

Introduction générale	1
Chapitre I : Méthode de calcul des performances dans les échangeurs	
I.1 Introduction.....	2
I.2 Méthode de la différence logarithmique des températures.....	2
1.2.1 Echangeur co-courant.....	2
1.2.2 Echangeur contre-courant.....	5
I.3 Méthode du nombre d'Unité de Transfert (NUT).....	8
I.3.1 Cas de l'échangeur co-courant.....	8
I.3.2 Cas de l'échangeur contre-courant.....	9
I.4 Conclusions.....	11
Chapitre II :Les matériaux à changement de phase	
II.1 Introduction.....	13
II.2 Le stockage de la chaleur.....	13
II.2.1 Stockage par chaleur sensible.....	13
II.2.2 Stockage par chaleur latente.....	14
II.3 Les matériaux à changement de phase (MCP).....	15
II.3.1 Les MCP organiques.....	15
II.3.1.1 Les paraffines.....	16
II.3.1.1.1 Différentes cires paraffiniques.....	17
II.3.1.1.2 Les propriétés physiques de quelques paraffines.....	17
II.3.1.2 Les composés organiques non-paraffiniques.....	18
II.3.1.2.1 Acides gras.....	18
II.3.1.2.2 Les caractéristiques des acides gras les plus courants.....	18

SOMMAIRE

II.3.1.3 Les avantages et les inconvénients du MCP organique.....	18
II.3.2 Les MCP inorganiques.....	19
II.3.2.1 Les hydrates salins.....	19
II.3.2.2 Différents hydrates salins.....	19
II.3.2.3 Les avantages et les inconvénients du MCP inorganique.....	19
II.3.3 Les MCP eutectiques.....	20
II.3.3.1 Les avantages et les inconvénients des MCP eutectiques.....	20
II.4 Choix d'un MCP.....	21
II.5 Méthodes de conditionnement des MCP dans les applications de stockage thermique.....	21
II.5.1 Macro encapsulation.....	21
II.5.2 Micro encapsulation.....	22
II.5.3 Incorporation des structures métalliques aux MCP.....	23
Chapitre III : Quelques types d'échangeurs avec MCP	
III.1 Introduction.....	24
III.2 Quelques types d'échangeurs de chaleur contenant des matériaux à Changement de phase.....	24
III.2.1 Echangeur tube-calandre contenant MCP.....	24
III.2.1.1 Description de l'échangeur.....	24
III.2.1.2 Description du MCP.....	26
III.2.2 Echangeur air-matériaux à changement de phase.....	27
III.2.2.1 Description de l'échangeur.....	27
III.2.2.2 Caractérisation des MCP utilisés.....	28
III.2.3 Echangeurs de chaleur air/ MCP.....	28
III.2.3.1 Description de l'échangeur.....	28

SOMMAIRE

III.2.3.2 Caractérisation des MCP utilisés.....	29
III.2.4 Echangeur-stockeur pour le rafraichissement de l'air.....	30
III.2.4.1 Description de l'échangeur.....	30
III.2.4.2 Caractérisation des MCP utilisés.....	30
Chapitre IV : Description de l'échangeur stockeur et le MCP utilisé	
IV.1 Introduction.....	31
IV.2 Description de l'échangeur.....	31
IV.2.1 Choix du matériau.....	32
IV.2.2 Les différentes opérations de fabrication de l'échangeur.....	32
IV.2.2.1 Fabrication des pièces de l'échangeur.....	33
IV.2.2.2 Fabrication des ailettes.....	33
IV.2.2.3 Assemblage des pièces par soudage.....	35
IV.2.2.4 La fixation des tubes de l'échangeur.....	36
IV.2.2.5 Méthode d'introduction des pastilles de MCP.....	36
IV.2.2.6 Réalisation des collecteurs d'admission et de sortie du fluide Caloporteur.....	36
IV.2.2.7 Réalisation du circuit aéraulique.....	38
IV.3 Description du composite.....	38
IV.3.1 Les matériaux utilisés.....	39
IV.3.1.1 Le MCP (la parafine).....	39
IV.3.1.2 La perlite expansée.....	40
IV.3.1.3 Le graphite.....	40
IV.3.1.3 Le graphite (suite).....	41
Chapitre V :	

SOMMAIRE

V.1 Introduction.....	42
V.2 Les appareils de mesure utilisés.....	42
V.2.1 Le thermocouple type K (picolog).....	42
V.2.1.1 Mode d'utilisation du logiciel picolog recorder.....	42
V.2.2 Hygromètre (testo 445).....	45
V.3 Technique de mesure du débit d'air.....	45
V.4 L'étalonnage.....	46
V.4.1 L'étalonnage du thermocouple.....	47
V.5 La description du montage expérimental.....	49
V.6 La méthode d'installation des thermocouples.....	50
V.7 Description de la méthode expérimentale.....	51
Chapitre VI : les résultats	
Premier essai.....	51
Deuxième essai.....	55
Troisième essai.....	58
Quatrième essai.....	61
Cinquième essai.....	64
Sixième essai.....	67

Conclusion

Liste des figures

Figure I.1: Evolutions des températures le long d'échangeurs à Co-courant.....	3
Figure I.2: Evolutions des températures le long d'échangeurs à contre-courant.....	5
Figure I.3 : Différents type d'échangeurs du commerce, plaques / joints, coaxial et lamellaire.....	7
Figure I.4 : Facteurs de correction à prendre en compte dans le cas : - D'une calandre et un multiple de 2 passes de tubes (à gauche) - De deux calandres et un multiple de 2 passes de tubes (à droite).....	7
Figure I.5 : Facteurs de correction à prendre en compte dans le cas : - D'un échangeur à courants croisés, aucun fluide étant mixé (à gauche) - D'un échangeur à courants croisés, seul un des fluides étant mixé (à droite)...	8
Figure I.6 : Efficacité d'échangeurs de chaleurs, (a) courants parallèles, (b) à contre-courant.....	11
Figure I.7 : Efficacité d'échangeurs de chaleurs à tubes et calandre, (a) une calandre à passages multiples aux tubes (deux, quatre,.....passages) (b) un calandre à passages multiples de quatre à n tubes.....	12
Figure II.1 : Evolution de la température d'un corps pur homogène avec changement d'état.....	15
Figure II.2 : Classification des MCP.....	16
Figure II.3 : Structure chimique des paraffines.....	17
Figure II.4 : Température de fusion des paraffines en fonction du nombre d'atomes de la molécule	17
Figure II.5 : Conditionnement de MCP en nodules.....	23
Figure II.6 : Représente les différents types des microcapsules.....	24
Figure II.7 : Représente la description de la microcapsule.....	24
Figure II.8 : représentation des différents types d'Incorporation des MCP dans des structures Métalliques.....	24
Figure III.1 : Géométries d'échangeurs : a) tube lisse en inox b) faisceau de sept.....	25
Figure III.2 : Géométries d'échangeurs : a) tube lisse en inox b) faisceau de sept tubes avec MCP.....	26

Liste des figures

Figure III.3 : Géométries d'échangeurs : c) tube en acier avec ailettes longitudinales d) tube en acier muni d'ailettes transverses.....	26
Figure III.4 : Géométries d'échangeurs : c) tube en acier avec ailettes longitudinales d) tube en acier muni d'ailettes transverses avec MCP.....	27
Figure III.5 : Echangeur air-matériaux à changement de phase.....	27
Figure III.6 : Schéma d'un élément de stockage d'énergie.....	28
Figure III.10 : Echangeur de chaleur air / MCP.....	29
Figure III.11 : MCP utilisé.....	30
Figure III.12 : Echangeur-stockeur pour le rafraîchissement de l'air.....	30
Figure IV.1 : Echangeur stockeur.....	32
Figure IV.2 : Plaque et tubes de cuivre.....	32
Figure IV.3: Bande et capsule.....	34
Figure IV.4: Dimensions des plaques.....	34
Figure IV.5 : Deux plaques découpées.....	34
Figure IV.6 : Réalisation des empoches avec pliage.....	35
Figure IV.7 : Pièces finales après emboutissage.....	35
Figure IV.8 : Forme finale des pièces après soudage.....	35
Figure IV.9 : Coupe des tubes pour l'échangeur.....	35
Figure IV.10 : Elément de l'échangeur après soudage.....	36
Figure IV.11 : Assemblage avec plaques en bois.....	36
Figure IV.12 : Image de l'échangeur sans collecteur.....	36
Figure IV.13 : Collecteurs d'admission et de sortie.....	37
Figure IV.14 : Perçage des collecteurs.....	37
Figure IV.15 : Image de l'échangeur avec collecteur.....	37

Liste des figures

Figure IV.16 : Image finale de l'échangeur.....	37
Figure IV.17 : Emboutissage de l'échangeur avec le circuit aéraulique.....	38
Figure IV.18 : Analyse DSC de la paraffine de du composite MCP/Pr, Gr.....	38
Figure IV.19 : Matériaux utilisés.....	39
Figure V.1: Thermocouple type K (picolog).....	41
Figure V.2 : Hygromètre (testo 445).....	44
Figure V.3 : Technique de mesure du débit d'air.....	45
Figure V.4 : Schéma de l'étalonnage du thermocouple.....	46
Figure V.5 : Courbes d'étalonnage des thermocouples.....	46
Figure V.6 : Schéma de principe du montage expérimental.....	47
Figure V.7 : Montage expérimental.....	48
Figure V.8 : Schéma d'installation des thermocouples.....	48

Introduction générale

Le stockage d'énergie est un enjeu vital pour les sociétés humaines ; pour les différents pays, l'indépendance énergétique est stratégique et économiquement essentielle. Pour les individus et les entreprises, l'énergie doit impérativement être disponible à la demande, sans coupure inopinée. Une rupture d'approvisionnement en énergie peut gravement désorganiser l'économie d'une nation et mettre en danger ses fonctions vitales : défense, système de santé ect. Il est donc important de disposer des stocks suffisants pour faire face à une coupure d'approvisionnement, en particulier en cas de crise géopolitique, le premier choc pétrolier de 1973, crée une baisse concertée de livraison de pétrole par les pays de l'OPEP, suscitant une envolée des prix pétroliers, a amené les 16 nations les plus industrialisées à créer l'Agence Internationale de l'Energie, chargée de coordonner leurs politiques énergétiques et de mettre sur pied une économie raisonnée de la ressource.

Le stockage d'énergie répond donc à plusieurs motivations, notamment la compensation de l'irrégularité de la production des énergies dites intermittentes.

Il existe un moyen pour le stockage l'énergie thermique grâce aux matériaux à changement de phase (MCP), ces matériaux ont la particularité de pouvoir stocker de l'énergie sous forme de chaleur latente. La chaleur étant absorbée ou restituée lors du passage de l'état solide à l'état liquide (et vice versa). Cette propriété du matériau est liée à son importante énergie de fusion par unité de volume, plus celle-ci sera grande plus les propriétés de stockage/ restitution de la chaleur seront intéressantes.

Pour le stockage de l'énergie, d'autres changements de phase sont théoriquement envisageable (solide-solide, solide-gaz, liquide-gaz), mais en pratique c'est le passage solide-liquide qui offre le plus d'applications, notons tout de même par exemple l'existence des fluides frigorigènes.

Les matériaux à changement de phase sont utilisés dans divers domaines tels que : l'isolation des bâtiments, la climatisation passive et chauffage d'intersaison, le stockage d'énergie thermique, l'industrie textile, refroidissement et transport des produits alimentaires ou bien des produits sensibles pharmaceutiques ou médicaux, la récupération de la chaleur issue de l'incinération des déchets, diminuer les effets exothermiques de réactions chimiques, énergie solaire, système thermique dans l'aérospatial, le refroidissement du moteur dans l'industrie automobile, ect.

I.1 introduction :

Dans une multitude de procédés industriels, comme dans notre environnement quotidien direct, nous sommes amenés à rencontrer des échangeurs thermiques (radiateurs de refroidissement des véhicules à combustion, évaporateurs et condenseurs de réfrigérateurs ménagers,...). Ces organes ont pour rôle de transférer de la chaleur entre deux fluides. Selon qu'il y ait ou non la présence d'une paroi séparant ces deux milieux, on distingue les échangeurs :

1. A fluides séparés (eau et air dans le cas d'un radiateur de chauffage central par exemple)
2. A contact direct (tour de refroidissement par exemple)

Dans ce chapitre, nous verrons dans les cas de configurations les plus simples, quels sont les principes de fonctionnement et les lois caractéristiques du comportement de ces appareils et nous verrons à travers d'une présentation non exhaustive des modèles et des configurations géométriques d'échangeurs que l'on peut rencontrer, enfin comment étendre et appliquer les méthodes mises en œuvre afin d'en évaluer les performances.

I.2 : méthode de la différence logarithmique des températures.[1]

Nous allons poser dans ce qui suit, certaines hypothèses :

1. Le régime est permanent : toutes les variables et tous les paramètres sont constants par rapport au temps $\frac{d}{dt} = 0$.
2. L'échangeur est adiabatique : il n'échange pas de chaleur avec l'extérieur.
3. Les propriétés thermo-physiques des fluides restent constantes dans les intervalles de températures envisagés.
4. Les températures ne varient que dans la seule direction de l'écoulement, le problème est monodimensionnel.
5. Il n'y a pas de pertes de charge au cours de l'écoulement.

I.2.1 : échangeur co-courant.

Dans ce type d'échangeur, que l'on dénomme aussi à courants parallèles, les deux fluides circulent dans le même sens, comme schématisé dans la figure I.1.

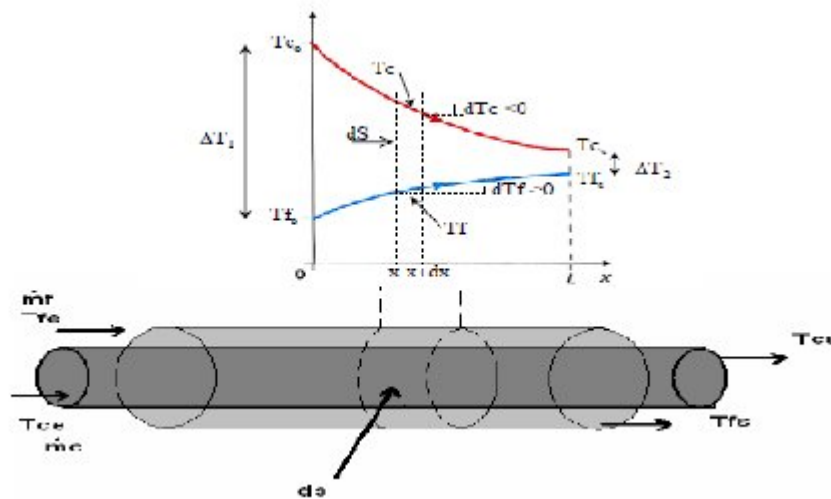


Figure I.1: Evolution des températures le long de l'échangeur à Co-courant [2]

Sont supposés connus :

1. Les débits des fluides chaud et froid \dot{m}_c et \dot{m}_f .
2. Les températures d'entrée des fluides chaud et froid T_{c0} et T_{fe} .
3. Le coefficient d'échange global U .

L'objectif est alors de déterminer les performances de l'échangeur, c'est à dire de calculer :

1. Les températures de sortie des fluides chaud et froid T_{c1} et T_{fc} .
2. Le flux de chaleur échangé ϕ .
3. L'éventuelle répartition spatiale des températures de fluides chaud $T_c(x)$, et froid $T_f(x)$ le long de l'échangeur.

Compte tenu des hypothèses énoncées plus haut, l'application du premier principe de la thermodynamique à la tranche de fluide chaud d'épaisseur dx échangeant la quantité de chaleur élémentaire $d\phi$ conduit à

$$-\dot{m}_c dh_c = d\phi + \dot{m}_c [h_c(x+dx) - h_c(x)]$$

Où h_c représente l'enthalpie massique spécifique du fluide chaud et dh_c la variation de son énergie interne au cours du temps.

Si cette enthalpie varie avec la température selon $dh_c = c_{p,c} dt_c$, où $c_{p,c}$ représente la capacité calorifique à pression constante du fluide chaud et si on considère que le régime est établi, alors l'expression du bilan précédent devient :

$$-\dot{m}_c c_{p,c} dt_c = d\phi + \dot{m}_c [h_c(x+dx) - h_c(x)], \text{ soit encore : } d\phi = -\dot{m}_c c_{p,c} dt_c$$

Le même raisonnement assortit des mêmes hypothèses concernant le fluide froid conduit alors à : $d\phi = \dots$

Or, les deux quantités $d\phi$ et $d\phi$ sont égales et de signes opposées, si bien que l'on peut convenir de la définition pour le flux échangé par les fluides : $d\phi = -d\phi = \phi > 0$

Compte tenu de l'expression du flux élémentaire, le système d'équations à résoudre devient :

$$\begin{aligned} \phi &= - \dots \\ \phi &= \dots \\ \phi &= \dots \quad (\dots) \end{aligned}$$

De ces équations, il vient : $\dots = - \frac{\phi}{\dots}$ et $\dots = \frac{\phi}{\dots}$, combinées par suite, elles

conduisent à : $\dots - \dots = - \phi \frac{\dots}{\dots} + \frac{\dots}{\dots}$

La substitution de cette expression du flux dans cette dernière équation permet alors d'obtenir l'équation différentielle vérifiée par l'évolution de l'écart de température \dots avec la surface S :

$$\dots = - \dots - \frac{\dots}{\dots} + \frac{\dots}{\dots}$$

Soit encore, sous une forme plus habituelle :

$$\frac{\dots}{\dots} = - \frac{\dots}{\dots} + \frac{\dots}{\dots}$$

Si on suppose que le coefficient d'échange U et les deux capacités calorifiques \dots et \dots demeurent constantes le long de l'échangeur, on peut intégrer l'équation suivante de 0 à x pour obtenir :

$$\frac{\dots}{\dots} = \ln \frac{(\dots) - (\dots)}{\dots} = - \frac{\dots}{\dots} + \frac{\dots}{\dots} \quad ()$$

Soit encore :

$$\frac{(\dots) - (\dots)}{\dots} = \frac{\dots}{\dots} \quad ()$$

Cette équation montre que l'écart de température entre les deux fluides suit une évolution exponentielle décroissante de l'aire d'échange S(x). et tend d'ailleurs vers 0 lorsque $S \rightarrow \infty$, Propriété à priori évidente.

L'équation étant valable quel que soit x, elle l'est donc pour la valeur particulière à la sortie de l'échangeur $x=L$ et pour laquelle $(T_c) = (T_f) = T_m$, $(S) = S$ (surface totale), $\phi = - \dot{m}_c (T_c - T_{c0})$ et $\phi = \dot{m}_f (T_f - T_{f0})$. On obtient alors l'expression :

$$\frac{-\dot{m}_c (T_c - T_{c0})}{-} = - \frac{\dot{m}_c (T_c - T_{c0})}{-} + \frac{\dot{m}_f (T_f - T_{f0})}{-} = - \frac{\phi}{\phi} [-(T_c - T_{c0}) + (T_f - T_{f0})]$$

$$= \frac{\phi}{\phi} [(T_c - T_{c0}) + (T_f - T_{f0})]$$

Que l'on écrit plus commodément :

$$\phi = \frac{(\dot{m}_c (T_c - T_{c0}) + \dot{m}_f (T_f - T_{f0}))}{\Delta T_m} = \phi \cdot \Delta T_m$$

Où ΔT_m représente la différence de température logarithmique moyenne (ΔT_m) entre les deux fluides. Ainsi, le calcul du flux de chaleur dépend du produit ϕ et de cet écart de température.

I.2.2 Echangeurs contre-courant

Dans ce type d'échangeur, les deux fluides circulent dans des sens contraire, l'entrée de l'un des fluides étant à l'opposé de l'autre. On attribue par exemple l'abscisse $x=0$ à l'entrée du fluide chaud et $x=L$ à celle du fluide froid. Les évolutions des températures chaude et froide peuvent être représentées schématiquement comme dans la figure ci-dessous :

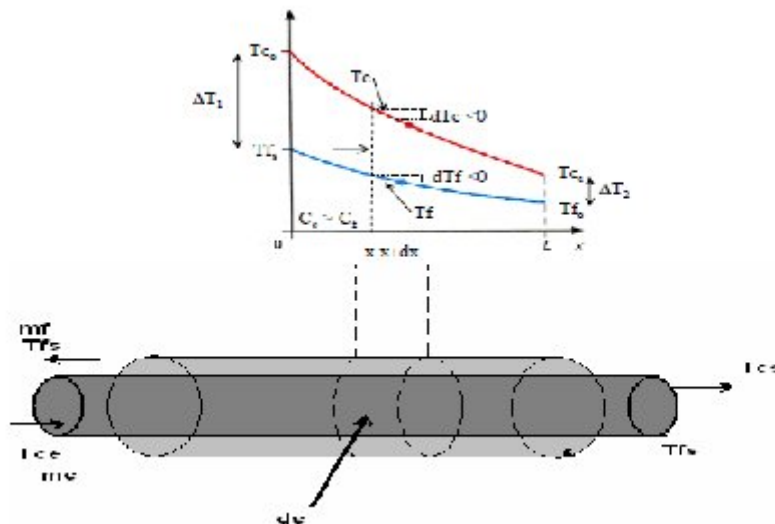


Figure2: Evolutions des températures le long d'échangeurs à contre-courant [2]

En conservant les mêmes hypothèses que lors de l'étude de l'échangeur co-courant et en notant cette fois ci que $\phi = < 0$ (compte tenu du sens de l'écoulement opposé à celui de l'axe des x) on peut écrire :

$$\begin{aligned} \phi &= - \cdot \\ \phi &= - \cdot \\ \phi &= (-) \end{aligned}$$

Une démarche similaire à celle adoptée dans le cas du co-courant conduit alors à :

$$\frac{-}{-} = - \frac{-}{-}$$

Qui après intégration entre les bornes $x=0$ et $x=x$, devient :

$$\frac{() - ()}{-} = \frac{-}{-} ()$$

Lorsque $=$ on a $() =$, $() =$, $() =$ (surface totale), $\phi = - \cdot (-)$ et $\phi = \cdot (-)$. l'expression précédente devient alors :

$$\begin{aligned} \frac{-}{-} &= - \frac{-}{-} = - \frac{1}{\phi} [(-) + (-)] \\ &= \frac{1}{\phi} [(-) + (-)] \end{aligned}$$

Ecrit plus commodément : $\phi = \frac{() ()}{()} = \cdot \Delta$

Il est évident que dans la réalité, les échangeurs du commercialisés sont différents, dans leur conception et leur comportement, des « cas écoles » que nous avons abordés ci-dessus à travers de l'échangeur co-courant et contre-courant .il suffit d'en montrer quelques-uns comme ceux de la figure pour comprendre à quel point ils peuvent être complexes et distincts les uns des autres.

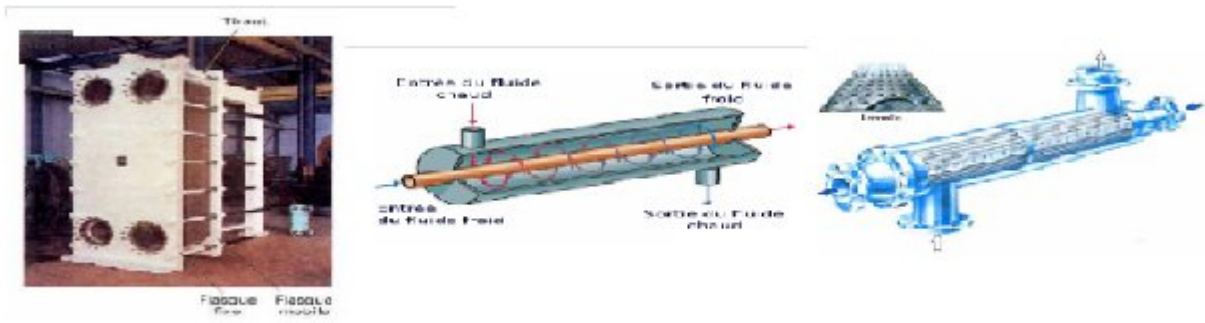


Figure3 : Différents types d'échangeurs du commerce, plaques / joints, coaxial et lamellaire [3]

Dans le cas de ces échangeurs plus élaborés, bien que la quantité Δ que nous avons vu jusqu'ici ne représente plus exactement l'écart de température logarithmique moyen, elle sera toujours calculée d'après l'expression du flux qui est corrigée par l'intermédiaire d'un facteur correctif F issu d'abaques : $\phi = \dots \Delta$

Quelques cas particuliers sont présentés dans les figures et sont décrits plus particulièrement dans l'annexe 2.

De façon générale, ce facteur est sélectionné d'après deux grandeurs caractéristiques de l'échangeur :

$$= \frac{\dots}{\dots} = \dots \text{ et } = \dots$$

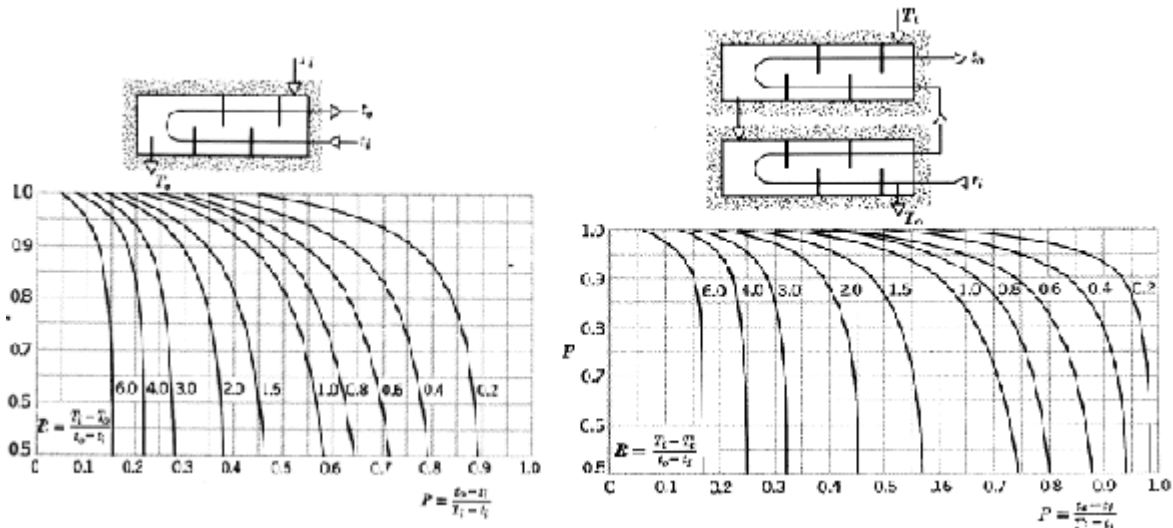
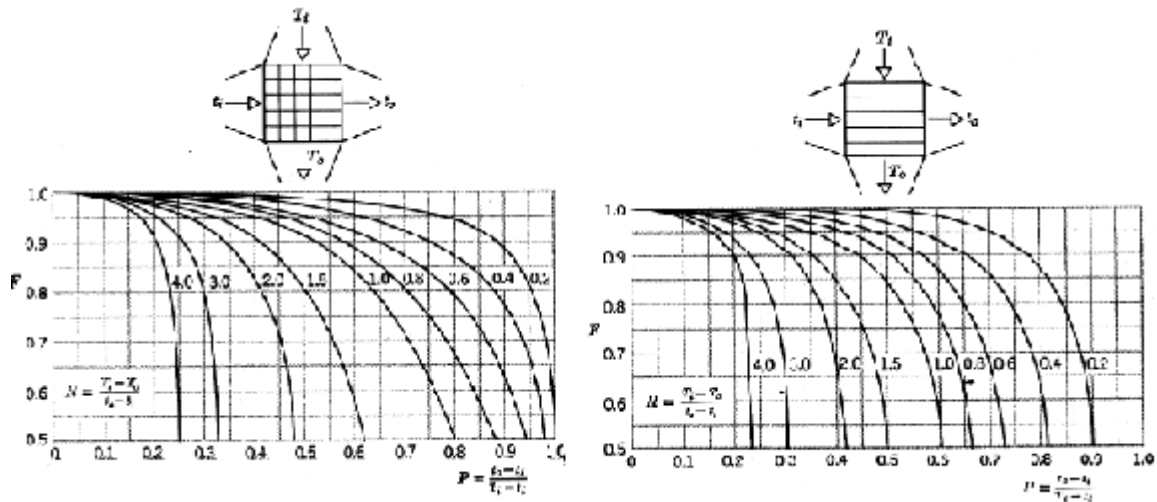


Figure 4 :facteurs de correction à prendre en compte dans le cas [1]

1. D'une calandre et un multiple de 2 passes de tubes (à gauche)
2. De deux calendres et un multiple de 2 passes de tubes (à droite)



1. D'un échangeur à courants croisés, aucun fluide étant mélangé (à gauche)
2. D'un échangeur à courant croisé, seul un des fluides étant mélangé (à droite) [2]

I.3 Méthode du Nombre d'Unité de Transfert (NUT)

Cette méthode, plus structurée, comme nous allons le voir, repose sur la définition du flux thermique maximum d'une part et de l'efficacité d'autre part, notions qui sont introduites ci-dessous :

Le flux thermique maximum transférable par un échangeur est atteint dans un échangeur contre-courant infiniment long. Dans une telle configuration, l'un des fluides subit le changement de température le plus élevé. Si on est dans le cas où $T_1 - T_2 < T_3 - T_4$, cet écart de température est atteint par le fluide chaud qui voit sa température évoluer de T_1 vers T_3 . Le flux maximal est alors donné par $\phi_{max} = C_c (T_1 - T_3)$. Si, au contraire, on se trouve dans le cas où $T_1 - T_2 > T_3 - T_4$, c'est dans ce cas le fluide froid qui subit le plus grand écart de température de T_4 vers T_2 conduisant au flux de chaleur maximal $\phi_{max} = C_f (T_4 - T_2)$. Ainsi, de façon générique, le flux maximal s'exprime par :

$$\phi_{max} = C_{min} (T_1 - T_4)$$

La notion d'efficacité découle de cette dernière valeur puisqu'elle caractérise le rapport entre le flux effectivement transmis, au flux maximum transférable et s'écrit :

$$E = \frac{\phi}{\phi_{max}} = \frac{C_c (T_1 - T_2)}{C_{min} (T_1 - T_4)} = \frac{C_f (T_4 - T_3)}{C_{min} (T_1 - T_4)}$$

Selon les cas ($T_1 - T_2 < T_3 - T_4$ ou $T_1 - T_2 > T_3 - T_4$), cette efficacité prendra différentes formes :

	$\dot{m}_{min} c p_{min} = C_{min} = \dot{m}_c c p_c = c_c$	$\dot{m}_{min} c p_{min} = C_{min} = \dot{m}_f c p_f = c_f$
E	$E = \frac{(T_{ce} - T_{cs})}{(T_{ce} - T_{fe})}$	$E = \frac{(T_{fs} - T_{fe})}{(T_{ce} - T_{fe})}$

Tableau 1 :expressions de l'efficacité Selon les cas (< >)

Cette notion d'efficacité est particulièrement intéressante puisqu'elle permet d'accéder directement à la puissance échangée selon $\phi = \dots$ (-) = . (-) tout en ne faisant intervenir que les températures d'entrée des fluides.

I.3.1 Cas de l'échangeur co-courant :

Nous avons vu précédemment que $\dots = - \dots = - - + -$, que l'on peut encore écrire :

$$\frac{-}{-} = - -$$

Si on se place dans le cas ou $\dots =$ l'efficacité s'écrit $= \dots$.

Le principe de conservation de l'énergie se traduit comme suit :

$$\phi = (-) = (-), \text{ d'où : } = + - (-)$$

En introduisant cette expression de \dots dans l'équation de l'écart de température, on trouve :

$$\frac{- - - (-)}{-} = - + - = - - ,$$

D'où la valeur de l'efficacité :

$$= \frac{- - -}{+ -}$$

Il est aisé de constater que dans le cas $U_1 = U_2$, la valeur de l'efficacité est donnée par :

$$E = \frac{1 - \exp(-NTU_1)}{1 + \exp(-NTU_1)}$$

De façon générique les deux expressions peuvent être regroupées en une seule équation :

$$E = \frac{1 - \exp(-NTU)}{1 + \exp(-NTU)}$$

I.3.2 Cas de l'échangeur contre-courant

Comme précédemment, nous allons partir d'un résultat déjà acquis donné par :

$$\frac{T_{c2} - T_{c1}}{T_{h1} - T_{c1}} = \frac{1 - \exp(-NTU)}{1 + \exp(-NTU)}$$

Le bilan énergétique de l'échangeur s'écrit : $(T_{h1} - T_{h2}) = (T_{c2} - T_{c1})$,

On en déduit que $T_{c2} - T_{c1} = (T_{h1} - T_{h2}) + (T_{c2} - T_{c1})$.

La combinaison avec l'équation précédente conduit alors à :

$$\frac{T_{c2} - T_{c1}}{T_{h1} - T_{c1}} = 1 + \frac{T_{c2} - T_{c1}}{T_{h1} - T_{c1}} \exp(-NTU) \Rightarrow \frac{T_{c2} - T_{c1}}{T_{h1} - T_{c1}} = \frac{\exp(-NTU)}{1 - \exp(-NTU)}, \text{ ou encore}$$

$$\frac{T_{c2} - T_{c1}}{T_{h1} - T_{c1}} = \frac{\exp(-NTU)}{1 - \exp(-NTU)}$$

Or $\frac{T_{c2} - T_{c1}}{T_{h1} - T_{c1}} = \frac{T_{h1} - T_{h2}}{T_{h1} - T_{c1}} = \frac{T_{h1} - T_{h2}}{T_{h1} - T_{h2} + (T_{c2} - T_{c1})} = \frac{T_{h1} - T_{h2}}{T_{h1} - T_{h2} + (T_{h1} - T_{h2})} = \frac{1}{2}$ lorsque $U_1 = U_2$

On obtient enfin :

$$\frac{1}{2} = \frac{\exp(-NTU)}{1 - \exp(-NTU)} \text{ Qui nous donne l'expression de l'efficacité E comme :}$$

$$E = \frac{1 - \exp(-NTU)}{1 + \exp(-NTU)}$$

$$= \frac{T_{12} - T_{22}}{T_{11} - T_{22}}$$

De la même manière, on obtiendrait un résultat similaire lorsque $T_{11} = T_{21}$; on peut donc retenir l'expression générale valable dans tous les cas :

$$= \frac{T_{12} - T_{22}}{T_{11} - T_{22}}$$

Généralement, la quantité adimensionnelle NTU , appelée nombre d'unités de transfert est notée NTU et la quantité C_r , rapport des débits de capacité thermique, est noté C_r .

Ainsi, pour le calcul des efficacités dans les cas du Co-courant et du contre-courant, il faut retenir les deux expressions du tableau ci-dessous :

co-courant	contre courant
$E = \frac{1 - e^{-NTU(1+C_r)}}{1 + C_r}$	$E = \frac{e^{-NTU} - 1}{C_r e^{-NTU} - 1}$

Tableau 2 : Expressions de l'efficacité dans le cas des échangeurs à co-courant et contre-courant

Les figures 6 et 7 présentent les courbes de variation de l'efficacité en fonction du nombre d'unité de transfert pour différentes valeurs du paramètre C_r , rapport des débits de capacité thermique et pour différentes configurations d'échangeurs.

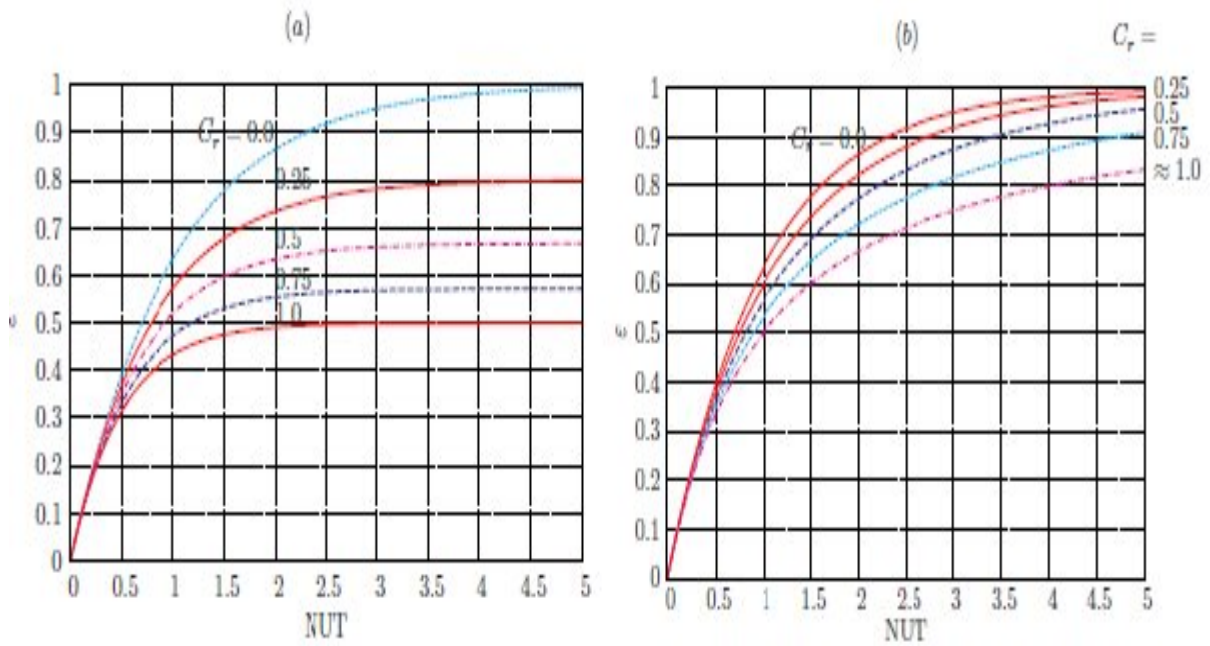


Figure 6 : Efficacité d'échangeurs de chaleurs, (a) courants parallèles,(b) à contre-courant [4]

La figure 7 présente l'évolution de l'efficacité pour des échangeurs de chaleur à tubes et calandre : (a) une calandre à passages multiples aux tubes (deux, quatre,.....passages) ; (b) une calandre à passages multiples de quatre à n tubes.

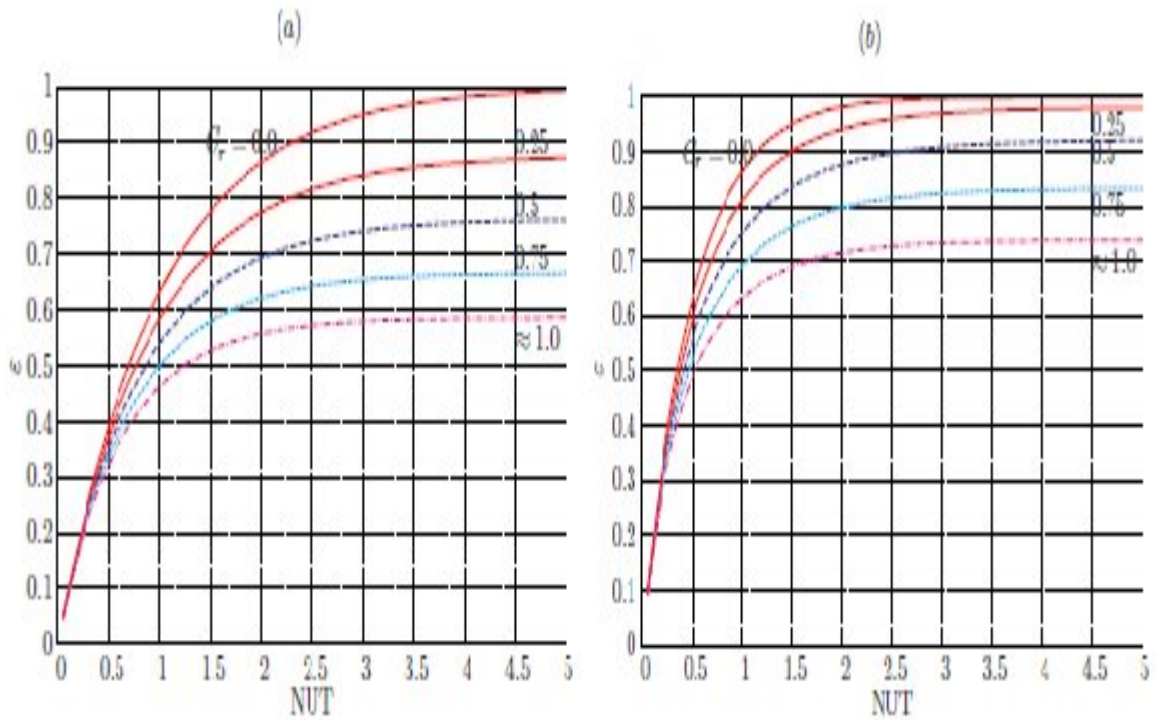


Figure 7 : Efficacité d'échangeurs de chaleurs à tubes et calandre, (a) une calandre à passages multiples aux tubes (deux, quatre,.....passages) (b) une calandre à passages multiples de quatre à n tubes [4]

I.4 Conclusion

Nous l'avons vu au travers du présent document, que l'étude, la sélection, le dimensionnement des échangeurs passe par la maîtrise d'outils tels que :

1. La méthode Δ
2. La méthode

Equivalentes, ces deux méthodes permettent d'aboutir au même résultat. Cependant, la seconde connaît une plus grande utilisation dans la pratique car elle est plus proche des contraintes du concepteur. En effet, la méconnaissance quasi systématique des températures de sortie dans un avant-projet, élimine rapidement la méthode Δ au profit de celle de l'efficacité / qui n'impliquée explicitement que les températures d'entrée.

Au niveau de l'aide au dimensionnement, force est de constater que les documents délivrés par les constructeurs sont de mieux en mieux faits et donnent bien souvent toutes les informations nécessaires au concepteur pour faire ses choix. Toutefois, les caractéristiques et les performances sont souvent données dans un cas bien précis (température, débit, nature de fluide,...) en pratique toujours différentes de celle du cas étudié. C'est seulement la maîtrise des notions vues ici qui permettent de traduire les informations délivrées par le constructeur et d'adapter le matériel au cas envisagé. Il faut quand même souligner la volonté de certains industriels qui dans le souci de répondre avec rapidité et à leurs clientèle, proposent de véritables outils de sélection des échangeurs, qui tiennent compte des contraintes du cahier des charges et qui facilitent le travail du concepteur. On pourra citer à titre d'exemple l'une d'entre elles : la société **ALFALAVAL**.

II. 1 Introduction

Durant les dernières décennies, de multiples études sont menées pour renouveler et améliorer les techniques de réduction des émissions de CO₂. Ainsi dans le secteur des bâtiments, un domaine où la consommation d'énergie est vorace, la maîtrise de la consommation d'énergie conventionnelle s'est avérée être l'une des clés prometteuses parmi les solutions proposées pour répondre à ces objectifs. Aujourd'hui, le stockage de l'énergie par chaleur latente présente des avantages certains pour les constructions modernes à basse consommation d'énergie. Ces constructions ont la capacité de réduire les consommations de chauffage en hiver grâce à leur faible inertie. Cependant, ces bâtiments se heurtent souvent à des problèmes de surchauffe en été dégradant ainsi les conditions de confort thermique des usagers. A cet égard, les MCP sont de bons candidats pour la conception et la rénovation des bâtiments permettant ainsi d'améliorer le confort thermique d'été et de réduire la consommation d'énergie. Beaucoup d'études ont été menées sur les MCP pour l'identification de leurs caractéristiques thermo-physiques et leur effet quand ils sont incorporés dans une paroi.

II .2 Le stockage de la chaleur

L'énergie doit être stockée pour qu'elle puisse être disponible à tout moment. Les matériaux sont capables d'accumuler de l'énergie et de la restituer plus tard. Les différents systèmes adaptés au stockage devront stocker le surplus d'énergie (phase de charge) et la produire au bon moment (phase de décharge). Le stockage de l'énergie peut se faire par une simple variation de température (stockage à chaleur sensible), par un changement de phase (stockage à chaleur latente), par une transformation physique (adsorption) ou une réaction chimique (stockage thermochimique). C'est le type de transformation de matériaux qui désigne le mode de stockage de l'énergie. A noter que ces systèmes doivent aussi répondre à des problèmes de non-toxicité et d'excellente tenue dans le temps.

II .2.1 Le Stockage par chaleur sensible [5]

Le stockage par chaleur sensible est la solution la plus ancienne pour stocker la chaleur. Il s'agit d'apporter de la chaleur à un matériau pour faire évoluer sa température sans changement d'état. Le matériau est caractérisé par sa capacité calorifique, notée Cp et exprimée en J/ (kg.K), qui traduit sa capacité à emmagasiner de la chaleur (J) par unité de masse (kg) et de température (K). L'énergie stockée répond alors à la formule suivante :

$$Q = m \cdot C_p \cdot \Delta T$$

Avec m la masse du matériau soumis au changement de température, C_p l'enthalpie massique, la capacité calorifique du matériau, et ΔT la différence de température de fonctionnement du stockage($T_{max} - T_{min}$). Le stockage sensible se retrouve

régulièrement dans notre vie courante. Il est possible de stocker du froid, comme dans un réfrigérateur par exemple, ou du chaud, comme dans un ballon d'eau chaude sanitaire domestique. La géothermie est un domaine qui utilise l'énergie du sol qui reste quasiment à la même température toute l'année. La terre est alors le matériau de stockage. On y puise tantôt de la chaleur en hiver et tantôt de la fraîcheur en été. Le stockage « actif » se distingue du stockage « passif ». Le stockage actif est caractérisé par un déplacement du matériau de stockage. Visuellement, dans le CSP, on le distingue car il est généralement doté de deux gros réservoirs (un froid et un chaud) dans lequel le fluide de transfert circule. La géothermie mentionnée plus tôt est un exemple de stockage passif.

II .2.2 Stockage par chaleur latente [5]:

La chaleur latente d'un matériau, ou enthalpie de changement d'état exprimée en $J.mol^{-1}$ ou en $J.kg^{-1}$ suivant qu'elle soit molaire ou massique, permet de quantifier l'énergie nécessaire à une quantité unitaire de matériau pour passer d'un état physique initial à un état final avec un changement de phase. On parle alors de stockage par chaleur latente, ou stockage latent. La quantité d'énergie mise en jeu lors du changement de phase d'une masse du matériau caractérisé par une chaleur latente notée est donnée par la relation :

$$=$$

Dans le cas d'un changement d'état (fusion), la quantité de chaleur mise en jeu s'écrit :

$$= - = \Delta []$$

Où Δ est l'enthalpie spécifique de fusion.

Si est la température de changement de phase d'un corps pur qui passe de la température à la température , avec $< <$ alors l'énergie stockée lors de cette transformation est :

$$= + +$$

: Chaleur spécifique du corps à l'état solide.

: Chaleur spécifique du corps à l'état liquide.

: Chaleur latente de changement de phase.

Le matériau peut exister généralement sous différentes formes : solide, liquide ou gaz. En faisant varier la température et/ou la pression du milieu, le matériau peut passer d'un état à un autre. Les différents changements d'état sont : la fusion, la vaporisation et la sublimation. La transition la plus fréquemment utilisée est le changement de phase

solide-liquide dont la variation volumique est faible. Cette dernière permet de stocker une grande énergie sous forme de chaleur latente avec des variations faibles de température. Un matériau à changement de phase stocke en premier lieu l'énergie sous forme de chaleur sensible et lorsque la température extérieure atteint sa température de changement de phase, le matériau change d'état provoquant une rupture des liaisons entre les chaînes moléculaires constituant le matériau. La Figure II.1 décrit la relation entre l'élévation de la température et l'enthalpie d'un matériau au cours et en dehors d'un changement de phase.

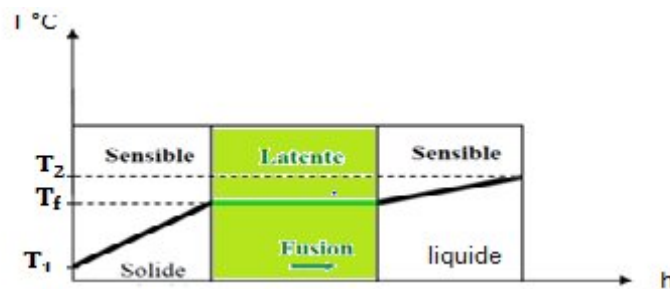


Figure II.1 : Evolution de la température d'un corps pur homogène avec changement d'état

Le changement d'état d'un matériau pur se fait à température constante et l'énergie sera stockée par chaleur latente jusqu'à la transformation complète d'un état à un autre. Généralement, le matériau continue à recevoir de l'énergie au cours du temps, ce surplus d'énergie sera alors stocké sous forme de chaleur sensible. La possibilité d'introduire ce mode de stockage est un verrou fondamental dans la problématique du chauffage et de la climatisation des bâtiments. En effet, le recours à ce type de stockage dans le bâtiment permet de maintenir une température quasi-constante à l'intérieur d'une pièce et en cas de besoin l'énergie stockée sera libérée.

II.3 Les Matériaux à changement de phase (MCP) [6]

Les matériaux souvent utilisés pour le stockage par chaleur latente sont appelés Matériaux à Changement de Phase (MCP). Ces matériaux sont capables de changer d'état physique sur une large plage de température et leur réactivité repose sur un principe physique simple. Lorsque la température environnante est égale à la température de fusion des MCP, ces derniers changent de phase en se liquéfiant et absorbent l'énergie par chaleur latente. Lorsque la température environnante chute, les MCP se cristallisent en restituant l'énergie qu'ils ont stockée. Les MCP sont classés en trois grandes familles selon leur nature chimique comme le montre la Figure II.2; à savoir les MCP organiques (paraffines, corps non-paraffiniques, polyalcools), inorganiques (hydrates salins, sels, métaux, alliages) et eutectiques (corps inorganiques et/ou organiques).

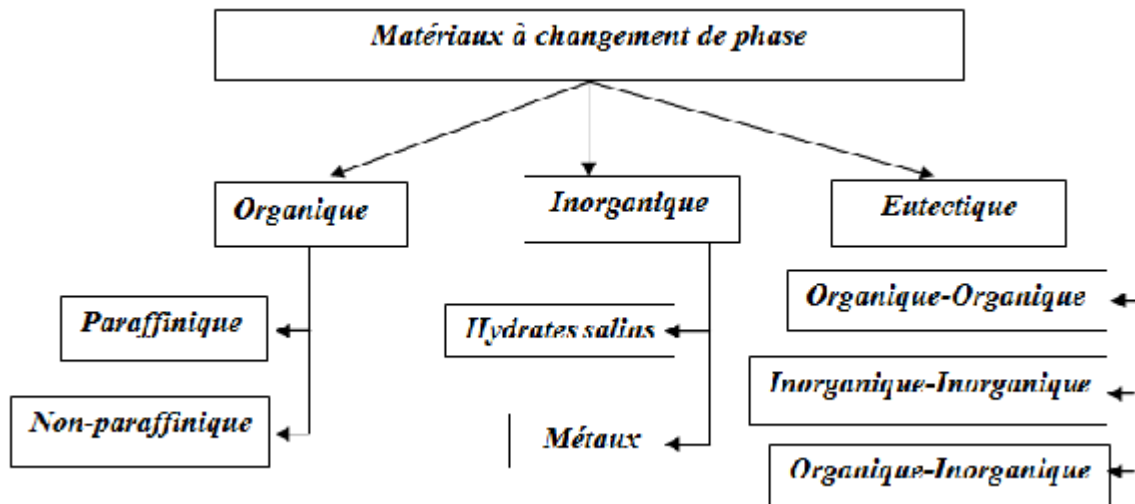


Figure II.2 : Classification des MCP

II .3.1 Les MCP organiques

Les matériaux ou les substances organiques ont une température ou une plage de température comprise entre 0° C et 150°C. Les plus utilisés sont essentiellement à base de paraffine, des acides gras et des alcools de sucre. Ils comportent certains inconvénients, comparés aux avantages des MCP inorganiques : ils ont une plus faible conductivité à l'état solide et à l'état liquide, ils ont une chaleur latente de fusion plus faible, ils sont inflammables. Par contre, ils ont des avantages majeurs ; ils sont disponibles dans une large gamme de température et sont compatibles avec les matériaux conventionnels de construction, ils sont chimiquement stables et ne nécessitent pas l'utilisation d'agents de nucléation. Ils sont non réactifs la plus part du temps et ils sont recyclables.

II .3.1.1 Les paraffines

Les paraffines sont des matériaux organiques, constitués par des mélanges d'hydrocarbures saturés qui eux-mêmes sont des alcanes de formule générale C_nH_{2n+2} . Elles sont fabriquées à partir du pétrole brut, après raffinage; elles sont inodores, non toxiques et sans saveur.

Les molécules de ces hydrocarbures saturés peuvent se présenter sous la forme de chaînes rectilignes (hydrocarbures n-paraffiniques) ou peuvent présenter plusieurs branches (hydrocarbures iso-paraffiniques(Figure II.3)).Pour des applications de stockage thermique les n-paraffines sont les plus utilisées à cause de leur capacité de stockage plus importante.

Les paraffines intéressantes pour le stockage thermique sont celles qui sont sous forme solide aux températures usuelles et elles sont qualifiées de cires paraffiniques.

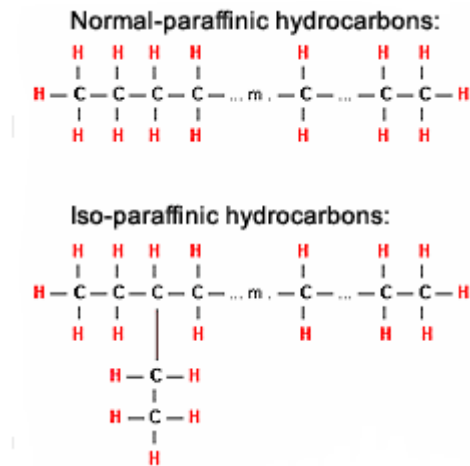


Figure II.3 : Structure chimique des paraffines

L'augmentation du nombre d'atomes le long de la chaîne carbonée augmente le poids moléculaire, ce qui donne une température de fusion et une chaleur latente plus élevée. Par exemple, l'augmentation du nombre des atomes de carbones de C_1 à C_{100} augmente la température de fusion de 90,68 à 388,40 K et la chaleur de fusion de 58 à 285 kJ/kg respectivement (Figure II.4).

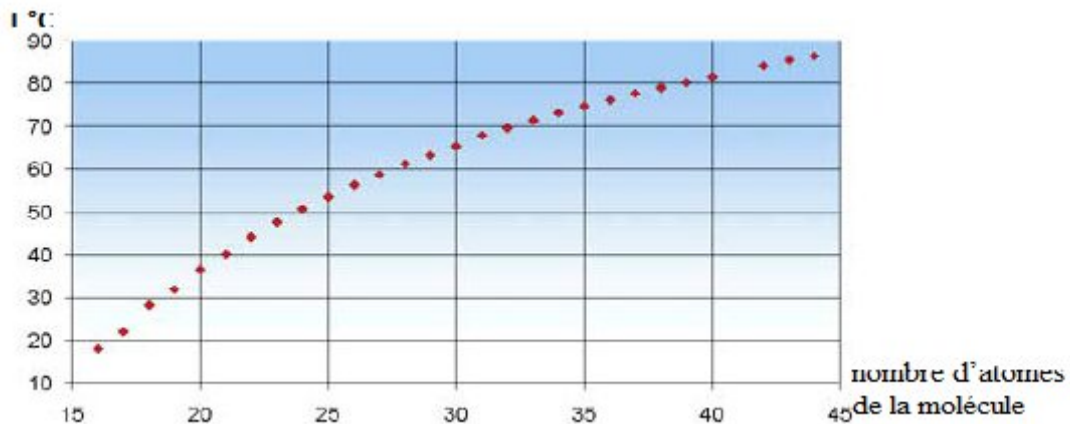


Figure II.4 : Température de fusion des paraffines en fonction du nombre d'atomes de la molécule

II.3.1.1.1 Différentes cires paraffiniques

Dans ce paragraphe sont donnés quelques exemples de cires paraffiniques soit pures soit en mélange.

- **n-octadécane ($C_{18}H_{38}$)**: cette cire fond à $T=28^\circ\text{C}$ et a une chaleur de fusion de 244 kJ/kg
- **n-eicosane ($C_{20}H_{42}$)** : sa fusion est congruente à $T=36,7^\circ\text{C}$, la chaleur de fusion est de 247 kJ/kg. Le n-eicosane et le n-octadécane sont très inflammables quand ils sont exposés à une flamme. Ils s'oxydent fortement. Ils ne sont ni toxiques, ni

corrosifs. Ils ont une grande conductivité thermique. Ils ont été utilisés par la NASA sur le Lunar Rover. Pours, ces composés sont très chers.

- **112/118 white scale cire:** ces cires paraffiniques sont issues du raffinage du pétrole brut « Pennsylvania-Grade ». Elles font apparaître deux transitions de phase solides avant leur domaine de fusion (42 – 48°C). Ces cires ont été soumises à un cyclage thermique (jusqu'à 1743 pour un échantillon) sans changement ni de la température de transition, ni du coefficient d'expansion volumique.
- **P116 :** cette cire à une chaleur latente de 210 kJ/kg et sa solidification se produit à T=45°C - 48°C. En forme de capsules sphériques.

II .3.1.1.2 Les propriétés physiques de quelques paraffines

Le Tableau II.1 permet d'apprécier les variations des propriétés physiques de quelques paraffines en fonction de leur masse moléculaire.

	Paraffines			
	Tétradécane	Hexadécane	Octadécane	Eicosane
Formule	C ₁₄ H ₃₀	C ₁₆ H ₃₄	C ₁₈ H ₃₈	C ₂₀ H ₄₂
Température de fusion [°C]	5,5	16,7	28	36,7
Enthalpie de fusion [kJ/kg]	226	237	244	247
Conductivité thermique [W/m. °C]	0,15	0,15	0,15	0,15
Capacité thermique massique [kJ/kg. °C]	2,07	2,11	2,16	2,21
Masse volumique solide [kg/m ³]	825	835	814	856
Masse volumique liquide [kg/m ³]	771	776	774	778

Tableau II.1 : Exemples de propriétés physiques de paraffines

II .3.1.2 Les composés organiques non -paraffiniques

Les composés organiques non-paraffiniques incluent plusieurs matériaux organiques comme les acides gras, les esters, les alcools et les glycols.

II .3.1.2 .1 Acides gras

Les acides gras sont des matériaux ayant pour origine les huiles végétales ou animales. Les acides gras ont la formule chimique générale suivante : CH₃ (CH₂)_{2n}COOH. Comme il est facile de les imprégner ou de les incorporer directement dans les structures conventionnelles, ils sont considérés comme de bons candidats pour les applications concernant la structure des bâtiments.

II.3.1.2.2 Les caractéristiques des acides gras les plus courants

Sur le Tableau II.2 on donne les caractéristiques des acides gras les plus courants.

Composant	Le domaine de fusion [°C]		La chaleur latente [kJ/kg]		Chaleur massique du solide (C_{ps}) [kJ/kg°C]	Chaleur massique du liquide (C_{pl}) [kJ/kg°C]
	Mesuré	Littérature	Mesurée	Littérature		
Acide caprique		31,3		163		
Acide laurique	40-43	42-44	167-171	178		
Acide myristique	50,4-53,6	54 ou 58	189	190 ou 200		
Acide palmitique	57,8-61,8 60-61 55-63	62 ou 63	201 ou 194 - 198 193	164 ou 212	2,20	1,70
Acide stéarique	62,2-68,5 55-71	69 ou 70	210 191	199 ou 209	2,07	1,90

Tableau II.2 : les caractéristiques des acides gras les plus courants.

On remarque que dans le Tableau II.2, il y a plusieurs valeurs de la température de fusion ou de la chaleur latente dans la colonne littérature. Les publications référencées ne fournissent pas toujours des valeurs identiques.

II.3.1.3 Les avantages et les inconvénients du MCP organique

Le Tableau II.3 est une revue des avantages et inconvénients des MCP organiques

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> - Disponibles dans une large gamme de température - Compatibles avec les matériaux conventionnels de construction - Pas de ségrégation - Chimiquement stables - Haute énergie de fusion - Sûr et non réactif - Recyclable 	<ul style="list-style-type: none"> - Faible conductivité thermique à l'état solide. D'importants transferts de chaleur sont nécessaires durant le cycle de gel - Chaleur latente volumétrique faible - Inflammable (nécessite des contenants adéquats) - Requièrent un large rapport surface/volume

Tableau II.3 : les avantages et les inconvénients du MCP organique

II.3.2 Les MCP inorganiques

Les matériaux ou les substances inorganiques ont une température ou une plage de température de fusion comprise entre -100 °C et +1000°C. Les plus utilisés sont : l'eau (température de fusion 0°C), les solutions aqueuses de sel (température de fusion

inférieure à 0°C), les sels hydratés (température de fusion comprise entre 5°C et 130°C), les mélanges de sels, les mélanges de métaux (température de fusion supérieure à 150°C). Ils présentent plusieurs avantages : une chaleur latente et une conductivité thermique importantes, une fusion nette (c'est-à-dire une plage de fusion étroite); ils sont non-inflammables, facilement disponibles et leur coût d'investissement abordable. Les problèmes majeurs rencontrés lors de leurs utilisations sont en rapport avec la ségrégation, la corrosion et la surfusion nécessitant ainsi l'utilisation d'agent de nucléation afin d'être fiables.

II .3.2.1 Les hydrates salins

Ce sont des composés obtenus par mélange d'un sel et d'une quantité d'eau en principe parfaitement définie. Un des plus connus est celui obtenu par mélange de chlorure de sodium et d'eau et qui forme l'hydrate ($\text{NaCl}, 2\text{H}_2\text{O}$); Ils représentent un groupe important de MCP et sans doute le plus étudié.

II .3.2.2 Différents hydrates salins

Les quelques exemples d'hydrates salins et leurs propriétés physiques :

- **Chlorure de calcium hexahydrate ($\text{CaCl}_2 \cdot 6 \text{H}_2\text{O}$)**

Le choix du chlorure de calcium hexahydrate a souvent été envisagé pour le chauffagesolaire passif. Son point de fusion est de l'ordre de 27 – 29.7°C et sa chaleur de fusion est 170 kJ/kg. Son principal inconvénient est la formation de chlorure de calcium tétrahydrate ($\text{CaCl}_2, 4\text{H}_2\text{O}$). L'hexahydrate a une fusion non –congruente que l'on peut rendre congruente en ajoutant du $\text{SrCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$.

- **Acétate de sodium tri hydrate ($\text{Na CH}_3 \text{COO} \cdot 3 \text{H}_2\text{O}$)**

La fusion de cet hydrate est à $T=58^\circ\text{C}$ et la chaleur de fusion est 170 à 264 kJ/kg. Il est adapté au chauffage des locaux et à la production d'eau chaude.

- **Hydroxyde de Baryum octahydrate ($\text{Ba}(\text{OH})_2 \cdot 8 \text{H}_2\text{O}$)**

Il a une fusion congruente à $T = 78^\circ\text{C}$ avec une grande chaleur de fusion de 301 kJ/kg, mais il est fortement alcalin et toxique. Il absorbe le CO_2 de l'air et devient donc insoluble dans l'eau. Il réagit fortement avec l'aluminium. En laboratoire, la cristallisation se produit en blocs compacts mais quand on ajoute de l'eau supplémentaire (plus 6 % en poids) la cristallisation se produit en petits cristaux.

- **Chlorure de Magnésium hexahydrate ($\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) et Nitrate de Magnésium hexahydrate($\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$)**

Ces deux sels, avec additifs pour éviter la surfusion ont été testés après encapsulation. Les tests ont montré que ces capsules étaient détruites après quelques centaines de cycles thermiques. Des boîtes en acier doux avec un enduit sont recommandées pour leur encapsulation

II .3.2.3 Les avantages et les inconvénients du MCP inorganiques

Le Tableau II.4 ci-dessous cite les avantages et inconvénients des MCP inorganiques :

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> - Chaleur latente volumétrique importante - Fiable coût et facilement disponibles - Point de fusion nette - Haute énergie de fusion - Non inflammables - Haute conductivité thermique 	<ul style="list-style-type: none"> - perte d'eau d'hydratation par répétition des cycles thermiques. - caractère corrosif - Phénomène de surfusion important, Agents de nucléation étrangers indispensable

Tableau II.4 : les avantages et les inconvénients du MCP inorganiques

II .3.3 Les MCP eutectiques

Les eutectiques sont des mélanges de deux ou plusieurs corps qui, par définition, ont des températures de fusion précises. Ils ont un comportement similaire au comportement des hydrates salins à fusion congruente. Les eutectiques ont un potentiel important pour les applications de stockage thermique de l'énergie. Quelques eutectiques sont utilisés pour le refroidissement et dans les systèmes passifs de stockage de l'énergie solaire. Les eutectiques sont classés en eutectiques inorganiques, eutectiques organiques et eutectiques organiques –inorganiques.

Le Tableau II.5 est une liste de quelques MCP eutectiques déjà utilisés pour les applications de stockage thermique.

Eutectiques Inorganiques	Point de fusion [°C]	Chaleur latente de fusion [kJ/kg]
49,3% MgCl ₂ .6H ₂ O + 50,7% Mg(NO ₃) ₂ .6H ₂ O	58	132,3
Na ₂ SO ₄ (32,5%)H ₂ O(41,4%), NaCl(6,66%), NH ₄ Cl(6,16%)	13	146
61,5%Mg(NO ₃) ₂ .6H ₂ O + 38,5%NH ₄ NO ₃	51	131,1
58,3%Mg(NO ₃) ₂ .6H ₂ O + 41,7%MgCl ₂ .6H ₂ O	58	106
CaCl ₂ .6H ₂ O + CaBr ₂ .H ₂ O	14	140
Eutectiques Organiques		
Acides Caprique – Laurique	18	120
Acides Palmitique – Laurique	33	145
Acides Stéarique – Laurique	34	150

Tableau II.5 : Une liste de quelques Eutectiques

II .3.3.1 Les avantages et les inconvénients des MCP eutectiques

Le Tableau II.5 regroupe les avantages et inconvénients des MCP eutectiques :

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> - Point de fusion nette similaire à une substance pure - Chaleur latente volumétrique légèrement supérieur à celle des composés organiques 	<ul style="list-style-type: none"> - Peu de données disponibles sur les propriétés thermiques de ces matériaux

Tableau II.5 : les avantages et les inconvénients du MCP eutectiques

II .4 le choix d'un MCP

La première question qui peut se poser concerne l'utilisation de l'eau comme MCP. En effet, l'eau a d'excellentes propriétés de chaleur latente. Cependant, avec l'eau, nous sommes limités aux températures de 0 °C ou 100 °C (à pression atmosphérique) alors que de nombreuses applications nécessitent d'autres niveaux de températures. Des critères vont donc être définis pour faciliter le choix d'un MCP pour une application donnée :

- **Considérations thermiques**

- Le niveau de la température de changement de phase qui dépend de l'application.
- La valeur de la chaleur latente de fusion (supérieur à 130 kJ / kg pour être compétitif).
- Une grande conductivité thermique pour des cinétiques de charge et de décharge rapides.

- Une faible pression de vapeur pour minimiser les problèmes de tenue en pression des systèmes de stockage.
- **Propriétés physiques**
 - Un faible changement de volume lors du changement d'état pour le dimensionnement du stockage et sa tenue à la pression.
 - Une grande masse volumique pour que le MCP puisse réaliser un stockage suffisant dans le volume le plus faible possible.
 - Une fusion congruente lors de l'utilisation d'un corps composé.
- **Considérations cinétiques**
 - Des cinétiques de charge et de décharge rapides.
 - Pas de surfusion qui détruit la cinétique et altère la possibilité de déstockage.
- **Considérations de stabilité et de compatibilité avec les autres matériaux**
 - Stabilité du corps lors des cyclages thermiques
 - Compatibilité avec les matériaux du réservoir de stockage pour chaque phase afin d'éviter tous les problèmes de corrosion, de réactivité chimique ou électrochimique.
- **Considérations chimiques:**
 - Stabilité chimique des corps avec le temps et avec les niveaux de température,
 - Un bon taux de cristallisation
 - Ininflammabilité
- **Considérations économiques**
 - Un coût raisonnable
 - Une bonne disponibilité

II.5 Méthodes de conditionnement des MCP dans les applications de stockage Thermique

Pour améliorer l'efficacité de la charge et décharge de la chaleur par les MCP, le paramètre à prendre en considération et à étudier est la conductivité thermique. Il existe de nombreuses techniques pour conditionner les MCP

II.5.1 Macro encapsulation

Elles peuvent être constituées de sacs, de bouteilles de plastique, etc. Il existe des procédés industriels qui utilisent le conditionnement dans des sphères de matière plastique ou nodules. Ces nodules sont manufacturés dans trois diamètres (77-78 et 98 mm) pour des usages respectivement aux faibles températures de changement d'état (-3 à -15 °C), aux températures intermédiaires (-3 à 15 °C) et à la température de stockage

de la glace (0 °C). Certains nodules spéciaux ont des températures de changement d'état de 27 °C. Dans certains cas, le transfert de chaleur et les fuites peuvent poser problème.

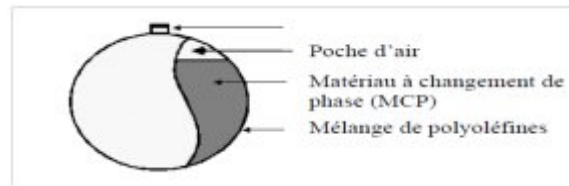


Figure II.5 : le Conditionnement de MCP en nodules

II .5 .2 Micro encapsulation

La micro encapsulation est un dispositif où les MCP sont enfermés dans des vésiculaires de petites tailles (quelques millimètres ou quelques centimètres) prenant différentes formes (sphères ou petits cylindres longitudinaux). Les MCP ainsi encapsulés peuvent être ensuite utilisés dans un système de stockage d'énergie latente dans lesquels ils sont apposés en amas ; le fluide vecteur de l'énergie à stocker (air ou eau) traverse alors cet amas ; l'avantage de cette géométrie interne de stockeur en amas de MCP micro-encapsulés est qu'elle offre une grande surface d'échange (surface sphérique). La micro encapsulation de MCP se fait par :

- Addition de graphite,
- Addition de SiC (Silicone Carbide),
- Peinture de la sphère de cuivre contenant le MCP par un film de nickel.

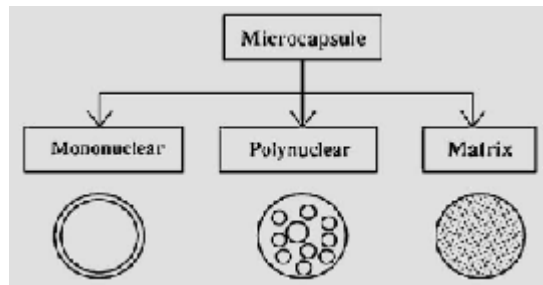


Figure II.6 : représente les différents types des microcapsules.

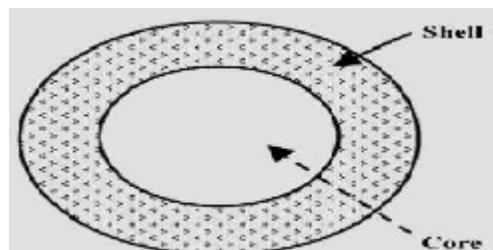


Figure II.7 : Représente la description de la microcapsule.

II .5 .3 Incorporation des structures métalliques aux MCP:

Cette méthode fait l'objet de nombreuses recherches. Des structures métalliques fabriquées en acier sont utilisées sous forme cylindrique ou sphérique etc. Les résultats obtenus sont :

- Amélioration de la conductivité thermique du MCP.
- Réduction du temps de fusion/solidification.
- Augmentation du coût du système.



Figure II.8 : Représentation des différents types d'Incorporation des MCP dans des structures métalliques.

III.1 Introduction :

La réduction de la consommation énergétique dans les secteurs très énergivores (comme le sont le secteur du bâtiment de l'industrie ou des transports) peut être envisagée à travers l'incorporation de nouveaux matériaux ou systèmes «intelligents» contribuant à une régulation des flux d'énergie et/ou une stabilisation de la température. Les matériaux de stockage par chaleur latente (notés MCP) en font partie notamment pour exploiter les sources d'énergies renouvelables à caractère intermittent ou pour être utilisés en tant que thermorégulateur dans divers procédés.

Le rafraîchissement des bâtiments par le stockage d'énergie thermique avec Matériaux à Changements de Phase (MCP) est un procédé naturel couramment utilisé depuis l'antiquité. Le principe de fonctionnement est le suivant : les matériaux à changement de phase fondent et absorbent l'énergie thermique excédentaire -réaction endothermique- lorsque la température de l'air dans le bâtiment dépasse leur température de fusion (en journée). Ce changement de phase permet de refroidir l'air concerné. La nuit, de l'air prélevé à l'extérieur du bâtiment amène à refroidir et solidifier ces MCP, la réaction est exothermique.

III.2 Echangeurs de chaleur contenant des matériaux à changement de phase :

Dans cette partie nous allons étaler quelques échangeurs existant dans certaines applications.

III.2.1 Echangeurs tube-calandre contenant MCP [7]

III.2.1.1 Description de l'échangeur

Il existe quatre échangeurs : un tube lisse en inox, un faisceau de sept tubes en inox, un tube en acier muni d'ailettes longitudinales et aussi un tube en acier muni d'ailettes transverses en cuivre. Leur longueur est d'environ 400 mm et leur diamètre intérieur et extérieur sont de 15 mm et de 21 mm respectivement, ces échangeurs sont représentés sur la figure 1 avec leurs caractéristiques

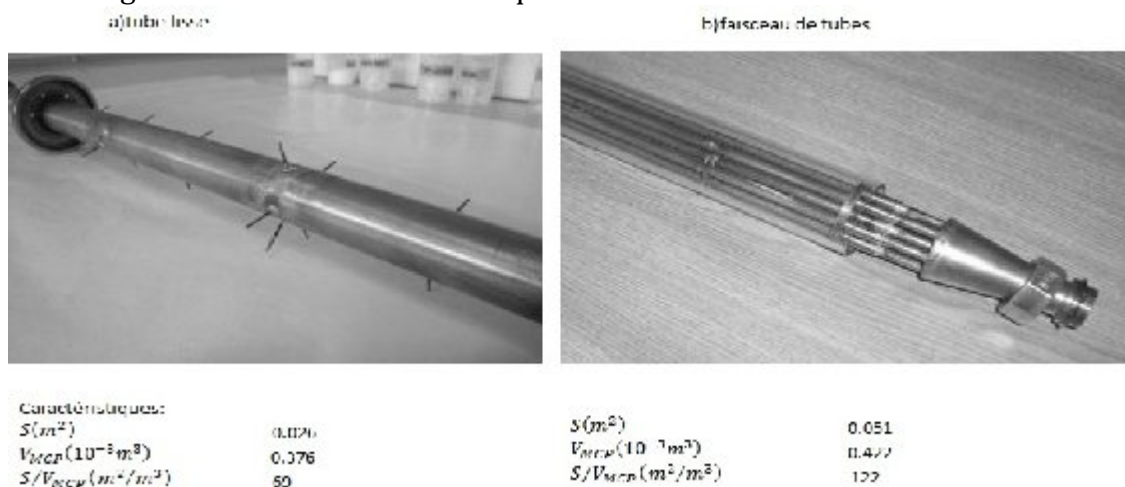


Figure III.1 : Géométries d'échangeurs : a) tube lisse en inox b) faisceau de sept tubes

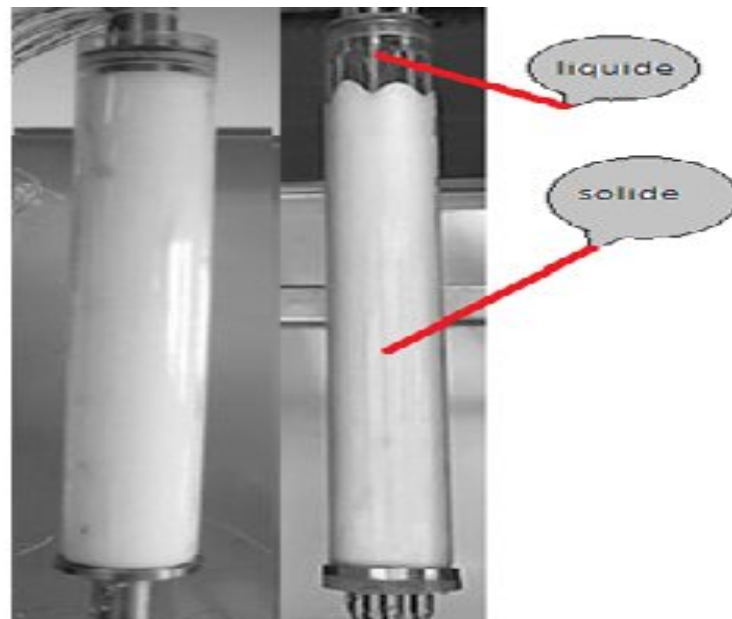


Figure III.2 : Géométries d'échangeurs : a) tube lisse en inox b) faisceau de sept tubes avec MCP



caractéristiques:			
$S(m^2)$	0.187	$S(m^2)$	0.198
$V_{MCP}(10^{-3}m^3)$	0.288	$V_{MCP}(10^{-3}m^3)$	0.304
$S/V_{MCP}(m^2/m^3)$	651	$S/V_{MCP}(m^2/m^3)$	650

Figure III.3 : Géométries d'échangeurs : c) tube en acier avec ailettes longitudinales d) tube en acier muni d'ailettes transverses.



Figure III.4 : Géométries d'échangeurs : c) tube en acier avec ailettes longitudinales d) tube en acier muni d'ailettes transverses avec MCP

III.2.1.2 Description du MCP

Le matériau à changement de phase est une paraffine dont la température de fusion est d'environ 35 °C, proche de la température ambiante, ayant des phases liquide et solide bien distinctes et une calandre en plexiglas qui permet de visualiser les fronts de fusion et solidification dans l'échangeur. Les propriétés thermo physiques de la paraffine RT35 sont présentées dans le Tableau 1.

propriétés	T_m	T_s	L	ρ	λ	ΔV
Unité	°C	°C	KJ/Kg	Kg/m^3	$W/m.K$	%
Valeur	34-36	36-34	240	770	0,2	12

Tableau III.1 : Les propriétés thermo physiques de la paraffine RT35

III.2.1 échangeur air-matériaux à changement de phase [8]

III.2.2.1 Description de l'échangeur

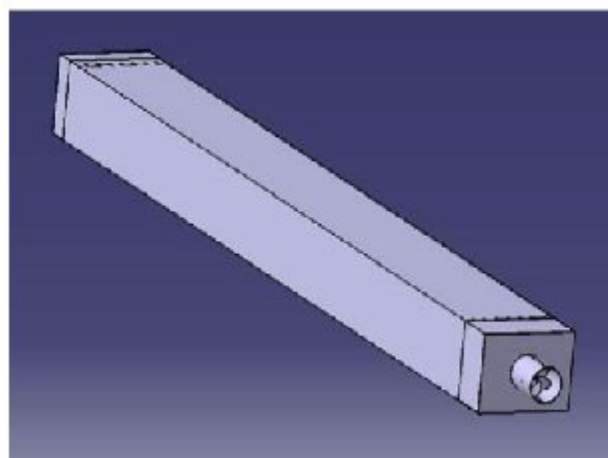


Figure III.5 : échangeur air-matériaux à changement de phase

La conception du prototype a été menée avec un souci de simplicité de fabrication, d'assemblage et de robustesse en fonctionnement. L'échangeur est constitué d'éléments de stockage d'énergie parallèles (cf. figures III.6 et 7) le long desquels circule l'air (cf. figure III.8). Un élément de stockage d'énergie est constitué de tubes à section rectangulaire horizontaux (de section externe 20mm x 30mm), assemblés en quinconce, dont la fonction est de contenir le MCP. Ces tubes sont reliés entre eux par des cheminées (tubes de section externe 10mm x 15mm) dont le but est de permettre le remplissage par le MCP et d'autoriser la dilatation des MCP lors de leur changement de phase sans apparition de contraintes internes au niveau des éléments de stockage. Des déflecteurs, jouant un rôle de chicanes, sont ajoutés à ce réseau de tubes connectés afin d'imposer à l'air un parcours tortueux, et ainsi d'augmenter l'échange air-élément de stockage sans trop augmenter les pertes de charges.

Un schéma global et un éclaté de l'échangeur sont présentés sur les figures 9 et 10

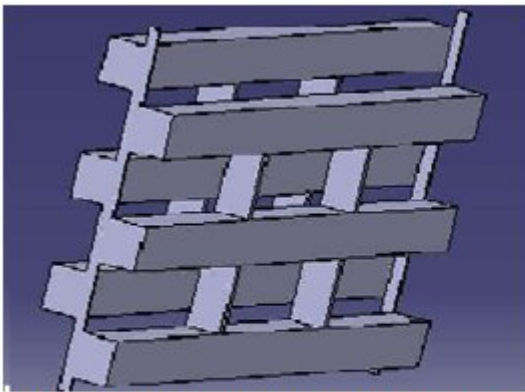


Figure III.6 :Schéma d'un élément de stockage d'énergie

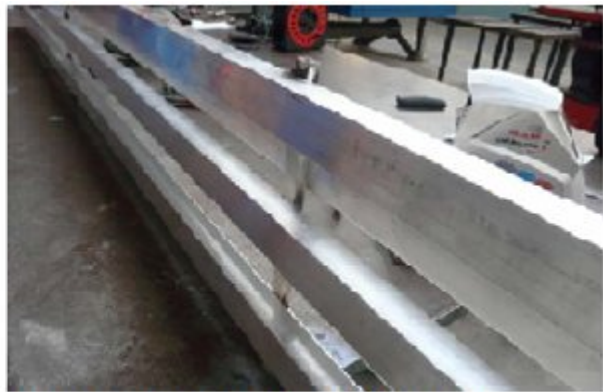


Figure III.7 :Photo d'un élément de stockage d'énergie.

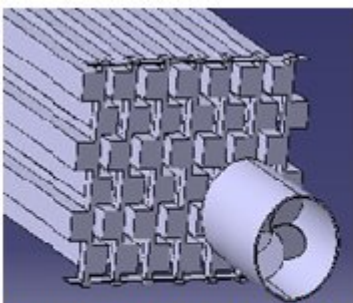


Figure III.8 : Schéma, hors coffrage et collecteur, de l'échangeur.

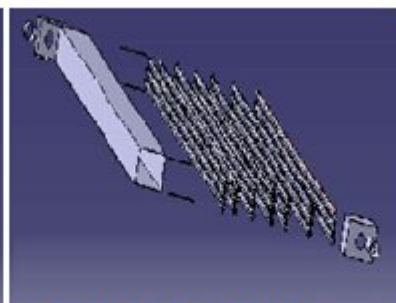


Figure III.9 :Eclaté de l'échangeur complet.

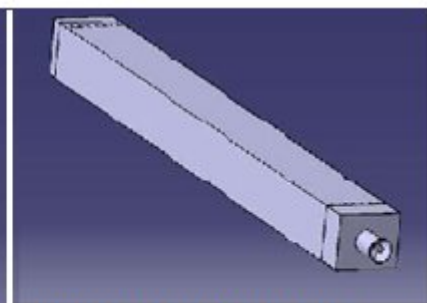


Figure III.10 :Schéma de l'échangeur complet

III.2.2.2 Caractérisation du MCP utilisé

Le matériau sélectionné est une paraffine de type RT21 commercialisée par Rubitherm. Sa plage de fusion annoncée est entre 18°C et 23°C avec une température principale de

21°C ; sa plage de solidification annoncée est entre 2°C et 19°C avec une température principale de 22°C. Sa chaleur latente de changement de phase annoncée est 155kJ/kg.

III.2.3 Echangeurs de chaleur air / MCP [9]

III.2.3.1 Description de l'échangeur

L'échangeur est composé de plaques de MCP horizontales contenues dans un coffre **Figure III.10**. Un ventilateur force l'air à travers l'échangeur pour que le MCP puisse absorber la chaleur. Il en est ainsi dans les applications de climatisation des bâtiments pour le confort d'été : l'air intérieur est rafraîchi en cédant sa chaleur au MCP, lequel va se décharger plus tard en ventilation nocturne. Pour améliorer leur efficacité, un diffuseur est utilisé pour distribuer l'air entre chaque plaque.

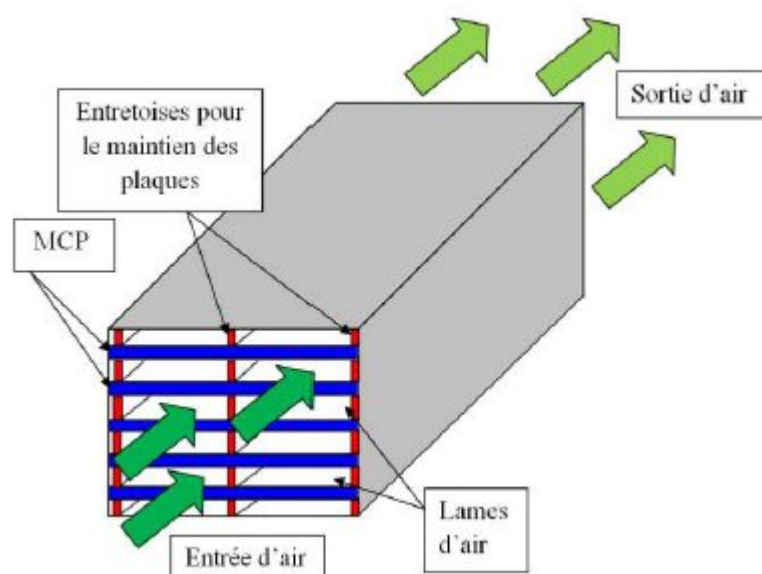


Figure III.10 : Echangeur de chaleur air / MCP

Les différentes configurations de l'échangeur thermique simulées sont listées dans le **Tableau III.1**. Les dimensions spatiales du système doivent être limitées pour conserver un ensemble qui peut être inséré dans un comble, un faux plafond ou tout autre emplacement adéquat.

CARACTERISTIQUES	VALEURS
Longueur (L)	3 m
Largueur (l)	0,9 m
Nombre de plaques de MCP:	De 4 à 18
Hauteur (H)	De 0,24 à 0,9 m
Epaisseur des lames d'air (b)	De 0,01 à 0,1 m
Epaisseur des couches de MCP (E)	0,005; 0,01; 0,015 ou 0,02 m
Débit d'air	De 150 à 1300 m ³ /h

Tableau III.2 : configuration de l'échangeur de chaleur.

III.2.3.2 Caractérisation du MCP utilisé

Les paraffines, qui sont utilisées dans cette étude sont des MCP très courants. Il est constitué de 60% de MCP micro-encapsulée. La forme finale du matériau consiste en des plaques de 5mm d'épaisseur et de densité 900 kg/m^3 . Elles sont couvertes d'une feuille d'aluminium.

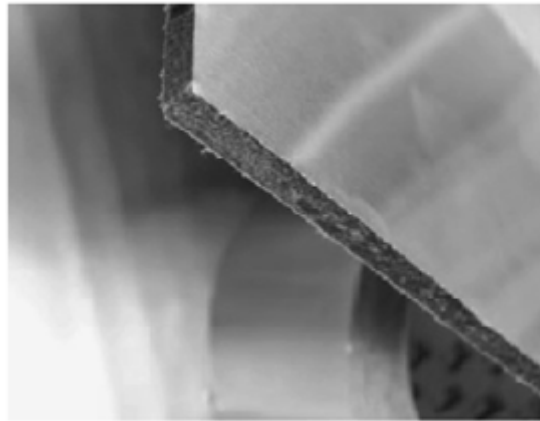


Figure III.11 : MCP utilisé

La capacité thermique massique du MCP a été mesurée par calorimétrie différentielle. La conductivité thermique est de $0,23 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ en dessous de la température de fusion et de $0,17 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ au-dessus.

III.2.4 Echangeur-stockeur pour le rafraîchissement de l'air [10]

III.2.4.1 Description de l'échangeur

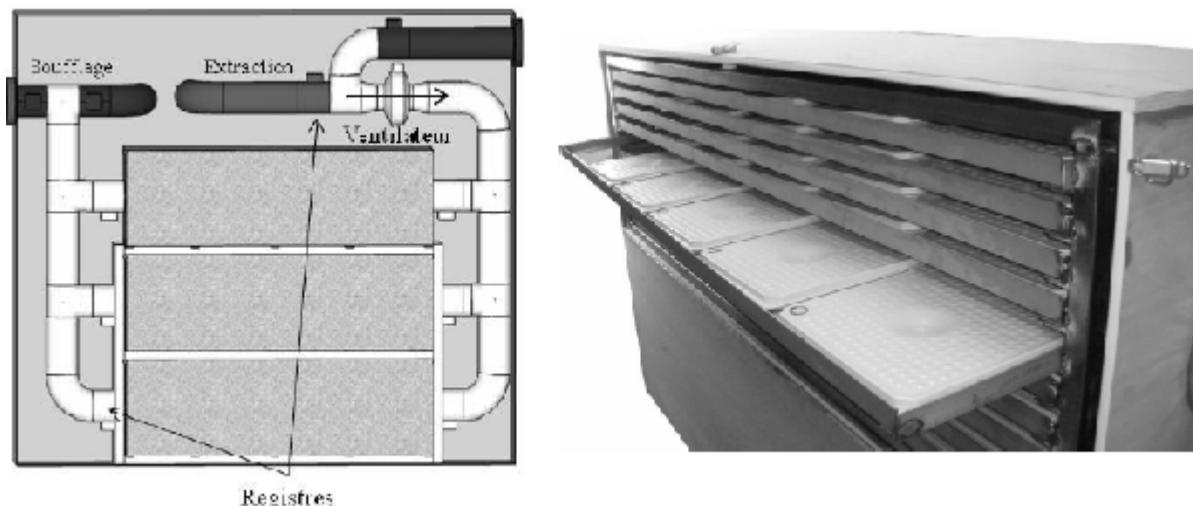


Figure III.12 : Echangeur-stockeur pour le rafraîchissement de l'air

L'échangeur-stockeur proposé sur la figure III.12 est composé de 10 tiroirs métalliques disposés en parallèle et espacés verticalement de 20 mm. Chaque tiroir contient 5 plaques d'aluminium serties ($300\text{mm} \times 450\text{mm} \times 20\text{mm}$) et placées successivement. Les plaques sont remplies d'une paraffine commerciale RT21 dont la

masse est de 1,64 kg par plaque, soit 82 kg pour un échangeur. Les tiroirs sont installés dans un caisson en bois dont la longueur est de 194cm et la section extérieure est de 500mmx600mm.

III.2.4.2 Caractérisation du MCP utilisé

La parafine RT21 est un produit commercial donc un mélange non-eutectique de plusieurs composants purs. A noter que la capacité de stockage de 134 kJ/kg donnée par le fabricant est entre 15°C et 30°C et comprend la chaleur sensible entre ces deux températures.

Chapitre IV :Description de l'échangeur stockeur et le MCP utilisé

IV.1 Introduction :

Le stockage d'énergie thermique par chaleur latente est largement utilisé actuellement dans plusieurs systèmes grâce à la capacité d'un stockage élevé en énergie de certains matériaux à température constante dans un volume réduit.

Les paraffines, sont souvent utilisées comme matériau à changement de phase (MCP) en raison de leur importante capacité de stockage et de leurs propriétés physiques ainsi que pour leur stabilité chimique. Cependant, elles présentent deux inconvénients qui empêchent leur application directe dans les systèmes de stockage et cela a cause de leur faible conductivité thermique et de leur dispersion dans les matrices poreuses lors du processus de fusion. Pour remédier à ce problème, les chercheurs ont trouvé comme solution la micro encapsulation, mais vu que la technique de mise en œuvre nécessite un moyen technologique qui n'est pas disponible au niveau de notre faculté, alors l'ancienne promotion avait opté pour une méthode plus simple, qui consiste à mélanger la paraffine à la perlite et au graphite.

Dans ce chapitre, nous allons détailler le processus de fabrication de l'échangeur ainsi que la mise au point du composite à base de paraffine qui dispose d'une grande capacité de stockage d'énergie thermique. Introduite dans une matrice de perlite sous forme de poudre, avec l'ajout de faible pourcentage en graphite afin d'améliorer la conductivité thermique. Comme application, le composite obtenu a été introduit dans un échangeur de chaleur dans le but d'améliorer ses performances thermiques.

IV.2Description de l'échangeur [11]:



Figure IV.1 : l'échangeur stockeur.

C'est un échangeur tubulaire à ailettes, contenant un matériau à changement de phase qui permet le stockage de l'énergie lors de son changement de phase, ce composite contient trois matériaux qui sont la paraffine la perlite et le graphite (Pa60%, Pr35%, Gr5%), la plupart des parties de l'échangeur sont en cuivre tels que les éléments conteneurs de MCP qui représentent des capsules sous forme carrée de dimensions (4*4*6 mm³) et des bandes pour empocher le MCP, 58 tubes de 8 mm de diamètre et de 40 cm de longueur, sont placés en parallèle, soudés avec les éléments conteneurs le MCP et fixés à l'aide de deux plaques en bois sur les côtés

Chapitre IV :Description de l'échangeur stockeur et le MCP utilisé

supérieur et inférieur de l'échangeur, sur ces deux plaques sont posés des collecteurs d'admission et de sortie de fluide caloporteur de forme rectangulaire au bout des quels sont fixés deux tubes de 22 mm de diamètre qui représentent les conduits d'admission et de sortie du fluide caloporteur, il contient aussi un circuit aéraulique, fait en plexiglas et contient un extracteur du côté de l'échangeur et un nid d'abeilles de l'autre côté, ce circuit assure l'emboîtement de l'échangeur, permet la fixation de l'extracteur d'air de l'échangeur.

IV.2.1 Choix du matériau

Le matériau utilisé pour la fabrication de l'échangeur est le cuivre (plaque et tube en cuivre) ce choix revient aux caractéristiques intéressantes qu'offre ce matériau :

- Une bonne conductivité thermique (385w/m.k)
- Malléable et donc facile à manipuler
- Possibilité de souder avec différents matériaux de soudage (brasure, étain, chalumeau...ect)

Des illustrations sont présentées ci-dessous :



Figure IV.2 : Plaque et Tubes de cuivre



Figure IV.2 : Baguettes de brasure.

IV.2.2 Les différentes opérations de fabrication de l'échangeur

Les étapes de fabrication se sont déroulées comme suit :

- Fabrication des différentes pièces de l'échangeur.
- Assemblage des pièces avec soudure pour obtenir les éléments de l'échangeur.
- Introduire les plaques MCP (pastilles) dans les éléments de l'échangeur.
- Fabrication et fixation des collecteurs d'admission et sortie de fluide caloporteur.
- Fabrication et fixation du système aéraulique.

IV.2.2.1 Fabrication des pièces de l'échangeur :

Ils ont fabriqué d'abord les éléments de l'échangeur conteneurs d'MCP c'est à dire les ailettes, ensuite les tubes de 8 mm de diamètre ont été coupés sur une longueur de 38 mm Par la suite, les collecteurs d'admission et de sortie du fluide caloporteur ont été fabriqués, et enfin la fabrication circuit aéraulique qui a été placé derrière l'échangeur dans le but d'assurer un meilleur échange de chaleur par convection forcée avec l'air.

IV.2.2.2 Fabrication des ailettes :

Dans un premier temps la feuille de 0,5 mm de cuivre est coupée en bandes puis en pièces appropriées pour qu'elles soient utilisées en capsules carrées.

Le processus fabrication des éléments stockeurs de l'échangeur est illustré sur les figures ci-dessous :

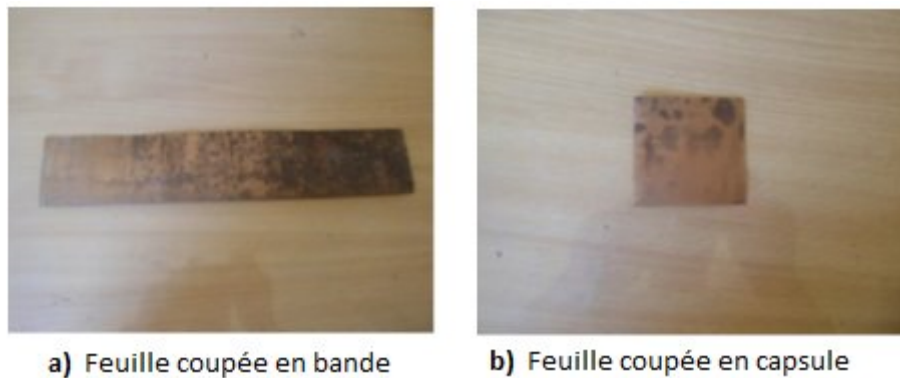


Figure IV.3: la bande et la capsule

Ensuite, ils ont tracé les deux plaques obtenues à des dimensions précisées sur la figure suivante :

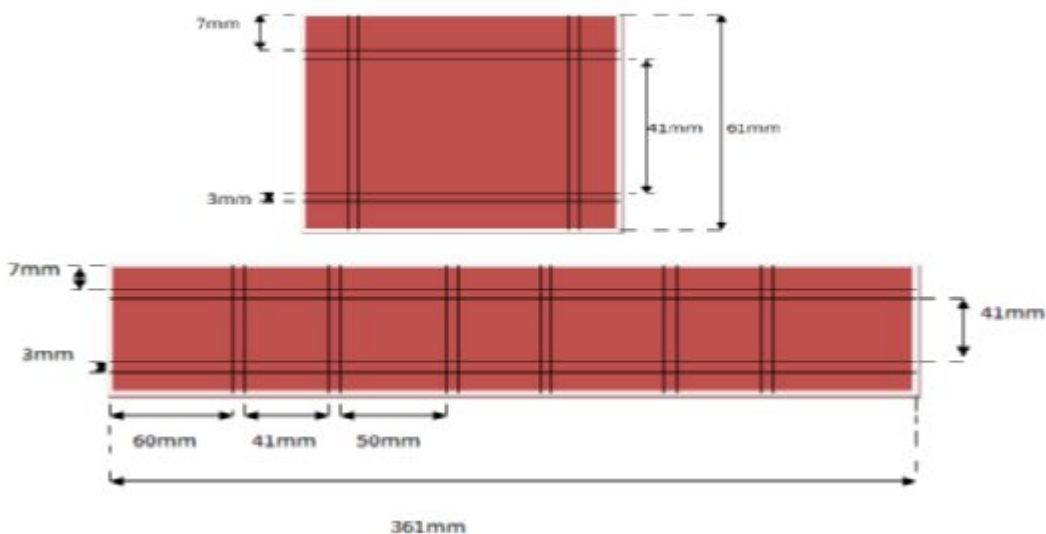


Figure IV.4: dimensions de plaques

Chapitre IV :Description de l'échangeur stockeur et le MCP utilisé

Les deux pièces sont coupées à l'aide d'un ciseau de façon à obtenir après pliage des empoches qui vont loger les pastilles de MCP.



Figure IV.5: Les deux pièces coupées.

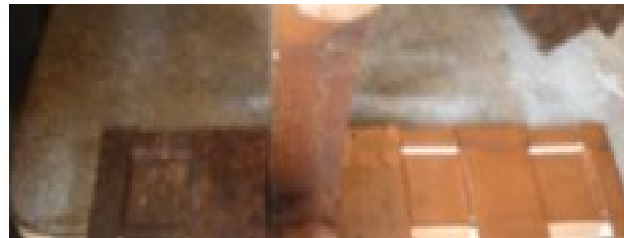


Figure IV.6: Emboutissage de la feuille pour la réalisation des empoches avec pliage.



Figure IV.7 : Pièces finales après emboutissage

Les deux éléments obtenus sont soudés avec brasure pour assurer l'étanchéité.



Figure IV.8 : opération de soudage de pièces réalisées.



Figure IV.9 : Forme finale des pièces après soudage.

Les tubes en cuivre de diamètre intérieur et extérieur respectivement 7,8 et 8 mm sont coupés à l'aide d'une scie à métaux, pour avoir une longueur de 40 cm, comme la montre la figure ci-dessous :



Tubes de 40 cm de longueur.

Figure IV.10: Coupe des tubes pour l'échangeur.

IV.2.2.3 Assemblage des pièces par soudage :

Sur la face extérieure des pièces embouties de forme carrée sont soudés deux tubes parallèles



Figure IV.11: opération d'assemblage des pièces et des tubes.

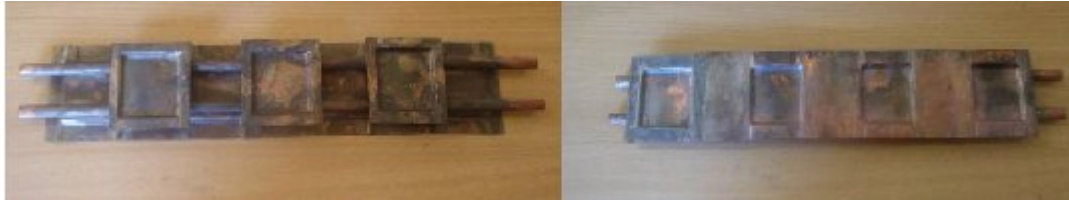


Figure IV.12 : élément de l'échangeur après soudage.

IV 2.2.4 La fixation des tubes de l'chargeur

Des plaques en bois de dimensions (6,5. 50,2cm) ont été coupées. Deux rangées de trous sont ensuite effectuées sur la planche. La distance entre deux rangées est de 3 cm et la distance entre deux trous pour chaque rangée est de 14,2 mm

Ces plaques vont servir d'une part comme support provisoire pour garder la géométrie de l'échangeur le temps de séchage de la colle de silicone utilisée lors de l'introduction de l'MCP et d'autre part, les plaques en bois vont servir de guide pour percer les plaques de cuivre utilisées pour la réalisation des collecteurs.



Figure IV.13 : assemblage avec plaques en bois.

IV 2.2.5 Méthode d'introduction des pastilles de MCP :

Après avoir préparé 102 pastilles de MCP (Pa 60%, Pr 35%, Gr 5%) de dimensions (4.4.6mm), celles-ci sont introduites dans les empoches des éléments de l'échangeur, qui ensuite collées avec le mastic de silicone. Et cette opération est effectuée pour 29 éléments, et ces derniers ont été laissés à l'air libre pour le séchage de la colle pendant 72 heures. A la fin de l'opération 29 éléments collés l'un à côté de l'autre sont obtenus (Figure IV.14)



Figure IV.14 : image de l'échangeur sans collecteur.

IV.2.2.6 Réalisation des collecteurs d'admission et de sortie du fluide caloporteur :

Pour fabriquer les collecteurs, ils ont utilisé des tubes en cuivre de 42 mm de diamètre extérieur et 40 mm de diamètre intérieur.



Figure IV.15 : les collecteurs d'admission et de sortie.

Pour chaque collecteur il faut deux plaques et chacune d'elles est pliée d'un côté comme le montre la figure 3.18. L'une des plaques est percée en utilisant la plaque en bois comme empreinte pour reproduire les mêmes trous.



Figure IV.16 : perçage des collecteurs

L'assemblage des deux plaques pliées donne ainsi la forme du collecteur. Les plaques trouées servant de base pour les collecteurs sont placées sur les extrémités de l'échangeur comme la montre la figure ci-dessous :



Figure IV.17: Image de l'échangeur avec collecteur

Les deux autres plaques non percées, qui servent de couverture, sont ensuite fixées directement sur les plaques percées à l'aide du mastic de silicone, pour donner la forme rectangulaire des deux collecteurs. Des bouchons sont ensuite conçus pour servir de fermeture sur les extrémités des collecteurs ; chaque collecteur porte alors deux bouchons dont l'un est percé pour permettre la fixation d'un tube de 22 mm de diamètre qui va servir d'admission ou de sortie pour le fluide caloporteur comme le montre la figure ci-dessous.



Figure IV.18 : Image finale de l'échangeur

IV 2.2.7 Réalisation du circuit aéraulique :

Le circuit aéraulique a été réalisé avec des plaques de plexiglas qui permet de donner la forme finale avec des dimensions qui permettent d'une part l'emboitage de l'échangeur et la fixation de l'extracteur de l'air, d'autre part la fixation du nid d'abeilles afin de calculer le débit d'air extrait.

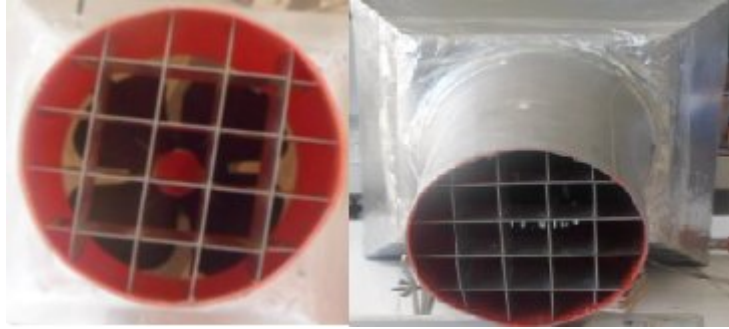


Figure IV.19 :emboutissage de l'échangeur avec le circuit aéraulique.

IV.3 Description du composite [11] :



Figure IV.20 : le composite utilisé (Pa 60%, Pe 35%, Gr 5%)

C'est un MCP organique eutectique, contenant la paraf ine, la perlite et le graphite (Pa 60%, Pe 35%, Gr 5%),le graphite et la perlite sont ajouté au matériau en raison de son importante conductivité thermique, d'après les résultats fournis par le microscope électronique à balayage, ce composite est homogène, compatible et représente une bonne adhérence entre la paraffine et les poudres de perlite et de graphite, la conductivité thermique du composite est de 0.325 w/m.k mesurée à l'aide d'un CT mètre et les différents résultats obtenus des tests de calorimétrie différentielle à balayage ont indiqués que la température du début de fusion du composite est de 53.8°C, la température de pic de fusion est de 55.4°C, la chaleur latente de changement de phase est de 72.45 J/g et la température de in de fusion est de 57.8°C , la quantité de chaleur nécessaire pour faire fondre toute la paraf ine du composite est de 121.26 kJ. Résultats des tests de calorimétrie différentielle à balayage (DSC) sont illustrés sur les figures ci-dessous

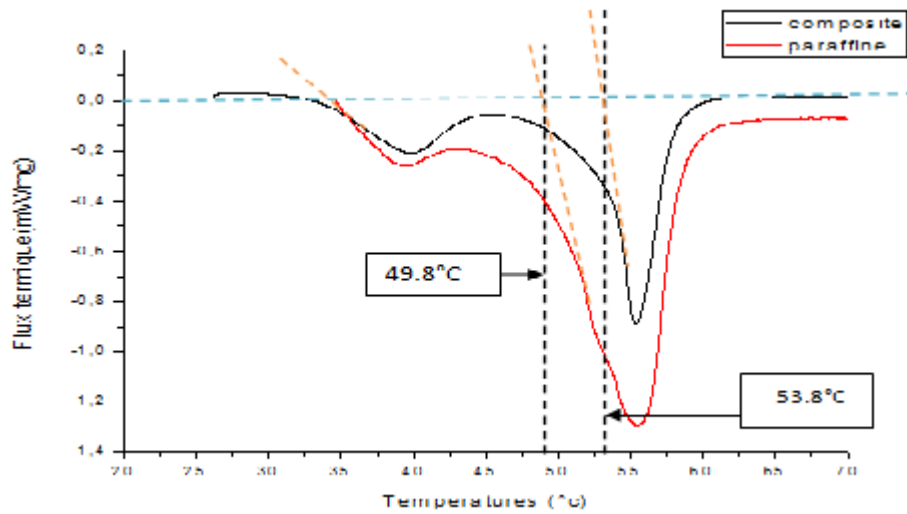


Figure IV.21 : Analyse DSC de la paraffine et du composite MCP/Pr, Gr

IV.3.1 Les matériaux utilisés

Le matériau à changement de phase utilisé dans ce composite est la paraffine (**Pa, Fig : IV.22.1a**). La poudre minérale utilisée est la perlite expansée (**Pr, Fig : IV.22.1b**) et le graphite en poudre (**Gr, Fig : IV.22.1c**) permet d'améliorer la conductivité thermique du composite.



Figure IV.22 : Matériaux utilisés : a) la paraffine b) la perlite c) le graphite

IV.3.1.1 le MCP (la paraffine)

Le choix du MCP pour le stockage de chaleur à basse température dépend :

- L'application à laquelle est destiné le système de stockage
- La température de fonctionnement du MCP
- La stabilité du MCP au stockage et au déstockage

Pour la réalisation de la partie expérimentale de ce travail, Seule une cire de paraffine est disponible, et elle est destinée à la fabrication de bougies, dont la température de fusion avoisine les 60 ° C et comportant des additifs chimiques inconvenables (présence entre autres de +20% de stéarine).

IV.3.1.2 La perlite expansée [12]

La perlite est une roche volcanique siliceuse naturelle de la famille des rhyolites perlitiques. La roche est d'abord concassée et calibrée par granulométrie. La perlite broyée ressemble à du sable. L'expansion industrielle de la perlite est réalisée dans des fours spéciaux, fixes ou rotatifs. Sous l'effet de la chaleur (1200 °C), les grains de perlite s'expandent. Une multitude de cellules fermées se forment à l'intérieur des grains. En effet, la vapeur d'eau expande la matière jusqu'à 15 fois son volume initial.

- **La fiche technique de perlite expansée :**

Composant	Formule chimique	Pourcentage
Silice	Si O ₂	70 - 80 %
Alumine	Al ₂ O ₃	12 - 16 %
Oxyde de sodium	Na ₂ O	2 - 5 %
Oxyde de potassium	K ₂ O	2 - 5 %
Oxyde de calcium	CaO	0 - 2 %
Oxyde de magnésium	MgO	0 - 1 %
Oxyde de fer	Fe ₂ O ₃	0 - 1 %
Eau libre et liée	H ₂ O liée	< 1 %

Tableau : IV.1 : Constituons de la perlite expansée

- **Les propriétés de la perlite expansée :**

- Bon isolant thermique,
- Imputrescible,
- Inaltérable,
- Non toxique,
- 100 % écologique,
- Incombustible,
- Matériau léger,
- Résistant à la compression et au poinçonnement

IV.3.1.3 Le graphite [13]

Le graphite naturel est un minéral de carbone (C) élémentaire, de structure cristalline hexagonale. Sa couleur varie du noir à gris-noir. C'est un minéral tendre, flexible, il est caractérisé par :

- Sa faible densité qui varie de 2,1 à 2,3 ;
- Son point de fusion très élevé (3500°C) ;

Le graphite est une substance inerte qui résiste à l'attaque de la plupart des produits chimiques. C'est un excellent conducteur d'électricité et de chaleur.

Dans ce travail, on a utilisé le graphite synthétique, il est de même composition que le graphite naturel et est obtenu par graphitisation (cuisson entre 2600 et 3000°C) d'un mélange de coke de pétrole et de bitume pré-cuit. Ce traitement permet de resserrer les pores et d'obtenir des grains de graphite dont le diamètre est de l'ordre du micromètre. Il est plus pur environ (99% de carbone) que le graphite naturel et offre une meilleure conductivité thermique et électrique ainsi qu'une plus grande résistance chimique.

En raison de ses bonnes propriétés physique et chimique tels que la neutralité chimique, la bonne résistance à la chaleur, la bonne conductivité thermique et électrique, le faible coefficient d'expansion thermique, et le faible coefficient d'absorption des rayons X et des électrons, il est

Chapitre IV :Description de l'échangeur stockeur et le MCP utilisé

utilisé dans de nombreux domaines tels que la fabrication des mines de crayons, réfractaires, creusets et moules, balais de moteurs électriques, garnitures de freins et d'embrayages, joints de pompes, les piles à combustible pour les véhicules.

V.1 Introduction :

La partie expérimentale est l'objectif de notre travail, tout ce qui a été réalisé; les différentes parties de l'échangeur ainsi que la mise au point du MCP seront placés dans un laboratoire et bien sûr avec d'autres éléments tels que la pompe centrifuge, le bain thermostat, ..., et un circuit fermé sera établi. Ce montage expérimental nous permettra de réaliser des expériences et aussi la surveillance des variations des différentes températures et d'autres paramètres au cours du temps pour enfin avoir des résultats qui devront être très précis grâce au thermocouple type K qui offre des caractéristiques idéales pour notre travail . Et enfin tirer des conclusions à partir de ces résultats sur les performances de cet échangeur. Dans ce chapitre, nous allons étaler toutes les parties du montage expérimental et ainsi l'explication des étapes de l'expérience .

V.2 Les appareils de mesure utilisés :

Dans toutes les expériences réalisées nous avons utilisé deux types d'appareils; un hygromètre avec lequel nous avons mesuré le débit d'air extrait par le ventilateur, un thermocouple qui nous a permis de prendre des mesures des températures dans différents endroits.

V.2.1 le thermocouple type K (picolog) [14]



Figure V.1: le thermocouple type K (picolog)

Le thermocouple utilisé pour la mesure de température est du type K, il est constitué de deux fils, l'un est composé du Chromel (Alliage nickel + Chrome) et l'autre est composé de l'Alumelle (Alliage nickel + Aluminium 5% +Silicium) il est utilisable et travaille dans des conditions de températures extrêmes [-200 °C ; 1250°C] leurs inconvénient est la précision, il est relativement difficile d'obtenir des résultats avec une erreur inférieure à 0.1 ; 0.2 °C . La mesure de température est basée sur l'effet Seebeck, c'est un effet thermoélectrique, le phénomène s'explique par l'apparition d'une différence de potentiel à la jonction de deux métaux soumis à une différence de température, cet effet est également à la base de génération d'électricité par effet thermoélectrique.

V.2.1.1 Mode d'utilisation du logiciel picolog recorder

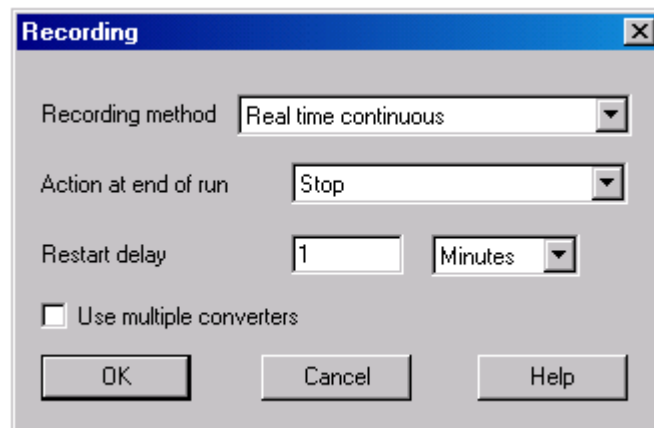
Le thermocouple type K possède un logiciel, appelé Picolog Recorder, ce logiciel nous allons l'installer sur un micro-ordinateur, et bien sûr nous allons suivre toutes les instructions et son mode d'utilisation; nous avons remarqué sur la feuille d'instructions, qu'il a été recommandé de ne pas connecter le USB TC-08, c'est à dire la table d'acquisition, avant que nous ayons installé le

logiciel Picolog Recorder et redémarré l'ordinateur, ensuite pour commencer l'utilisation de l'USB TC-08, nous allons le connecter au port de notre ordinateur en utilisant le câble fourni câble fourni, et puis, nous allons relier un thermocouple à l'une des entrées du thermocouple les connecteurs. Pour terminer l'installation, nous allons sélectionner le TC-08 unité et thermocouple USB et nous allons taper Picolog comme suit:

1. Démarrage Picolog Recorder

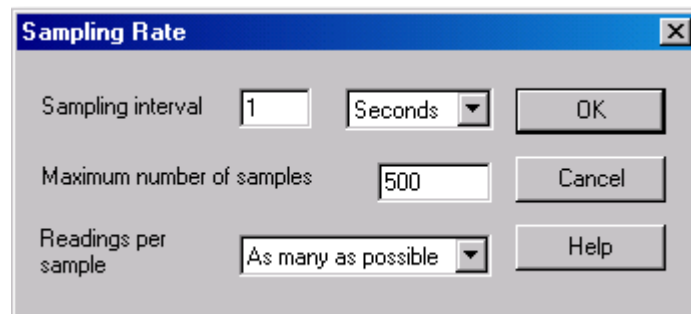
2. Sélectionnez Nouveaux paramètres dans le menu Fichier.

La boîte de dialogue d'enregistrement apparaît:



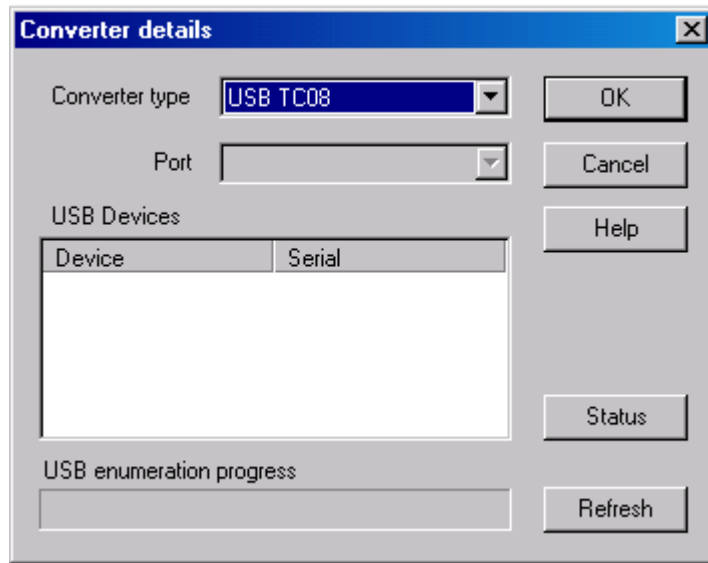
3. Cliquez sur le bouton OK.

La boîte de dialogue Taux d'échantillonnage apparaît



4. Cliquez sur le bouton OK.

La boîte de détails Convertisseur de dialogue apparaît



5. Sélectionnez USB TC-08 dans la liste déroulante des convertisseurs.

Le nom du périphérique et le numéro de série doit apparaître dans le volet des périphériques USB et

la barre de progression de l'énumération USB étendre progressivement à 100%. Si la barre de progression ne démarre pas en mouvement, débrancher et rebrancher le TC-08 USB, puis cliquez sur

Rafraîchir.

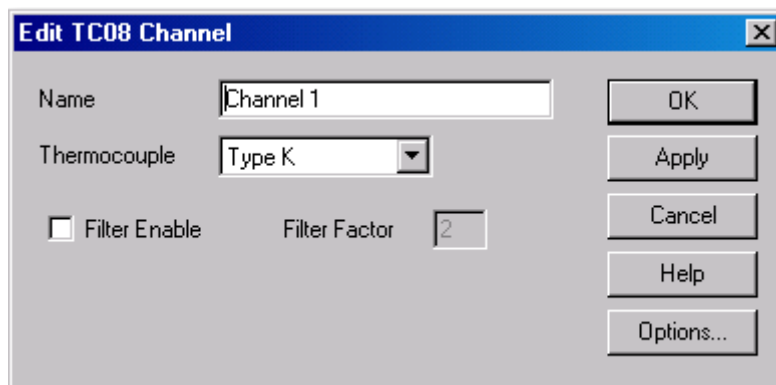
6. Dans le volet Périphériques USB, sélectionnez l'USB TC-08. Si vous utilisez plus d'un USB TC-08, vérifier le numéro de série sur le fond de l'appareil afin que vous sachiez dont l'un pour sélectionner dans la liste.

7. Cliquez sur le bouton OK.

La boîte de dialogue suivante apparaît.

8. Dans la fenêtre TC-08 canaux, double-cliquez sur le canal 1 utilisé.

La boîte de dialogue Modifier TC-08 canaux apparaît

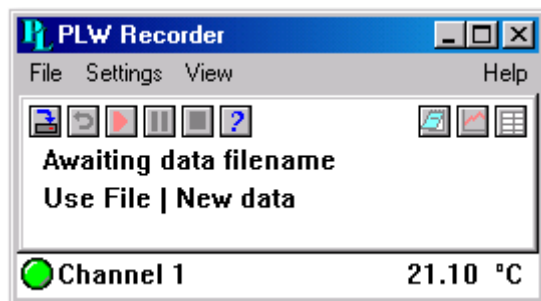


9. Dans la liste déroulante Thermocouple, sélectionnez le type de thermocouple que vous êtes utiliser et cliquez sur OK.

La boîte de dialogue TC-08 canaux apparaît.

10. Cliquez sur OK.

Le canal 1 doit maintenant apparaître dans la fenêtre du moniteur avec la température actuelle en train de lire.



V.2 .2 hygromètre (testo 445) [15]



Figure V.2 : Hygromètre (testo 445)

Hygromètre (testo 445) dispose de deux entrées pour le raccordement d'une large gamme de sondes pour les mesures sur les installations de climatisation et de ventilation. L'appareil enregistre les valeurs du flux dans le canal, à la sortie du canal ou sur les installations d'aspiration. Cet appareil polyvalent mesure ou calcule en outre des paramètres tels que le débit volumétrique, la qualité de l'air ambiant, la température, l'humidité relative, le point de rosée, l'humidité absolue, le taux d'humidité, l'enthalpie, la pression et le CO. Une simple pression sur un bouton permet au testo 445 d'afficher les valeurs actuelles, la dernière valeur mesurée, ainsi que les valeurs minimales, maximales et moyennes. Les données de mesure peuvent également être enregistrées en fonction du lieu de mesure, puis analysées sur PC ou documentées directement sur site au moyen de l'imprimante rapide Testo.

V.3 technique de mesure du débit d'air :

Pour mesurer la vitesse de l'écoulement généré par le système de ventilation nous devons disposer d'un hygromètre qui doit être bien fixé par un support pour éviter la perturbation des mesures car si nous le tenions par la main, l'hygromètre n'aurait pas donné des débits justes et précis à cause des mouvements de la main, et c'est pour cette raison que nous avons cherché ce

support, nous avons choisi ce type d'hygromètre qui est testo 445, grâce à son haut degré de fiabilité c'est à dire l'erreur qu'il donne est à peu près comprise entre 0,1 à 0,6. Pour une bonne mesure du débit d'air nous avons placé l'hygromètre au centre de l'axe du diamètre extérieur du circuit aéraulique et nous l'avons éloigné de 2 cm de ce dernier. Cet hygromètre de type testo 445 nous permet aussi de prendre des mesures du degré hygrométrique de l'air aspiré par le ventilateur ainsi que sa vitesse.



Figure V.3 : technique de mesure du débit d'air

Au bout quelques secondes, les variations affichées sur l'écran se sont stabilisées à 2,45 m/s, nous avons donc retenu cette valeur.

nous avons le débit massique de l'air donné sous forme : $\dot{m} =$

: La valeur de la masse volumique de l'air est de : 1.293 kg/

: La vitesse de l'écoulement de l'air

: La section de passage de l'écoulement qui a pour diamètre : 10 cm

A.N : $\dot{m} = \rho \cdot v \cdot S$ /

V.4 L'étalonnage.

Etalonnage: opération qui, dans des conditions spécifiées, établit en une première étape une relation entre les valeurs et les incertitudes de mesure associées qui sont fournies par des étalons et les indications correspondantes avec les incertitudes associées, puis utilise en une seconde étape cette information pour établir une relation permettant d'obtenir un résultat de mesure à partir d'une indication.

- Un étalonnage peut être exprimé sous la forme d'un énoncé, d'une fonction d'étalonnage, d'un diagramme d'étalonnage, d'une courbe d'étalonnage ou d'une table d'étalonnage. Dans certains cas, il peut consister en une correction additive ou multiplicative de l'indication avec une incertitude de mesure associée.

- Il convient de ne pas confondre l'étalonnage avec l'ajustage d'un système de mesure, souvent appelé improprement « auto-étalonnage », ni avec la vérification de l'étalonnage.[16]

V.4.1 L'étalonnage du thermocouple.

L'étalonnage du thermocouple est inévitable avant de commencer l'expérience, nous avons un appareil de mesure de référence un thermomètre qui sera placé dans un bain en parallèle avec l'ensemble des thermocouples et de sorte que ces thermocouples prennent seulement la température de l'eau ce bain est réglé à une température avoisinant les 40°C, ces thermocouples sont reliés à une table d'acquisition qui est à son tour branchée à un ordinateur.

La figure ci-dessous montre le montage réalisé :

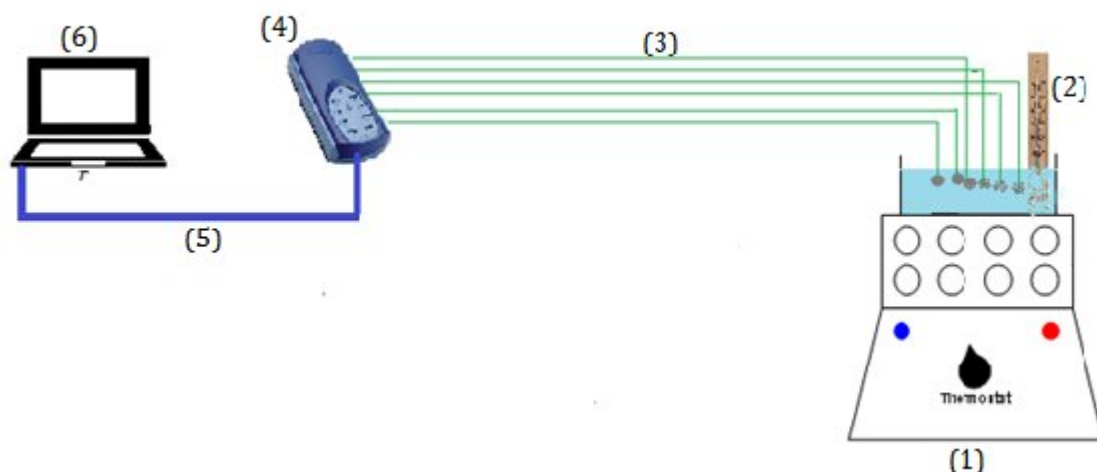


Figure V.4 : le schéma de l'étalonnage du thermocouple

1 : bain thermostat ; 2 : un thermomètre ; 3 : les thermocouples ; 4 : la table d'acquisition ; 5 : câble USB ; 6 : ordinateur.

Les valeurs des températures captées par les thermocouples et qui sont affichées sur le logiciel PW avoisinent les 40 °C , en comparaison avec la valeur de la température révélée par le thermomètre , cette dernière est quasiment la même avec celles qui sont affichées sur le logiciel PW.

Les figures ci-dessous montrent les résultats des différents thermocouples :

Temps (s)	Thermocouple (1)	Thermocouple (2)	Thermocouple (3)	Thermocouple (4)	Thermocouple (5)	Thermocouple (6)
0	40,43	40,34	40,08	40	39,89	40,27
20	40,38	40,19	39,89	40,19	39,82	40,21
40	40,34	40,2	40,16	39,87	39,81	40,12
60	40,36	40,31	40,16	39,84	39,79	40,06
80	40,34	40,17	39,99	39,85	39,76	40,08
100	40,31	40,25	40,12	39,82	39,74	40,06
113	40,32	40,25	40,14	39,82	39,73	40,06

Tableau V.1 : les résultats de l'étalonnage pour les différents thermocouples

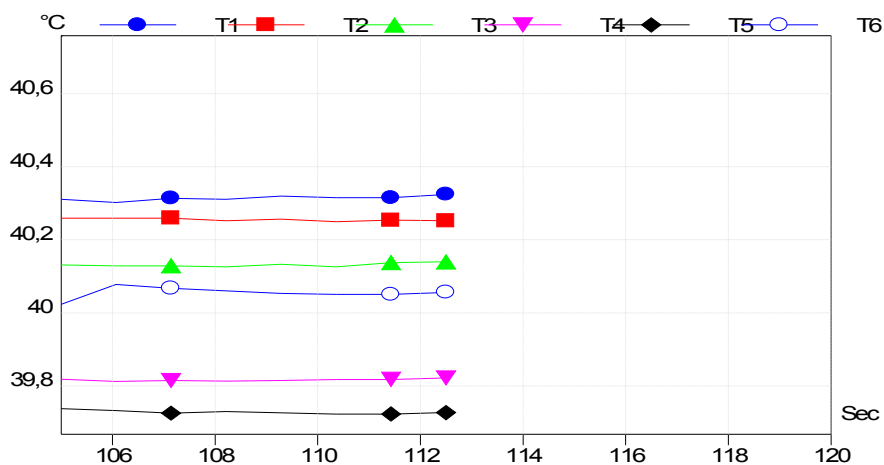
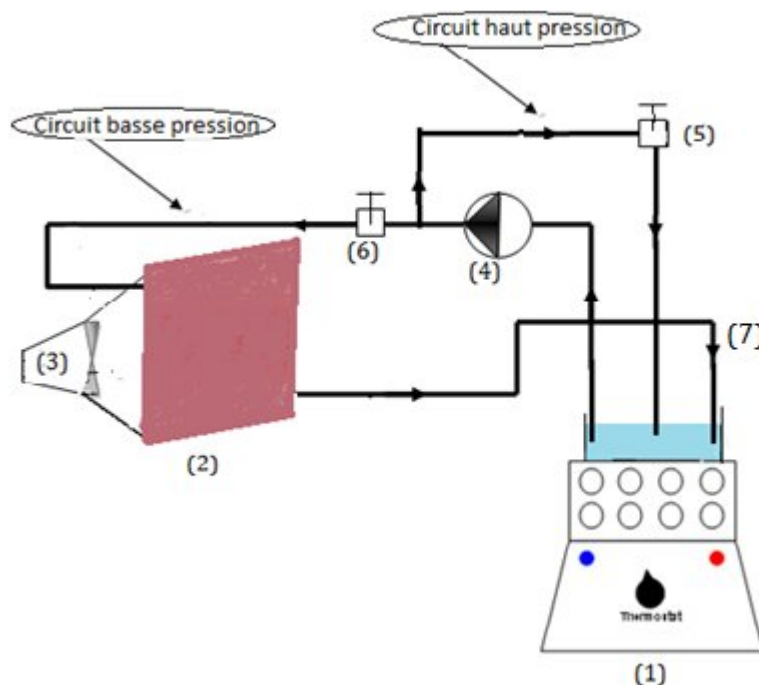


Figure V.4 : les résultats de l'étalonnage pour les différents thermocouples

V.5 La description du montage expérimental :

Le montage expérimental réalisé comporte les éléments suivants :



FigureV.5 : Schéma de principe du montage expérimental

1 : bain thermostat ; **2** : l'échangeur de chaleur ; **3** : ventilateur ; **4** : pompe centrifuge ; **5** : une vanne (pour le circuit haut pression) ; **6** : une vanne (pour le circuit basse pression) ; **7** : la tuyauterie en plastique.

La première étape que nous avons fait est l'alimentation de l'échangeur grâce à une pompe centrifuge, cette pompe aspire de l'eau chaude à partir d'un bain thermostat et son débit minimal aspiré est déjà assez élevé pour nos conditions de travail, pour cela nous avons créé deux circuits, un circuit basse pression reliés directement au conduit d'admission de l'échangeur, et l'autre, le circuit haute pression, dans lequel l'eau chaude retourne dans le bain thermostat.

Nous avons placé deux vannes, la vanne **(6)** nous l'avons placé entre la pompe et le conduit d'admission de l'échangeur, et la vanne **(5)** nous l'avons placé dans le circuit haute pression, le rôle de ces vannes est la régulation du débit d'eau chaude. La sortie de l'échangeur est reliée au bain thermostat pour avoir un système fonctionnant en circuit fermé.

La circulation de l'eau chaude dans ce circuit est assurée par une tuyauterie faite en plastique.



Figure V.6 : montage expérimental

V.6 La méthode d'installation des thermocouples :

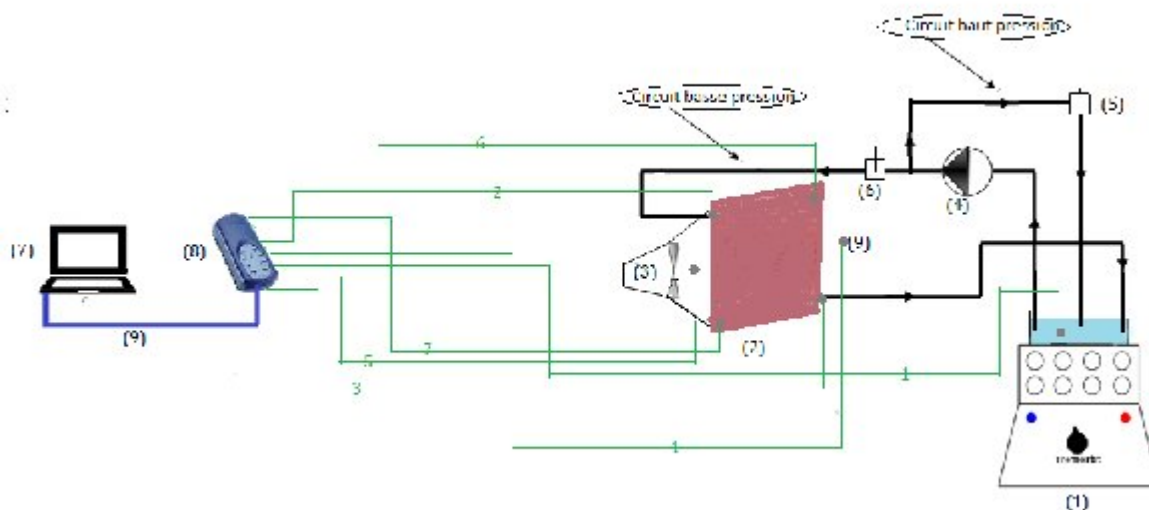


Figure V.7 : Schéma d'installation des thermocouples

1 : bain thermostat ; **2** : l'échangeur de chaleur ; **3** : ventilateur ; **4** : pompe centrifuge ; **5** : une vanne (pour le circuit haute pression) ; **6** : une vanne (pour le circuit basse pression) ; **7** : ordinateur ; **8** : la table acquisition ; **9** : câble USB.

- **le thermocouple (1)**, nous l'avons placé dans le bain thermostat étant donné que nous avons un circuit fermé et un éventuel changement de température dans ce bain n'est pas à écarter.
- **Le thermocouple (2)**, nous l'avons placé au centre de l'axe du conduit d'admission, juste à l'entrée de l'échangeur, pour qu'il n'y ait aucun contact entre le thermocouple et la paroi, et ainsi la température mesurée par le thermocouple ne sera celle de l'eau et non celle de la paroi.
- **Le thermocouple (3)**, nous l'avons placé au centre de l'axe du conduit de sortie, juste à la sortie de l'échangeur, pour éviter tout contact entre le thermocouple et la paroi, de cette façon nous aurons mesuré exactement la température de l'eau chaude au lieu de la température de la paroi.

- **Le thermocouple (4)**, nous l'avons placé devant l'échangeur, au centre de son axe, éloigné de 20 cm ; ce thermocouple est placé à une distance suffisamment importante pour que la vapeur d'eau qui est chauffée par le bain thermostat n'ait pas d'effet sur notre mesure de température de l'air entrant dans l'échangeur.
- **Le thermocouple (6)**, nous l'avons placé sur la paroi, au niveau de la partie haute de l'ailette, la sonde du thermocouple est couverte par un papier aluminium collant, pour éviter ainsi de mesurer la température ambiante, de cette manière nous aurons mesuré la température de la paroi de l'ailette.
- **Le thermocouple (7)**, nous l'avons placé sur la paroi, au niveau de la partie basse de l'ailette, la sonde du thermocouple est couverte par un papier aluminium collant, pour éviter ainsi de mesurer la température de l'air ambiant, de cette façon nous aurons mesuré la température de la paroi de l'ailette inférieure.

V.7 La Description de la méthode expérimentale

Maintenant que nous avons fini l'installation et l'organisation des appareils expérimentaux; du test de fiabilité du thermocouple au logiciel Picolog Recorder installé sur l'ordinateur en passant par le placement des thermocouples dans les différents endroits du montage expérimental et toutes autres étapes, nous allons à présent commencer les expériences. Dans nos essais, nous allons à chaque fois faire varier le débit de l'eau, par la régulation des vannes des circuits basse et haute pression, le débit de l'eau, on le mesure par la quantification de l'eau contenue dans un Becher au bout d'un temps t .

On fait aussi varier la température de l'eau contenue dans le bain thermostat par la régulation de ce dernier, car nous souhaitons élargir notre étude en réalisant plusieurs essais et donc à des températures et débits d'eau différents

Nous réalisons un essai par jour pour permettre au composite de prendre son état initial, parce que après chaque expérience le matériau à changement de phase fond et pour qu'il se transforme à l'état solide on le laisse quelques heures pour qu'il prenne la température ambiante.

Nous avons effectué une série de six expériences en modifiant le débit dans l'intervalle [0,016-0,076 kg/s] et en envisageant deux cas : avec ventilation (convection forcée) et sans ventilation.

1-Premier essai : Débit d'eau estimé à 0.016 kg/s , température du bain 90°C et température ambiante =30 °C.

Les tableaux ci-dessous montrent l'évolution des températures au cours du temps dans les deux cas, avec et sans ventilation

a) Avec ventilation

Temps (s)	Température d'entrée d'eau (°C)	Température de sortie d'eau (°C)	Ecart de température de l'eau Entrée-Sortie	Température de sortie d'air (°C)	Température première ailette (°C)	Température dernière ailette (°C)
60	78,2	65,2	13,0	31,7	46,0	32,0
200	77,2	66,3	10,9	36,9	46,5	41,2
400	77,5	67,1	10,4	39,8	48,4	45,2
600	78,0	68,0	10,0	39,9	49,9	47,9
800	78,6	68,5	10,1	40,7	50,6	48,0
1000	79,2	69,0	10,2	41,2	50,9	50,0
1200	79,7	69,6	10,1	41,8	51,7	51,0
1400	80,5	69,4	11,1	42,5	52,0	51,3
1600	80,6	69,3	11,3	42,7	52,0	51,4
1800	80,8	69,2	11,6	42,8	52,3	51,6
2000	80,9	69,1	11,8	43,0	52,6	51,8

Tableau VI.1 : Evolution des températures au cours du temps avec ventilation. (Débit d'air = 0.024 kg/s)

b) Sans ventilation

Temps (s)	Température d'entrée d'eau (°C)	Température de sortie d'eau (°C)	Ecart de température de l'eau Entrée-Sortie	Température première ailette (°C)	Température dernière ailette (°C)
60	82,0	70,2	11,8	61,2	46,3
200	80,2	70,8	9,4	65,8	62,9
400	80,7	71,3	9,4	68,2	65,5
600	80,8	72,4	8,4	68,8	67,1
800	81,1	73,6	7,5	69,1	67,9
1000	81,5	74,1	7,4	70,3	68,4
1200	81,7	74,2	7,5	71,7	70,0
1400	81,7	74,3	7,4	72,4	70,8
1600	81,8	74,5	7,3	72,7	71,9
1800	81,9	74,7	7,2	73,0	72,7
2000	82,0	75,2	6,8	73,6	73,2

Tableau VI.2 : Evolution des températures au cours du temps sans ventilation.

c) Courbes de températures :

Nous représentons sur les figures ci-dessous l'évolution des températures au cours du temps pour les deux expériences avec et sans ventilation :

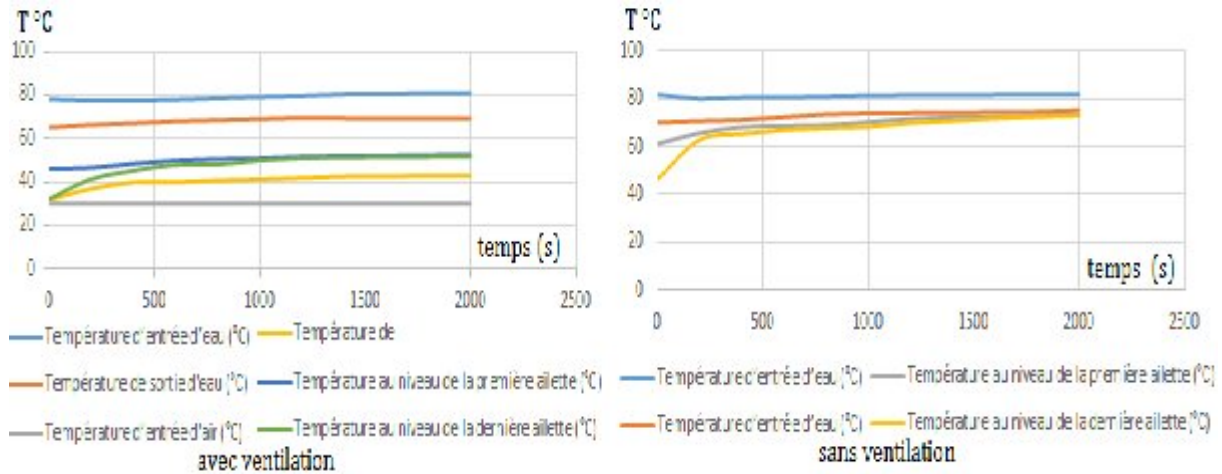


Figure VI.1 : Représentation graphique de l'évolution des températures au cours du temps avec et sans ventilation pour le premier essai.

a) Analyse :

La température de l'air à la sortie de l'échangeur n'est pas élevée au début de l'expérience, les parois de l'échangeur n'étant pas encore suffisamment réchauffées par l'eau, mais elle augmente progressivement, jusqu'à atteindre une valeur de 43°C pour l'échangeur ventilé, assez éloignée cependant de la température de surface des ailettes qui est de 50°C environ.

Les ailettes de la partie haute de l'échangeur s'échauffent plus rapidement que les ailettes situées en sortie, étant donné que dans la conception de l'échangeur le conduit d'admission en eau chaude est placé dans cette zone. La température au niveau de la partie basse de l'échangeur remonte au bout de quelques minutes (200s environ) de 32°C à 41°C pour l'échangeur ventilé et de 46 jusqu'à 63°C en absence de ventilation. Au bout d'un quart d'heure de fonctionnement, le régime stationnaire est atteint: toutes les températures se stabilisent.

L'écart de température de l'eau entre l'entrée et la sortie rend compte de l'efficacité de l'échangeur. Comme attendu, cet écart est plus important sur toute la durée de l'expérience pour l'échangeur fonctionnant en convection forcée. Cependant on peut noter une différence de comportement quand la température d'entrée de l'eau dans l'échangeur augmente: par e et la sortie rend compte de l'efficacité de l'échangeur. Comme attendu, cet écart est plus important sur toute la durée de l'expérience pour l'échangeur fonctionnant en convection forcée. Cependant on peut noter une différence de comportement quand la température d'entrée de l'eau dans l'échangeur augmente: par comparaison, le rendement croît légèrement dans le cas du régime forcé tandis qu'il baisse sensiblement en convection naturelle. L'explication est que la fusion du MCP n'intervient pas dans l'échangeur ventilé.

Dans l'autre cas, la température de parois est tout de suite plus importante que la température de fusion; la diminution du rendement est sans doute due dans ce cas à une baisse du débit de cire en fusion. En effet, la température des parois est 46,48°C pour l'essai avec ventilation, et 65,77°C sans ventilation (à t= 200s): le système de ventilation, en refroidissant les parois, n'a pas permis dans cet essai le changement d'état du MCP.

d) Evaluation des flux de chaleur moyens mis en jeu dans l'échangeur :

Ces flux sont calculés à chaque intervalle de temps Δt qui sépare deux séries de mesures successives des températures.

Flux cédé par l'eau: $\phi = \dot{m}_e \cdot \frac{(T_{e1}) - (T_{e2})}{\Delta t}$

T_{e1} : Température de l'eau à l'entrée de l'échangeur.

T_{e2} : Température de l'eau à la sortie de l'échangeur

$\dot{m}_e = 0.019 \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$; $c_{p_e} = 4182 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$

Flux récupéré par l'air: $\phi = \dot{m}_a \cdot \frac{(T_{a1}) - (T_{a2})}{\Delta t}$

T_{a1} : Température de l'air à l'entrée de l'échangeur

T_{a2} : Température de l'air à la sortie de l'échangeur

$\dot{m}_a = 0.024 \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$; $c_{p_a} = 1006 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$

Flux absorbé par les parois: $\phi = m \cdot c_p \cdot \frac{(T_{pe}) - (T_{ps})}{\Delta t}$

T_{pe} : Température de la paroi au niveau de la première ailette.

T_{ps} : Température de la paroi au niveau de la dernière ailette.

$m = 8.755 \text{ kg}$; $c_p = 381 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$

Flux absorbé par le MCP: $\phi = \phi - (\phi + \phi)$

Les 2 tableaux ci-dessous représentent l'évolution des flux de chaleur au cours du temps avec ventilation et sans ventilation:

temps (s)	Le flux cédé par l'eau (w)	Le flux récupéré par l'air (w)	Le flux absorbé par les parois (w)	Le flux absorbé par le MCP (w)
0-200	800	104	80	614
200-400	713	202	49	461
400-600	682	238	35	409
600-800	672	249	7	417
800-1000	680	264	19	395
1000-1200	680	278	15	386
1200-1400	709	293	5	410
1400-1600	749	304	1	444
1600-1800	766	307	4	454
1800-2000	782	311	4	467

Tableau VI.3 : Evolution des flux au cours du temps avec ventilation pour le premier essai.

temps (s)	Le flux cédé par l'eau (w)	Le flux absorbé par les parois (w)	Le flux absorbé par le MCP (w)
0-200	709	176	532
200-400	628	41	587
400-600	595	18	577
600-800	531	9	522
800-1000	498	14	484
1000-1200	498	25	473
1200-1400	498	12	485
1400-1600	491	11	480
1600-1800	485	9	475
1800-2000	468	9	459

Tableau VI.4 : l'évolution des flux au cours du temps sans ventilation pour le premier essai

Nous représentons sur les figures ci-dessous l'évolution des flux de chaleur au cours du temps pour les deux cas : avec et sans ventilation :

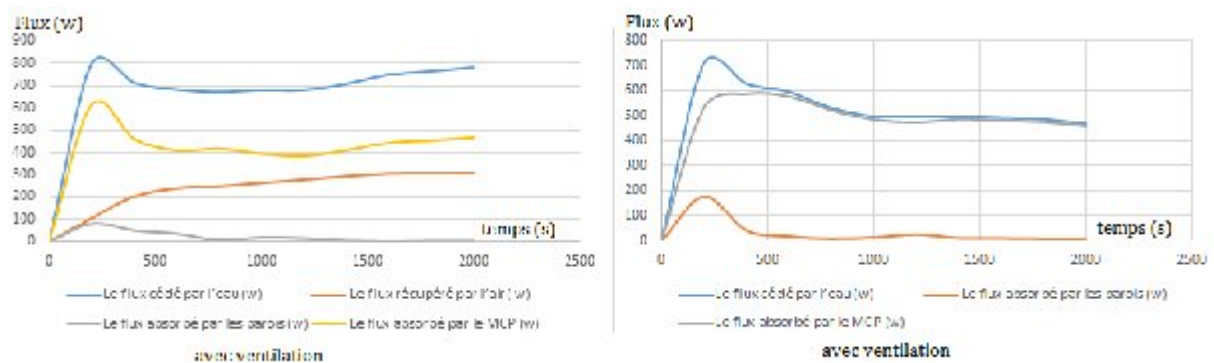


Figure VI.2 Représentation graphique de l'évolution des flux au cours du temps avec et sans ventilation pour le premier essai

Analyse de l'évolution des flux au cours du temps:

Le flux absorbé par les parois est maximal entre $t = 0s$ et $t = 200s$, en raison du grand écart de température initial entre le fluide caloporteur et les parois de l'échangeur; ce qui explique par la même raison que le flux récupéré par l'air soit faible à ce moment de l'expérience. Ce flux croît au fur et à mesure que les parois s'échauffent et se stabilise à une valeur de 300W environ en régime établi dans le cas de l'échangeur ventilé.

L'eau chaude cède un flux de chaleur important entre $t = 0s$ et $t = 200s$ au moment où les parois de l'échangeur sont encore froides et baisse par la suite. Dans l'échangeur sans convection la quantité de chaleur absorbée est due essentiellement à la fusion de la cire car la température de paroi des ailettes a dépassé la température de fusion du MCP. Dans

le cas de l'échangeur ventilé, le flux absorbé par l'eau croît -la température de l'eau en entrée augmente alors qu'elle diminue en sortie- ; cela est due à l'augmentation de la différence de température avec l'air.

2- Deuxième essai :

Conditions d'expérience : Débit de l'eau est estimé à 0.048 kg/s, température du bain 90°C et température ambiante =37 °C.

Les tableaux ci-dessous montrent l'évolution des températures au cours du temps dans les deux cas, avec et sans ventilation

Temps (s)	Température d'entrée d'eau (°C)	Température de sortie d'eau (°C)	Ecart de température de l'eau Entrée-Sortie	Température d'entrée d'air (°C)	Température de sortie d'air (°C)	Température au niveau de la première ailette (°C)	Température au niveau de la dernière ailette (°C)
0	80,3	75,0	5,3	37	39,2	59,6	51,0
200	78,9	74,3	4,6	37	49,5	60,2	57,0
400	77,9	73,7	4,2	37	50,4	61,0	60,2
600	77,7	73,3	4,3	37	51,7	61,4	60,4
800	77,5	73,0	4,5	37	51,9	61,7	61,3
1000	77,5	73,0	4,5	37	51,5	61,9	61,4
1200	77,2	73,0	4,2	37	51,5	62,6	61,5
1400	78,4	72,4	6,0	37	51,5	62,6	61,6
1600	80,0	71,5	8,5	37	51,4	62,8	61,6
1800	79,9	71,7	8,2	37	51,4	62,8	61,6
2000	79,8	71,8	8,0	37	51,5	62,3	61,4

Tableau VI.5 : Evolution des températures au cours du temps avec ventilation (Débit de l'air à 0.024 kg/s)

Temps (s)	Température d'entrée d'eau (°C)	Température de sortie d'eau (°C)	Ecart de température de l'eau Entrée-Sortie	Température au niveau de la première ailette (°C)	Température au niveau de la dernière ailette (°C)
0	81,8	75,5	6,3	67,4	54,8
200	80,2	76,3	3,9	70,0	60,2
400	80,6	76,8	3,8	72,4	65,5
600	81,5	77,1	4,4	72,9	69,2
800	81,7	77,3	4,4	73,1	70,6
1000	81,9	77,6	4,3	73,6	71,9
1200	81,9	77,7	4,2	73,8	72,6
1400	81,8	77,9	3,9	73,9	72,7
1600	82,1	77,9	4,2	73,9	72,9
1800	82,0	78,0	4,0	74,1	73,5
2000	82,0	78,1	3,9	74,1	73,7

Tableau VI.6 : Evolution des températures au cours du temps sans ventilation

Nous représentons sur les figures ci-dessous l'évolution des températures au cours du temps pour les cas avec et sans ventilation :

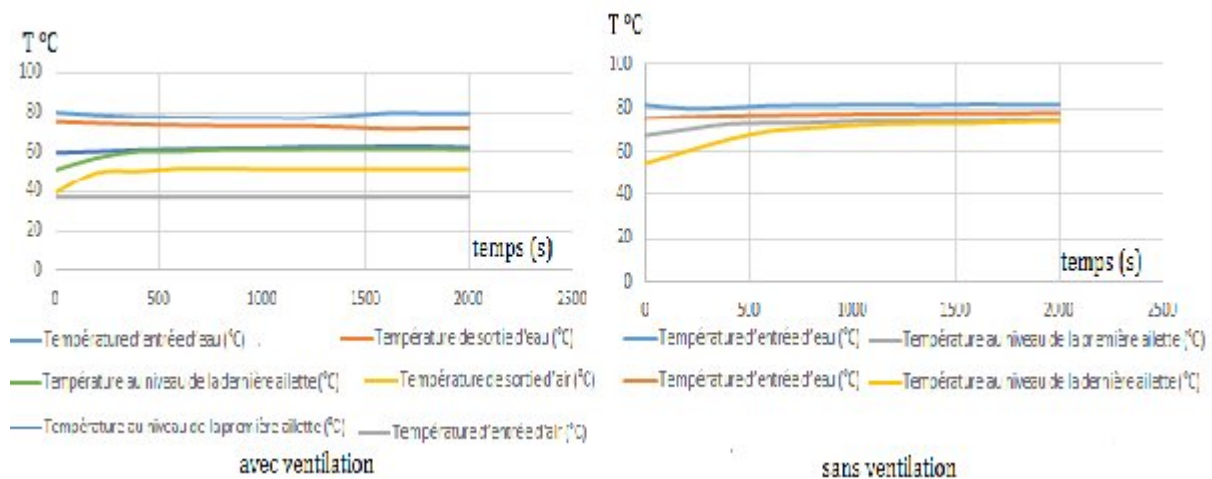


Figure VI.3 : Evolution des températures au cours du temps avec et sans ventilation

Analyse de l'évolution des températures pour le 2^{ème} essai avec et sans ventilation :

Dans cet essai le débit d'eau est plus important ; ce qui a pour effet de placer l'échangeur à un niveau de température plus élevé, d'autant plus que la température ambiante pour cet essai (37°C) est supérieure à celle de l'expérience précédente (30°C). Même dans le cas de la ventilation, la température de paroi rattrape rapidement la température de fusion du MCP.

Comme dans le cas précédent, l'écart de température entrée-sortie pour le fluide chaud de l'échangeur avec ventilation est plus important en raison du coefficient d'échange air-eau plus grand en convection forcée.

Les tableaux ci-dessous montrent l'évolution des flux au cours du temps dans les deux cas avec et sans ventilation :

temps (s)	Le flux cédé par l'eau (w)	Le flux récupéré par l'air (w)	Le flux absorbé par les parois (w)	Le flux absorbé par le MCP (w)
0-200	1002	178	55	769
200-400	892	312	34	546
400-600	962	338	5	519
600-800	881	356	11	514
800-1000	890	355	3	533
1000-1200	869	350	6	513
1200-1400	1027	349	2	676
1400-1600	1452	348	2	1102
1600-1800	1677	348	1	1326
1800-2000	1630	349	1	1288

Tableau VI.7 : Evolution des flux au cours du temps avec ventilation pour le deuxième essai.

temps (s)	Le flux cédé par l'eau (w)	Le flux absorbé par les parois (w)	Le flux absorbé par le MCP (w)
0-200	1016	68	948
200-400	763	63	699
400-600	816	36	780
600-800	886	13	872
800-1000	879	15	863
1000-1200	856	7	849
1200-1400	815	1	814
1400-1600	815	2	812
1600-1800	831	6	824
1800-2000	798	2	795

Tableau VI.8 : l'évolution des flux au cours du temps sans ventilation pour le deuxième essai

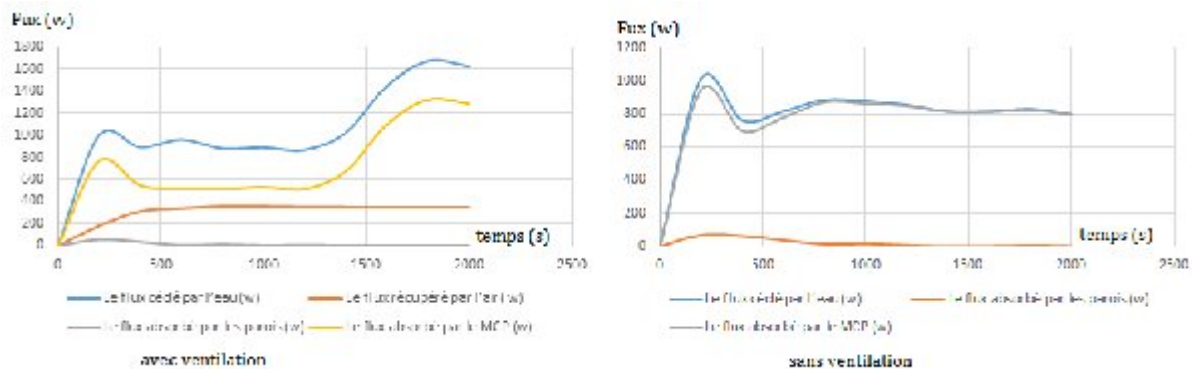


Figure VI.4 : Représentation de l'évolution des flux de chaleur au cours du temps pour les cas avec et sans ventilation

Analyse de l'évolution des flux de chaleur avec et sans ventilation :

Dans l'échangeur ventilé, le flux de chaleur cédé par l'eau connaît une hausse assez franche (presque le double) après vingt minutes, ce qui devrait correspondre à une transition du mode d'échange de chaleur dans les capsules contenant le MCP ; c'est ce que suggère l'évolution de la température de paroi des capsules -et donc de leur contenu- qui présente un palier dans cette phase de l'expérience ; les quantités de chaleur absorbées par la cire y sont beaucoup plus élevées, ce qui représente un autre argument en faveur de l'hypothèse du changement de phase.

Dans l'échangeur non ventilé, le flux cédé au composite, que nous n'avons pas dissocié du flux cédé à l'air en mode de convection naturelle (relativement faible en comparaison avec le flux consommé par la fusion de la cire), est presque constant pendant le temps de

l'expérience (35 mn environ), si l'on excepte les premiers instants où le transfert de chaleur par mode sensible est prédominant.

3- Troisième essai :

Débit d'eau estimé à 0.02 Kg/s, température du bain 70°C, et température ambiante =30 °C.

Les tableaux ci-dessous montrent l'évolution des températures au cours du temps dans les deux cas, avec et sans ventilation

Temps (s)	Température d'entrée d'eau (°C)	Température de sortie d'eau (°C)	Ecart de température de l'eau Entrée-Sortie	Température d'entrée d'air (°C)	Température de sortie d'air	Température au niveau de la première ailette (°C)	Température au niveau de la dernière ailette (°C)
0	66,3	56,9	9,4	27,0	35,0	42,5	41,7
200	67,1	58,2	8,9	27,1	36,9	44,5	44,1
400	66,8	58,4	8,4	30,4	38,4	46,4	46,0
600	67,1	58,8	8,3	31,6	38,8	46,9	46,6
800	66,7	58,6	8,1	29,2	38,9	47,2	47,0
1000	66,7	58,5	8,2	29,7	38,6	47,2	46,9
1200	66,9	58,3	8,6	30,4	38,3	47,1	46,9
1400	66,7	58,5	8,2	28,8	39,1	47,0	46,8
1600	66,4	58,5	7,9	28,0	38,8	46,9	46,7
1800	66,4	58,1	8,3	28,4	38,7	46,8	46,7
2000	66,6	58,2	8,4	28,5	38,8	46,9	46,8

Tableau VI.9 : Evolution des températures au cours du temps avec ventilation (Débit de l'air à 0.024 kg/s)

Temps (s)	Température d'entrée d'eau (°C)	Température de sortie d'eau (°C)	Ecart de température de l'eau Entrée-Sortie	Température au niveau de la première ailette (°C)	Température au niveau de la dernière ailette (°C)
0	67,8	57,7	10,1	43,7	42,1
200	68,2	59,3	8,9	44,9	43,1
400	68,3	62,5	5,8	47,6	45,6
600	68,5	62,9	5,6	47,7	46,8
800	68,8	63,2	5,6	48,2	47,1
1000	68,8	63,5	5,3	48,8	48,0
1200	68,8	63,9	4,9	48,7	48,0
1400	68,7	64,1	4,6	48,8	47,9
1600	68,8	64,4	4,4	49,1	48,3
1800	68,8	64,6	4,2	49,2	48,5
2000	68,8	64,7	4,1	49,2	48,7

Tableau VI.10 : Evolution des températures au cours du temps sans ventilation

Nous représentons sur les figures ci-dessous l'évolution des températures au cours du temps avec et sans ventilation :

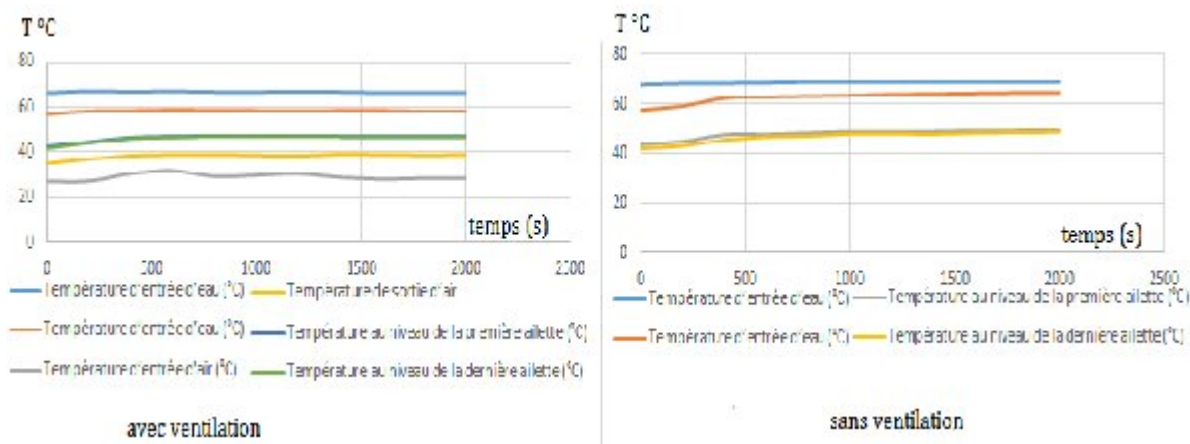


Figure VI.5 : Représentation graphique de l'évolution des températures avec et sans ventilation

Analyse de l'évolution des températures au cours du temps pour les cas avec et sans ventilation :

Dans cet essai, le niveau de température de l'eau chaude n'est pas suffisant pour porter la paroi des capsules à la température de fusion du MCP. L'échangeur fonctionne entièrement en mode sans changement de phase.

Les tableaux ci-dessous montrent l'évolution des flux de chaleur avec et sans la ventilation :

Temps (s)	Le flux cédé par l'eau (w)	Le flux récupéré par l'air (w)	Le flux absorbé par les parois (w)	Le flux absorbé par le MCP (w)
0-200	766	214	36	515
200-400	723	214	32	476
400-600	699	183	8	507
600-800	688	203	5	479
800-1000	685	225	1	461
1000-1200	706	203	1	503
1200-1400	706	220	1	487
1400-1600	674	255	1	420
1600-1800	677	255	1	422
1800-2000	699	248	1	449

Tableau VI.11 : Evolution des flux au cours du temps avec ventilation pour troisième essai.

Temps (s)	Le flux cédé par l'eau (w)	Le flux absorbé par les parois (w)	Le flux absorbé par le MCP et l'air (w)
0-200	792	18	773
200-400	613	43	570
400-600	476	11	465
600-800	467	6	460
800-1000	454	11	442
1000-1200	424	1	424
1200-1400	393	1	394
1400-1600	373	6	367
1600-1800	357	2	355
1800-2000	347	1	345

Tableau VI.12 : Evolution des flux au cours du temps sans ventilation pour troisième essai.

Sur les figures ci-dessous l'évolution des flux de chaleur au cours du temps est représentée avec et sans ventilation :

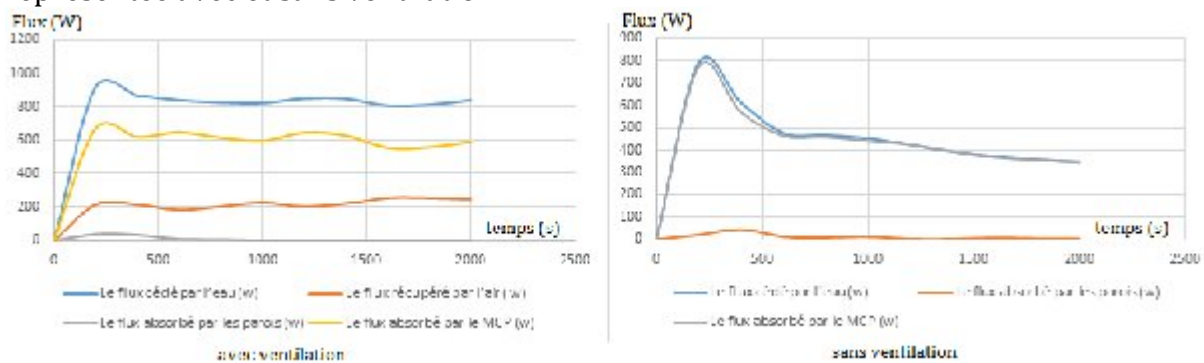


Figure VI.6 : évolution des flux avec et sans ventilation

Analyse de l'évolution des flux de chaleur au cours du temps avec et sans ventilation :

Dans cet essai, le débit est légèrement plus élevé que dans le premier essai et la température d'entrée de l'eau est relativement plus faible ; ce qui fait que dans les deux cas, ventilation ou non, le niveau de température dans les capsules de l'échangeur reste inférieure à 50°C. Nous pouvons supposer ainsi que dans cet essai, il ne pourrait y avoir de fusion. Le flux cédé par l'eau ne peut se faire que par convection forcée ou naturelle. C'est pourquoi sa valeur dans cet essai est plus faible.

4)Quatrième essai :

Débit d'eau estimé à 0.028 Kg/s, température du bain= 80°C, et température ambiante =30 °C.

Les tableaux ci-dessous montrent l'évolution des températures au cours du temps dans les deux cas, avec et sans ventilation

Temps (s)	Température d'entrée d'eau (°C)	Température de sortie d'eau (°C)	Ecart de température de l'eau Entrée-Sortie	Température d'entrée d'air (°C)	Température de sortie de l'air °C	Température au niveau de la première ailette (°C)	Température au niveau de la dernière ailette (°C)
60	72,5	58,3	14,2	30	33,0	40,2	38,6
200	72,5	64,0	8,5	30	36,1	46,6	44,3
400	73,1	65,1	8,0	30	38,8	48,5	46,6
600	74,2	67,3	6,9	30	38,9	50,3	48,5
800	73,8	66,8	7,0	30	37,9	49,9	48,3
1000	73,7	66,8	6,9	30	38,0	49,9	48,2
1200	73,6	66,1	7,5	30	38,3	49,7	47,9
1400	74,5	67,3	7,2	30	40,2	50,6	48,8
1600	73,3	66,6	6,7	30	39,7	50,6	49,0
1800	72,8	66,3	6,5	30	39,3	50,2	48,7
2000	72,9	66,6	6,3	30	39,5	50,4	48,9

Tableau VI.13 : Evolution des températures au cours du temps avec ventilation (Débit de l'air à 0.024 kg/s

Temps (s)	Température d'entrée d'eau (°C)	Température de sortie d'eau (°C)	Ecart de température de l'eau Entrée-Sortie	Température au niveau de la première ailette (°C)	Température au niveau de la dernière ailette (°C)
0	73,6	60,2	13,4	43,8	39,9
200	74,0	67,5	6,5	50,9	48,6
400	74,2	69,1	5,1	52,7	50,8
600	74,3	69,9	4,4	53,7	52,0
800	74,5	69,7	4,8	54,5	53,2
1000	74,4	69,9	4,5	54,8	53,7
1200	74,5	70,1	4,4	55,3	54,5
1400	74,6	70,2	4,4	55,7	54,7
1600	74,6	70,6	4,0	56,0	55,2
1800	74,4	70,8	3,6	56,1	55,3
2000	74,4	70,8	3,6	56,2	55,5

Tableau VI.14 : Evolution des températures au cours du temps sans ventilation

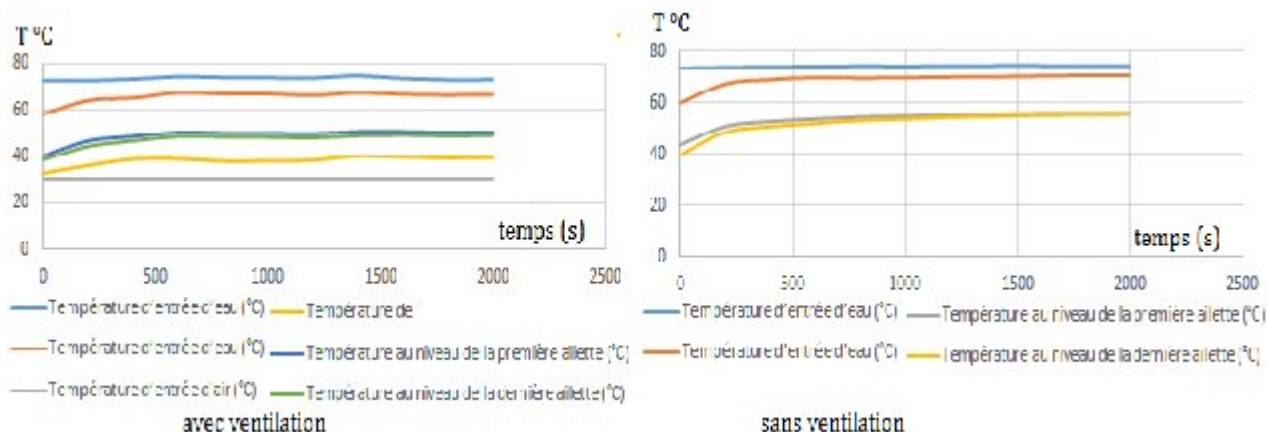


Figure VI.7 : Représentation graphique de l'évolution des températures avec et sans ventilation

Analyse de l'évolution des températures au cours du temps avec et sans ventilation :

L'allure des courbes de température est identique aux cas du premier et troisième essai avec des températures de paroi qui restent inférieures à la température de fusion de la paraffine utilisée dans l'échangeur forcé, tandis qu'elles se situent légèrement au dessus pour l'autre situation. A partir de $t = 1600s$, les températures tendent à se stabiliser.

Les tableaux ci-dessous montrent l'évolution des flux:

Temps (s)	Le flux cédé par l'eau (w)	Le flux récupéré par l'air (w)	Le flux absorbé par les parois (w)	Le flux absorbé par le MCP (w)
0-200	1329	110	101	1117
200-400	967	180	34	752
400-600	872	213	6	627
600-800	812	203	1	613
800-1000	810	192	1	618
1000-1200	836	197	1	645
1200-1400	855	222	1	617
1400-1600	816	239	2	574
1600-1800	775	229	1	551
1800-2000	752	226	0	526

Tableau VI.15 : Evolution des flux au cours du temps avec ventilation pour quatrième essai.

temps (s)	Le flux cédé par l'eau (w)	Le flux absorbé par les parois (w)	Le flux absorbé par le MCP et l'air (w)
0-200	1164	131	1033
200-400	677	33	644
400-600	556	18	538
600-800	536	16	519
800-1000	544	7	537
1000-1200	523	10	513
1200-1400	515	5	510
1400-1600	494	7	486
1600-1800	450	1	449
1800-2000	426	1	424

Tableau VI.16 : Evolution des flux au cours du temps sans ventilation pour quatrième essai

Nous représentons sur les figures ci-dessous au cours du temps avec et sans ventilation :

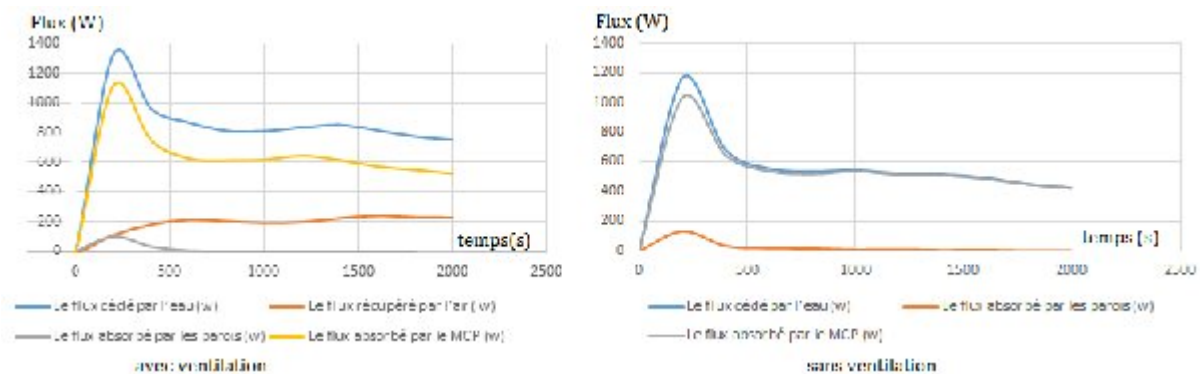


Figure VI.8 : Représentation graphique de l'évolution des flux au cours du temps avec et sans ventilation

Analyse de l'évolution des flux de chaleur au cours du temps avec et sans ventilation :

Les valeurs des flux sont légèrement supérieures à celles des essais 1 et 3 et évoluent dans le sens de la baisse du flux cédé par l'eau en raison de la réduction, dans le temps consacré aux mesures, de la différence de température entre les parois de l'échangeur et l'eau. La différence entre les essais est due principalement à la valeur du débit qui est plus grande dans ce quatrième test

5- Cinquième essai :

Débit d'eau estimé à 0.076 Kg/s, température du bain= 90°C, et température ambiante =30 °C.

Les tableaux ci-dessous montrent l'évolution des températures au cours du temps dans les deux cas, avec et sans ventilation

Temps (s)	Température d'entrée d'eau (°C)	Température de sortie d'eau (°C)	Ecart de température de l'eau Entrée-Sortie	Température d'entrée d'air (°C)	Température de sortie d'air °C	Température au niveau de la première ailette (°C)	Température au niveau de la dernière ailette (°C)
0	84,8	75,0	9,8	30	34,7	39,0	31,4
200	80,9	74,8	6,1	30	47,3	57,3	50,9
400	79,4	74,5	4,8	30	48,2	58,3	56,6
600	78,2	73,8	4,4	30	48,7	59,7	57,4
800	78,0	73,4	4,6	30	49,0	59,8	57,8
1000	77,7	73,3	4,3	30	49,5	60,5	58,8
1200	77,6	73,2	4,4	30	50,4	60,6	58,8
1400	77,3	73,3	4,0	30	51,5	61,2	59,0
1600	77,3	73,2	4,1	30	51,7	61,2	59,2
1800	77,3	73,1	4,2	30	51,8	61,3	59,3
2000	77,4	73,4	4,0	30	51,9	61,4	60,5

Tableau VI.17: l'évolution des températures au cours du temps avec ventilation pour le cinquième essai (Débit d'air 0.024 kg/s)

Temps (s)	Température d'entrée d'eau (°C)	Température de sortie d'eau (°C)	Ecart de température de l'eau Entrée-Sortie	Température au niveau de la première ailette (°C)	Température au niveau de la dernière ailette (°C)
0	85,2	74,4	10,8	42,0	37,7
200	81,1	75,5	5,6	60,8	54,9
400	80,9	76,8	4,1	68,8	65,0
600	80,5	77,0	3,5	69,3	67,2
800	80,7	77,4	3,3	70,2	68,4
1000	80,8	78,0	2,8	70,5	68,9
1200	81,0	78,5	2,5	70,8	69,1
1400	81,2	78,8	2,4	70,9	69,4
1600	81,3	79,4	1,9	70,9	69,8
1800	81,1	79,8	1,3	70,9	70,1
2000	81,1	79,9	1,2	70,9	70,3

Tableau VI.18: l'évolution des températures au cours du temps sans ventilation pour le cinquième essai

Nous représentons sur les figures ci-dessous l'évolution des températures avec et sans ventilation :

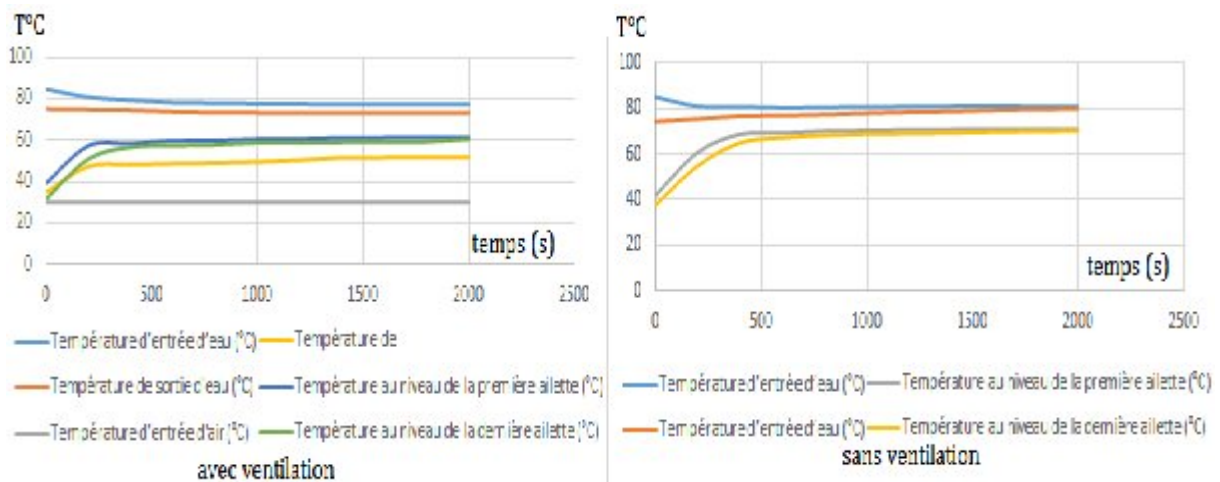


Figure VI.9 : représentation graphique de l'évolution des températures au cours du temps avec et sans ventilation

Analyse de l'évolution des températures avec et sans ventilation :

Nous remarquons qu'après seulement 200s, les températures au niveau de la première et de la dernière ailette ont atteint leurs valeurs maximales ; elles ont augmenté approximativement de 20°C en ce laps de temps, en raison de l'importance du débit d'eau chaude circulant dans l'échangeur. La température de l'air est également plus élevée à la sortie de l'échangeur grâce à la chaleur cédée par les parois. Quant à la température d'entrée de l'eau, elle diminue légèrement au début mais par la suite, elle tend à se stabiliser, comme d'ailleurs la température de sortie de l'eau. L'écart Δ pour le cas de l'échangeur sans ventilation reste plus faible comme pour tous les essais.

Le tableau ci-dessous représente l'évolution des flux avec ventilation :

temps (s)	Le flux cédé par l'eau (W)	Le flux récupéré par l'air (W)	Le flux absorbé par les parois (w)	Le flux absorbé par le MCP (W)
60-200	2518	265	450	1803
200-400	1730	428	56	1245
400-600	1471	444	18	1008
600-800	1438	454	4	980
800-1000	1420	464	14	942
1000-1200	1390	481	2	908
1200-1400	1341	505	5	830
1400-1600	1293	520	2	771
1600-1800	1323	524	2	798
1800-2000	1306	527	10	768

Figure VI.19 : l'évolution des flux de chaleur avec ventilation pour le cinquième essai

Le tableau ci-dessous représente l'évolution des flux avec ventilation :

Temps (s)	Le flux cédé par l'eau (W)	Le flux absorbé par les parois (W)	Le flux absorbé par le MCP et l'air (W)
0-200	2604	300	2304
200-400	1544	150	1393
400-600	1204	22	1181
600-800	1069	16	1052
800-1000	959	7	952
1000-1200	835	5	831
1200-1400	777	4	773
1400-1600	684	4	681
1600-1800	513	2	511
1800-2000	405	2	402

Figure VI.20 :l'évolution des flux de chaleur sans ventilation pour le cinquième essai.

Nous représentons sur les figures ci-dessous l'évolution des flux de chaleur avec et sans ventilation :

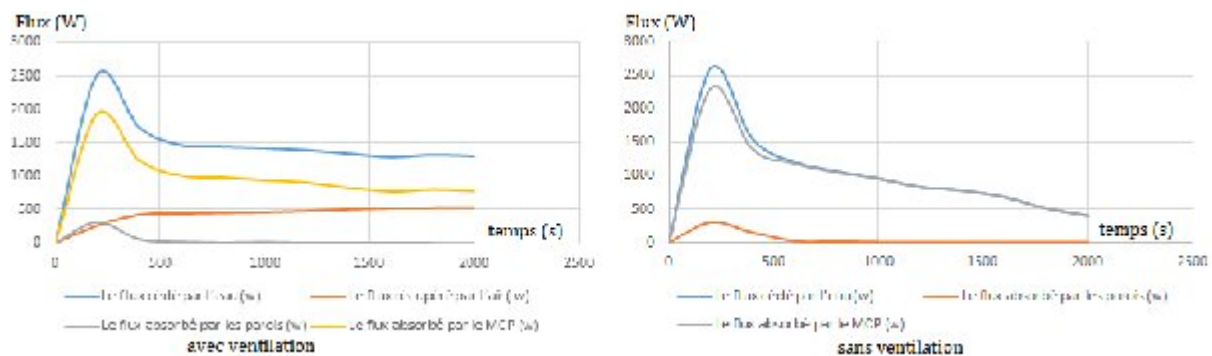


Figure VI.10 :Représentation graphique de l'évolution des flux de chaleur avec et sans ventilation

Analyse de l'évolution des flux de chaleur avec et sans ventilation :

En début d'expérience, les flux sont maximaux, en raison du grand écart de température entre les parois de l'échangeur et le fluide caloporteur. Même s'ils diminuent par la suite, les flux absorbés par le composite sont importants dans les deux situations étudiées, et ne peuvent s'expliquer que par le changement de phase du matériau contenu dans les ailettes de l'échangeur, d'autant plus que la température de fusion est atteinte assez rapidement dans les deux cas.

Cet essai est assez intéressant puisqu'il montre l'intérêt d'incorporer au matériau à changement pour augmenter sensiblement les performances de l'échangeur.

6-Sixième essai : Débit d'eau estimé à 0.055 kg/s, température du bain 50°C et température ambiante = 27 °C.

Les tableaux ci-dessous montrent l'évolution des températures au cours du temps dans les deux cas, avec et sans ventilation

Temps (s)	Température d'entrée d'eau (°C)	Température de sortie d'eau (°C)	Ecart de température de l'eau Entrée-Sortie	Température d'entrée d'air (°C)	Température de sortie de l'air (°C)	Température au niveau de la première ailette (°C)	Température au niveau de la dernière ailette (°C)
60	41,2	38,5	2,7	26,4	27,9	35,6	34,6
200	45,0	43,6	1,4	26,6	28,4	38,9	38,9
400	45,2	44,5	0,7	26,6	29,5	39,7	39,6
600	46,1	45,4	0,7	26,7	29,7	40,7	39,5
800	46,2	45,4	0,8	26,8	30,2	41,2	39,8
1000	46,7	46,0	0,7	27,0	30,6	41,6	40,2

Tableau VI.21 : l'évolution des températures avec ventilation pour le sixième essai (débit d'air 0.024 Kg/s)

Temps (s)	Température d'entrée d'eau (°C)	Température de sortie d'eau (°C)	Ecart de température de l'eau Entrée-Sortie	Température au niveau de la première ailette (°C)	Température au niveau de la dernière ailette (°C)
0	43,6	42,9	0,7	38,3	37,8
200	45,9	44,5	1,5	39,0	38,0
400	46,4	45,0	1,4	39,6	38,4
600	46,6	44,9	1,7	39,5	39,0
800	46,5	45,2	1,2	41,2	40,1
1000	47,0	45,4	1,6	41,7	41,2

Tableau VI.22 : l'évolution des températures sans ventilation pour le sixième essai

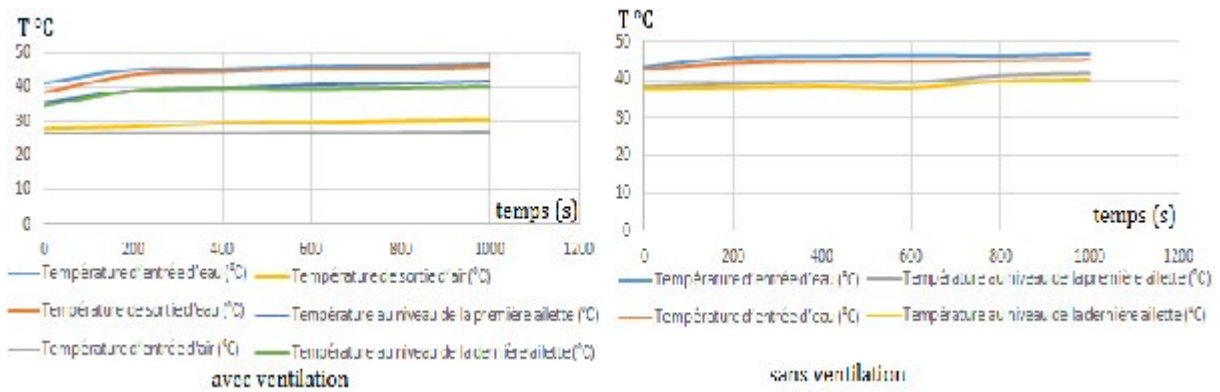


Figure VI.11 : Représentation graphique de l'évolution des températures avec et sans ventilation

Analyse de l'évolution des températures avec et sans ventilation :

Dans cet essai, avec et sans ventilation, nous avons pris une température inférieure à la température de fusion du MCP et un débit de fluide caloporteur important.

Nous remarquons que l'écart de température du fluide caloporteur entre l'entrée et la sortie est le plus faible des essais effectués. Il diminue de plus en plus, à fur à mesure que les températures de parois se rapprochent de la température de l'eau.

Les tableaux ci-dessous représentent l'évolution des flux de chaleur avec et sans ventilation :

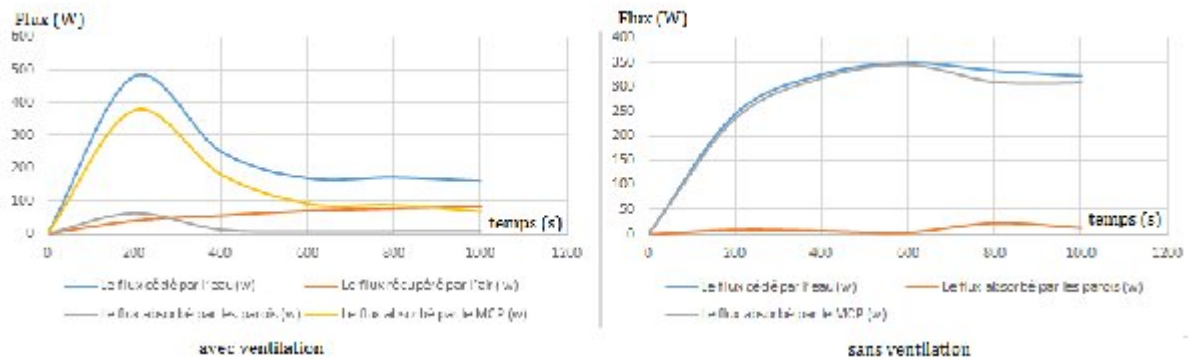
temps (s)	Le flux cédé par l'eau (w)	Le flux récupéré par l'air (w)	Le flux absorbé par les parois (w)	Le flux absorbé par le MCP (w)
0-200	471	40	90	341
200-400	242	57	12	172
400-600	161	71	7	82
600-800	172	77	7	88
800-1000	173	85	7	82

Tableau VI.23 : évolution des flux au cours du temps avec ventilation pour le sixième essai

temps (s)	Le flux cédé par l'eau (w)	Le flux absorbé par les parois (w)	Le flux absorbé par l'air et le MCP (w)
0-200	244	12	232
200-400	325	7	318
400-600	349	4	345
600-800	333	23	310
800-1000	322	13	308

Tableau VI.24 : évolution des flux au cours du temps sans ventilation pour le sixième essai

Nous représentons sur les figures ci-dessous l'évolution des flux de chaleur avec et sans ventilation :



Analyse de l'évolution des flux de chaleur au cours du temps avec et sans ventilation :

Nous remarquons que les flux de chaleur échangés par le fluide chaud dans les deux cas, avec et sans ventilation, sont faibles malgré un débit de fluide caloporteur élevé et c'est le même cas pour le flux absorbé par le MCP. Ce résultat obtenu avec des températures inférieures à la température de fusion montrent tout l'intérêt du stockage par chaleur latente. La ventilation par l'air n'est pas utile dans cet essai car l'écart de température entre les parois et l'air de refroidissement est faible ; ce qui explique le faible débit cédé par le fluide caloporteur dans ce cas.

Références bibliographiques

- [1] Jean Castaing – Lasvignea es. 2002, Technologie et principes de fonctionnement des échangeurs de chaleur, Université de pau et des pays de l'aour.
- [2] F.Rouland, 2011-2012, les échangeurs thermiques.
- [3] Echangeur de chaleur – description des échangeurs. Catégorie : génieÉnergétique be 9516. Technique de l'ingénieur.
- [4] B.Bourret, les échangeurs de chaleur, INSA de Toulouse.
- [5] S.Drissi. 2015 .développement des nouveaux bétons, accumulateur d'énergie, investigation expérimentale, probabiliste et numérique du comportement thermique. Thèse doctorat Université Paris-est.
- [6] Maha Ahmed .2004. Nouveaux composants actifs pour la gestion énergétique de l'enveloppe légère bâtiments, couplage matériaux changement de phase, super-isolation, apports solaires. Thèse de doctorat. Université Joseph Fourier.
- [7] Adèle Caron. 2014 .le stockage de chaleur dans les matériaux à changement de Phase : étude expérimentale des transferts thermiques dans les échangeurs de Stockage latent. Université Joseph Fourier.
- [8] E.Ango .2010, Rafrachissement d'air passif : conception – dimensionnement – Réalisation d'un échangeur air- à changement de phase. Paris Tech-Bordeaux
- [9] Julien Bordron. Étude paramétrique d'un échangeur thermique air/matériaux à changement de phase pour le rafraîchissement des bâtiments. INSA de Lyon.
- [10] Fabien Rouault .2013 .évaluation des performances et modélisation du Comportement thermique d'un échangeur stockeur pour le rafraichissement de L'air .Université bordeaux.
- [11] N.Feddi, A.Zerrougui. 2013/2014.realisation d'un échangeur stockeur rempli d'un Matériau composite pour le stockage d'énergie. Université mouloud Mammeri Département Génie mécanique.
- [12] Fiche technique de la perlite expansée, PERLINDUSTRIA. info@perlindustria.com / www.perlitayvermiculita.com (consulté le 01/07/2014).7
- [13] Jean-Paul Bailon et Jean-Marie Dorlot. Troisième édition des matériaux, page 624-625
- [14] Thermocouple DATA Logger Software for the TC0.8-PICO Technology
- [15] Testo 445 –l'instrument de mesure pour la climatisation. www.testo445.com
- [16] vocabulaire international de métrologie version 2008 .www.perrin33.com / Etalonnages/defetalonnage .html