

## **Chapitre II : Fluide caloporteur et échangeurs**

### **II. Fluide caloporteur et échangeurs**

#### **II.1. Fluide caloporteur :**

De très nombreuses activités industrielles nécessitent le chauffage d'un produit à une température supérieure à la température ambiante. Différents modes de chauffage peuvent être identifiés [6]:

- le produit est chauffé directement par des gaz de combustion (fuel, gaz naturel), par des résistances électriques, par un chauffage inductif ou à micro-ondes.
- le produit est chauffé indirectement. Un circuit intermédiaire est, dans ce cas, disposé entre l'équipement thermique.

Le fluide circulant dans ce circuit intermédiaire peut jouer plusieurs rôles. Lorsque ce fluide effectue un simple transport de la chaleur, on le dit « caloporteur ».

Ainsi, le fluide caloporteur effectue un simple transport de la chaleur entre deux niveaux de température. Il est donc capable :

- d'emmagasiner l'énergie produite par une source de chaleur sous forme généralement de chaleur sensible (chauffage du fluide), mais également de chaleur latente (grâce à l'évaporation du fluide, comme cela est le cas en particulier dans un tube caloduc (BE 9545))
- de transmettre l'énergie thermique par contact direct avec le produit comme dans un four de cuisson ou par contact indirect grâce à un échangeur comme dans grand nombre de procédés industriels tels que les centrales électriques avec générateur de vapeur.
- de véhiculer cette énergie jusqu'à son point d'utilisation par circulation naturelle.
- **Exemples d'utilisation**

De nombreux exemples du domaine de la production d'énergie électrique peuvent illustrer l'utilisation de fluides caloporteurs : – dans un réacteur nucléaire de type PWR (Pressurized Water Reactor), la chaleur dégagée dans la grappe de crayons combustibles est évacuée grâce

à un circuit d'eau pressurisée (ce fluide est alors désigné comme fluide caloporteur), puis transférée au fluide du circuit secondaire grâce à un générateur de vapeur. Ce fluide secondaire est vaporisé et détendu dans une turbine pour la production de l'énergie électrique. Le fluide secondaire (de l'eau, dans le cas des PWR) joue alors le rôle de fluide énergétique ; – dans une centrale thermique solaire, le fluide caloporteur [généralement une huile thermique mais, dans quelques cas, des sels fondus (centrale Themis, par exemple)], porté à une température proche de 300 °C dans le capteur solaire (collecteur parabolique, par exemple), transmet la chaleur – au travers d'un générateur de vapeur – au fluide secondaire (de l'eau, dans ce cas). Ce fluide secondaire est vaporisé puis détendu pour permettre la production de travail mécanique et d'énergie électrique. Ce fluide joue également le rôle de fluide énergétique ; – l'usage de caloporteurs de type « métaux liquides » a été largement étudié pour les réacteurs nucléaires à neutrons rapides alors que les caloporteurs à sels fondus ont été utilisés dans certaines centrales solaires haute température ; – dans une centrale thermique, les gaz de combustion à des températures proches de 1 000 °C permettent la vaporisation – au travers des échangeurs récupérateurs – du fluide énergétique (également de l'eau) qui, après détente, permettra la production d'énergie mécanique et électrique. Dans ce cas particulier, il n'est pas fait usage de fluide caloporteur. De nombreux autres exemples relevant de la thermique industrielle peuvent illustrer aussi la diversité des fluides caloporteurs : – dans nombre de fours de cuisson (en particulier dans les applications alimentaires), l'air est chauffé au contact de résistances chauffantes, mis en mouvement grâce à un ventilateur puis mis en contact avec les produits alimentaires. L'air joue le rôle de fluide caloporteur ; Certaines applications très spécifiques, caractérisées par de très hautes températures de fonctionnement, peuvent faire appel à des métaux liquides ou des sels fondus comme fluides caloporteurs.

### **II.1.1. Principaux fluide caloporteurs**

- Les fluides caloporteurs les plus courants sont, bien entendu, l'eau et l'air, de par leur provenance naturelle et leur quantité illimitée. L'air, comme tous les gaz, peut être utilisé à toutes températures, mais son emploi est limité par un coefficient de transmission thermique médiocre. L'eau en phase liquide ou vapeur est un fluide caloporteur courant dans l'emploi est fortement handicapée par sa pression du vapeur

- (15 bar à 200°C). eau et air présentent les atouts de forte stabilité, faible coût, grande sûreté d'utilisation (inflammabilité, non toxicité)
- Les fluides organiques possèdent une faible pression de vapeur et une température de congélation basse (toluène)
- Les sels fondus et les métaux liquides sont réservés aux hautes températures et leur utilisation nécessite des grandes précautions en termes de sécurité et de corrosion.

Fluide	Domaine usuel de température d'utilisation (°C)
Gaz (air, CO <sub>2</sub> , He...)	Ambiant à 1 000
Vapeur d'eau	100 à 600
Eau	Ambiant à 200
Fluides organiques	Ambiant à 350
Sels fondus	150 à 500
Métaux liquides	200 à 700

**Tableau II.1** : Température d'utilisation des fluides caloporteurs

## II.2. Echangeur thermique

Les échangeurs de chaleur : Sont des dispositifs qui assurent l'échange de chaleur entre deux fluides à des températures différentes sans qu'ils soient mélangés [7, 8].

Au sein d'un échangeur de chaleur on peut trouver les modes d'échange suivants :

- Conduction : c'est la propagation de la chaleur dans la matière, sans transfert de masse. À travers les solides, la conduction assure un bon transfert de chaleur.
- Convection : ce mode de transfert de chaleur apparaît entre deux phases dont l'une au moins est mobile, en présence d'une différence de température. Le mouvement des phases peut être provoqué par des différences de densité dans le fluide, le transfert de chaleur est dit de convection naturelle ou libre. Le mouvement peut être provoqué par une dégradation d'énergie mécanique, le transfert de chaleur est dit de convection forcée. Cette dernière est essentielle pour ces appareils (échangeurs).

- Rayonnement : c'est l'émission d'énergie par les surfaces des corps sous forme de radiation. Elle correspond à un échange de chaleur par l'intermédiaires d'une onde de nature électromagnétique et qui ne nécessite aucun support matériel (cas du vide, certains gaz plus ou moins transparent et de certains solide).

Donc, le transfert de chaleur qui a lieu au sein d'un échangeur fait intervenir le mode convectif dans chacun des deux fluides et le mode conductif à travers la paroi qui les séparent. Généralement, le rayonnement est faible et sera négligé.

En général, Il existe trois classes d'échangeurs de chaleurs :

1. Échangeurs à transferts directs,
2. Échangeurs de stockage thermique,
3. Échangeurs à contacts directs.

### **II.2.1. Principe général**

Le principe est de faire circuler deux fluides à travers des conduits qui les mettent en contact thermique. Ces fluides sont mis en contact thermique à travers une paroi métallique ce qui favorise les échanges de chaleur. En général, le fluide chaud cède de la chaleur au fluide froid.

Le principal problème consiste à définir une surface d'échange suffisante entre les deux fluides pour transférer la quantité de chaleur nécessaire dans une configuration donnée. La quantité de chaleur transférée ne dépend pas seulement de la surface d'échange entre les deux fluides mais aussi de nombreux autres paramètres.

Les flux de chaleurs transférées dépendent aussi :

- des températures d'entrée,
- des caractéristiques thermiques des fluides (chaleurs spécifiques, conductivité thermique),
- des coefficients d'échange par convection.

## II.2.2. Configurations géométriques

### ➤ Échangeurs tubulaires coaxiaux (simple)

Un des fluides circule dans l'espace annulaire entre les deux tubes tandis que l'autre circule dans le tube central. Pour cette configuration, deux types de fonctionnements sont distingués : les deux fluides circulent dans le même sens ou en sens opposé. Le premier est un échangeur co-courant (ou courant- parallèle). Dans le deuxième cas, c'est un échangeur contre-courant. Ce type d'échangeur est souvent rencontré dans l'industrie frigorifique en particulier pour les condenseurs à eau ou dans les groupes de production d'eau glacée.

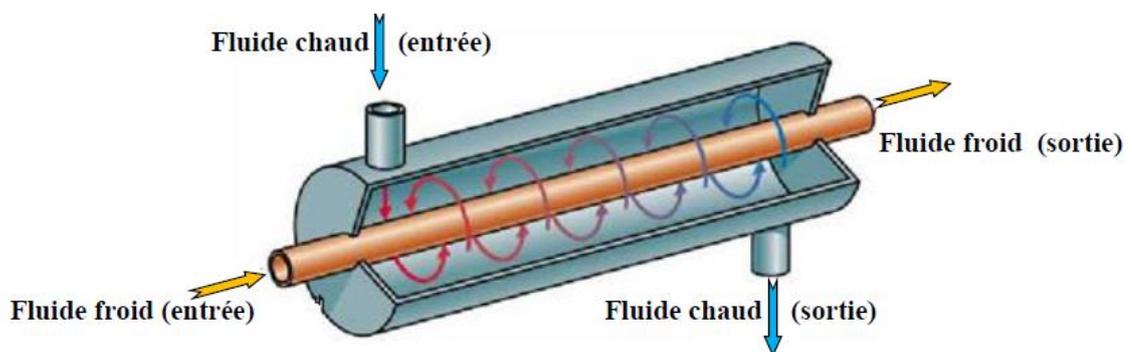
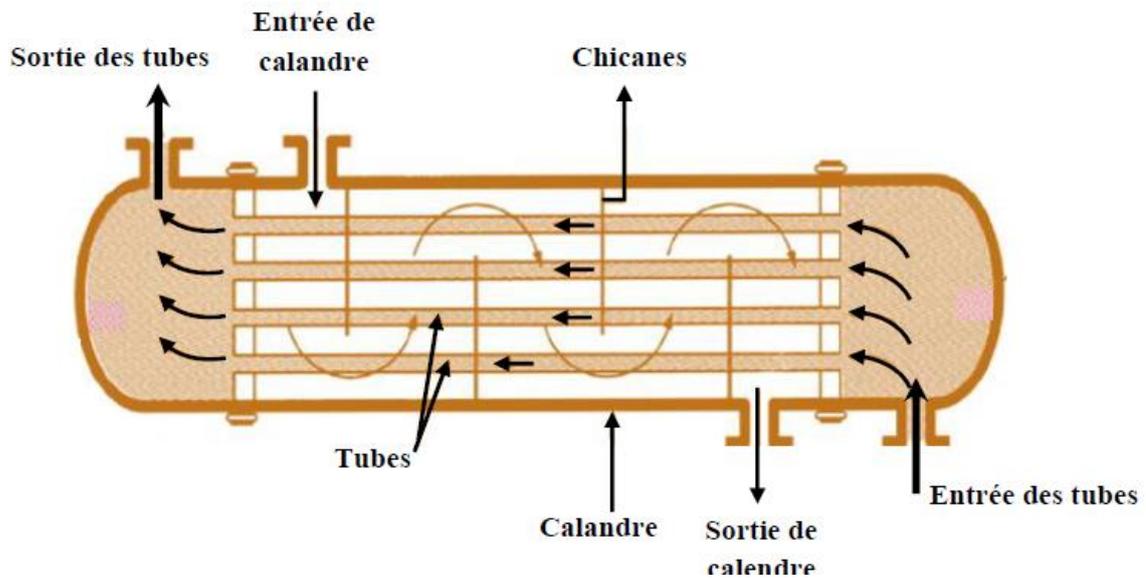


Figure II.1: Echangeur tubulaire simple

### ➤ Échangeurs Tubes/Calandre (à faisceaux complexes)

Dans ce type d'échangeurs, l'un des fluides circule dans le calandre autour de tubes qui le franchissent tandis que l'autre fluide circule à l'intérieur des tubes. Souvent, il est constitué d'un faisceau de tubes traversant un réservoir de manière longitudinale, appelé **échangeur multitubulaire**.

La circulation du fluide à travers les tubes est forcée par l'emplacement des parois, de manière à ce qu'il effectue un ou plusieurs aller-retours.

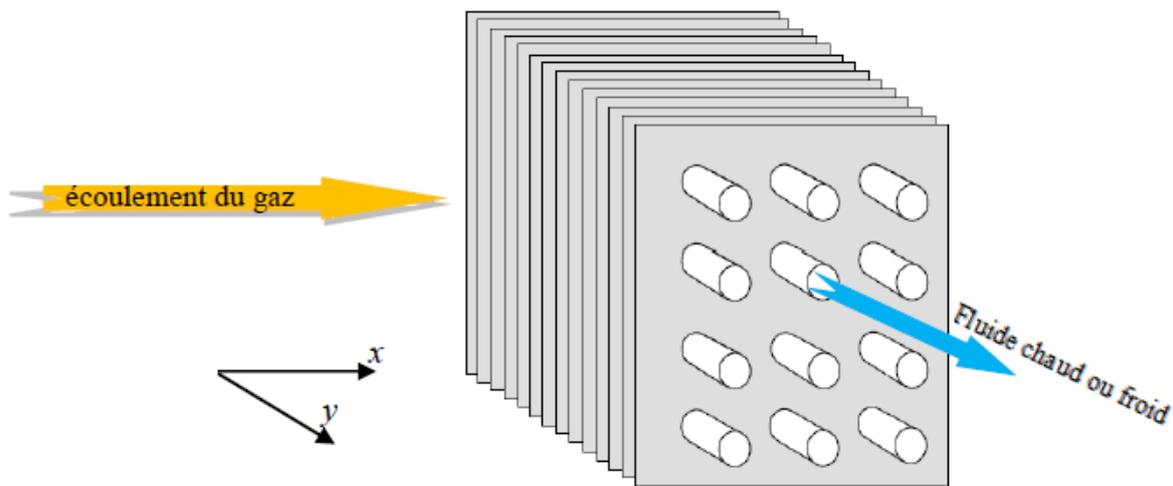


**Figure II.2:** Echangeur multitubulaire.

Ces échangeurs sont constitués soit d'un tube unique (serpentin), soit d'un faisceau de tubes branchés en parallèle enfermés dans une enveloppe appelée calandre.

➤ **Échangeurs à courants croisés**

Dans ce type d'échangeurs, une circulation de l'un des fluides dans une série de tubes alors que l'autre circule perpendiculairement autour des tubes. Généralement, c'est le liquide qui circule dans les tubes et le gaz à l'entour. Les tubes munis d'ailettes permettent un bon transfert de chaleur échangée en augmentant la surface d'échange. Le radiateur de refroidissement des véhicules à moteur est un exemple de cet échangeur.

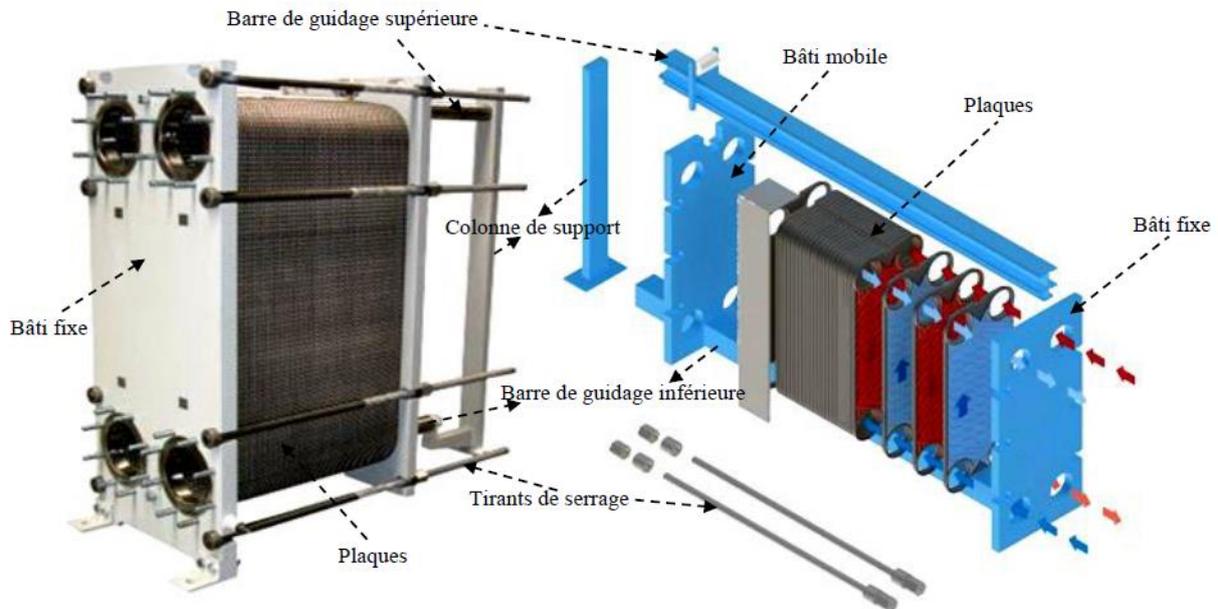


**Figure II.3 :** Echangeur à courants croisés

➤ **Échangeurs à plaques**

Ce type d'échangeurs est constitué de plaques assemblées de façon que le fluide puisse circuler entre elles. Un jeu de joints assure la distribution des fluides entre les plaques de telle sorte que chacun des deux fluides soit envoyé alternativement entre deux espaces inter plaques successifs.

Un échange thermique des fluides s'effectue à travers les plaques. La compacité avantage ce type d'échangeur. Ce dispositif permet une grande surface d'échange dans un volume limité. Donc, son utilité apparait clairement lors des grandes puissances.



**Figure II.4** : Echangeur à plaques

### II.2.3. Étude d'un échangeur

Pour le refroidissement ou le chauffage des fluides, certains procédés nécessitent l'utilisation des fluides caloporteurs ou frigoporteurs intermédiaires.

Les paramètres nécessaires au dimensionnement d'un échangeur sont :

- La surface d'échange (surfaces des plaques, surface intérieure des tubes concentriques...) : **S en m<sup>2</sup>**

- Des caractéristiques de l'appareil (conductivité thermique, épaisseur des plaques) et du fluide

(viscosité, régime laminaire ou turbulent,...) qui déterminent le coefficient global d'échange thermique **K en W/(m<sup>2</sup>.°C) ou en W/(m<sup>2</sup>.°K).**

- L'écart de température d'une part et de la surface d'échange d'autre part, on utilise la moyenne logarithmique des écarts de température entre les extrémités de l'échangeur, notée  **$\Delta T$  (°C)**

#### ❖ Notations

Dans ce qui suit on utilise les hypothèses suivantes :

- Le régime est permanent : tous les paramètres et les variables sont constants dans le temps,

- L'échangeur est adiabatique,

- Les propriétés thermo-physiques des fluides restent constantes dans les intervalles de

températures envisagées,

- Les températures sont monodimensionnelles et ne varient que dans une direction de l'écoulement,
- Pas de pertes de pression (charge) au cours de l'écoulement.

➤ **Coefficient global d'échange thermique,  $K$**

Déterminer un coefficient global de l'échange thermique,  $K$  constitue l'un des aspects incertains d'échangeur thermique. Cela provient de la dégradation continue de l'échangeur. Il est défini par la relation suivante :

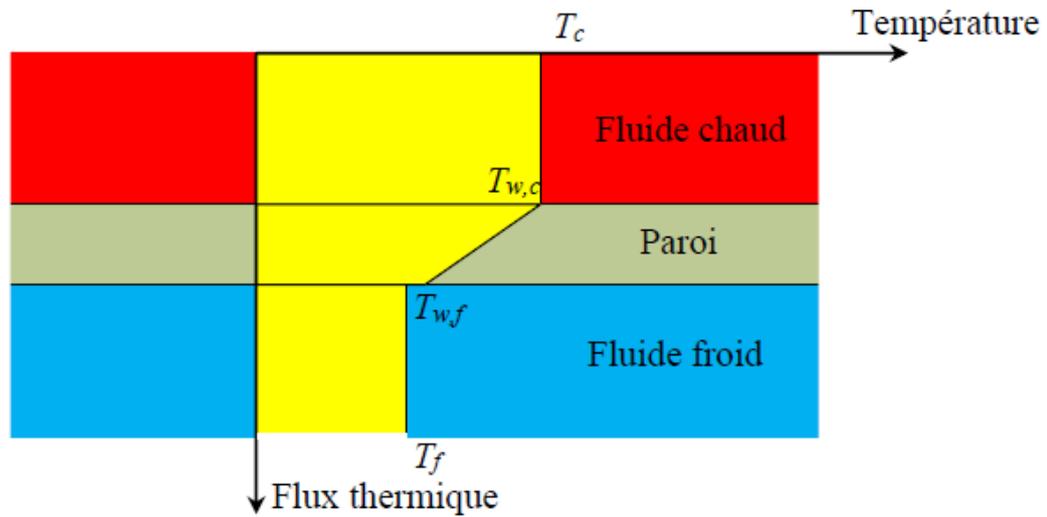
La performance d'un échangeur de chaleur est évaluée principalement par sa conductance thermique globale. Cette dernière peut être calculée en se basant sur la géométrie, les propriétés de la paroi et les propriétés des deux fluides chaud et froid, les conditions de son fonctionnement (débits massiques et températures d'entrées des deux fluides).

La démarche de calcul est simple, mais elle est nécessaire. Elle permet aux étudiants de se familiariser aux calculs des échangeurs de chaleur.

$$d\phi = K(T_c - T_f)dS$$

Dans un échangeur de chaleur, le transfert de chaleur du fluide chaud au fluide froid provient essentiellement de ces phénomènes :

- Convection entre le fluide chaud et la face externe de la paroi solide,
- Conduction à travers cette paroi solide,
- Convection entre la face interne de la paroi solide et le fluide froid.



**Figure II.5:** Le profil de température à travers un élément de surface  $dS$ .

La résistance thermique convective du fluide chaud est  $1/h_c S$  ( $h_c$  est le coefficient de convection du fluide chaud)

La résistance thermique convective du fluide froid est:  $1/h_f S$  ( $h_f$  est le coefficient de convection du fluide froid)

La résistance thermique de conduction à travers la paroi solide d'épaisseur  $e$  et de conductivité thermique  $\lambda$  est  $e/\lambda S$

L'expression de flux thermique transféré du fluide chaud au fluide froid est :

$$\phi = \frac{T_c - T_f}{\frac{1}{h_c S} + \frac{e}{\lambda S} + \frac{1}{h_f S}}$$

Ainsi on a:

$$\phi = KS(T_c - T_f) \Rightarrow K = \frac{1}{\frac{1}{h_c} + \frac{e}{\lambda} + \frac{1}{h_f}}$$

➤ **Résistances d'encrassement,  $R$**

L'encrassement est l'accumulation de matériaux non désirés sur des surfaces solides au détriment de la fonction. La couche de dépôts représente une résistance supplémentaire au transfert de chaleur et provoque une diminution du taux de transfert de chaleur dans un échangeur de chaleur. En conséquence, l'encrassement dans les échangeurs de chaleur réduit l'efficacité thermique, diminue le flux de chaleur, augmente la température du côté chaud, diminue la température du côté froid, induit une corrosion sous le dépôt, augmente l'utilisation de l'eau de refroidissement. L'effet net de ces accumulations sur le transfert de chaleur est représenté par un facteur d'encrassement,  $R_f$ , qui mesure la résistance thermique globale introduite par l'encrassement.

Les valeurs des résistances d'encrassement (Tableau II.2) sont déduites par des mesures comparatives entre les conditions de mise en service, puis le fonctionnement au cours du temps. Ces valeurs varient dans la gamme :  $1 \times 10^{-4} - 70 \times 10^{-4} (m^2 \cdot ^\circ C) / W$

Fluides	Valeurs moyennes de $\ddot{R}$ [ $m^2 \cdot ^\circ C / W$ ]
Eau de mer à $T < 50^\circ C$	$9 \cdot 10^{-5}$
Eau de mer à $T > 50^\circ C$	$2 \cdot 10^{-4}$
Eau de ville à $T < 50^\circ C$	$2 \cdot 10^{-4}$
Eau de ville à $T > 50^\circ C$	$3.5 \cdot 10^{-4}$
Eau de rivière	$3.5 \text{ à } 7 \cdot 10^{-4}$
Vapeur d'eau non grasse	$9 \cdot 10^{-5}$
Vapeur d'eau grasse	$2 \cdot 10^{-4}$
Liquides réfrigérants	$1.8 \text{ à } 2 \cdot 10^{-4}$
Fioul	$4 \text{ à } 9 \cdot 10^{-4}$
Essence, kérosène, gas-oil	$2 \cdot 10^{-4}$
Huile de lubrification	$1.8 \cdot 10^{-4}$
Air non dépoussiéré	$3.5 \cdot 10^{-4}$
Air industrielle	$4 \cdot 10^{-4}$
Produits de combustion gazeux	$20 \text{ à } 70 \cdot 10^{-4}$
Vapeurs d'Alcool	$9 \cdot 10^{-5}$

**Tableau II.2** : Valeurs de la résistance d'encrassement

➤ **Méthode DTLM (Moyenne logarithmique de la température)**

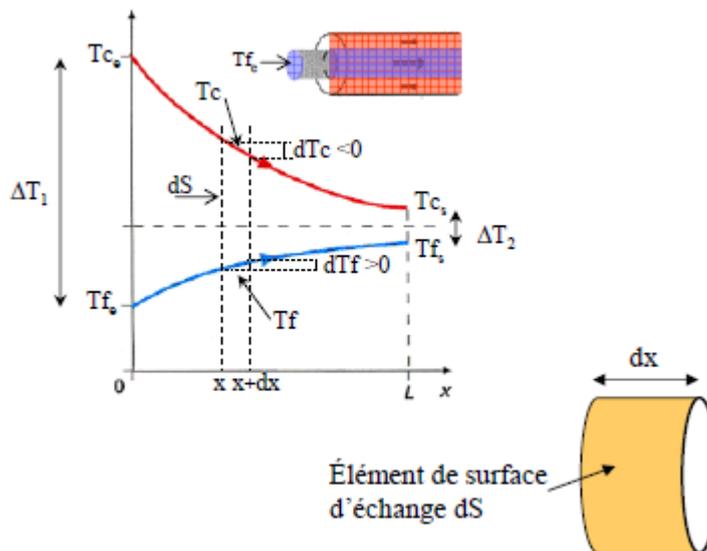
Il existe deux principaux types d'échangeurs tubulaires: l'échangeur à co-courant et l'échangeur à contre courant.

La minimisation de la surface d'échange et la perte de charge pour une puissance d'échange thermique donnée est l'objectif principal.

• **Echangeur à co-courant**

Si  $T_c$  et  $T_f$  sont les températures des deux fluides au droit de l'élément  $dS$  de la surface d'échange. Le flux thermique  $d\phi$  échangé entre les deux fluides à travers  $dS$  peut s'écrire:

$$d\phi = K(T_c - T_f)dS \tag{1}$$



**Figure II.6** : La variation de la température dans le cas à co-courant

**Hypothèse** : échangeur sans pertes, c'est-à-dire un échangeur dans lequel la chaleur cédée par le fluide chaud est intégralement transmise au fluide froid.

Dans ces conditions, le flux de chaleur  $d\phi$  transmis du fluide chaud au fluide froid à travers l'élément  $dS$  s'écrira, dans le cas de l'échangeur à courants parallèles

$$d\phi = -\dot{m}_c C_{pc} dT_c = \dot{m}_f C_{pf} dT_f \quad (2)$$

Avec,

$\dot{m}_c$  et  $\dot{m}_f$  sont les débits massiques respectifs des fluides chauds et froids, en kg/s.

$C_{pc}$  et  $C_{pf}$  sont leurs chaleurs massiques à pression constante, en J/(kg.°C).

$$(2) \Rightarrow d(T_c - T_f) = -d\phi \left( \frac{1}{\dot{m}_c C_{pc}} + \frac{1}{\dot{m}_f C_{pf}} \right)$$

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

Si le long de l'échangeur  $K = \text{Cte}$

L'expression d'où on tire finalement la puissance thermique totale échangée :

$$\phi = KS \frac{(T_{c,s} - T_{f,s}) - (T_{c,e} - T_{f,e})}{\ln \frac{T_{c,s} - T_{f,s}}{T_{c,e} - T_{f,e}}}$$

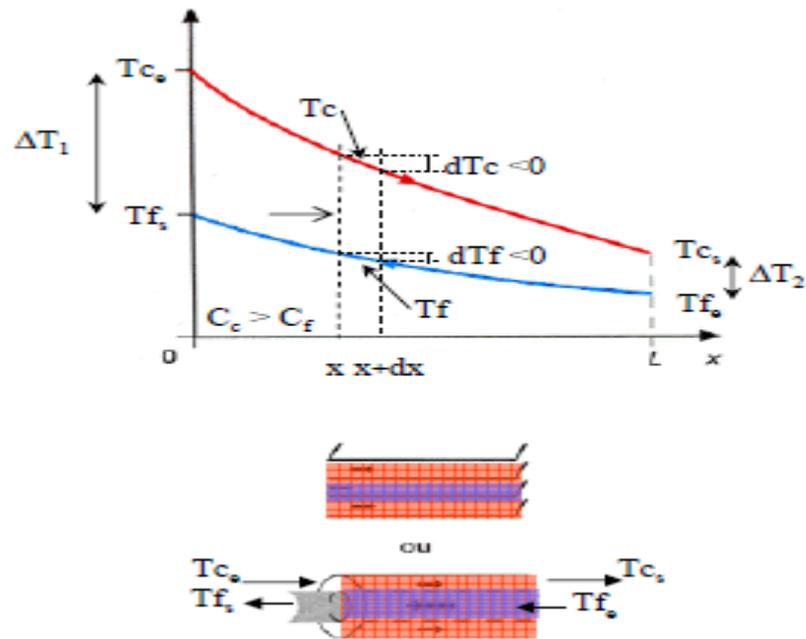
- **Echangeur à contre courant**

La variation de température  $dT_f$  du fluide froid quand on augmente la surface d'échange de  $dS$ , devient négative. Dans ces conditions, les relations (2) doivent s'écrire :

$$d\phi = -\dot{m}_c C_{p,c} dT_c = -\dot{m}_f C_{p,f} dT_f$$

La puissance thermique totale échangée :

$$\phi = KS \frac{(T_{c,e} - T_{f,s}) - (T_{c,s} - T_{f,e})}{\ln \frac{T_{c,e} - T_{f,s}}{T_{c,s} - T_{f,e}}}$$



**Figure II.7 :** Les variations de températures le cas à contre-courant