

I.1. Introduction :

Le transfert de chaleur peut être défini comme la transmission de l'énergie d'une région à autre sous l'influence d'une différence de température. Il est régi par une combinaison de lois de physiques.

La plupart des phénomènes étudiés font apparaître l'intervention des trois modes de transmission de la chaleur :

La convection, la conduction et le rayonnement.

I.2. Modes de transfert thermique :

I.2.1. Conduction :

La conduction est définie comme étant le mode de transmission de la chaleur provoquée par la différence de température entre deux régions d'un milieu solide, liquide ou gazeux, ou encore entre deux milieux en contact physique; le milieu n'est le siège d'aucun mouvement macroscopique interne (sans déplacement appréciable des particules de ce corps).

Elle se fait par interaction directe des particules voisines et agitation (transfert de mouvement de molécule à molécule), C'est un transfert lent.

(La conduction se fait dans les solides et les fluides fixes (au repos)).

Exemple : propagation de la chaleur dans une paroi entre l'intérieur de bâtiment chauffé et l'extérieur.

Applications :

Le transfert de chaleur par conduction caractérise tous les transferts de chaleur qui s'effectuent dans les parois séparant deux corps à des températures différentes.

C'est le cas des surfaces d'échange des échangeurs de chaleur, mais c'est aussi celui des murs et vitrages d'un bâtiment des cuves contenant des liquides chauds ou froids, des parois des fours, etc. ... [3, 4, 5, 6,7].

I.2.2. Convection :

C'est un transfert de chaleur dans la matière avec mouvement macroscopique de la matière. Ce type de transfert n'intervient que pour les liquides et les gaz (C'est le fluide en mouvement qui transporte de la chaleur) ; elle caractérise la propagation de la chaleur dans un fluide, gaz ou liquide, dont les molécules sont en mouvement.

On distingue deux types de convection :

La convection forcée : le mouvement du milieu est engendré par un dispositif externe (le vent, un ventilateur, ...)

Exemple : refroidissement d'un bâtiment sous l'effet du vent.

La convection naturelle : le mouvement du fluide est engendré par les variations de densité causées par les variations de température au sein du fluide. C'est un mode de transfert rapide en général.

Exemple: mouvement de la vapeur au-dessus d'une tasse de café, principe du convecteur.

- ❖ La combinaison de ces deux types fondamentaux de convection est dite la convection Mixte causée à la fois par des différences de pression et de température.

Applications :

Les applications du transfert de chaleur par convection sont beaucoup trop nombreuses pour que l'on puisse envisager de les citer toutes.

Elles interviennent chaque fois que l'on chauffe ou que l'on refroidit un liquide ou un gaz, qu'il s'agisse de faire bouillir de l'eau dans une casserole, du radiateur de chauffage central, du radiateur associé au moteur d'une voiture ou de l'échangeur dans un procédé, évaporateur ou condenseur.

La convection s'applique même si la surface d'échange n'est pas matérialisée par une paroi, ce qui est le cas des condenseurs par mélange ou des réfrigérants atmosphériques, voire des sècheurs à air chaud. ... [3, 4, 5, 6,7].

I.2.3. Rayonnement :

C'est l'échange de chaleur entre deux parois séparées par un milieu transparent ou semi transparent.

Les matériaux ont la propriété d'absorber ou d'émettre des photons (ou des quantités d'énergie).

L'énergie emportée par le photon est prélevée sur l'état d'énergie du corps et réciproquement l'énergie d'un photon absorbé est souvent transformée en chaleur. Cette propriété d'émission dépend donc de la température du milieu. Il s'agit d'un transfert à distance quasi-instantané sans nécessité de support matériel. Donc :

Dans la transmission de chaleur par rayonnement, le transfert thermique s'effectue par des vibrations électromagnétiques entre deux surfaces (même dans le Vide). Sans aucun contact entre eux, par le déplacement d'ondes dans l'espace qui se propagent en ligne droite sans aucun support de matière.

Finalement, on distingue dans ce mode de transfert trois phénomènes :

Emission
Propagation
Absorption

Nous avons :

Le rayonnement thermique concerne les longueurs d'ondes comprises entre $100\mu\text{m}$ et $0,01\mu\text{m}$ et va de l'infrarouge à l'ultraviolet en couvrant le visible.

Le rayonnement diélectrique concerne les fréquences hertziennes et les longueurs d'ondes comprises entre 100 m et 0,01 m.

Exemple : réchauffement d'un mur par le rayonnement solaire le jour, et chaleur émise par le mur la nuit... [3].

Applications :

Le rayonnement infrarouge : est appliqué dans de très nombreux procédés industriels. Son action sur la matière est essentiellement thermique et les applications principales concernent :

- Le séchage (papiers, cartons, textiles, etc.) ;
- La cuisson (teintures, apprêts, enductions...)
- Le chauffage (avant formage de matériaux divers, traitements thermiques, soudage, chauffage de postes de travail...)
- Les polymérisations (encres, revêtements, emballages...)
- La stérilisation (flacons pharmaceutiques, produits alimentaires divers...).
- Le rayonnement ultraviolet : est constitué de photons dont l'énergie est de l'ordre de grandeur de l'énergie des liaisons atomiques. Ceux-ci agissent sur la matière par déplacement des électrons vers des niveaux énergétiques supérieurs.

Lorsque la matière soumise au rayonnement y est sensible, il s'y produit des réactions chimiques. [4].

I.3. Loi de transmission de la chaleur :

I.3.1. La loi de Fourier :

Conduction :

La théorie de la conduction repose sur l'hypothèse de Fourier :

La densité de flux est proportionnelle au gradient de température.

Fourier a donné (1822) une loi phénoménologique qui s'exprime comme suit :

Loi de Fourier :

$$\Phi = -\lambda S \nabla T \quad (\text{I.1})$$

Φ : flux de chaleur (en w).

λ : coefficient de conductivité thermique ($\text{w.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$).

S : surface d'échange en (m^2).

T : Température (en °k).

I.3.2 La loi de Newton :

Convection :

Ce mécanisme de transfert est régi par la loi de Newton :

La loi de Newton pour la convection est :

$$Q = h.S(T_p - T_f) \quad (\text{I.2})$$

Où :

Q : Le flux échangé par convection (en w).

h : Coefficient de convection (en $\text{w/m}^2.\text{deg}$).

S : Surface de la paroi en contact avec le fluide (en m^2).

T_p : Température de la paroi solide (en k).

T_f : Température du fluide (en k).

I.3.3 La loi de Stefan Boltzmann :

La loi de Stefan Boltzmann : pour le rayonnement s'énonce comme suit :

$$q = \varepsilon.\sigma.T^4 \quad (\text{I.3})$$

Où :

q : La densité de flux de chaleur émis par le corps (en w/m^2)

ε : Émissivité thermique du matériau (facteur adimensionnel)

σ : Constante de Stefan (en $\text{w/m}^2.\text{k}^4$, évalué à $5,6 \cdot 10^{-8}.\text{k}^8$)

T : Température du corps (en K) [8].

I.4. Grandeurs thermiques :

Ces définitions permettent d'expliquer avec succès les phénomènes de transfert de chaleur d'un corps à l'autre, et plus généralement de conservation de la chaleur dans des systèmes isolés.

Pour une quantité de matière donnée, l'apport d'une quantité de chaleur (énergie) induit un changement de sa température ou un changement d'état de la matière. La distinction entre ces deux phénomènes permet de distinguer deux formes de chaleur, la chaleur sensible et la chaleur latente.

La température quant à elle est une grandeur physique qui caractérise un niveau d'énergie de la matière. Ces différentes notions sont explicitées ci-après.

I.4.1. La température :

C'est la traduction à l'échelle macroscopique d'un état énergétique de la matière à l'échelle microscopique.

À savoir :

Pour les solides : c'est l'état de vibration des atomes à l'intérieur d'un Réseau cristallin ou de mouvement d'électrons pour les matériaux qui ont la faculté d'échanger des électrons (les métaux par exemple) ;

Pour les fluides : c'est l'état d'agitation des molécules. La température s'exprime en degrés Kelvin (K) ou Celsius (C).

L'unité de température thermodynamique (le kelvin) est définie à partir de la valeur assignée au point triple de l'eau, 273,16°K (ou 0.01 °c) une définition de la température absolue d'un corps : elle est mesurée en kelvin = zéro kelvin = -273.15 degrés Celsius (environ) [3].

I.4.2. Champ de température :

En tout point de l'espace ou se trouve de la matière, on définit une fonction scalaire température, $T(x, y, z, t)$, fonction des coordonnées du point ainsi que du temps. L'ensemble des valeurs instantanées de la température dans tout l'espace est appelé « champ la température » [9].

I.4.3. Régime d'écoulement :

Les transferts d'énergie sont déterminés à partir de l'évolution dans l'espace et dans le temps de la température $T = f(x, y, z, t)$. La valeur instantanée de la température en tout point de l'espace est un scalaire appelé champ de température.

Nous distinguerons deux cas :

- Champ de température indépendant du temps : le régime est dit permanent ou stationnaire.
- Evolution du champ de température avec le temps : le régime est dit variable ou in stationnaire [9,10].

I.4.4. Surface isotherme :

L'ensemble des points ayant, à un instant donné, la même température est appelée « surface isotherme ». par ailleurs, en tout point de l'espace et à tout instant, nous pouvons écrire la variation élémentaire de température dans une direction quelconque \overrightarrow{dM} sous la forme :

$$dT = \overrightarrow{\text{grad}T} \cdot \overrightarrow{dM} \quad (\text{I.4})$$

Si le déplacement élémentaire \overrightarrow{dM} s'effectue sur une surface isotherme $dT = \overrightarrow{\text{grad}T} \cdot \overrightarrow{dM} = 0$

Il en résulte que le gradient de température en chaque point d'une surface isotherme A est normal à cette surface, nous pouvons donc écrire,

$$\overrightarrow{\nabla T} = \overrightarrow{\text{grad}T} = \vec{n} \left(\frac{\partial T}{\partial n} \right) \quad (\text{I.5})$$

Surface isotherme [9,10].

I.4.5. La chaleur :

Est encore plus difficile à définir. Mais la thermodynamique donne un sens à la notion de chaleur:

" Il s'agit de la quantité d'énergie échangée par un système, avec un autre système ou le milieu extérieur ".

I.4.6. Flux de chaleur :

La chaleur s'écoule sous l'influence d'un gradient de température par conduction des hautes vers les basses températures. La quantité de chaleur transmise par unité de temps et par unité d'aire de la surface isotherme est appelée densité de flux de chaleur [1].

$$q = \frac{dQ}{dt} \quad (\text{I.6})$$

I.4.7. Propriétés thermo physiques des matériaux :

Les échanges thermiques par conduction sont caractérisés essentiellement par trois propriétés thermo physiques des matériaux qui sont liées entre elles :

La conductivité thermique caractérise l'aptitude du matériau à transmettre la chaleur;

La diffusivité thermique caractérise la vitesse de propagation de la chaleur dans le matériau ;

La capacité thermique massique caractérise l'aptitude du matériau à emmagasiner de la chaleur.

I.4.8. La chaleur sensible :

Lorsque un corps qui reçoit ou cède de la chaleur s'échauffe ou se refroidit sans changer d'état, on parle alors de chaleur sensible. La variation de température T que va subir un corps de masse m est reliée à la quantité de chaleur Q par le coefficient de proportionnalité C_p (chaleur spécifique, ou capacité calorifique) [3].

I.4.9. La chaleur spécifique :

Par définition, la chaleur spécifique C_p correspond à la quantité de chaleur qu'il faut fournir à un matériau de masse donnée pour que sa température s'élève d'un degré. C'est-à-dire :

La quantité de chaleur échangée entre deux corps respectivement à la température T_1 et T_2 ($T_1 > T_2$) s'exprime par :

$$C_p = \frac{1}{m} \frac{dQ}{dT} \quad (I.7)$$

I.4.10. Chaleur latente :

On parle de chaleur latente lorsque le corps qui reçoit ou cède de la chaleur l'utilise pour changer d'état, sans que sa température ne varie.

La quantité de chaleur qu'il faut fournir à un matériau de masse m donnée pour que, à température constante, celui-ci change d'état (solide \rightarrow liquide ; liquide \rightarrow gaz) est donnée par :

$$Q = m.L \quad (I.8)$$

Où

L : est le coefficient de chaleur Latente.

On parle alors de "transformation isotherme" car la température du système reste constante pendant tout le processus d'échange de chaleur [3].

I.4.11. Conductivité thermique :

La conductivité thermique est une grandeur physique caractérisant le comportement des matériaux lors du par conduction. Cette constante apparaît par exemple dans la loi de Fourier Elle représente la quantité de chaleur transférée par unité de surface et par une unité de temps sous un gradient de température.

La conductivité thermique est exprimée en watts par mètre, ($W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$) où :

D'autres paramètres comme l'humidité, la pression intervient également.

La conductivité thermique évolue avec la température.

Donc :

La conductivité thermique caractérise l'aptitude du matériau à transmettre la chaleur.

Mathématiquement, la conductivité thermique λ peut donc s'écrire : [9].

I.5. Régimes d'écoulement :

L'expérience de REYNOLDS relative à un écoulement dans une conduite cylindrique met en évidence deux régimes d'écoulement et un paramètre caractéristique du phénomène.

Pour les faibles débits l'écoulement est dit laminaire. Et turbulent pour les débits importants. Le débit d'écoulement se caractérise par le nombre de REYNOLDS.

I.5.1. Régime laminaire :

Les filets fluides sont parallèles, les échanges s'effectuent entre les couches qui sont d'origine moléculaire (conduction).

L'écoulement reste laminaire tant que le nombre de REYNOLDS reste inférieur à 2300.

I.5.2. Régime turbulent :

L'écoulement est perturbé, le mouvement des particules fluides est aléatoire et tridimensionnel.

Le régime d'écoulement est considéré comme turbulent si le nombre de REYNOLDS atteint ou dépasse 10000.

Le régime correspondant au nombre de REYNOLDS compris entre 2300 et 10000 est dit transitoire [11].

1.6. Nombre adimensionnel :

D'après la loi de NEWTON pour la convection on a le flux de chaleur qui se détermine par :

$$Q = h.S.\Delta T \quad (I.9)$$

Q : Flux de chaleur.

h : Coefficient d'échange global.

S : Surface d'échange.

ΔT : L'écart de température.

Mais, en réalité cette équation est plus complexe, puisque le coefficient d'échange convective h est en fonction de plusieurs paramètres ; la géométrie, le profil, la vitesse, la température,

l'écoulement,...etc. et qui implique beaucoup d'expérience pour déterminer l'influence de chacune de ces paramètres.

La complicité des phénomènes de convection rend nécessaire l'utilisation des techniques générales permettant de limiter le nombre des paramètres influents.

Après analyse adimensionnelle et similitude faites, on est parvenu à minimiser ces paramètres en un plus petit nombre de regroupement adimensionnel ci-dessous.

I.6.1. Le nombre de Reynolds :

Le nombre de REYNOLDS est le rapport des forces d'inertie aux forces de viscosité donné par la formule :

$$\text{Re} = \frac{\rho \cdot V \cdot L}{\mu} = \frac{V \cdot L}{\nu} \quad (\text{I.10})$$

ρ : Masse volumique en $[\text{Kg}/\text{m}^3]$.

μ : La viscosité dynamique en $[\text{Kg}/\text{m s}]$.

ν : Viscosité cinématique en $[\text{m}^2/\text{s}]$.

V : Vitesse moyenne du fluide en $[\text{m}/\text{s}]$.

L : longueur caractéristique en $[\text{m}]$.

I.6.2. Le nombre de Prandtl :

C'est le rapport de la diffusivité de la matière à la diffusivité thermique donner par :

$$\text{Pr} = \frac{\mu C_p}{\lambda} \quad (\text{I.11})$$

C_p : Chaleur massique en $[\text{J} / \text{kg}^\circ\text{K}]$

λ : Conductivité thermique en $[\text{W} / \text{m}^\circ\text{K}]$

I.6.3. Le nombre de Peclet :

C'est le rapport de transfert de chaleur par convection au transfert de chaleur par conduction donner par :

$$\text{Pe} = \text{Re} \cdot \text{Pr} \quad (\text{I.12})$$

I.6.4. Le nombre de Nusselt :

Il représente la quantité de chaleur échangée par la convection à la quantité de chaleur par conduction.

$$\text{Nu} = \frac{h.L}{\lambda} \quad (\text{I.13})$$

λ : Le coefficient d'échange convectif en [w/m²k] [3].

I.7. Echangeurs de chaleurs :

I.7.1. Définition :

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.

Les fluides, chauffant et chauffé sont des fluides caloporteurs.

Le fluide caloporteur est un fluide à l'état liquide qui est utilisé sans changement de phase pour le transfert d'un lieu à un autre une certaine quantité de chaleur générée par des moyens étranges. Il est caractérisé par sa chaleur massique C_p . étant donné que la puissance d'échange thermique Q est proportionnelle à la chaleur massique. Ce qui implique le choix de l'eau : [12].

$$C_{\text{P}_{\text{eau}}} = 1\text{Kcal.Kg}^{-1}.\text{°K}^{-1} ; C_{\text{P}_{\text{air}}} = 0.25\text{Kcal.Kg}^{-1}.\text{°K}^{-1}$$

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. La majorité des échangeurs existant fonctionnent à une température à 600 °C [13].

Etant donné que la majorité des échangeurs de chaleur utilisée sont à surface d'échange c-à-d les deux fluides sont séparés par une paroi , ces deux fluides peuvent être soit deux liquides, soit deux gaz ou vapeurs, soit un liquide et un gaz en outre, l'échange de chaleur dans l'appareil sont s'effectuer soit sans changement d'état (l'appareil est alors un simple échangeur), soit avec changement d'état (l'appareil est alors selon le cas, un condenseur ou un évaporateur ou un cristallisateur) aussi bouilleurs, en absence de la paroi séparatrice, il y a mélange direct entre les deux fluides (échangeur mélangeur).dans ce cas, les deux fluides sont de la même nature ou non miscible.

Un échangeur est rarement constitué d'un seul tube, en général, on a une multitude d'éléments (un ensemble de tubes ou de plaques, etc. ...) [2,13].

I.7.2. Principe de fonctionnement :

Dans un changeur, la chaleur est transmise d'un fluide à un autre. Le même fluide peut être conservé son état physique (liquide ou gazeux) ou se présenter successivement sous les deux phases (cas des condenseurs et des vaporiseurs) [8].

I.7.3. Types de contact :**I.7.3.1. 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.

Exemples :

- les réchauffeurs d'eau (injection de vapeur d'eau sous pression).
- les dés réchauffeurs industriels et les condenseurs à injection (centrale thermique).

I.7.3.2. Échangeurs à contact indirect :

En principe, pour les échangeurs les plus répandus dans l'industrie, 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 cédée au fluide 2 par convection le long de l'autre face.

Les processus de transfert présentent une réciprocity convection (1) conduction (paroi), convection (2). 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 T_1 et T_2 des fluides [8].

I.7.4. Disposition des écoulements :

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

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

Ou bien les vectrices vitesses des écoulements sont approximativement parallèles :

S'ils sont de même sens les écoulements sont « Co-courants ».

S'ils sont de sens contraire, les écoulements sont « à contre-courant ».

Ou bien les vecteurs vitesses sont en moyenne perpendiculaire l'un à l'autre ; il s'agit cette fois de « courant croisés » [14].

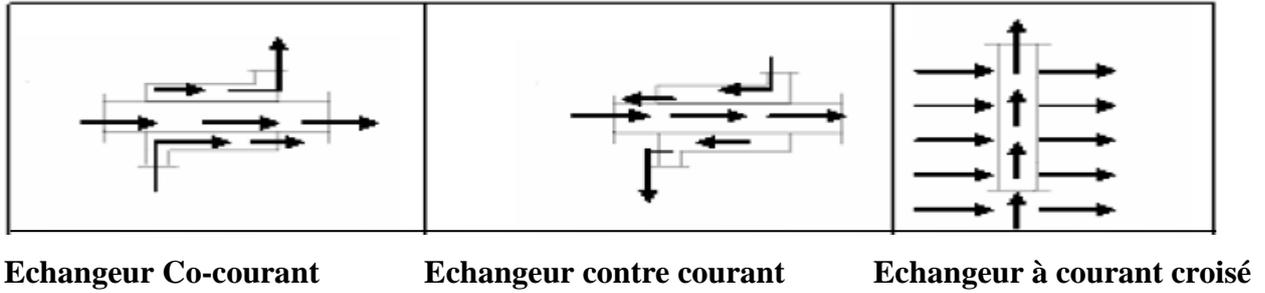


Figure I.1. Différent mode de circulation.

I.7.5. Distribution des températures :

Les températures des fluides pendant leur traversée longitudinale de l'échangeur, à moins que l'un des fluides ne subisse un changement de phase, auquel cas sa température reste constante. Les figures donnent l'allure de quelques distributions de températures des échangeurs très simple. On a porté en abscisses l'aire de la surface d'échange, variant depuis zéro, à l'entrée de l'appareil (extrémité où rentre le fluide chaud), jusqu'à sa valeur totale s , à la sortie du fluide chaud. Les températures sont repérées à l'aide d'indices e signifiant entrée et s sortie, c désignent le fluide chaud et f fluide froid [2].

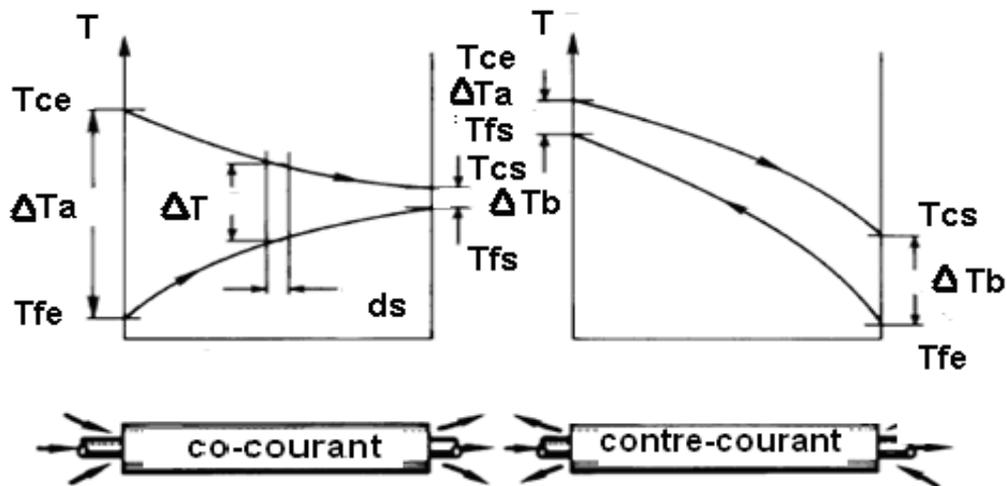


Figure I.2. Distribution des températures dans des échangeurs à un seul passage.
(Type double tube).

✓ On remarque on particulier sur ces figures que :

- dans un échangeur à contre courant, la température de sortie du fluide « le plus froid » peut être supérieur à celle de sortie du fluide « le plus chaud », cette disposition étant l'une des plus favorables pour l'échange thermique.

I.8. Différents types d'échange :

Les échangeurs de chaleur sont diphasiques ou monophasique.

I.8.1. Échange 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.

Parmi ces échangeurs on cite les échangeurs : (liquide –liquide, gaz -liquide et gaz –gaz...)

I.8.2. Échange avec changement de phase :

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

1- l'un des fluides se condense alors que l'autre se vaporise. Ces échangeurs sont rencontrés dans les machines frigorifiques installées en cascade. Ces sont les évaporateurs - condenseurs.

2- 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.

3- le fluide primaire se condense en cédant sa chaleur latente au fluide secondaire plus froid, lequel ne subit pas de transformation d'état .A titre d'exemple; ce cas est rencontré dans les condenseurs des machines frigorifiques [13].

I.9. Classification des échangeurs :

Les échangeurs de chaleur peuvent être classés de multiple façons, ainsi dans ce qui suit, on ne cite que les groupes qui nous paraissent importants.

- ✓ *Classification selon leurs procédés de transfert thermique* : selon leurs procédés de transfert, les échangeurs de chaleur sont classés en deux types : à contact direct et à contact indirect.
- ✓ *Classification selon la compacte de surface* : Cette autre classification, arbitraire, se base sur le rapport de l'aire la surface d'échange au volume de l'échangeur et se divise en deux :

Échangeurs compact et non-compact.

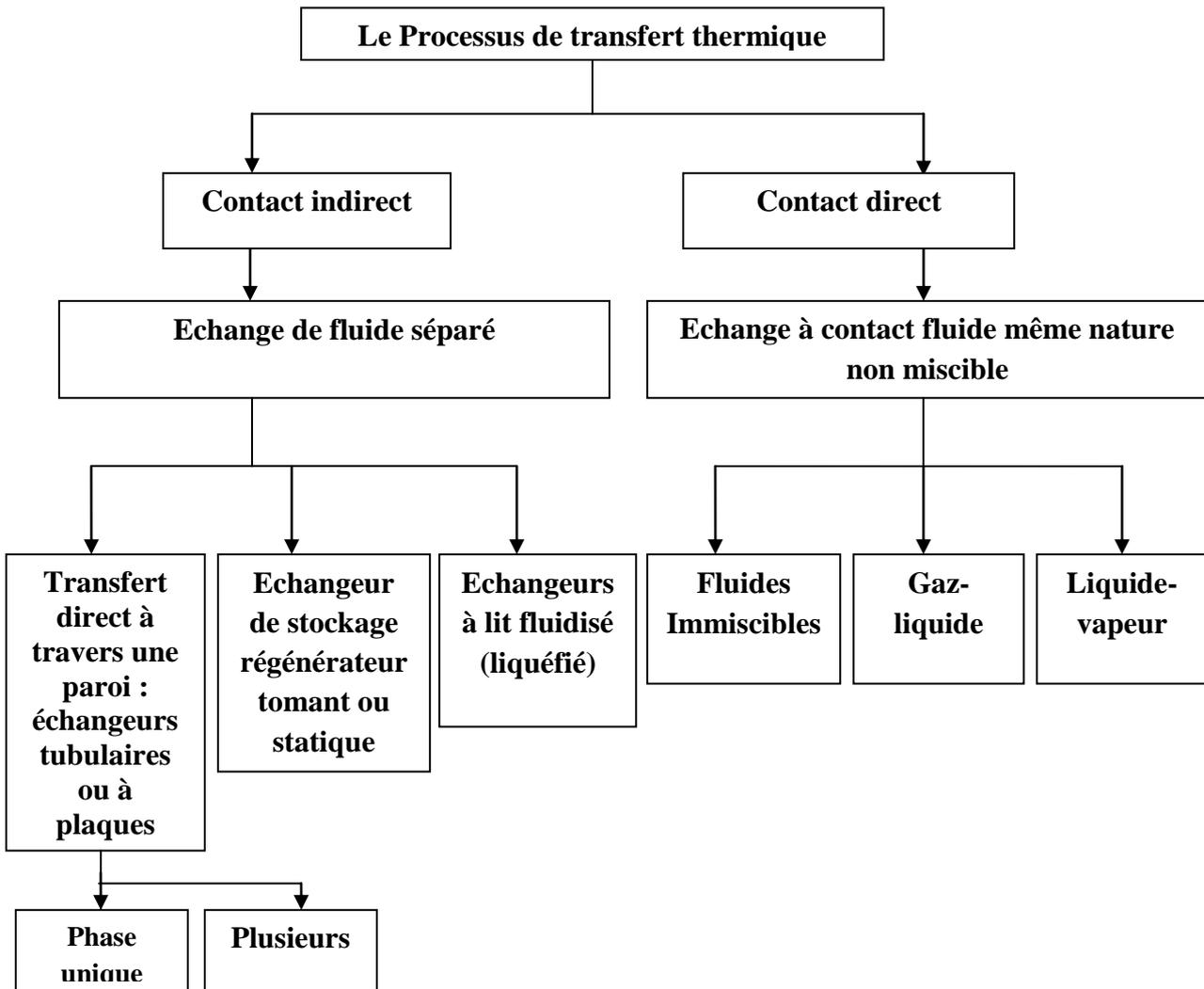
Cette classification est faite parce que la forme physique des échangeurs, les applications et les techniques différent.

- ✓ *Classification selon le nombre de fluide*
- ✓ *Classification selon le sens de l'écoulement*
- ✓ *Classification suivant la construction*
- ✓ *Classification suivant le mécanisme de transfert de chaleur*

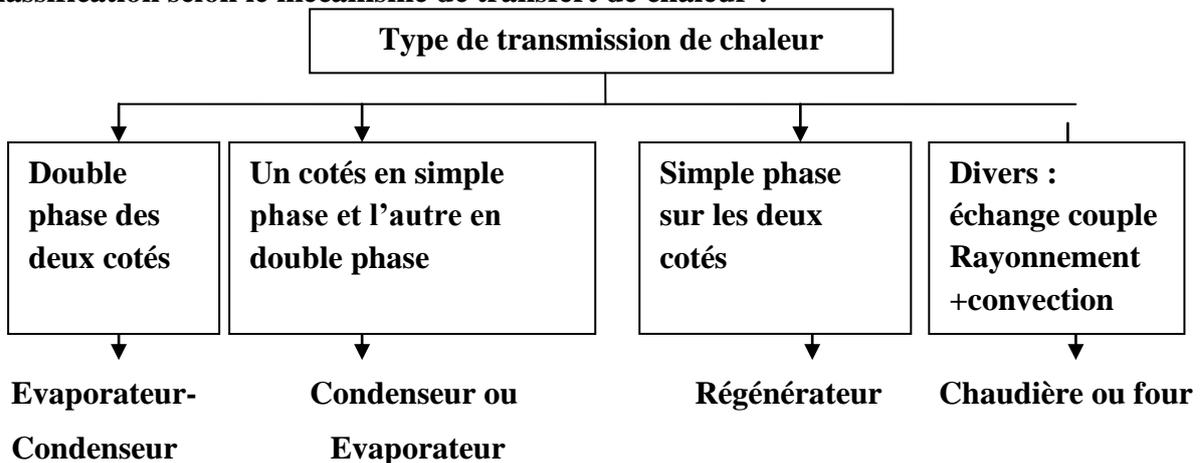
✓ *Classement suivant la nature du matériau de la paroi d'échange* : les échangeurs métalliques : en acier, cuivre, aluminium,...

Les échangeurs non métalliques : en plastique, céramique,...

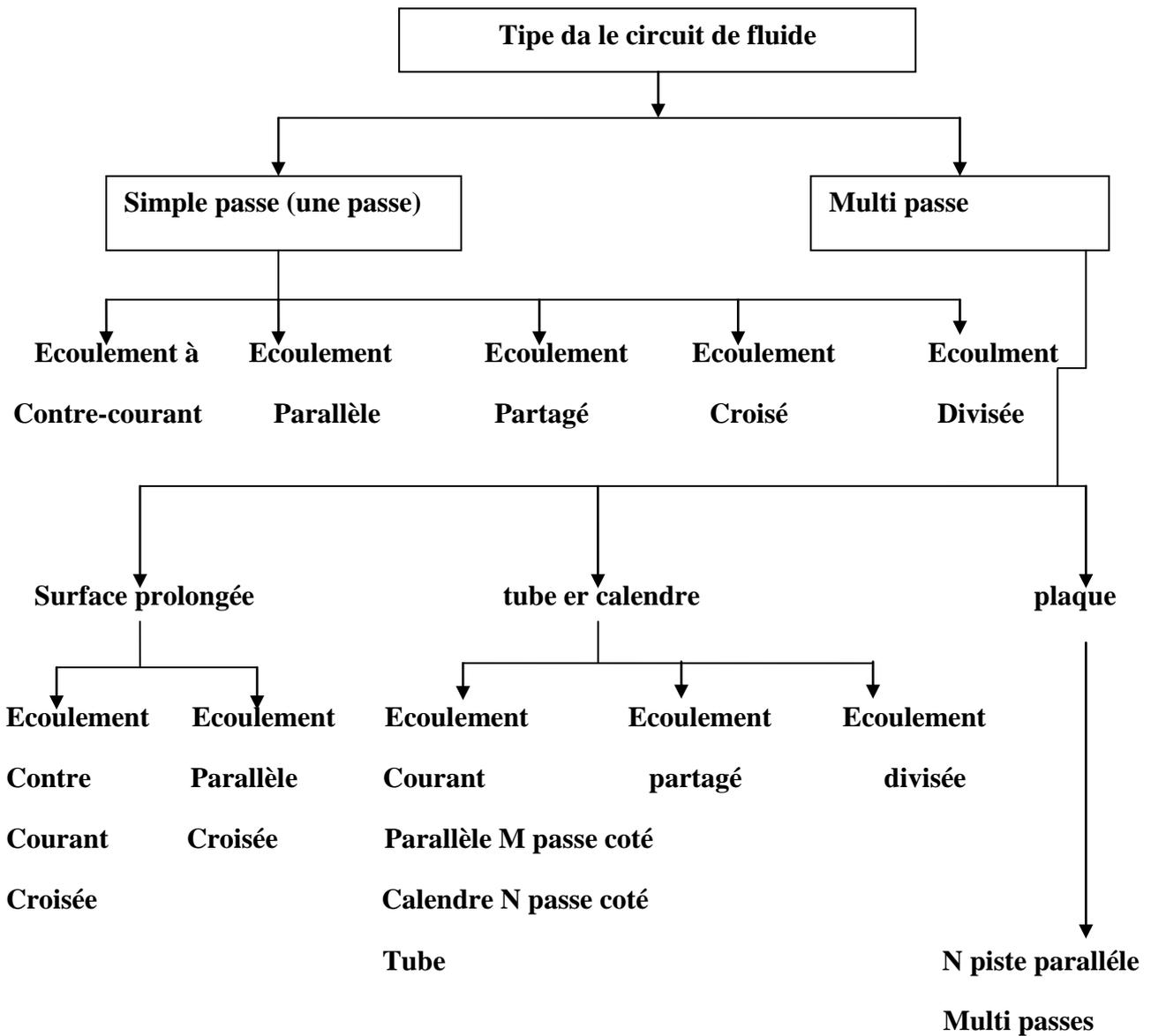
1-Classification suivant le processus de transfert thermique :



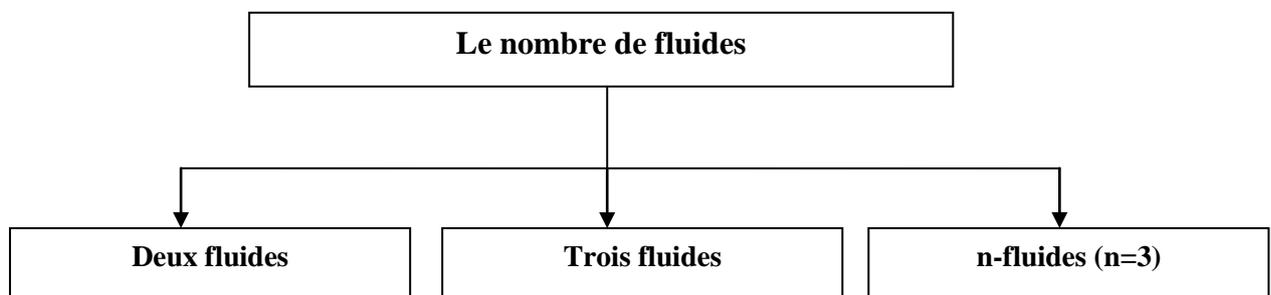
2- Classification selon le mécanisme de transfert de chaleur :



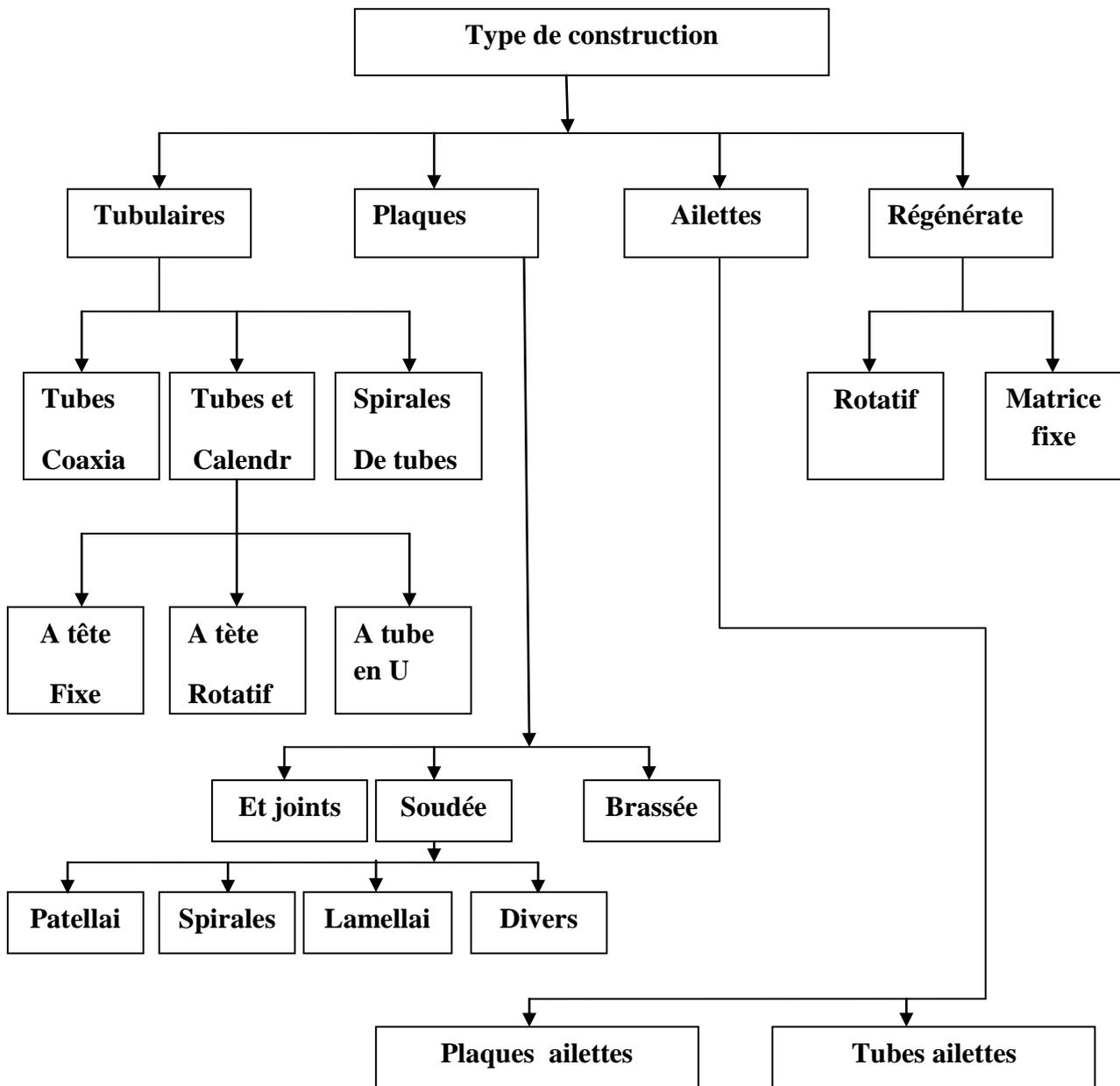
3-Classification selon le mode de transfert



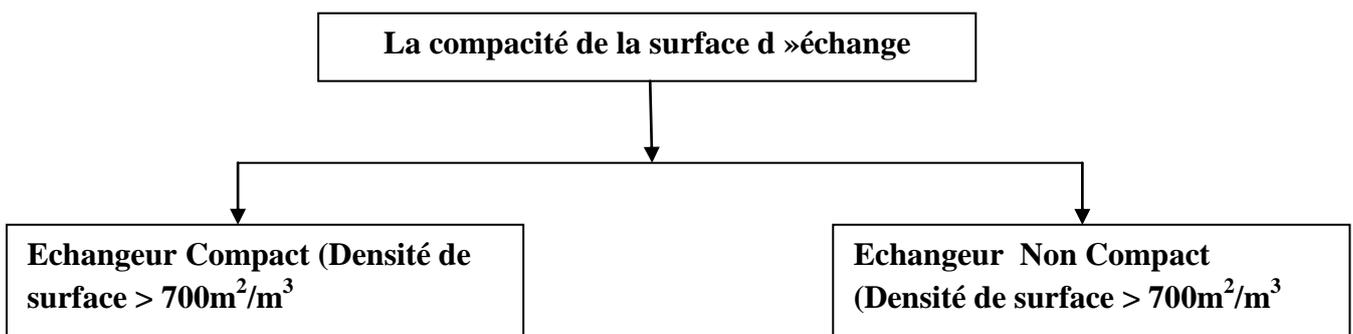
4-Classification selon le nombre de fluide :

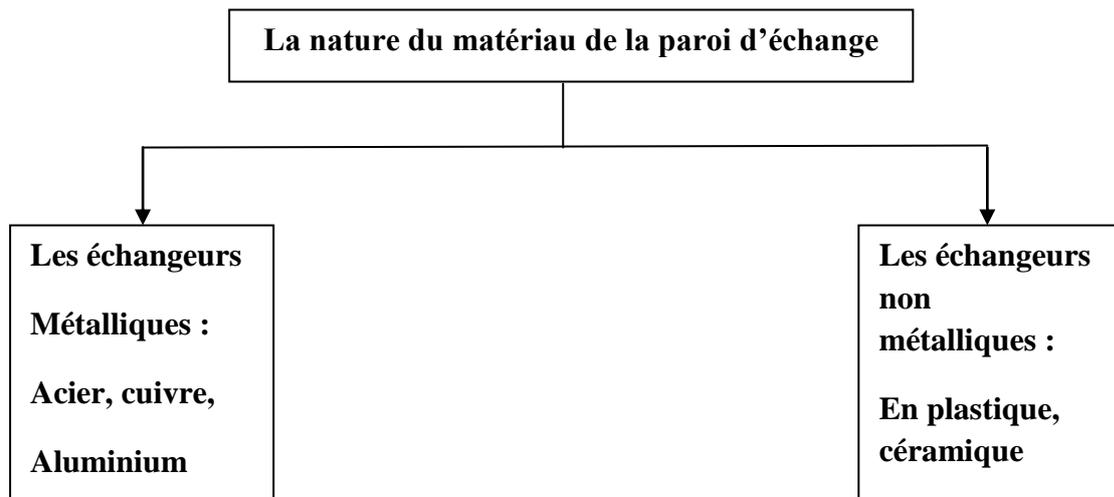


5-Classification selon la construction :



6-Classification selon la capacité de la surface d'échange :



7-Classement suivant la nature du matériau de la paroi d'échange :

Les Figures I.3 Classifications des échangeurs [13, 17].

I.10. Matériaux applicables aux échangeurs de chaleur :

On fabrique les échangeurs de chaleur en matière extrêmement nombreuse. Le choix de matériaux pour les différentes pièces de l'échangeur dépend surtout des conditions de service (température, pression, degré de corrosivité du milieu).

La température de service des échangeurs de chaleur se trouve couramment dans les limites d'utilisation des aciers au carbone (de -30° à 475°C) [18].

Les matériaux employés pour la réalisation des tubes sont le plus souvent métalliques (acier, laiton). Les céramique se développent dans les échangeurs où transitent des fluides à haute température. Les tubes en plastique (généralement de très petit diamètre) sont également utilisés, sont en faisceaux, soit intégrés dans des plaques minces qui leur servent de raidisseurs [19].

I.10.1. Aspects structurels dans la conception des échangeurs :

Sans entrer dans des considérations trop technologiques, on doit néanmoins citer les deux structures essentielles qui sont à la base de la conception des échangeurs : Structure « à modules » et Structure « à passe ».

- a) **Échangeurs à modules :** Un échangeur à modules est constitué de plusieurs cellules élémentaires identiques, et il se caractérise donc par une périodicité géométrique. On peut alors se limiter à l'étude d'une seule cellule, l'assemblage de plusieurs modules permettant de reconstituer tout l'appareil. Parmi les principaux modèles d'échangeurs modulaires,

citons les appareils à méandres, les appareils à faisceau de tubes et chicanes, les appareils à spirales et échangeurs à plaques.

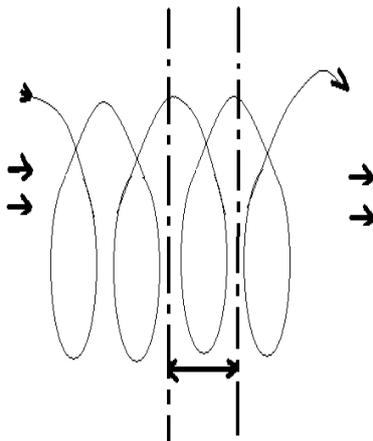
- b) **Échangeurs à passes** : On désigne par « passe » une traversée de l'échangeur par l'un des fluides .parmi les échangeurs à passe, la famille la plus représentative regroupe les modèles de type P-N. Ce sont en général des appareils à faisceau de tubes et calandre, dans lesquels chacun des deux fluides traverse une ou plusieurs fois le volume d'échange.

Le fluide qui circule dans la calandre (donc à l'intérieur des tubes) passe P fois dans le volume d'échange, et le fluide contenu dans les tubes traverse N fois (c'est-à-dire qu'il effectue N/2 allers-retours).on dit que l'échangeur est à P passes coté calandre et à N passes coté tubes.

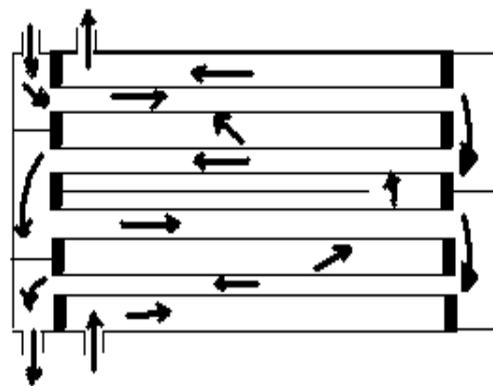
Dans le modèle P-N le plus courant est l'échangeur 1-N : le fluide situé coté calandre ne traverse celle-ci qu'une fois, tandis que le fluide qui circule dans les tubes la traverse N fois.

La notion de passe s'applique également à d'autres modèles. Et on particulier aux échangeurs à plaques dans lesquels on rencontre des configurations mono passes (avec distribution en U ou en Z, ou multi passes .du point de vue thermique, on notera que la distribution en U est meilleure que la distribution en Z.

La distribution entre passes et modules est parfois un peu subtile, mais ces deux notions sont cependant bien utiles pour simplifier certains calculs. On peut dire que échangeurs modulaires et échangeurs P-N relèvent la priori de conception différentes .un échangeur à modules peut être de type P-N mais cela n'a rien de systématique. Inversement, un échangeur P-N n'est pas forcément constitué de modules identiques .parfois, il peut y avoir recouvrement entre passe et module [14].



Échangeur à tube en spirale
(M : module).



échangeur P-N
P=2, N=4 (d'après A.Bouvenot).

Figure I.4. Deux exemples simples pour les deux notions.

I.11. Synthèse des échangeurs :

En préalable à l'exposé des méthodes de calcul, il est indispensable de présenter les principales dispositions géométriques qui sont retenues dans la réalisation des échangeurs, car elles conditionnent évidemment la nature des écoulements et le calcul des transferts thermiques [14].

Dans notre étude on ne considère que les échangeurs à fluides séparés ou le transfert de chaleur s'effectue à travers une paroi matérielle. Ce qui exclut donc les échangeurs à « contact direct ». Dans ces appareils dominent deux grandes familles : les échangeurs tubulaires et les échangeurs à plaques [14].

I.11.1. Les échangeurs tubulaires :

Comme leur nom l'indique, Les échangeurs tubulaires sont constitués de tubes dont la paroi forme la surface d'échange. Ils comportent soit un tube unique (serpentin), soit deux tubes coaxiaux (échangeurs bitubes ou concentrique), soit un faisceau de tubes (échangeur multitubulaire) ; ce dernier type existe sous quatre formes :

- ✓ échangeurs à tubes séparés
- ✓ échangeurs à tubes rapprochés
- ✓ échangeurs à tubes ailettes
- ✓ échangeurs à tubes calandre (faisceau de tubes enfermé dans une enveloppe appelée calandre).

En ce qui concerne les échangeurs à faisceau de tubes et calandre, on peut citer parmi les dispositions les plus courantes le faisceau rectiligne, et le faisceau en U, ce dernier mieux adapté aux forts gradients de température puisqu'il permet une libre dilatation des tubes.

Il n'y a pas de règles générales pour fixer la disposition relative des circuits chauds et froids. On fera plutôt circuler le fluide chaud dans les tubes si on veut limiter les déperditions thermiques ; de même la circulation en tubes sera recommandée s'il s'agit d'un fluide agressif [14].

- **Utilisation des échangeurs tubulaires :** un des modèles les plus simple d'échangeur que l'on puisse imaginer est constitué de deux tubes coaxiaux .l'un des fluides s'écoulent dans le tube central et l'autre dans l'espace annulaire, les deux fluides pouvant circuler dans le même sens ou en sens contraire. Il est difficile d'obtenir des surfaces d'échange importantes avec cette configuration, même en soudant les tubes, sans aboutir à des appareils très encombrants. Aussi préfère-t-on disposer un faisceau de tubes dans une enveloppe unique, généralement cylindrique appelé calandre, l'un des fluides circulant dans les tubes et l'autre à l'intérieur de la calandre autour des tubes.

Dans ce genre d'échangeur, des chicanes de formes variées disposées surtout perpendiculairement à l'axe de la calandre rendent le parcours du fluide qui la traverse plus long et sinueux, elles favorisent la turbulence, ce qui a pour effet d'améliorer les échanges (mais aussi malheureusement d'augmenter les pertes de charge).

Ce genre de disposition est la plus utilisée pour les échangeurs liquide -liquide .La compacité maximum (surface d'échange par mètre cube) obtenue avec cette configuration est de l'ordre de $500\text{m}^2/\text{m}^3$ [2].

I.11.2. Les échangeurs à plaques :

Les échangeurs de la deuxième famille sont constitués par un empilement de plaques garnies de joints d'étanchéité à leur périphérie ; les fluides s'écoulent entre ces plaques dans des canaux plats où la circulation peut être soit diagonale soit latérale .il y a évidemment alternance du fluide froid et du fluide chaud d'un canal au suivant .globalement, la distribution des fluides entre les différents canaux se fait en U, en Z. [18]

Les plaques peuvent être lisses ou corrigées (ondulées ou à cannelures en chevrons) afin d'intensifier l'échange de chaleur par l'augmentation de la turbulence et de la surface d'échange .La pression d'utilisation des échangeurs à plaques et joints est inférieure à 20 bars. La température usuelle maximale ne doit pas dépasser 250°C [13].

Les échangeurs à plaques se présentent sous diverses formes :

- ✓ les échangeurs à plaques hélicoïdales.
- ✓ les échangeurs à plaques planes.
- ✓ les échangeurs à plaques munies d'ailettes.
- ✓ les échangeurs à tubes munis d'ailettes.

Dans tous ces échangeurs, les surfaces d'échange sont très supérieures à celles des échangeurs à faisceau et calandre, pour un encombrement géométrique donné. En outre, les écoulements secondaires et les pertes de charge correspondantes sont éliminés ainsi que les problèmes de court circuit et de dilatation différentielle. Cependant leur réalisation est beaucoup plus délicate et onéreuse et ils ne sont généralement utilisés que pour des échanges ne nécessitant pas en valeur absolue de très grandes surfaces d'échange [18].

Utilisation des échangeurs à plaques : elles sont très utilisées pour certaines applications liquide - liquide (on particulier dans les industries alimentaires) dans le cas des échangeurs gaz -liquide ou gaz -gaz, la faible densité des gaz impose, si l'on veut rester à un niveau acceptable de perte de

charge, que l'on réduise la vitesse de passage des gaz relativement à celles pratiquées pour les liquides.

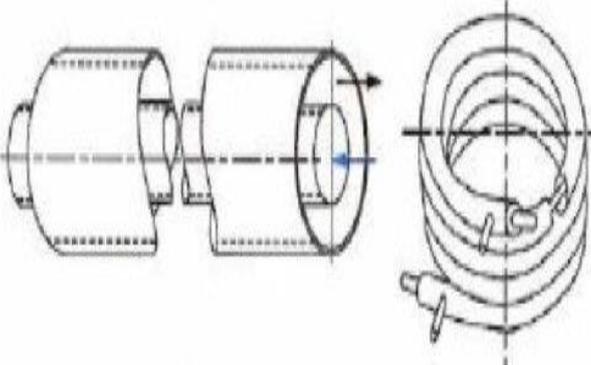
Réduire la vitesse c'est aussi réduire le coefficient de convection fluide -paroi, ce qui nécessite, à volume égal, une augmentation de la surface d'échange.

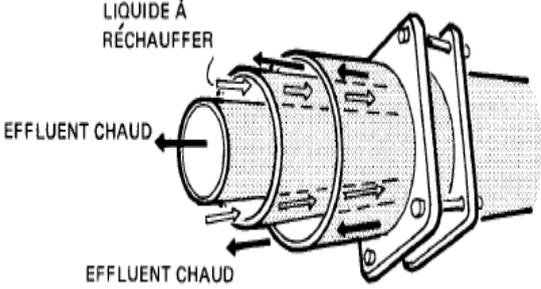
Pour les échangeurs gaz -gaz les surfaces d'échanges adoptées sont très souvent constituées de plaques planes séparées par des ailettes braisées sur celle-ci les deux fluides circulant alternativement entre les plaques .les ailettes permettent d'augmenter la surface d'échange et aussi, par leur disposition en quiconque de crée des interruptions dans les écoulements favorisant la turbulence et améliorant de ce fait les échanges thermiques.

Dans les échangeurs gaz -liquide, il y a nécessité d'obtenir une surface d'échange ayant des étendues différentes au contact des deux fluides. C'est la raison pour laquelle on utilise des batteries de tubes à ailettes ou des radiateurs dans l'automobile [2].

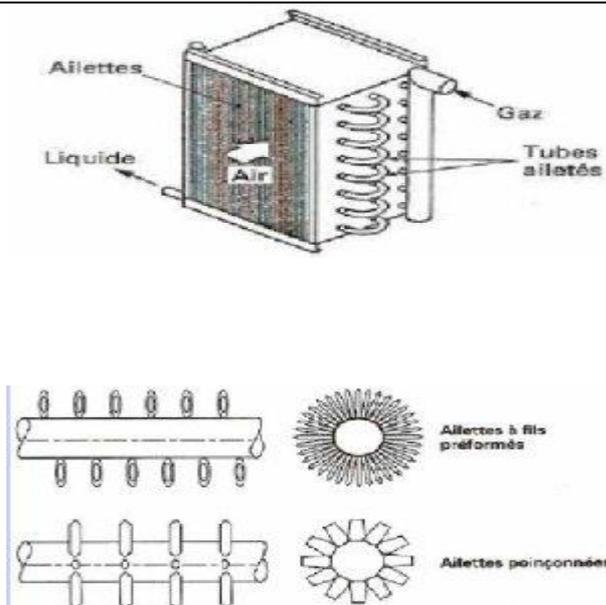
I.12. Technologie usuelle des échangeurs de chaleur :

Voici une brève description des types d'échangeurs thermiques les plus communément utilisés :

La catégorie	Le type	Les caractéristiques
<p style="text-align: center;">Tubulaire</p> <p style="text-align: center;">↓</p> <p>→ mono tubulaire. → bitube. → faisceaux de tubes.</p>	 <p style="text-align: center;">Echangeur mono tubulaire</p>	<p>Echangeurs à tube unique ; il est placé à l'intérieur d'un réservoir, généralement, prend la forme d'un serpent</p>

<p>Echangeur bitube (tube coaxiaux ou double</p>		<p>L'échangeur à deux tubes coaxiaux est le plus simple des échangeurs (à simple passe).</p> <p>Le premier fluide s'écoule dans le tube intérieur tandis que l'autre s'écoule dans l'espace annulaire compris entre les deux tubes. Ces appareils sont intéressants pour les facilités qu'ils offrent</p>
--	---	---

	<p>enveloppe, concentrique).</p>	<p>pour le démontage et l'entretien. Ils peuvent fonctionner en contre courant pur, ce qui permet d'obtenir de bons rendements. Par contre, ils présentent les inconvénients suivants : risque de fuites aux raccords – flexion du tube intérieur si la longueur est importante surface d'échange faible. Cet échangeur convient aux produits sales, pour des débits faibles, des températures et des pressions élevées pour les liquides visqueux</p>
	<div data-bbox="279 862 790 1243" data-label="Image"> </div> <p data-bbox="351 1377 734 1422">Echangeur a tube et calandre.</p>	<p>Echangeur à multi passe, peut assimiler à une superposition de plusieurs échangeurs à double tube il comporte un faisceau de tubes enfermé dans une enveloppe cylindrique appelée « calandre ». Un des fluides coule à travers les tubes et l'autre à travers l'enveloppe au-dessus du faisceau de tubes. l'implantation des chicanes permet d'irriguer mieux tous les tubes. Le nettoyage de l'échangeur s'en trouve facilité, bien que les tubes eux-mêmes demeurent difficiles à nettoyer. Quelques-unes des applications possibles sont le chauffage de l'eau, les condenseurs, les rebouilleurs et les fours multitubulaires. Il sert le plus souvent dans des opérations ne s'appliquant pas directement à un produit alimentaire car l'enveloppe et les tubes peuvent être difficiles à inspecter.</p>

 <p>Échangeurs thermiques à ailettes.</p>	<p>C'est un échangeur à type échanges gaz liquide, il est constitué d'un faisceau de tubes dans lequel circule le liquide à réchauffer et au-dessus duquel s'écoulent des gaz d'échappement caloporteurs. Des ailettes fixées aux tubes augmentent la surface d'échange. Il sert à chauffer l'eau à toutes sortes de fins, (l'eau d'alimentation des chaudières ou l'eau de nettoyage).</p>
--	---

Tableaux I.1. Description des types d'échangeurs thermiques les plus communément utilisés.