RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR

ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE



Faculté de Technologie
Département de génie Mécanique

Projet de Fin d'Etudes

POUR L'OBTENTION DU DIPLÔME DE MASTER

An Génie Climatique, Énergie et froid industriel

Sous la direction du Dr. M. AZIZOU – U.Y.F.Médéa

ETUDE DE L'INFLUENCE DE GEOMETRIE D'AILETTES SUR LES PERFORMANCES D'UN CONDENSEUR A UNE MACHIN A ADSORPTION

Présenté par :

- **MOSTEFAOUI Saddam Hocine**
- **HAMDADOU Soufian**

Promotion : Juin 2017

Remerciements

Nous remercions Allah, le glorieux, le miséricordieux, pour m'avoir donné la santé, la volonté et le courage pour mener à bien ce travail.

*Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude et sincères remerciements à notre encadreur Mr. **Mohamed AZIZOU** de l'U.Y.F. Médéa, d'avoir dirigé ce travail.*

Nous tenons à lui exprimer aussi, notre profonde reconnaissance pour tous ces conseils qu'il n'a cessé de nous prodiguer avec tout le temps qu'il a consacré pour l'élaboration de ce projet, dont nous exprimons toute notre gratitude et nos respects.

Nos remerciements s'adressent également à monsieur le Président de jury et les membres du jury pour l'honneur qu'ils nous font d'avoir assister à notre soutenance.

Nos vifs remerciements aussi à Mr. REBHI RIDHA, et Tous deux maîtres assistants à l'université de MEDEA, pour avoir accepté d'être examinateurs de ce travail.

Un grand merci à tout l'ensemble des enseignants de la spécialité « Génie climatique» qui ont contribué à notre formation.

Que tous ceux qui ont contribué de loin ou de près à ce projet veuillent bien accepter ici nos sincères salutations.

Dieu Merci

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à tous ceux qui me sont chers

A ceux qui ont fait de moi ce que je suis :

Ma très chère MERE pour qui je n'oublierai jamais sa grande affection; son soutien et ses encouragements ; tout le long de mes études.

_ A mes très chers frères et soeurs.

_ A mes très chers amis (es).

_ A toute la famille HAMDADOU

_ A mon promoteur Mr .M. AZIZOU

_ A tout mes collègues de la promotion 2016-2017.

_ A tous ceux qui me sont chers et qui ne sont plus aujourd'hui de ce monde.

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à tous ceux qui me sont chers

A ceux qui ont fait de moi ce que je suis :

Ma très chère MERE pour qui je n'oublierai jamais sa grande affection; son soutien et ses encouragements ; tout le long de mes études.

_ A mes très chers frères et soeurs.

_ A mes très chers amis (es).

_ A toute la famille MOSTEFAOUI

_ A mon promoteur Mr .M. AZIZOU

_ A tout mes collègues de la promotion 2016-2017.

_ A tous ceux qui me sont chers et qui ne sont plus aujourd'hui de ce monde.

ملخص

في الشركات الصناعية مبادل للحرارة هو عنصر أساسي لحسن استعمال الطاقة واهم المشاكل تتعلق بدراسة ابعاد هدا المبادل. لذلك قمنا بدراسة عددية للسلوك الديناميكي والحراري لتدفق السوائل لتحسين أداء مبادلات الحرارة في الحالة البسيطة والحالة مع أجنحة ولمعرفة الفرق بين هذين الحالتين و رؤية تحسن الأداء في المبادلات الحرارية إذا قمنا بتغيير هندسة زعانف.

كلمات مفتاحية آلة التبريد، والامتزاز ي، زعنفة مكثف علم الهندسة

Résumé

Dans les sociétés industrielles l'échangeur de chaleur est un élément essentiel pour la maitrise de l'énergie, les problèmes relevant de la thermo hydraulique concernent avant tout le dimensionnement thermique des appareils. Pour cela, dans ce travail on va étudier numériquement le comportement dynamique et thermique d'un écoulement en convection forcée pour deux fluides pour améliorer les performances des échangeurs de chaleur dans le cas simple et le cas avec des ailettes dans la veine d'écoulement des fluides, pour avoir la différence entre ces deux cas, et pour voir la net amélioration des performances dans l'échangeurs de chaleur si on changeait la géométrie des ailettes.

Mots clés : machine frigorifique**,** adsorption, condenseur, ailette. Géométrie.

Abstract

In industrial societies, the heat exchanger is an essential element for the control of energy, the problems related to thermo hydraulics concern above all the thermal dimensioning of the devices. In this work, we will study numerically the dynamic and thermal behavior of a forced convection flow for two fluids to improve the performance of heat exchangers in the simple case and the case with fins in the flow vein of Fluids, in order to have the difference between these two cases, and to see the marked improvement in performance in the heat exchangers if the geometry of the fins were changed.

Key words: refrigeration machine, adsorption, condenser, fin (wings) geometry.

SOMMAIRE

Remerciements

Dédicaces

Résumés

Sommaire

Liste des Figures

Liste des tableaux

Nomenclateur

Chapitre I : les différents systèmes de la machine frigorifique

I-1-Historique 3

I-2-Définition d'une machine frigorifique : 4

I-3-Classification des machines frigorifiques : 4

I-3-1 Classification par source d'énergie absorbée 4

I-3-1-1 Systèmes frigorifiques consommant de l'énergie mécanique ……4

I-3-1-2 Systèmes frigorifiques consommant de l'énergie calorifique .. ……..5

I-3-2 Classification selon le mode de fonctionnement ……...5

I-3-2-1 Les phénomènes de transfert thermique……..5

I-3-2-2 Machine utilisant la vaporisation d'un frigorigène 5

I-4- Les différant type de la machine frigorifique 7

I-4-1 les machine frigorifique a compression..... 7

I-4-1-1 Principe de fonctionnement d'une machine à compression 8

I-4-1-2 avantages et inconvénients 9

I-4-2 les machines éjecto-compresseur 9

I- 4-2-1 Les domaines d'applications 9

I-4-2-2 Différents éléments de la machine 10

I-4-2-3 Critères de choix des fluides de travail 12

I-4-2-4 Principe de fonctionnement de la machine frigorifique 12

I-4-2-5 Avantages et inconvénients de l'éjecteur 12

I-5- Machines frigorifiques à sorption 14

I-5-1- Théories du phénomène de sorption dans les systèmes de réfrigération 14

SOMMAIRE

I-5-2 Machines à absorption 16
I-5-2-1 Principe de l'absorption 16
I-5-2-2 Différentes technologies d'absorption disponibles 16
I-5-2-3 Avantages et inconvénients des machines à absorption 19
I-5-3 Machines à adsorption 19
I-5-3-1 Principe de l'adsorption 19
I-5-3-2 Description d'une machine frigorifique à adsorption 20
I- 5-3-3 Principe de fonctionnement 20
I-5-3-4 Différentes technologies d'adsorption disponibles 22
I-5-3-5 Avantages et inconvénients des machines à adsorption. 22

Chapitre II : Echangeurs de chaleur lié à la machine frigorifique

II-1- Définitions d échangeurs de chaleur 24
II-2-Critères De Classement Des Echangeurs 24
II-2-1 Types de contact 24
II-2-1-1 Échangeurs à contact direct 24
II-2-1-2 Échangeurs à contact indirect 24
II-2-2 classement suivant les types d'échange 24
II-2-2-1 Échangeur sans changement de phase 24
II-2-2-2 Échangeur avec changement de phase 24
II-2 -3 Classement suivant la disposition des écoulements 25
II-2-4 Classement fonctionnel 25
II-2-5 Classement suivant la compacité de l'échangeur 25
II-2-6 Classement suivant la nature du matériau de la paroi d'échange 25
II-2-7 Classement technologique 26
II-3-Principe de l'échangeur de chaleur 26
II-4-Fonctionnement 26
II-5-Différents types d'échangeurs de chaleurs 26
II-5-1 Echangeurs de chaleur tubulaires 27
II-5-1-2 : Les avantages et les inconvénients d'un échangeur tubulaire 28
II-5-2 Échangeur à tubes en U 28
II-5-3 Échangeur à faisceau tubulaire horizontal 29
II-5-4 Echangeur à faisceau tubulaire vertical 31

SOMMAIRE

II-5-5 Echangeur à spirales 32
II-5-6 Echangeur a plaques 33
II-5-7 Échangeur de chaleur rotatif 35
II-5-7-1 Colonne de Bouhy 35
II-5-7-2 Échangeur à bloc 36
II-5-8 Échangeur à ailettes 37
II-5-8-1 Choix de l'échangeur à ailettes 38

II-6-Généralités sur les ailettes 38

II-6-1 Différents types d'ailettes 38
II-6-1-1 Ailettes continues 39
II-6-1-1-1 Les ailettes planes et lisses 40
II-6-1-1-2 Les ailettes corrigées 40
II-6-1-1-3 Les ailettes persiennes 40
II-6-1-2 Ailettes indépendantes 41
II-6-1-2-1 Ailettes transversales 41
II-6-1-2-2 Ailettes longitudinales 42

Chapitre III : résultats et discussions

III-1 Introduction 43
III-2 Le condensation dans un échangeur de chaleur sans ailettes 44
III-2-1 Introduction 44
III-2-1 L'analyse 46

III-3 : Les Echangeurs de chaleur avec les ailettes 47
III-3-1 Les Géométrie 47
III-3-2 L'effet de la forme géométrique sur le début de la variation de température . 48
III-3-2-1 Introduction 48
III-3-3 Gradient de température 54
III-3-3-1 Cercle 54
III-3-3-2 rectangle 55
III-3-3-3 triangle 56
III-3-3-4 Les trios forme 57
III-3-3-4-1 Introduction 57

III-3-3-5-2 L’analyse 58

III-4 conclusion générale 59

Bibliographique

Annexe

Liste des tableaux

Tableau II-1 : les avantages et les inconvénients et les utilisations d'un échangeur à tubes en U **29**

Tableau II-2 : les avantages et les inconvénients et les utilisations d'un échangeur tubulaire horizontal **30**

Tableau II-3 : les avantages et les inconvénients et les utilisations d'un échangeur à faisceau tubulaire vertical **32**

Tableau II-4 : les avantages et les inconvénients et les utilisation d'un échangeur a plaques **34**

Tableau II-5 : les avantages et les inconvénients et les utilisations d'un échangeur a bloc

Tableaux III-1 : la variation de titre en fonction de temps 35

Tableaux III-2 : la variation de température en fonction de temps 37

Tableaux III-3 : la variation de température en fonction de temps 46

Tableaux III-4 : la variation de température en fonction de temps 55

Tableaux III-5 : la variation de température en fonction de temps 57

Liste des figures

Figure. I-1 : Les types des machines frigorifiques 7

Figure. I-2 : Schéma d'une machine à compression 8

Figure I- 3 : Schéma d'une machine à éjecto-compresseur 10

Figure I- 3 : Système de réfrigération par sorption. 13

Figure I- 4 : schéma d'une Machines à absorption 17

Figure. I-5 : Schéma d4une machine frigorifique à adsorption 21

Figure I-6 : Schéma d4une machine frigorifique solaire à adsorption 21

Figure II-1 : Schéma d'une Echangeurs de chaleur tubulaires 27

Figure II-2 : Schéma d'un échangeur à tubes en U 28

Figure II-3 : Schéma d'un échangeur tubulaire horizontal 30

Figure II-4 : Schéma d'un Echangeur à faisceau tubulaire vertical 31

Figure II-6 : Schéma d'un échangeur à spirale 33

Figure II-7 : Schéma d'un échangeur a plaques 34

Figure II-8 : échangeur colonne de Bouhy 35

Figure II-9 : schéma d'un échangeur a bloc 36

Figure II-10 : Echangeur batterie à ailettes utilisé dans les aéroréfrigérants 37

Figure II-11 : Ailettes continues ou indépendantes pour tubes 39

Figure II-12 : Détail d'une ailette persienne 40

Figure II-13 : Ailettes indépendantes 41

Figure II-14 : Ailettes annulaires ou spiralées 42

Figure II-15 : exemple d'une ailette longitudinale 42

Figure III-1 : Différentes positions pour le début de condensation 44

Figure III-2 : Profils de titres en fonction de temps 45

Figure III-3 : profil de titres en fonction de temps 47

Figure III-4 : Géométrie de l'échangeur de chaleur avec les ailettes 48

Figure III -5 : Variation de température à l'instant 0s 49

Figure III -6 : Variation de température à l'instant 60s 50

Figure III -7 : Variation de température à l'instant 120s 51

Figure III -8 : Variation de température à l'instant 180s 52

Figure III -9 : Variation de température à l'instant 240s 53

Figure III -10 : Variation de température à l'instant 270s 54

Figure III-11 : Profile de grade température en fonction de temps 55

Figure III-12 : Profile de grade température en fonction de tempe 56

Figure III-13 : Profile de grade température en fonction de tempe 57

Figure III-14 : profile de grade température en fonction de tempe 57

des matières n'a été trouvée.

NOMENCLATURE

$\mathbf{T_f}$: Température une froid [K]

$\mathbf{T_i}$: Température intermédiaire [K]

$\mathbf{T_{ch}}$: Tempirateur de chaleur [K]

$\mathbf{T_c}$: Tempirateur de condenseur [K]

$\mathbf{P_c}$: pressions de condenseur [Kpa]

$\mathbf{Q_c}$: chaleur de condenseur (kWh)

$\mathbf{Q_E}$: chaleur d'évaporateur (kWh)

$\mathbf{T_E}$: Tempirateur d'évaporateur [K]

$\mathbf{P_E}$: pression d'évaporateur [K]

A privation

DEC : Dessicant evaporative cooling

COP : coefficient de performance

Indice

V : Vanne

introduction générale

Introduction générale

De nos jours, les échangeurs de chaleur sont utilisés dans de nombreux domaines à savoir (automobile, fusée, moteur Stirling, centrale nucléaire, centrale thermique, etc.).

Il existe plusieurs types d'échangeurs ; on peut citer, de façon non exhaustive, les échangeurs à plaques, multicanaux, à faisceau de tubes. Ces derniers sont des modèles largement répandus. Ils présentent l'avantage de proposer une grande surface de transfert de chaleur et une fabrication simple, le type d'écoulement des fluides peut être : à courant co-courant, contre courant et à courant croisé où les deux fluides transitent perpendiculairement. L'écoulement dans un faisceau de tubes à co-courant a été largement étudié ces dernières années.

L'installation frigorifique est l'ensemble des composants avec les quels une machine de production de froid fonctionne, elle englobe les systèmes d'échange de chaleur, les différentes sources d'énergie...etc.

Le principe des échangeurs thermiques est simple, ce sont des appareils destinés à transférer de la chaleur entre deux fluides à des températures différentes donc elle font appel essentiellement aux mécanismes de transfert thermiques ; leurs technologies, leurs conceptions et leurs développements influent directement sur la performance d'une installation frigorifique ou autre installation utilisant ces échangeurs.

Le souci d'améliorer les performances de ces échangeurs thermiques et les exigences nouvelles en matière de qualité des procédés nécessitent une connaissance complète du fonctionnement de ces appareils. Il se pose alors le problème de l'étude précise de leur comportement dynamique en régime laminaire où la majorité des études existantes correspondent à ce régime.

L'intensification des performances thermiques de l'échangeur thermique a été réalisée par la fixation des ailettes fixes sur la paroi des tubes, ce cas a été ainsi intensément étudié. Actuellement, divers travaux ont montré que cette performance peut être encore améliorée en employant des ailettes poreuses.

L'étude présentée dans ce mémoire est basée en réalité sur d'autre études telles que les échangeurs tubulaires munis d'ailettes solides et à co-courant et les échangeurs munis d'ailettes poreuses ou enveloppé avec des couches poreuses ,

Cette étude s'inscrit dans le cadre de la compréhension des phénomènes de transfert de chaleur dans un échangeur de chaleur à courant croisé unis des tubes à ailettes poreuses et solides

Introduction générale

Pour réduire la difficulté et la complexité de la simulation de transfert de chaleur dans le faisceau de tube à ailettes, on a supposé que le régime d'écoulement est stationnaire et la surface (Aa) des ailettes poreuses et solide est la même. Le code «CFX» nous a aidé à simplifier la démarche de modélisation et nous a donné une vue plus claire d'échanges de chaleur soit entre et dans les ailettes où dans le faisceau de tubes lui-même.
Noter étude il est envisagé l'étude de l'influence de la géométrie d'ailettes sur la performance de l'échangeur de chaleur en utilisant la simulation numérique .la simulation numérique a été faite du code de calcul CFX .

Le présent mémoire de trois chapitre, Dans le premier chapitre comporte les différant système de la machine frigorifique.

Le deuxième chapitre en donne des généralités sur les échangeurs de chaleurs (cas général) et notamment les échangeurs de chaleur a ailettes et les défirent géométrie des ailettes

Le troisième chapitre c'est le dernier chapitre qui représente une étude sur les échangeurs a ailettes et sans ailettes par une simulation numérique de L'ANSYS.

Enfin une conclusion générale sur le problème étudié et sur les perspectives de cette étude.

chapitre I
Généralité sur la machine frigorifique

I-1-Historique

L'application du froid, se voit d'un rôle important dans la préservation des aliments, car ces derniers d'un entrepose à la température ambiante périssent rapidement est ce la de la croissance rapide des bactéries.

En 1685 le physicien français FHILIPPE de la Hire fut le 1er a produit artificiellement de la glace, en enveloppant sel d'ammoniac humide, une toile pleine d'eau fraiche, mais c'est seulement dans la 1ere moitie du XIXème siècle que sur ce principe**. [1]**

Une première description du cycle frigorifique pour la production de froid a été donnée en1805 par l'américain *Oliver Evans* (1755-1819). Mais c'est à l'américain *Jacob Perkins* (1766-1849), qui travaillait en Angleterre que nous devons le premier brevet. Et un premier modèle fonctionnant à l'éther éthylique. (1835). Les premières machines à compression qui eurent un succès industriel sont le fait d'un écossais émigré en Australie, James Harrison (1816-1893) (brevets en 1855-56-57). Les machines étaient fabriquées en Angleterre, elles pouvaient produire de la glace ou refroidir des denrées. Le frigorigène était toujours l'éther éthylique**.**

En 1869 *Charles TELLIER*, ingénieur français, développa la première installation pouvant servir à conserver les aliments, puis en 1874 développa la machine frigorifique à compression de vapeur pour conserver la viande et le transporter **[2]** et en 1857 *Ferdinand Carre* réalise la première machine frigorifique à compression, le développement des machines frigorifiques est relié aux changement des fluides frigorigènes.**[3]**

La fabrication industrielle des réfrigérateurs électriques à usage domestique a commencé dans les années 1920 aux États-Unis, et à usage domestique a commencé dans les années 1935, en Europe.

Dans les années 1930, la découverte et l'utilisation du fréon conduisit à la création de réfrigérateurs encore plus efficaces**. [2]**

Le principe de refroidissement par absorption a été démontré vers la fin du 19ème siècle(1859), mise au point par un français, Ferdinand carré. Le fluide utilisé est un mélange binaire, il se compose d'eau et d'acide Sulfurique. Mais le fonctionnement se faisait de façon discontinue dis ans plus tard. FERDINAND Carré a adopté le mélange (eau/ammoniac) et il a obtenu par la même occasion un fonctionnement continu.

De 1950 à 1965, l'absorption connaît un succès commercial important, en particulier aux États-Unis ; deux couples sont alors en compétition : ammoniac/eau (NH3/H2O) et eau/bromure de lithium (H2O/BrLi**). [4]**

I-2-Définition d'une machine frigorifique :

Une machines frigorifique, est une machine thermodynamique destinée à assurer le froid d'un local ou d'un système à partir d'une source de chaleur externe dont la température est supérieure à celle du local ou du système à refroidir.

C'est donc un système de froid qui transfère des calories d'un milieu à haute niveau de température vers un milieu où la température doit être inférieur.

L'écoulement naturel de la chaleur s'effectuant toujours d'un corps froid vers un corps chaud, on peut définir également la machine frigorifique comme un matériel permettant de réaliser l'écoulement de chaleur inverse du sens naturel, c'est–à–dire d'un milieu chaud versus milieu froid. Une dépense d'énergie sera bien entendu inévitable pour réaliser ce transfert inverse. L'énergie nécessaire pour assurer le transfert doit être inférieure à l'énergie calorifique utile pour que le système ait un quelconque intérêt**. [5]**

Généralement la machine frigorifique à pour éléments principaux :

- Le compresseur
- Le détendeur
- Le condenseur
- L'évaporateur

I-3-Classification des machines frigorifiques

I-3-1 Classification par source d'énergie absorbée

- **I-3-1-1 Systèmes frigorifiques consommant de l'énergie mécanique**

Parmi ces systèmes, on trouve essentiellement les systèmes frigorifiques à compression de vapeur qui transfèrent de l'énergie calorifique d'un niveau de température : Inférieur Tf vers un niveau de température supérieur Ti. Ils sont donc au moins di-thermes.

D'après le second principe de la thermodynamique, ils doivent nécessairement consommer de l'énergie pour effectuer cette opération**.**

- **I-3-1-2 Systèmes frigorifiques consommant de l'énergie calorifique :**

Le principe de fonctionnement de ces systèmes consiste à extraire ou fournir une quantité de chaleur en consommant de l'énergie calorifique. Ils sont constitués d'au moins trois sources de chaleur :

- ✓ source froide, à la température Tf
- ✓ source intermédiaire ou puits de rejet thermique à la température Ti
- ✓ source fournissant de la chaleur" motrice" à la température T_{ch} **[6]**

I-3-2 Classification selon le mode de fonctionnement

❖ I-3-2-1 Les phénomènes de transfert thermique :

Pour extraire de la chaleur d'un milieu « froid » (source froide) vers un milieu chaud (puits de chaleur) un fluide frigorigène est utilisé comme vecteur, celui-ci est le siège de phénomènes physico-chimiques permettant de prélever, de transférer et de restituer la chaleur. Ainsi donc, pour extraire de la chaleur d'une source froide le fluide frigorigène subit en contact d'une source, un phénomène endothermique (qui consomme de la chaleur).

De la même manière, pour extraire la chaleur stockée par le fluide frigorigène afin de la restituer à la source chaude un phénomène exothermique (qui dégage de la chaleur) est utilisé. Dans la majeure partie des cas, une série de transformations qui ramène, périodiquement, le frigorigène dans son état initial, est décrite. Le cycle de fonctionnement ainsi décrit est appelé cycle frigorifique**.**

❖ I-3-2-2 Machine utilisant la vaporisation d'un frigorigène :

La présentation de ces machines utilisant le phénomène de vaporisation d'un frigorigène, la manière dont les vapeurs issues de l'évaporateur sont aspirées permette de distinguer les différents types des machines suivantes**. [7]**

- ✓ **a)Machine frigorifique à compression :**

Les vapeurs issues de l'évaporateur sont aspirées par un compresseur mécanique. En raison de leur simplicité ces machines sont les plus répandues, consommant exclusivement de l'énergie mécanique, elles entrent dans la catégorie des systèmes au moins diathermes.

- ✓ **b) Machine frigorifique à éjection :**

Les vapeurs du cycle frigorifique sont aspirées mécaniquement par un éjecteur. Celui-ci fonctionne grâce à l'énergie cinétique de la vapeur motrice (généralement de même nature que la vapeur de frigorigène) qui, par l'injecteur I, pénètre dans la partie convergente, II, de l'éjecteur. La compression du mélange des vapeurs motrice et de frigorigène s'effectue dans la partie divergente, ces systèmes ont une application assez rare.

- ✓ **c) Machine frigorifique à adsorption :**

La fixation de la vapeur de frigorigène se fait ici sur la surface d'un solide qui est l'adsorbant. Il présente une grande affinité pour le frigorigène. L'adsorption de la vapeur s'accompagnant d'un fort dégagement de chaleur, surtout dans le cas de la formation d'un composé chimique, l'adsorbeur, relié à l'évaporateur du système frigorifique, doit comporter donc un échangeur interne de refroidissement. La masse de frigorigène adsorbé est limitée par la capacité d'adsorption de l'adsorbant. Contrairement aux autres systèmes qui permettent une production continue de froid, les systèmes à adsorption ont un fonctionnement intermittent

L'extraction du frigorigène adsorbé se faisant par chauffage, les systèmes à adsorption entrent dans la catégorie des systèmes au moins tri-thermes et sont très peu utilisés en pratique.

- ✓ **d) Machine frigorifique à absorption :**

Pour ce type de machine, l'aspiration de la vapeur de frigorigène se fait par l'intermédiaire d'un liquide absorbant qui présente une grande affinité pour ce fluide. La vapeur est absorbée par tout le volume du liquide absorbant et l'aspiration à lieu. L'évaporateur est relié à l'absorbeur, à l'intérieur duquel est pulvérisée en permanence la solution absorbante pauvre en frigorigène, afin d'accroître la surface de contact avec la vapeur de frigorigène.

Le liquide absorbe la vapeur du fluide frigorigène donnant lieu à l'aspiration d'une nouvelle masse de frigorigène issue de l'évaporateur

La solution enrichie en frigorigène (solution riche) quitte l'absorbeur, et elle est dirigée vers un autre point de la machine où, par chauffage, on procède à l'extraction du frigorigène fixé.

Les systèmes à absorption appartiennent donc à la catégorie des systèmes frigorifiques au moins tri thermes. L'absorption du frigorigène par la solution absorbante est exothermique ce qui impose l'usage d'un échangeur de chaleur pour le refroidissement de la solution absorbante. Les systèmes à absorption ont été les premières machines frigorifiques industriellement opérationnelles. Le développement des systèmes à compression les a confinés dans des applications bien précises**.**

Les deux types de machine frigorifique qui nous intéressent dans notre étude ; sont actuellement les plus répondus :

La machine à compression mécanique, qui est de loin la plus utilisé, et la machine à absorption, qui peut fonctionner sans électricité, avec de l'énergie solaire**. [8]**

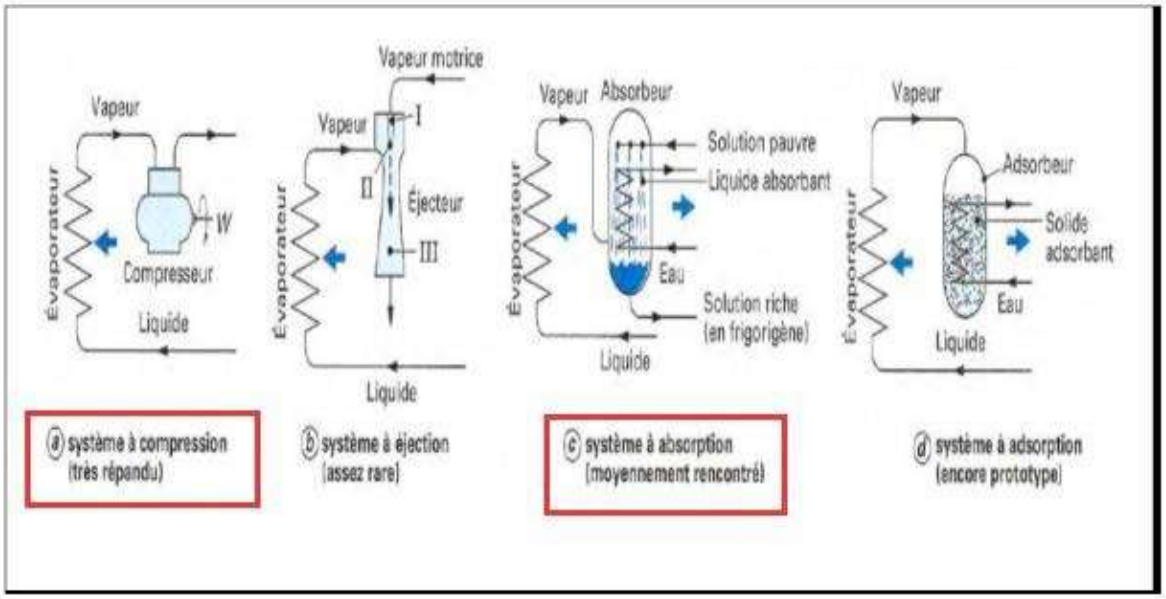
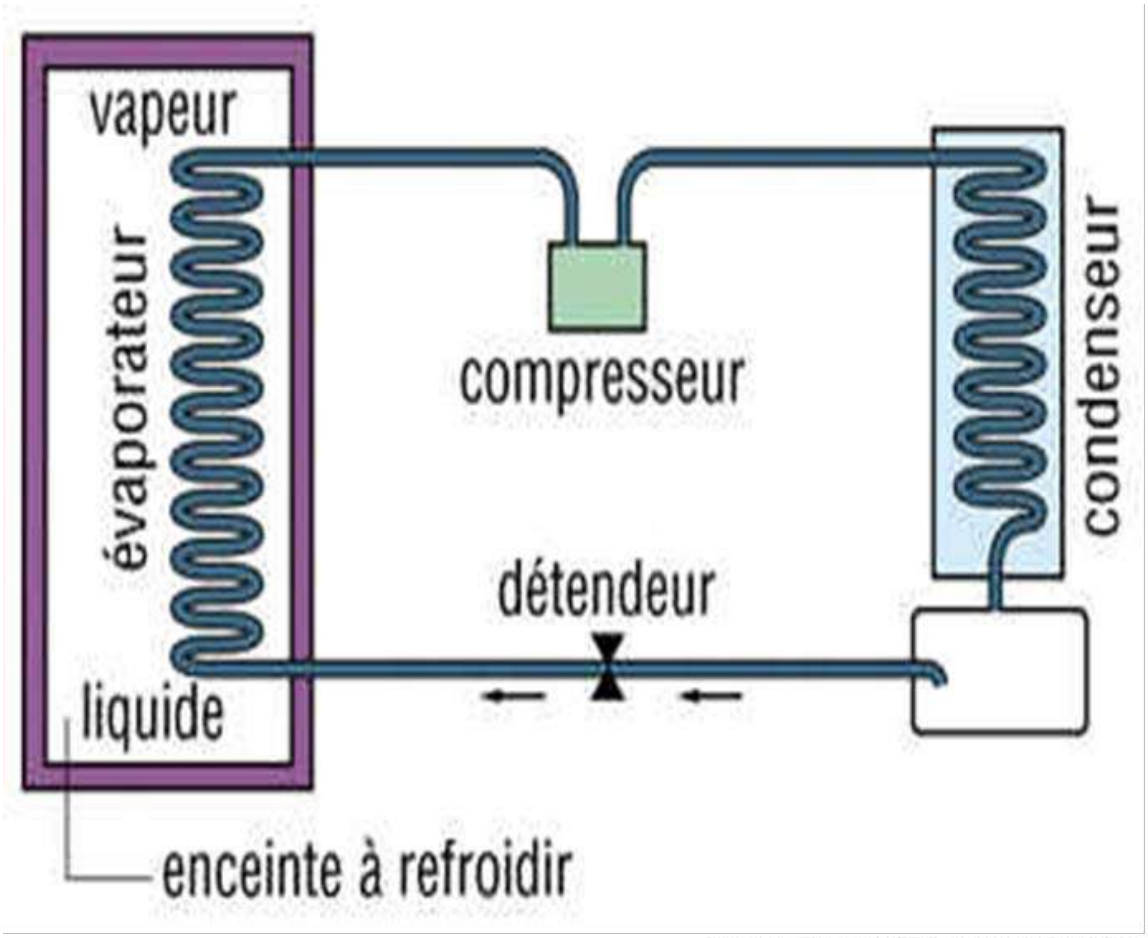


Figure. I.1 : les types des machines frigorifiques [8]

I-4- Les différant type de la machine frigorifique

I-4-1 les machine frigorifique a compression :

Elles comprennent une enceinte, « l'évaporateur », où se vaporise le fluide frigorigène sous l'effet d'une dépression (entretenue par une pompe) ; le fluide gazeux est ensuite comprimé dans une autre enceinte entraînant une production de chaleur ; il passe à nouveau par l'évaporateur et le cycle recommence. Pour de grandes installations, on utilise une compression en deux ou plusieurs phases avec refroidissement des vapeurs entre deux étages consécutifs. Ces machines ont un excellent rendement.



Source : Internet Yahoo encyclopédie

Figure I-2 : schéma d'une machine à compression

I-4-1-1 Principe de fonctionnement d'une machine à compression

Une machine frigorifique est composée de 4 organes principaux où circule un fluide frigorigène permettant le transfert des calories d'un milieu vers un autre.

1. Compresseur

Le fluide frigorigène à l'état gazeux est aspiré par le compresseur. Comprimé, il est ensuite refoulé à haute pression et haute température.

2. Condenseur

Au travers de son passage dans le condenseur, le fluide frigorigène cède des calories au milieu dans lequel il se trouve.

En cédant des calories, il condense passant de l'état gazeux à l'état liquide à haute pression.

3. Détendeur

Au travers de son passage dans le détendeur, la pression du fluide frigorigène va chutter. Lors de cette détente, sa température va chutter également.

4. Evaporateur

- Lors de son passage dans l'évaporateur, le fluide frigorigène absobe les calories du milieu dans lequel il se trouve.
- En absorbant des calories, il s'évapore passant de l'état liquide à l'état gazeux à basse pression.

I-4-1-2 avantages et inconvénients :

Les avantages :

- Montée rapide en froid et froid plus intense en cas de forte chaleur extérieur.
- Possibilité de fabriquer des appareils d'un volume important 300 litres et plus.
- Besoin d'une aération arrière moins importante qu'a vécu un réfrigérateur à Absorption

Les inconvénients

- Bruit régulier (compresseur=moteur).Notez que les compresseurs d'aujourd'hui ont fait d'énormes progrès et qu'un appareil à compression de qualité fait moins de bruit qu'un PC allumé toute la journée dans bureau.
- Petits appareils beaucoup plus rares(en petite profondeur pour encastrement par exemple).
- Consommation électrique supérieur à un frigo à absorption à volume équivalent.
- Source unique d'énergie : besoin de courant pour alimenter le moteur électrique

I-4-2 les machines éjecto-compresseur

Dans ce type de machines frigorifiques, le compresseur mécanique est remplacé par un éjecteur. Il est composé d'une chambre de mélange où arrive la vapeur motrice à travers une tuyère et la vapeur aspirée mais aussi d'un diffuseur où le mélange se comprime et est éjecté vers le condenseur. Les installations diffèrent selon qu'on emploie des fluides chlorofluorés (les plus utilisées) ou de la vapeur d'eau.

I- 4-2-1 Les domaines d'applications:

Le froid a des applications dans le domaine médical (hibernation artificielle, conservation des embryons,…), l'industrie alimentaire (conservation des aliments, mûrissement retardé des fruits et des légumes), l'industrie chimique et pétrochimique (récupération des solvants, liquéfaction des gaz,…), l'industrie métallurgique et mécanique (montage à froid), le génie

civil (refroidissement du béton,…) et le conditionnement des locaux industriels et d'habitation (climatisation)

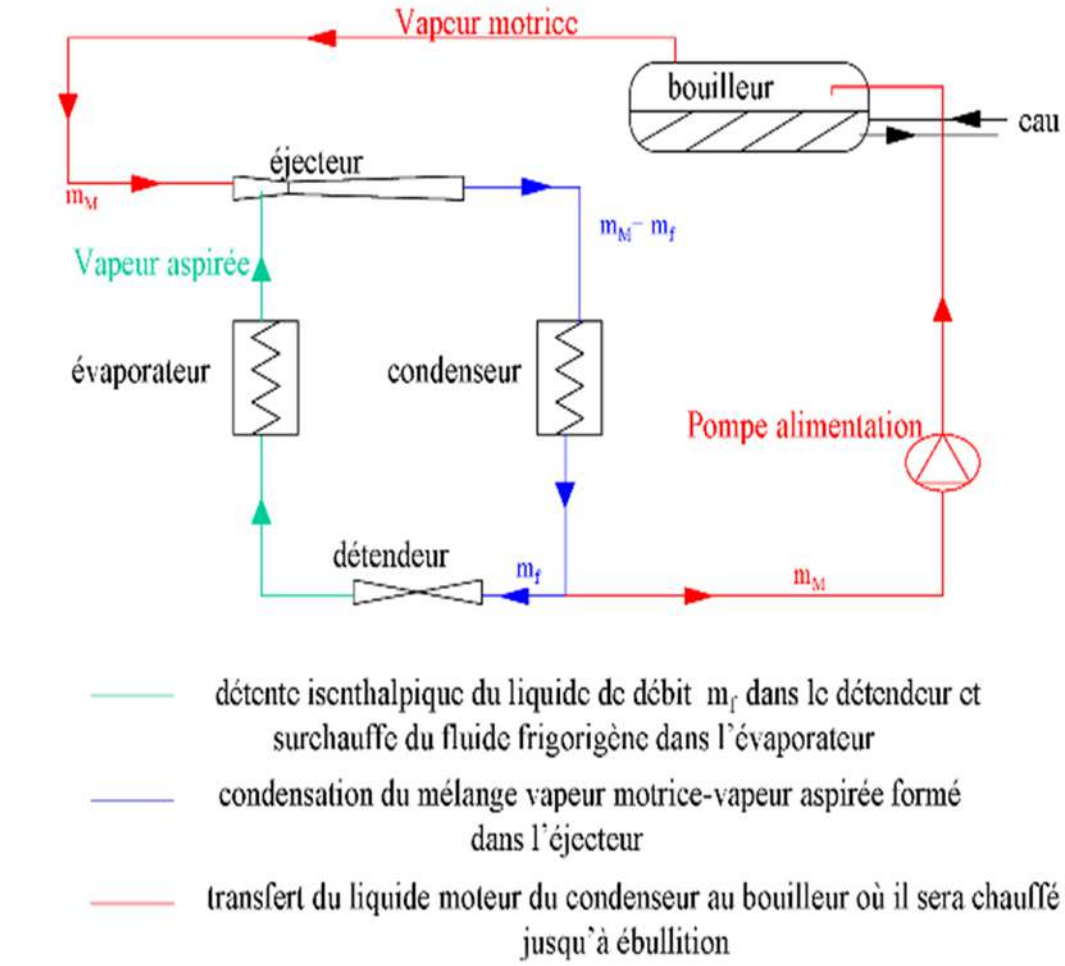


Figure I- 3 : schéma d'une machine à éjecto-compresseur

I-4-2-2 Différents éléments de la machine :

a) Bouilleur :

La solution contenant le fluide primaire (ou moteur) reçoit la quantité de chaleur QB cédée par le bouilleur à une température TB ce qui provoque la vaporisation du fluide. La boucle motrice comprend la pompe qui comprime le liquide puisé du condenseur et assure la circulation du débit moteur (ma) jusqu'à l'éjecteur.

b) Condenseur :

II est analogue à celui des machines à compression de vapeur ; la chaleur substituée cours d'un cycle frigorifique au milieu à refroidir est évacuée dans un condenseur par agent de refroidissement. Son rôle est de refroidir le mélange à sa sortie de l'éjecteur une température TC et une pression PC, d'évacuer la quantité de chaleur puisée au niveau l'évaporateur dans le milieu à refroidir. Donc, la condensation du frigorigène nécessite le de la chaleur de condensation QC à la température TC.

L'échange de chaleur s'effectue entre le fluide frigorigène et un fluide de refroidissement qui peut être liquide (eau en général) ou gazeux (air). On notera que le phénomène condensation s'effectuant à température constante, seule la température du fluide refroidissement varie.

c) Evaporateur :

L'évaporateur est un échangeur de chaleur dans lequel la transmission de chaleur s'effectue du milieu à refroidir vers le fluide de refroidissement circulant dans le circuit frigorifique. Le milieu à refroidir peut être soit un fluide gazeux, soit un fluide liquide.

Le fluide de refroidissement quant à lui est toujours un fluide liquide qui est un fluide frigorigène.

A la sortie du condenseur, le liquide subit une détente à travers le détendeur puis s'évapore en prenant la chaleur QE au fluide ou à l'enceinte à refroidir. La température d'évaporation TE et la pression la plus basse PE, sont fixées par la température de la source froide

d) Ejecteur :

L'éjecteur est l'élément essentiel du système tri thermes à éjecto-compresseur. Il est composé d'une tuyère motrice et d'une tuyère secondaire en trois parties, partie convergente, chambre de mélange, partie divergente du diffuseur. L'éjecteur est l'élément où s'effectue le mélange des deux fluides (primaire et secondaire). C'est aussi un compresseur statique qui sert augmenter la pression, donc, c'est un élément moteur de la machine dans laquelle le fluide moteur aspire le fluide de la boucle frigorifique. La partie active de l'éjecteur consiste en système de deux tuyères coaxiales liées par un collecteur d'aspiration.

Le fluide moteur sous pression est admis à l'entrée de la tuyère primaire, arrivé dans le collecteur, il entraîne le fluide secondaire issu de l'évaporateur. Les deux courants fluides pénètrent ensuite dans la seconde tuyère où après mélange, ils sont comprimés dans le diffuseur jusqu'à la pression du condenseur.

Un éjecteur a le grand avantage d'être d'un prix de revient sensiblement inférieur à celui d'une pompe classique, de ne posséder aucune pièce en mouvement donc d'être d'un entretien quasi nul, et de bien résister à la corrosion ou aux attaques de gaz agressifs.

Donc un éjecteur est un dispositif élevant la vitesse d'un fluide dans une section étranglée pour y créer une dépression et y attirer un autre fluide. La tuyère primaire réalise la conversion de l'enthalpie en énergie cinétique.

Dans le diffuseur l'énergie cinétique du mélange est convertie en énergie de pression.

I-4-2-3 Critères de choix des fluides de travail :

L'amélioration du fonctionnement du système peut être obtenue par la recherche d'un fluide optimal. La sélection du meilleur fluide de travail dans un système thermodynamique quelconque a toujours été un problème important en génie thermique, car chaque système a ses propres besoins. Le cas d'un système frigorifique à éjecto-compresseur n'est pas une exception. Donc, le choix de la paire de fluides à utiliser dans cette machine frigorifique à éjecto-compresseur, pour optimiser son fonctionnement, est une tache qui n'est pas toujours facile pour Les caractéristiques demandées au fluide de travail voir chapitre V

I-4-2-4 Principe de fonctionnement de la machine frigorifique :

Le but de ce paragraphe est de présenter le principe de fonctionnement de la machine frigorifique tritherme à éjecto-compresseur. La vapeur motrice provenant d'une buse d'alimentation pénètre dans la tuyère de détente d'un éjecteur et aspire la vapeur en provenance de l'évaporateur. La première partie de l'éjecteur étant de forme convergente, la vitesse de la vapeur s'accroît tandis que simultanément sa pression diminue.

La vapeur de fluide frigorigène se trouve donc aspirée par la vapeur du fluide primaire, le mélange pénétrant ensuite dans la partie divergente de l'éjecteur ; là, la vitesse du mélange diminue tandis que la pression augmente jusqu'à atteindre la pression de condensation. Dans

cette installation, le moto-compresseur est remplacé par l'éjecteur qui va réaliser le processus de compression en utilisant l'énergie cinétique du fluide moteur pour aspirer, entraîner et comprimer le fluide secondaire. Le fonctionnement de toute l'installation commence par la partie liquide du fluide qui, comprimé par une pompe, est envoyé au bouilleur ou il prendra la chaleur pour être vaporisé. Cette vapeur se détend à haute pression et température, dans la tuyère primaire, avant d'aspirer et entraîner la vapeur issue de l'évaporateur. Le mélange des fluides comprimés sera envoyé au condenseur, pour la liquéfaction, avec le dégagement de chaleur pour former le cycle moteur. L'autre partie commence par la détente dans le détendeur puis traverse l'évaporateur pour s'évaporer en créant l'effet frigorifique. Ce fluide sera aspiré par le fluide primaire pour être entraîné vers le condenseur, pour clôturer le cycle secondaire ou frigorifique. Donc les condensas qui se sont formés dans le condenseur sont renvoyés pour partie à la chaudière de production de vapeur vive par l'intermédiaire d'une pompe et pour partie vers l'évaporateur. On remarque que dans ce système, la pompe est le seul appareil qui a des parties en mouvement. Dans l'appareil à jet de vapeur (ou éjecteur de vapeur), il y a compression mécanique et l'on peut donc classer ce type de machine dans la catégorie de celles fonctionnant sur le principe du cycle frigorifique à compression ; mais comme l'énergie (que l'on pourrait appeler par analogie d'entraînement) utilisée est la chaleur, le cycle idéal de référence est un cycle double de CARNOT.

La figure (I-3) simplifiée représente le principe de fonctionnement du système : la partie (ma) du fluide en phase liquide issue du condenseur est comprimée par la pompe qui élève la pression de PC à PB. Puis, ce fluide prend de la chaleur au bouilleur, se vaporise. Le mélange de deux fluides pénètre dans le condenseur à la pression PC. Le cycle primaire du système (appelé cycle moteur ou cycle chaud) est ainsi terminé. L'autre partie (mB) du fluide, issue du condenseur, traverse le détendeur où sa pression diminue de PC à PE

Puis, le liquide va s'évaporer dans l'évaporateur pour être ensuite aspiré par le jet primaire. Le mélange comprimé retourne au condenseur. Le cycle secondaire (ou cycle froid) est bouclé.

I-4-2-5 Avantages et inconvénients de l'éjecteur :

- Au lieu d'utiliser les énergies nobles (Energie électrique, Energie cinétique…), le cycle à éjecto-compression utilise les énergies thermiques gratuites ou non nocives (Energie solaire).
- Il recycle les énergies perdues en forme de chaleur.

- Il à un système mécanique très simple sans pièces en mouvement.
- Il ne demande pas d'entretien ou une maintenance couteuse (pas de lubrification ou de friction).
- La fabrication d'une machine de réfrigération avec éjecteur supersonique est très simple.
- Grande sécurité d'emplois.
- Le système à éjecteur a une étanchéité parfaite du cout :
  - ✓ Les fluides frigorigènes utilisés ne causent pas de pollution à l'environnement.
  - ✓ Le système de réfrigération peut fonctionner à des niveaux de pression très basses ce qui, permet l'utilisation des fluides frigorigènes inédits comme par exemple l'eau.
- Grande variété de matériaux pour le construire.
- La plupart des gaz et les réfrigérants peuvent être utilisés.
- Pas de limite de température (sauf pour les martiaux).
- Signalons à ce propos que l'un des problèmes pratique rencontrés lors de l'utilisation d'un éjecteur dans un cycle, sont ses performances qui dépendent beaucoup de ces conditions de fonctionnement : le rapport de compression obtenu est bien évidemment fonction du rapport d'entrainement, mais une variation de ce dernier induit une modification de la géométrie optimale de l'éjecteur qui est bien évidemment impossible à réaliser. Il s'ensuit qu'un éjecteur s'adopte mal à un fonctionnement hors conditions de design.

I-5- Machines frigorifiques à sorption

I-5-1- Théories du phénomène de sorption dans les systèmes de réfrigération :

La réfrigération par sorption utilise l'attraction physique ou chimique entre un couple de substance pour le but de produire le froid. Une sorption a une capacité unique de transformer l'énergie thermique directement en puissance de refroidissement. La substance a plus faible température d'ébullition est appelée le sorbat et l'autre est appelée le sorbant. Le sorbat joue le rôle de fluide frigorigène **[9]**

En outre, nous pouvons résumer le phénomène de sorption en deux processus principaux :

1- La sorption suivant un cycle fermé suivant un processus d'adsorption ou d'absorption. L'absorption se réfère à un processus de sorption ou un sorbant liquide ou solide absorbe les molécules de réfrigérant dans son intérieur avec de modification physique et/ou chimique

dans le processus. L'adsorption, d'autre part, se réfère à un sorbant solide qui attire les molécules de réfrigérant sur sa surface par force physique ou chimique, et ne change pas sa forme dans le processus.

2- La sorption en cycle ouvert appelée aussi système a dessiccation (Dessicant Evaporative Cooling, DEC) ou un sorbant, c'est-à-dire un déshydratant, absorbe l'humidité de l'air humide. Les cycles de sorption ouvert sont classés soit en liquide ou solide selon le cycle dessicatif en fonction de la phase de la déshydratation utilisée **[9].**

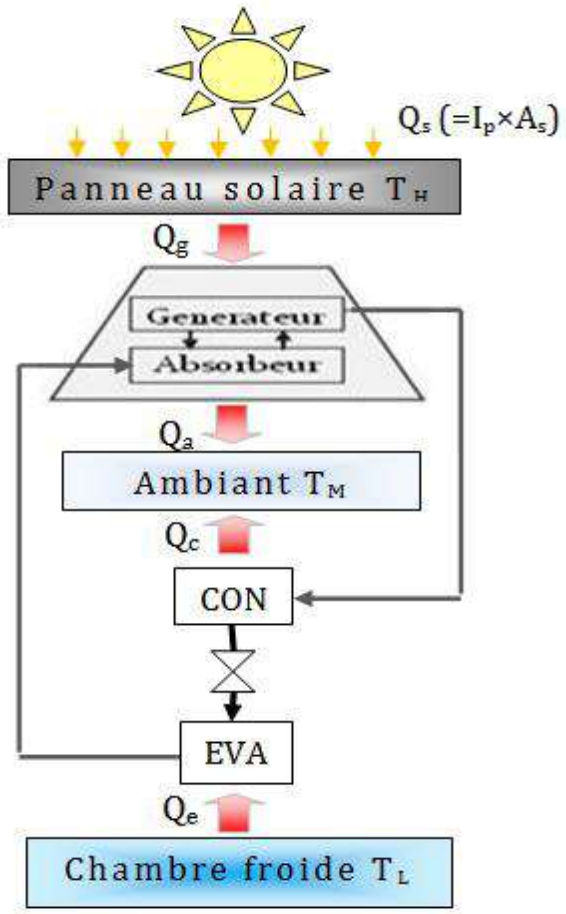


Figure I. 3 : Système de réfrigération par sorption. [9]

I-5-2 Machines à absorption :

Les machines à absorption sont les systèmes frigorifiques thermiques les plus répandus dans le monde.

I-5-2-1 Principe de l'absorption :

Du point de vue de l'évaporateur et du condenseur, le principe général de fonctionnement d'une machine à absorption est le même que pour un système de refroidissement à compression classique : A l'évaporateur, le liquide est vaporisé en récupérant de la chaleur d'un circuit à basse température. La vapeur est ensuite compressée pour atteindre un niveau de pression supérieur et se condense à haute température dans le condenseur. Dans le cas d'une machine à absorption, la compression de la vapeur n'est pas effectuée via un compresseur, mais grâce au couplage de deux composants : l'absorbeur et le générateur. Ainsi, la compression du réfrigérant est effectuée en utilisant une solution liquide réfrigérant/sorbant et une source de chaleur qui remplace la consommation électrique d'un compresseur électrique. **[10]**

Le cycle à absorption passe par les étapes suivantes :

- Evaporation du réfrigérant dans l'évaporateur, ce qui a pour effet d'extraire la chaleur d'une source de chaleur à faible température. Cette étape est à l'origine du rafraîchissement utile et désiré du bâtiment.
- Le réfrigérant est ensuite dirigé vers l'absorbeur dans lequel il est absorbé par une solution concentrée d'absorbant. La chaleur latente d'absorption ainsi que le chaleur de mélange doivent être rejetés. Pour cela, une tour de refroidissement est habituellement utilisée.
- La solution diluée est ensuite pompée vers le générateur dans lequel l'énergie solaire est utilisée pour

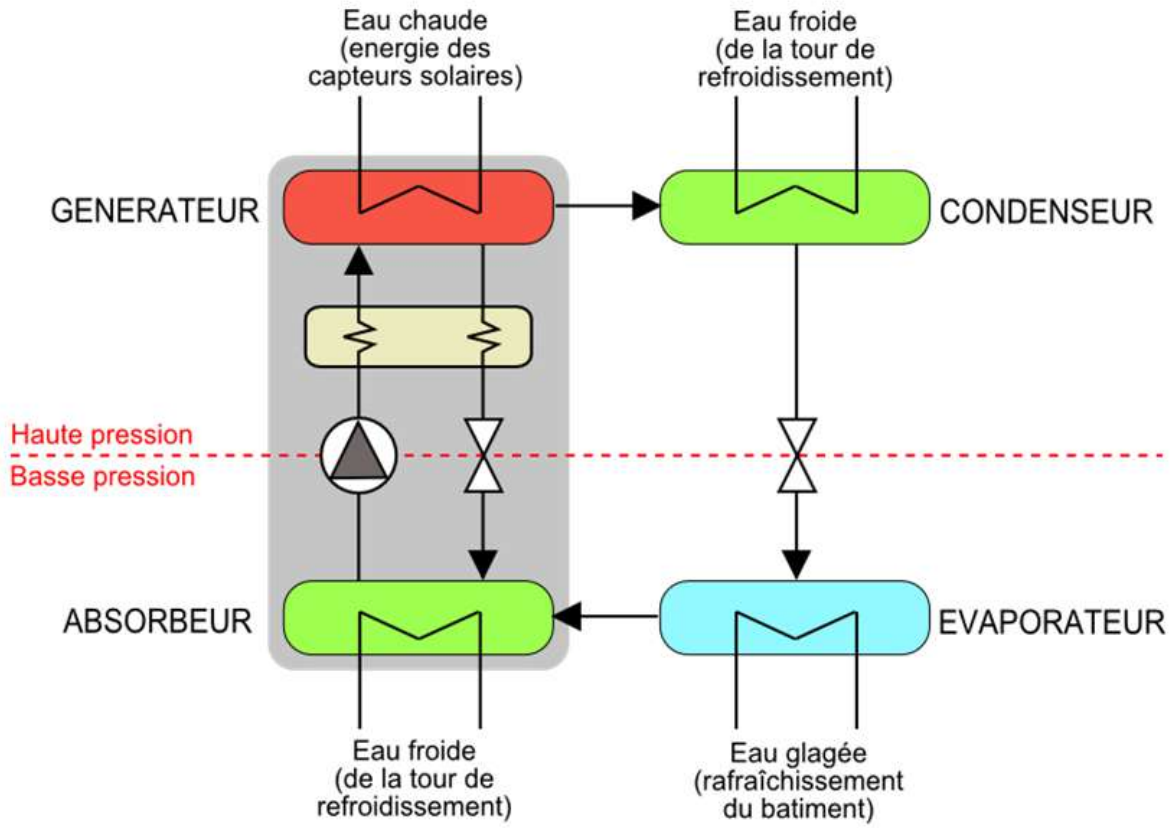


Figure I -4 : schéma d'une Machines à absorption [11]

Le cycle à absorption passe par les étapes suivantes :

- Evaporation du réfrigérant dans l'évaporateur, ce qui a pour effet d'extraire la chaleur d'une source de chaleur à faible température. Cette étape est à l'origine du rafraîchissement utile et désiré du bâtiment.

- Le réfrigérant est ensuite dirigé vers l'absorbeur dans lequel il est absorbé par une solution concentrée d'absorbant. La chaleur latente d'absorption ainsi que le chaleur de mélange doivent être rejetés. Pour cela, une tour de refroidissement est habituellement utilisée.

- La solution diluée est ensuite pompée vers le générateur dans lequel l'énergie solaire est utilisée pour chauffer la solution au dessus de son point d'ébullition. Ainsi, le réfrigérant et d'absorbant concentré sont séparés. Le réfrigérant sous forme vapeur et sous haute pression est envoyé vers le condenseur, et l'absorbant concentré est renvoyé vers l'absorbeur.

- Le réfrigérant se condense alors, et l'énergie libérée par ce changement de phase doit être évacuée. Pour cela, une tour de refroidissement est habituellement utilisée, de même que pour l'absorbeur.

- La pression du réfrigérant est ensuite brutalement réduite en passant à travers une vanne de détente avant de retourner dans l'évaporateur.

I-5-2-2 Différentes technologies d'absorption disponibles :

Habituellement, pour produire de l'eau glacée à une température supérieure à 0°C, le couple H2O/LiBr est utilisé avec l'eau comme réfrigérant. Cependant, d'autres couples sont possibles comme le couple H2O/LiCl ou encore NH3/H2O permettant de produire aussi de l'eau glacée à des températures inférieures à 0°C

De nombreuses machines à absorption sont disponibles sur le marché, cependant habituellement la capacité frigorifique de ces machines est de l'ordre de quelques kW. Pendant plusieurs années, la plus petite machine disponible avait une capacité de 35 kW. Pour une machine à simple effet, la température de la source chaude doit habituellement être au dessus de 80°C (certaines fonctionnement encore jusqu'à 65°C, une fois mis en régime nominal), le coefficient de performance est alors de l'ordre de 0,6 à 0,8. Les machines à double effet utilisant un générateur sur deux étages nécessitent habituellement une température d'au moins 140°C, mais peuvent atteindre des COP de 1 à 1,2.

Néanmoins grâce à de récents progrès dans la filière, plusieurs constructeurs proposent désormais des machines de capacités inférieures à 50kW (jusqu'à 10 kW). Pour les problématiques de rafraîchissement et climatisation solaire, ce sont ces machines qui sont les plus souvent adoptées. De plus, récemment un modèle de machine simple effet a été conçu pouvant fonctionner à plus faible température : à partir de 65°C, et ayant un COP toujours aux alentours de 0,7. Cela montre le fort potentiel d'amélioration des performances des machines à absorption. Les nouveaux développements pour les machines de petites et moyennes capacités ont étés récemment réalisés par les fabricants européens et asiatiques dans le but de couvrir les besoins de rafraîchissement pour des bâtiments de faibles surfaces de l'ordre de 200 m² à 500 m². Les fabricants européens sont implantés en Allemagne, Autriche, Espagne, Suède, Italie, et Portugal. La plupart de ces récents matériels sont déjà testés dans des installations pilotes, de recherche ou de démonstration.

5-2-3 Avantages et inconvénients des machines à absorption :

Avantage :

- ✓ Technologie sensiblement plus mature que les autres technologies de froid solaire
- ✓ Coefficient de performance plus élevé (de l'ordre de 0,6 à 0,8)

Inconvénients :

- ✓ Nécessité de plus hautes températures au générateur
- ✓ Les éléments mobiles sont plus nombreux (pompe) d'où une consommation électrique légèrement plus importante**. [12]**

I-5-3 Machines à adsorption :

I-5-3-1 Principe de l'adsorption :

Ici, au lieu d'une solution liquide, un matériau solide (un adsorbant) est utilisé.

La machine comprend deux compartiments remplis d'adsorbant (compartiments 1 et 2), un évaporateur, et un condenseur. **[13]**

L'adsorbant du premier compartiment est régénéré par chauffage (eau chaude solaire), la vapeur d'eau ainsi générée étant envoyée dans le condenseur où elle se condense. L'eau liquide, via une vanne de détente, est envoyée à basse pression dans l'évaporateur où elle s'évapore (phase de « production de froid »).

L'adsorbant du compartiment 2 maintient la basse pression en adsorbant cette vapeur d'eau. Ce compartiment doit être refroidi pour entretenir le processus d'adsorption. Lorsque la production de froid diminue (saturation de l'adsorbant en vapeur d'eau), les fonctions des deux compartiments sont permutées par ouverture et fermeture de clapets

I-5-3-2 Description d'une machine frigorifique à adsorption :

Le schéma de principe d'une machine frigorifique à adsorption est représenté dans la figure (I.5). Dans le cas le plus simple, la machine comporte les composants suivants:

- Un adsorbeur (contenant l'adsorbant solide, en contact avec une source chaude, il joue pour le cycle à adsorption, le rôle joué par le compresseur (aspiration et compression) dans un cycle à compression de vapeur.
- Un condenseur : en contact avec une source intermédiaire dans lequel le réfrigérant se condense à la pression de condensation.
- Un réservoir, qui sert à stocker le réfrigérant liquide provenant du condenseur.
- Une vanne de détente V3.
- Un évaporateur, en contact avec la source froide, dans lequel le réfrigérant se vaporise à pression d'évaporation.
- Deux clapets anti-retour V1 et V2 **[14]**

I- *5*-3-3 Principe de fonctionnement :

Au début de cycle, les vannes V1, V2 et V3 sont fermées, l'adsorbeur se trouve à sa température minimale, l'adsorbant est chargé d'une masse maximale d'adsorbat. En chauffant l'adsorbeur, la pression du gaz adsorbé augmente au fur et à mesure que sa température augmente, la masse adsorbée reste constante. Lorsque la pression atteint celle du condenseur (pression haute), la vanne V2 s'ouvre, la vapeur désorbée circule vers le condenseur où elle se liquéfie à la température de condensation et le condensât est stocké dans le réservoir.

Le chauffage continue jusqu'à ce que l'adsorbeur soit en équilibre avec la température de la source chaude où la température atteint sa valeur maximale. À ce moment, le refroidissement de l'adsorbeur commence. Sa pression diminue et la vanne V2 se ferme.

La vanne V3 s'ouvre, le condensât stocké dans le réservoir se détend et entre dans l'évaporateur, sa pression chute de la pression du condenseur jusqu'à celle de l'évaporateur (pression basse). Lorsque la pression qui règne dans l'adsorbeur atteint celle de l'évaporateur, la vanne V1 s'ouvre et l'adsorbeur qui se trouve en légère dépression, aspire la vapeur produite dans l'évaporateur. L'effet utile de refroidissement se produit lors de l'évaporation. Le refroidissement de l'adsorbeur continue jusqu'à ce qu'il atteint sa température minimale, où l'adsorbant est saturé en adsorbat. Les vannes V1et V3 se ferment et un autre cycle commence **[14]**

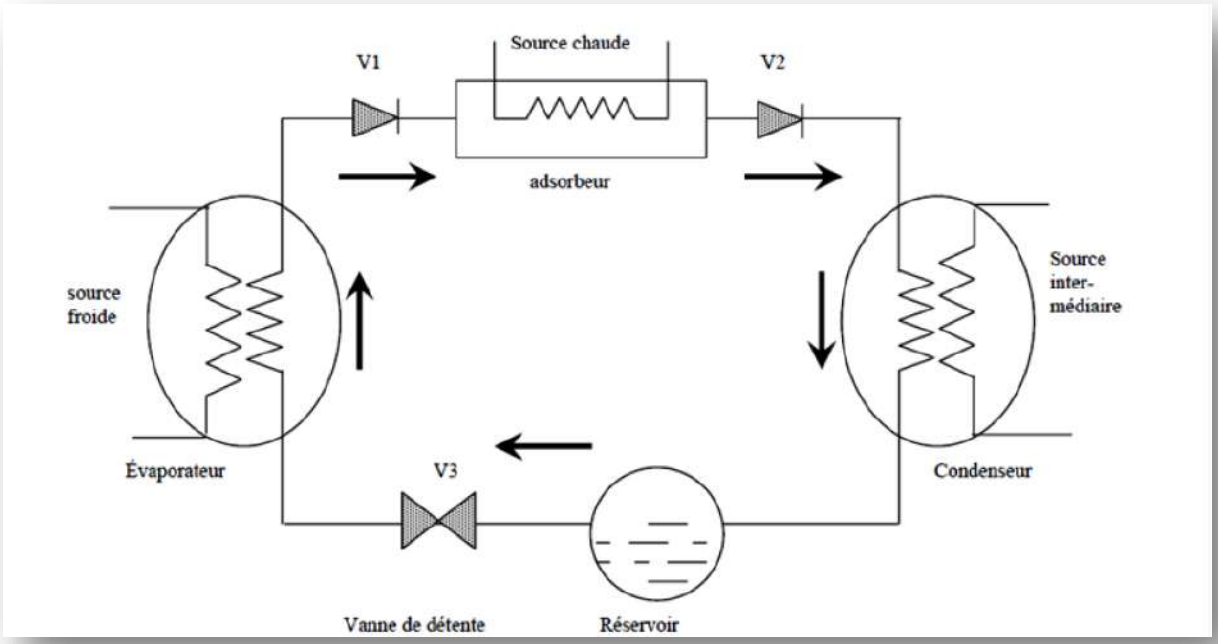


Figure I-5 : Schéma d'une machine frigorifique à adsorption [14]

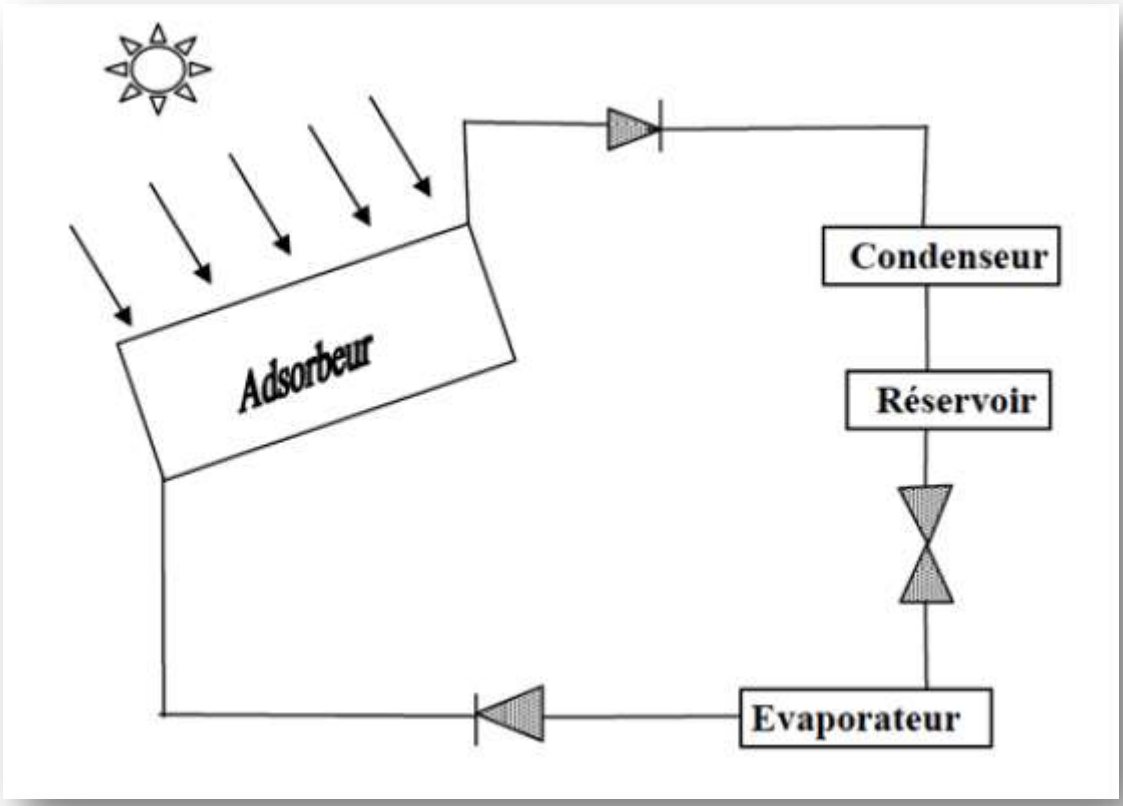


Figure I-6 : Schéma d'une machine frigorifique solaire à adsorption [14].

I-5-3-4 Différentes technologies d'adsorption disponibles :

Les systèmes disponibles sur le marché utilisent l'eau comme réfrigérant et le silicagel comme adsorbant. Mais récemment, quelques constructeurs préfèrent utiliser du zéolithe comme solution alternative au silicagel. Ainsi, ces deux technologies sont maintenant disponibles.

Actuellement, seuls quelques fabricants asiatiques et européens produisent des machines à adsorption. Les deux acteurs historiques étaient Japonais, mais récemment un fabricant Allemand est entré sur le marché. Avec une température de source chaude d'environ 80°C, ces systèmes obtiennent des COP d'environ 0,6 mais peuvent fonctionner jusqu'à des températures d'environ 60°C. La capacité frigorifique de ces machines va de 7 kW à 500 k

I-5-3-5 Avantages et inconvénients des machines à adsorption :

Avantage :

Les machines frigorifiques à adsorption présentent comme avantages principaux:

- L'absence de compression mécanique, donc pas de vibrations et de bruits.
- La possibilité d'utiliser une énergie calorifique disponible et d'éviter ainsi la consommation électrique du compresseur.
- L'intermittence du cycle de base associé à ces machines représente une caractéristique utile dans les applications solaires où l'énergie solaire n'est que discontinuent disponible. Ces machines sont donc parfaitement adaptables à cette énergie.
- Le fonctionnement intermittent permet de diminuer le nombre de composant du système.
- Des coûts de fonctionnement et d'entretien très réduits et durée de vie de ces machines peut être longue **[14].**

Inconvénients :

- Le coefficient de performance thermique de ces machines est limité (< 0.5).
- Fortes puissances thermiques à évacuer vers l'extérieure
- Les performances du système de captation des machines frigorifiques solaires à adsorption sont particulièrement sensibles aux conditions environnementales (vent, température ambiante et rayonnement solaire), ce qui renforce le caractère aléatoire de la production frigorifique provenant du caractère fluctuant de l'énergie solaire

- La production discontinue de froid imposant un accumulateur externe pour le stockage de l'énergie. Cette solution permet de pallier la nature intermittente et aléatoire de l'énergie solaire, mais n'a pas encore reçu de succès économique satisfaisant **[15 ; 16]**

chapitre II
Echangeurs de chaleur lié à la machine frigorifique

II-1- Définitions d échangeurs de chaleur :

Un échangeur de chaleur est un système qui permet d'échanger la chaleur entre deux fluides sans se mélanger. Dans un échangeur thermique, le fluide chaud et le fluide froid sont séparés par une paroi (plane ou tubulaire). La transmission de la chaleur se fait du fluide chaud vers le fluide froid. Dans le domaine des échangeurs de chaleur les résistances thermiques par conduction et par rayonnement sont souvent négligées devant la résistance convective globale des deux fluides **[17]**

II-2-Critères de classement des échangeurs :

Il existe plusieurs critères de classement des différents types d'échangeurs Énumérons les principaux**.**

II-2-1 Types de contact :

- **II-2-1-1 Échangeurs à contact direct** :

Le type le plus simple comprend un récipient (ou canalisation) dans lequel les deux fluides sont directement mélangés et atteignent la même température finale **[18]**

- **II-2-1-2 Échangeurs à contact indirect :**

Les deux fluides, désignés par 1 et 2, s'écoulent dans des espaces séparés par une paroi ou cloison, à faible inertie thermique. La chaleur que le fluide 1 cède à la paroi, par convection le long de la surface de contact, traverse l'épaisseur de la paroi par conduction et est cédé au fluide 2 par convection le long de l'autre face. Le flux de chaleur échangé s'exprime par le produit d'une conductance globale constante le long de l'échangeur, et de la différence entre les températures moyennes T1 et T2 des fluides

Par la suite, nous avons défini les différents échangeurs de chaleur liée à l'installation frigorifique solaire à adsorption **[18]**

II-2-2 classement suivant les types d'échange :

II-2-2-1 Échangeur sans changement de phase :

Les échangeurs de chaleur sans changement de phase correspondent aux échangeurs dans lesquels l'un des fluides se refroidit pour réchauffer le deuxième fluide sans qu'il y ait changement de phase .les températures des fluides sont donc variables, tout le long de l'échangeur.

II-2-2-2 Échangeur avec changement de phase:

Les échanges avec changement de phase sont caractérisés par trois cas différents:

- ✓ l'un des fluides se condense alors que l'autre se vaporise : ces échangeurs sont rencontrés dans les machines frigorifiques.
- ✓ le fluide secondaire se vaporise en recevant de la chaleur du fluide primaire, lequel ne subit pas de changement d'état. Ils sont appelés évaporateurs.
- ✓ le fluide primaire se condense en cédant sa chaleur latente au fluide secondaire plus froid, lequel ne subit pas de transformation d'état

II-2 -3 Classement suivant la disposition des écoulements :

Dans les échangeurs à fluide séparés, les modes de circulation des fluides peuvent se ranger en deux catégories :

- Même sens « Co-courants ».
- Sens contraire « contre-courant ».

Ou bien les vecteurs vitesses sont perpendiculaire l'un à l'autre ; il s'agit cette fo is de «courant croisés »

II-2-4 Classement fonctionnel :

Le passage des fluides dans l'échangeur peut s'effectuer avec ou sans changement de phase ; suivant le cas, on dit que l'on a un écoulement monophasique ou diphasique. On rencontre alors les différents cas suivants :

- les deux fluides ont un écoulement monophasique ;
- un seul fluide à un écoulement avec changement de phase, cas des évaporateurs ou des condenseurs ;

II-2-5 Classement suivant la compacité de l'échangeur :

La compacité est définie par le rapport de l'aire de la surface d'échange au volume de l'échangeur un échangeur soit considéré comme compact si sa compacité est supérieure à 700 m^2/m^3; cette valeur est susceptible de varier de 500 à 800 m^2/m^3

Une classification en fonction de la compacité peut être donnée :

II-2-6 Classement suivant la nature du matériau de la paroi d'échange :

On retiendra deux types de paroi :

- les échangeurs métalliques en acier, cuivre, aluminium ou matériaux spéciaux : superalliages, métaux ou alliages réfractaires ;
- les échangeurs non métalliques en plastique, céramique, graphite, verre, etc.

II-2-7 Classement technologique :

Les principaux types d'échangeurs rencontrés sont les suivants :

- à tubes : monotubes, coaxiaux ou multitubulaires ;
- à plaques : à surface primaire ou à surface secondaire ;
- autres types : contact direct, à caloducs ou à lit fluidisé.

II-3-Principe de l'échangeur de chaleur :

Les échangeurs de chaleur transfèrent l'énergie sous forme de chaleur d'un support (gaz ou liquide, par exemple) à un autre. On les trouve dans l'industrie, dans les véhicules motorisés et dans les foyers, dans les réfrigérateurs et les radiateurs à accumulation, notamment. Les échangeurs de chaleur spécialement conçus pour récupérer la chaleur des déchets, des gaz d'échappement et des liquides et la réutiliser en la transférant directement à un autre support sont appelés des récupérateurs. Recair fabrique des récupérateurs pour les systèmes de ventilation à récupération de chaleur air/a

II-4-Fonctionnement :

- ✓ Dans un échangeur de chaleur à récupération de chaleur air/air, les flux d'air entrant et sortant sont séparés par une barrière solide (une paroi de conduit, par exemple).S'il y a une différence de température entre les deux flux d'air, la chaleur du flux d'air le plus chaud est transférée au flux d'air plus frais au travers de la barrière, conformément à la deuxième loi de la thermodynamique. Celle-ci établit que la chaleur se déplace d'une région chaude vers une région plus froide. La chaleur de l'air vicié qui est évacué du bâtiment est ainsi transférée à l'air frais qui entre dans le bâtiment ou inversement.

- ✓ Comment savoir qu'un échangeur de chaleur fonctionne correctement?
  La plupart des personnes souhaitent avoir la certitude qu'elles ne sentiront pas de courants d'air froid ou chaud lors de l'installation d'un système de ventilation à récupération de chaleur: l'air rejeté par l'échangeur dans la maison doit être plus ou moins à la même température que l'air déjà présent dans la maison. Mais il est possible de se montrer plus exigeant encore. Le fait qu'un échangeur de chaleur évacue de l'air plus ou moins à la bonne température ne signifie pas qu'il fonctionne de manière optimale. S'il ne récupère pas autant de chaleur que possible, il ne vous permet pas de réaliser des économies optimales! Sur la durée de vie d'un échangeur de chaleur, même les améliorations d'efficacité les plus minimes peuvent être synonymes d'économies importantes sur votre facture énergétique. C'est la

raison pour laquelle Recair s'efforce en permanence de proposer des produits à l'efficacité maximale, de manière à ce que toute la chaleur soit transférée de l'air évacué vers l'air entrant, avec un air rejeté qui quitte l'échangeur de chaleur à la même température que l'air extérieur et un air frais qui pénètre dans la pièce à la même température que l'air intérieur.

II-5-Différents types d'échangeurs de chaleurs :

Un échangeur de chaleur est un système servant à transférer de l'énergie thermique d'un fluide vers un autre, sans les mélanger.

II-5-1 Echangeurs de chaleur tubulaires :



Figure II.1 : **Schéma d'une Echangeurs de chaleur tubulaires**

Les échangeurs tubulaires utilisant des tubes comme constituant principal de la paroi d'échange sont largement répandus. On distingue 3 catégories :

- L'échangeur monotube : un tube ayant généralement la forme d'un serpentin est placé à l'intérieur d'un réservoir;
- L'échangeur coaxial (ou « tube-in-tube ») : deux tubes sont imbriqués l'un dans l'autre. En général, le fluide chaud ou à haute pression s'écoule dans le tube intérieur;
- L'échangeur multitubulaire, qui peut exister sous trois formes :

  - ✓ Échangeur à tubes séparés : à l'intérieur d'un gros tube sont placés plusieurs petits tubes, maintenus écartés par des entretoises;

- ✓ Échangeur à tubes ailettes (batteries à ailettes) : il est constitué d'un faisceau de tubes, répartis en nappes, dans lesquels circule un fluide ayant un bon coefficient d'échange (liquide ou fluide frigorigène). Le fluide extérieur étant un gaz, on met des ailettes sur la face externe des tubes pour en améliorer l'échange;
- ✓ Échangeur à tubes et calandre : ils sont constitués d'un faisceau de tubes placé dans une enveloppe (calandre). Les tubes sont maintenus par des plaques (perforées) qui servent également de chicanes pour l'écoulement du fluide circulant côté calandre.

II-5-1-2 : Les avantages et les inconvénients d'un échangeur tubulaire

- ➢ Cette multitude de fluides potentiels et de modes de fonctionnement n'est pas le seul avantage de l'échangeur tubulaire : il résiste en effet à de très fortes pressions, et à de nombreuses puissances.
- ➢ Il accepte de grands écarts de température, et peut être utilisé en condensation partielle.
- ➢ En revanche, son entretien n'est pas aisé, ce qui s'explique notamment par son fonctionnement basé sur de grands tubes, qu'il faut sortir complètement pour pouvoir les nettoyer.
- ➢ L'échangeur tubulaire est également sensible aux vibrations, ce qui est à ne pas négliger dans le cadre d'une installation sur un site indus

II-5-2 Échangeur à tubes en U

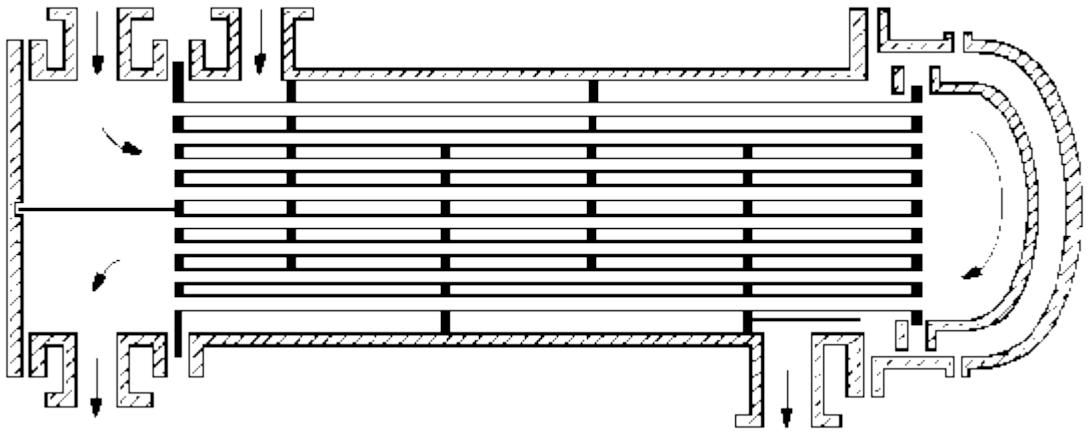


Figure II-2 Schéma d'un échangeur à tubes en U

Tableau II-1 : les avantages et les inconvénients et les utilisation d'un échangeur a tubes en U

Avantages	Inconvénients	Utilisation
• Résiste aux fortes pressions • Libre dilatation des tubes et du corps • Toutes puissances	• Encombrement • Prix de revient élevé • Débouchage difficile	• vapeur/eau • Eau surchauffée/eau • Huile/eau • Process

L'échangeur tubulaire en U, très utilisé aujourd'hui.

Il présente l'avantage de résister à de fortes pressions, et de convenir à de nombreuses puissances différentes.

En revanche, son prix de revient est assez élevé.

II-5-3 Échangeur à faisceau tubulaire horizontal

Un schéma typique d'un échangeur tubes calandre (*Shell and tubes exchanger* ou échangeur à tubes et virole) est présenté ci-contre. L'appareil est constitué d'un faisceau de tubes, disposés à l'intérieur d'une enveloppe dénommée calandre. L'un des fluides circule à l'intérieur des tubes et l'autre à l'intérieur de la calandre, autour des tubes. On ajoute en général des chicanes dans la calandre, qui jouent le rôle de promoteurs de turbulence et améliorent le transfert à l'extérieur des tubes.

À chaque extrémité du faisceau sont fixées des boîtes de distribution qui assurent la circulation du fluide à l'intérieur du faisceau en une ou plusieurs passes. La calandre est elle aussi munie de tubulures d'entrée et de sortie pour le second fluide (qui circule à l'extérieur des tubes) suivant le chemin imposé par les chicanes (voir figure).

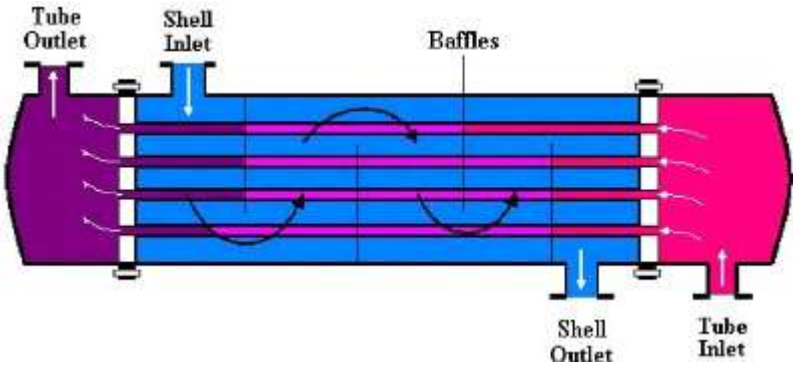


Figure II-3 : Schéma d'un échangeur tubulaire horizontal

Tableau II-2 : les avantages et les inconvénients et l'utilisation d'un échangeur tubulaire horizontal

Avantages	Inconvénients	Utilisation
• Résiste aux fortes pressions • Pour toutes les puissances • Economique • Accepte des grands écarts de température • Peut être utilisé en condensation partielle	• Contraintes sur les tubes • Difficulté de nettoyages (multitubes) • Sensible aux vibrations	• Eau/eau • Vapeur/eau • Huile/eau • Eau surchauffée/eau

II-5-4 Echangeur à faisceau tubulaire vertical

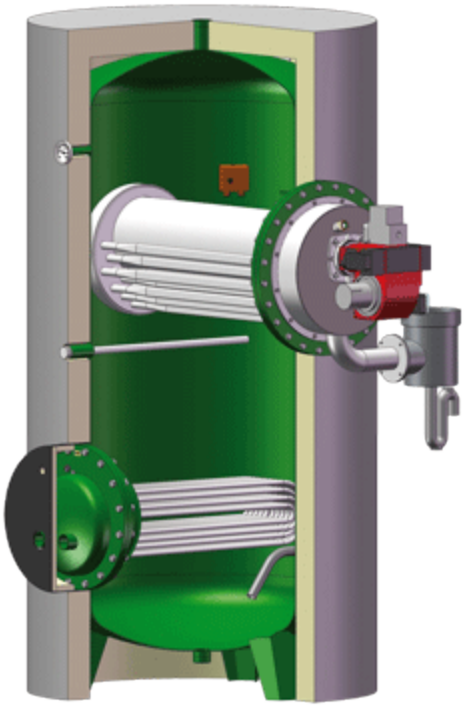


Figure II-4 : Schéma d'un Echangeur à faisceau tubulaire vertical

Il fonctionne comme son équivalent horizontal, mais positionné à la verticale.

Son encombrement est donc moindre !

Tableau II-3 : les avantages et les inconvénients et l'utilisation d'un échangeur à faisceau tubulaire vertical

Avantages	Inconvénients	Utilisation
• Faible encombrement • L'échangeur peut être plein de condensat • Parfaitement adapté à l'échange vapeur haute pression/eau	• Formation de poche d'air	• Vapeur HP/eau • Eau surchauffée/eau • Fluide thermique/eau • Fumées/eau • Process

II-5-5 Echangeur à spirales :

Un échangeur à spirales consiste en 2 plaques de métal enroulées de manière hélicoïdale pour former une paire de canaux en spirale. Le diamètre de l'échangeur est relativement grand, avec une surface d'échange maximale d'environ 450 m^2 pour un diamètre de 3 m[2], ce qui le place dans la catégorie des échangeurs non-compacts. L'échange de chaleur n'est pas aussi bon que celui de l'échangeur à plaques, car la surface d'échange ne possède pas en règle générale de profil, mais pour une même capacité d'échange, un échangeur spiral nécessite 20 % de moins de surface d'échange qu'un échangeur à faisceau tubulaire[2].

Il est utilisable pour les liquides visqueux ou pour les mélanges liquide-solide et possède une capacité auto-nettoyante garantissant un encrassement réduit par rapport à l'échangeur à faisceau tubulaire. Il ne peut travailler qu'avec des différences de températures et de pression limitées.

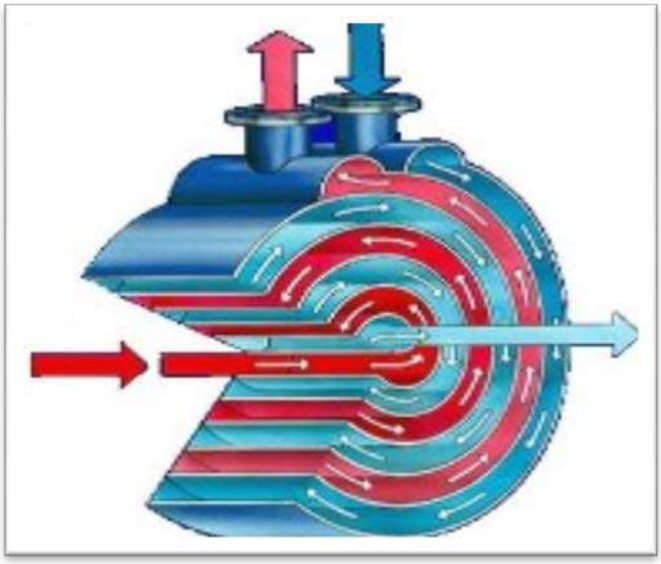


Figure II-6 : Schéma d'un échangeur à spirale

Tableau II-4 : les avantages et les inconvénients et l'utilisation d'un échangeur à spirale

Avantages	Inconvénients	Utilisation
• Grande surface de contact • Large passage • Encombrement réduit • Excellent condenseur • Autonettoyant	• Non démontable • Ecarts de T limités	• Eau/eau • Vapeur/eau • Eau surchauffée/eau

II-5-6 Echangeur a plaques

L'échangeur à plaques est un type d'échangeur de chaleur qui connaît un usage croissant dans l'industrie. Il est composé d'un grand nombre de plaques disposées en forme de millefeuilles et séparées les unes des autres d'un petit espace (quelques millimètres) où circulent les fluides. Le périmètre des plaques est bordé d'un joint qui permet par compression de la structure d'éviter les fuites.

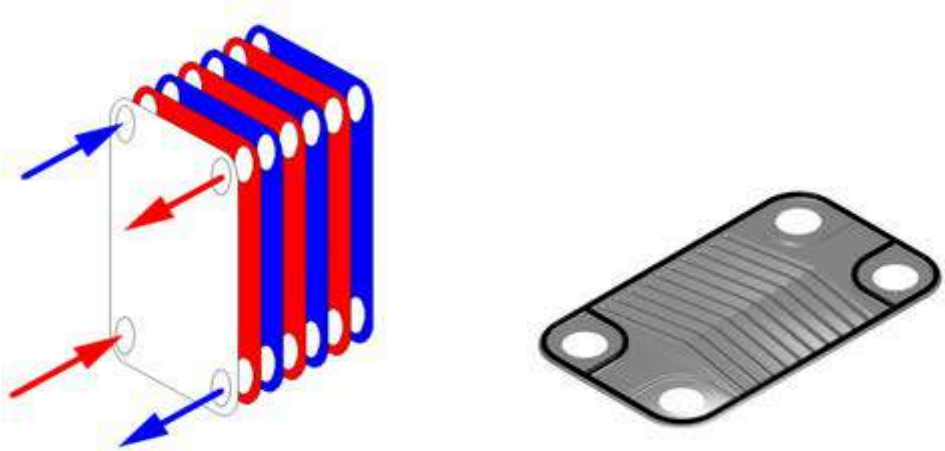
Les plaques ne sont pas plates, mais possèdent une surface ondulée selon un schéma bien précis afin de créer un flux turbulent synonyme d'un meilleur transfert de chaleur, mais permet également de canaliser les fluides se déplaçant à la surface vers les coins de la plaque. Le fluide se déplace, par exemple, du coin inférieur gauche vers le coin supérieur droit de la plaque, où un orifice lié à un tuyau lui permet de passer de l'autre côté de la plaque et de

sauter une couche du millefeuille (un espace entre 2 plaques) avant de s'écouler à nouveau le long de la plaque suivante. Ainsi chaque fluide ne circule parallèlement à une plaque que tous les 2 espaces.

L'avantage de ce type d'échangeur est sa simplicité qui en fait un échangeur peu coûteux et facilement adaptable par ajout/retrait de plaques afin d'augmenter/réduire la surface d'échange en fonction des besoins (Attention : la surface ne peut être augmentée de manière infinie à cause de la perte de charge). La surface en contact avec l'extérieur est réduite au minimum, ce qui permet de limiter les pertes thermiques et l'étroitesse de l'espace où circulent les fluides ainsi que le profil des plaques assurent un flux turbulent qui permet un excellent transfert de chaleur.

Toutefois ces derniers paramètres entraînent une importante perte de charge qui limite le nombre de passage des fluides entre les plaques. Cette perte de charge ne peut être compensée par une pression d'entrée des fluides élevée (<2.5 MPa) car une trop grande pression causerait des fuites au travers des joints placés entre les plaques. La différence de températures entre les 2 fluides ne doit pas être trop grande également pour éviter une déformation des plaques par dilatation/contraction de ces dernières qui empêcherait les joints entre les plaques d'être parfaitement étanches.

La turbulence permet de réduire l'encrassement de la surface d'échange de 10-25 % par rapport à un échangeur à faisceau tubulaire. Comparativement à un échangeur à faisceau tubulaire la surface d'échange est inférieure de 50 % pour le même transfert de chaleur



Echangeur à plaques **Une plaque avec un profil a chevrons**

Figure II-7:Schéma d'un échangeur a plaques

Tableau II-5 : les avantages et les inconvénients et l'utilisation d'un échangeur à plaques

Avantages	Inconvénients	Utilisation
• Compact • Très bons coefficients de transfert • Prix compétitifs • Peu de pertes thermiques • Modulable	• Faible écart de T possible • Régulation • Perte de charge importante • Pression de travail limitée	• Vapeur BP/eau • Eau/eau • Huile/eau • Eau surchauffée/eau

II-5-7 Échangeur de chaleur rotatif

II-5-7-1 Colonne de Bouhy



Figure II-8 : échangeur colonne de Bouhy

Excellente alternative aux échangeurs à plaques dans les sécheurs d'air comprimé, la colonne de Bouhy est en fait un échangeur à tête d'épingle auquel a été ajouté un séparateur air/eau centrifuge dans la partie inférieure. Le dispositif dispose de deux échangeurs coaxiaux, le premier servant à amener l'air en dessous de son point de rosée, le second servant à la fois à ramener l'air à une température convenant à son utilisation et surtout à augmenter l'efficacité du refroidissement. Ce type d'échangeur se caractérise par une très faible perte en charge.

II-5-7-2 Échangeur à bloc



Echangeur à bloc complexe



Echangeur à bloc simple

Figure II-9 : schéma d'un échangeur a bloc

L'échangeur à bloc est un type d'échangeur de chaleur réservé à des applications particulières. Il consiste en un bloc d'une matière thermiquement conductrice percé de multiples canaux dans lesquels circulent les 2 fluides. Le bloc est le plus souvent composé de graphite additionné parfois de polymères pour améliorer les propriétés mécaniques de l'échangeur. Le bloc est placé dans une structure qui assure la distribution des liquides dans les canaux.

Le bloc peut avoir différentes formes : cylindrique ou cubique. Il peut encore être composé d'un seul bloc ou de plusieurs parties empilées de manière à permettre les fluides de passer d'une partie à l'autre. L'intérêt de ce type d'échangeur de chaleur est principalement sa résistance chimique aux liquides corrosifs ainsi que sa capacité modulaire : le bloc peut facilement être remplacé en cas de fuites. Le fait que le rapport volume libre pour passage des fluides/volume du bloc est très petit crée une grande inertie dans les cas de changements de température : le bloc agit comme un réservoir et peut lisser les différences de température.

Les blocs sont cependant fragiles tant aux chocs qu'aux grands écarts de température (problème de dilatation non-uniforme pouvant conduire à des fissurations du bloc). Le prix est relativement élevé par rapport aux autres types d'échangeurs et le transfert de chaleur est en général moyen : l'épaisseur de la paroi d'échange est plus grande que pour une surface d'échange en métal pour cause de fragilité, ce qui augmente la résistance au transfert.

Tableau II-6 : les avantages et les inconvénients et l'utilisation d'un échangeur a bloc

Avantages	Inconvénients	Utilisation
• Bonne résistance chimique • Inertie • Peu de pertes thermiques • Modulable	• Sensible aux grands écarts de T • Sensible aux chocs • Coefficients de transfert moyen • Prix	• Vapeur/eau • Eau/eau • Eau surchauffée/eau • Liquides corrosifs

II-5-8 Échangeur à ailettes :

L'échangeur à ailettes et comprend essentiellement (figure II-10) :

- des tubes ailettes d'échange.
- des collecteurs avec tubulures.
- un châssis constitué de deux longerons et des traverses internes.
- L'échangeur constituent les éléments échangeurs où le refroidissement du fluide va s'effectuer, et en complément des faisceaux principaux, l'aéroréfrigérant peut comporter des équipements auxiliaires participant à l'échange tels que les persiennes qui permettent de moduler le débit d'entrée ou de sortie d'air afin de garantir une température constante de refroidissement du fluide ou d'éviter le tirage naturel lors de l'arrêt de l'appareil **[25].**

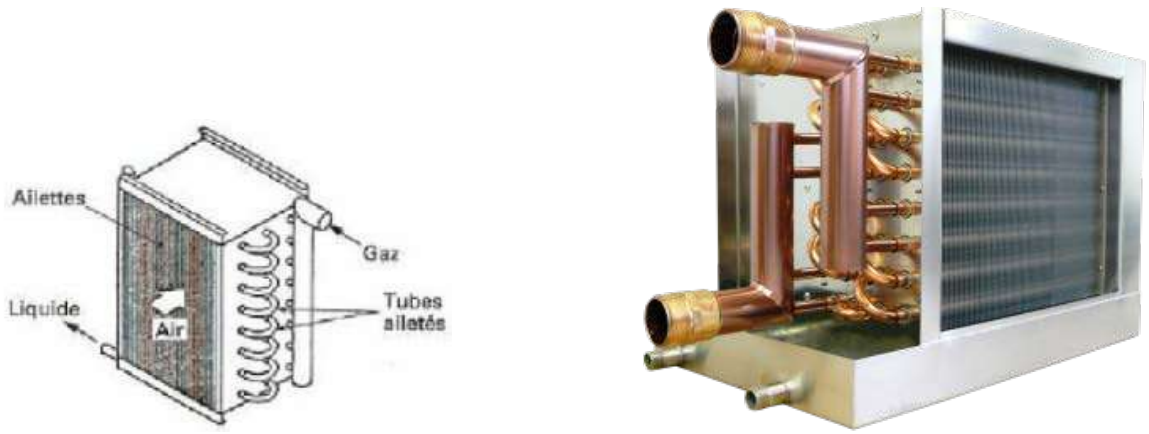


Figure II-10 : Echangeur batterie à ailettes [25]

II-5-8-1 Choix de l'échangeur à ailettes

Chaque dimensionnement d'aéroréfrigérant se caractérise par un choix de tube et de surface ailette. Une étude particulière est menée pour chaque appareil en fonction des besoins thermiques et de l'encombrement souhaité.

Le choix de batteries de tubes ailettes est donc conseillé. Deux grandes familles existent :

- échangeurs à tubes et ailettes individuelles où chaque tube possède sa « propre » ailette.
- échangeurs à tubes et ailettes continues. Le liquide circulant dans les tubes qui peuvent avoir différentes formes (plats, ovales, ronds…). Le gaz, pour sa part, traverse les rangs de tubes (alignés ou quinconces) dans des canaux délimités par les ailettes parallèles.

II-6-Généralités sur les ailettes

Afin d'équilibrer les résistances thermiques externes et internes, on augmente la surface d'échange extérieur. Ces ailettes peuvent être plates ou plus souvent ondulées ou gaufrées afin d'améliorer le coefficient d'échange extérieur.

L'ailette est un dispositif qui permet de créer des perturbations et de la turbulence au niveau de l'écoulement du fluide entourant l'ailette (elle permet d'augmenter le niveau de la turbulence dans la couche limite), mais surtout la surface d'échange de chaleur, donc le transfert thermique. Elle est utilisée, en particulier dans les échangeurs industriels, les radiateurs de véhicules, de chauffage central, et le refroidissement des composantes électroniques, …etc**. [22].**

II-6-1 Différents types d'ailettes :

Les différents types d'ailettes sont regroupés dans deux grandes parties :

- Ailettes continues.
- Ailettes indépendantes.

Les ailettes continues sont souvent utilisées dans les échangeurs de chaleur employés dans l'habitat, tandis que les échangeurs de chaleur industriels ont plutôt des ailettes indépendantes.

Dans chacune de ces parties, on distingue plusieurs catégories d'ailettes entrant dans la conception des échangeurs de chaleur industriels **[22].**

II-6-1-1 Ailettes continues :

Les ailettes continues sont traversées par plusieurs tubes, de forme généralement rectangulaire, elles sont souvent fabriquées par emboutissage puis fixées par dilatation des tubes. Un collet fixe l'écartement entre les ailettes, elles peuvent être planes ou ondulées.

L'ondulation provoque une perturbation de l'écoulement qui améliore l'échange thermique.

Les trois principaux types d'ailettes sont les ailettes planes et lisses, les ailettes corrigées (ondulées) et les ailettes persiennes voir figure («3-2) **[23].**

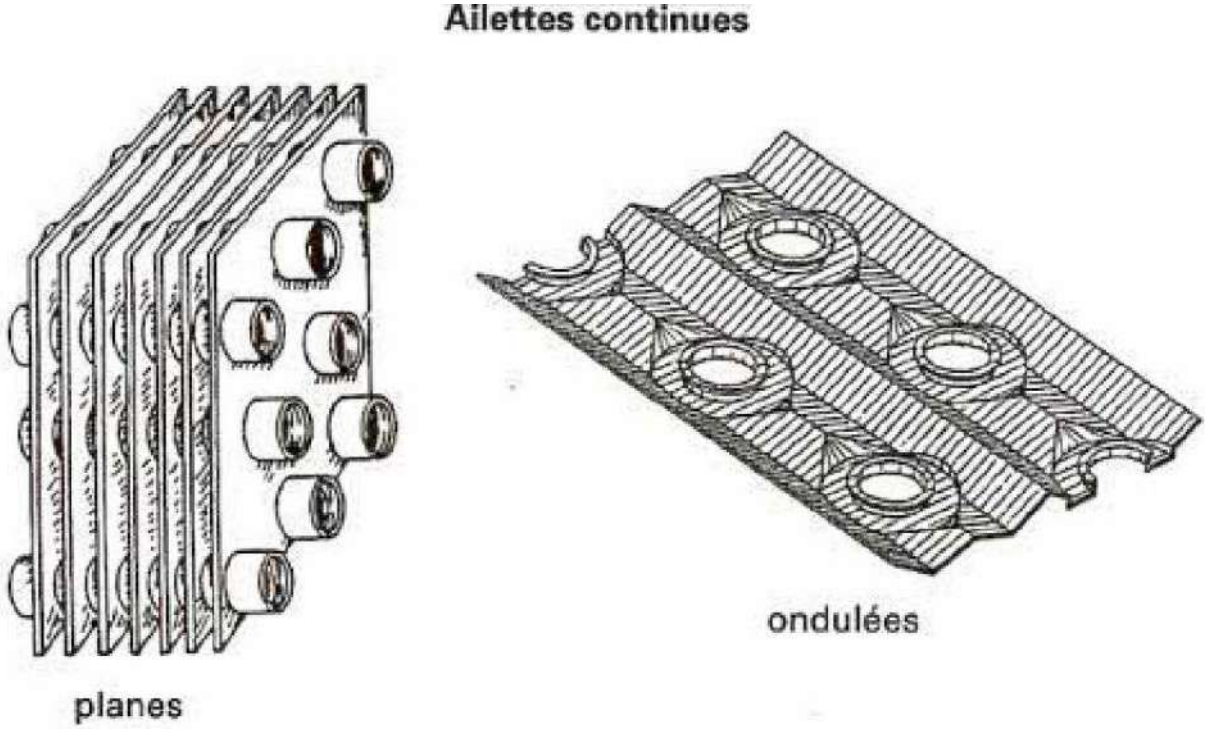


Figure II-11 : Ailettes continues ou indépendantes pour tubes [22]

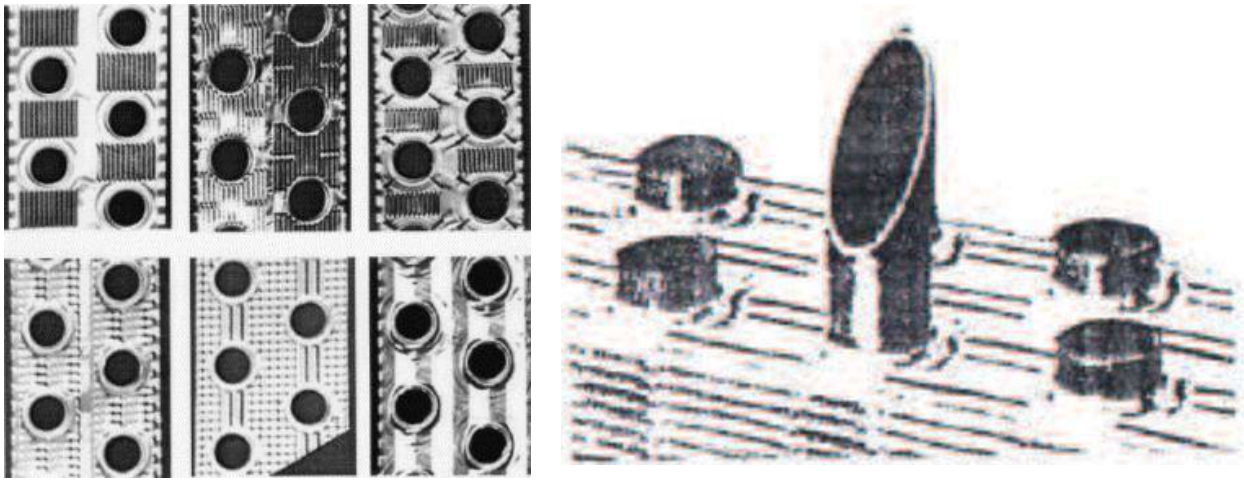


Figure II-12 : Détail d'une ailette persienne [22]

- **II-6-1-1-1 Les ailettes planes et lisses :** constituent les géométries les plus couramment utilisées grâce à leur simplicité. Leur pas d'ailette est généralement compris entre 1 et 8.7 mm, les tubes qui les traversent ont des diamètres variant entre 6 et 13 mm. Les vitesses d'écoulement d'air sont comprises, pour la majeure partie des échangeurs, entre 0 et 16.3 m/s **[24].**

- **II-6-1-1-2 Les ailettes corrigées :** sont caractérisées par des ondulations régulières qui permettent une augmentation significative du coefficient d'échange de chaleur. Ces ailettes sont, de nos jours, couramment utilisées et font l'objet de nombreuses publications sur l'évaluation expérimentale de leurs performances thermo aérauliques. Cependant, elles accroissent les pertes de charge **[23].**

- **II-6-1-1-3 Les ailettes persiennes :** ont des géométries très complexes mais permettent un gain bien plus significatif sur le coefficient d'échange. Elles sont cependant pénalisantes en termes de perte de charge et sont sujettes à l'encrassement. Il n'existe que très peu de travaux publiés sur les ailettes persiennes malgré leur large utilisation, notamment dans les radiateurs automobiles du fait de leur complexité **[24].**

II-6-1-2 Ailettes indépendantes

Les ailettes indépendantes sont traversées par un seul tube (figure 3-4). Elles peuvent être pleines ou segmentées.

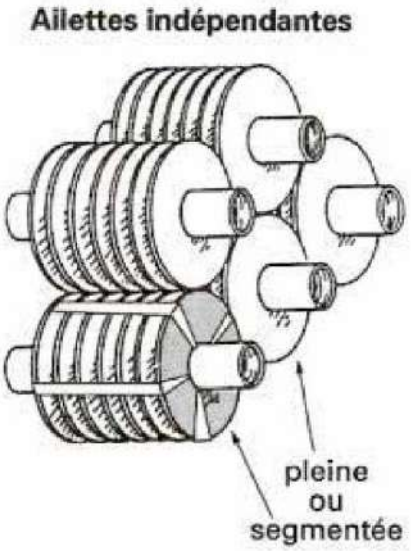


Figure II-13 : Ailettes indépendantes [24]

Les ailettes indépendantes peuvent être de différentes sortes :

II-6-1-2-1 Ailettes transversales

Ailettes transversale peuvent être constituées de différents types :

- ailettes annulaires, en principe des ailettes pleines (figure II-14 a).
- ailette hélicoïdale (spiralée) (figure II-14 b), pleine ou segmentée, bien adaptée aux grandes longueurs de tubes. Elle est généralement obtenue par enroulement d'un ruban serti ou soudé sur le tube. Si la hauteur de l'ailette est grande devant le rayon du tube, l'ailette est segmentée **[25].**

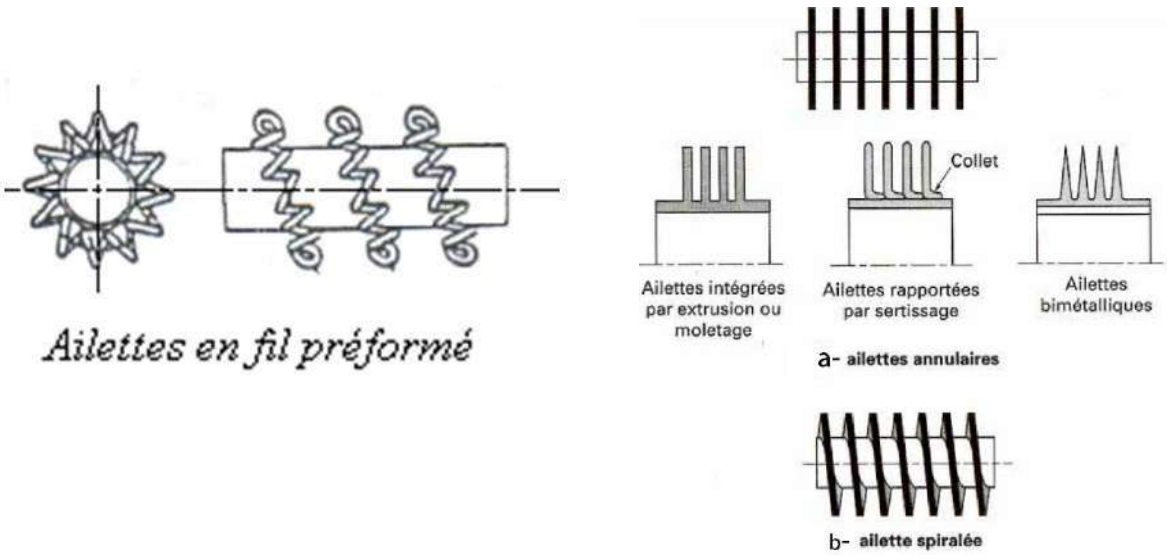


Figure II-14 : Ailettes annulaires ou spiralées [25]

II-6-1-2-2 Ailettes longitudinales :

Les ailettes sont disposées suivant l'axe des tubes (figure 3-6); elles peuvent être situées à l'intérieur ou à l'extérieur des tubes. Pour améliorer le transfert de chaleur, elles sont quelques fois localement torsadées.

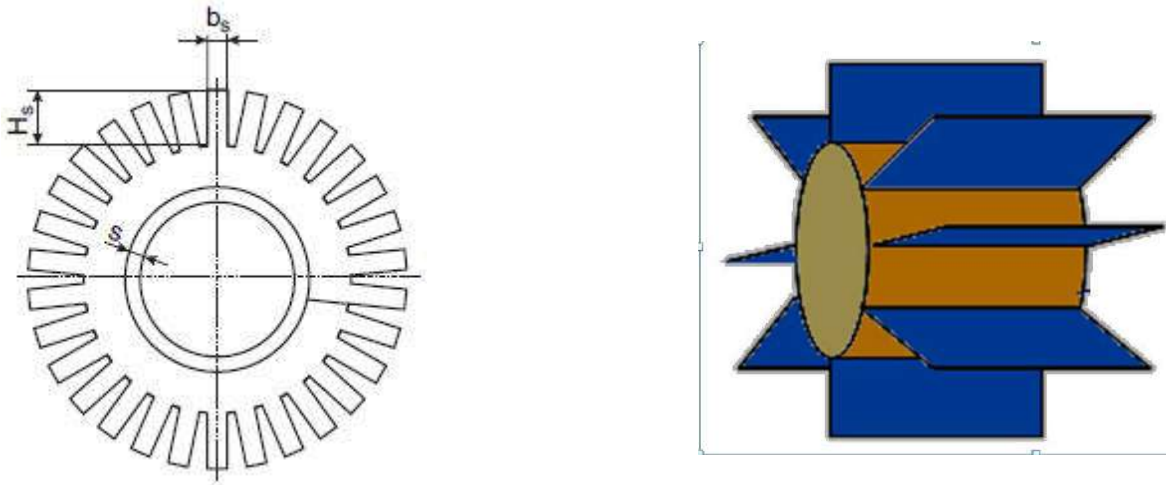


Figure II-15 : exemple d'une ailette longitudinale [25]

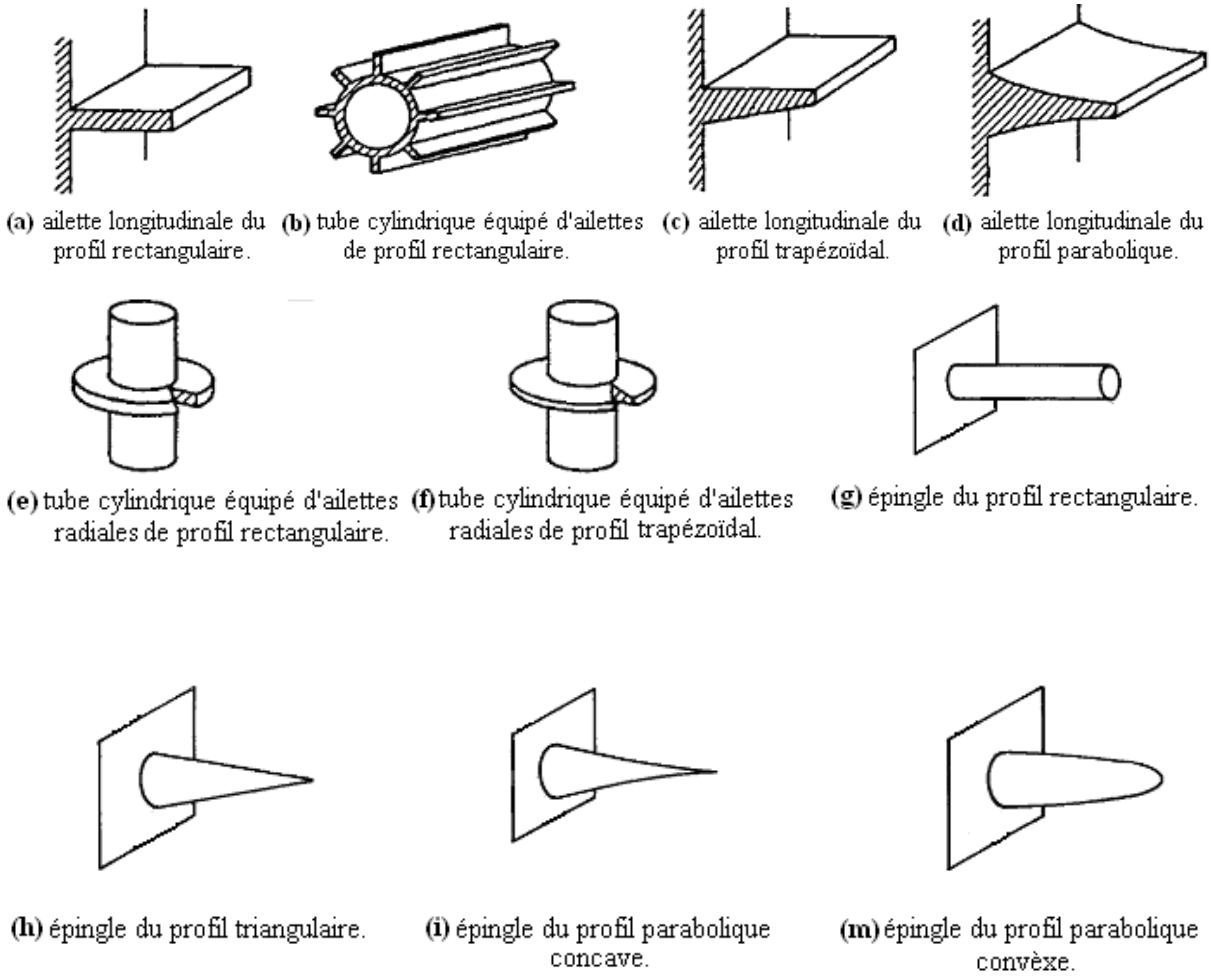


Figure II-16 : Quelques exemples typiques de surfaces étendues indépendantes [25]

Les ailettes continues sont utilisées dans les échangeurs de chaleur employés dans l'habitat, tandis que les échangeurs de chaleur industriels ont plutôt des ailettes indépendantes.

chapitre III
résultats et discussions

III-1 Introduction

Dans ce chapitre nous avons une étude numérique sur l'échangeur de chaleur et diverses formes d'ailettes (rectangulaire triangulaire et circulaire) alors que nous allons appliquer cette idée par le programme solide Works ce qui est une application de conception mécanique 3D paramétrique qui permet aux concepteurs d'esquisser rapidement des idées, d'expérimenter des fonctions et des cotes afin de produire des modèles et des mises en plan précises.et après avoir obtenu le format approprie pour cette étude, nous utilisons un autre programme ansys. Qui est un éditeur de logiciels spécialisé' en simulation numérique, nous donne les résultats pour voir la forme le plus efficace dans cette étude

Le code CFX (Mécanique des Fluides (CFX)) est un code de CFD commercial tridimensionnel, sans option bidimensionnelle, ayant des champs d'applications assez vastes.

L'un des avantages de CFX est qu'il résout les équations en trois dimensions spatiales, permettant ainsi de simuler des géométries qui ne sont pas nécessairement axisymétriques ou simplifiables en deux dimensions. Ceci ouvre la porte à la résolution de problèmes plus près delà réalité des géométries industrielles.

Par contre, l'un de ses désavantages est qu'il fonctionne strictement en trois dimensions, nécessitant des maillages avec beaucoup plus d'éléments qu'un calcul en deux dimensions spatiales, pour obtenir une précision similaire. Ceci a pour effet d'allonger beaucoup les temps de calcul, ou de réduire la précision des résultats, selon le cas.

Mettre en place une simulation à l'aide d'ANSYS CFX se fait en trois étapes :

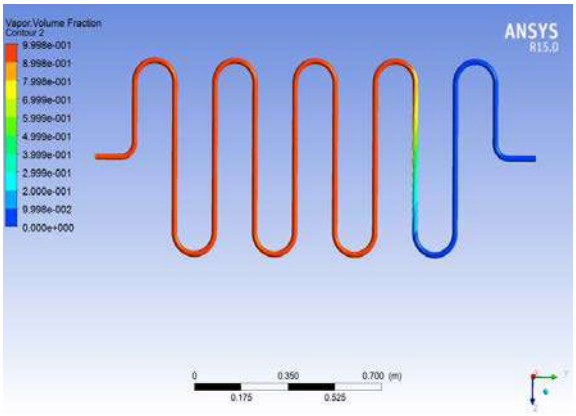
- ✓ CFX-Pre : pour construire une géométrie et générer son maillage, ainsi quel 'incorporation des conditions aux limites…
- ✓ CFX-Solver : qui résout les équations et affiche les différents résidus à chaque itérations.
- ✓ CFX-Post : où l'on exploite les résultats.

Nous allons présenter la procédure suivie pour réaliser une simulation avec CFX. L'exemple d'application proposé dans ce chapitre est conforme au problème traité dans ce mémoire.

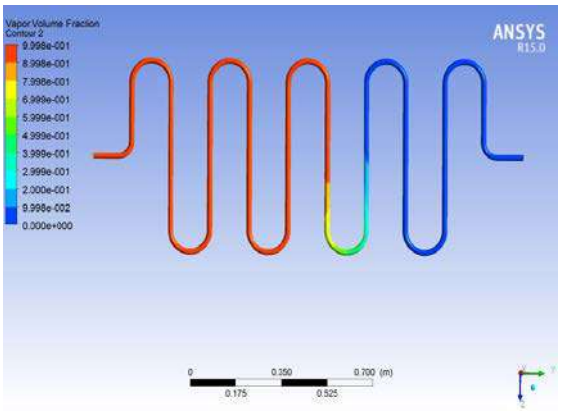
III-2 La condensation dans un échangeur de chaleur sans ailettes

III-2-1 Introduction :

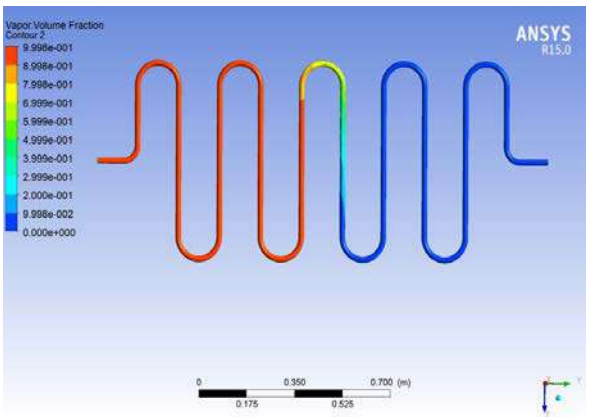
Dans cette étape, nous surveillons le temps de débuts de condensation de l'échangeur de chaleur dans un période de deux minutes.



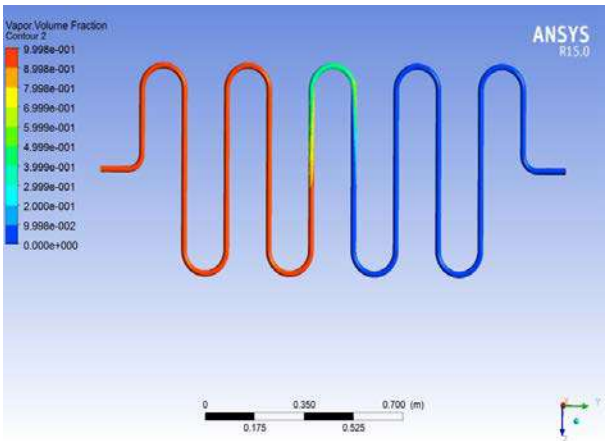
30s



60s



90s



120s

Figure III-1 : différentes positions pour le début de condensation

U : position dans l'échangeur de chaleur

Le tableau (III-1) et la figure (III-2) représenter la variation de titre chaque 30s **:**

Tableaux III-1 : variation de titre de vapeur en fonction de temps

U	titre (30s)	titre (60s)	titre (90s)	titre (120s)
u1	**0,94**	**0,94**	**0,94**	**0,94**
u2	**0,94**	**0,94**	**0,94**	**0,94**
u3	**0,94**	**0,94**	**0,94**	**0,4**
u4	**0,94**	**0,7**	**0,3**	**0**
u5	**0,2**	**0,2**	**0**	**0**
u6	**0**	**0**	**0**	**0**

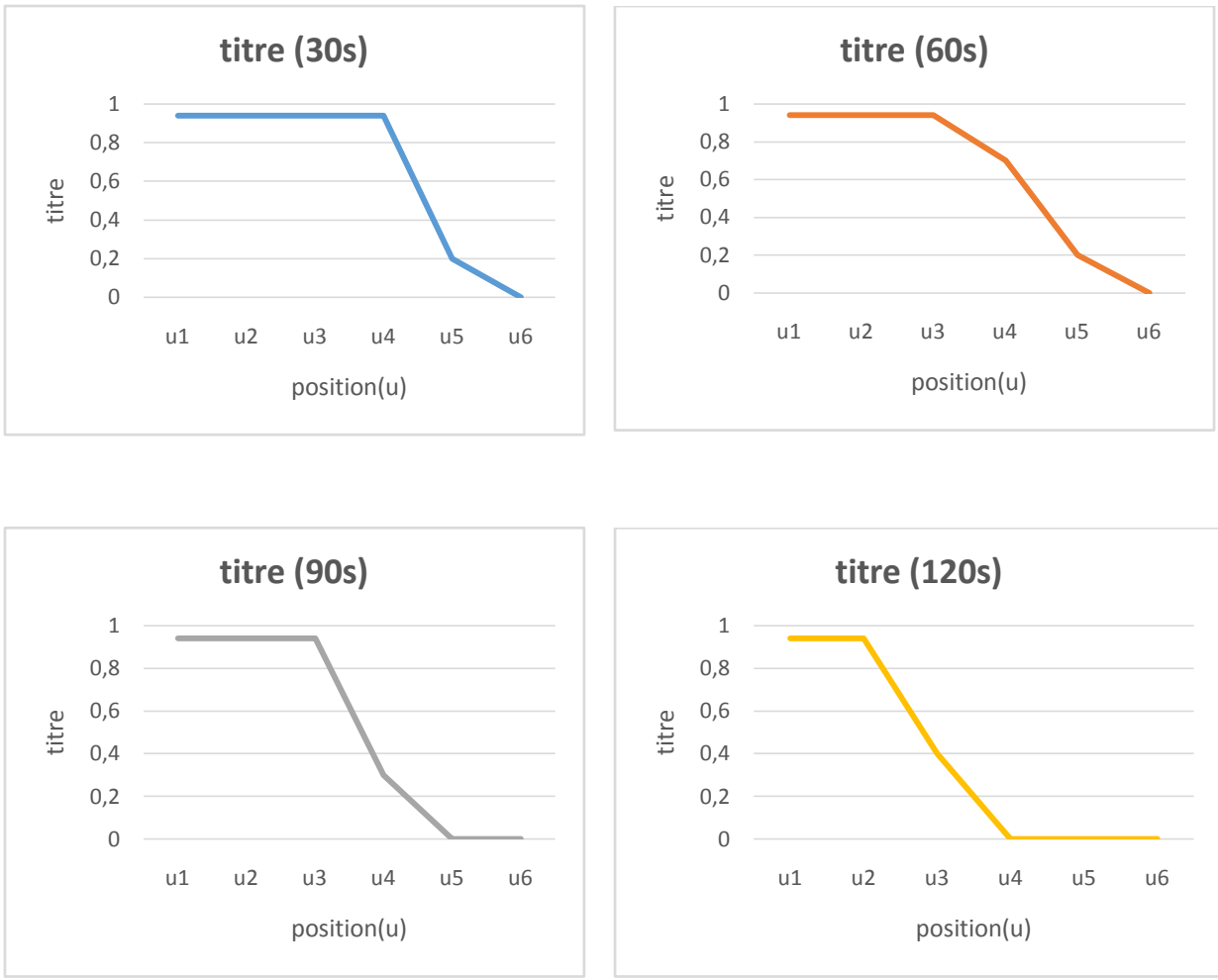


Figure III-2 : profil de titres de vapeur en fonction de temps

Figure III-3 représente les 4 profile de titre au même courbe

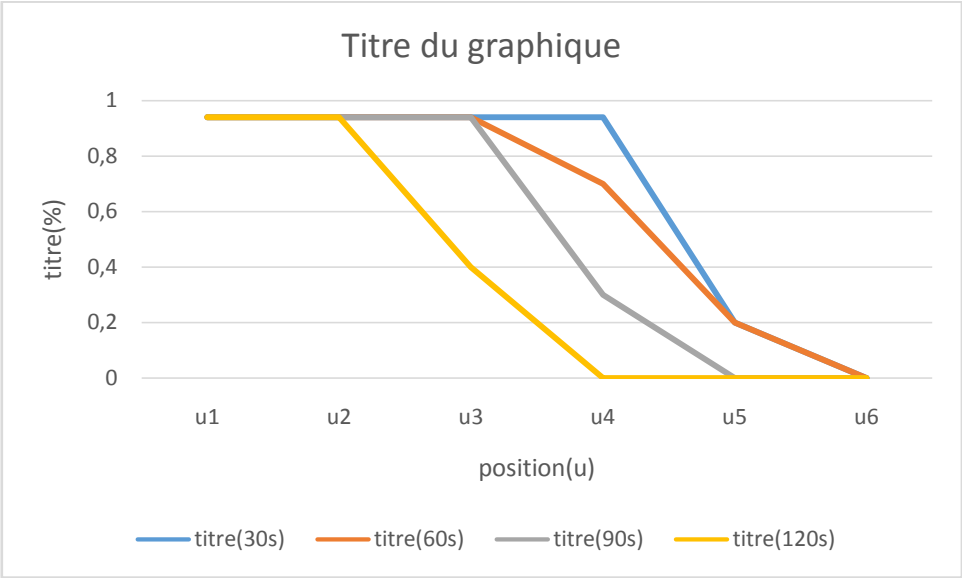


Figure III-3 : profil de titres de vapeur en fonction de temps

III-2-2 Analyse :

Dans les figures précédentes, nous avons suivi le début de la condensation dans une période de deux minutes, D'après les résultats numériques au-dessus, on remarque clairement que les valeurs de titre dans l'échangeur de chaleur est varié en fonction de temps ; Où l'on note à chaque trente secondes une valeur différente de son prédécesseur.

Dans la premier 30s la diminution de la quantité de vapeur et dans le u2 par rapport à l'instant 60s et 90s elle est dans le u3. Et à la fin du temps, il était dans le u4.

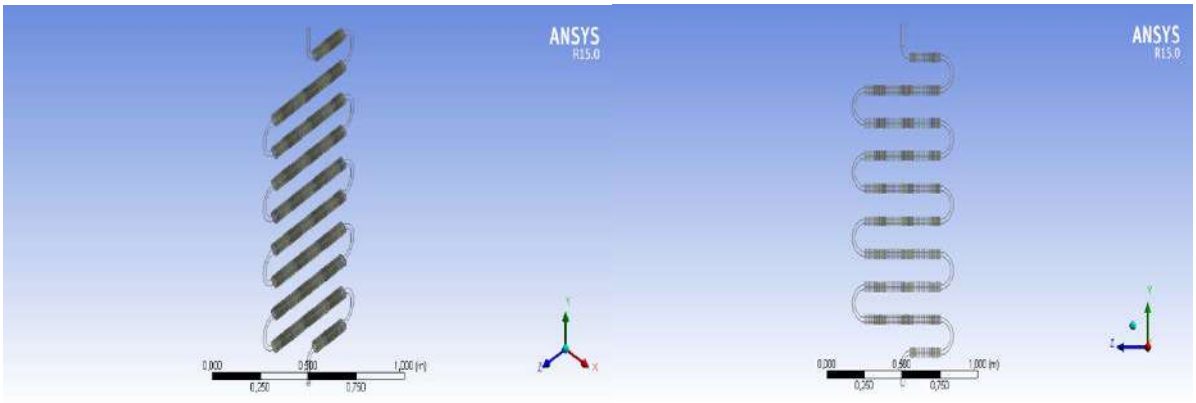
Il conclut qu'avec le passage du temps la proportion de la quantité de vapeur sera inexistants

Donc l'opération de la condensation est terminée.

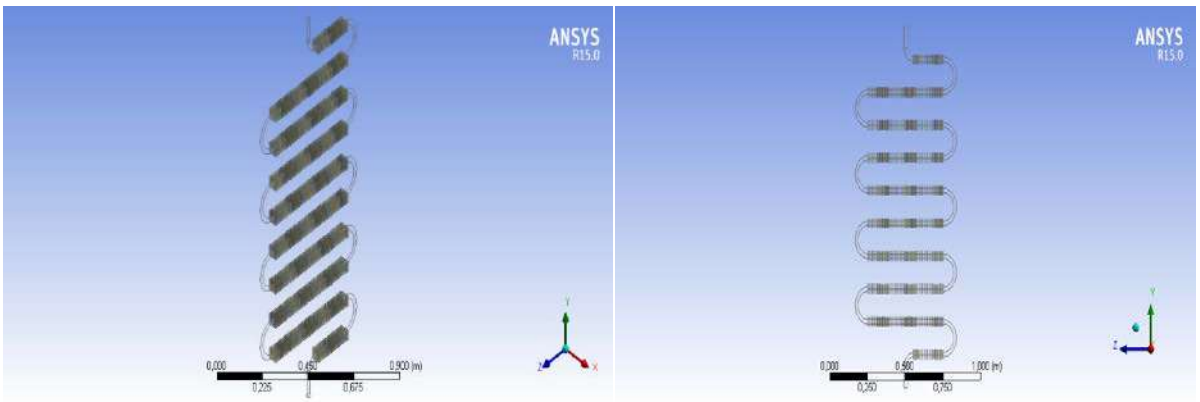
III-3 : Les Echangeurs de chaleur avec les ailettes

III-3-1 Les Géométrie

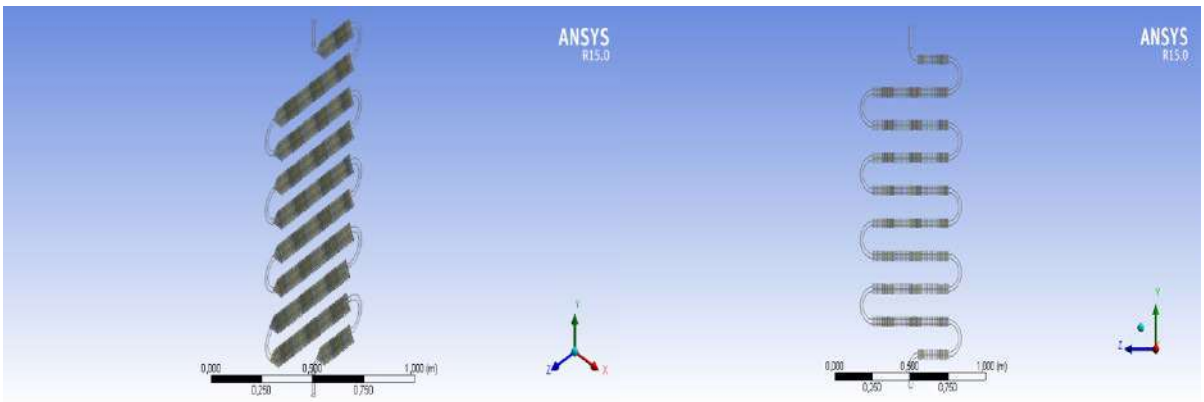
La figure (III-3) représenté l'échangeur de chaleur avec les différentes formes d'ailettes



Cercle



Rectangle

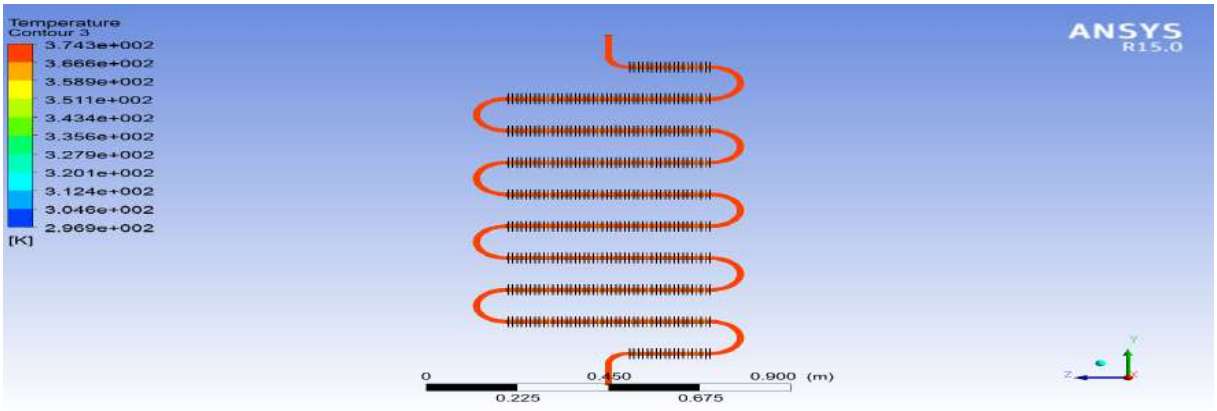


Triangle

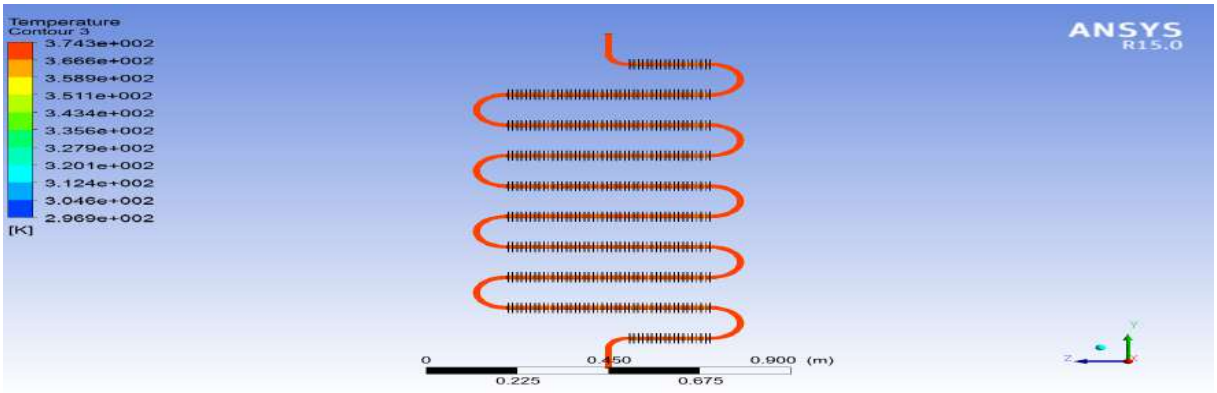
Figure III-4 : géométrie de l'échangeur de chaleur avec les ailettes

III -3-2 L'effet de la forme géométrique sur la variation de température :

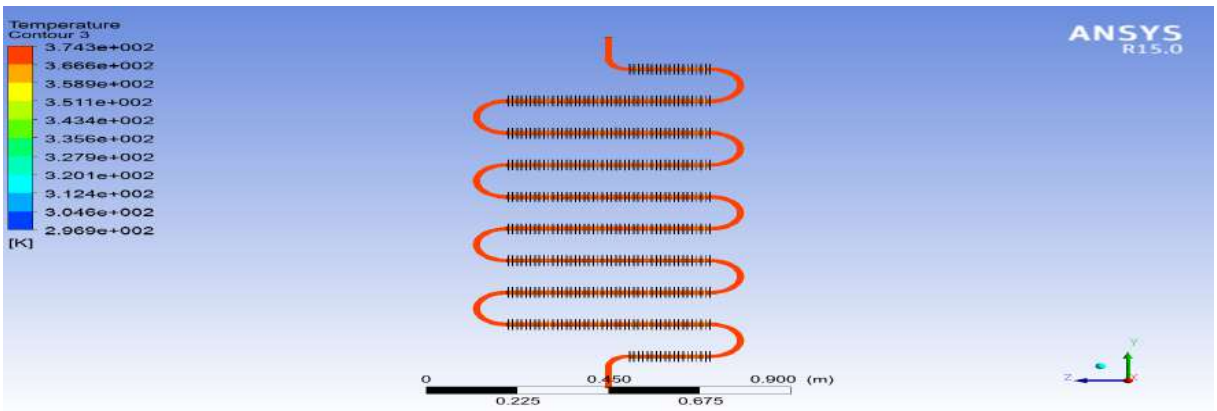
III-3-2-1 Introduction : dans cette section, on veut examiner l'effet de la forme géométrique sur la variation de température dans l'échangeur de chaleur. On a teste les forme (cercle, triangle, rectangle)



Cercle

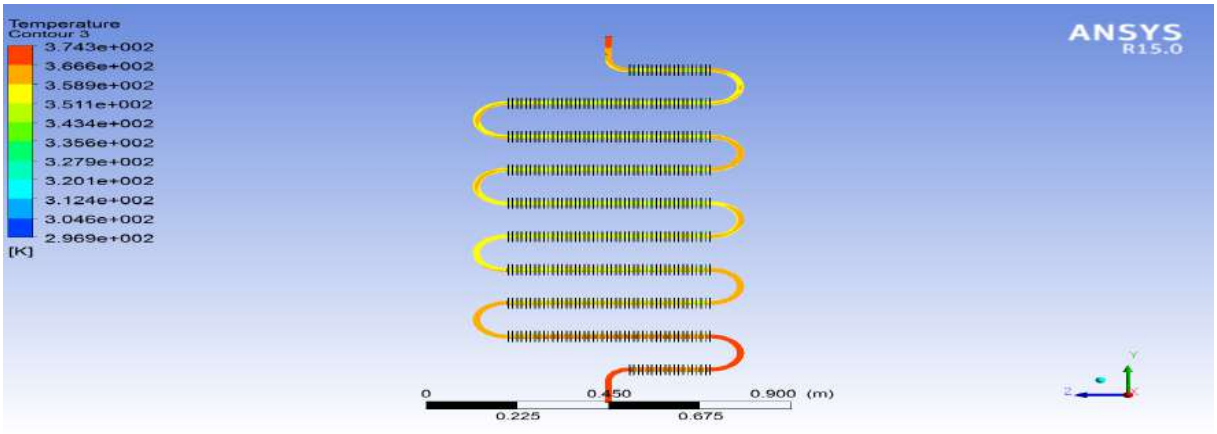


Rectangle

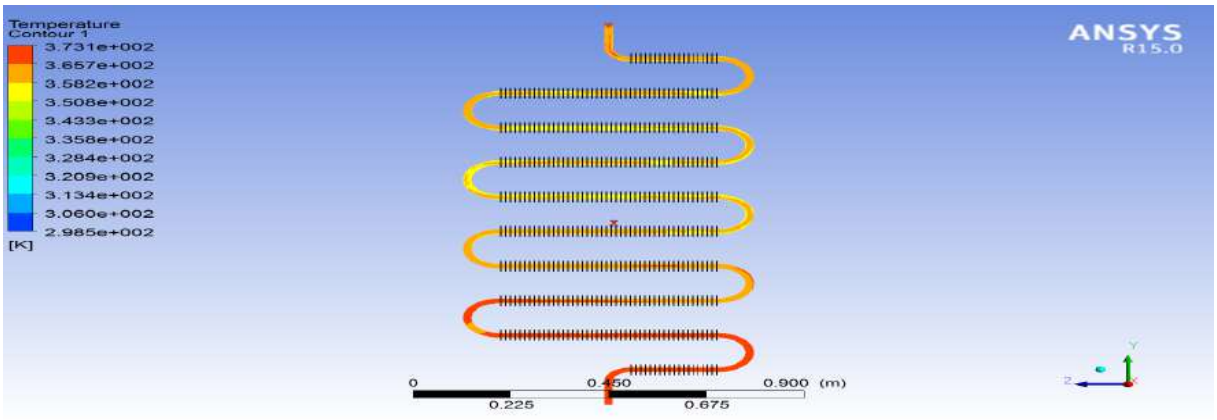


Triangle

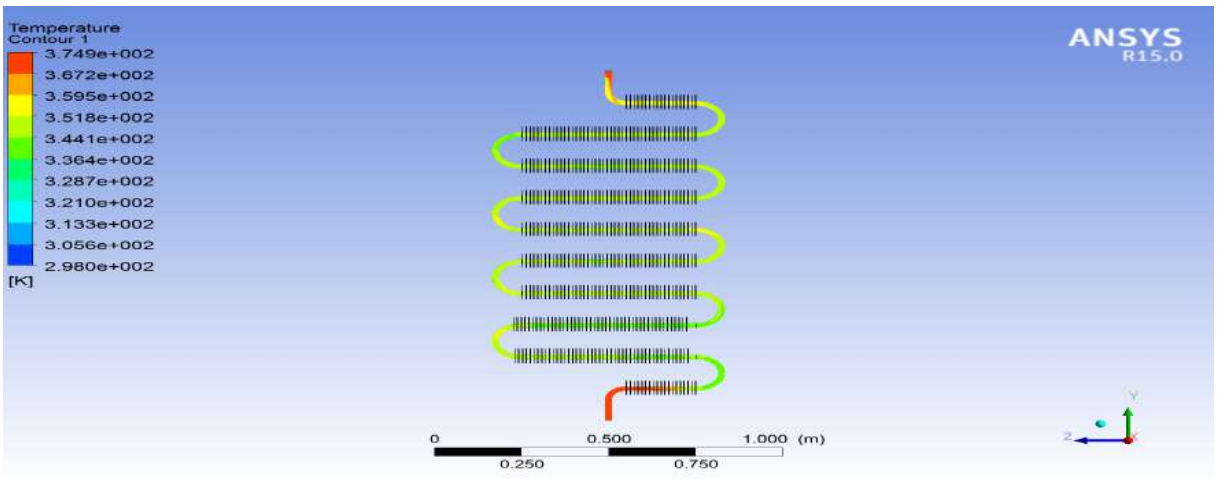
Figure III -5 : variation de température à l'instant 0s



Cercle

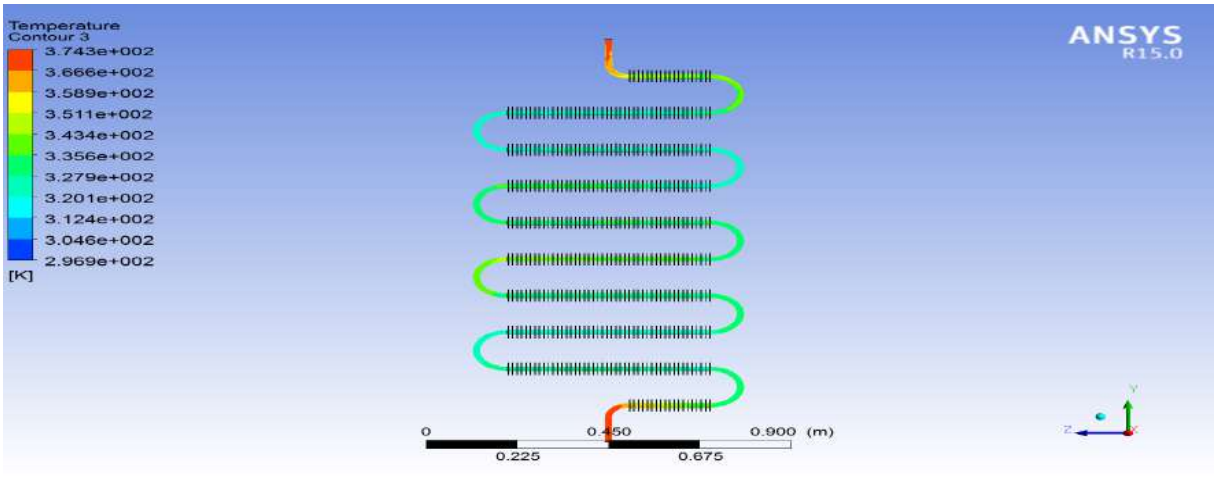


Rectangle

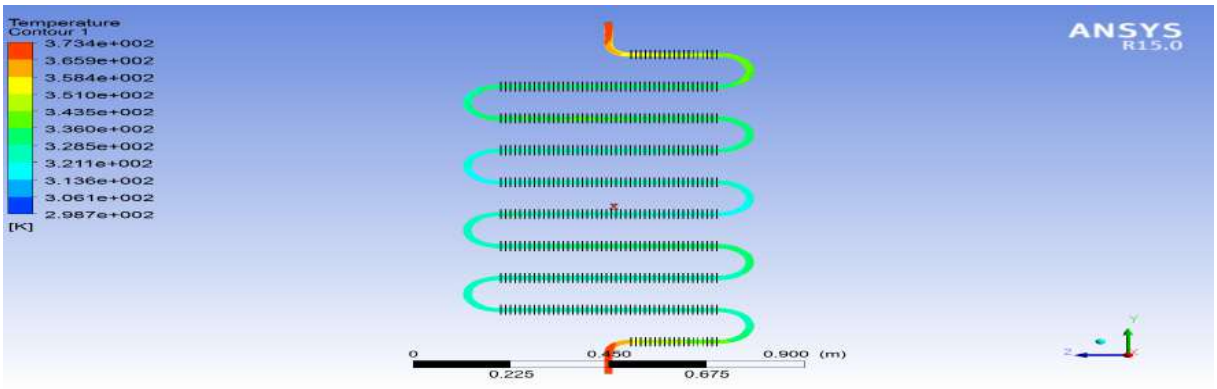


Triangle

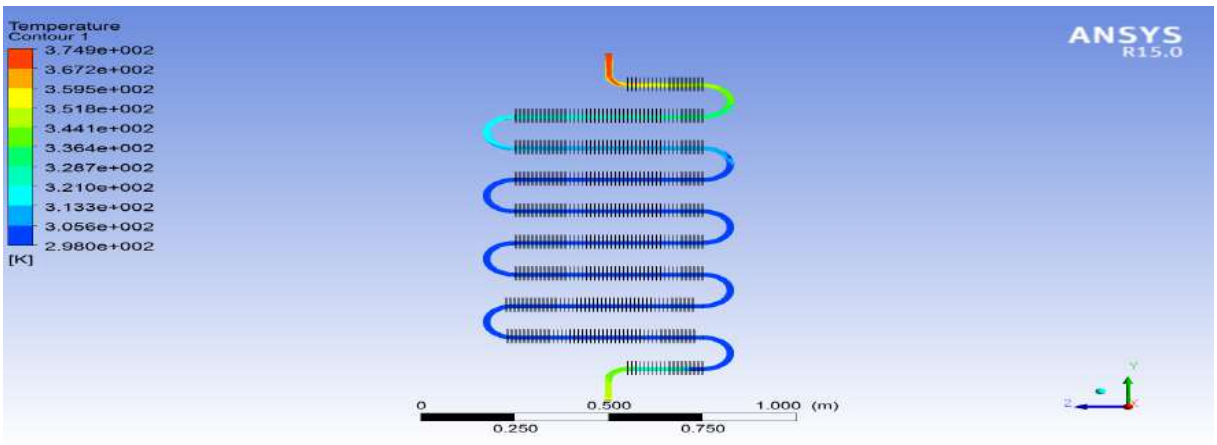
Figure III -6 : variation de température à l'instant 60s



Cercle

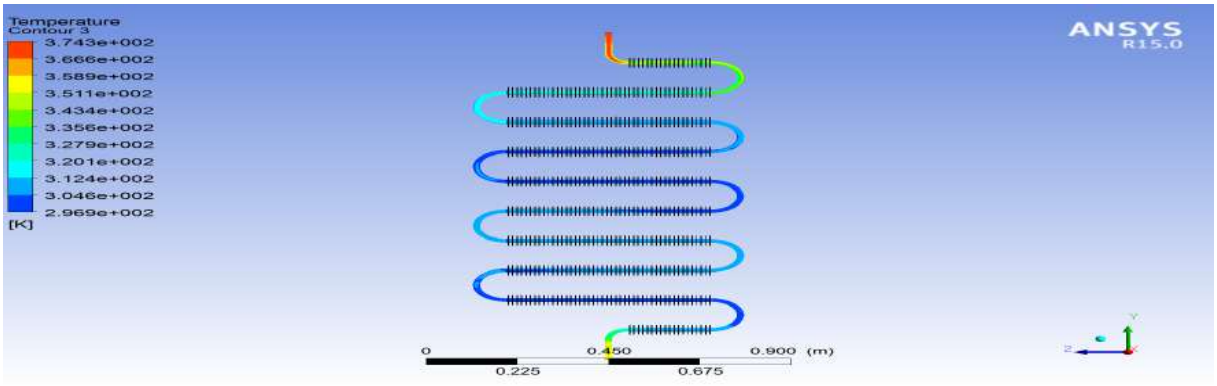


Rectangle

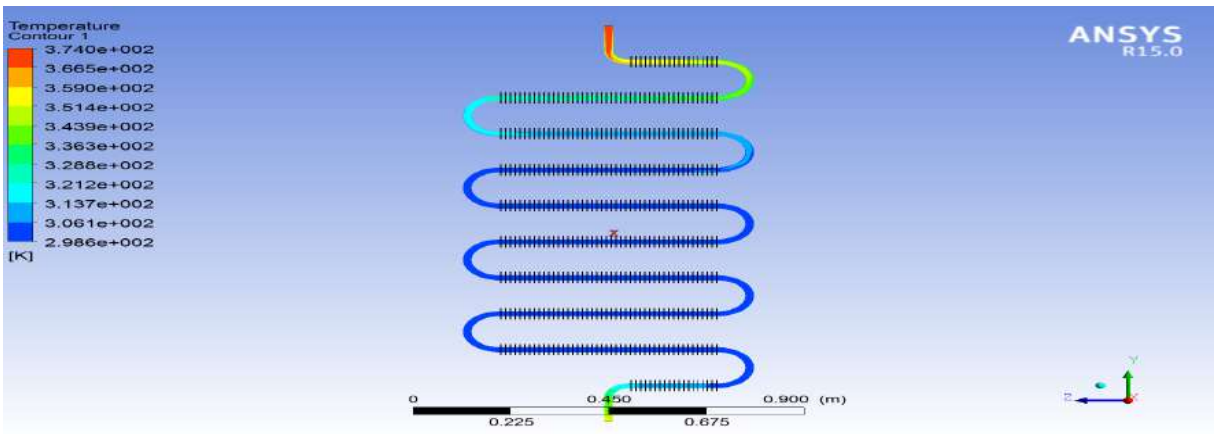


Triangle

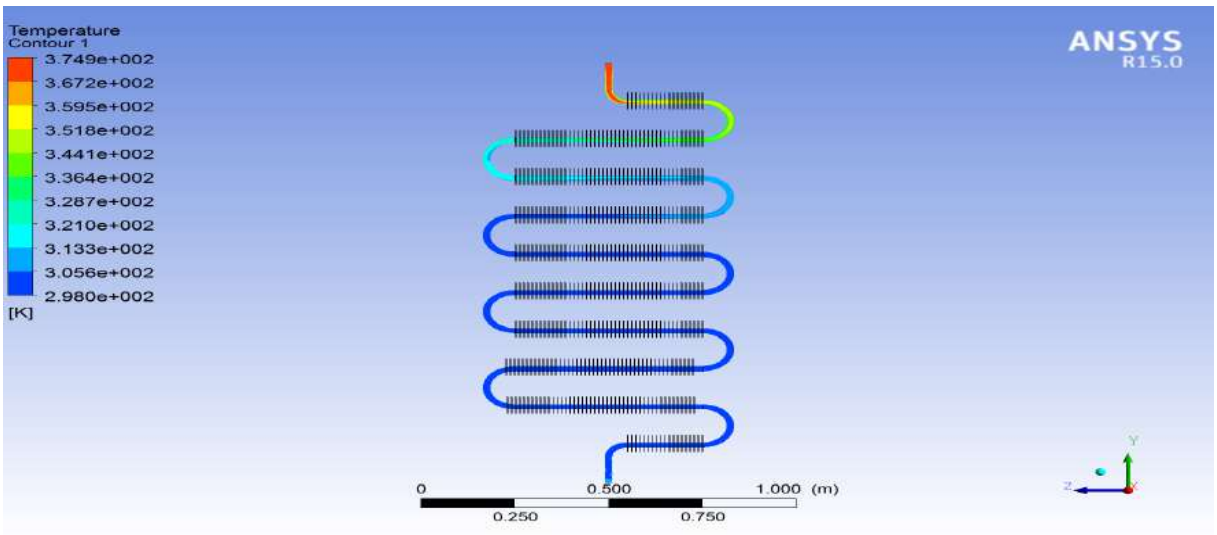
Figure III -7 : variation de température à l'instant 120s



Cercle

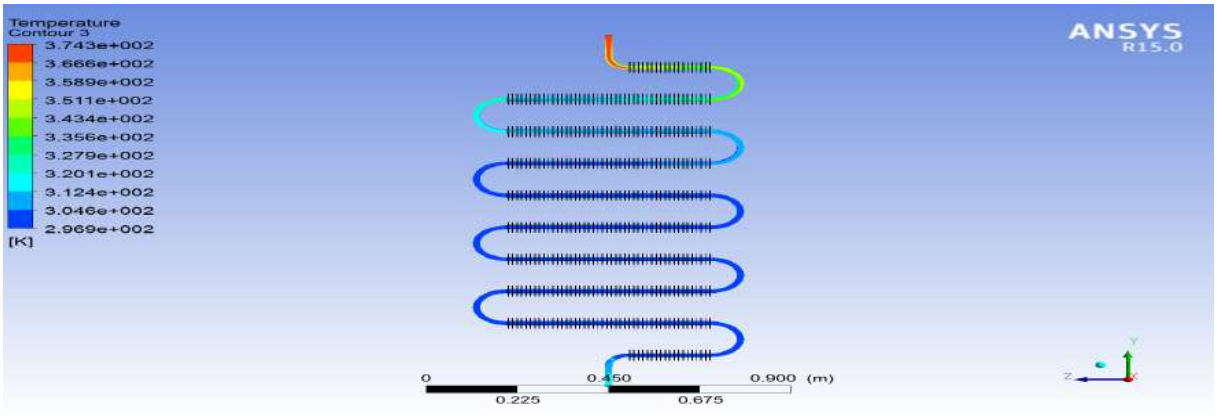


Rectangle

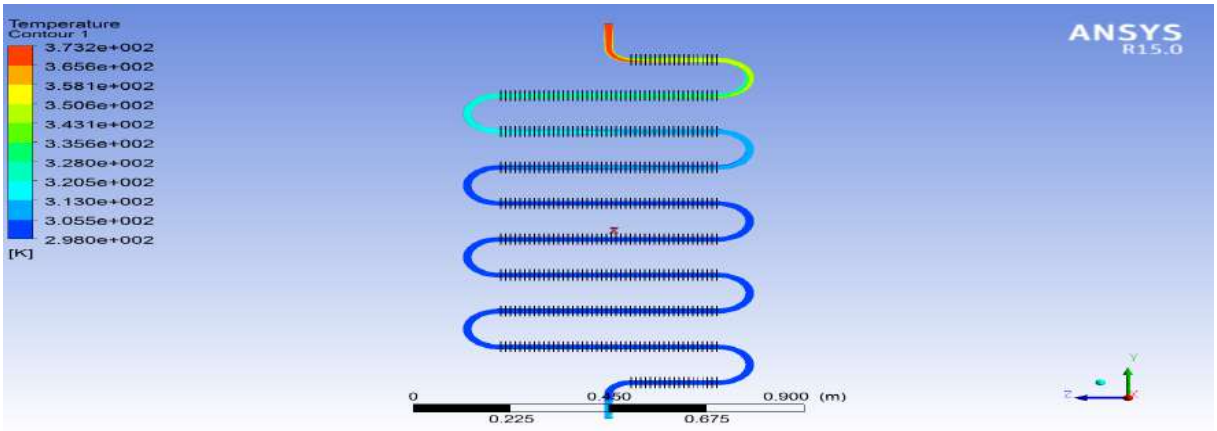


Triangle

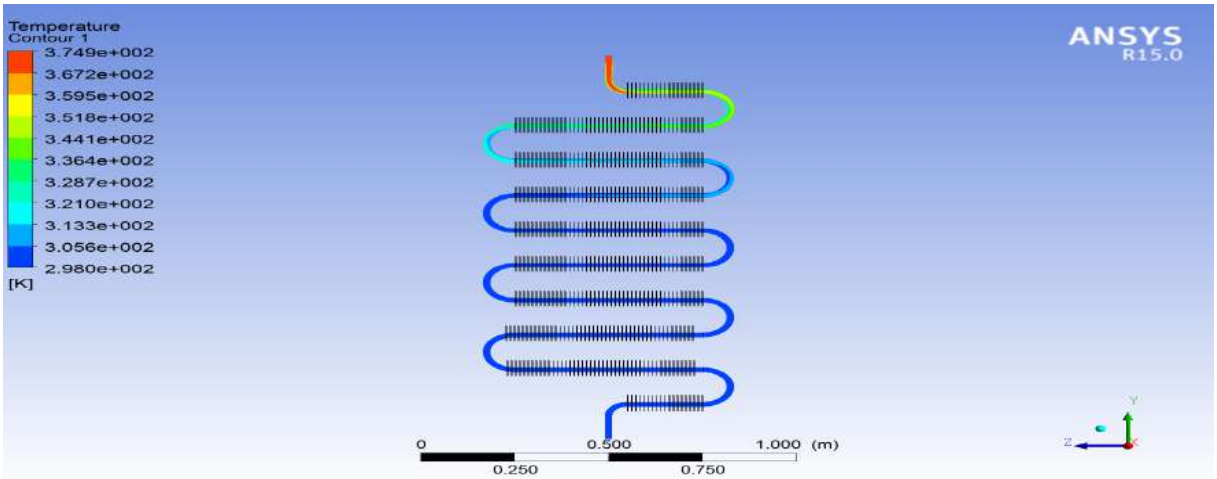
Figure III -8 : variation de température à l'instant 180s



Cercle

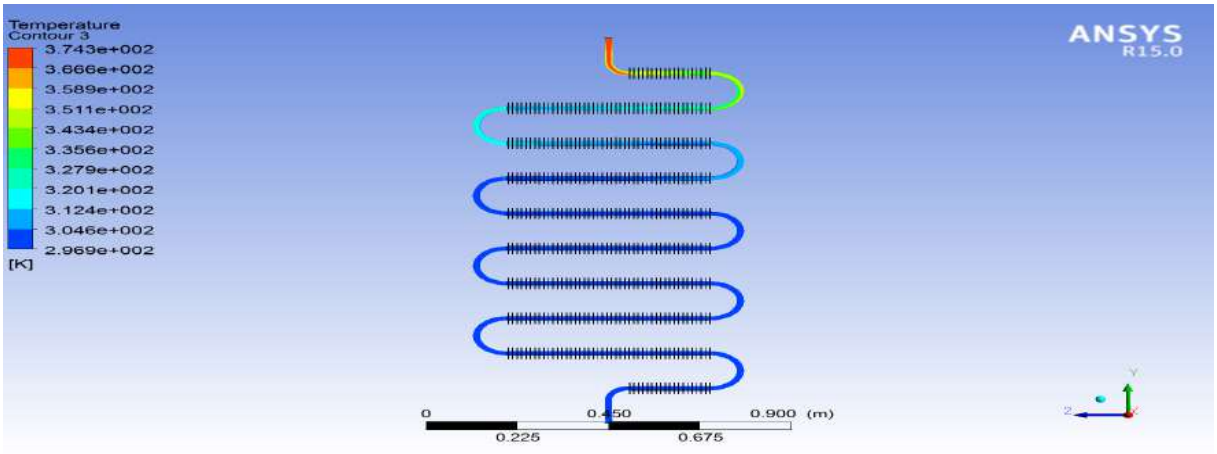


Rectangle

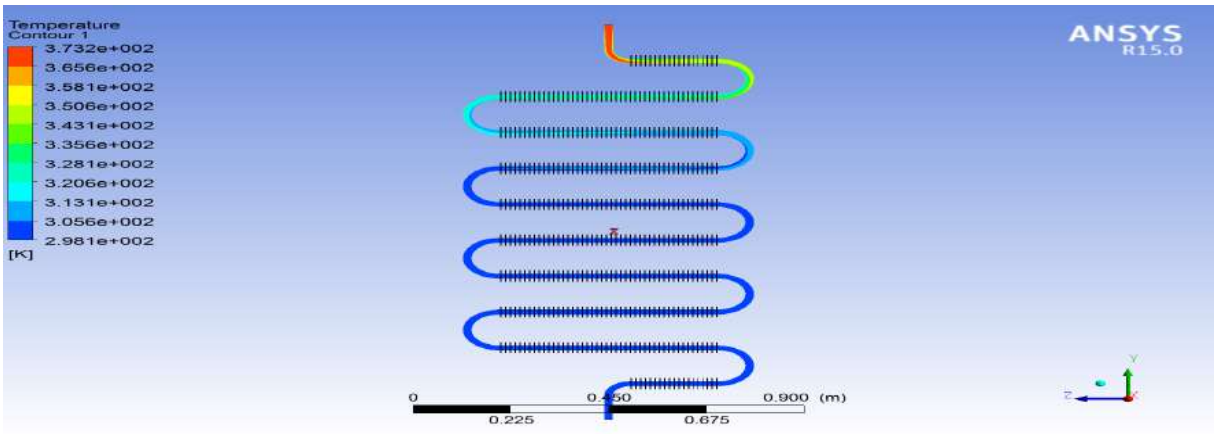


Triangle

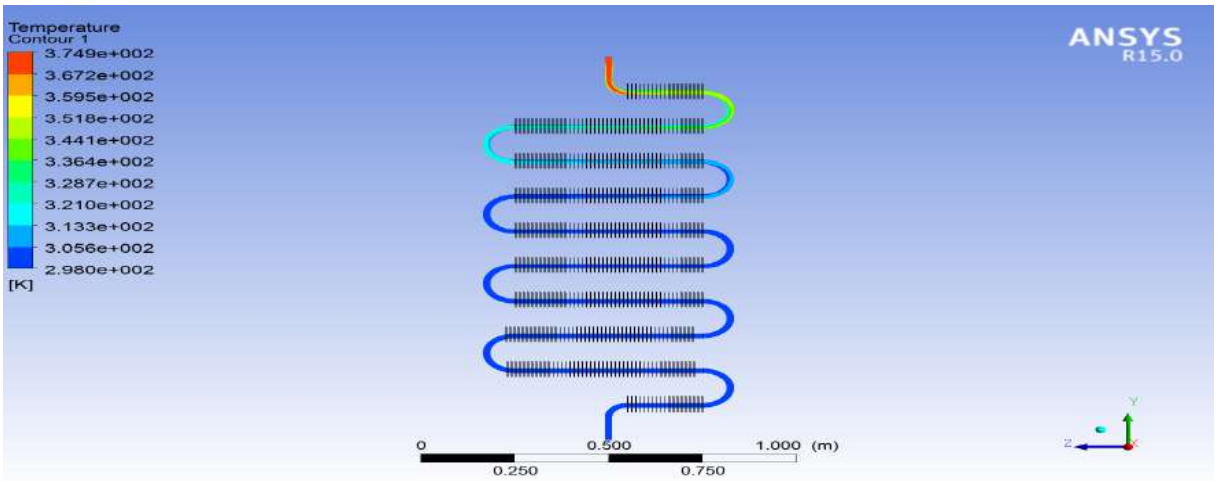
Figure III -9 : variation de température à l'instant 240s



Cercle



Rectangle



Triangle

Figure III -10 : variation de température à l'instant 270s

III-3-3 Gradient de température

Dans les tableaux (III-2, III-3, III-4) nous prendrons la température dans le centre de chaque cœur pour noter la déférence de la variation dans le temps (0s ; 60s ; 120s ; 180s ; 240s ; 270s) et tracer la courbe pour chaque tableau.

III-3-3-1 Cercle

Tableaux III-2 : variation de température en fonction de temps

t(s)	T(k)
0	373
60	351
120	327
180	304
240	298
270	298

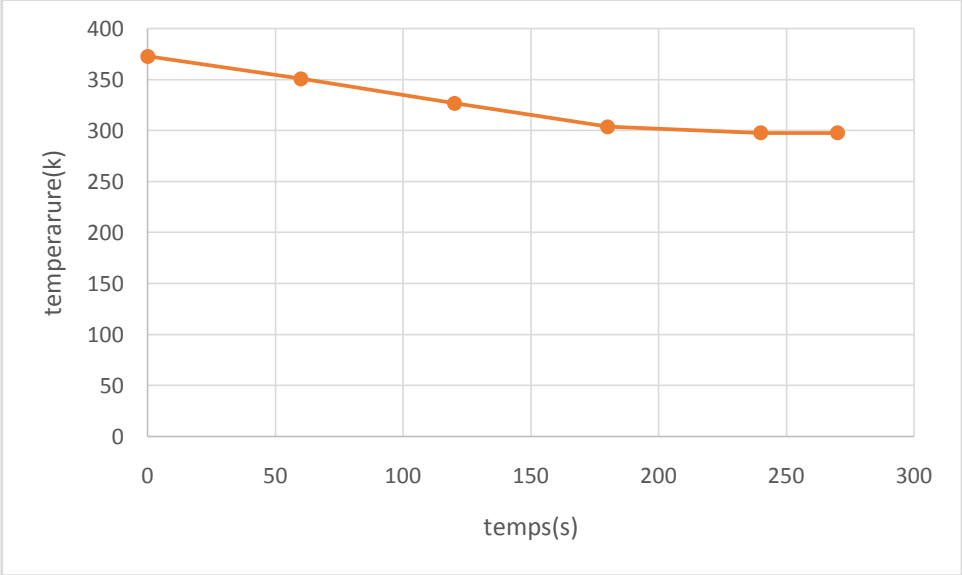


Figure III-11 : profile de grade température en fonction de tempe

III-3-3-2 Rectangle

Tableaux III-3 : variation de température en fonction de temps

t(s)	T(k)
0	373
60	358
120	327
180	300
240	298
270	298

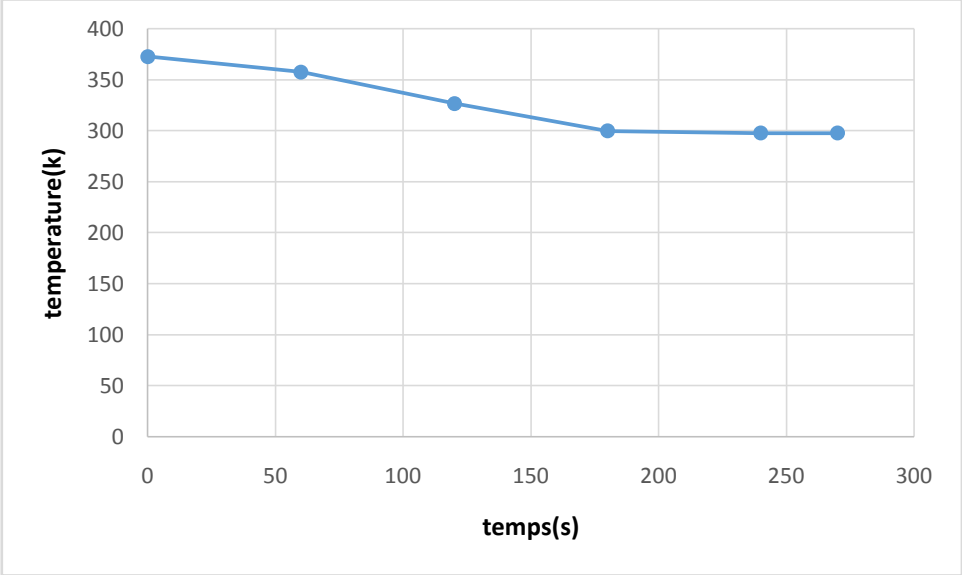


Figure III-12 : profile de grade température en fonction de tempe

III-3-3-3 triangle :

Tableaux III-4 : variation de température en fonction de temps

t(s)	T(k)
0	373
60	328
120	305
180	298
240	298
270	298

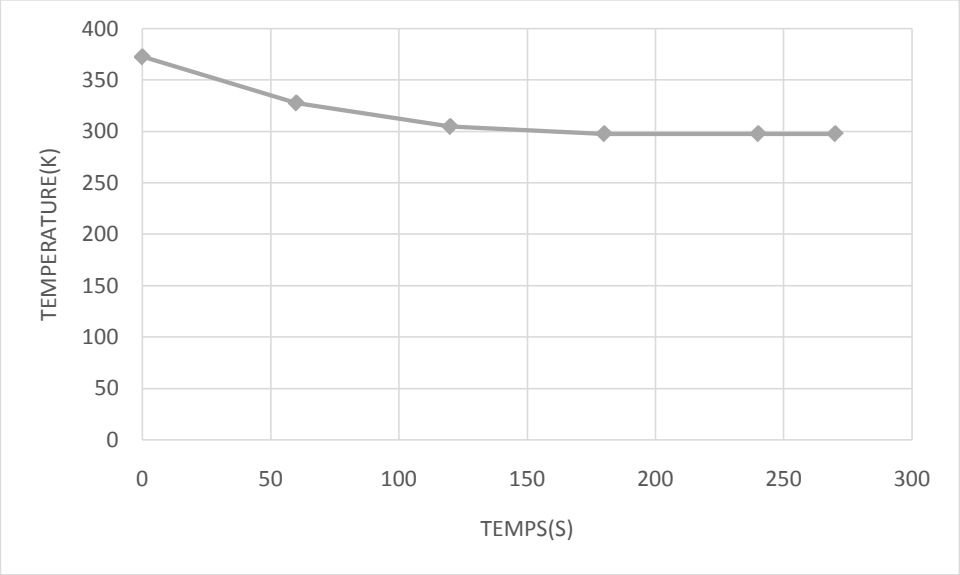


Figure III-13 : profile de grade température en fonction de tempe

III-3-3-4 Les trios forme

III-3-3-5 Introduction :

Dans cette section, nous allons suivre l'évolution de température pour les trois formes ou même temps et tracer la courbe de cette étude.

Tableaux III-5 : variation de température en fonction de temps

t(s)	T(k) Cercle	T(k) Rectangle	T(k) Triangle
0	373	373	373
60	351	358	328
120	327	327	305
180	304	300	298
240	298	298	298
270	298	298	298

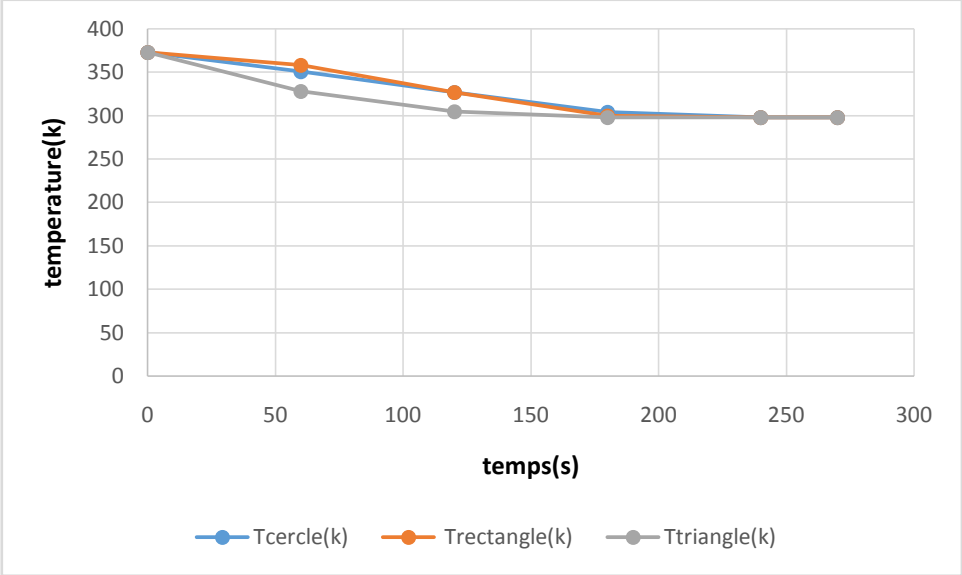


Figure III-14 : profile de grade température en fonction de tempe

III-3-3-5 Analyse :

Dans les figures précèdent, nous avons comparé le résultat de simulation de la variation de température en fonction de temps pour les différentes formes d'ailettes.

Donc nous avons remarqué une différence de la rapidité de refroidissement de forme à l'autre, Par exemple dans le cas d'un échangeur de chaleur avec des ailettes triangulaire le refroidissement et plus rapide que avec des ailettes circulaires et rectangulaires.

Dans la forme circulaire et rectangulaire l'atterrissage de la température au niveau de température ambiant est à l' instant 300s. Par contre dans la forme triangulaire est à l'instant 270s.

conlution général

Conclusion générale

Dans ce travail, nous avons présenté une étude de l'influence de la géométrie d'ailettes sur les performances de l'échangeur de chaleur

Les résultats des calculs numériques obtenus nous ont permis de voir la variation de la température, évaluer et explorer la sensibilité de la forme des ailettes sur les performances de la machine étudiée.

La simulation est faite en utilisant le code CFX sous environnement ANSYS 15.0. Le maillage adopté pour cette étude est un maillage raffiné de 437 254 nœuds. Le calcul est réalisé sur un PC CoreI3, 3 Go de RAM. Le temps de calcul est de 24 heures pour une simulation.

L'étude montre que :

- Les ailettes jouent un rôle rentable dans le domaine des échangeurs de chaleur.
- La forme triangulaire est la forme la plus approprie parmi les trois formes étudié (cercle, triangle, rectangle).
- la variation de température ne dépend que la surface d'change pour les formes circulaire et rectangulaire.

On peut conclure, d'après les résultats de la simulation numérique de L'ANSYS, on a constaté que la variation de température dans l'échangeur avec les ailettes triangulaires est plus importante que l'échangeur avec les ailettes circulaires et rectangulaires.

Enfin, il est important pour les études prochaines de développer des recherches autour les ailettes et aussi en proposant d'autre formes géométrique.

Références bibliographiques

[1] : ARGOUB RABEH, mémoire Installation et Maintenance des Equipements Frigo-Industriel et Climatisation, ANNABA

[2] : **Improhome** : Maison et bricolage, Site internet, « L'histoire du frigo », site consulté en Février 2014

[3] : www.iifiir.org , Institut international du froid. Organisation intergouvernementale pur le développement du froid. France.

[4] : Gearoid Falay, Robert Devant, Richard Sweatser, The futur of absorption technologie in American.

[5] : C. Schein et R. Rader mâcher, Scroll compresser simulation model. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power123 (2001)

[6] : Mouad DINY, étude de fonctionnement d'une machine frigorifique à adsorption modélisation des transferts de chaleur et de masse et optimisation des fonctionnements de la machine, décembre 1996, école doctorale PROMEN

[7] : Maxime Duminil, Théorie des machines frigorifiques, Machine à compression mécanique B 9 730, traité Génie énergétique, Techniques de l'Ingénieur, fév.1996

[8] : Vrinat G. Production du froid. Technologie des machines industrielles. B 2 365, traité Génie énergétique, Techniques de l'Ingénieur, oct. 1991.

[9] D. S. Kim, and **C.A** .infante Ferreira, Solar réfrigération options- a state of-the-art review , International journal of Réfrigération 31, pp 3-15, (2008).

[10] I. Belahbib, A. Tihami, étude d'un système de climatisation couple à l'énergie solaire Thèse d'ingéniorat, Université Kasdi Merbeh de Ouargla, p 92, (2011).

[11] P. Velluet, R. Dehausse, système frigorifique a absorption mécaniquement autonome utilisent l'énergie solaire machine expérimentale de petite puissance, commission des communautés européennes, pp 16, (1986).

[12] A. Brigitte, M. Nouadje, combinaison du solaire et de modules Peltier pour production de froid au SAHEL , mémoire master, Institut International d'ingénierie de l'Eau et de l'Environnement, pp 18, (2011).

[13] A. Errougani, fabrication et expérimentation d'un réfrigérateur solaire à adsorption utilisent le couple charbon actif-méthanol dans le site de Rabat , thèse doctorat d'état, université Mohammed V, pp 3, (2007).

[14] W. Chekirou, "Etude et Analyse d'une machine frigorifique solaire à adsorption", Thèse de doctorat, Université Mentouri, pp 14, (2008).

[15] D. Zejli, R. Benchrifa, A. Bennouna, O. K.Bouhelal, " Analyse énergetique et entropique de la régénération de chaleur dans d'une machine frigorifique à adsorption", Revue de mécanique appliquée et théorique, Vol. 1, 4, pp 253- 268, (2003).

[16] A. El Almers, " étude du transfert de chaleur et de masse dans un lit fixe de charbon actif réagissant par adsorption avec l'ammoniac – application à la modélisation d'une machine frigorifique solaire", Thèse de Doctorat, Tétouan, (2002).

[17] A. Bontemps, A. Garrigue, et al, Echangeurs de Chaleur - Intensification des échanges thermiques", Techniques de l'Ingénieur b2341, pp 1-23, (1995).

[18] N. Benayad, Etude et optimisation des échangeurs de chaleur, thèse de Magister, Université Mentouri Constantine, (2008).

[19] DERGHOUT. Z : mémoire de magister, investigation du cycle de réfrigération à éjecto-compression et ses applications dans le froid, le chaud et l'énergie, Université Mentouri Constantine 2007. P17,18,19,20,43,44,100, 101,102,103,104,105.

[20] LIMANE Abdelhakim: mémoire de magister, étude numérique d'un système de réfrigération à éjecteur Université M'hamed BOUGARA, Boumerdes 2009, P5.

[21] ANDRE BONTEMPS « ECHANGEUR DE CHALEUR » Université Joseph Fourier, Institut universitaire de Technologie, Département Génie thermique et Énergie (Grenoble)

[22] Soltani, N., "simulation numérique d'une batterie à ailettes fonctionnant en régimes sec ethumide", Thèse de Magistère, Université de Batna, pp 1-74 (1998)

[23] Berrada, N., C. Marvillet, "Synthèse bibliographique sur les transferts de chaleur et les pertesde pression dans les batteries à ailettes lisses ou corrigées continues", Grenoble, Greth (2007).

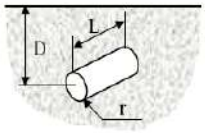
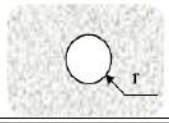
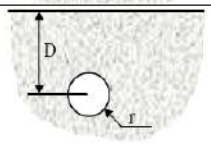
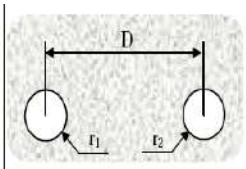
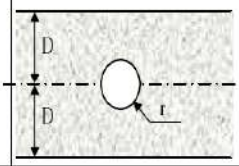
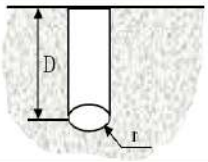
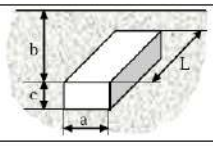
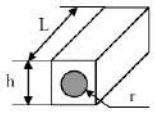
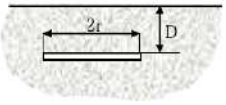
[24] Hugo, J. M., "Transferts dans les milieux cellulaires à forte porosité-Application à l'optimisation structurale des échangeurs à ailettes", Thèse de Doctorat, Spécialité Mécanique & Energétique Université D'aix-Marseille, pp 1-274 (2012).

[25] Bontemps, A., A. Garrigue, et al "Echangeurs de Chaleur - Intensification des échanges thermiques", Techniques de l'Ingénieur b2341, pp 1-23 (1995).

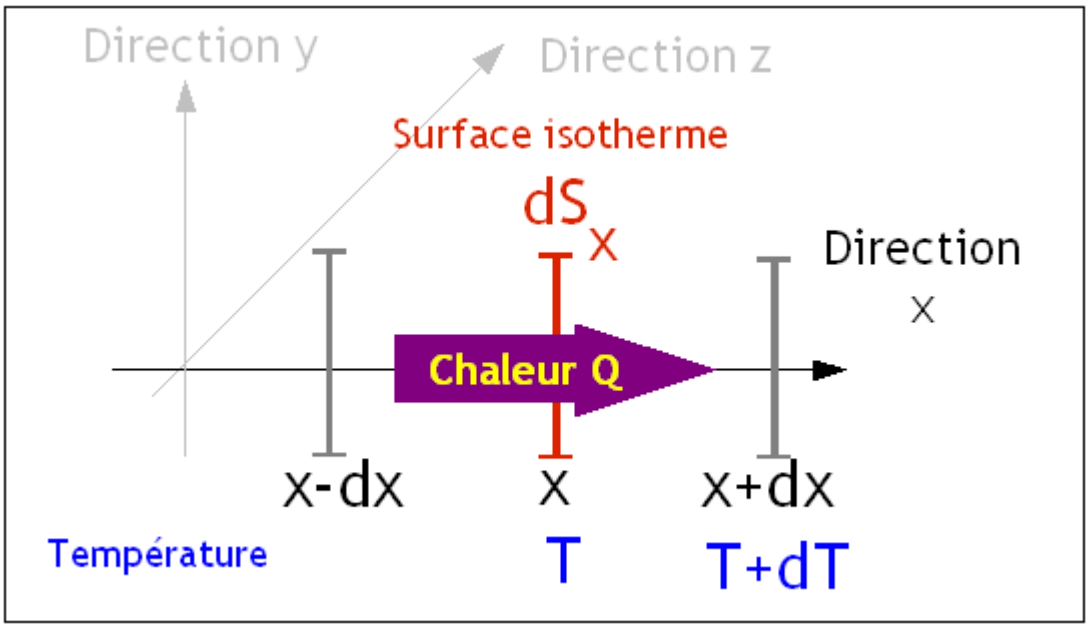
[26] Feidt, R., "Réfrigérants atmosphériques-Aéroréfrigérants directs secs", Technique de l'ingénieur Editions T.I. BE8940 (2010).

ANNEXE

Valeur du coefficient de forme de conduction :

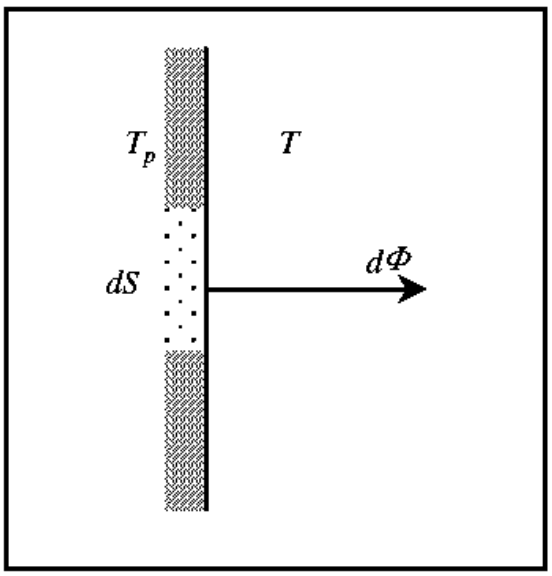
Système	Schéma	Coefficient de forme	Domaine d'application
Cylindre isotherme de rayon r enterré dans un milieu semi-infini à surface isotherme		$\frac{2\pi L}{\cosh^{-1}\left(\frac{D}{r}\right)}$	L>>r
Sphère isotherme de rayon r enterrée dans un milieu infini		$4\pi r$	
Sphère isotherme enterrée dans un milieu semi-infini à surface isotherme		$\frac{4\pi r}{1-\frac{r}{2D}}$	
Conduction entre 2 cylindres isothermes enterré dans un milieu infini		$\frac{2\pi L}{\cosh^{-1}\left(\frac{D^2-r_1^2-r_2^2}{2r_1r_2}\right)}$	L>>r L>>D
Cylindre horizontal au centre dans une plaque infinie		$\frac{2\pi L}{\ln\left(\frac{4D}{r}\right)}$	
Cylindre isotherme de rayon r placé dans un milieu semi-infini		$\frac{2\pi L}{\ln\left(\frac{2L}{r}\right)}$	L>>2r
Parallélépipède rectangle isotherme enterré dans un milieu semi-infini à surface isotherme		$1.685L\left[\log\left(1+\frac{b}{a}\right)\right]^{-0.59}\left(\frac{b}{c}\right)^{-0.078}$	
Cylindre au centre d'un parallélépipède de section carrée		$\frac{2\pi L}{\ln\left(0.54\frac{h}{r}\right)}$	L>>W
Plaque rectangulaire mince enterrée dans milieu semi-infini à surface isotherme		4r 8r	D = 0 D>>2r

Transfert de chaleur par conduction



COEFFICIENT LOCAL DE CONVECTION

Lorsqu'un fluide de température T se trouve en contact avec une paroi solide de température T_p différente (plus élevée pour fixer les idées), il reçoit de chaque élément dS de l'aire de contact un flux $d\Phi$. Le mécanisme est le suivant : les parcelles fluides au contact de la paroi s'échauffent jusqu'à T_p ; elles cèdent ensuite aux parcelles voisines une fraction de la chaleur reçue par conduction. ou par mélange, ou par les deux phénomènes à la fois.

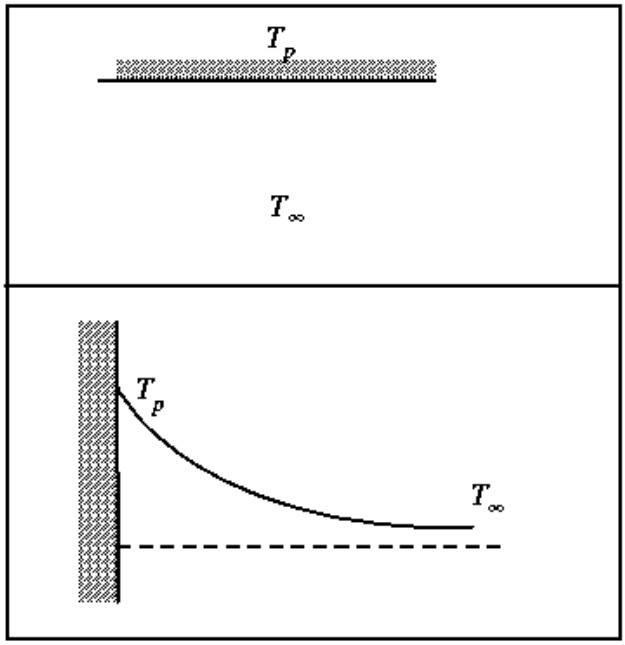


Le coefficient local de convection se définit par : $\varphi = d\Phi/dS = h.(T_p - T)$
Cette expression est purement phénoméno-logique. Contrairement aux apparences, elle ne suppose pas la linéarité entre densité de flux et écart de température. Seule l'étude ultérieure renseignera sur h et son éventuelle dépendance à l'écart de température. La température du fluide n'est certainement pas uniforme, sinon les parcelles pariétales ne pourraient transmettre aucune chaleur aux autres.
Que choisir pour T ?

GEOMETRIE FERMEE OU OUVERTE

La température utilisée est T_∞

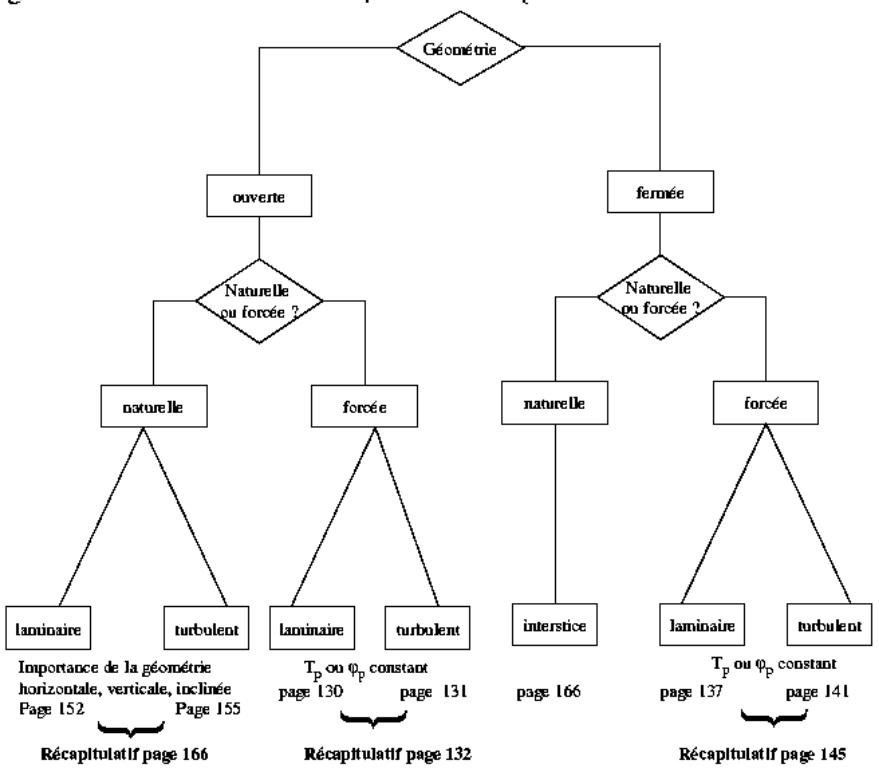
$$\varphi = h.(T_p - T_\infty)$$



Dans le sens perpendiculaire à la paroi, le fluide s'étend jusqu'à l'infini (traduisons : très loin), et on adopte comme température du fluide celle T_∞ **à grande distance de la paroi**. A proximité de la paroi, le fluide évolue entre la température de paroi et T_∞. Cette température peut aussi s'interpréter comme une température de mélange si l'on néglige la couche limite (petite devant l'épaisseur complète de fluide) où la température varie.

Figure 4.1.2 : Température équivalente dans le cas d'une plaque

Ainsi, pour s'orienter convenablement dans le choix des corrélations, il convient d'abord d'identifier les caractéristiques de la configuration à l'étude. Le logigramme ci dessous résume les questions à se poser.



Equation de la mécanique d'un fluide visqueux - Navier Stokes -

$$\rho\frac{D\vec{w}}{Dt}=\rho\vec{F}-\vec{\nabla}p+\vec{\nabla}.v$$

Evaluons tout d'abord le premier membre de l'équation :

Si l'on pose : $x^+=\frac{x}{L_0}$ et donc $\vec{\nabla}=\frac{1}{L_0}\vec{\nabla}^+$

$$\rho^+=\frac{\rho}{\rho_0},\ w^+=\frac{w}{w_0},\ t^+=\frac{t.w_0}{L_0} \text{ et donc } \frac{D}{Dt}=\frac{w_0}{L_0}\frac{D}{Dt^+}$$

$$\mu^+=\frac{\mu}{\mu_0},\ z^+=\frac{z}{L_0}$$

$$p^+=\frac{p}{\rho_0 w_0^2} \text{ la pression est ramenée à celle de référence } \rho_0 w_0^2$$

L'équation devient : $\frac{\rho_0 w_0^2}{L_0}.\rho^+.\frac{D\vec{w}^+}{Dt^+}=\rho\vec{F}-\vec{\nabla}p+\vec{\nabla}.V$

- Si l'on suppose que les forces externes se réduisent à la pesanteur :

$\rho\vec{F}=-\rho g\vec{\nabla}z$ soit encore $\rho\vec{F}=-\rho_0 g.\rho^+\vec{\nabla}+z^+$

- La variation de pression s'écrit :

$$\vec{\nabla}p=\frac{\rho_0 w_0^2}{L_0}\vec{\nabla}^+p^+$$

- Si l'on suppose le fluide Newtonien :

$v=2\mu.[\frac{1}{2}(\nabla w+\nabla w^T)-\frac{1}{3}\nabla wI]$ qui devient en variables adimensionnelles

$$v=\frac{\mu_0 w_0}{L_0}.2\mu^+.[\frac{1}{2}(\nabla^+w^++\nabla^+w^{+T})-\frac{1}{3}\nabla^+w^+I]=\frac{\mu_0 w_0}{L_0}v^+$$

$$\vec{\nabla}.v=\frac{\mu_0 w_0}{L_0^2}\vec{\nabla}.v^+$$

Finalement, on obtient :

$$\frac{\rho_0 w_0^2}{L_0}\rho^+.\frac{D\vec{w}^+}{Dt^+}=-\rho_0 g\rho^+\vec{\nabla}^+z^+-\frac{\rho_0 w_0^2}{L_0}\vec{\nabla}^+p^++\frac{\mu_0 w_0}{L_0^2}\vec{\nabla}^+.v^+$$

$$\rho^+.\frac{D\vec{w}^+}{Dt^+}=-\frac{L_0 g}{w_0^2}\rho^+\vec{\nabla}^+z^+-\vec{\nabla}^+p^++\frac{\mu_0}{\rho_0 w_0 L_0}\vec{\nabla}^+.v^+$$

Récapitulatif des équations

$$\rho^+.\frac{D\vec{w}^+}{Dt^+}=-\frac{L_0 g}{w_0^2}\vec{\nabla}^+ z^+-\frac{\beta_0 T_0 L_0 g}{w_0^2}.\beta^+(1-T^+).\vec{\nabla}^+ z^+-\vec{\nabla}^+ p^++\frac{\mu_0}{\rho_0 w_0 L_0}\vec{\nabla}.v^+$$

$$\frac{\partial \rho^+}{\partial t^+}+\vec{\nabla}^+.\rho^+\vec{w}^+=0$$

$$\rho^+\frac{Dh^+}{Dt^+}=\frac{w_0^2}{c_{p0}T_0}\frac{Dp^+}{Dt^+}+\frac{\mu_0 w_0}{\rho_0 c_p T_0 L_0}.(\Omega+\pi)^++\frac{\lambda_0}{\rho_0 c_p w_0 L_0}\vec{\nabla}^+.(K^+\vec{\nabla}^+T^+)$$

On introduit alors les nombres sans dimension :

Froude $Fr=\dfrac{w_0}{\sqrt{g.L_0}}$

Reynolds[3] $Re=\dfrac{\rho_0 w_0 L_0}{\mu_0}$

Grashof $Gr=\dfrac{\beta_0 T_0 L_0^3 \rho_0^2 g}{\mu_0^2}$ donc : $\dfrac{Gr}{Re^2}=\dfrac{\beta_0 T_0 L_0 g}{w_0^2}$

Eckert $Ec=\dfrac{w_0^2}{c_{p0}T_0}$

Prandtl[4] $Pr=\dfrac{c_{p0}\mu_0}{\lambda_0}$

D'où les équations adimensionnées (l'équation de continuité ne fait pas apparaître de nombres adimensionnels) :

Récapitulatif des équations adimensionnées

$$\rho^+.\frac{D\vec{w}^+}{Dt^+}=-\frac{1}{Fr^2}\vec{\nabla}^+ z^++\frac{Gr}{Re2}.\beta^+(1-T^+).\vec{\nabla}^+ z^+-\vec{\nabla}^+ p^++\frac{1}{Re}\vec{\nabla}.v^+$$

$$\rho^+\frac{Dh^+}{Dt^+}=Ec\frac{Dp^+}{Dt^+}+\frac{Ec}{Re}.(\Omega+\pi)^++\frac{1}{Re.Pr}.\vec{\nabla}^+.(K^+\vec{\nabla}^+T^+)$$

Conditions de nature thermique – condition de Newton $\varphi = h.\Delta T$

On pose : $\varphi^+ = \frac{L_0}{\lambda_0 T_0}\varphi$. On choisit d'adimensionner à partir de ΔT. Soit :

$\varphi^+ = \frac{L_0}{\lambda_0 \Delta T}\varphi$. On introduit le nombre de Nusselt[6] : $Nu = \frac{h.L_0}{\lambda_0}$. Soit :

$$\varphi^+ = Nu \qquad \text{[Eq 4.8]}$$

$$\text{avec } Nu = \frac{h.L_0}{\lambda_0}$$

Flat Plate Correlations

Flow Conditions	Average Nusselt Number	Restrictions
Laminar	$\overline{Nu_L} = 0.664\,\mathrm{Re}_L^{1/2}\,\mathrm{Pr}^{1/3}$	$\mathrm{Pr} \geq 0.6$
Turbulent	$\overline{Nu_L} = \left(0.037\,\mathrm{Re}_L^{4/5} - A\right)\mathrm{Pr}^{1/3}$ where $A = 0.037\,\mathrm{Re}_{x,c}^{4/5} - 0.664\,\mathrm{Re}_{x,c}^{1/2}$	$0.6 \leq \mathrm{Pr} \leq 60$ $\mathrm{Re}_{x,c} \leq \mathrm{Re}_L \leq 10^8$

Note: All fluid properties are evaluated at film temperature for flat plate correlations.

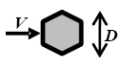
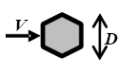
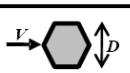
Cylinders in Cross Flow

Cylinder Cross Section	Reynolds Number Range	Average Nusselt Number	Restrictions
	0.4-4	$\overline{Nu_D} = 0.989\,\mathrm{Re}_D^{0.330}\,\mathrm{Pr}^{1/3}$	$\mathrm{Pr} \geq 0.7$
	4-40	$\overline{Nu_D} = 0.911\,\mathrm{Re}_D^{0.385}\,\mathrm{Pr}^{1/3}$	$\mathrm{Pr} \geq 0.7$
	40-4,000	$\overline{Nu_D} = 0.683\,\mathrm{Re}_D^{0.466}\,\mathrm{Pr}^{1/3}$	$\mathrm{Pr} \geq 0.7$
	4,000-40,000	$\overline{Nu_D} = 0.193\,\mathrm{Re}_D^{0.618}\,\mathrm{Pr}^{1/3}$	$\mathrm{Pr} \geq 0.7$
	40,000-400,000	$\overline{Nu_D} = 0.027\,\mathrm{Re}_D^{0.805}\,\mathrm{Pr}^{1/3}$	$\mathrm{Pr} \geq 0.7$

Note: All fluid properties are evaluated at film temperature for cylinder in cross flow correlations.

Alternative Correlations for Circular Cylinders in Cross Flow:

- The Zukauskas correlation (7.53) and the Churchill and Bernstein correlation (7.54) may also be used

	6,000-60,000	$\overline{Nu_L} = 0.304\,\mathrm{Re}_D^{0.59}\,\mathrm{Pr}^{1/3}$	gas flow
	5,000-60,000	$\overline{Nu_D} = 0.158\,\mathrm{Re}_D^{0.66}\,\mathrm{Pr}^{1/3}$	gas flow
	5,200-20,400	$\overline{Nu_D} = 0.164\,\mathrm{Re}_D^{0.638}\,\mathrm{Pr}^{1/3}$	gas flow
	20,400-105,000	$\overline{Nu_D} = 0.039\,\mathrm{Re}_D^{0.78}\,\mathrm{Pr}^{1/3}$	gas flow
	4,500-90,700	$\overline{Nu_D} = 0.150\,\mathrm{Re}_D^{0.638}\,\mathrm{Pr}^{1/3}$	gas flow

Freely Falling Liquid Drops

Average Nusselt Number
$\overline{Nu_D} = 2 + 0.6\,\mathrm{Re}_D^{1/2}\,\mathrm{Pr}^{1/3}$

Note: All fluid properties are evaluated at T_∞ for the falling drop correlation.

Flow Around a Sphere

Average Nusselt Number	Restrictions
$\overline{Nu_D} = 2 + \left(0.4\,\mathrm{Re}_D^{1/2} + 0.06\,\mathrm{Re}_D^{2/3}\right)\mathrm{Pr}^{0.4}\left(\frac{\mu}{\mu_s}\right)^{1/4}$	$0.71 \le \mathrm{Pr} \le 380$ $3.5 \le \mathrm{Re}_D \le 7.6\times10^4$ $1.0 \le (\mu/\mu_s) \le 3.2$

Note: For flow around a sphere, all fluid properties, except μ_s, are evaluated at T_∞. μ_s is evaluated at T_S.