

Chapitre VII. Tubes à ailettes

VII.1. Introduction

L'objectif des études sur les échangeurs de chaleur est généralement de réduire la taille du volume occupé par l'échangeur ou/et d'améliorer la performance thermique. Pour cela, il est nécessaire de trouver la configuration optimale qui nous donne le transfert de chaleur maximal. Pour améliorer les échangeurs de chaleur, les chercheurs et les constructeurs ont fait plusieurs études sur leurs performances thermiques et dynamiques. Dans leurs études, ils ont souvent recherché les configurations optimales en modifiant les géométries de ces appareils.

Les échangeurs de chaleur sont des dispositifs thermiques qui permettent et facilitent le transfert de chaleur généralement entre deux fluides ou plus. L'objectif principal des échangeurs est de transmettre la chaleur d'une source chaude vers une autre froide. La taille et la fonctionnalité des échangeurs de chaleur varient en fonction de l'application et du lieu d'utilisation.

L'intérêt considérable de fabriquer des échangeurs de plus en plus compacts a conduit à rechercher des techniques d'intensification des échanges de chaleur entre une source chaude et une source froide et à réaliser des programmes et des logiciels de simulation. Parmi les techniques d'intensification effectivement utilisées, l'utilisation des ailettes permet d'augmenter le niveau de la turbulence dans la couche limite, ainsi que la surface d'échange de chaleur. Les tubes à ailettes sont utilisés uniquement dans le cas où un côté du tube (côté ailettes) présente un faible coefficient d'échange de chaleur.

Le type d'échangeur de chaleur à tube à ailettes est préférable dans l'industrie, parce qu'il est facile à construire. Dans la littérature on peut trouver beaucoup d'études concernant la géométrie des ailettes et les tubes et leur optimisation. Une analyse des performances d'un échangeur de chaleur à tubes et ailettes a été réalisée. L'objectif de cette étude était de comprendre l'effet de la mauvaise distribution du débit d'air sur l'écoulement de fluide et le transfert de chaleur. Les résultats indiquent que la non-uniformité de l'écoulement de l'air a une grande influence sur l'efficacité de l'échangeur de chaleur. Cette influence est due à la non-uniformité qui peut intensifier la convection thermique de la paroi longitudinale et à la mauvaise distribution de la température intérieure. Les auteurs ont découvert que l'amélioration ou la détérioration du facteur de Colubrin pouvait atteindre 50% par rapport à celles qui sont obtenues par un échangeur de chaleur avec un profil de vitesse de l'air d'entrée uniforme.

Le type d'ailette dans les échangeurs de chaleur affecte beaucoup plus le transfert de chaleur que les tubes. En général, la plupart des études se concentrent sur le profil des ailettes plutôt que sur la géométrie du tube. Dans la pratique on peut trouver plusieurs formes d'ailette tel que les ailettes segmentées, les ailettes annulaires hyperboliques, les ailettes poreuses, les ailettes en plaque inclinées, les ailettes excentriques, les ailettes annulaires à courbe, les ailettes annulaires à pas, les ailettes en forme de barres, les ailettes rectangulaires, etc. Pour les ailettes planes on trouve les ailettes planes simples, les ailettes planes ondulées, les ailettes planes avec des générateurs de turbulent, les ailettes planes poreuses, etc.

VII.2. Ailettes basses intégrales

VII.2.1. Description

Le tube à ailettes basses intégrales permet d'améliorer les propriétés thermiques d'un échangeur de chaleur sans qu'il soit nécessaire de changer la dimension de la coque, L'arrangement d'écoulement ou le repositionnement de la tuyauterie.

La formation « d'ailettes basses », obtenues par extrusion du matériau du tube de base, augmente la surface externe du tube. Elles sont déroulées à partir de la paroi des tubes et sont donc intégrées au tube. Lorsque les ailettes sont formées à partir du tube de base en déroulant le matériau de sa paroi, l'épaisseur de paroi sous la section à ailettes est réduite par rapport à l'épaisseur de paroi aux extrémités lisses. Elles sont un type de tubes extrudés constitués de petites ailettes basses.

Le tube à ailettes basses est très similaire aux types extrudés « à ailettes hautes », mais ces tubes ont le même diamètre que le tube de base. Les tubes à ailettes basses peuvent être utilisés dans les déflecteurs et plaques tubulaires standard. Le principal avantage du tube à ailettes basses est l'amélioration de la surface et un meilleur transfert de chaleur par rapport aux tubes lisses.

Au cours du processus de fabrication, le matériau des ailettes est étroitement enroulé autour de l'extérieur du tube afin de sécuriser le contact métal sur métal de la base de l'ailette avec le tube. Le tube intégral à ailettes basses présente l'avantage de pouvoir améliorer les performances thermiques d'un échangeur thermique sans qu'il soit nécessaire de modifier la taille de la coque, la configuration du flux ou le repositionnement de la tuyauterie. La surface externe du tube est

augmentée par la formation de « petites ailettes » par extrusion directe à partir du matériau du tube de base.

VII.2.1.1. Avantages

Les ailettes basses intégrales fournissent 2,5 à 3 fois la surface externe du tube nu. Cela procure de nombreux avantages pour l'équipement de transfert de chaleur

- ✓ Coût en capital réduit pour le nouvel équipement : une efficacité accrue de l'échange de chaleur signifie qu'il faut moins de tubes Fine-Fin pour effectuer le même transfert de chaleur qu'un tube nu.
- ✓ Réduction des coûts de mise à niveau pour l'équipement existant : les ailettes basses peuvent augmenter les performances d'un échangeur de chaleur existant sans la tâche difficile et coûteuse de construire de nouvelles coques, têtes, buses, tuyauteries et fondations.
- ✓ Espace, poids et économies structurelles : la réduction de l'espace et du poids de la parcelle peut s'avérer extrêmement utile pour la production en mer ou les colonnes de distillation haute altitude. Cette technologie transforme les grands échangeurs tubulaires en échangeurs de chaleur compacts.
- ✓ Plus de matériaux et d'alliages à sélectionner : les tubes à ailettes basses est disponible dans une gamme plus large d'alliages que les tubes traditionnels qui se limitent aux métaux tendres. Cela ouvre un nouveau monde d'opportunités pour des tubes améliorés dans un service corrosif.
- ✓ Réduction du coût de maintenance et du cycle de vie : une sélection appropriée des matériaux peut éliminer les temps d'arrêt et les coûts de maintenance coûteux. Exemple : les raffineries côtières utilisant des systèmes de refroidissement à eau de mer à passage unique peuvent tirer avantage de la substitution des tubes en cuivre-nickel conventionnels par des tubes à ailettes basses en titane.

VII.2.1.2. Applications

Les ailettes basses intégrales sont utilisées au cas où :

- Le transfert de chaleur côté coquille est déterminant.
- Des matériaux de construction coûteux sont nécessaires.
- Déclenchement d'un échangeur existant.
- Mise à niveau ou mise à niveau avec un nouveau matériau de tube.
- Satisfaire à une exigence d'espace ou de poids stricte.

VII.2.2. Efficacité

Elle définit les performances d'une ailette en comparant le flux dissipé à celui qui serait dissipé dans une ailette de mêmes dimensions mais dont la température serait uniforme et égale à celle de la base (conductivité thermique $\lambda \rightarrow \infty$, pas de résistance thermique de conduction donc pas de chute de température dans l'ailette). Le flux échangé par cette ailette idéale serait.

$$Q_{\max} = h p e L (T_0 - T_{\infty})$$

Avec :

h : Coefficient de transfert de chaleur par convection.

T_0 : Température à l'instant 0.

Pour une ailette circulaire de rayon de base r_0 et de rayon externe r_e :

$$Q_{\max} = 2 \pi h (r_e^2 - r_0^2)(T_0 - T_{\infty})$$

L'efficacité de l'ailette η s'écrit donc :

$$\eta = \frac{Q_p}{Q_{\max}}$$

Où Q_i est le flux de chaleur extrait par l'ailette.

Nous en déduisons les relations suivantes :

✓ **Ailette rectangulaire longue ($L \rightarrow \infty$)**

$$\eta = \frac{1}{\omega L}$$

Avec :

$$\omega = \sqrt{\frac{h p_e}{\lambda S}}$$

S : Surface d'échange.

λ : Conductivité thermique.

✓ **Ailette rectangulaire isolée à l'extrémité**

$$\eta = \frac{\tanh(\omega L)}{\omega L}$$

✓ Ailette rectangulaire avec transfert de chaleur à l'extrémité

$$\eta = \frac{\tanh(\omega L) + \left(\frac{h}{\omega \lambda}\right)}{\omega L + \left(\frac{h}{\omega \lambda}\right) \tanh(\omega L)}$$

✓ Ailette circulaire de section rectangulaire

$$Q_p = \sqrt{\frac{2}{hr_0 r_0}} \frac{1}{\left(\frac{re^2}{r_0^2}\right) - 1} \frac{K_1(\omega r_0)I_1(\omega re) - I_1(\omega r_0)K_1(\omega re)}{I_1(\omega re)K_0(\omega r_0) + I_0(\omega r_0)K_1(\omega re)}$$

Avec :

I : Intensité énergétique.

K : Conductance globale d'un échangeur.

VII.2.3. Coefficient de transfert global des échangeurs

Un échangeur de chaleur est un système qui permet de transférer un flux de chaleur d'un fluide Chaud à un fluide froid à travers une paroi sans contact direct entre les deux fluides.

La figure ci-dessous représente d'un échangeur tubulaire simple.

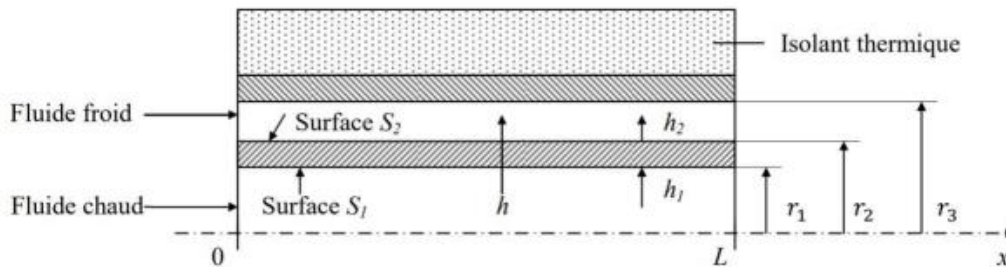


Figure VII.1. Schéma d'un échangeur tubulaire simple

Une première expression du flux de chaleur transféré dans un échangeur peut être déterminée en écrivant qu'il est égal au flux de chaleur perdu par le fluide chaud et au flux de chaleur gagné par le fluide froid pendant leur traversée de l'échangeur.

Le fluide chaud 1 entre dans l'échangeur à la température T_{1e} et en sort à T_{1s} , le fluide froid 2 entre à T_{2e} et sort à T_{2s}

$$Q = \dot{m}_1 c_{p1} (T_{1e} - T_{1s}) = \dot{m}_2 c_{p2} (T_{2s} - T_{2e})$$

Où :

\dot{m}_i : Débit massique du fluide i (kg/ s).

c_{pi} : Chaleur spécifique de fluide i (J/K kg).

Les produits $q_{c1} = \dot{m}_1 c_{p1}$ et $q_{c2} = \dot{m}_2 c_{p2}$ sont appelés les débits calorifiques des deux fluides (W/K)

Le flux de chaleur peut donc finalement s'écrire :

$$Q = q_{c1} (T_{1e} - T_{1s}) = q_{c2} (T_{2s} - T_{2e})$$

Par ailleurs, le flux de chaleur Q transmis d'un fluide 1 à un fluide 2 à travers la paroi d'un tube cylindrique s'écrit :

$$Q = \frac{\Delta T}{\frac{1}{2\pi L h_1 r_1} + \frac{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{2\pi \lambda L} + \frac{1}{2\pi L h_2 r_2}}$$

Avec :

λ : Conductivité thermique.

r_1 : Rayon intérieur de tube.

r_2 : Rayon extérieur de tube.

Le coefficient global de transfert h d'un échangeur de chaleur s'écrit donc :

$$h = \left(\frac{r_2}{h_1 r_1} + \frac{r_2 \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{\lambda} + \frac{1}{h_2} + R_{en} \right)^{-1}$$

R_{en} est une résistance thermique due à l'encrassement des surfaces d'échange dont il faut tenir compte après quelques mois de fonctionnement (entartrage, dépôts, corrosion, etc.).

VII.2.4. Coefficient de film à la condensation sur des tubes à ailettes horizontaux

Les condenseurs horizontaux à coque équipés de tubes radiaux à ailettes basses sont couramment utilisés pour condenser les réfrigérants et autres fluides organiques. La tension superficielle de ces condensats est généralement inférieure à 35 dynes/cm. Avec des fluides ayant une tension superficielle élevée, le condensat peut combler l'espace entre les ailettes, ce qui entraîne un mauvais drainage du condensat et des coefficients de transfert de chaleur inférieurs à ceux des tubes ordinaires. Par conséquent, l'espacement des ailettes est une considération importante pour ces

condensats Beatty et Katz ont étudié la condensation du propane, du n-butane, du n-pentane, du dioxyde de soufre, du chlorure de méthyle et du fréon-22 sur des tubes à ailettes horizontaux simples, et ont développé une corrélation de Nusela modifiée qui s'adapte aux données expérimentales à $\pm 10\%$ près. La corrélation est basée sur un diamètre équivalent qui permet de représenter le transfert de chaleur des ailettes et de la surface primaire par un seul coefficient moyen de transfert de chaleur. La corrélation peut être énoncée comme suit :

$$h = 0.689 \left[\frac{k_L^3 \rho_L (\rho_L - \rho_V) g \lambda}{\mu_L \Delta T_f D_e} \right]^{1/4}$$

Avec :

λ : Chaleur latente de la vaporisation.

μ_L : Viscosité du liquide.

μ_V : Viscosité de la vapeur.

ρ_L : Densité du liquide.

ρ_V : Densité de la vapeur.

k_L : Conductivité thermique du liquide.

g : Accélération gravitationnelle.

Ici ΔT_f est la différence de température à travers le film de condensat et le diamètre

Équivalent, D_e est défini par l'équation suivante :

$$D_e^{-0.25} = \frac{1.30 \eta_f A_{fins} E^{-0.25} + A_{prime} D_r^{-0.25}}{\eta_w A_{Tot}}$$

Avec :

η_f : Efficacité des ailettes.

η_w : Efficacité pondérée de la surface à ailettes.

A_{fins} : Surface de toutes les ailettes.

A_{prime} : Surface primaire.

$A_{tot} = A_{fins} + A_{prime}$

D_r : Diamètres du tube radulaire.

$E : \pi (r_2^2 - r_1^2) / 2r_2$

r_2 : Rayon de l'ailette.

$r_1 = D_r/2$: Rayon du tube.

Le taux de transfert de chaleur à travers le film de condensat est donné par :

$$q = W\lambda = hn_t\eta_w A_{tot}\Delta T_f$$

L'arrangement de cette équation donne :

$$\lambda/\Delta T_f = hn_t\eta_w A_{tot}/W = h\eta_w A_{tot}/(\Gamma L)$$

Avec :

nt : Nombre de tubes

L : Longueur du tube

W : Taux de condensation

Ici, $\Gamma = W/ntL$ est la charge de condensat par tube.

En substituant ce résultat dans l'équation précédente, on obtient :

$$h = 0.689 \left[\frac{k_L^3 \rho_L (\rho_L - \rho_V) g \eta_w (A_{Tot}/L)}{\mu_L D_e \Gamma} \right]^{1/4} h^{1/4}$$

En résolvant pour h , on obtient :

$$h = 0.609 \left[\frac{k_L^3 \rho_L (\rho_L - \rho_V) g \eta_w (A_{Tot}/L)}{\mu_L D_e \Gamma} \right]^{1/3}$$

Cette équation est valable pour une seule rangée de tubes. Pour un faisceau de tubes Horizontales, Γ est remplacé par la charge effective, $\Gamma^* = W / \ln n_t^{2/3}$

Les coefficients de condensation des tubes à ailettes ont tendance à être sensiblement plus élevés que ceux des tubes lisses, à condition qu'il y ait une bonne évacuation du condensat de la surface à ailettes. Cependant, la corrélation Beatty-Katz ne tient pas compte de l'effet de la tension superficielle sur le drainage du condensat. Par conséquent, elle peut surestimer le coefficient de transfert de chaleur pour de très petits espacements entre les ailettes si la tension de surface du condensat est relativement élevée. Les corrélations qui incluent les effets de la tension de surface sont discutées par Kraus et al, qui présentent également une méthode d'estimation de l'espacement minimal des ailettes compatible avec un bon drainage pour un condensat donné.

VII.3. Ailettes hautes intégrales

VII.3.1. Généralités

Les tubes à ailettes sont généralement utilisés dans la production ou le retubage des échangeurs de chaleur refroidis par air. La pièce doit ce nom à sa conception. Airco-Fin est votre fournisseur de confiance en tubes à ailettes, avec de nombreuses années d'expérience dans sa production. De nombreuses parties de l'industrie font confiance aux tubes à ailettes de haute qualité que nous pouvons fournir. Nous produisons des tubes à ailettes à partir d'une bande d'aluminium enroulée autour d'un tube métallique. Ce tube, servant de base à un tube à ailettes, peut être réalisé en tout métal parfaitement conforme à l'application à laquelle il est destiné. Nous sommes heureux de vous en dire plus sur l'application et la production de nos tubes à ailettes.

Il existe plusieurs types de tubes à ailettes hautes, notamment :

- ✓ Ailettes intégrales.
- ✓ Bimétallique.
- ✓ Ailette enroulée sous tension.
- ✓ Ailette encastrée.
- ✓ Ailette brasée.

Gamme de produits de tubes à ailettes en aluminium extrudé "tubes à ailettes intégrales".

- ✓ Tubes intégrés à ailettes basses.
- ✓ Tubes à ailettes intégrales moyennes hautes.
- ✓ Tubes en U à ailettes basses.
- ✓ Tubes à ailettes basses avec nervure interne.
- ✓ Bobines de tubes à ailettes basses.
- ✓ Tubes à ailettes hautes.
- ✓ Tubes ondulés.
- ✓ Tubes à ailettes hautes.

VII.3.2. Description

Les tubes à ailettes en aluminium extrudé, communément appelé « à ailettes intégrales », sont formés à partir d'un tube d'aluminium à paroi épaisse dans lequel peut être inséré un tube lisse de matériau différent. Lors du passage dans la machine qui forme les ailettes, l'aluminium est étiré à froid, ce qui lui confère des propriétés mécaniques exceptionnelles (grande rigidité, résistance à la corrosion accrue, etc.). Les fortes pressions exercées sur le tube d'aluminium lors du procédé de fabrication permettent d'assurer un contact parfait entre le tube intérieur et le tube d'aluminium. Par ailleurs, le tube intérieur est complètement recouvert d'aluminium, aucune

corrosion ne peut se loger entre le tube et l'ailette. C'est d'ailleurs cette particularité qui confère au tube à ailettes intégrales sa supériorité à garder un échange fiable et durable par rapport aux autres technologies d'ailettes.

A. Spécifications des tubes bimétalliques à haute ailette

Tube de base : Diamètre :	De Ø 8 mm à Ø 50.8 mm	
	De Ø 3/10 pouce à Ø 2 pouce	
	Matériau :	Différents types
Ailettes :	Hauteur des ailettes :	De 9,55 mm à 15,88 mm
		De 3/8 pouce à 5/8 pouce
	Nombre d'ailettes :	De 197 par mètre à 472 par mètre
		De 5 par pouce à 12 par pouce
	Matériau :	Aluminium et cuivre (limité)

Les tubes à ailettes monométalliques n'ont pas de tube de revêtement avec les Ailettes solidaires du tube, Les ailettes sont produites intégralement par un processus de Laminage de fils 'Température 310°C (590°F)'.

B. Spécifications des tubes monométalliques à haute ailette

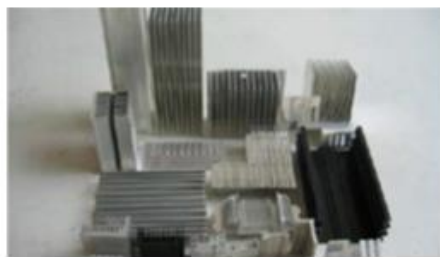
Tube de base : Diamètre :	De Ø 10 mm à Ø 38,1 mm	
	De Ø 4/10 pouce à Ø 1,5 pouce	
	Matériau :	Aluminium, cuivre, laiton
Ailettes :	Hauteur des ailettes :	Jusqu'à 9,5 mm
		Jusqu'à 3/8 pouce
	Nombre d'ailettes :	De 197 par mètre à 433 par mètre
		De 5 par pouce à 11 par pouce

VII.3.3. Refroidissement à air

Dans le cas où les composants sont faiblement contraints thermiquement, la solution la plus utilisée Aujourd'hui est le dissipateur à air. Dans ce cas, l'échange thermique entre le dissipateur et le milieu Ambiant est à la fois convectif et radiatif. Il peut être utilisé avec un ventilateur (convection forcée) Ou sans (convection naturelle) Dans ce dernier cas, le mouvement est dû à une simple différence de température au sein d'un milieu. Dans le cas de la convection naturelle et

pour l'ordre de grandeur des températures qui nous intéressent, le coefficient d'échange équivalent ne dépasse pas $15 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$. Afin d'avoir un ordre d'idée de l'efficacité de ce type d'échange thermique, nous donnerons l'exemple d'une dissipation de 1 W sur une surface de 100 cm^2 . (Ordre de grandeur de la surface d'un petit module de puissance). Dans ce cas, l'échauffement est d'au moins 66°C ($\Delta T = \Phi / HS$).

La nécessaire augmentation de la puissance dissipée passe donc par l'augmentation de la surface d'échange entre le dispositif et le milieu ambiant. La solution la plus rencontrée est le radiateur à ailettes sur la Figure (a) mais il existe d'autres types de dissipateurs à air comme les 'nids d'abeille' sur la Figure (b) avec un coefficient d'échange équivalent proche de $300 \text{ W m}^{-2}\text{K}^{-1}$ ce qui correspond à une réduction d'un rapport 20 de l'élévation de la température.



(a) radiateur à ailettes



(b) nids d'abeilles

Figure VII.2. Exemples de radiateurs à air (ailettes et nids d'abeilles)

Pour la convection forcée avec des ventilateurs et en utilisant des gros dissipateurs à ailettes sur la Figure, ce coefficient d'échange équivalent peut augmenter jusqu'à $2000 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ selon la société Avide spécialisée dans le refroidissement des composants électroniques.



Figure VII.3. Exemples de systèmes de refroidissement à air pulsé

Les principaux avantages de cette technique de refroidissement sont le coût et la facilité de mise en œuvre. C'est donc la solution qui sera privilégiée dans la plupart des cas. Nous pouvons ajouter que ce type de refroidisseur peut être utilisé sans problème dans des applications hautes température, ses performances augmentant même avec la température. Néanmoins, il dispose de deux défauts importants. Le premier est la limitation en termes de densité de flux de chaleur dissipée par les composants qui reste inférieure à $100 \text{ W m}^{-2}\text{K}^{-1}$.

. Le deuxième est qu'il n'est pas possible d'utiliser cette solution dans les cas où le système électronique est confiné (circulation d'air difficile ou impossible). Afin d'offrir une réponse à ces deux limites, nous allons voir dans la partie suivante qu'il est possible d'associer un caloduc au dissipateur.

VII.3.3.1. Puissance de refroidissement

Dans la pratique, le refroidissement par air est souvent utilisé pour refroidir les fluides de Procédé ayant une température élevée ($> 80^\circ\text{C}$) jusqu'à un niveau auquel le refroidissement par Eau sera plus approprié. L'intensité de l'échange de chaleur est liée à la différence de température entre l'air de refroidissement et le fluide de procédé. La température maximale de Conception de l'air de refroidissement ne devrait, en pratique, être dépassée que quelques heures Par an. La température de conception dépend de la température de bulbe sec, et les conditions Climatiques sont très importantes.

Étant donné que la capacité thermique de l'air est faible ($1,0 \text{ kJ/kg K}$) et que le coefficient de Conduction et de convection est faible, il faut une plus grande quantité d'air et une surface D'échange thermique plus importante qu'avec le refroidissement par eau. C'est la raison pour Laquelle des ailettes sont souvent placées à la surface du tube pour augmenter la surface effective d'échange de chaleur. Sur la base de considérations économiques, une approche minimale de 10 à 15°C est utilisée dans la conception des refroidisseurs par air. Cela entraîne généralement des températures finales plus élevées (minimum $40\text{-}45^\circ\text{C}$), même si dans des zones où les Températures de l'air ambiant sont plus élevées. Pour les configurations indirectes, l'approche ($13\text{-}20^\circ\text{C}$) et les températures finales réalisables ($50\text{-}60^\circ\text{C}$) augmenteront en conséquence.

VII.3.3.2. Aspects environnementaux

Les principaux aspects environnementaux sont le bruit et l'utilisation d'énergie pour le fonctionnement des ventilateurs. Il n'y a pas de consommation d'eau, sauf si elle est utilisée Comme

fluide de refroidissement secondaire dans une conception indirecte. Toutefois, le système étant fermé, cette eau nécessite peu ou pas de maintenance. Le nettoyage de l'extérieur Des tubes (à ailettes) est nécessaire et parfois des problèmes peuvent se poser du fait de l'accumulation de débris atmosphériques et de petits insectes.

VII.3.3.3. Applications

Les échangeurs de chaleur par air sec sont utilisés dans de nombreuses industries de petite et de grande taille. Ils servent à refroidir les produits dans l'industrie chimique et pétrochimique, pour la condensation à vide dans les centrales électriques et pour le refroidissement des gaz d'échappement. Pour une même puissance, le refroidissement par air sec requiert une plus grande surface que le système de refroidissement par voie humide, et les systèmes par voie sèche sont généralement considérés comme étant plus onéreux. Dans les sites de production électrique, le refroidissement par air sec est toutefois utilisé dans des situations spécifiques où la production d'électricité est prévue sur des emplacements où les approvisionnements en eau sont insuffisants pour le refroidissement par voie h.

VII.4. Conclusion

Suivant ce présent travail, on conclut :

- ✓ Les ailettes jouent un rôle rentable dans le domaine des échangeurs de chaleur.
- ✓ L'efficacité des ailettes triangulaires est la meilleure parmi les autres ailettes.
- ✓ Les paramètres géométriques et thermo physiques influent sur l'efficacité des ailettes, en effet, on a vu par les résultats des courbes :
- ✓ Les valeurs élevées de la conductivité thermique et de l'épaisseur améliorent l'efficacité des ailettes.
- ✓ La diminution des coefficients d'échanges de chaleur par convection et la longueur d'ailettes améliorent l'efficacité des ailettes.
- ✓ Pour que la dissipation de flux de chaleur soit optimum, on a Am, op (volume par unité de largeur) est inversement proportionnelle à la conductivité k , ce que nous donne une liberté de remplacer la matière des ailettes pour réaliser un gain sur le poids.
- ✓ Les ailettes en cascade nous permettent de les utiliser dans des cas spécifiques.
- ✓ Le logiciel " MAPLE " résout l'équation de la chaleur et donne la solution analytique de la distribution de température et l'efficacité des différentes ailettes avec une Grandes précision.
- ✓ Grandes précisions.

- ✓ En fin, il est important pour les études prochaines de développer des recherches autour les ailettes, surtout dans les cas multidimensionnels instationnaires et aussi en proposant d'autres formes géométriques.