

Chapitre VI

Appareils d'échange de chaleur avec changement de phase

VI.1. Introduction

Les échanges thermiques interviennent dans de nombreux secteurs d'activités humaines. Dans la plupart de ces activités, le transfert de chaleur doit s'effectuer sans altération du milieu intervenant dans le transfert thermique. L'utilisation d'équipements spécifiques d'échange de chaleur d'un milieu à un autre est alors nécessaire. Ces équipements sont connus sous la dénomination d'échangeurs de chaleur.

L'échangeur de chaleur est un équipement qui permet d'assurer un transfert de chaleur d'un fluide chaud à un fluide froid, avec ou sans contact direct entre les deux. Le même fluide peut conserver son état physique liquide ou gazeux, ou se présenter successivement sous les deux phases : c'est le cas des condenseurs, évaporateur, rebouilleurs, ou tous les systèmes de refroidissement. Dans tous les cas on rencontre au moins un échangeur de chaleur dans une installation thermique.

Lorsque le but recherché est l'extraction de la chaleur à un corps, ou à un milieu, pour le refroidir ou le maintenir à une température inférieure à celle de l'ambiance, c'est-à-dire lorsqu'il s'agit de produire du froid, le système thermodynamique qui effectue cette opération prend naturellement le nom de machine frigorifique. L'effet utile est la chaleur extraite (ou le froid produit) à la source froide. Si, au contraire le but recherché est la production de chaleur pour chauffer un milieu ou le maintenir à une température suffisamment haute à partir de chaleur gratuite récupérée à une température plus basse, le système en question est dénommé habituellement pompe à chaleur.

VI.2. Description des appareils

VI.2.1. Généralités

Un échangeur de chaleur est un dispositif utilisé pour le transfert d'énergie (sous forme thermique) entre deux fluides ou plus, à des températures différentes. Les deux fluides sont, généralement, séparés par une paroi solide à travers de laquelle les échanges thermiques se font par conduction. Le transfert de chaleur fluide-paroi se fait par convection. Les

échangeurs de chaleur constituent des appareils importants dans les applications industrielles tel que : la production d'énergie mécanique ou électrique à partir de l'énergie thermique, l'agroalimentaire, refroidissement des stations nucléaires, le chauffage et le conditionnement d'air, la réfrigération, etc.

La figure VI.1 représente la structure générale d'un échangeur de chaleur.

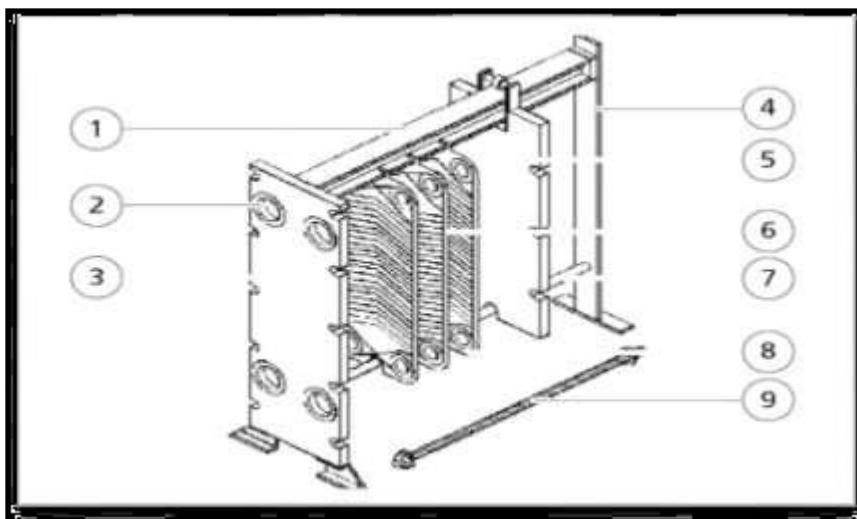


Figure VI.1. Structure générale d'un échangeur de chaleur

Avec : 1. poutre de support, 2. connexions, 3. plaque fixe, 4. colonne de support, 5. plaque mobile, 6. plaque d'échangeur, 7. barre de guidage inférieure, 8. joints, 9. tirant.

VI.2.2. Matériaux applicables aux échangeurs de chaleur

Les échangeurs de chaleur sont fabriqués en utilisant de nombreuses matières .le choix des matériaux pour les différentes pièces de l'échangeur, dépend surtout des conditions de service (température, pression, degré de corrosive du milieu). La température de service des échangeurs de chaleur se trouve couramment dans les limites d'utilisation des aciers au carbone (de -30 à 475°C). Les matériaux employés pour la réalisation des tubes sont le plus souvent métalliques (acier, laiton). Les céramiques de développent dans les échangeurs où transitent des fluides à haute température. Les tubes en plastique (généralement de très petits diamètres) sont également utilisés, soit en faisceaux, soit intégrés dans des plaques minces qui leur servent de raidisseurs.

VI.2.3. Classification des échangeurs de chaleur

Les échangeurs de chaleur peuvent être classés selon plusieurs critères :

- ✓ Processus de transfert : contact direct ou contact indirect.
- ✓ Géométrie de construction : tubes, plaques et surfaces à ailettes.
- ✓ Mécanismes de transfert de chaleur : une ou deux phases.
- ✓ Types d'écoulement : courants parallèles, contre-courant ou écoulements croisés.

IV.3. Condenseurs

Dans un condenseur, la phase liquide du fluide frigorigène apparaît dès que la température de la surface de refroidissement devient inférieure à la température de saturation du fluide frigorigène sous la pression de condensation.

La figure VI.2 représente l'évolution des températures dans un condenseur

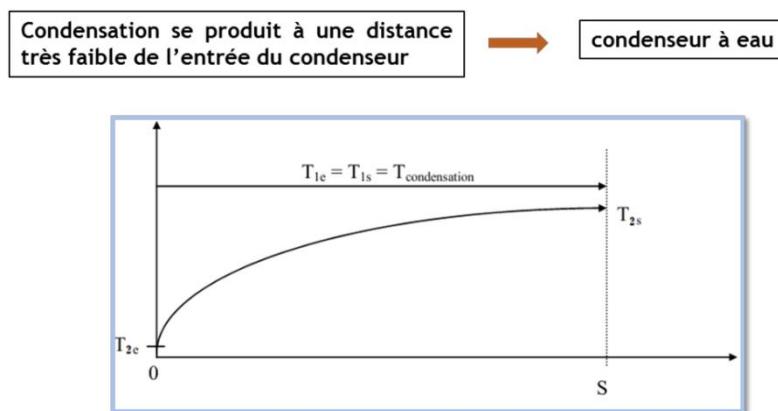


Figure VI.2. Evolution des températures dans un condenseur

✓ Condenseurs tubulaires

Le but de ces échangeurs est de condenser une vapeur à l'aide d'un fluide réfrigérant. Ils concernent des secteurs d'activité très variés comme la production d'énergie (centrale thermique), les industries chimiques (colonnes à distillation), les industries du génie climatique, de l'agro-alimentaire, du séchage, etc. On distingue deux types de condenseurs : les condenseurs à fluides séparés et les condenseurs à contact direct.

VI.3.1. Condensation d'une vapeur pure

Le changement de phase de l'état vapeur à l'état liquide est désigné par condensation. Ce phénomène est souvent rencontré dans les processus industriels et joue un rôle important, dans les installations motrices à vapeur, les machines frigorifiques et les pompes à chaleur.

Dans les condenseurs industriels la vapeur à condenser est séparée du fluide froid par une surface intermédiaire. Lorsqu'une vapeur se trouve en contact avec une surface dont la température est inférieure à la température de saturation de la vapeur, il y a un changement de phase vapeur-liquide donnant naissance à un transfert de chaleur important. Or, la condensation de la vapeur sur une paroi refroidie donne naissance à deux types de phénomènes qui se caractérisent par l'aspect visuel du condensat formé.

Dans le premier cas les gouttelettes liquides se forment sur la surface et on parle de «**Condensation en gouttes**»

Dans le second cas le condensat recouvre la surface sous la forme d'un film continu et on parle de «**Condensation en film**»

✓ Condensation en gouttes

Lorsqu'une surface de condensation est contaminée par une substance qui empêche le condensat de mouiller la surface, la vapeur se condense en gouttes plutôt qu'un film continu.

Ceci est connu sous le nom de condensation en gouttes. Dans ces conditions une grande partie de la surface n'est pas recouverte par un film isolant, et les coefficients d'échange de chaleur sont quatre à huit fois plus élevés que pour la condensation en film. Jusqu'à présent ce genre de condensation n'a été obtenu d'une façon sûre que pour la vapeur d'eau, la condensation en gouttes ne se présente que dans des conditions très précises qui en pratique ne peuvent être toujours maintenues. La condensation en gouttes de la vapeur d'eau peut, toutefois, être utilisée dans des travaux expérimentaux lorsqu'on désire amener la résistance thermique, sur un côté d'une surface, à une valeur négligeable.

La condensation en gouttes peut être schématisée dans la figure VI.3

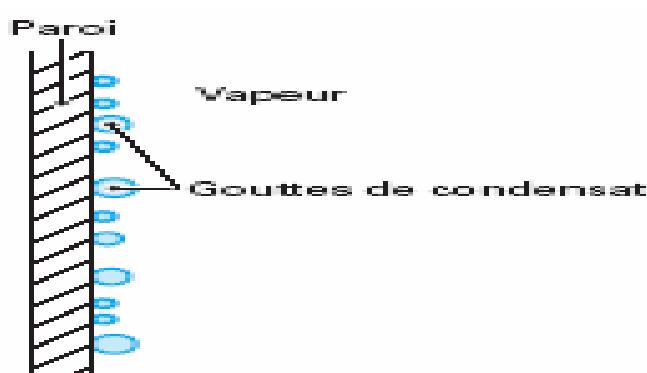


Figure VI.3. Condensation en gouttes

✓ **Condensation en film**

Lors de la condensation, sur une paroi, un film liquide se forme sur la surface refroidie. L'épaisseur du film liquide résulte de l'interaction entre l'écoulement du liquide et celui de la vapeur, en fonction de la géométrie de la surface solide. Dans la pratique industrielle, les surfaces d'échanges utilisées sont souvent très complexes et ne se prêtent pas facilement à l'analyse théorique du phénomène de la condensation. Les phénomènes tels que les vagues sur la surface de film de condensat ou l'arrachement des gouttelettes et l'inondation compliquent davantage l'analyse.

La condensation en film peut être schématisée dans la figure VI.4

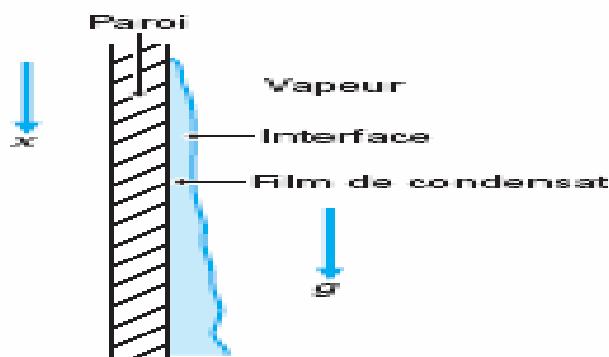


Figure VI.4. Condensation en film

A. Condensation à l'extérieur des tubes

✓ **Condensation à l'extérieur d'un tube horizontal**

Ce sont des échangeurs de tubes et calandre avec une faible perte de pression du côté de la vapeur. La condensation s'effectue coté calandre. L'écartement des chicanes peut être resserré entre l'entrée de la vapeur et la sortie du condensat, pour maintenir une vitesse de circulation correcte. Le faisceau est protégé à l'entrée de la vapeur par une plaque évitant l'érosion et la mise en vibration des tubes. Il faut s'assurer que la section de passage autour de la plaque soit au moins égale à celle de la tuyauterie, afin de minimiser la perte de pression. On trouve souvent une diminution du nombre de tubes : dans la partie haute du faisceau pour diminuer la perte de pression ou dans la partie basse pour faciliter l'écoulement du condensat. Il est nécessaire de ménager dans la partie supérieure de la calandre un événement pour l'extraction des incondensables.

✓ **Condensation à l'extérieur d'un tube vertical**

Ces condenseurs sont souvent appelés condenseurs à film tombant. Les coefficients d'échanges sont bons, car le film de condensate peut être de faible épaisseur. Il est important

d'assurer une bonne distribution de l'eau à l'intérieur de tous les tubes, par un réservoir collectif ou une alimentation individuelle des tubes. Il faut également prévoir une purge de la calandre et un trop-plein au réservoir des tubes.

B. Méthodes de calculs (méthode DMTL)

Plusieurs critères sont à considérer pour le dimensionnement d'un condenseur suivant son utilisation, la puissance thermique est toujours la principale préoccupation, mais le choix définitif de l'appareil peut dépendre d'autres paramètres tels que (la surface d'échange, la température de la paroi a ne pas dépasser, l'encombrement, les matériaux utilisés, etc.). Pour le calcul d'un condenseur on à des méthodes analytiques et des méthodes numériques :

- ✓ Les méthodes numériques : Elles essaient d'améliorer la précision du calcul en décomposant les phénomènes physiques mis en jeu, et en prenant en compte la nature de l'écoulement, telles que la méthode des volumes finis.
- ✓ Les méthodes analytiques globales : telles que la méthode de l'écart moyenlogarithmique *DTML* ou la méthode de l'efficacité *NUT*, elles présentent du fait de leurs hypothèses certaines limitations :
 1. Elles supposent un coefficient d'échange constant le long du condenseur pour permettre une intégration analytique des équations.
 2. Elles n'offrent pas la possibilité de dégrader l'influence de paramètres géométrique, car les corrélations sont obtenues à partir des résultats globaux sur des appareils standards.
 3. Elles nécessitent une bonne connaissance pratique de ces échangeurs dès que l'on s'éloigne des dimensions standards.

DMLT est la Différence Moyenne Logarithmique de Température. Cette méthode permet de déterminer la surface d'échange (S), connaissant la puissance échangée et les températures d'entrée et de sortie des deux fluides.

Considérons un condenseur à un seul passage à contre-courant, ou circulent deux fluides, l'un chaud (vapeur se condense) et l'autre froid voir la (figure VI.5) pour le calcul en admet que :

- ✓ Le régime est stationnaire.
- ✓ Le coefficient d'échange thermique global est constant.
- ✓ Les chaleurs massiques des fluides restent constantes.
- ✓ Le condenseur est considéré adiabatique.

On pose :

- ✓ T_{ec} : Température d'entrée du fluide chaud ($^{\circ}\text{C}$)

- ✓ T_{sc} : Température de sortie du fluide chaud ($^{\circ}\text{C}$)
- ✓ t_{ef} : température d'entrée du fluide froid ($^{\circ}\text{C}$)
- ✓ t_{sf} : température de sortie du fluide froid ($^{\circ}\text{C}$)
- ✓ L'extrémité chaude : $DT_c = T_c - t_{sf}$ ($^{\circ}\text{C}$)
- ✓ L'extrémité froide : $DT_f = T_c - t_{ef}$ ($^{\circ}\text{C}$)

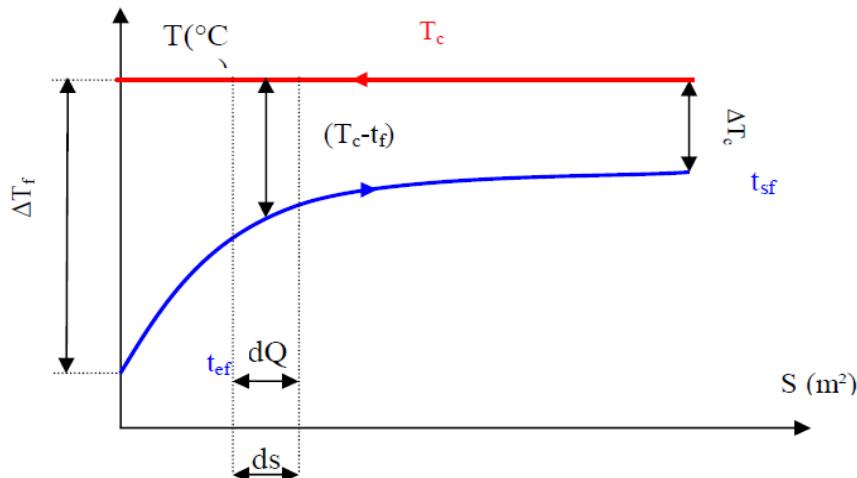


Figure VI.5. Distribution des températures dans un condenseur à contre-courant.

C. Désurchauffeur

Est permis d'ajusté la température fin de sortie de vapeur surchauffée avec une injection d'eau entre les deux surchauffeurs. Ou Au lieu d'une injection d'eau, le réglage de température de surchauffe peut se faire par un serpentin situé entre les deux surchauffeurs et placé dans le ballon inférieur :

C.1. Condensat

Le condensat est constitué d'un mélange d'hydrocarbures paraffinées, de l'iso pentane jusqu'au dodécane et plus généralement extrait des gisements de gaz à condensat, il est sous forme liquide dans les conditions normales de pression et température.. On distingue habituellement le condensât léger (C5 à C10 environ) et le condensât lourd (C10 à C15 environ).

C.2. Liquide de refroidissement

C'est le flux moteur du système, il définit, par ses caractéristiques, la puissance des condenseurs. Les paramètres les plus pertinents sont les paramètres d'entrée c'est-à-dire la température et le débit :

- ✓ La température du liquide de refroidissement à l'entrée des condenseurs est un facteur influent. Nous ne pouvons pas la contrôler, car les condenseurs sont connectés directement au réseau commun d'eau. De ce fait, cette température ne sera pas prise en compte. Par ailleurs, le plan doit être exécuté sur une durée assez courte pour limiter autant que possible les variations de cette température en fonction des conditions atmosphériques.
- ✓ Le débit du liquide de refroidissement est également un facteur influent. Il est limité par le débit du réseau qui est de 40 litres par minute. Nous avons défini un domaine expérimental allant de 24 à 38 litres par minute. La borne inférieure de ce domaine de variation a été définie pour un écoulement minimum dans les tubes des condenseurs et la borne supérieure est un peu plus faible que le débit maxi (40 l/min) pour prévenir une diminution éventuelle du débit du réseau.

C.3. Liquide de refroidissement des condenseurs

Ce flux circule à l'intérieur des tubes des condenseurs. Sa température doit être inférieure à la température de saturation pour rendre possible la condensation de la vapeur d'eau sur la surface extérieur des tubes. De plus, son débit doit être assez élevé pour d'une part, raccourcir son temps de séjour dans le condenseur afin limiter l'augmentation de sa température, et, d'autre part, créer un écoulement turbulent dans les tubes favorisant un meilleur échange de chaleur. C'est alors la capacité des condenseurs à transformer en condensats le volume de vapeur généré dans la chambre de séparation qui constitue l'élément moteur du système. En effet, tous les paramètres des flux de vapeur et de liquide dans tout le système sont couplés, après un régime transitoire pour compenser la masse thermique du système, se suit un régime permanent dans lequel l'ensemble de ces paramètres atteint un palier d'équilibre. Cet équilibre est la conséquence d'une autorégulation du système en fonction principalement de la puissance des condenseurs.

VI.3.2. Condensation d'une vapeur complexe

A. Coefficient de transfert propre U_p

Pour un élément de tube de longueur dl , le flux de chaleur correspondant s'écoulera en rencontrant cinq résistances :

- ✓ $R_0 = \frac{1}{h_0}$: résistance dans le fluide à l'extérieur du tube ;
- ✓ R_{so} : résistance due au film d'encrassement déposé sur l'extérieur du tube ;

- ✓ R_i : résistance due à la paroi métallique du tube (cette résistance peut être négligée dans les calculs) ;
- ✓ R_{si} : résistance due au film d'encrassement déposé à l'intérieur du tube ;
- ✓ $R_i = \frac{1}{hc}$: résistance dans le fluide à l'intérieur du tube ;

On convient de choisir, en référence, la surface extérieure du tube, ce qui amène à corriger les résistances intérieures en les multipliant par le rapport ($\frac{d_{ext}}{d_{int}}$) des diamètres extérieurs et intérieurs du tube. Ces résistances corrigées s'écrivent :

$$R_{sio} = R_{si} \quad (\text{VI.1})$$

La résistance globale au transfert égale à la somme des quatre résistances. Prendra la forme :

$$R_s = \frac{1}{h_0} + R_{so} + R_{sio} + \frac{1}{h_{io}} = \frac{1}{u_s} \quad (\text{VI.2})$$

U_s est le coefficient de transfert sale relatif à l'élément du tube dl .

Lorsque cette élément est neuf, les résistances R_{so} et R_{sio} sont nulles et on définit alors un coefficient de transfert propre U_p , tel que :

$$\frac{1}{U_p} = \frac{1}{h_0} + \frac{1}{h_{io}} = \frac{h_{io} + h_0}{h_{io}h_0} \quad (\text{VI.3})$$

La détermination des coefficients de transfert locaux U_p et U_s nécessite l'estimation des coefficients de film h_0 et h_{io}

Calcul du coefficient de transfert propre U_p

- ✓ Faisceau

Section par passe :

$$a_t = \frac{Nt}{nt} \frac{\pi d^2 int}{4} \quad (\text{VI.4})$$

$$\text{Vitesse massique } G_t = \frac{m \cdot c}{a_t} \quad (\text{VI.5})$$

Les caractéristiques du fluide à la température calorique T_c : C_p, ρ, λ , et μ

Nombre de Reynolds :

$$Re_t = \frac{d_{int} G_t}{\mu} \quad (\text{VI.6})$$

Coefficient du film interne :

$$\frac{h_i}{\phi t} = j_h \frac{\lambda}{d_{int}} \left(\frac{C_p c \mu}{\lambda} \right)^{1/3} \quad (\text{VI.7})$$

$$\frac{h_{io}}{\phi t} = \left(\frac{h_i}{\phi t} \right) \left(\frac{d_{int}}{d_{ext}} \right) \quad (\text{VI.8})$$

$$\text{En régime laminaire } j_h = 1.86 \left(Re \frac{d_{int}}{L} \right)^{1/3} \quad (\text{VI.9})$$

En régime turbulent $j_h = 0.027 (\text{Re})^{0.8}$ (VI.10)

✓ **Calandre**

Section par calandre :

$$a_{ct} = \frac{Dc}{p}(p - d_{ext})B \quad (\text{VI.11})$$

Vitesse massique :

$$G_{CT} = \frac{m \cdot f}{act} \quad (\text{VI.12})$$

Diamètre équivalent

Pour le pas carré $D_e = \frac{4p^2}{\pi d_{ext}} - d_{ext}$ (VI.13)

Pour le pas triangulaire $D_e = \frac{3.464p^2}{\pi d_{ext}}$ (VI.14)

Les caractéristiques du fluide à t_c : $C_p, \rho', \lambda' \text{ et } \mu'$

Nombre de Reynolds $\text{Re}_{ct} = \frac{De G_{ct}}{\mu'}$ (VI.15)

Coefficient du film externe $\frac{h_0}{\phi c} = j'_h \frac{\lambda'}{De} \left(\frac{C_p \mu'}{\lambda'} \right)^{1/3}$ (VI.16)

Détermination de la température du tube

$$t_t = T_c - \frac{\frac{h_0}{\phi t}}{\frac{h_0}{\phi c} + \frac{h_0}{\phi t}} (T_c - t_c) \quad (\text{VI.17})$$

Détermination de ϕt à t_t $\phi t = \left(\frac{\mu t}{\mu' t} \right)^{0.14}$ (VI.18)

B. Perte de charge dans la calandre (Méthode de Kern)

Cette perte de charge est calculée par la formule suivante :

$$\Delta P_c = \frac{n_c f_c G^2 c \cdot (N_c + 1) D_c}{1.271 \times 10^{15} d \cdot De \cdot \phi c} \quad (\text{VI.19})$$

VI.4. Evaporateurs

VI.4.1. Evaporateurs tubulaires

Ces appareils sont généralement utilisés pour concentrer une solution, refroidir un fluide, ou produire de la vapeur. Le fluide chauffant peut être une phase liquide qui transmet sa chaleur sensible ou de la vapeur cédant sa chaleur latente de condensation sur la paroi. Il existe deux types d'évaporateurs.

- ✓ Ceux où l'évaporation se produit à l'intérieur des tubes

- ✓ Ceux où elle se produit à l'extérieur des tubes

VI.4.2. Evaporateurs à l'intérieur de tubes

On distingue deux types d'évaporateurs à l'intérieur de tubes :

- ✓ **Évaporations à tubes verticaux** : Utilisés pour concentrer une solution, fournir de la vapeur nécessaire au réchauffement d'un fluide à distiller ou comme évaporateurs cristallisateurs. Les tubes sont généralement chauffés extérieurement par de la vapeur qui se condense.

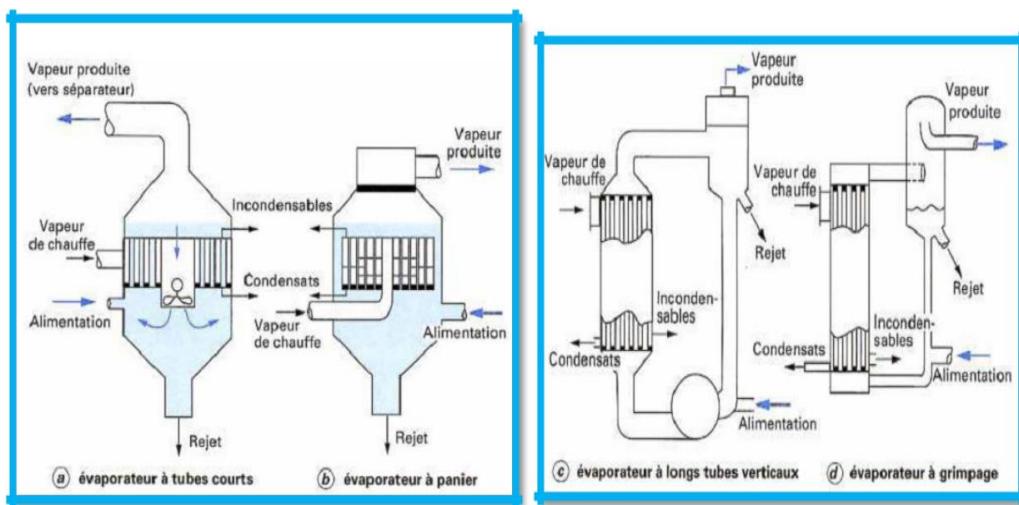


Figure VI.6. Evaporateurs à tubes verticaux

✓ Évaporateurs à tubes horizontaux

Ces appareils sont généralement utilisés comme refroidisseurs de liquide (eau, saumure, eau glycolée, etc.). Le liquide à évaporer qui circule dans les tubes est un fluide frigorigène alors que le fluide à refroidir circule à l'extérieur des tubes. On distingue trois types : évaporateurs multipasses à tubes et calandre, évaporateurs monopasses à tubes et calandre et évaporateurs coaxiaux.

VI.4.3. Evaporation à l'extérieur de tubes

Ces évaporateurs utilisent généralement des tubes horizontaux. On distingue deux types:

- ✓ **Evaporateurs noyés (ou submergés)**

Dans ce type d'échangeur, l'évaporation se produit à l'extérieur des tubes complètement « noyés » dans la phase liquide. Si la perte de charge due à la circulation du fluide frigorigène

est négligeable, la température de ce fluide est constante tout au long de l'évaporateur et égale à la température d'évaporation.

Les figures VI.7 et VI.8 montrent l'évaporateur noyé et l'évolution des températures dans un évaporateur noyé

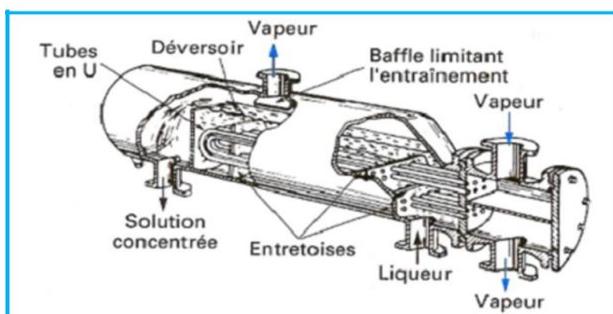


Figure VI.7. Evaporateur noyé

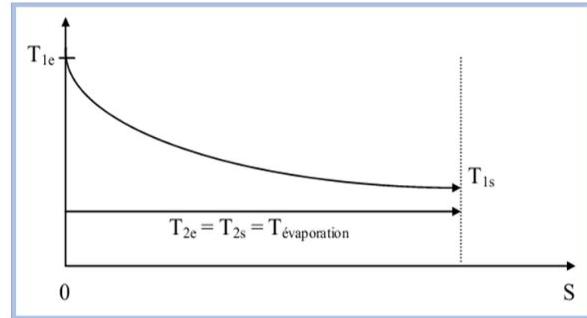


Figure VI.8. Evolution des températures dans un évaporateur noyé

VI.5. Rebouilleurs

Les rebouilleurs sont des appareils tubulaires dont le but est d'effectuer une vaporisation partielle des fonds de colonne de distillation afin d'engendrer la phase vapeur qui assurera le fractionnement dans la section d'épuisement. Ces appareils sont construits selon le même principe que les échangeurs à faisceaux et calandre, mais avec des variantes imposées par le système de séparation liquide-vapeur adopté.

IV.5.1. Rebouilleur noyés à circulation forcée

Le rebouilleur est alimenté par le liquide accumulé dans le fond de tour (colonne) et recirculé plusieurs fois dans l'appareil avec une pompe. Dans la deuxième diapositive on peut régler facilement le taux de vaporisation on joue sur le débit de la pompe, pour cette raison le deuxième dispositif est meilleur que le premier. Afin d'obtenir des pertes de charge très faible en circulation naturelle, on supprime les chicane et il est d'usage de respecter certaines proportions entre le diamètre de la calandre D_c et la longueur des tubes l

✓ Rebouillage d'un mélange dans la calandre

Le rebouilleur d'une colonne de stabilisation d'essence est l'exemple parfait de ce cas de vaporisation. Le liquide rentre dans l'appareil à sa température de bulle et il en sort à une température d'autant plus élevée que la fraction revaporisée est importante. Si le fluide

chauffant est de la vapeur, on prendra comme différence moyenne de température la (DTLM). Sinon on calculera le t_m pondéré en décomposant en tranches élémentaires.

IV.5.2. Rebouilleur à niveau à circulation naturelle

On a :

A. Rebouilleur à Kettle

C'est un rebouilleur idéal puisqu'il permet de réaliser jusqu'à 80% de vaporisation sur le résidu de fond de colonne, sans nécessiter un taux de recirculation important du liquide, comme c'est le cas pour les thermosiphons. En plus de sa fonction de vaporisation l'appareil assure la séparation des deux phases. Il est conçu avec un déversoir dont la hauteur correspond au diamètre du faisceau afin que celui-ci soit constamment submergé. La calandre est d'un diamètre nettement supérieur à celui du faisceau afin de ménager au-dessus du niveau liquide une zone désengagement de la vapeur et éviter les entraînements de liquide. Le faisceau est construit d'une manière classique avec deux plaques tubulaires lorsque le fluide chauffant est un produit pétrolière ; si l'en utilise la vapeur d'eau on fait souvent l'économie de la plaque tubulaire mobile, en employant des tubes en U. Dans ces appareils, la circulation est le plus souvent naturelle. Ces rebouilleurs sont appelés « KettleReboiler » qui se représente dans la figure VI.9.

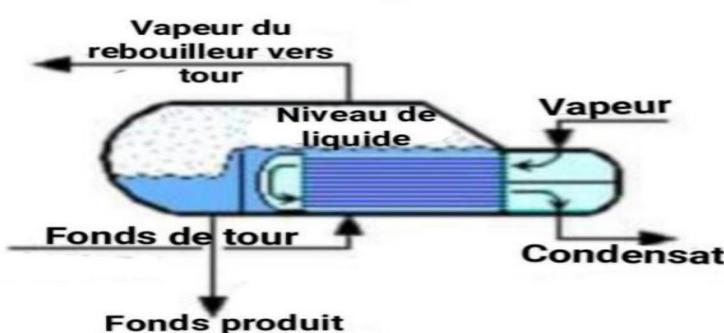


Figure VI.9. Rebouilleur à Kettle

B. Rebouilleur thermosiphon horizontale

On considère le rebouilleur de type thermosiphon émergé horizontalement qui assure le chauffage des produits de fond de la colonne de distillation en présence de la vapeur d'eau à basse pression (BP). La chaleur d'ebouillage est fournie par la vapeur BP qui se condense dans le rebouilleur. Le débit de condensat de la vapeur est réglé en fonction du taux de

rebouillage désiré. Le schéma (figure 10) représente un rebouilleur de type thermosiphon horizontal qui ressemble à un échangeur type faisceaux-calendre tubulaire

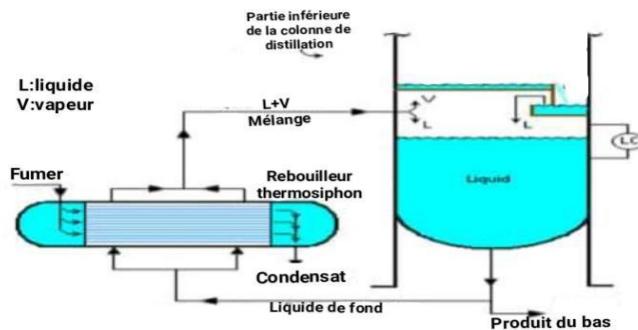


Figure VI.10. Rebouilleur thermosiphon horizontale

C. Rebouilleur thermosiphon vertical

Les rebouilleurs à thermosiphon verticaux sont fréquemment utilisés pour générer de la vapeur à la base des colonnes de distillation. Les méthodes de conception actuelles mettent l'accent sur le côté processus (ébullition). Le chauffage de la chaudière verticale est découplé du système. De plus, la plupart des recherches universitaires ont envisagé un agencement d'écoulement à tube unique avec un chauffage électrique contrôlé et uniforme.

VI.6. Conclusion

Ce travail a été consacré à l'étude théorique des appareils d'échange de chaleur avec changement de phase, comme on a dit déjà que le transfert de chaleur s'appuie sur des éléments qui assurent cet échange soit en gardant les mêmes phases ou avec un changement de phase.

L'étude a commencé par des généralités qui définit c'est quoi un échangeur de chaleur, sa structure et ses composants. Afin de décrire ces appareils on a regroupées les types en trois qui sont les condenseurs , les évaporateurs et finalement les rebouilleurs , il faut pas niée qu'ils ont des types ramifiés c'est-à-dire dans chaque types on trouve de deux jusqu'au quatre types donc pour cela on a schématisées nos informations dont on a obtenu dans les références mentionnés ci-dessous , cette variation du à plusieurs facteurs tel que le processus de transfert, les phases dont on vas établir l'échanges et d'autres qu'on a déjà les citer.

En effet, pour des changeurs très performants, avec des pertes de charge négligeables, il est préférable d'utiliser des fluides de densité faible et de capacité calorifique important,

D'autre part, pour les échangeurs à fonctionnement réchauffeur, les équations qu'on a obtenus nous ont permis de confirmer que plus la vitesse du fluide froid est faible, plus le réchauffeur est performant, surtout en mode contre-courant, qui est le mode optimal dans ce cas. L'échangeur de chaleur contre-courant est plus rentable que celui à co-courant.