

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
CENTRE UNIVERSITAIRE SALHI AHMED- NAAMA



INSTITUT DES SCIENCES ET TECHNOLOGIES
DÉPARTEMENT DE TECHNOLOGIE

MÉMOIRE

En vue de l'obtention du diplôme de **Master** en :

Génie Mécanique

Option : Énergétique

Intitulé :

ÉTUDE DES MODÈLES DE CALCUL DES PROPRIÉTÉS THERMO-PHYSIQUES DES NANO FLUIDES POUR UN ÉCHANGEUR A PLAQUES

Présenté par :

- **SOUCI Abderrahmen**
- **CHABANE Mohammed**
- **BOUSAID Mohamed Zakaria**

Soutenu le :29/06/2021.....devant le Jury :

<i>DrBOIKHADIA Karima</i>	<i>MCB</i>	<i>Centre Universitaire Naâma</i>	<i>Président</i>
<i>DrBOUNOUA Nouredine</i>	<i>MCB</i>	<i>Centre Universitaire Naâma</i>	<i>Encadreur</i>
<i>DrMEDJAHED Driss Meddah</i>	<i>MCB</i>	<i>Centre Universitaire Naâma</i>	<i>Examineur</i>

Remerciement

Nous remercions tout d'abord notre **ALLAH** pour nous avoir donné la force et le courage pour faire ce modeste travail.

Nos sincères remerciements s'adressent à notre encadreur Mr **BOUNOUA NOUREDDINE** pour ses directives et ses conseils durant notre période de projet fin étude, ainsi que pour l'intérêt particulier qu'il a prodigué à notre mémoire.

Nous le remercions également pour la confiance qu'il nous a accordée et sans laquelle ce travail n'aurait pas été tel qu'il le fut.

Nos remerciements les plus vifs s'adressant aussi aux Messieurs le président et les membres de jury d'avoir accepté d'examiner et d'évaluer notre travail.

Nous adressons également nos remerciements les plus vifs aux responsables de filière de génie mécanique énergétique de l'université.

Nous remercions sincèrement tous nos enseignants qui ont veillé à notre formation.

Finalement nous adressons nos gratitudes remerciements à toute personne qui a contribué de loin ou de près à la réalisation de ce travail.

A decorative border of pearls and roses surrounds the text. The top and bottom borders consist of a row of large pearls, with a row of smaller pearls below it. The left and right borders consist of a vertical line of pearls. In the top-left corner, there is a bouquet of white and red roses with green leaves and buds. In the bottom-right corner, there is a single large white rose with green leaves and buds.

Dédicace

Nous dédions ce modeste travail à
Nos chers parents pour leurs soutiens et leurs
encouragements durant toutes nos carrières d'étude
Nos frères
Toutes nos grandes familles
À tous les étudiants de génie mécanique
Ainsi que tous nos amis et tous qui nous connaissent

SOUCI Abderrahmen

CHABANE Mohammed

BOUSSAID Mohamed Zakaria

Sommaire

Nomenclature

Liste des figures

Chapitre I : Notions fondamentales et principes des échangeurs de chaleur

I.1. Définition	5
I.2. Type des échangeurs de chaleur	5
I.2.1. Les échangeurs tubulaires	5
I.2.1.1. Échangeur monotube.....	6
I.2.1.2. Échangeur coaxial.....	6
I.2.1.3.Échangeur multitubulaire.....	6
I.2.1.3.1. Échangeur à tubes séparés.....	6
I.2.1.3.2. Échangeur à tubes rapprochés	7
I.2.1.3.3. Échangeur à tubes ailettes	7
I.2.1.3.4. Echangeur à tube et calandre	9
I.2.1.3.4.1. Echangeur de chaleur à tête flottante	9
I.2.1.3.4.2.Echangeur à plaque tubulaires fixes	9
I.2.1.3.4.3.Echangeur à tubes en U	10
I.2.2 Echangeur à plaque	11
I.2.2.1 Échangeurs à surface primaire.....	12
I.2.2.2. Échangeurs à surface secondaire.....	12
I.2.2.3. Échangeur lamellaire.....	12
I.2.2.4. Échangeur à spirale.....	13
I.2.2.5. Échangeurs à plaques soudées ou brasé.....	14
I.2.2.5.1. Échangeur platulaire	14
I.2.2.5.2. Échangeur Compabloc	15
I.2.2.5.3. Échangeur Packinox	16
I.2.3. Échangeurs avec un fluide changeant de phase.....	17
I.2.3.1. Évaporateurs tubulaires	17
I.2.3.1.1. Évaporateurs à l'intérieur de tubes	17
I.2.3.1.2 Évaporation à l'extérieur de tubes	17

I.2.3.2 Condenseurs tubulaires	18
I.3. Critères de classement des échangeurs de chaleur	18
I.3.1. Type de contact	18
I.3.1.1. Échangeurs à contact direct	18
I.3.1.2. Échangeurs à contact indirect	18
I.3.2. Classification selon le mode de circulation	18
I.3.2.1. Echangeur a courants parallèles	18
I.3.2.2. Echangeur à contrecourant	19
I.3.2.3. Echangeurs à courants croisés	19
I.3.3. Classement fonctionnel	20
I.3.4. Classement suivant la compacité de l'échangeur	21
I.3.5. Classification selon le nombre des fluides	21
I.3.6. Classement suivant les types d'échange	21
I.3.6.1. Échangeur sans changement de phase	21
I.3.6.2. Échangeur avec changement de phase	22
I.3.7. Classement suivant la nature du matériau de la paroi d'échange.....	22
I.3.8. Classement technologique.....	22

Chapitre II : les nanofluides et nanoparticules

II-1 Généralité sur les nanofluides et nanoparticules	24
II-1-1 Production des nanofluides et nanoparticules	24
II-2 Caractéristiques thermo-physiques des nanofluides	29
II-2-1 Fraction volumique (ϕ)	29
II-2-2 Conductivité thermique.....	30
a-Modèle de Maxwell.....	30
b-Modèle de Bruggeman.....	30
c- Modèle de Hamilton & Crosser.....	31
d-Modèle de Yu et Choi.....	31
II-2-3 Viscosité dynamique des nanofluides.....	32
a-Modèles d'Einstein.....	32
b-Modèlesde Brinkman.....	33
c-modèle de Batchelor.....	33
II-2-4 Chaleur spécifique.....	34
a-Modèle du PAK(1998).....	34

b-Modèle de XUA (2000).....	34
II-2-5 Masse volumique.....	35
II-2-6 Coefficient d'expansion thermique.....	35
II-3 Domaine d'application des nanofluides.....	35
II-3-1 Applications de refroidissement industriel.....	36
II-3-2 Smart Fluides.....	36
II-3-3 Réacteurs nucléaires.....	37
II-3-4 Extraction de l'énergie géothermique et d'autres sources d'énergie.....	37
II-4 les avantages et les inconvénients des nanofluides.....	38
II-5 le transfert de chaleur par Convection dans les enceintes nanofluide.....	38

Chapitre III : Formulation mathématique du problème

III-1 Introduction	41
III-2 Position du problème physique	41
III-2.1 Modèle géométrique	41
III-2.2 Conditions aux limites	43
III-2.3 Hypothèses	43
III.3 Maillage	43
III.4 Equations gouvernantes	45
III.4.1 Equations de conservation.....	45
III.4.1.1 Equation de conservation de la masse.....	45
III.4.1.2 Equation de conservation de la quantité de mouvement.....	45
III.4.1.3 Equation de conservation de l'énergie	45

Chapitre IV

IV.1 Introduction	47
IV.2. Vérification de l'amélioration du transfert convectif par les nanofluides.....	47
IV.3 Comparaison entre différents modèles de calcul des propriétés thermo-physique ...	50
IV.4 Effet de la traction volumique PHI.....	53
IV.5.Effet de la vitesse d'écoulement des deux fluides.....	55
IV. Conclusion.....	57
-CONCLUSION GENERALE.....	58

Nomenclature

Symboles Latins:

T : Température [K]

C_p : Chaleur spécifique [J/kg.k]

K : Conductivité thermique [W/m.k]

K_f : la conductivité thermique du fluide de base [W/m.k]

K_{nf} : la conductivité thermique du nanofluide [W/m.k]

K_s : la conductivité thermique des particules solides [W/m.k]

L : longueur de l'échangeur [m]

n : facteur de forme empirique.

V : Vitesse de l'écoulement [m.s⁻¹]

Nu : Nombre de Nussel

K : Conductivité thermique [W/m.k]

K_f : la conductivité thermique du fluide de base [W/m.k]

K_{nf} : la conductivité thermique du nanofluide [W/m.k]

K_s : la conductivité thermique des particules solides [W/m.k]

u : Vitesse de l'écoulement suivant x [m.s⁻¹]

V : Vitesse de l'écoulement [m.s⁻¹]

V_s : volume des nanoparticules [m³]

V_f : Volume du fluide de base [m³]

Liste des figures

Chapitre I

Figure I.1 : Principe de l'échangeur tubulaire.....	5
Figure I.2. Échangeur monotube en serpent.....	6
Figure I.3. Échangeur coaxial.....	6
Figure I.4. Échangeur à tube séparé.....	7
Figure I.5. Échangeur à tube rapproché.....	7
Figure I.6. Échangeur à tube ailette.....	7
Figure I.7. Autre différent type d'ailettes.....	8
Figure I.8. Échangeur à tête flottante.....	9
Figure I.9. Échangeur à plaque tubulaire fixe.....	10
Figure I.10. Échangeur à tubes en U.....	10
Figure I.11 : Composition d'un échangeur à plaques.....	11
Figure I.12. Échangeur à plaques.....	12
Figure I.13. Échangeur lamellaire.....	13
Figure I.14. Echangeur à spirale.....	13
Figure I.15. Échangeur à plaques brasées.....	14
Figure I.16. Échangeur Platulaire schéma canaux (d'après Barriquand) A. canal « corrugué » B. canal « lisse ».....	15
Figure I.17. Échangeur Compabloc à 4 passes.....	16
Figure I.18. Plaque d'un échangeur Pckinox (d'après Pckinox).....	17
Figure I.19. Echangeur Co-courant.....	19
Figure I.20. Echangeur Contre-courant.....	19

Figure I.21. Echangeur à courants croisés.....	19
Figure I.22. Echangeur à courants croisés méthodiques.....	20
Figure I.23. Echangeur à courants croisés anti méthodiques	20
Figure I.24. Echangeur a deux fluides.....	21
Figure I.25. Echangeur a trois fluides	21

Chapitre II

Figure II.1 : Pyrolyse laser donnant de la nanopoudre à mélanger au liquide et dépôt direct dans le liquide par pulvérisation cathodique sous vide.....	25
Figure II.2: Nanoparticule (Ag) / Nanoparticule (TiO ₂)	26
Figure II.3: Nanoparticules sphériques (BAN/2005) ;Nanotubes de carbone (INT1).....	27
Figure II.4 : Exemples de nanofluides aqueux et opaques avec seulement 1 % de nanoparticules de diverses natures.....	29

Chapitre III

Figure III.1 Modèle géométrique	42
Figure III.2 Maillage du modèle	43

Chapitre IV

Figure IV.1 Profil des températures des deux fluides (chaud et froid) le long de l'échangeur	48
Figure IV.2 Evolution de la température le long de l'échangeur coté chaud et froid.....	49
Figure IV. 3. Evolution des pertes de charges le long de l'échangeur dans les deux cotés.....	49

INTRUCTION GENERALE

L'intensification des transferts thermiques dans les échangeurs de chaleur est un enjeu majeur du génie des procédés industriels et plus globalement dans toute politique de maîtrise de l'énergie. La problématique est complexe car elle nécessite un bon équilibre entre les coûts et les gains afin de s'inscrire dans une démarche technico-commerciale économiquement viable. Les techniques permettant l'intensification des transferts thermiques mènent très souvent à une augmentation des coûts de fabrication du fait de modification d'installations existantes, de consommation supplémentaire de matières premières ou de leur complexité technologique (usinage plus long, utilisation de nano matériaux...).il existe deux types de techniques d'amélioration du transfert thermique :

Les techniques dites actives ou on peut citer :

- les procédés dont les parois du canal sont fixes
- les procédés dont les parois sont mobiles.

Et les techniques dites passives ou on peut citer :

- Modification de l'hydrodynamique de l'écoulement
- Modification de la géométrie de la surface d'échange : Les ailettes
- Optimisation des propriétés thermo-physiques des fluides : les nano-fluides .Cette dernière est l'objet de notre étude vue son utilisation très larges ces dernières années.

Les nano-fluides sont des dispersions de particules de taille nanométrique (dont le diamètre est typiquement inférieur à 100 nm), appelées nanoparticules, dans un fluide de base afin d'en améliorer certaines propriétés.

Dans le cas des fluides caloporteurs, un des premiers paramètres à prendre en compte afin d'évaluer le potentiel d'échange de chaleur est la conductivité thermique. Or, les fluides les plus employés tels que l'eau, l'huile ou l'éthylène-glycol (EG) ne disposent que d'une conductivité thermique faible par rapport à celle des solides cristallins. Avec les nano-fluides, l'idée est alors d'insérer, au sein du fluide de base, des nanoparticules afin d'augmenter la

conductivité thermique effective du mélange. Ce terme nano-fluide a été introduit par Choi [nano-fluides pour les applications thermiques](#)[8] et reste couramment utilisé pour désigner ce type de suspensions.

L'idée d'améliorer les propriétés thermiques de fluides par l'adjonction de particules n'est pas nouvelle, mais l'utilisation de particules de taille nanométrique permet potentiellement de minimiser considérablement les problèmes d'érosion et de sédimentation rencontrés avec les particules de taille plus élevée. De plus, certains auteurs ont mis en avant des performances thermiques améliorées en conductivité thermique et en échange thermique liquide et liquide/ vapeur dues à la taille nanométrique [9].

Débutée il y a une dizaine d'années, l'activité de recherche sur les nanofluides croît de manière quasiment exponentielle depuis lors pour atteindre, à l'automne 2008, 92 brevets, 268 présentations dans des conférences internationales, 6 livres ou chapitres de livre, 454 articles de revues scientifiques, 34 rapports et 15 thèses sur le sujet.

L'objectif de ce modeste mémoire est l'étude numérique grâce au code de calcul COMSOL MULTIPHYSICS version 5.3a de l'intensification du transfert thermiques par l'utilisation des nano-fluides et l'amélioration des performances d'un échangeur de chaleur à plaques et joints travaillant à contre –courant.

Notre mémoire est composé de quatre chapitres :

Dans le premier chapitre « **Notions fondamentales et principes des échangeurs de chaleur** » nous présentons des généralités sur les nano-fluides leurs différents types et leurs classes ainsi que leurs domaines d'application.

Le second chapitre « **Les nanofluides et nanoparticules** » est consacré à la théorie des nano-fluides ainsi que les différents modèles de calcul de leurs propriétés thermo-physiques.

Nous présentons dans le troisième chapitre « **Formulation mathématique** » notre modèle géométrique et la position de la problématique avec toutes les hypothèses considérées.

Finalement dans le quatrième et dernier chapitre « **Résultats et discussions** » nous exposons et discutons les résultats de notre étude numérique réalisée avec le code de calcul COMSOL MULTIPHYSICS (version 5.3a).

CHAPITRE I

Notions fondamentales et principes des échangeurs de chaleur

I.1. Définition

L'échangeur de chaleur est un appareil destiné à chauffer ou refroidir un fluide au moyen d'un autre fluide. L'échange thermique peut se faire avec deux fluides (miscibles ou non).

Dans un tel système, les deux fluides atteignent la même température finale. Toutefois les échangeurs les plus courants sont ceux où les fluides sont séparés par une paroi (par une cloison) à travers laquelle la chaleur s'écoule [1].

I.2. Type des échangeurs de chaleur

I.2.1. Les échangeurs tubulaires

Pour des raisons historiques et économiques, les échangeurs utilisant les tubes comme (Figure I.1) constituant principal de la paroi d'échange sont les plus répandus. On peut distinguer trois catégories suivant le nombre de tubes et leur arrangement, toujours réalisés pour avoir la meilleure efficacité possible pour une utilisation donnée [2].

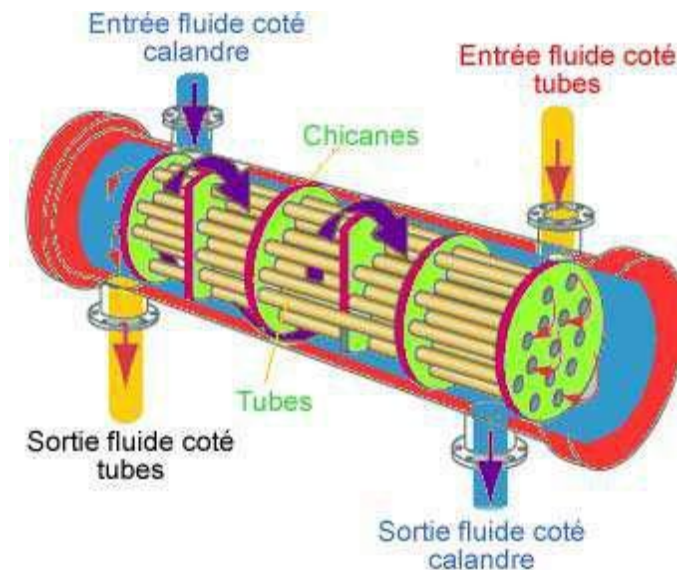


Figure I.1 : Principe de l'échangeur tubulaire

I.2.1.1. Échangeur monotube

Dans lequel le tube est placé à l'intérieur d'un réservoir et a généralement la forme d'un serpentín comme montré à la figure au-dessous

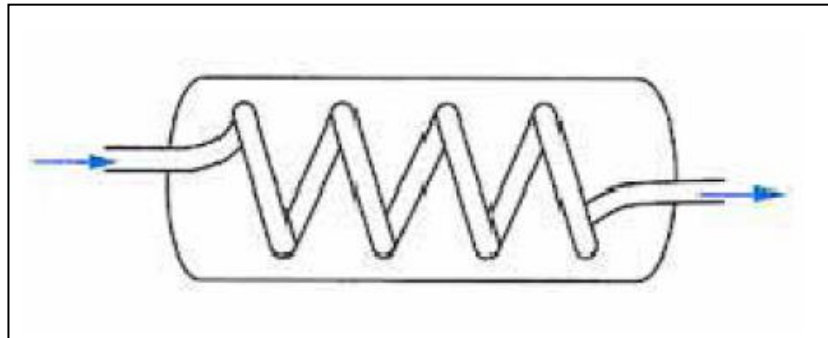


Figure I.2. Échangeur monotube en serpentín [2].

I.2.1.2. Échangeur coaxial

Dans lequel les tubes sont le plus souvent cintrés ; en général, le fluide chaud ou le fluide à haute pression s'écoule dans le tube intérieur comme montré à la figure au-dessous [2].

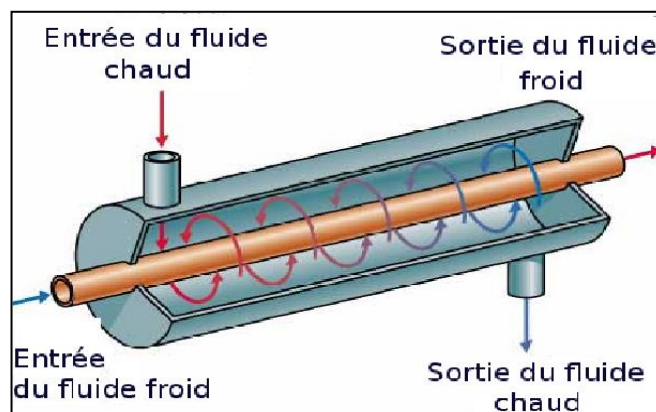


Figure I.3. Échangeur coaxial.

I.2.1.3. Échangeur multitubulaire

Existant sous quatre formes :

I.2.1.3.1. Échangeur à tubes séparés

À l'intérieur d'un tube de diamètre suffisant (de l'ordre de 100 mm) se trouvent placés plusieurs tubes de petit diamètre (8 à 20 mm) maintenus écartés par des entretoises. L'échangeur peut être soit rectiligne, soit enroulé [2].

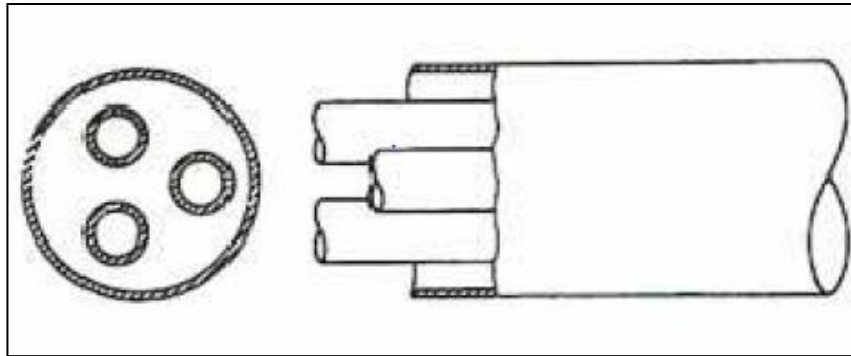


Figure I.4. Échangeur à tube séparé [2].

I.2.1.3.2. Échangeur à tubes rapprochés

Pour maintenir les tubes et obtenir un passage suffisant pour le fluide extérieur au tube, on place un ruban enroulé en spirale autour de certains d'entre eux. Les tubes s'appuient les uns sur les autres par l'intermédiaire des rubans [2].

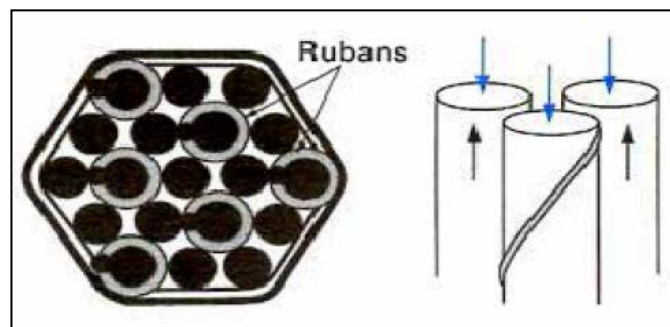


Figure I.5. Échangeur à tube rapproché [2].

I.2.1.3.3. Échangeur à tubes ailettes

Ces tubes permettent d'améliorer le coefficient d'échange thermique ; différents types d'ailettes sont toutefois présentés si contre.

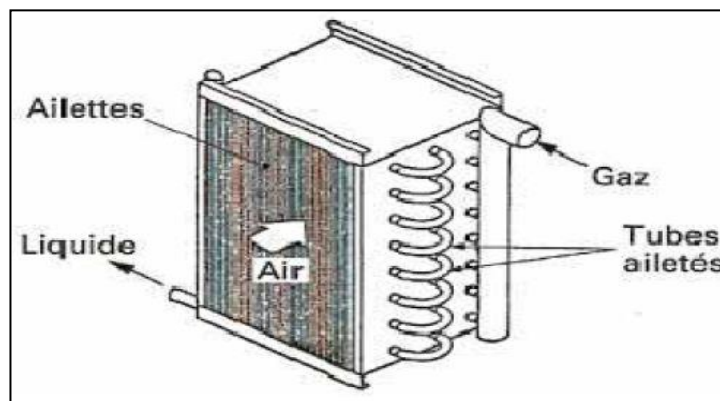
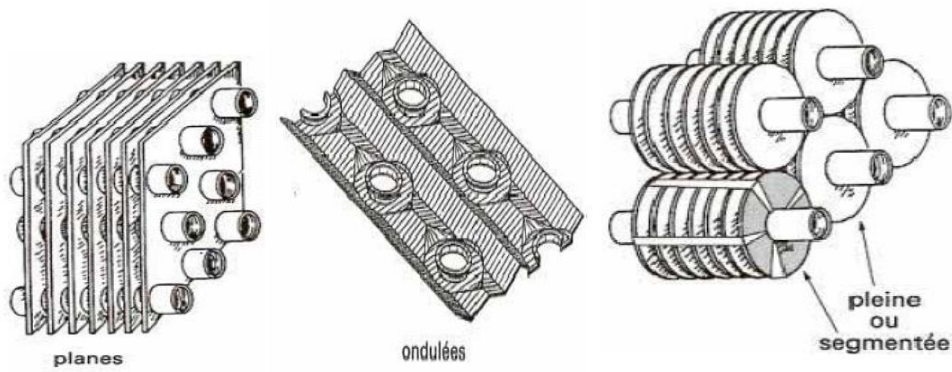
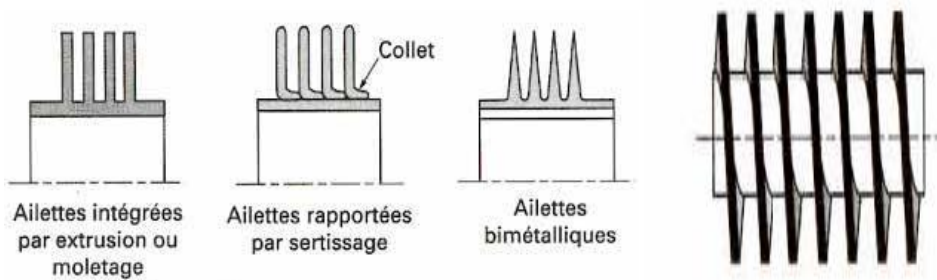


Figure I.6. Échangeur à tube ailette[2].

- Ailettes transversales :

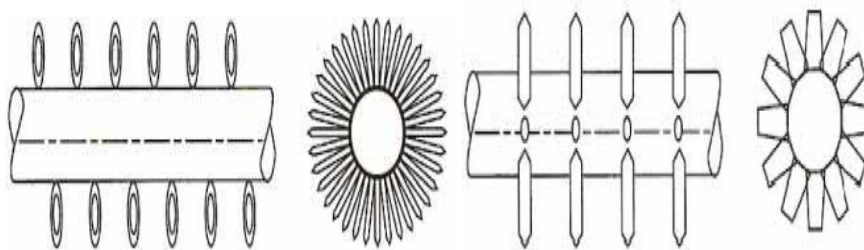


Ailettes continue [2] Ailettes indépendant [2]



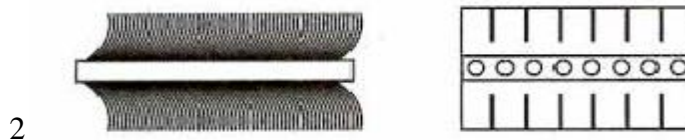
Ailettes annulaire [2]

Ailettes spirale [2]



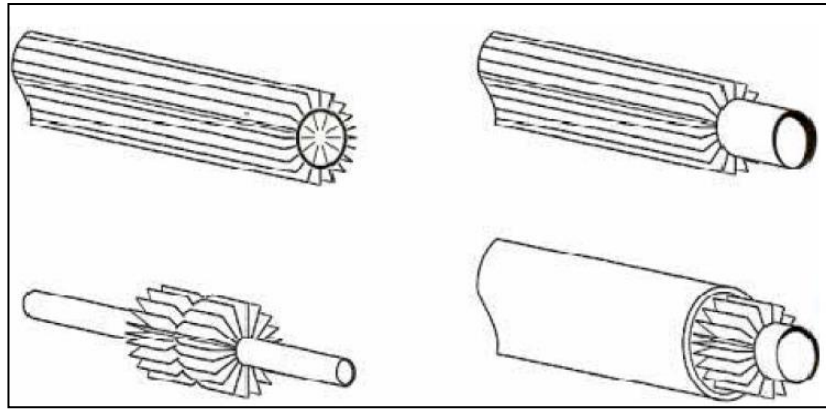
Ailettes à fils préformés [2]

Ailettes poinçonnées [2]



Ailettes en brosse Ailettes longitudinal [2]

- Ailettes longitudinal :



Type d'ailettes longitudinal.[2]

Figure I.7. Autre différent type d'ailettes [2].

I.2.1.3.4. Echangeur à tube et calandre :

I.2.1.3.4.1. Echangeur de chaleur à tête flottante

L'une des plaques tubulaires est fixe, bloquée entre les brides de la calandre et de la boîte de distribution. La seconde plaque, d'un diamètre inférieur, porte la boîte de retour et peut coulisser librement à l'intérieur du capot qui ferme la calandre [3].

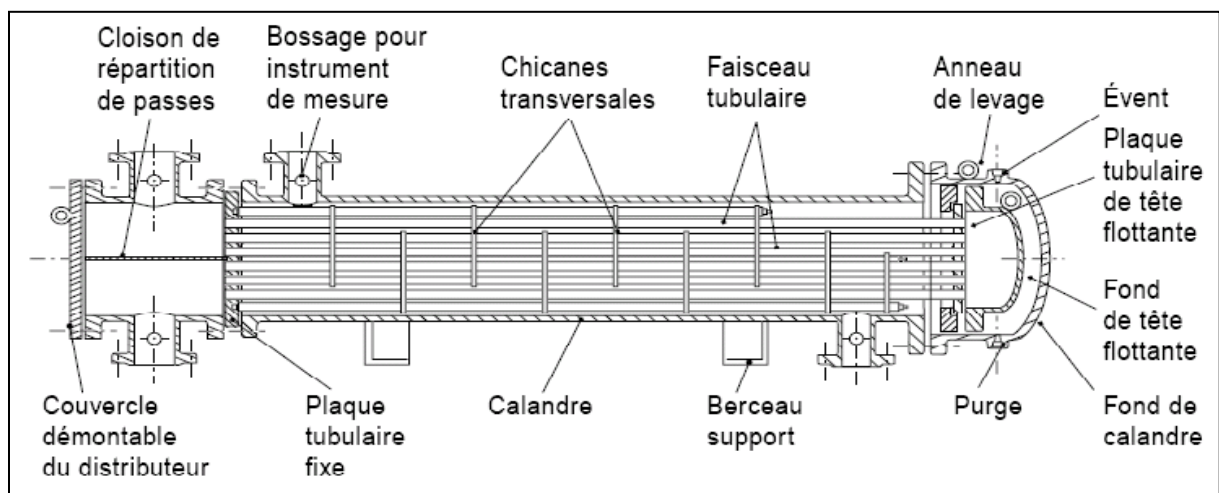


Figure I.8.Échangeur à tête flottante.

I.2.1.3.4.2. Echangeur à plaque tubulaires fixes

Dans ce cas, les plaques tubulaires peuvent être directement soudées sur la calandre [3].

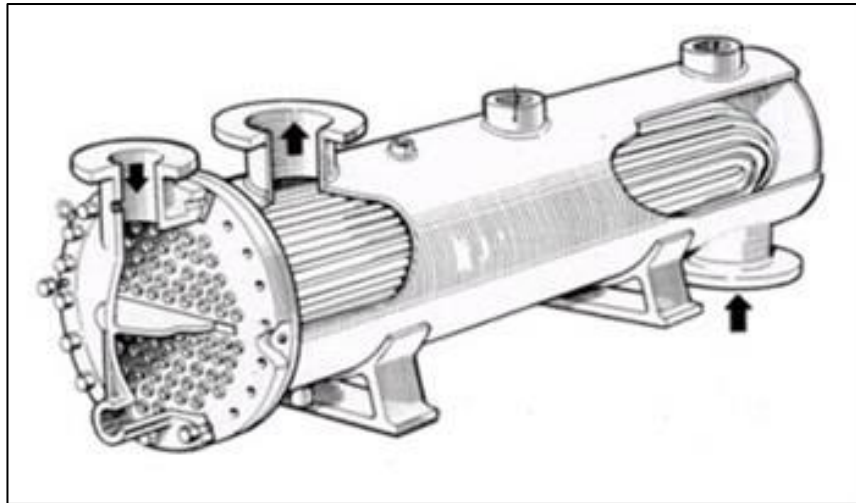


Figure I.9. Échangeur à plaque tubulaire fixe [3].

I.2.1.3.4.3. Echangeur à tubes en U

Le faisceau est constitué de tubes coudés en forme d'épingle, il n'est donc porté que par une seule plaque tubulaire. Ce système permet de la dilatation du faisceau. En revanche, le nettoyage des tubes est difficilement réalisable autrement que par voie chimique

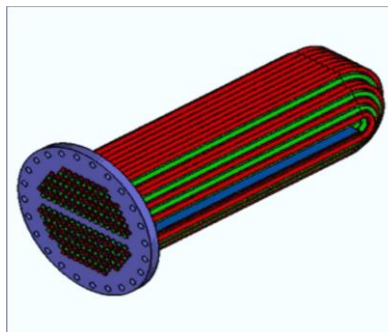


Figure I.10. Échangeur à tubes en U [3].

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> - Résiste aux fortes pressions - Libre dilatation des tubes et du corps - Toutes puissances 	<ul style="list-style-type: none"> - Prix de revient élevé - Débouchage difficile

Tableau I.1 : Avantages et inconvénients d'un échangeur de chaleur à tube en

I.2.2 Echangeur à plaque

Un échangeur à plaques (Figure I.11) est constitué d'un ensemble de plaques métalliques embouties à travers lesquelles s'effectue le transfert de chaleur entre deux fluides. Il est constitué de :

1. **Les plaques** : sont serrées entre un bâti fixe et un bâti mobile. Elles sont positionnées et guidées par deux barres support inférieure et supérieure.
2. **Les bâtis** : maintiennent les plaques serrées au moyen de tirants. Les deux barres guides sont elles mêmes supportées par un pied support.
3. **Un joint** : par plaque assure l'étanchéité de l'échangeur ainsi que la répartition des fluides dans les canaux formés par les deux plaques.

Le raccordement des fluides s'effectue généralement sur le bâti fixe de l'appareil. L'emboutissage des plaques en chevrons ou en cannelures (industries alimentaires) favorise la turbulence des fluides et assure une bonne tenue à la pression.

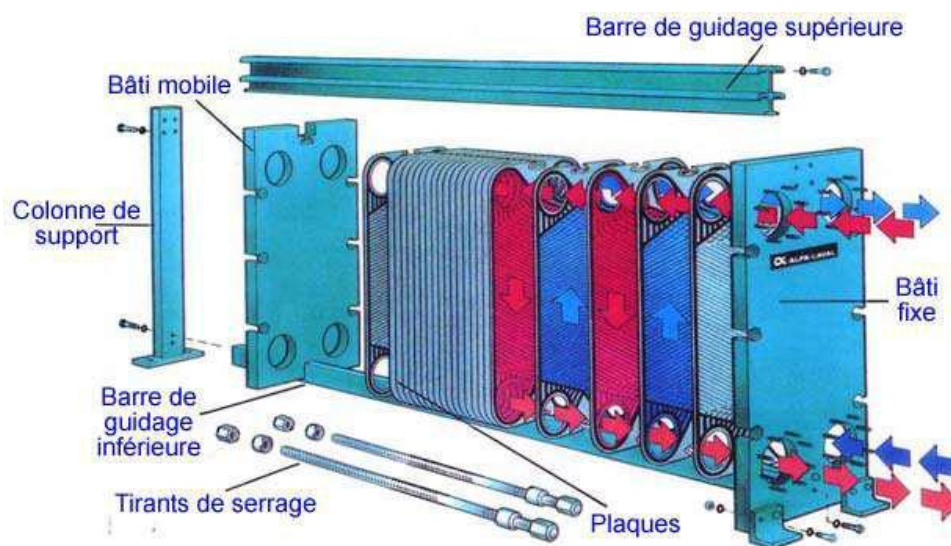


Figure I.11 : Composition d'un échangeur à plaques

Les fluides circulent alternativement entre les plaques. Grâce aux corrugations, l'écoulement est souvent turbulent même à faible vitesse, générant ainsi des coefficients d'échange très élevés.

On distingue suivant la géométrie de canal utilisée les échangeurs à surface primaire et les échangeurs à surface secondaire [4].

I.2.2.1 Échangeurs à surface primaire

Les échangeurs à surface primaire sont constitués de plaques corruguées, nervurées ou picotées. Le dessin du profil de plaques peut être assez varié mais il a toujours un double rôle d'intensification du transfert de chaleur et de tenue à la pression.

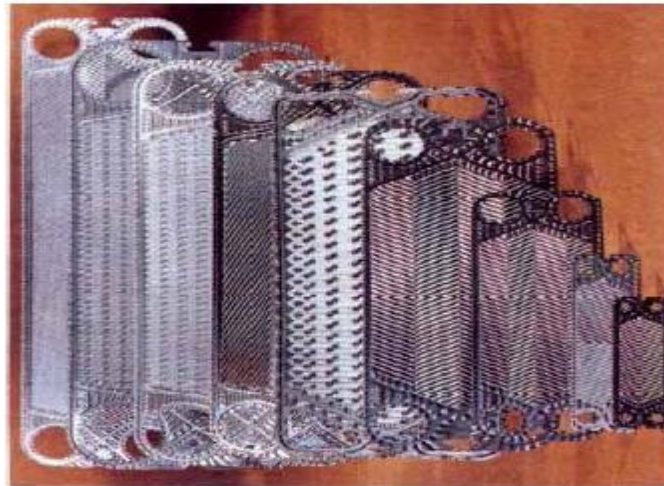


Figure I.12. Échangeur à plaques [4].

I.2.2.2. Échangeurs à surface secondaire

Ces échangeurs sont réalisés en aluminium ou en acier inoxydable ; ils sont constitués par un empilage de tôles ondulées formant des ailettes séparées par des tôles planes.

I.2.2.3. Échangeur lamellaire

C'est une variante de l'échangeur de type tubes et calandre, dans lequel le faisceau est constitué de tubes aplatis ou lamelles. Ces lamelles sont réalisées à l'aide de deux plaques formées et soudées ensemble et constituant un canal dans lequel circule l'un des fluides. Chaque lamelle peut contenir un élément interne (tabulateur) qui permet d'obtenir une meilleure tenue à la pression et un meilleur échange thermique. Les limites de fonctionnement de cet échangeur sont de 350 °C en température et 25bar en Pression maximale. Cette technologie d'échangeur est actuellement en pleine mutation.

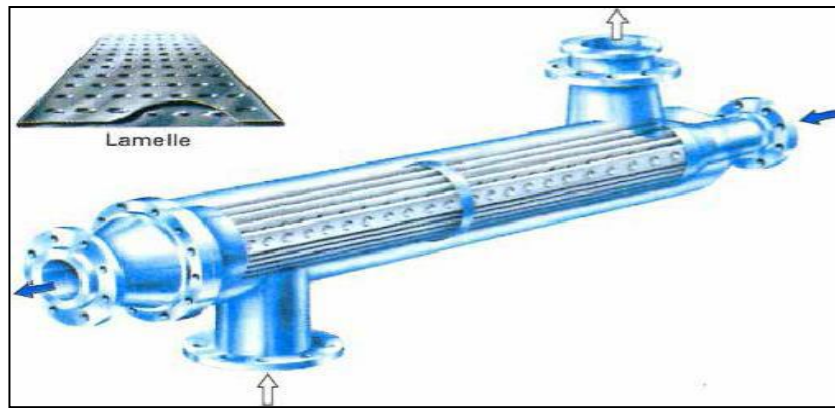


Figure I.13. Échangeur lamellaire.

I.2.2.4. Échangeur à spirale

Il est constitué de deux rubans de tôle enroulés et maintenus parallèles. La distance entre les surfaces d'échange des deux canaux est maintenue constante par des taquets soudés sur les plaques. La circulation des fluides est du type monocanal. Cet échangeur peut fonctionner jusqu'à des pressions de l'ordre de 25 bars et des températures de l'ordre de 300°C.

Il est plutôt utilisé pour des liquides mais certaines applications existent en évaporation ou en condensation des fluides homogènes [2].

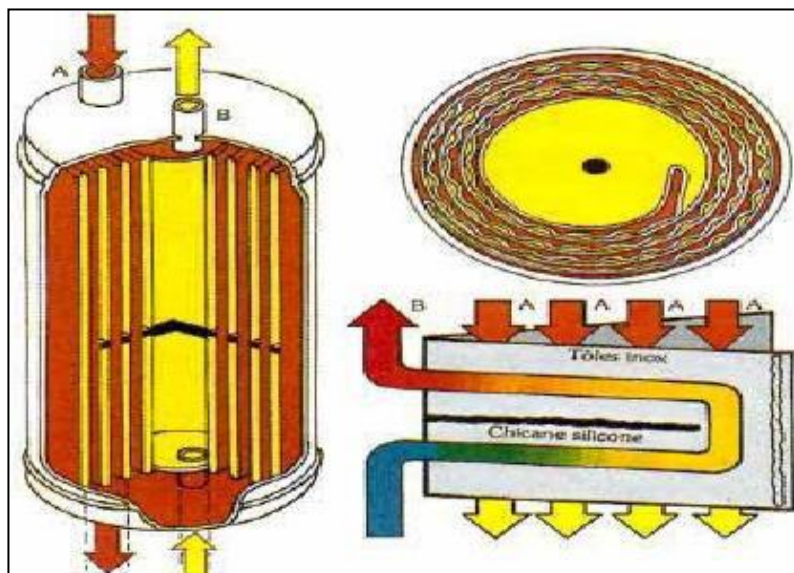


Figure I.14. Echangeur à spirale.

I.2.2.5. Échangeurs à plaques soudées ou brasés

Ces échangeurs sont en aluminium brasé. Les fluides circulent dans des passages définis par deux tôles planes consécutives et fermés latéralement par des barres. Les tôles ondulées (ondes) sont réalisées par emboutissage du feuillard sur des presses spéciales ; elles peuvent avoir des hauteurs, des épaisseurs et des espacements différents. Chaque type d'onde possède ses propres caractéristiques hydrauliques et thermiques : les ondes droites (perforées ou non) donnent des performances identiques à celles que donneraient des tubes de diamètre hydraulique équivalent ; les ondes décalées créent plus de turbulence et améliorent donc le coefficient d'échange thermique, tout en provoquant plus de pertes de pression. Ces échangeurs souvent réalisés en Aluminium allient une légèreté exceptionnelle (masse volumique de 900 kg/m^3 à $1\,200 \text{ kg/m}^3$) à une excellente tenue mécanique ; ils sont particulièrement utilisés dans le domaine de la Cryogénie où leur efficacité est élevée avec des niveaux de température compris entre -269 °C et $+65 \text{ °C}$ et des niveaux de pression pouvant atteindre 75 bar. Pour certaines applications spécifiques touchant au domaine de l'aéronautique, des échangeurs en acier inoxydable sont également utilisés [4].

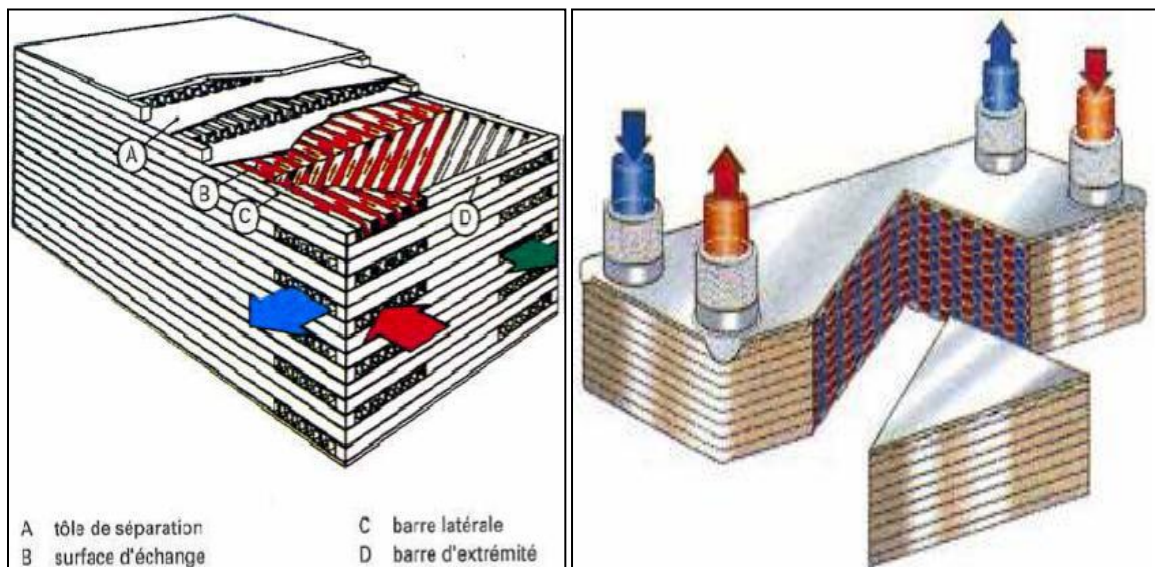


Figure I.15. Échangeur à plaques brasées.

I.2.2.5.1. Échangeur platulaire

Le faisceau est réalisé par un empilage de couples de plaques à «bosses» obtenues par emboutissage, chacun des couples étant constitué de deux plaques associées symétriquement.

Ainsi sont créés deux types de canaux; des canaux dits «corrugués» présentant une alternance de réductions et d'élargissements de la section de passage, des canaux dits « lisses » dont la largeur être réglée par l'écartement maintenu entre deux couples de plaque consécutifs. Ces derniers canaux autorisent une circulation de fluides chargés.

La circulation des deux fluides peut être organisée à contre-courant ou à courant-croisé.

La répartition en est assurée par des collecteurs soudés ou par des boîtes ouvrables sur l'un ou et l'autre des deux circuits permettant l'accès aux canaux, sans débrider les tubulaires. La distribution peut être adaptée pour une utilisation sur plusieurs fluides à la fois dans un seul échangeur.

Les surfaces d'échanges disponibles pour un seul corps peuvent être de plusieurs centaines de mètres carrés [5].

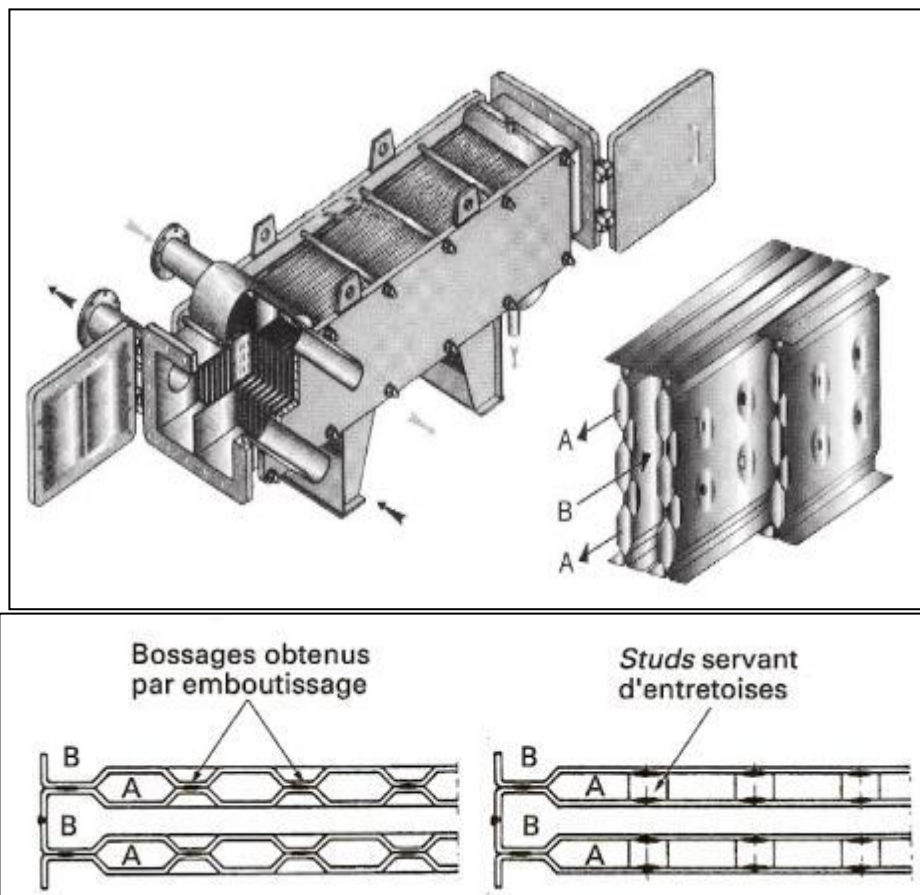


Figure I.16. Échangeur Platulaire schéma canaux (d'après Barriquand) A. canal « corrugué »
B. canal « lisse ».

I.2.2.5.2. Échangeur Compabloc

La surface d'échange est constituée d'un empilement de plaque carrées embouties avec des ondulations à 45° et soudées. L'ensemble est inséré dans un coffrage. Dont les panneaux

latéraux sont des couvercles démontables permettant l'accès aux canaux pour nettoyage et opérations de maintenance.

La circulation des deux fluides est à courant croisé, multi passes selon les besoins, et à contre-courant d'ensemble pour répondre aux exigences de croisements importants des températures de sortie.

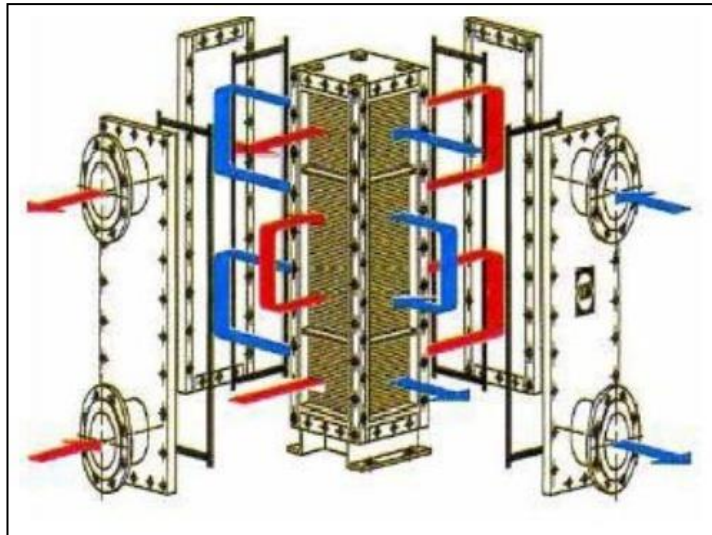


Figure I.17.Échangeur Compabloc à 4 passes.

I.2.2.5.3. Échangeur Packinox

Les échangeurs Packinox sont constitués de plaques de grande dimension formées par explosion en piscine (explo-formage) puis assemblées et soudées en faisceau. Les principales caractéristiques des plaques sont :

- Longueur : 5 à 20 m ;
- Largeur : 0.50 à 1.40 m ;
- Epaisseur : 0.50 à 1.40 mm ;

L'empilement es plaques peut se faire e hauteur de 0.2 à 2 m.

La circulation des deux fluides dans les espaces entre plaques est à contre courant ; elle peut être à courant croisé[5].

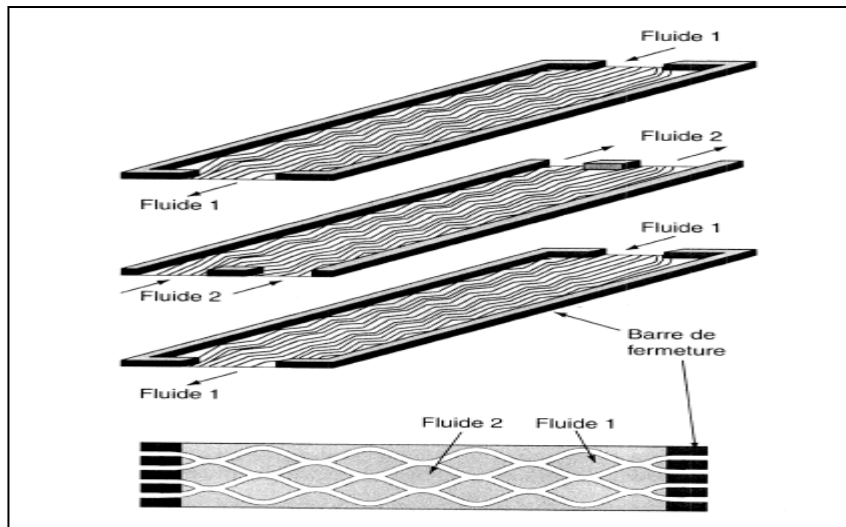


Figure I.18.Plaque d'un échangeur Pckinox (d'après Pckinox).

I.2.3. Échangeurs avec un fluide changeant de phase

I.2.3.1. Évaporateurs tubulaires

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

Il existe deux types d'évaporateurs, ceux où l'évaporation se produit à l'intérieur des tubes et ceux où elle se produit à l'extérieur des tubes.

I.2.3.1.1. Évaporateurs à l'intérieur de tubes

On distingue les évaporateurs à tubes verticaux et ceux à tubes horizontaux.

a) Évaporations à tubes verticaux

Ces appareils sont utilisés pour concentrer une solution, fournir de la vapeur nécessaire au réchauffement d'un fluide à distiller (*rebouilleurs à colonnes*) ou comme évaporateurs cristallisateurs. Les tubes sont généralement chauffés extérieurement par de la vapeur qui se condense.

b) Évaporateurs à tubes horizontaux

Ces appareils sont généralement utilisés comme refroidisseurs de liquide (eau, saumure, eau Glycolée, etc.). Le liquide à évaporer qui circule dans les tubes est un fluide frigorigène, alors que le fluide à refroidir circule à l'extérieur des tubes.

I.2.3.1.2 Évaporation à l'extérieur de tubes

Ces évaporateurs utilisent généralement des tubes horizontaux. On distingue deux types : les évaporateurs noyés (ou submergés) et les évaporateurs arrosés (ou aspergés).

I.2.3.2 Condenseurs tubulaires

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

Le fluide à condenser est rarement un corps pur, mais le plus souvent une vapeur en présence d'autres gaz incondensables. La condensation de la vapeur saturée est obtenue par échange thermique avec un fluide froid appelé réfrigérant. Un condenseur nécessite un liquide de refroidissement abondant et bon marché et, pour cela, on utilise principalement l'eau et parfois l'air [6].

I.3. Critères de classement des échangeurs de chaleur

Il existe plusieurs critères de classements des différents types d'échangeurs, énumérons les principaux :

I.3.1. Type de contact I.3.1.1. Échangeurs à contact direct

Le type le plus simple comprend un récipient ou canalisation dont lequel les deux fluides sont directement mélangés et atteignent la même température finale.

I.3.1.2. Échangeurs à contact indirect

Les deux fluides s'écoulent dans des espaces séparés par une paroi [7].

I.3.2. Classification selon le mode de circulation

Ce classement est réalisé à partir de la géométrie de l'échangeur et de sens relatif des écoulements des deux fluides dans ce qui suit, on représente uniquement les circulations des fluides les plus souvent rencontrées.

I.3.2.1. Echangeur a courants parallèles

Dans cette configuration (figure I.17) les deux fluides s'écoulent dans la même direction. Cette circulation est dite Co-courant ou anti méthodique.

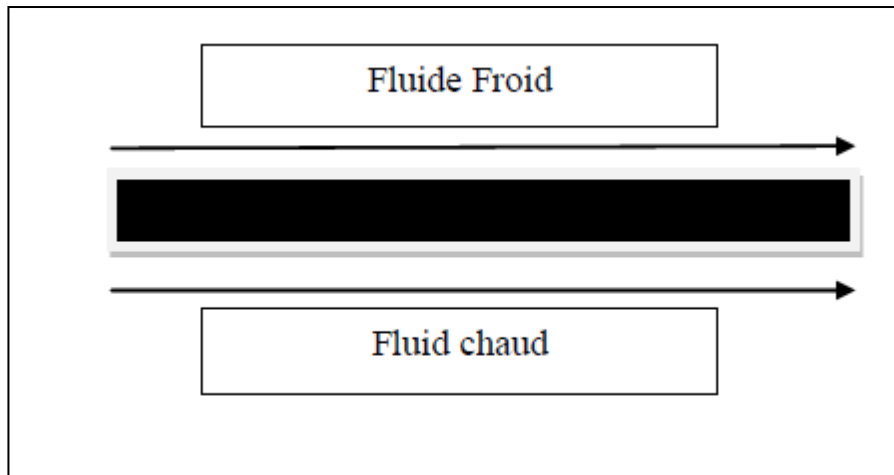


Figure I.19. Echangeur Co-courant.

I.3.2.2. Echangeur à contre courant

Si la circulation a lieu dans le sens contraire, les écoulements sont dits à contre-courant ou méthodique.

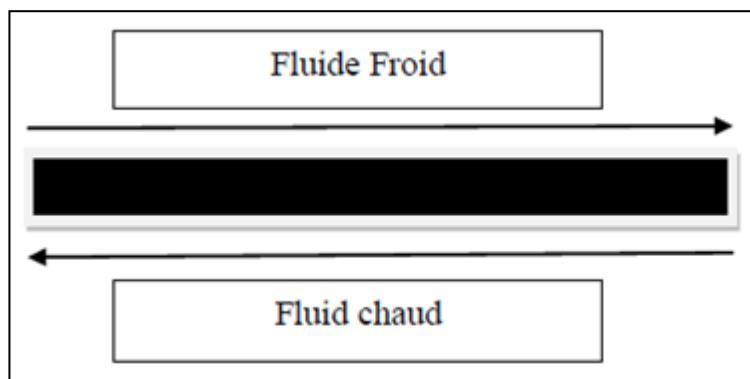


Figure I.20. Echangeur Contre-courant.

I.3.2.3. Echangeurs à courants croisés

Dans ce type d'échangeurs les deux fluides s'écoulent perpendiculairement l'un à l'autre (Figure I.19) en remarque ainsi que le sens d'écoulement est sans importance.

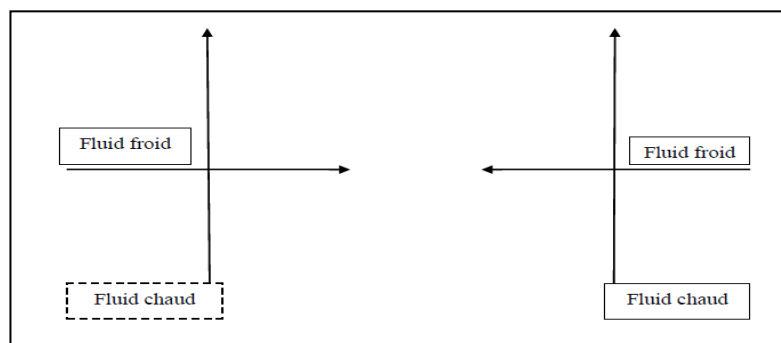


Figure I.21. Echangeur à courants croisés.

Dans la plupart des cas l'un des fluides traverse l'écoulement de l'autre fluide plusieurs fois, et l'échangeur est appelé à multiple passe. On distingue deux modes de circulation :

a- Circulation à courants croisés méthodiques

L'un des fluides entre par l'extrémité de l'appareil d'où sort le deuxième fluide (figure I.20).

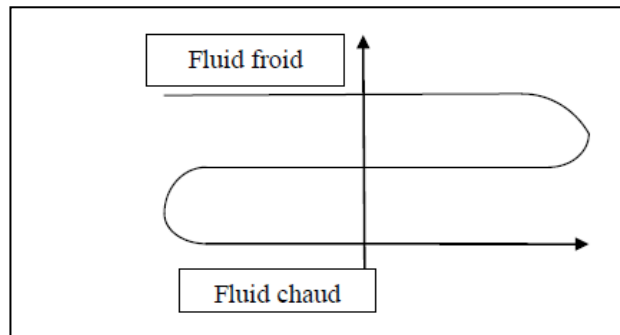


Figure I.22. Echangeur à courants croisés méthodiques.

b- Circulation à courants croisés anti méthodiques

Les deux fluides entre par la même extrémité de dispositif (figure I.21)

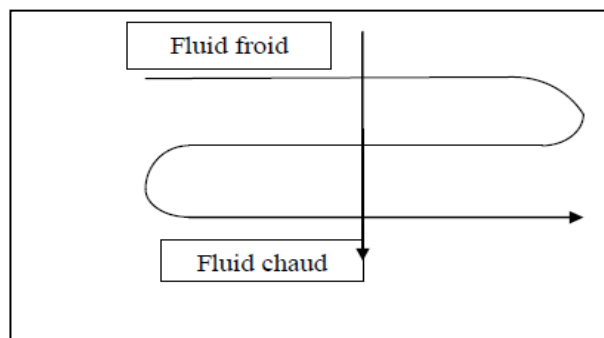


Figure I.23. Echangeur à courants croisés anti méthodiques [8].

I.3.3. 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 a un écoulement avec changement de phase, cas des évaporateurs ou de condenseurs.
- les deux fluides ont un écoulement avec changement de phase, cas des évapo-condenseurs.

I.3.4. Classement suivant la capacité de l'échangeur

La capacité est définie par le rapport de l'aire de la surface d'échange au volume de l'échangeur. R.K.Shah propose qu'un échangeur soit considéré comme compact si sa capacité est supérieure à $700\text{m}^2/\text{m}^3$; cette valeur est susceptible de varier de 500 à $800\text{m}^2/\text{m}^3$. Une classification en fonction de la capacité peut être donnée.

I.3.5. Classification selon le nombre des fluides

- Deux fluides.

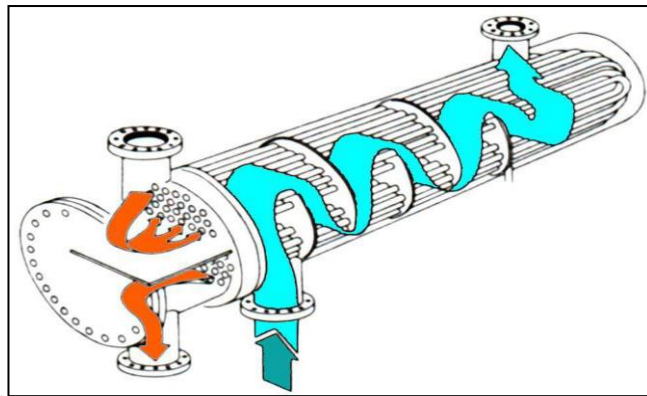


Figure I.24. Echangeur a deux fluides.

- Trois fluides.

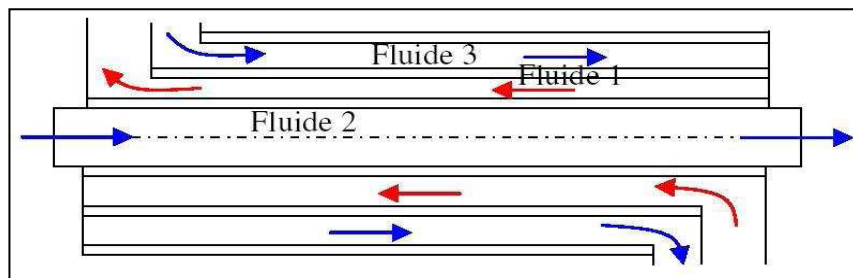


Figure I.25. Echangeur a trois fluides [9].

- Nombre de fluide >3 .

I.3.6. Classement suivant les types d'échange

I.3.6.1. 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.

I.3.6.2. 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.

I.3.7. 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.

I.3.8. Classement technologique

Les principaux types d'échangeurs rencontrés sont les suivants :

- **Echangeur à tubes** : monotubes, coaxiaux ou multitubulaires.
- **Echangeur à plaques** : à surface primaire ou à surface secondaire.
- **autres types** : contact direct, à caloducs ou à lit fluidisé [7].

CHAPITRE II

Les nanofluides et nanoparticules

II-1 Généralité sur les nanofluides et nanoparticules :

Les fluides caloporteurs de base souvent utilisés dans les applications de refroidissement ou de chauffage ont des conductivités thermiques très faibles qui limitent parfois leur capacité de transfert de chaleur. L'utilisation des nanofluides, particules de taille nanométrique de conductivité thermique très élevée en suspension dans un fluide caloporteur, est susceptible d'apporter des gains en performances thermiques très importants. De nombreuses recherches ont été menées sur cette nouvelle génération de fluides afin d'apporter une meilleure compréhension des mécanismes physiques mis en jeu lors de l'utilisation des nanofluides, et mettre ainsi au point des liquides caloporteurs plus performants.

Une nanoparticule est un assemblage de quelque centaine à quelques milliers d'atomes conduisant à un objet dont au moins l'une des dimensions est de taille nanométrique (1-100 nm), les nanoparticules se situent à la frontière entre l'échelle microscopique et l'échelle atomique ou moléculaire. Elles ont un intérêt à la fois fondamental et appliqué, et sont très étudiées actuellement [10]

II-1-1 Production des nanofluides et nanoparticules :

Les expériences effectuées sur les fluides caloporteurs avec des particules de taille micrométrique (10^{-6} m) ont montré que certains problèmes pouvaient être engendrés par l'utilisation de ces dernières tel que le problème de sédimentation des particules, l'augmentation des pertes de charge *etc...* tandis que pour des particules de l'ordre du nanomètre (10^{-9} m), ces problèmes sont pratiquement insignifiants.

Tout en supposant que la suspension est stable et durable, l'agglomération de particules est négligeable, aucun changement chimique du fluide, la préparation des nanofluides peut se faire par l'une des méthodes :

- 1- La méthode à une seule étape : basée sur la vaporisation d'un matériau solide sous vide, puis condensation directe de sa vapeur dans le liquide.
- 2- La méthode à deux étapes : elle consiste d'abord à la fabrication d'une nanopoudre sèche, puis le mélange et la dispersion de celle-ci dans le liquide.

Ces procédés de fabrication sont la nature physique ou chimique. Ils font l'objet de beaucoup de recherches pour améliorer le coût de production qui reste toutefois élevé vu les

difficultés de mise en œuvre et pour obtenir des particules de taille voulue. Chaque méthode a ses inconvénients et certaines ne sont pas aptes à produire de grandes quantités de nanoparticules pour une production de masse vu les contraintes inhérentes au procédé, notamment les méthodes en une étape (Figure II.1). Les principaux moyens peuvent être [10] :

- La mécanosynthèse (broyage à haute énergie)
- La précipitation chimique (réduction de sels métalliques par exemple)
- Les dépôts chimiques ou physiques en phase vapeur (CVD ou PVD)
- Les dépôts chimiques en phase vapeur assistés par plasma (PECVD)
- La condensation de vapeurs par détente brutale dans des tuyères supersoniques
- La pulvérisation cathodique radiofréquence
- La sublimation par ablation laser (vaporisation d'un échantillon par impulsion laser)
- La pyrolyse laser (interaction entre un faisceau laser continu et un flux de réactifs)
- La désintégration d'électrodes submergées par passage d'étincelles (comme pour un usinage par électroérosion).

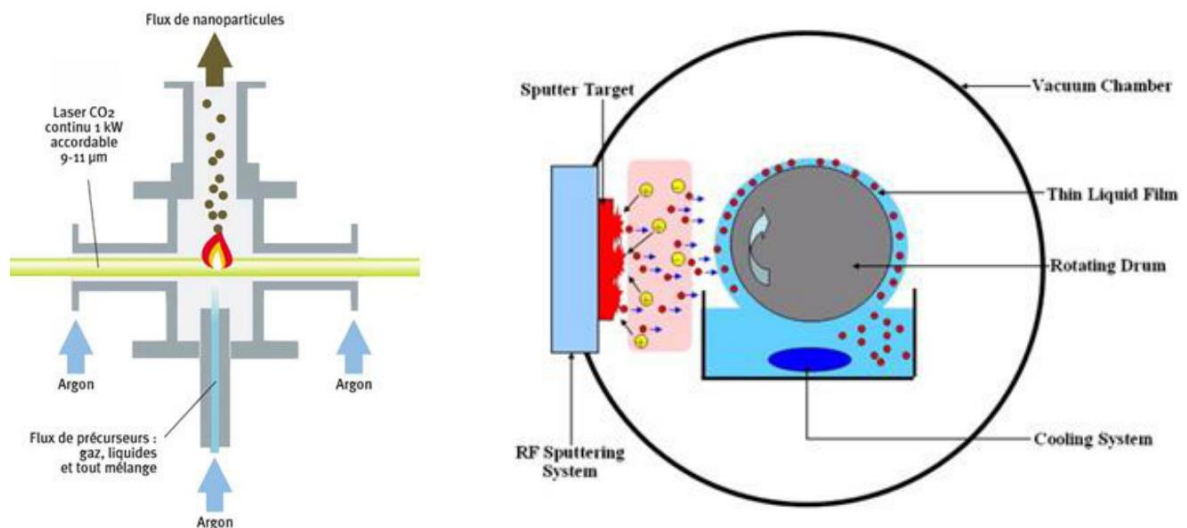


Figure II.1 : Pyrolyse laser donnant de la nanopoudre à mélanger au liquide et dépôt direct dans le liquide par pulvérisation cathodique sous vide [10]

Par contre pour les procédés de fabrication de nanoparticules sont nombreux. Ils peuvent être classés en deux catégories [11] :

- 1- Les procédés physiques, comme le broyage mécanique.
- 2- Les procédés chimiques, comme la pyrolyse ou la précipitation chimique.

- Les nanoparticules des oxydes métalliques :

1. L'oxyde d'aluminium (Al_2O_3).
2. L'oxyde de cuivre (CuO).
3. L'oxyde de silicium (SiO_2).

- Les nanoparticules métalliques :

- 1-L'aluminium (Al).
- 2-Le cuivre (Cu).
- 3-L'or (Au).
- 4-L'argent (Ag).

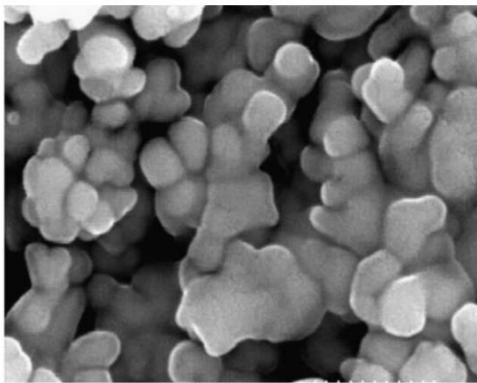
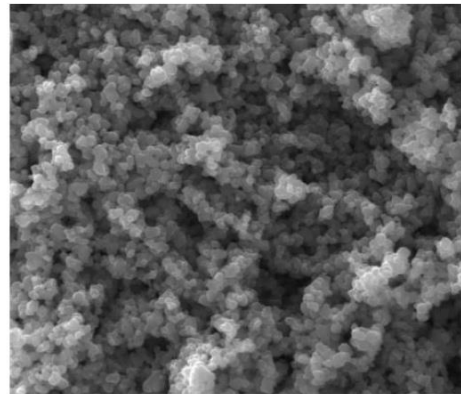


Figure II.2: Nanoparticule (Ag) [11]



Nanoparticule (TiO_2) [11]

- Les nanoparticules non métalliques :

- 1-Les nanotubes de carbone (CNT).
- 2-Le diamant (C).

D'une manière générale, les nanoparticules peuvent être classées selon leur forme en deux grandes catégories (figure II.1) :

- Les nanoparticules sphériques pour lesquelles plusieurs types de matériaux peuvent être utilisés pour leur fabrication. Ces nanoparticules sphériques peuvent ainsi être à base de métaux (cuivre Cu, fer Fe, or Au, argent Ag...) ou d'oxydes de cuivre (oxyde d'aluminium Al₂O₃, oxyde de cuivre CuO, oxyde de titane TiO₂...).
- Les nanotubes (les nanotubes de carbone NTC, les nanotubes de titane TiO₂,

Nanotube de silicium...)

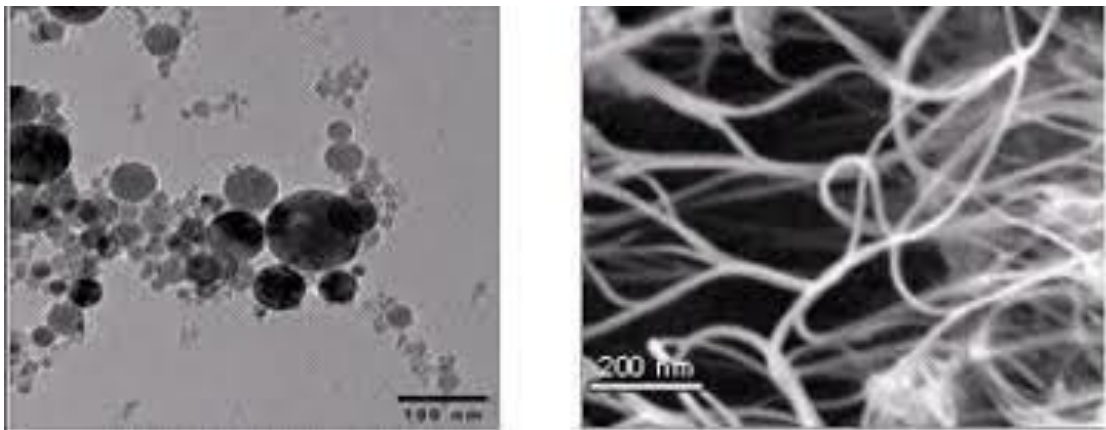


Figure II.3: nanoparticules sphériques (BAN/2005) ;Nanotubes de carbone (INT1) [11]

- Les liquides de base les plus utilisés :

- 1- L'eau.
- 2- L'éthylène glycol (EG).
- 3- Les huiles.
- 4- Les fluides de réfrigération (R12,R22....)

Les suspensions de nanoparticules dans un fluide, souvent appelées nanofluide, ont des caractéristiques thermiques intéressantes comparées aux fluides de base traditionnels. (Tableau II.1)

Tableau II.1 : les propriétés thermophysiques de différents matériaux

	Nanoparticule et fluide de base	K ($Wm.k^{-1}$)	ρ (kg/m^3)	C_p ($J/kg.k$)	μ ($Pa.s$)
Métallique (solides)	Cu	400	8954	383	
	Fe	80.2	7870	447	
	Ni	90.7	8900	444	
	Au	317	19.300	129	
	Ag	429	10.500	235	
	C(diamant)	2300	3500	509	
Oxyde métallique (solides)	SiO ₂	1.38	2220	745	
	TiO ₂	8.4	4157	710	
	Al ₂ O ₃	63	3970	765	
	CuO	69	6350	535	
	SiC	490	3160	675	
Liquides non métallique	L'eau	0.613	1000	4183	0.0008513
	Ethylène-glycol (EG)	0.258	1132	2349	0.0157

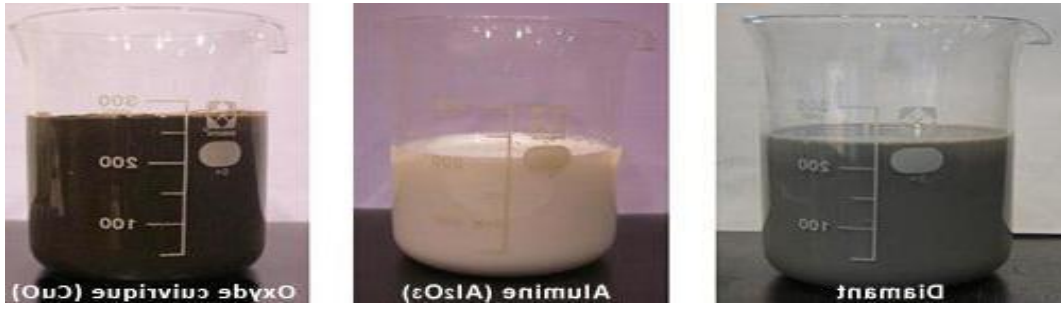


Figure II.4 : Exemples de nanofluides aqueux et opaques avec seulement 1 % de nanoparticules de diverses natures [11]

II-2 Caractéristiques thermo-physiques des nanofluides :

Les propriétés thermo physiques (conductivité thermique, viscosité dynamique et cinématique, capacité thermique massique, etc.) des solutions sont profondément modifiées par l'ajout de nanoparticules et un grand nombre de paramètres peuvent avoir un effet non négligeable sur cette déviation (le matériau, la taille, le rapport d'aspect, la concentration des particules en suspension, la conductivité du fluide de base, la température du milieu, etc.). De nombreux groupes de recherche tentent de comprendre quels sont le ou les mécanismes à l'origine de telles différences mais aucune phénoménologie n'a pu être encore formulée de manière concise et satisfaisante. [11]

II-2-1 Fraction volumique (φ) :

La fraction volumique est la propriété la plus important pour le nanofluide, puisque les calculs des tous les autres propriétés se basés sur la fraction volumique du nanofluide. Et on peut défini la fraction volumique comme le volume de solide ou particule (nanoparticules) sur le volume total (nanoparticules+fluide de base). La valeur de la fraction volumique est variée entre 0 (fluide de base pure) et 1. La fraction volumique est donnée par la relation suivante

$$\varphi = \frac{V_s}{V_s + V_f} \quad \text{II.1}$$

Où V_s , V_f : son respectivement le volume des nanoparticules et le volume du fluide de base [m^3]

II-2-2 Conductivité thermique :

La conductivité thermique, notée $K(W.m^{-1} k^{-1})$ est la capacité d'un matériau de conduire ou de transmettre de la chaleur. C'est une propriété très importante pour l'amélioration des performances thermiques d'un fluide caloporteur. La synthèse des nanofluides répond au besoin d'améliorer et d'amplifier la conductivité thermique des liquides.

Il existe plusieurs modèles théoriques permettant d'estimer, sous certaines conditions, la conductivité thermique des suspensions. Nous présenterons dans cette partie les modèles les plus utilisés dans le cas des nanofluides.

a-Modèle de Maxwell :

Maxwell fut le premier à dériver un modèle pour estimer la conductivité thermique d'une suspension contenant des particules (1881)

$$K_{nf} = \frac{K_s + 2K_f + 2\varphi(K_s + K_f)}{(K_s + 2K_f) - \varphi(K_s + K_f)} K_f \quad \text{II.2}$$

Où

K_{nf} : la conductivité thermique du nanofluide

K_f : la conductivité thermique du fluide de base

K_s : la conductivité thermique des particules solides

Le modèle de Maxwell est satisfaisant pour les suspensions contenant des

particules sphériques de concentrations volumiques relativement faibles mais ne tient pas compte de l'effet de la taille ni de la forme des particules. Il est à noter aussi que l'effet des interactions inter-particules est négligé dans ce modèle.

b-Modèle de Bruggeman :

Le modèle de Bruggeman (1935) complète celui de Maxwell pour des concentrations volumiques relativement élevées.

$$\varphi \left(\frac{(K_s - K_f)}{(K_s + 2K_f)} \right) + (1 - \varphi) \left(\frac{(K_s - K_f)}{(K_s + 2K_f)} \right) = 0 \quad \text{II.3}$$

Ce modèle ne tient pas compte ni de la taille des particules ni leur forme.

c- Modèle de Hamilton & Crosser :

Le modèle de Hamilton-Crosser (1962) est une extension du modèle de Maxwell, qui tient compte de la forme des particules. En effet, pour prendre en compte la non-sphéricité des particules (cas des NTC), ce modèle intègre un facteur géométrique appelé sphéricité, et noté φ , faisant référence à la géométrie sphérique. Ce coefficient est défini comme étant le rapport de l'aire d'une sphère de même volume que la particule sur l'aire de cette même particule.

$$K_{nf} = \frac{K_s + (n-1)K_f - (n-1)(K_s - K_f)\varphi}{K_s + (n-1)K_f - \varphi(K_s - K_f)} K_f \quad \text{II.4}$$

n est un facteur de forme empirique donné par : $n = \psi/3$

Ce modèle peut être utilisé lorsque la conductivité thermique des particules est au moins 100 fois plus élevée que celle du fluide de base (1962).

d-Modèle de Yu et Choi :

Yu et Choi (2003) ont proposé un modèle modifié plus complexe que le modèle de Hamilton-Crosser, qui tient compte de l'effet d'interface entre les particules et le fluide de base mais qui n'est valable que pour les particules de forme sphérique.

$$K_{nf} = \frac{K_s + 2K_f - (K_s - K_f)(1+B)^3\varphi}{K_s + 2K_f - (K_s - K_f)(1+B)^3\varphi} K_f \quad \text{II.5}$$

Où B est le rapport de de la couche nanométrique sur le rayon des particules.

e- Modèle de Walvekar et al :

Walvekar et al. (2012) ont proposé un modèle de conductivité thermique pour des nanofluides contenant des NTC qui tient compte de l'effet du diamètre, du rapport d'aspect des NTC ainsi que l'effet du mouvement brownien due à la température. Ce modèle, représenté par l'équation $Nu = hL/k$

Le nombre de **Nusselt** est un nombre adimensionnel utilisé pour caractériser les transferts thermiques entre un fluide et une paroi, appelé transfert convectif

est le résultat d'une extension d'un modèle initialement introduit par (2004).

$$K_{nf} = K_f \left[1 + \frac{\left(\frac{2\varphi(r_s + l_s)}{r_s l_s} \right)}{\frac{3(1-\varphi)}{r_f}} \right] + \frac{C\varphi(T-T_0)}{r_s^2 l_s^2 \mu_f} \ln \left(\frac{l_s}{d_s} \right) \quad \text{II.6}$$

Dans cette équation, r_s et l_s sont respectivement le rayon (m) et la longueur (m) des NTC. le rayon moyen de la molécule du fluide de base (m).

La première partie du modèle est principalement liée à la forme, le rapport d'aspect des NTC et à la conductivité thermique des NTC et celle du fluide de base. La seconde partie de l'équation $Nu = hL/k$ représente la contribution du mouvement brownien des nanoparticules lié à la température et la viscosité du fluide de base. T_0 est prise égale à 273 k, ce qui correspond à la température de référence en dessous de laquelle le mouvement brownien devient négligeable.

C'est une constante qui dépend de la constante de Boltzmann (2012).

II-2-3 Viscosité dynamique des nanofluides :

La viscosité caractérise l'aptitude d'un fluide à s'écouler. Sa connaissance est fondamentale pour toutes les applications impliquant le transport de fluides. L'ajout des nanoparticules permet d'augmenter et d'améliorer la conductivité thermique du nanofluide mais cela peut aussi conduire à une augmentation défavorable de la viscosité dynamique. Ainsi, ces deux propriétés sont étroitement corrélées, et doivent être maîtrisées en vue d'une exploitation de ce type de fluides dans des échangeurs.

De nombreuses études théoriques et expérimentales ont été menées afin d'estimer ou de mesurer la viscosité dynamique des nanofluides et de quantifier l'importance des principaux paramètres qui l'influencent.

Plusieurs modèles théoriques ont été développés pour prédire l'évolution de la viscosité dynamique des suspensions sous certaines conditions. Dans cette partie, nous nous intéresserons aux modèles les plus utilisés dans le cas des nanofluides.

a-Modèles d'Einstein :

D'une manière générale, les formules existantes dérivent du travail fondamental d'Einstein (1906). Basé sur l'hypothèse que l'énergie a une dépendance linéaire avec la viscosité,

Einstein a déterminé l'énergie dissipée autour d'une seule particule dans un fluide en associant son énergie au travail réalisé pour la faire avancer relativement au fluide. A partir de ce résultat, il a déterminé l'expression décrivant une dépendance linéaire de la viscosité des suspensions dans un fluide avec la concentration.

$$\mu_{nf} = \mu_f(1 + 2.5\varphi) \quad \text{II.7}$$

Où : μ_{nf} la viscosité dynamique du nonfluide.

μ_f : la viscosité dynamique du fluide de base.

La formule d'Einstein a depuis été vérifiée expérimentalement et est considérée satisfaisante pour des suspensions très diluées de particules sphériques (browniennes ou non browniennes), typiquement pour des concentrations volumiques inférieures à 1%. Il est à noter que ce modèle ne tient pas compte des effets de la taille des particules et des interactions inter particules.

b-Modèle de Brinkman :

La formule de Brinkman (1952) complète le modèle d'Einstein jusqu'à une concentration volumique inférieure à 4%.

$$\mu_{nf} = \frac{\mu_f}{(1-\varphi)^{2.5}} \quad \text{II.8}$$

Cette relation décrit une évolution non linéaire de la viscosité dynamique avec la concentration volumique mais ne tient pas compte de la collision entre les particules. En effet, l'écoulement autour de chaque particule est influencé par la présence éventuelle d'autres particules à proximité et par les collisions entre particules.

c-modèle de Batchelor :

$$\mu_{nf} = \mu_f(1 + \eta\varphi + k_h\varphi^2 + \dots) \quad \text{II.9}$$

Où : η est la viscosité intrinsèque et k_h est le coefficient de Huggins. La valeur η et k_h est de 2.5 et 6.5 respectivement pour des particules sphériques.

II-2-4 Chaleur spécifique :

La conductivité thermique et la viscosité dynamique sont les deux propriétés thermo physiques les plus étudiées dans le cas des nanofluides. La chaleur spécifique des nanofluides, quant à elle, est très rarement étudiée, notamment sur le plan expérimental.

La chaleur spécifique ou la capacité thermique massique, notée C_p ($J/kg.K$), est définie par la quantité d'énergie à apporter par échange thermique pour élever d'un degré Kelvin la température de l'unité de masse d'une substance. Cette grandeur est incorporée dans l'équation de l'énergie, et nécessite alors d'être déterminée d'une manière rigoureuse.

La plupart des études effectuées dans la littérature utilise un des deux modèles définis par :

a-Modèle du PAK(1998) :

$$(C_p)_{nfp} = (1 - \varphi)(C_p)_f + (C_p)_s \quad \text{II.10}$$

b-Modèle de XUA (2000) :

$$(\rho C_p)_{nf} = \frac{(1-\varphi)(\rho C_p)_f + \varphi(\rho C_p)_s}{(1-\varphi)\rho_f(C_p)_f + \varphi\rho_s} \quad \text{II.11}$$

Pour déterminer la chaleur spécifique des nanofluides. Le premier modèle (II.4) est basé sur la loi de mélange d'une suspension homogène, tandis que le modèle de l'équation (II.5) est fondé sur l'hypothèse d'équilibre thermique entre les particules et le fluide de base.

Zhou et al. (2010) ont mesuré expérimentalement la chaleur spécifique d'un nanofluide à base de nanoparticules d'oxyde de cuivre dispersées dans de l'eau. D'après leurs résultats, la chaleur spécifique décroît progressivement avec la concentration volumique. Ils ont montré que la loi de mélange (II.4) ne permet pas de modéliser la chaleur spécifique dans le cas des nanofluides étudiés et que le modèle (II.5) est mieux adapté pour le calcul de la chaleur spécifique. **O'Hanley et al.** (2012) ont confirmé expérimentalement ce résultat en utilisant un calorimètre différentiel à balayage.

II-2-5 Masse volumique :

La masse volumique des nanofluides est proportionnelle à la fraction volumique en particules et augmente avec l'ajout des nanoparticules. Dans la littérature, et en l'absence de résultats expérimentaux, la masse volumique des nanofluides est souvent calculée à partir de la loi de mélange dans laquelle, comme pour la chaleur spécifique, le nanofluide est supposé homogène (1998).

$$\rho_{nf} = \rho_s + (1 - \varphi)\rho_f \quad \text{II.12}$$

Où :

ρ_{nf} : Masse volumique du nanofluide.

ρ_s : Masse volumique du nanoparticule.

ρ_f : Masse volumique du fluide.

II-2-6 Coefficient d'expansion thermique :

La variation de masse volumique sous l'action de la température est caractérisée par le coefficient d'expansion thermique appelé également **coefficient de dilatation isobare** [12]

$$\beta = \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial T} \right) \quad \text{II.13}$$

Le calcul de la valeur de ce coefficient pour les nanofluides est déterminée par analogie avec la relation (I.6) qui exprime la masse volumique du nanofluide.

$$\beta_{nf} = \varphi\beta_s + (1 - \varphi)\rho\beta_f \quad \text{II.14}$$

II-3 Domaine d'application des nanofluides :

Les nanofluides sont des suspensions de nanoparticules dans des fluides qui montrent une amélioration significative de leurs propriétés à des concentrations de nanoparticules modestes. De nombreuses publications sur les nanofluides traitent de leur comportement afin de pouvoir les utiliser là où une amélioration directe du transfert de chaleur est primordiale, comme dans de nombreuses applications industrielles, réacteurs nucléaires, transport, électronique, biomédecine et aliments. Le nanofluide en tant que fluide intelligent, dans lequel le transfert de chaleur peut être réduit ou amélioré à volonté, a également été signalé. [13]

II-3-1 Applications de refroidissement industriel :

Pour l'industrie américaine, le remplacement de l'eau de refroidissement et de chauffage par des nanofluides pourrait permettre de conserver 1000 milliards de Btu d'énergie. Pour l'industrie américaine de l'énergie électrique, l'utilisation de nanofluides dans les cycles de refroidissement en boucle fermée pourrait permettre d'économiser environ 10000 à 30000 milliards de Btu par an (équivalent à la consommation d'énergie annuelle d'environ 50000 à 150000 ménages). Les réductions d'émissions associées seraient d'environ 5,6 millions de tonnes métriques de dioxyde de carbone; 8600 tonnes d'oxydes d'azote; et 21000 tonnes métriques d'anhydride sulfureux.

Pour les usines de pneumatiques de Michelin Amérique du Nord, la productivité de nombreux processus industriels est limitée par le manque de moyens permettant de refroidir efficacement le caoutchouc lors de son traitement. Cela nécessite l'utilisation de plus de 2 millions de gallons de fluides caloporteurs pour les usines Michelin en Amérique du Nord. Dans ce projet, Michelin a pour objectif d'obtenir une augmentation de productivité de 10% dans ses usines de traitement du caoutchouc si des nanofluides à base d'eau appropriés peuvent être développés et produits commercialement de manière rentable. [13]

II-3-2 Smart Fluides :

Dans cette nouvelle ère de conscience énergétique, notre manque d'abondantes des sources d'énergie propre et la diffusion généralisée de dispositifs à piles, tels que les téléphones portables et les ordinateurs portables, ont accentué la nécessité d'une gestion technologique intelligente des ressources énergétiques. Les nanofluides se sont avérés capables de gérer ce rôle dans certains cas en tant que fluide intelligent. Dans un article publié récemment dans en mars 2009 de *Physicien Review Letters*, Donzelli et al. ont montré qu'une classe particulière de nanofluides peut être utilisée comme matériau intelligent fonctionnant comme une valve thermique permettant de contrôler le flux de chaleur. Le nanofluide peut être facilement configuré soit dans un état «bas», où il conduit mal la chaleur, soit dans un état «haut», où la dissipation est plus efficace. Pour franchir l'abîme des technologies de chauffage et de refroidissement, les chercheurs devront démontrer qu'un système d'exploitation stable répond à une plus grande gamme de flux de chaleur.

II-3-3 Réacteurs nucléaires :

Dans un système de centrale nucléaire à réacteur à eau sous pression, [des chercheurs au-Massachusetts Institute of Technology (MIT)-, ont réalisé une étude visant à évaluer la faisabilité des nanofluides dans les applications nucléaires en améliorant les performances de tout système nucléaire à refroidissement par eau dont l'évacuation de chaleur est limitée. Les applications possibles comprennent le liquide de refroidissement primaire d'un réacteur à eau sous pression (REP), les systèmes de sécurité en veille, les cibles d'accélérateur, les déviateurs de plasma, etc]. le processus limitant la production de vapeur ,c'est un flux de chaleur critique entre les barres de combustible et l'eau, lorsque des bulles de vapeur finissent par recouvrir la surface des barres de combustible. Très peu de chaleur par opposition à l'eau liquide. En utilisant des nanofluides à la place de l'eau, les barres de combustible se recouvrent de nanoparticules, telles que de l'alumine, qui repoussent les bulles nouvellement formées, empêchant ainsi la formation d'une couche de vapeur autour de la barre et augmentant ensuite considérablement le CHF [13]

II-3-4 Extraction de l'énergie géothermique et d'autres sources d'énergie :

Lors de l'extraction d'énergie de la croûte terrestre dont la longueur varie entre 5 et 10 km et la température entre 500 C° et 1000 C°, des nanofluides peuvent être utilisés pour refroidir les tuyaux exposés à de telles températures. Lors du forage, les nanofluides peuvent contribuer au refroidissement des machines et des équipements fonctionnant dans des environnements à fortes frictions et à hautes températures. En tant que « supraconducteur fluide », les nanofluides pourraient être utilisés comme fluide de travail pour extraire l'énergie du noyau terrestre et être traités dans un système de centrale REP utilisant une grande quantité d'énergie de travail.

Dans le sous-domaine de la technologie de conversion de puissance, améliorer les performances de transfert de chaleur pour les nanofluides à basse température et développer des conceptions d'installations pour des températures de ressources plus élevées dans la région de l'eau supercritique entraînerait un gain de l'ordre de grandeur (ou plus) des performances du réservoir et efficacité de conversion chaleur-énergie.

II-4- les avantages et les inconvénients des nanofluides :

La littérature concernant les nanofluides montre que leur utilisation en tant que fluide caloporteur est envisageable, la plupart des auteurs ayant constaté une amélioration des performances thermiques. Les informations qui reviennent le plus souvent sont l'amélioration de la conductivité thermique et une hausse de la viscosité avec l'augmentation de la concentration en nanoparticules. L'utilisation des nanofluides est assez contraignante cependant, des précautions particulières devant être prises pour éviter la sédimentation des particules, la corrosion ou l'augmentation des pertes de charge. A l'opposé, certains auteurs affirment le contraire, en l'occurrence que les nanofluides sont moins performants que leurs liquides de base.

D'une manière générale, les nanofluides permettent de réduire l'encombrement et la consommation des équipements de refroidissement industriel par une meilleure efficacité. Comme les nanofluides sont de bons conducteurs de chaleur ils peuvent aussi être utilisés pour réchauffer plus efficacement. "La très petite taille des nanoparticules et les propriétés lubrifiantes de certaines d'entre elles permettraient leur emploi comme fluide pour les transmissions, les boîtes de vitesses et les huiles de moteurs thermiques". Un des grands inconvénients des nanofluides est leur prix (près de 100 euros le litre). On doit s'assurer de leur rentabilité. Leur emploi sera sûrement réservé aux technologies de pointes.

Les grandes disparités sur l'explication des phénomènes derrière l'amélioration des propriétés thermiques des nanofluides prouvent bien que cette technologie n'est pas encore mature. [14]

II-5 le transfert de chaleur par Convection dans les enceintes nanofluide :

L'amélioration du transfert de chaleur par convection est l'objet principal de plusieurs travaux, et pour ce faire, un grand nombre de chercheurs ont mené une multitude d'essais numériques et expérimentaux portant sur la description des phénomènes géométriques gérant la convection, l'effet de la nature des systèmes dans lesquels elle a lieu (géométrie spécialement), et les propriétés des fluides impliqués (propriétés physico-chimiques). Chronologiquement, bien que les idées d'amélioration aient touché surtout la géométrie des systèmes, et la nature physico-chimique des milieux convectifs, les travaux n'ont touché que l'ordre macroscopique ou parfois microscopique du processus. Mais avec l'apparition et le développement rapide des nanosciences et nanotechnologies pendant la deuxième moitié du

20ème siècle, la convection a pris une grande part de cette nouvelle richesse, et a pris un autre aspect de perfectionnement :

c'est au niveau nanométrique de la matière du milieu convectif que les récents travaux ont été concentrés. Les nanofluides sont alors l'un des fruits d'une telle richesse. Dotés de propriétés physico-chimiques particulières et intéressantes, telles que leur importante conductivité thermique, les nanofluides offrent un coefficient de transfert thermique imbattable par les autres caloporteurs [13]

CHAPITRE III

Formulation mathématique du problème

III-1 Introduction

Cette partie du travail est consacrée à la mise en équations du problème physique considéré, en utilisant les équations de conservation gouvernant les transferts de chaleur dans un canal plan 3D en régime laminaire. La formulation mathématique est présentée dans ce chapitre en explicitant d'abord le problème physique et les principales hypothèses qui ont été introduites.

L'étude est multi physiques : écoulement de fluide dans un milieu plan d'une part ,et phénomène de transfert de chaleur d'autre dans un échangeurs à plaques et joints . la première partie de notre étude est fait sans nano-fluides (eau/eau) tandis que dans la seconde on ajoute des nanoparticules au fluide chaud (eau chaude).

Dans les deux cas, les équations de conservation, les hypothèses de travail et les conditions aux limites sont présentées.

III-2 Position du problème physique

Cette étude porte sur l'influence de l'utilisation des nanofluides sur les performances d'un échangeur de chaleur à plaques et joints. La géométrie considérée est constituée de deux canaux plans(ou circule les deux fluides chaud et froid) séparés par une plaque en acier. Nous avons donc un flux de chaleur qui passe du fluide chaud vers le fluide froid en trois étapes convection/ conduction/ convection.

Les simulations numériques sont basées sur la résolution des équations de transport modélisant des écoulements dans une conduite plane (espace entre deux plaques).

III-2.1 Modèle géométrique

Pour l'étude tridimensionnelle de l'influence des nanofluides dans un échangeur de chaleur à plaques nous avons choisis un modèle géométrique (3D) composé de trois domaines distincts figure III.1:

- ❖ le fluide chaud (eau chaude) d'épaisseur E_{fc}
- ❖ une plaque en acier inoxydable d'épaisseur E_p
- ❖ le fluide froid (eau froide) d'épaisseur E_{ff}

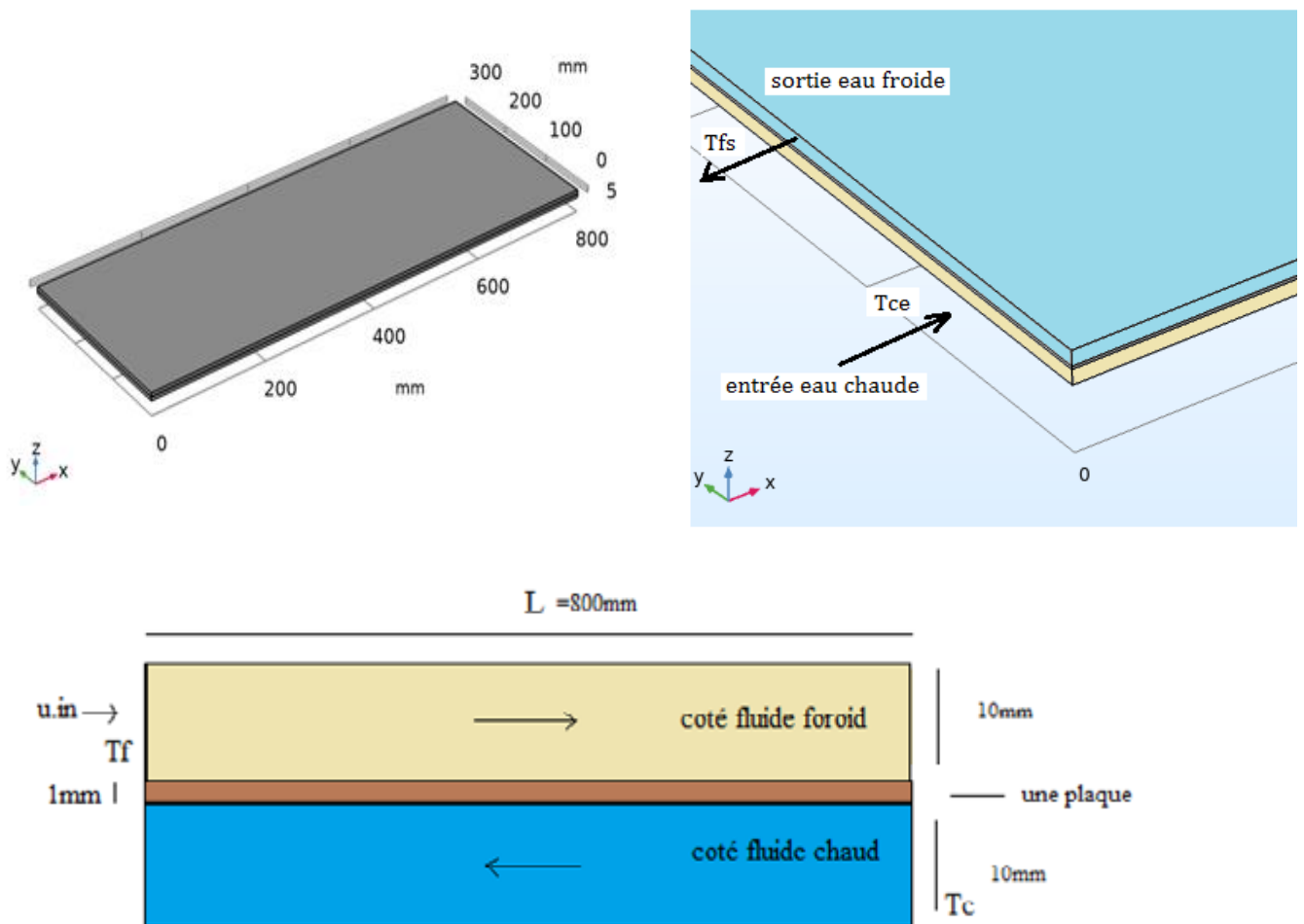


Figure III.1 Modèle géométrique

Les caractéristiques de chaque domaine sont présentées dans le tableau

Nom	Expression	Valeur	Description
L	800[mm]	0.8 m	longueur de la plaque
Ep	1[mm]	0.001 m	épaisseur de la plaque
Efc	10[mm]	0.01 m	épaisseur domaine fluide chaud
Eff	10[mm]	0.01 m	épaisseur domaine fluide froid
u_in	0.1[m/s]	0.1 m/s	vitesse d'entrée des deux fluides
Tc	353.15[K]	353.15 K	température d'entrée coté chaud
Tf	293.15[K]	293.15 K	température d'entrée coté froid

Tableau III.1 Caractéristiques et dimensions du modèle géométrique

Les propriétés thermo-physiques de chaque domaine

- ❖ la plaque en acier inoxydable

Nom	Valeur	Unit
Thermal conductivity	44.5	W/(m·K)
Density	7850	kg/m ³
Heat capacity at constant pressure	475	J/(kg·K)

Tableau III.2 Les propriétés de la plaque

❖ le domaine fluide froid (eau)

Nom	Valeur	Unit
Thermal conductivity	0.6	W/(m·K)
Density	1000	kg/m ³
Ratio of specific heats	1	1
Dynamic viscosity	0.0008513	Pa·s
Heat capacity at constant pressure	4183	J/(kg·K)

Tableau III.3 les propriétés de l'eau liquide

III-2.2 Conditions aux limites

Le fluide à traiter (eau froid) entre dans l'échangeur à plaques avec une vitesse (u_{in}) et à une température uniforme moyenne T_f (voir tableau). La longueur L du canal est choisie de sorte que l'écoulement soit dynamiquement et thermiquement établi dans la section de sortie pour les nombres de Reynolds considérés. Les propriétés thermo-physiques du fluide sont évaluées à la température moyenne $(T_c+T_f)/2$ ou T_c est la température d'entrée du fluide chaud (l'eau) figure III.3. Le flux de chaleur passe du fluide chaud vers la plaque par convection, traverse cette dernière par conduction et passe dans le fluide froid par convection.

III-2.3 Hypothèses

- Fluide Newtonien,
- Le régime d'écoulement est laminaire,
- L'écoulement est incompressible, tridimensionnel en régime stationnaire,
- les milieux fluides sont supposés homogènes et isotropes
- On suppose que les propriétés physiques des fluides restent constantes et évaluées à une température moyenne de référence
- L'accélération due à la pesanteur est négligée,
- Pas de source interne de chaleur,
- Toute la chaleur du fluide chaud est cédée au fluide froid à travers la plaque,
- La dissipation d'énergie par les forces visqueuses est négligée

Le modèle physique choisi ainsi que le système de coordonnées utilisé est représenté sur la Figure III.1

. III.3 Maillage

III.3 Maillage

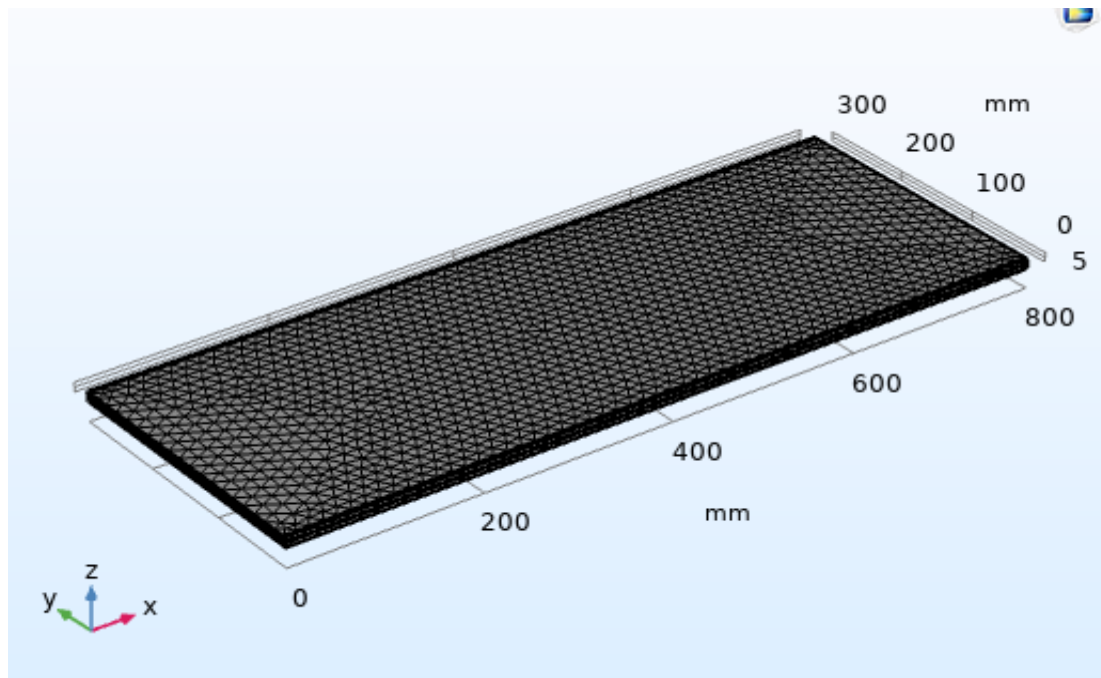


Figure III.2 maillage du modèle

Description	Value
Minimum element quality	1.357E-4
Average element quality	0.1414
Tetrahedron	23428
Prism	11664
Triangle	11120
Quad	632
Edge element	636
Vertex element	16

Tableau III.4 type et nombre d'élément utilisé pour la discrétisation du modèle

III.4 Equations gouvernantes

III.4.1 Equations de conservation

Les équations de base représentant la physique du problème sont celles de Navier-Stokes qu'on peut trouver par exemple dans Hinze [Hinze 1975-a].

III.4.1.1 Equation de conservation de la masse

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \cdot \vec{U}) = 0 \quad (\text{III.1})$$

Où « ρ » est la masse volumique du fluide et « U » sa vitesse.

En tenant compte des hypothèses précédentes, l'équation de continuité se réduit à :

$$\frac{\partial U_i}{\partial X_i} = 0 \quad (\text{III.2})$$

III.4.1.2 Equation de conservation de la quantité de mouvement

$$\frac{D(\rho \cdot \vec{U})}{Dt} = -\nabla P + \vec{F} + \mu \nabla^2 \vec{U} \quad (\text{III.3})$$

$\frac{D}{Dt}$ étant la dérivée particulaire définie par :

$$\frac{D}{Dt} = \frac{\partial}{\partial t} + U_j \frac{\partial}{\partial X_j}$$

En tenant compte des hypothèses précédentes, l'équation (III.3) se réduit à :

$$\rho U_j \frac{\partial U_i}{\partial X_j} = -\frac{\partial P}{\partial X_i} + \mu \frac{\partial^2 U_i}{\partial X_j^2} \quad (\text{III.4})$$

III.4.1.3 Equation de conservation de l'énergie

$$\rho C_p \frac{DT}{Dt} = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + q' + \beta T \frac{DP}{Dt} + \mu \zeta$$

Où « q' » est la génération interne de chaleur par unité de volume et « ζ » la fonction de dissipation visqueuse

En tenant compte des hypothèses précédentes, l'équation d'énergie se réduit à :

$$\rho C_p U_j \frac{\partial T}{\partial X_j} = \frac{\partial}{\partial X_j} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial X_j} \right) \quad (\text{III.6})$$

CHAPITRE IV

IV.1. Introduction

Dans ce chapitre , les résultats de notre étude numérique réalisé grâce au code de calcul COMSOL MULTIPHYSICS version 5.4 sont présentés.

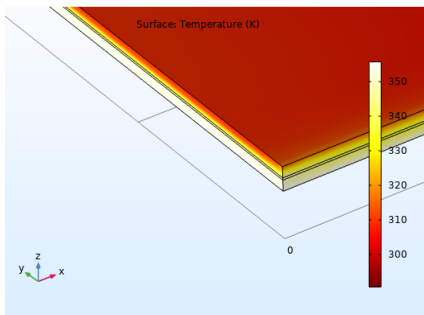
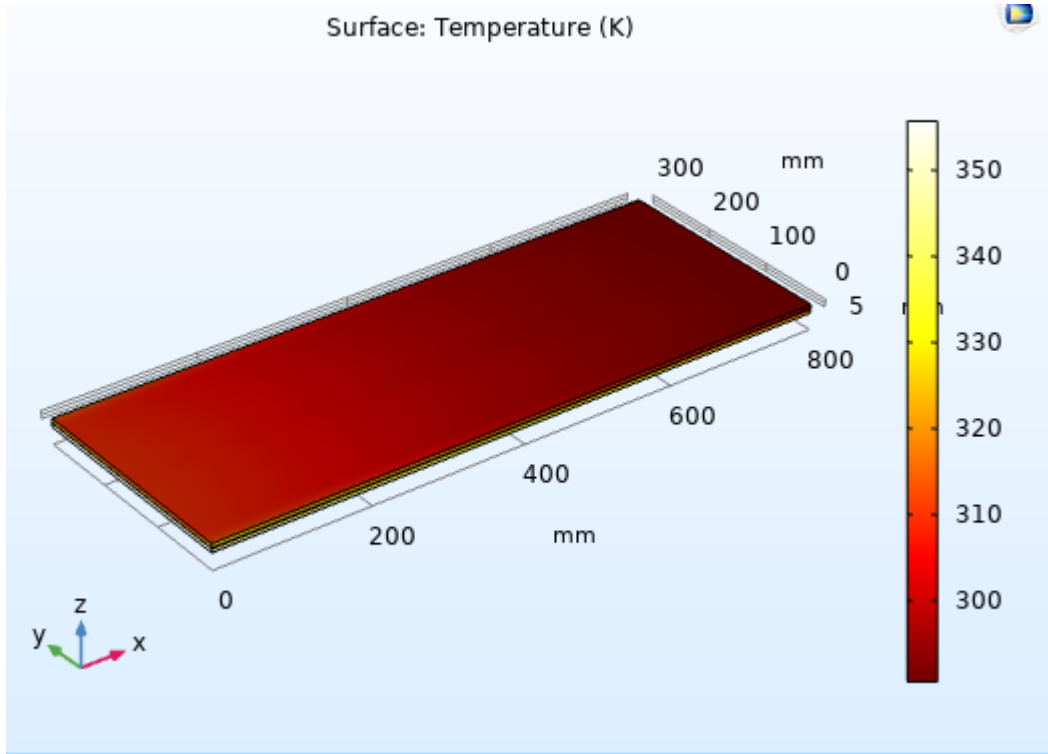
L'objectif de ce travail est de montrer l'efficacité de l'utilisation des nano-fluides comme fluide caloporteur dans l'intensification du transfert convectif au sein des échangeurs de chaleur à plaques et joints. Pour cela notre étude paramétrique débutera par une vérification de l'influence des nanofluides sur les performance de notre échangeur ,ensuite une comparaison entre les différents modèles de calcul des propriétés thermo-physique est présenté .Nous verrons par la suite l'influence de la fraction volumique des nanoparticules dans les performance de notre échangeur de chaleur .par la suite la variation du débit et donc du nombre de Reynolds et son influence sur le flux thermique échangé ainsi que sur les pertes de charges sont misent en évidences .une dernière partie est consacrée à l'effet la température d'entrée du fluide froid (nano-fluide) dans l'amélioration des qualités de notre échangeur.

IV.2. Vérification de l'amélioration du transfert convectif par les nanofluides :

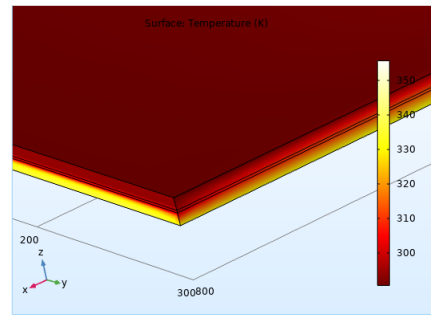
On considère dans cette première partie de notre étude d'une part l'échangeur à plaques travaillant à contre-courant avec de l'eau pure comme fluide chaud (fluide caloporteur) et fluide froid (fluide à traité) et de l'autre part le même échangeur avec comme fluide chaud un nano-fluide (eau+ Cu) pour une fraction volumique $\phi=0.6$ et en utilisant le model de calcul de MAXWELL.

Les résultats des simulations (COMSOL) sont les suivantes :

La figure VI.1 montre le profil des températures des deux cotés (chaud et froid) le long de l'échangeur. a)entrée du fluide chaud et sortie du fluide froid , b) sortie du fluide chaud et entrée du fluide froid



a)



b)

Figure IV.1 Profil des températures des deux fluides (chaud et froid) le long de l'échangeur

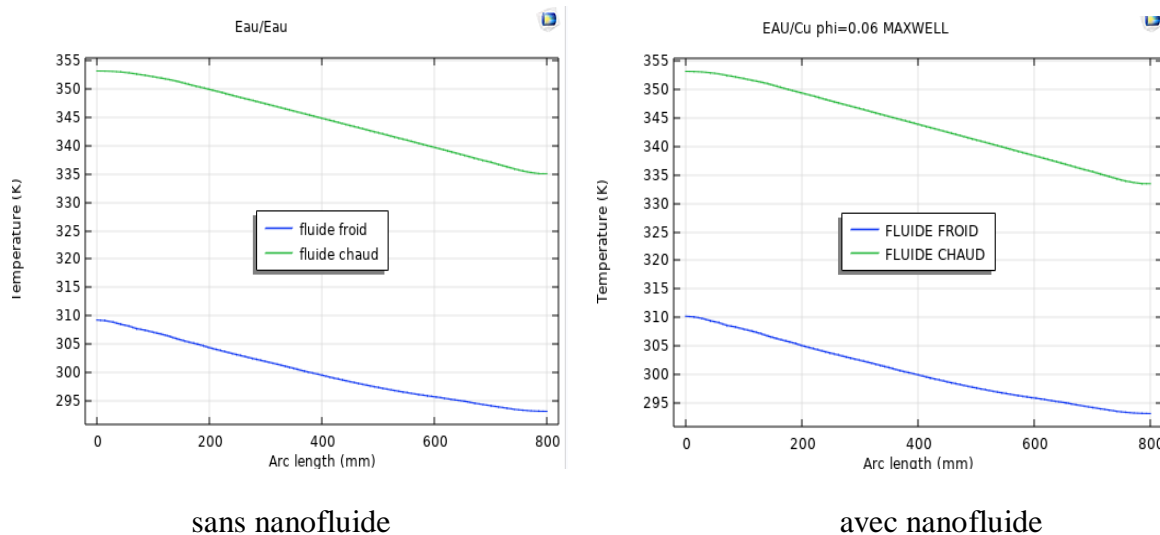


Figure IV.2 Evolution de la température le long de l'échangeur coté chaud et froid

En examinant les deux graphes précédents, nous remarquons qu'effectivement l'échangeur utilisant un nano-fluide comme fluide caloporteur est plus performant qu'un échangeur classique (sans nano-fluide). Le fluide traité (eau froide) sort avec une température $T_{fs} = 310^{\circ}\text{C}$ pour l'échangeur avec nano-fluide contre une température $T_{fs} = 309^{\circ}\text{C}$ pour l'échangeur sans nano-fluide, une différence de 1°C pour seulement un seul passage (une seule plaque) sachant qu'un échangeur à plaque peut être composé de plusieurs dizaines de plaques.

Le flux thermique échangé peut être calculé grâce à la méthode du ΔTLM (différence logarithmique moyenne de la température) qui s'écrit :

$$\Phi = U * S * \Delta TLM$$

Avec :

U : coefficient d'échange thermique global

S : surface d'échange thermique

Et

$$\Delta TLM = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln \frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}}$$

Si on considère que le coefficient U et la surface S sont constants alors le flux de chaleur dépend seulement du ΔTLM . L'échangeur est donc plus performant lorsque le ΔTLM augmente.

- Pour l'échangeur sans nanofluides : $\Delta TLM = 41.99 \text{ }^\circ\text{C}$
- Alors que pour l'échangeur utilisant les nanofluides : $\Delta TLM = 42,07 \text{ }^\circ$

La différence entre les deux ΔTLM (calculée pour une seule plaque) est considérable sachant qu'un échangeur à plaques est constitué de plusieurs dizaines de plaques.

D'autres part ,la figure 4.3 montre les pertes des charges dans les deux cotés (chaud et froid) de l'échangeur pour les deux cas étudiés (avec et sans nano-fluide)

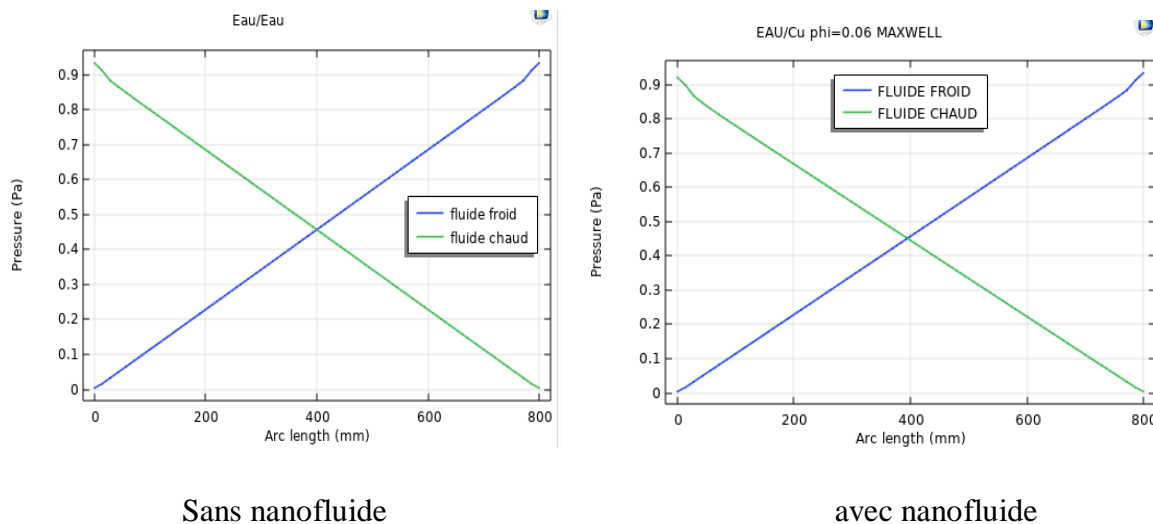


Figure IV.3 Evolution des pertes de charges le long de l'échangeur dans les deux cotés

On constate que les pertes de charge pour le fluide froid dans les deux cas (échangeurs avec et sans nano-fluide) sont presque les mêmes, par contre pour le fluide chaud les pertes de charge pour l'échangeur à nano-fluide sont légèrement inférieures à celle relevée pour l'échangeur sans nano-fluide.

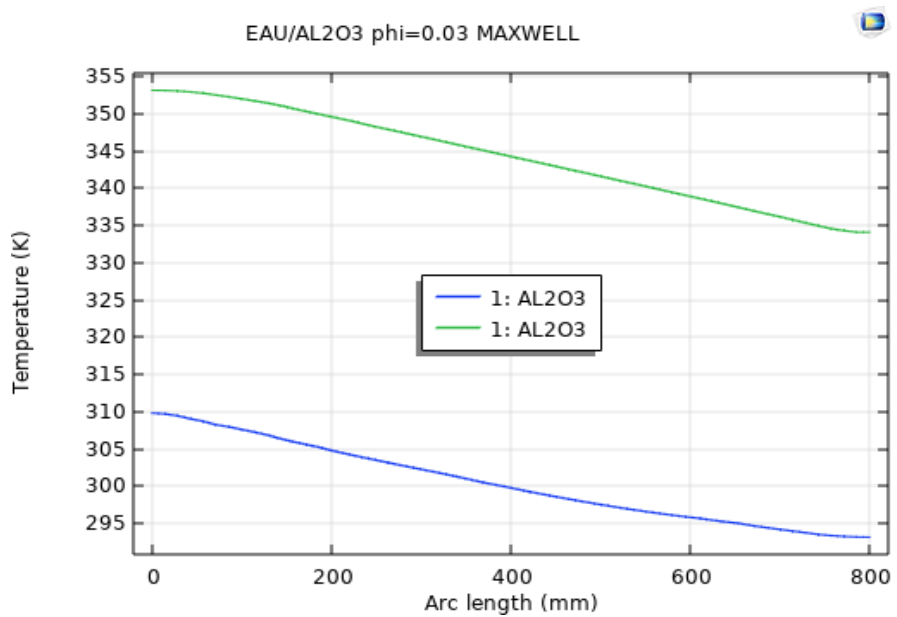
IV.3. Comparaison entre différents modèles de calcul des propriétés thermo-physique :

Une comparaison entre quelques modèles de calcul des propriétés thermo-physique des nano fluides est présentée dans cette partie. Les modèles étudiés sont :

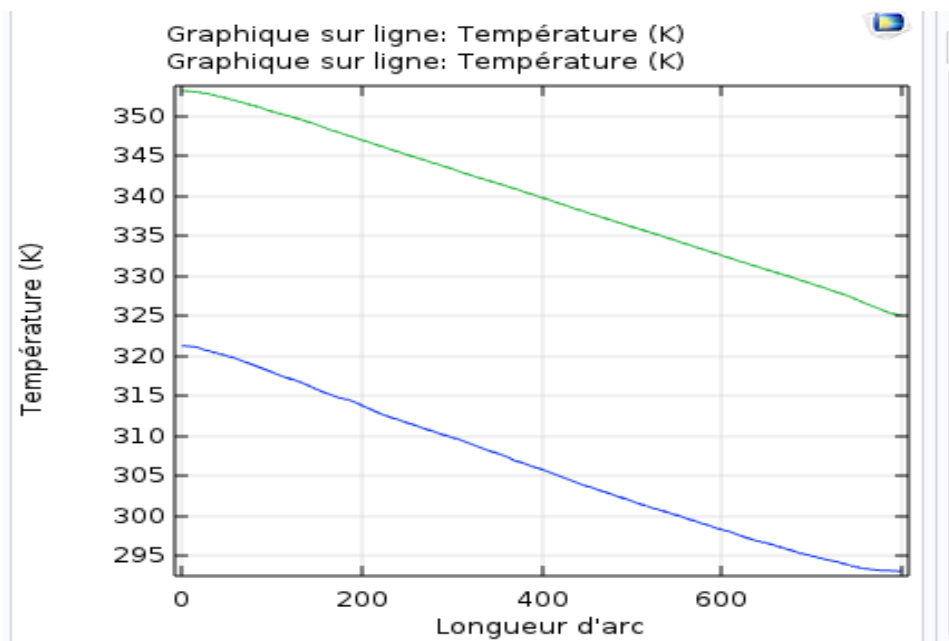
- Modèle de MAXWELL
- Modèle de BHUTTACHARYA et al .
- Modèle de KEBLINSKI et al .
- Modèle de TIMOFEEVA et al .

La figure IV.4 montre le profil de la température (coté chaud et froid) le long de l'échangeur utilisant le nano-fluide EAU/AL₂O₃ comme fluide caloporteur pour différentes théories de calculs des nano-fluides. la fraction volumique ($\phi=0.03$)

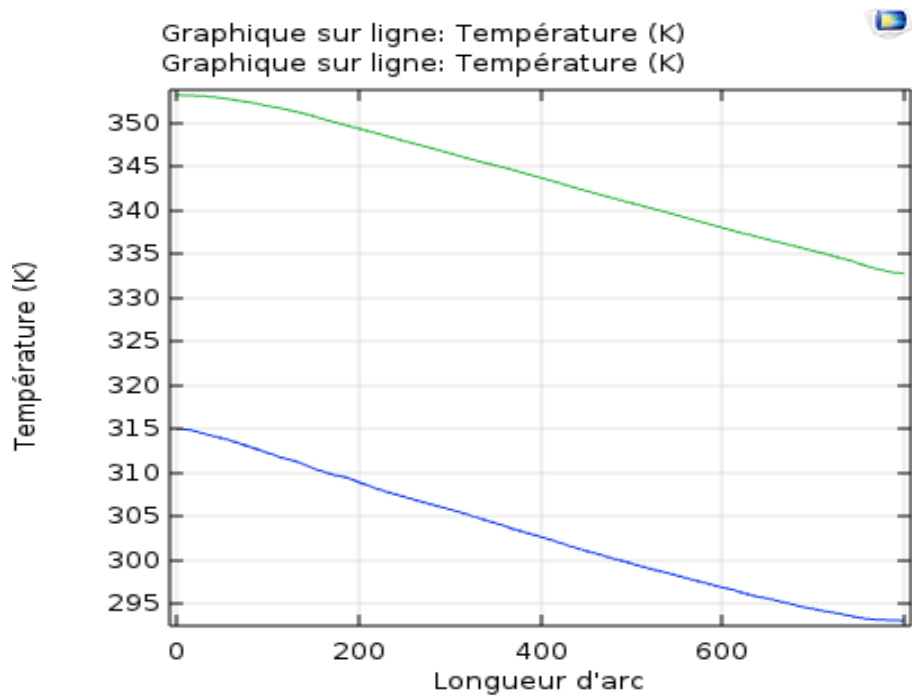
Les résultats obtenus par simulation grâce au code de calcul COMSOL 5.4 montre les quatre modèles donnent des résultats complètement divergents à l'exception des deux derniers modèles (TIMOFEEVA et KEBLINSKI) qui présentent presque le même résultat.



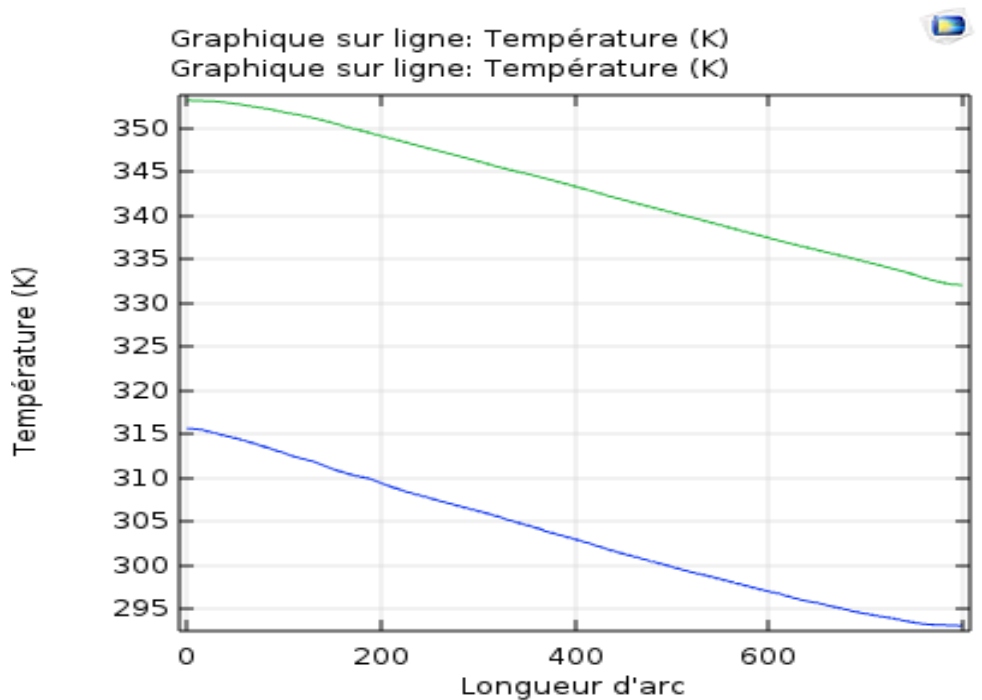
modèle de MAXWELL



Modèle de BHUTTACHARYA



Modèle de TIMOFEEVA

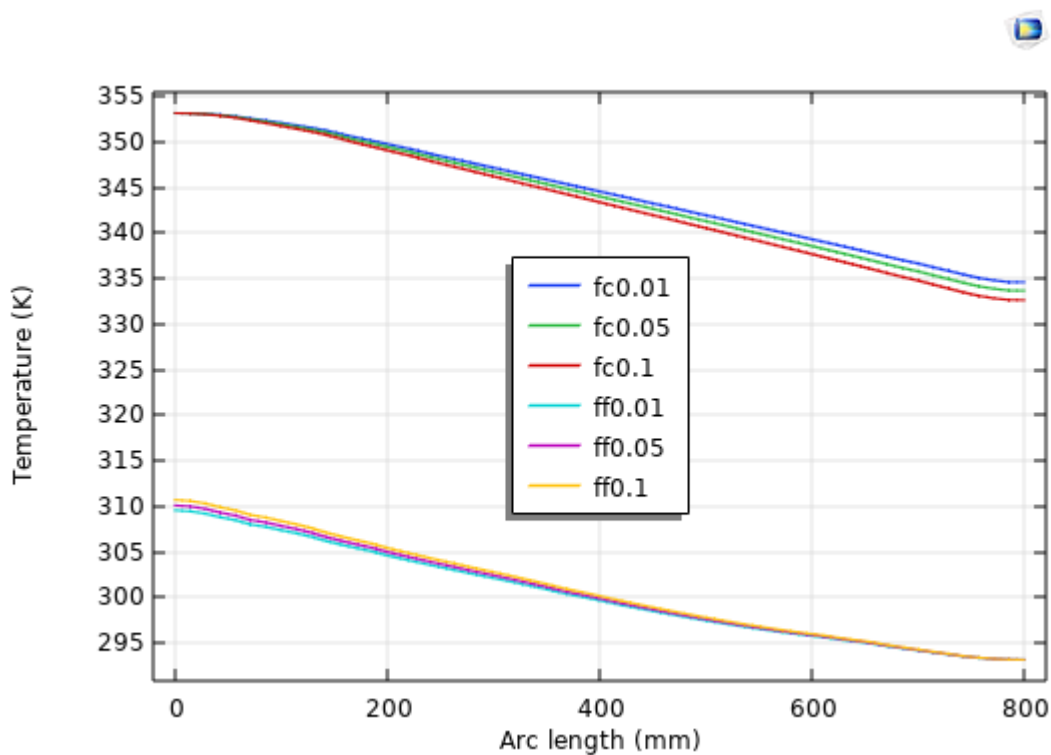


Modèle de KEBLINSKI

IV.4 Effet de la traction volumique PHI

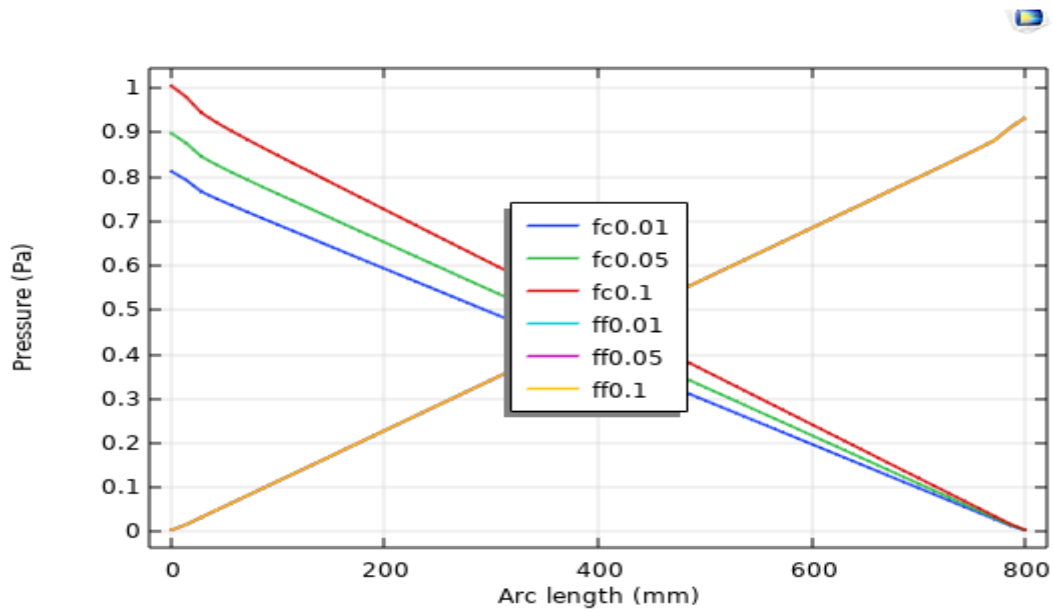
Nous analysons dans cette partie l'influence de la fraction volumique ϕ du mélange eau/AL₂O₃ sur les performances de notre échangeur suivant le modèle de calcul de MAXWELL. Les résultats sont les suivants :

La figure VI.7 montre le profil de la température des deux fluides le long d'une plaque de l'échangeur pour différentes fractions volumiques.



La figure VI.8

On distingue clairement que plus le volume des nanoparticules est important plus le rendement de l'échangeur est meilleur ; par contre l'augmentation de ϕ (fraction volumique) entraîne directement une augmentation des pertes de charges chose qu'on peut voir dans la figure VI.8 qui montre les chutes de pression de part et d'autre de la plaque .



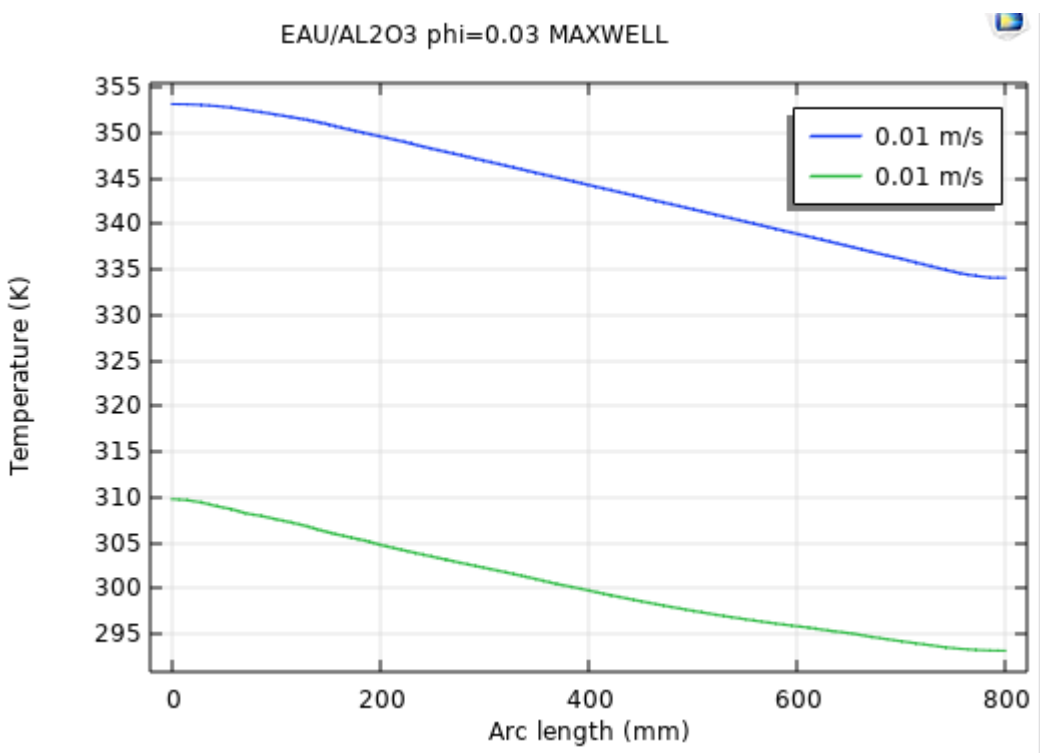
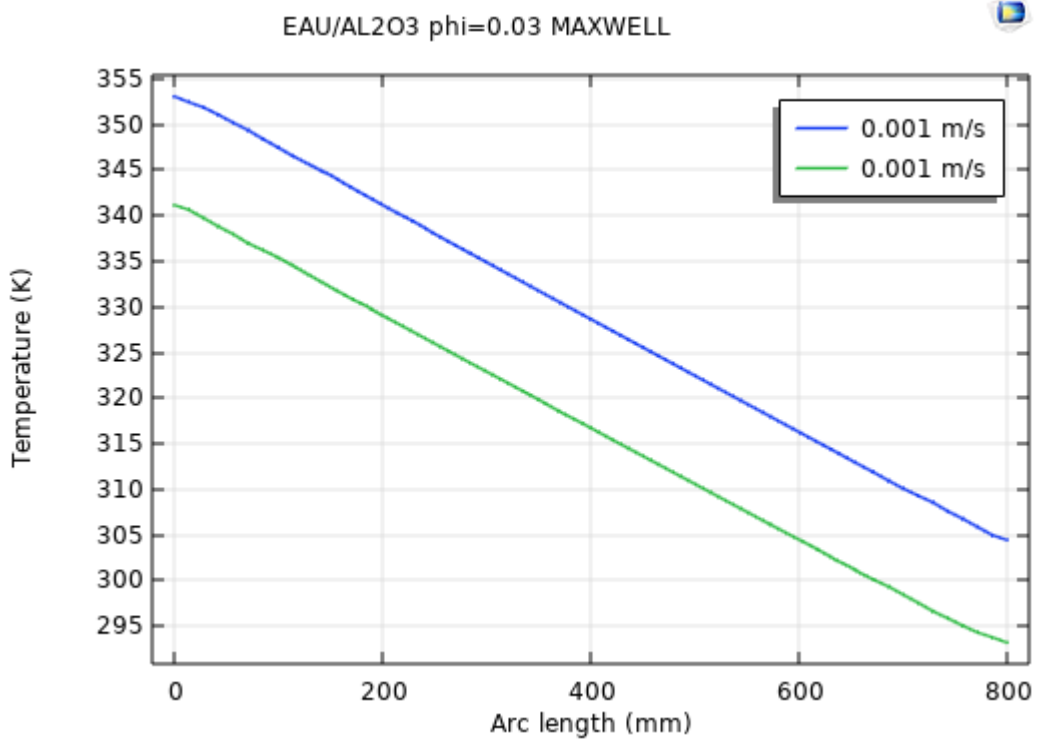
La figure VI.9

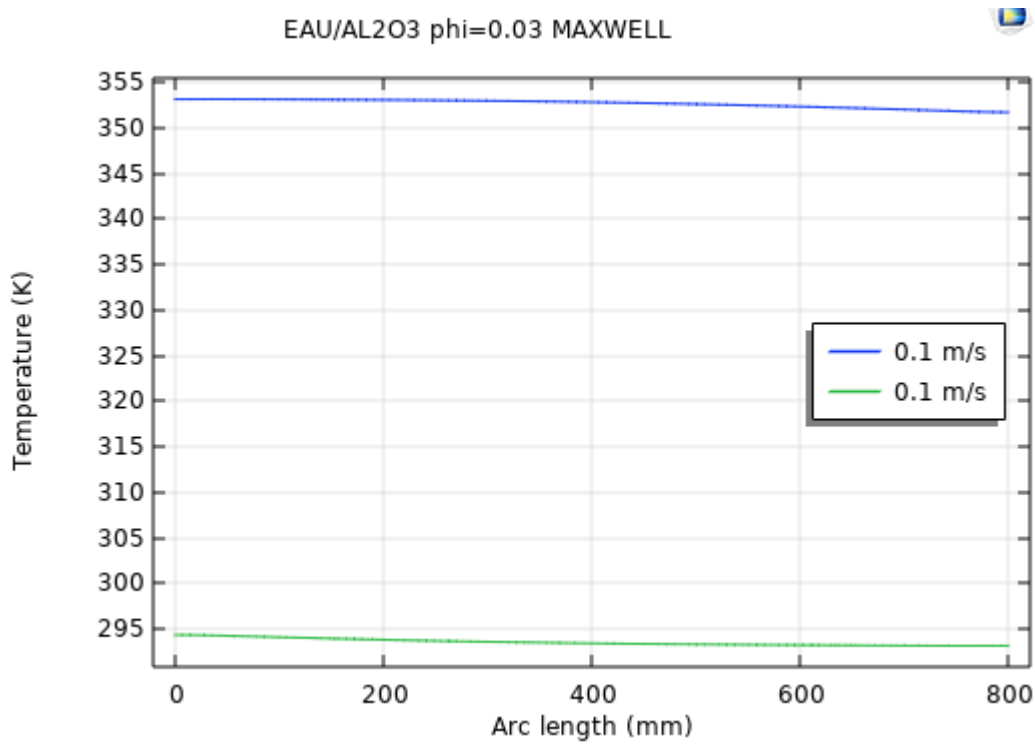
IV.5.Effet de la vitesse d'écoulement des deux fluides :

Dans cette partie nous allons voir l'effet vitesse d'écoulement des deux fluides chaud et froid (donc du débit du fluide froid [nano-fluide]) sur le rendement de notre échangeur.

L'étude est faite pour des nanoparticules en AL₂O₃ à une fraction volumique de 0.03% associées à l'eau pour trois valeurs de la vitesse (à savoir 0.001 ,0.01 et 0.1 m/s).

La figure VI. 9 montre le profil de la température des deux fluide le long de la plaque pour une vitesse d'entrée égale à : a) 0.001m/s ,b) 0.01m/s et c) 0.1m/s





La figure VI. 10

Une vitesse d'écoulement petite signifie un temps de contact très grand entre les deux fluides et donc plus de chaleur échangées ce qui explique l'augmentation relativement grande de la température du fluide froid pour une vitesse d'entrée égale à 0.001m/s par rapport aux deux autres vitesses plus rapides.

IV. Conclusion :

Dans cette partie nous avons étudié l'amélioration de transfert de chaleur convectif par les nano fluide grâce au code de calcul COMSOL

En examinant les résultats obtenus on peut tirer la conclusion suivant :

-la présence de la nanoparticule dans le fluide de base (eau pur) fait augmenter le transfert de chaleur.

-l'ajout des nanoparticules dans le fluide de base (eau pur) fait diminuer les pertes de charge.

-les modèles de calcul propriétés thermo physiques des nano fluides donnent souvent des résultats plus ou moins divergents.

-la diminution de la vitesse d'entrée des deux fluides induit une augmentation de la quantité de chaleur échangée ainsi qu'une diminution les pertes de charges.

-L'augmentation de la fraction volumique des nanoparticules dans le fluide de base augmente considérablement le flux échangé et donc les performances de l'échangeur de chaleur.

CONCLUSION GENERALE :

Ce mémoire récapitule notre étude menée sur l'intensification du transfert thermique et donc l'amélioration d'un échangeur de chaleur à PLAQUES et JOINTS en utilisation la technique des nano-fluides .Il a été décomposée en quatre chapitres dont les principales conclusions et les perspectives de recherches sont les suivantes :

- ✚ Le chapitre I nous a permis de définir les échangeurs de chaleurs ainsi que leurs différents types et classes.
- ✚ Le chapitre II nous a éclairé sur les propriétés thermo physiques des nanofluides ainsi que les différentes théories pour les calculer.

Les résultats de notre étude numérique nous a permis de tirer les conclusions suivantes :

- ✚ la présence de la nanoparticule dans le fluide de base (eau pur) fait augmenter le transfert de chaleur.
- ✚ l'ajout des nanoparticules dans le fluide de base (eau pur) fait diminuer les pertes de charge.
- ✚ les modèles de calcul propriétés thermo physiques des nano fluides donnent souvent des résultats plus ou moins divergents
- ✚ la diminution de la vitesse d'entrée des deux fluides induit une augmentation de la quantité de chaleur échangée ainsi qu'une diminution les pertes de charges.
- ✚ L'augmentation de la fraction volumique des nanoparticules dans le fluide de base augmente considérablement le flux échangé et donc les performances de l'échangeur de chaleur.

Bibliographies

- [1] : M. Moussa, J. Marie PERRIERCORNET. Échangeur de Chaleur : échangeur Tubulaire et [Échangeur à surface raclée, JEAN CASTAING LASVINOTTES 2002
- [2] : BONTEMPS, A., et al., Description des échangeurs. technique de l'ingénieur [B 2 341], université Abderrahmane mira Bejaia,2018.
- [3] : Saadallah, I. and M.S.-e. Medjahed, Etude paramétrique des échanges externes de chaleur d'une machine à absorption, Université Aboubakr Belkaïd – Tlemcen, 2018
- [4] : Taourit, F., Etude du comportement dynamique et thermique de deux écoulements de fluide dans un échangeur de chaleur (comparaison entre le cas simple et le cas avec ailettes) ; Université Abou Bakr Belkaid-TLEMCEM, 2013.
- [5] : Wauquier, J.-P., et al., Le raffinage du pétrole1994, Paris: Editions Technip.
- [6] : Toufik, Y., Percement des tubes dans les échangeurs de chaleur,université Abdelhamid Ibn Badis De Mostaganem 2012.
- [7] : Boufoudi, H., F. Allaoua, and A. Djerrada, Dimensionnement d'un système de refroidissement d'huile de lubrification de la centrale en cogénération-Cevital, Béjaïa, 2018, Université Abderrahmane Mira-Bejaia.
- [8] : Bougriou, C., Calcul et technologie des échangeurs de chaleur,université de Batna Algérie, 1998.
- [9] : Benyahia, N. and M. Lahmar, Etude thermique de l'échangeur de chaleur a faisceau et calandre E05 existant dans le complexe gazier de rhourde nous (sonatrach algerie), Université Aboubakr Belkaïd – Tlemcen, 2017.
- [10] : **Stephen U. S. Choi* and J. A. Eastman.**Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles. International mechanical engineering congress and exhibition1995
- [11] : **Olivier Doche, Jean-Antoine Gruss & Olivier Soriano** .Une nouvelle technologie pour les échangeurs thermiques : Le Nanofluide .2007
- [12] : **Stéphane FOHANNO, Guillaume POLIDORI, Catalin POPA.** Nanofluides et transfert de chaleur par convection naturelle. Université de Reims Champagne-Ardenne, France2012.

[13] : **Kaufui V. Wong . Omar De Leon.** Applications of Nanofluids: Current and Future. Mechanical and Aerospace Engineering Department, University of Miami.2015

[14] : **Salma Halefadi** .Caractérisation des propriétés thermo-physiques et d'échanges de chaleur des nanofluides à base de nanotubes de carbone.2014