

4- Récupérateurs de chaleur

4.1- Introduction

Etant donné que tous les processus industriels utilisent partiellement la chaleur dans leurs installations, une partie importante de cette dernière se trouve perdue. Les fumées des chaudières des installations de chauffage sortent à des températures souvent comprises entre 100 et 250 °C, l'air de ventilation rejeté à 20 °C et les eaux usées à 20 ou 30 °C contiennent encore de l'énergie qui est manifestement perdue.

La récupération de chaleur a pour but de rendre de nouveau utilisable ces quantités d'énergies "perdues". Elle consiste soit à réinjecter ces dernières dans le même procédé qui les a dégagé, soit à la réutiliser dans d'autres procédés. Cette opération nécessite l'adjonction d'échangeurs accompagnés d'organes supplémentaires tels que les pompes ou les ventilateurs.

Cette récupération de chaleur ne pourra, bien sûr, être rentable que si l'économie d'énergie réalisée est supérieure aux frais d'investissement additionnés aux dépenses supplémentaires (maintenance et entretien). Aussi, faut-il noter que cette récupération ne sera toujours que partielle et la fraction récupérée dépendra de la qualité du système adopté et du niveau potentiel de la source d'énergie dont on dispose sans nuire au rendement de l'installation produisant ces pertes thermiques.

4.2- Différentes sources de chaleur

Les sources de chaleur les plus utilisées en récupération sont:

- ◆ L'air vicié (traitement de l'air).
- ◆ L'eau des nappes phréatiques.
- ◆ Les eaux usées.
- ◆ Les eaux de refroidissement (des moteurs thermiques, des condenseurs, des équipements frigorifiques,...etc).

- ◆ Les gaz de combustion produits par les chaudières, les turbines à gaz, les moteurs à combustion et à gaz...etc.

4.3- Notions sur les échangeurs de chaleur

Un échangeur de chaleur est un appareil destiné à transmettre la chaleur d'un fluide à un autre. Dans les échangeurs les plus courants, les deux fluides sont séparés par une paroi au travers de laquelle les échanges se font par conduction ensuite par convection entre cette paroi et le fluide qui circule. Le rayonnement n'intervient de manière sensible que s'il existe des différences de température très importantes entre un fluide semi-transparent et la paroi. C'est pour cela que dans de nombreux cas pratiques le transfert de chaleur par rayonnement est négligé devant les autres modes de transfert.

Dans certains appareils, l'échange de chaleur est associé à un changement de phase de l'un des fluides (cas des condenseurs, évaporateurs, bouilleurs, tours de refroidissement,...etc). Dans ce paragraphe, nous nous intéresserons seulement aux échangeurs à fluides séparés (ce qui exclut donc les échangeurs dits "à *contact direct*") et sans changement de phase.

4.3.1- Principaux types d'échangeurs

Les principaux types qui dominent les échangeurs à fluides séparés sont les échangeurs tubulaires et les échangeurs à plaques.

4.3.1.1- Echangeurs tubulaires

Ils sont constitués de tubes dont la paroi forme la surface d'échange. Ils comportent soit un tube unique (serpentin) (Fig.4.1), soit deux tubes coaxiaux (échangeurs *bitubes*) (Fig.4.2), soit un *faisceau* de tubes enfermés dans une enveloppe appelée *calandre* (Fig.4.3).

Les échangeurs à faisceau de tubes et calandre sont utilisés principalement en deux dispositions: faisceau rectiligne (Fig.4.3) et faisceau en U (Fig.4.4). Ce dernier est mieux adapté aux forts gradients de température puisqu'il permet une libre dilatation des tubes. L'implantation des chicanes transversales permet d'allonger le trajet du fluide en calandre et d'augmenter l'échange de chaleur.

Il n'y a pas de règle pratique pour fixer la disposition relative des circuits chaud et froid. On fera plutôt circuler le fluide chaud dans les tubes si on veut limiter les déperditions thermiques; de même la circulation en tubes sera recommandée s'il s'agit d'un fluide agressif.

Le principal avantage des échangeurs tubulaires par rapport aux échangeurs à plaques est de traiter des produits plus visqueux. Par contre, ces appareils sont nettement plus encombrants.

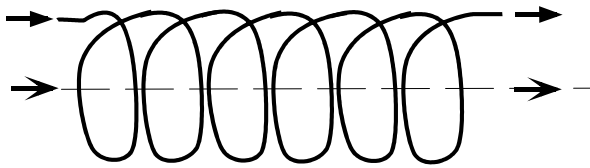


Fig.4.1- Echangeur à tube unique.

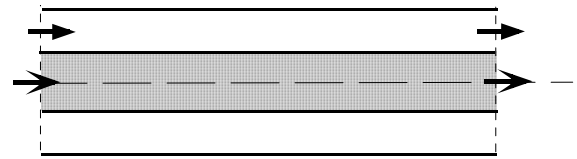


Fig.4.2- Echangeur bi-tubes.

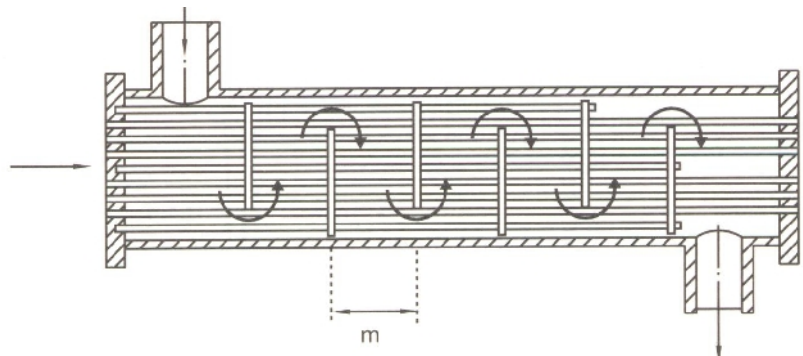


Fig.4.3- Echangeur tubulaire à chicanes.

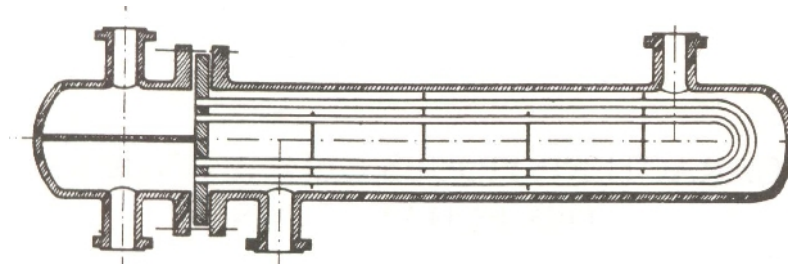


Fig.4.4- Echangeur tubulaire à faisceau en U.

4.3.1.2- Echangeurs à plaques

Ils sont les plus fréquemment utilisés et sont constitués par un empilement de plaques garnies de joints d'étanchéité à leur périphérie; les fluides s'écoulent entre ces plaques dans des canaux plats où la circulation peut être soit diagonale soit latérale. Il y a évidemment alternance du fluide froid et du fluide chaud d'un canal au suivant (Fig.4.5). Globalement, la distribution des fluides entre les différents canaux se fait en U, en Z ou selon un schéma multipasse.

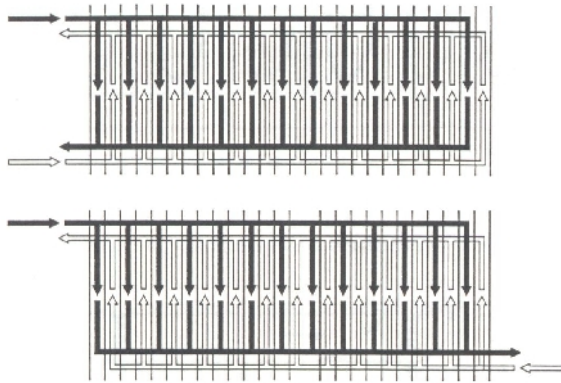


Fig.4.5- Distribution monopasses dans un échangeur à plaques.

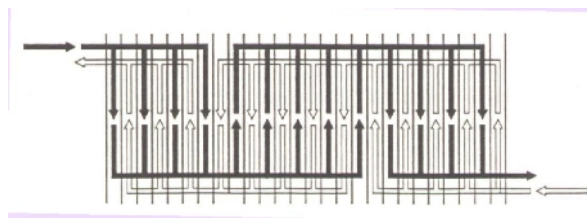


Fig.4.6- Echangeur à plaques : distribution à 3 passes sur chaque fluide.

4.3.2- Disposition des écoulements

Les modes de circulation des fluides sont classés en deux grandes catégories:

- ◆ Les vecteurs vitesses sont parallèles :
 - S'ils sont de même sens, on dira que c'est un échangeur à « *co-courant* » ;
 - S'ils sont de sens contraire, on dira que c'est un échangeur à « *contre-courant* » .
- ◆ Les vecteurs vitesses sont perpendiculaires : on dira que c'est un échangeur à « *courants croisés* ». Dans ce cas, l'un des fluides peut être « *brassé* » (ou mélangé) c'est-à-dire que sa veine est subdivisée en un certain nombre de chemins qui s'entrecroisent. Ce brassage a pour effet d'homogénéiser les températures et d'augmenter la turbulence et de ce fait le transfert de chaleur par l'intermédiaire du coefficient de convection.

4.3.3- Distributions de température

Le calcul des températures des fluides le long de l'échangeur est possible moyennant quelques hypothèses simplificatrices:

- Le régime est stationnaire.
- Le coefficient d'échange est identique en tout point de l'échangeur.
- Les pertes vers l'extérieur sont négligées.
- Pas de changement de phase des deux fluides.

Ce calcul étant assez fastidieux et dans le but de ne pas alourdir inutilement le document, nous en donnerons directement la solution pour deux cas particuliers : l'échangeur co-courant et l'échangeur contre-courant (Fig.4.7 et 4.8).

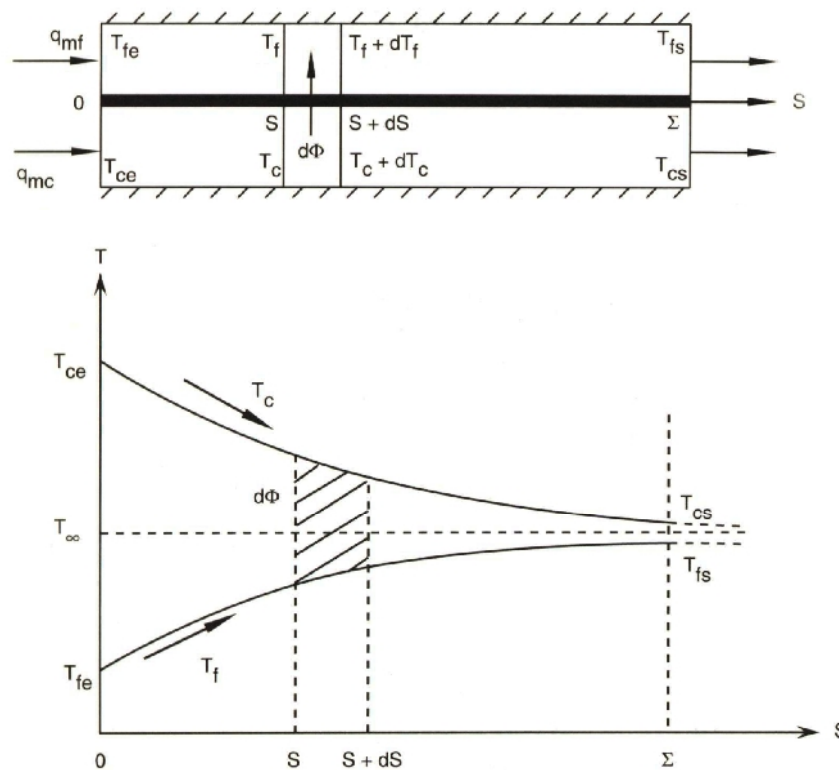


Fig.4.7- Distribution de température dans un échangeur à co-courant.

c, f : indices des températures des fluides chaud et froid respectivement ;

e, s : indices des températures d'entrées et de sortie de l'échangeur.

S : surface d'échange mesurée depuis l'entrée du fluide chaud (joue le rôle d'une abscisse).

Σ : surface totale d'échange.

T : température du fluide.

q_m : débit massique [kg/s].

q_t : débit thermique unitaire [W/°K].

$$q_t = q_m C_p \quad (4.1)$$

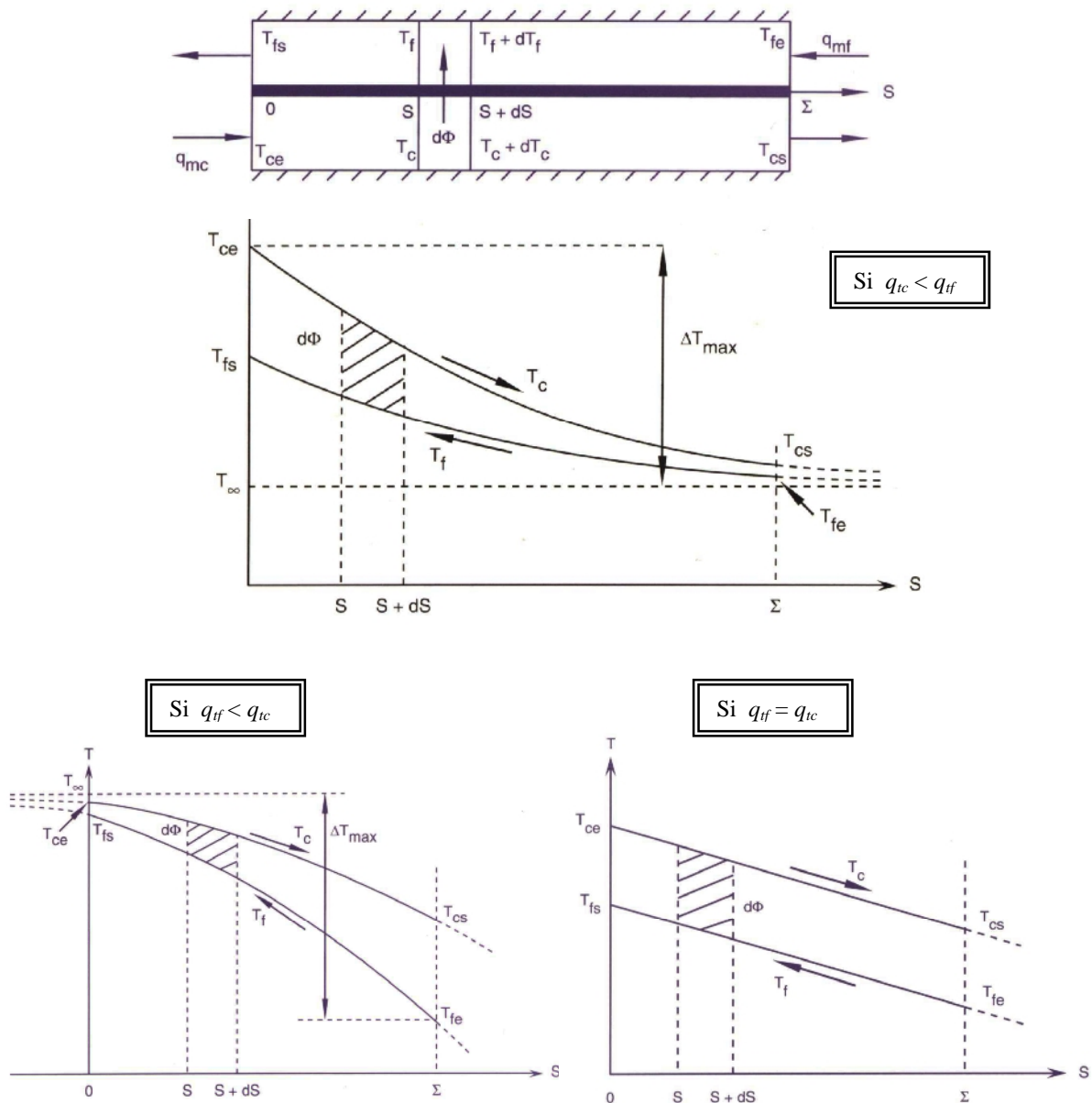


Fig.4.8- Distribution de température dans un échangeur à contre-courant.

On remarque sur ces courbes que dans le cas de l'échangeur co-courant, la température de sortie du fluide chaud est toujours plus élevée que celle du fluide froid. Par contre, dans le cas de l'échangeur à contre courant et dans des conditions favorables (par exemple : longueur non excessive de l'échangeur), il est possible d'avoir une température de sortie du fluide froid supérieure à celle de sortie du fluide chaud.

Nous remarquons aussi que pour les deux cas d'échangeurs, la puissance de l'appareil est proportionnelle à l'aire délimitée par les courbes T_c et T_f .

Les distributions de température sont données par les relations ci-dessous ; k étant le coefficient local d'échange à travers la paroi.

- Echangeur à co-courant :

$$\frac{T_c - T_f}{T_{ce} - T_{fe}} = \exp \left\{ - \left(\frac{1}{q_{tc}} + \frac{1}{q_{tf}} \right) k S \right\} \quad (4.2)$$

En particulier, à la sortie de l'échangeur on a :

$$\frac{T_{cs} - T_{fs}}{T_{ce} - T_{fe}} = \exp \left\{ - \left(\frac{1}{q_{tc}} + \frac{1}{q_{tf}} \right) k \Sigma \right\} \quad (4.3)$$

Les évolutions des températures T_c et T_f sont données par :

$$\frac{T_c - T_{ce}}{T_{ce} - T_{fe}} = - \frac{q_{tf}}{q_{tc} + q_{tf}} \left\{ 1 - \exp \left[- \left(\frac{1}{q_{tc}} + \frac{1}{q_{tf}} \right) k S \right] \right\} \quad (4.4)$$

$$\frac{T_f - T_{fe}}{T_{ce} - T_{fe}} = \frac{q_{tc}}{q_{tc} + q_{tf}} \left\{ 1 - \exp \left[- \left(\frac{1}{q_{tc}} + \frac{1}{q_{tf}} \right) k S \right] \right\} \quad (4.5)$$

Les températures de sorties des deux fluides sont déterminées en faisant $S = \Sigma$ dans les relations (4.4) et (4.5).

- Echangeur à contre-courant :

$$\frac{T_c - T_f}{T_{ce} - T_{fs}} = \exp \left\{ - \left(\frac{1}{q_{tc}} - \frac{1}{q_{tf}} \right) k S \right\} \quad (4.6)$$

$$\frac{T_c - T_{ce}}{T_{ce} - T_{fs}} = \frac{q_{tf}}{q_{tf} - q_{tc}} \left\{ \exp \left[- \left(\frac{1}{q_{tc}} - \frac{1}{q_{tf}} \right) k S \right] - 1 \right\} \quad (4.7)$$

$$\frac{T_f - T_{fs}}{T_{ce} - T_{fs}} = \frac{q_{tc}}{q_{tf} - q_{tc}} \left\{ \exp \left[- \left(\frac{1}{q_{tc}} - \frac{1}{q_{tf}} \right) k S \right] - 1 \right\} \quad (4.8)$$

- Influence de la surface d'échange :

On montre d'une part, que quelque soit le débit thermique unitaire, la surface d'échange dans le cas du co-courant est inférieure à celle du contre-courant. Et d'autre part, que chaque mètre carré de surface supplémentaire a de moins en moins de valeur thermique, mais il coûte aussi cher. En conséquence, il faudra rechercher une surface d'échange économiquement optimale.

4.3.4- Flux thermique maximum dans un échangeur

En supposant qu'il ne se produit aucune perte de chaleur externe, la puissance thermique maximale échangée peut être calculée en faisant un bilan enthalpique global sur l'un des fluides (chaud ou froid) et en examinant les courbes $T = f(S)$ étudiées pour les échangeurs à courant parallèles. Elle est donnée par la relation:

$$\Phi_{\max} = q_{t \min} \Delta T_{\max} = q_{t \min} (T_{ce} - T_{fe}) \quad (4.9)$$

Dans tous les autres cas, quelque soit le modèle d'échangeur, on constate sur les courbes qu'aucun des fluides ne peut subir une variation de température supérieure à $(T_{ce} - T_{fe})$, car alors il faudrait que le fluide froid sorte à une température supérieure à T_{ce} , ou que le fluide chaud sorte à une température inférieure à T_{fe} , ce qui est physiquement impossible.

4.3.5- Efficacité d'un échangeur

On définit l'efficacité d'un échangeur par le rapport de la quantité de chaleur échangée à la quantité de chaleur maximale qui pourrait être échangée.

$$E = \frac{\Phi}{\Phi_{\max}} \quad (4.10)$$

Selon les valeurs que peuvent prendre les débits thermiques unitaires des deux fluides, la définition de E en fonction de T varie :

♦ Si $q_{tc} < q_{tf}$ alors :

$$E = \frac{T_{ce} - T_{cs}}{T_{ce} - T_{fe}} \quad (4.11)$$

♦ Si $q_{tc} > q_{tf}$ alors :

$$E = \frac{T_{fs} - T_{fe}}{T_{ce} - T_{fe}} \quad (4.12)$$

- Remarque :

Dans la définition de l'efficacité E, on prend toujours le fluide qui a la plus faible capacité thermique (ou débit thermique unitaire). On dit que ce fluide commande le transfert car il accuse le changement de température le plus important.

4.4- Méthode générale de calcul des échangeurs

Le calcul des échangeurs de configurations diverses a longtemps été calqué sur celui des échangeurs à *courant parallèles* (co-courant et contre-courant), à grand renfort de termes correctifs d'origine expérimentale. Il existe pourtant une méthode plus structurée et beaucoup plus riche dans ses applications, c'est la méthode du *nombre d'unité de transfert* dite **NUT**.

Ce nombre joue un rôle essentiel dans la modélisation des échangeurs ($E = f(R, NUT)$).

En remarquant dans les formules précédentes l'existence de deux nombres sans dimension, on pose alors :

$$R = \frac{q_{t \min}}{q_{t \max}} \quad (4.13)$$

$$NUT = \frac{k \Sigma}{q_{t \min}} \quad (4.14)$$

Et comme l'efficacité est définie par le rapport de la puissance thermique au flux maximal échangé on en déduit les relations suivantes :

- Echangeur à co-courant :

$$E = \frac{1 - \exp[-(1 + R) NUT]}{1 + R} \quad (4.15)$$

- Echangeur à contre-courant :

Quelque soit le fluide qui commande le transfert, on a :

$$E = \frac{1 - \exp[-(1-R)NUT]}{1 - R \exp[-(1-R)NUT]} \quad (4.16)$$

- Echangeur de configuration quelconque:

Des calculs analogues aux précédents mais plus complexes peuvent être conduits pour des échangeurs à courants croisés, ou de type 1-N. L'allure générale des courbes $E = f(R, NUT)$ est donnée sur la figure (Fig.4.9) dans le cas où $R=0.75$.

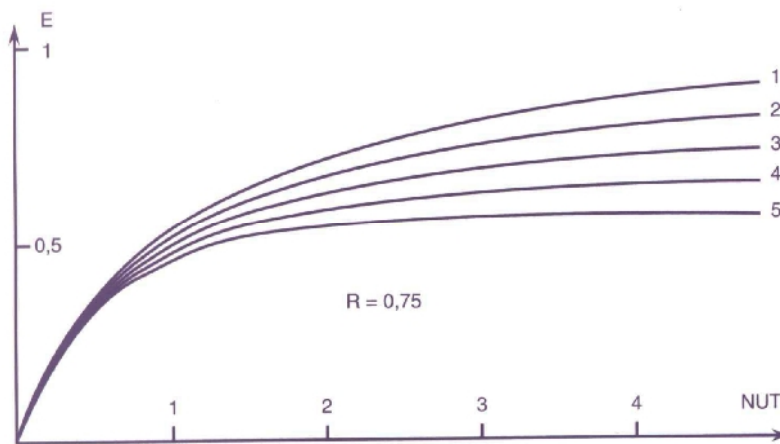


Fig.4.9- Courbes $E = f(R, NUT)$: 1- contre-courant. 2- courants croisés, fluide non brassé. 3- courants croisés, fluide à $q_{1,min}$ brassé. 4- échangeur 1-N. 5- co-courant.

On trouve dans la littérature des abaques $E = f(R, NUT)$ pour la plupart des configurations courantes d'écoulements.

- Méthodologie de calcul :

La méthode NUT permet d'apporter une réponse élégante et rapide à la plupart des problèmes qui se posent dans les études d'ingénierie relatives aux échangeurs. Ces problèmes se répartissent en deux grandes classes:

- Problèmes de conception dans lesquels les températures d'entrée et une température de sortie sont imposées, les débits étant connus.

La question est de sélectionner le modèle d'échangeur le plus approprié, et déterminer sa taille, c'est-à-dire la surface Σ nécessaire pour obtenir la température de sortie désirée.

La méthode à employer consiste à calculer R et E , puis $NUT(E)$ d'où l'on tire Σ .

C'est dans ce cadre que s'insèrent le plus souvent les *problèmes d'optimisation*.

- Problèmes de performances où les données sont le modèle et la taille de l'échangeur, les débits et les températures d'entrée.

La question est de déterminer la puissance et les températures de sortie.

La méthode NUT permet ici de calculer R et NUT d'après les données, d'où l'on déduit $E(NUT)$; les deux températures de sortie inconnues sont fournies par les relations (4.11) et (4.12) et Φ s'obtient par le bilan enthalpique global.

4.5- Systèmes de récupération de chaleur

La récupération de chaleur peut se faire de plusieurs manières et en utilisant des "supports" différents. Les échanges peuvent s'effectuer par:

- ◆ conduction-convection, cas des récupérateurs statiques ;
- ◆ accumulation dans un matériau, cas des échangeurs rotatifs ;
- ◆ fluide caloporteur sans changement de phase, cas des batteries à eau glycolée ;
- ◆ fluide caloporteur avec changement de phase, cas des caloducs et pompes à chaleur.

Il existe bien sûr d'autres systèmes de récupération tels que les récupérateurs de chaleur sur les gaz de combustion et les systèmes spéciaux.

4.5.1- Echangeurs de chaleur statiques

Ce sont des systèmes dans lesquels il n'y a aucun mélange entre les fluides. On distingue principalement deux types:

- ✓ Echangeurs à plaques type air-air à courants croisés.
- ✓ Echangeur à contre-courant pour liquides.

4.5.1.1- Echangeurs à plaques type air-air

Des plaques minces d'environ 1 mm d'épaisseur sont assemblées et disposées parallèlement à intervalles réguliers; un passage d'air entre deux plaques de 1.5 à 10 mm est ainsi créé (Fig.4.10).

Le fonctionnement optimal de l'échangeur est réalisé pour une vitesse de passage de l'air de l'ordre de 2 à 3 m/s.

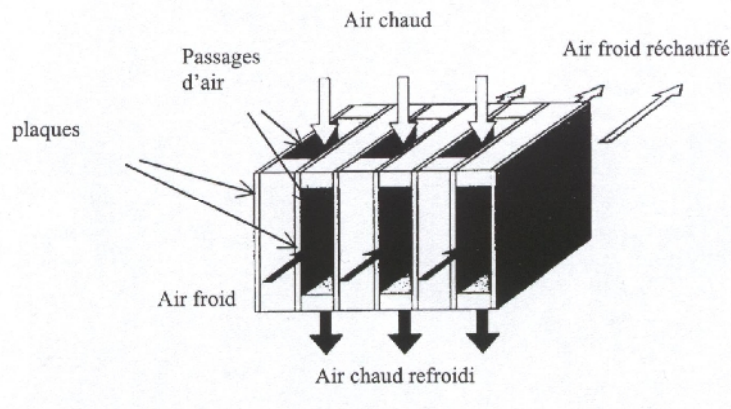


Fig.4.10- Echangeur à plaques type air-air.

Ces échangeurs peuvent être utilisés dans:

- ✓ les installations de ventilation et de confort et les hôpitaux;
- ✓ les piscines couvertes et complexes sportifs ;
- ✓ les installations de séchage et de laquage ;
- ✓ la ventilation industrielle.

Les températures d'emploi peuvent atteindre 200 à 300 °C et leurs efficacité peut atteindre les 60% tandis que les débits traités vont jusqu'à 80000 m³/h.

4.5.1.2- Echangeurs à plaques pour liquides

Des plaques de faible épaisseur, embouties afin d'avoir un profil ondulé, sont assemblées et disposées parallèlement à faible intervalles réguliers (Fig.4.11 et 4.12). Les fluides y circulent à contre-courant.

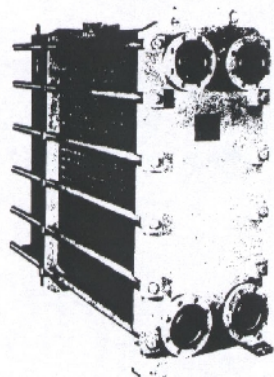


Fig.4.11- Echangeur à plaques type eau-eau

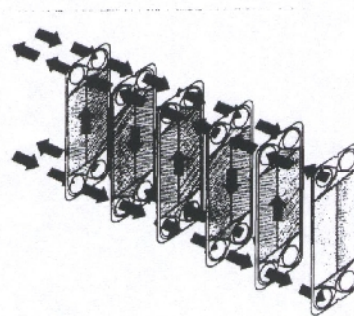


Fig.4.12- Disposition des plaques avec circulations des fluides entre celles-ci.

Ces échangeurs sont généralement employés dans l'industrie et les installations de cogénération; ils sont également utilisés en géothermie. Les plaques sont empilées et fixées les unes aux autres par tiges filetées, boulonnées et assemblées à l'intérieur d'un cadre (Fig.4.11).

Ils sont utilisés dans :

- ✓ industries chimique, pharmaceutique et alimentaire ;
- ✓ techniques de l'environnement ;
- ✓ chauffage avec des couples fluides : eau-eau, eau-huile, eau-glycol, ...etc.

Les températures d'emploi vont jusqu'à 150 °C et même 300 °C (avec des joints spéciaux). Leurs efficacité varie entre 50 et 90% pour des débits traités de 5 à 2500 m³/h.

4.5.2- Echangeurs de chaleur statiques à fluide intermédiaire

Ce sont des systèmes de récupération avec transfert par fluide caloporteur sans changement de phase. Le principe de fonctionnement typique est représenté par le circuit intermédiaire assurant le transport de chaleur du côté chaud au côté froid (Fig.4.13). Le raccordement hydraulique des deux échangeurs permet le transfert de chaleur d'un échangeur à un autre. Le fluide caloporteur (généralement de l'eau glycolée) circulant dans le circuit intermédiaire à un effet régénérateur: il stocke et transporte la chaleur.

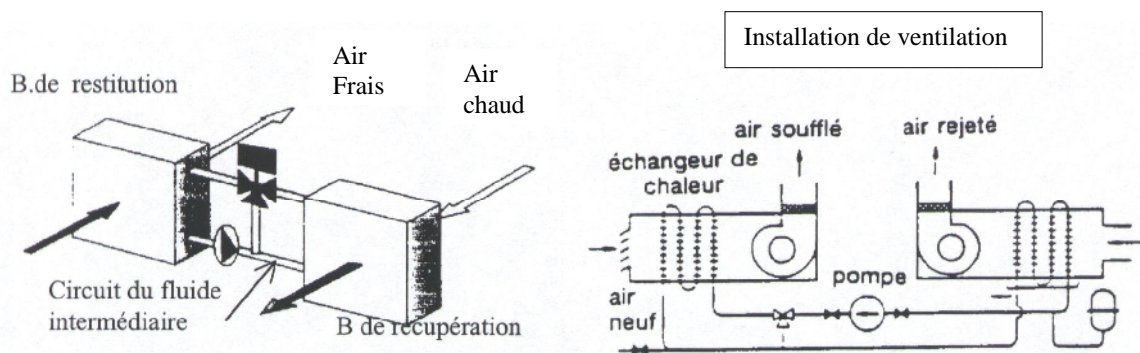


Fig.4.13- Récupération à fluide intermédiaire.

Le domaine d'application le plus important de ce système est la ventilation comme le montre la figure ci-dessus. La température d'emploi est limitée par l'ébullition du fluide caloporteur et l'efficacité thermique de ce système est d'environ 50%.

4.5.3- Echangeurs de chaleur rotatifs à régénération

Ces récupérateurs (avec matériau accumulateur) sont des échangeurs air-air. On distingue deux types: les échangeurs rotatifs lents et les ventilateurs capillaires. Ces derniers étant très peu utilisés, nous ne considérons que le premier type.

Le fonctionnement de l'échangeur rotatif lent se distingue par les charges et les décharges périodiques de chaleur et de l'humidité dans la masse de l'accumulateur (rotor en forme d'un cylindre plat). Le rotor tourne lentement ; dans une direction il est parcouru par de l'air chaud, et dans l'autre direction par de l'air froid. Ainsi, la chaleur et l'humidité sont soutirées à l'air chaud et transmises à l'air froid. Une zone de rinçage fonctionnant par dépression évite le transfert de particules d'air extrait dans l'air neuf (Fig.4.14).

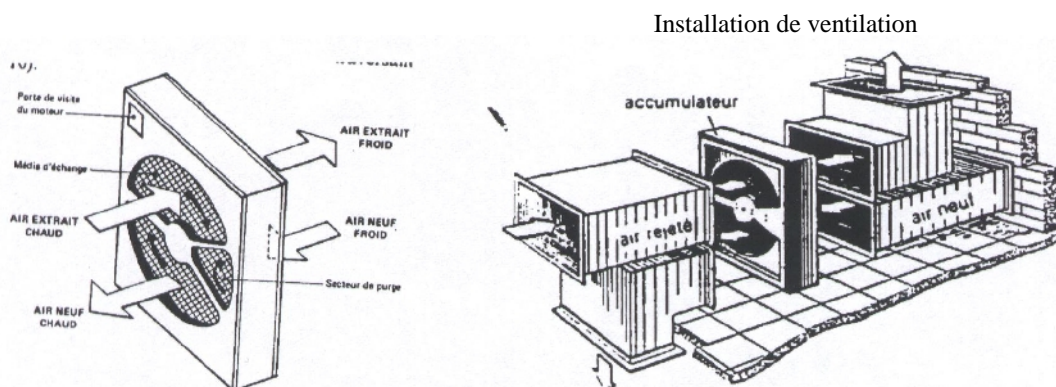


Fig.4.14- Echangeur rotatif à régénération.

Le domaine d'application comprend aussi bien les installations de ventilation que les installations techniques des procédés purement industriels. La température d'emploi varie entre 0 et 300 °C, leurs efficacité peut aller jusqu'à 75% et les débits traités peuvent aller de 1000 à 100000 m³/h.

4.5.4- Caloducs

Ce sont des systèmes de récupération avec transfert par fluide caloporteur avec changement de phase. On distingue les caloducs *horizontaux* et *verticaux*.

Un caloduc horizontal est constitué d'un tube métallique étanche contenant un fluide subissant des changements d'état (vaporisation et liquéfaction). La paroi intérieure est tapissée d'un matériau capillaire. Sous l'effet de la chaleur apportée par le milieu extérieur (air extrait par

exemple) à l'extrémité du caloduc appelée évaporateur, le fluide s'évapore et tend à occuper tout le volume libre (Fig.4.15) en abandonnant sa chaleur latente au milieu extérieur (air neuf). Le liquide ainsi formé retourne à l'évaporateur grâce au média capillaire. Un transfert de chaleur continu de l'évaporateur vers le condenseur est ainsi réalisé. Une inclinaison du tube (jusqu'à 6°) favorise ou contraire le retour du liquide vers l'évaporateur, d'où la régulation de la capacité de transfert c'est-à-dire variation de l'efficacité du caloduc.

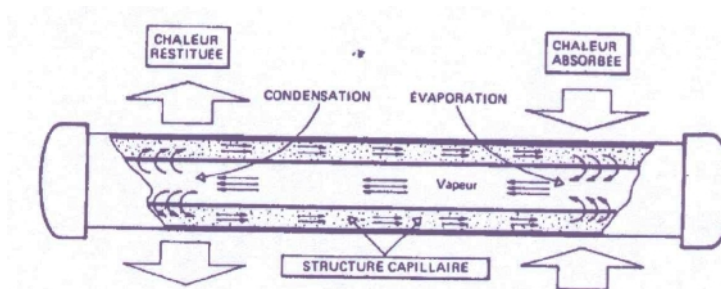


Fig.4.15- Caloduc horizontal.

Le caloduc vertical (Fig.4.16) diffère de l'horizontal par sa position et par l'absence du média capillaire. Le retour du liquide à l'évaporateur s'effectue par ruissellement sur la paroi interne du tube. Il n'y a pas de possibilité de régulation dans ce cas.

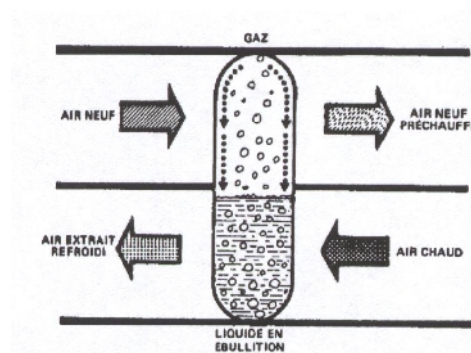


Fig.4.16- Caloduc vertical.

Le caloduc convient très bien aux centrales de traitement de l'air en caisson. Il est aussi utilisé dans l'industrie pour la récupération de la chaleur dégagée par les fours (Fig.4.17). Les températures d'emploi sont liées au fluide caloporteur (exemple : eau : 60 à 230 °C ; méthanol : -45 à 120 °C).

L'efficacité d'un caloduc type vertical peut atteindre 50% ; celle du caloduc horizontal peut atteindre les 60 à 75%. Les débits traités varient entre 300 à 300000 m³/h.

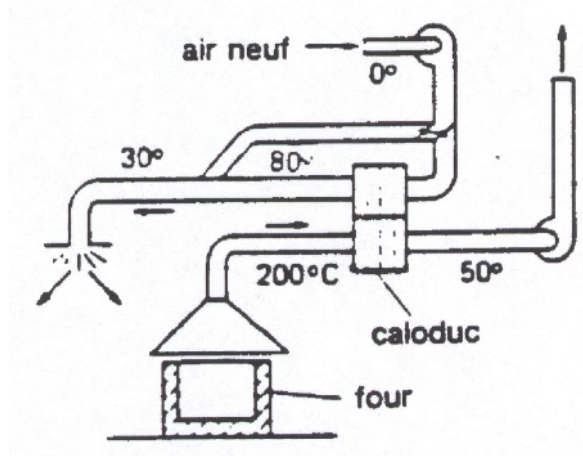


Fig.4.17- Récupération de chaleur par caloduc.