues par l'essai expérimental) ce qui nous a permis d'ajuster au mieux les valeurs des constantes du fluide. Dans le cas d'un calcul théorique pur, le calcul sera fait, par exemple, à partir des valeurs des températures du fluide en entrée.

Ces corrélations ne donneraient peut-être pas un aussi bon résultat dans d'autres cas de fonctionnement (cas laminaire par exemple).

Notre cas d'étude est simple, dans le cas d'échangeur ayant une géométrie et des écoulements plus complexes, il est parfois difficile de trouver la relation de convection adaptée au matériel (il s'agit de relations empiriques expérimentales).

 e) Comparaison des puissances transmises dans les échangeurs

Des essais expérimentaux, nous pouvons tirer le tableau comparatif suivant :

Débit eau chaude/ Débit eau froide	PUISSANCE MOYENNE (W)		% de puissance supplémentaire pour l'échangeur à plaques
	Echangeur à tubes concentriques	Echangeur à plaques	
160/400	2989	5206	+74%
40/160	1034	1536	+48%
280/280	3518	5201	+48%

(on aurait pu comparer les efficacités)

Les résultats ci-dessus sont significatifs et témoignent bien des performances de l'échangeur à plaques. Ce qui explique leur omniprésence surtout dans les applications de chauffage à eau chaude (eau / eau) où les pressions et les températures sont limitées ($<200^\circ\text{C}$ et $<20\text{bar}$).

V ANNEXES

Extraits sous forme papier
Documentation complète sur CD

Schéma électrique
Plan de l'échangeur à tubes concentriques
Feuille de résultats vierge
Table des caractéristiques thermodynamiques de l'eau

Brochure commerciale indicateur ASCON
Brochure commerciale régulateur ASCON
Débitmètre à flotteur BROOKS
Débitmètre TECFLUID manuel d'instructions
Débitmètre à flotteur TECFLUID
Détecteur de niveau
Isolant ISOTUBE
Manuel indicateur
Manuel régulateur
PYRO CONTROLE catalogue
Raccords rapides STAUBLI
Relais statique CELDUC
Sondes de température
Thermostat