



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche
Scientifique

Université Abou Bakr Belkaid-Tlemcen

Faculté des Sciences

Département de Physique



Mémoire pour l'obtention de diplôme de Master en
Physique Énergétique et Matériaux

Le Thème

Etude Thermo Énergétique d'un Matériau à
Changement de Phase (MPC Eutectique) Utilisé
à des Fins de Stockage de Froid.



Présenté par M^{re} CHERIF Meriem

Soutenu le 13/03/2012 Devant le Jury Composé de :

Président : A. ZERGA

Examinatrice : K. RAHMOUN

Examinatrice : N. GHELLAI

Encadreur : R. SAIM

Maitre de conférences (A) U.A.B Tlemcen

Maitre de conférences (A) U.A.B Tlemcen

Professeur (A) U.A.B Tlemcen

Maitre de conférences (A) U.A.B Tlemcen

Année Universitaire : 2011-2012

Sommaire

Sommaire

Partie théorique

Remerciement.....	0
Sommaire.....	0
Liste des tableaux.....	0
Liste des figures.....	0
I. introduction générale.....	0
II. Chapitre 1 : Généralités sur les MPC et leurs applications dans le froid industriel	
1.1. Introduction	1
1.2. Les matériaux à changement de phase.....	2
1.2.1. Définition.....	2
1.2.2. Les trois types des Matériaux à changement de phase.....	2
a) Les MPC minéraux.	2
b) Les MPC organique.	4
c) Les avantages des cires de paraffine.....	4
d) Les MPC eutectique.	5
1.2.3. Certains phénomènes physiques qui influent sur le rôle des MPC.....	6
a) L'hystérésis.....	6
b) La surchauffe	6
c) La dilatation	7
1.2.4. Critères de choix d'un MCP.....	7
a) Critères thermiques	7
b) Critères physiques	7
c) Critères chimiques	7
d) Critères écologiques.....	7
e) Critères économiques.....	7
1.3. Le Domain d'utilisation.....	7
1.3.1. Les principales applications	8
a) Les principales applications industrielles des MPC.....	8
1.3.2. La climatisation passive et le chauffage	8
1.3.3. Le stockage de l'énergie thermique	8
1.3.4. Le textile	9
1.3.5. L'isolation des bâtiments	9
a) Les MPC micro encapsulés.....	9
b) la microémulsion.....	10
1.3. 6. Transport de produits alimentaire et médical.....	10

Sommaire

1.3.7. Utilisation des matériaux à changement de phase dans le domaine informatique	10
1.3.8. Stockage solaire thermique	11
a) La production de l'eau chaude	11
b) Les panneaux solaires à double vitre	12
1.4. La production du froid	
1.4.1. Le type de compresseur utilisé pour le frigo domestique	12
a) Le compresseur	12
b) Compresseurs à piston hermétiques	13
1.4.2. L'installation frigorifique	14
a) Le compresseur	14
b) Le condenseur	14
c) Le détendeur	14
d) L'évaporateur	14
1.5. Les fluides frigorifiques	15
1.5.1. Historique.....	15
1.5.2. La classification des fluides frigorifique.....	16
a) Les composés inorganiques.....	16
b) Les composés organiques	16
1.5.3. L'impact de certain fluide frigorifique sur la destruction de la couche d'ozone et le réchauffement de la planète	17
a) Destruction de la couche d'ozone.....	17
b) Réchauffement de la planète.....	18
1.5.4. L'isobutane R600a.....	19
1.5.5. Les qualités du fluide frigorigène.....	19
a) Qualités thermique.....	20
b) Qualités physiques.....	20
c) Qualités chimiques.....	20
1.6. Le stockage de l'énergie thermique	
1.6.1. Définition	20
1.6.2. Les trois modes de stockage thermique.....	20
a) Le stockage du froid par chaleur sensible.....	21
b) Stockage thermochimique.....	22
c) Le stockage par chaleur latente	22
1.6.3. Domaine d'utilisation du système de stockage par chaleur latente.....	23
a) Les contraintes technologiques du stockage par chaleur latente	24
b) Les avantages du stockage par chaleur latente	24
1.7. Différents processus de stockage par chaleur latente	24
1.7.1. Les Fluides frigoporteurs diphasiques.....	24
1.7.2. Les Nodules encapsulés.....	25
a) La micro encapsulation.....	26
b) La macro-encapsulation.....	26
1.7.3. Les Bacs à glace.....	26
1.7.4. Les coulis de glace.....	26
1.8. Domaine d'utilisation des processus présentés	26
1.8.1. Les coulis de glace.....	26

Sommaire

a) Un stock de frigories.....	27
b) L'installation frigorifique.....	28
c) Une puissance électrique instantanée ramenée de 150 à 60 kW	28
d) Les avantages de cette technologie.....	29
1.8.2. Avantages de la technologie des coulis de glace.....	29
1.8.3. Les inconvénients et limites.....	29
1.8.4. Les domaines d'applications.....	29
1.8.5. Les clathrates.....	30
1.8.6. Les billes de gel.....	30
1.8.7. Les bacs de glace.....	30
a) Bacs à eau en tubes.....	31
1.8.8. Les nodules.....	31
b) Domaine d'utilisation.....	32

III. Chapitre 2 : Recherche bibliographique

2.1. Introduction.....	33
2.2. Introduction sur Les travaux analytiques, numériques et expérimentaux qui précèdent le travail de Kamel Azoug	34
2.2.1 Améliorer l'isolation de la porte et du cabinet pour réduire les pertes de chaleur.....	34
2.2.2 Développer compresseurs à haute efficacité.....	34
2.2.3 Améliorer l'efficacité des échangeurs de chaleur, et en particulier de l'évaporateur.....	34
2.3 Le prototype d'un réfrigérateur à haute énergie thermique.....	35
2.3.1. Description du dispositif expérimental.....	35
2.4. Procédure expérimentale et calcul.....	38
2.4.1. Caractérisation thermique du réfrigérateur avec PCM.....	38
2.4.2. Performance et test de capacité de stockage du froid.....	39
2.4.3. Les expériences avec l'eau comme MPC.....	39
2.4.4. Les expériences avec une solution eutectique aqueuse.....	44
2.4.5. Des tests de performance énergétique	46
2.5. Les équations de Navier-Stocks.....	50

IV. Chapitre 3 : présentation des équations de conservations et les conditions aux limites imposées sur chaque grandeur.

3.1. Introduction.....	52
3.2. Le modèle mathématique.....	53
3.2.1. Transfert de chaleur par convection libre.....	53
3.2.2. Le transfert de chaleur dans le PCM.....	53
3.2.3. Modèle de cycle de compression de vapeur.....	54
a) Les échangeurs de chaleur.....	55
b) Compresseur et détendeur.....	55
c) Modèle de cellule réfrigéré.....	56

Sommaire

3.3. Ecoulements incompressibles de fluides newtoniens.....	55
3.3.1 Le milieu continue	56
3.3.2. Modélisation du processus de fusion/solidification dans le PCM.....	56
3.3.3 Les équations gouvernantes.....	56
a)L'équation de continuité.....	57
b) Les équations de quantité de mouvement	57
c)L'équation de l'énergie.....	57
3.3.4. Modèle mathématique du problème étudié.....	58
a)Equations dimensionnelles	58
b) Equation de continuité.....	59
c) Equation de quantité de mouvement suivant la direction X.....	59
d) Equation de quantité de mouvement suivant la direction Y.....	59
e)Equation de l'énergie	59
f) Nombre de Nusselt.....	60

Partie simulation

V. Chapitre 4 : présentations du logiciel fluent

4.1. Introduction.....	61
4.2. Le logiciel gambit	62
4.3. Maillage sous Gambit	62
4.3.1 Démarrage de Gambit.....	62
4.3.2. Construction de la géométrie.....	63
4.3.3. Maillage.....	63
4.3.3.1. Choix du type de maillage.....	63
a) Maillage structuré (quadra/hexa).....	64
b) Maillage non structuré (tri/tétra)	64
c) Maillage hybride	64
d) Techniques générales de génération du maillage	64
e) Qualité d'un maillage	65
f) Lissage	65
g) Génération d'un maillage couche limite	65
4.4. Conditions aux limites et définition de domaines.....	66
4.4.1. Commande pour la construction de la géométrie.....	66
4.4.2. Commande d'un point.....	67
4.4.3. Commande d'un segment.....	68
4.4.4. Commande Relative à une face.....	69
4.4.5. Commande relative à un volume.....	70
4.4.6. Commande de maillage	70
4.4.7. Spécification de schéma des éléments face.....	71

Sommaire

4.4.8. Spécification Du type de maillage des éléments face	71
4.5.1. Simulation sous fluent.....	72
4.5.2. Importation de la géométrie.....	72
4.5.3. Vérification du maillage importé.....	73
4.5.6. Lissage du maillage.....	73
4.5.7. Vérification de l'échelle.....	74.
4.5.8. Affichage de la grille.....	74
4.5.9. Choix du solveur.....	75
4.5.10. L'équation de l'énergie.....	75
4.5.11. Choix du modèle de turbulence.....	76
4.5.12. Définition des caractéristiques du fluide.....	76
4.6. Operating conditions.....	77
4.6.1. Conditions aux limites usuelles.....	77
4.6.2. Choix d'ordre des équations et l'algorithme.....	79
4.6.3. Initialisation	79
4.6.4. Choix des critères de convergence.....	80
4.6.5. Lancement du calcul.....	80
4.6.6. Allures de l'évolution des résidus de calcul.....	81
VI. Chapitre 5: interprétation des résultats	
5.1. Introduction.....	82
5.2 .Les résultats.....	82
5.2.1 Le Contour des vitesses pour différence positions le long de la plaque.....	82
5.2.2 La distribution des vitesses pour différente positions le long de la plaque	83
5.2.3 Contour des températures pour différence positions le long de la plaque.....	84
5.2.4 La distributions des Température pour différente positions le long de la plaque.....	85
5.3. Interprétation des résultats.....	85
5.4. Conclusion.....	86
VII. Conclusion générale	
88	
Nomenclature.....	89
Référence.....	91
Résumé	92

Liste des tableaux

Liste des tableaux

Tableau. I. 1 propriété thermique des MPC minéraux	3
Tableau. I. 2 propriétés thermiques des paraffines	5
Tableau. I. 3 propriétés thermiques des MPC eutectique.....	6
Tableau. I. 4 Valeurs de PAO de quelques fluides frigorigènes.....	18
Tableau. I. 5 Valeurs de GWP100 de quelques fluides frigorigènes.	19
Tableau. I. 6 caractéristiques de l'isobutane.....	19
Tableau. I. 7 caractéristiques de l'isobutane	19

Tableau.II. 1 résume les mesures effectuées et les incertitudes associées	37
Tableau.II. 2 les conditions expérimentales.....	40
Tableau.II. 3 autonomie et temps de fonctionnement	44
Tableau.II. 4 Les valeurs moyennes des propriétés thermo physiques des frigorigènes pour des tirages différents.....	49

Tableau.III. 1 propriétés thermo physiques du PCM utilisés dans la simulation.....	53
--	----

Tableau.IV. 1 Commande pour la construction de la géométrie	66
Tableau.IV. 2 Commande d'un point	67
Tableau.IV. 3 Commande d'un segment	68
Tableau.IV. 4 Commande Relative à une face.....	69
Tableau.IV. 5 Commande relative à un volume	70
Tableau.IV. 6 Commande de maillage	70
Tableau.IV. 7 Spécification de schéma des éléments face	71
Tableau.IV. 8 Spécification Du type de maillage des éléments face	71
Tableau.IV. 9.type de maillage.....	72

.....	41
Table II. 8 (pour des charges thermiques) sous lesquels le MCP n'est pas geler complètement (conditions de charge thermique).....	41
Figure II. 9 l'évolution de la température moyenne de l'air avec et sans PCM	42
Figure II. 10 le caractère de température à différente distance de l'évaporateur.....	43
Figure II. 11 représentations de la température moyenne de l'air dans l'enceinte du réfrigérateur en fonction de la charge thermique.....	45
Figure II. 12 la capacité du stockage du froid pour différents charges thermique.....	46
Figure II. 13 les valeurs moyennes du COP pour différentes charges thermiques.....	47
Figure II. 14 Evolution temporelle de la température d'évaporation avec et sans PCM.....	48
Figure II. 15 l'Evolution temporelle de la température d'évaporation avec et sans PCM.....	49
Figure II. 16 comparaisons des résultats obtenus avec eau et MPC.....	50

Liste des figures

Figure III. 1	les conditions limites à l'interface solide liquide $x=s(t)$	57
Figure III. 2	Schéma représentant la configuration de la convection	60

Figure IV. 1	Lancement du Gambit.....	62
Figure IV. 2	Les opérations pour construire une géométrie.....	63
Figure IV. 3	maillage structuré et non structuré.....	65
Figure IV. 4	Génération d'un maillage couche limite.....	66
Figure IV. 5	Définition des conditions aux limites.....	67
Figure IV. 6	Importation de la géométrie.....	72
Figure IV. 7	Vérification du maillage sous fluent	73
Figure IV. 8	Lissage du maillage	73
Figure IV. 9	Vérification des unités.....	74
Figure IV. 10	Affichage de la grille et vérification des conditions.....	74
Figure IV. 11	Choix du solveur sous Fluent.....	75
Figure IV. 12	Equation de l'énergie.....	75
Figure IV. 13	Choix du modèle de turbulence.....	67
Figure IV. 14	Définition des caractéristiques du fluide.....	67
Figure IV. 15	Choix de la pression de référence.....	77
Figure IV. 16	Valeurs des conditions aux limites	78
Figure IV. 17	Vitesse d'entrée.....	78
Figure IV. 18	Choix d'ordre des équations et l'algorithme	79
Figure IV. 19	Initialisation du calcul	79
Figure IV. 20	Choix et affichage pendant les calculs des critères de convergence	80
Figure IV. 21	Choix du nombre des itérations.....	80
Figure IV. 22	Allures de l'évolution des résidus de calcul en régime stationnaire	81

Figure V. 1	.....	82
Figure V. 2	.....	82
Figure V. 3	.....	83
Figure V. 4	.....	83
Figure V. 5	.....	84
Figure V. 6	.....	85
Figure V. 7	.....	86

Introduction générale :

D'après le Jeune Indépendant du lundi 12 avril 2010, L'état a la ferme intention de développer les capacités de stockage sous froid en Algérie de sorte à concourir efficacement à la régulation du marché des viandes et même des fruits et légumes. Le gouvernement veut encourager le développement de l'industrie du froid en Algérie pour augmenter les capacités de stockage des produits agroalimentaires. Il a affirmé à ce titre qu'une société d'entrepôts de froid serait créée prochainement pour compléter les investissements du secteur privé dans ce domaine pour les cinq prochaines années.

Fascinée par l'industrie du froid et les innovations apportées par les chercheurs dans ce domaine et dans le but de pouvoir participer à améliorer la performance énergétique du stockage de froid nous avons fait une recherche bibliographique dans le domaine de stockage du froid par chaleur latente. Différents travaux de recherche menés ces dernières années ont clairement montré que la conservation domestique des aliments posait des problèmes cruciaux, aussi bien en ce qui concerne le niveau des températures observées dans les réfrigérateurs que les performances énergétiques de ces équipements. Il apparaît donc que la recherche de solutions aux problèmes posés par cet équipement réponde particulièrement bien à un double besoin, visant d'une part la sécurité alimentaire et d'autre part la réduction de la consommation d'électricité domestique. L'intégration de matériaux à changement de phase (PCM) dans les réfrigérateurs domestiques est une solution technologique innovante et économique qui permet d'apporter une réponse à ces deux problèmes.

En premier lieu nous présentons dans le premier chapitre les concepts sur la classification des MPC et leur domaine d'utilisation. Dans le deuxième chapitre nous présentons le travail expérimental fait par le chercheur Kamel Azoug, qui a réalisé un prototype de réfrigérateur à haute inertie thermique utilisant un matériau à changement de phase. Les données de ces expériences montrent une nette réduction des fluctuations de température dans l'enceinte réfrigérée et une amélioration du comportement du système en termes d'autonomie et d'efficacité énergétique.

Dans le troisième chapitre nous démontrons le modèle mathématique et le bilan énergétique des échangeurs et du MPC. Le quatrième chapitre nous montrons le logiciel avec lequel nous allons simuler notre travail. Et à la fin nous allons présenter et discuter les résultats trouvés dans le cinquième chapitre. Vu que le temps donné pour présenter le mémoire de master n'est pas assez suffisant pour faire une recherche pratique à fin de trouver un MPC eutectique qui est équivalent dans ces propriétés thermo physique à celui utilisé par le chercheur Kamel Azoug nous avons laissé la partie expérimentale pour le futur proche.



CHAPITRE I

1.1. Introduction :

Dans ce chapitre nous avons présenté des concepts sur la classification des MPC et leur domaine d'utilisation. Ces matériaux à changement de phase sont de nature physico-chimique très différente les uns des autres. Ce sont leurs caractéristiques de fusion-cristallisations qui les rendent intéressants pour le stockage de chaleur latente. Parmi ces matériaux, on distingue les 3 grandes familles suivantes :

Les composés minéraux ou inorganiques : Parmi ces composés, les sels hydratés présentent un intérêt pour leur utilisation en tant que MCP. Ils sont issus d'un alliage de sels organiques et d'eau. Ils ont l'avantage de posséder des grandes chaleurs latentes. En revanche, leur principal défaut concerne leur tendance à la surfusion.

Les composés organiques : présentent Des propriétés thermiques (chaleur latente et conductivité thermique en particulier moindres que les sels hydratés, ceux-ci présentent l'avantage de ne pas être ou très peu concernés par la surfusion. On les utilise en particulier, pour le stockage de chaleur latente, les paraffines et les acides gras appartiennent à cette famille.

Les composés eutectiques : Les eutectiques sont un mélange de sels possédant une température de fusion constante pour une valeur particulière de concentration. Ils peuvent être inorganiques et/ou organiques.

les Domaines d'utilisation des MPC sont très vaste notamment comme matériaux de construction pour améliorer les performances énergétique des bâtiments en les intégrant dans les parois des bâtiments (cloisons, carreaux de plâtre, briques). on les utilise aussi pour la Climatisation passive, le Stockage d'énergie thermique, le refroidissements et transport de produits alimentaire ou de produits sensibles (pharmaceutiques ou médicaux), le Domain d'énergie solaire ,l'amélioration des composant de l'ordinateur (la mémoire) la fabrication du textiles inflammable (les tenus de sport) . Nous avons aussi présenté brièvement le développement du froid industriel. Dans ce domaine industriel on utilise toujours les énergies non renouvelables ca nous offre le confort d'un coté mais d'un autre coté les énergies no renouvelables Pollue la nature et réchauffe la planète et détruit la couche d'ozone. Parmi cette technologie nous citons la fabrication du fluide frigorigène CFC. Dans le but de luté contre ces phénomènes indésirable les chercheur offrent des produit avec un PAO= 0 c'est le isobutane et les hydro carburant qui ne sont pas nuisibles ni destructives pour la couche d'ozone.

L'électricité qui est un important vecteur de l'énergie présente de nombreux avantages :

- ✓ Elle peut être produite à partir de multiples sources primaires fossiles et non fossiles.
- ✓ Elle peut être transportable en grande quantité et sur de grandes distances.
- ✓ Elle est convertible dans les principales formes d'énergie mécanique, chimique, et thermique

Par contre l'un des inconvénients major qu'elle n'est pas stockable ; excepté en repassant sous une autre forme d'énergie, chimique (piles), mécanique (éolienne) ; thermique (panneaux solaire ; MPC). La consommation de cette énergie dans l'industrie du froid devient de plus en plus couteuse et très demander même indispensable dans les pays du monde entier ; le réfrigérateur domestique devient un électroménagère indispensable pour la vie quotidienne des gens.



Dans notre travail, nous avons choisi de montrer l'intérêt des MPC dans ce domaine. La technologie de fabrication des réfrigérateurs domestique, des congélateurs, des chambres froides connaissent un développement énorme et rapide. Maintenant on intègre les MPC dans les murs des chambres froides. Les MPC ont la particularité de stocker de l'énergie sous forme de chaleur latente, par les nodules encapsulés. C'est une technique qui utilise les MPC il suffit de les refroidir pour cristalliser leur contenu et de les mettre en contact avec la charge chaude pour le déstockage. Plusieurs recherches se suivent dans ce domaine. Pour comprendre le comportement des matériaux à changement de phase nous allons présenter les principales définitions de stockage d'énergie avec chaleur sensible et avec chaleur latente. Dans la deuxième partie de ce chapitre, nous avons exposé les différents travaux orientés vers la production du froid.

1.2. Les matériaux à changement de phase :

Les matériaux à changement de phases MPC ont pour 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.

1.2.1. Définition :

Les MPC reposent sur l'application d'un principe physique. Au-delà d'une certaine température caractéristique de chaque matériau ils se liquéfient en absorbant la chaleur de l'atmosphère ambiante en les restituant lorsque la température baisse. 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 et de restitution de la chaleur seront intéressantes.

Pour le stockage d'autres changements de phase sont envisageables (solide _ solide, solide _ gaz,) mais en pratique c'est le passage solide liquide qui offre plus d'application, car la plupart des transitions liquide _ gaz et solide _ gaz impliquent des volumes importants ou des hautes pressions pour stocker le matériau à son état gazeux. De plus, ces transitions demandent des températures élevées et donc des énergies plus importantes que dans le cas solide _ liquide. Quant aux transitions solides _ solide elles sont généralement très lentes et possèdent de faibles énergies de transition. [1]

1.2.2. Les trois types des Matériaux à changement de phase :

Les MCP permettent d'utiliser la chaleur sensible pour stocker de l'énergie. Suivant leurs propriétés en phase solide, liquide et gazeuse, leurs températures de changement d'état, leurs chaleurs latentes, les MCP présentent des avantages et des inconvénients. Par exemple, la chaleur latente de vaporisation est bien plus importante devant la chaleur latente de fusion, cependant, les volumes de vapeur dégagés sont très importants. Il se pose alors le problème du stockage. Le changement d'état solide _ liquide est sans doute le mieux adapté. La variation de volume entre le matériau solide et le matériau liquide est faible pour la plupart des matériaux. De plus, la gamme de températures de fusion couverte par les MCP est très large, et permet donc d'être utilisée dans de nombreuses applications. Il existe de nombreux types de matériaux à changement de phase, de nature physicochimique très différentes les uns des autres. Parmi ces matériaux, on distingue les trois grandes familles suivantes :

a) Les MPC minéraux [2]:

Parmi ses composés seuls les sels hydratés présentent un intérêt pour leur utilisation comme des matériaux à changement de phase. Ils sont issus d'un alliage de sels organiques et d'eau. Ils ont l'avantage de posséder des grandes chaleurs latentes, et facilement disponibles non inflammables,

Chapitre 1 : Généralités sur les MPC et leurs applications dans le froid industriel

avec un point de fusion net, et possèdent une haute conductivité thermique. En revanche, leur principal défaut est leur tendance de surfusion.

Les hydrates salins par exemple, obtenus par mélange d'un sel et d'une quantité d'eau définie. Le Nitrate de Calcium Tétra Hydrate ($\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$) illustré sur la figure 4, est obtenu en mélangeant du Nitrate de Calcium ($\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$) et de l'eau (H_2O).

Les principales propriétés des hydrates salins sont :

- ✓ Une grande chaleur latente de fusion.
- ✓ Une grande conductivité thermique.
- ✓ Une faible variation de volume lors du changement d'état.

Cependant, ils possèdent aussi des inconvénients :

- ✓ L'hystérésis, qui peut cependant être traité par l'ajout d'un agent de nucléation.
- ✓ La perte de l'eau contenue dans l'hydrate au cours des cycles.
- ✓ Le caractère corrosif des hydrates la plupart du temps.



Fig1.1 Nitrate de Calcium
Tétra Hydrate

Tableau 1.1 : propriétés thermique des MPC minéraux

Hydrates salins	Température de fusion en C°	Chaleur latente de fusion en C°
Sel de grauber $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$	32.4	252
Chlorure de calcium exa hydrate $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	27-30	190
Hydroxyde de baryum octa hydrate $\text{Ba}(\text{OH})_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$	78	301
Carbonate de sodium déca hydrate $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$	32-35	247
Nitrate de calcium tétra hydrate $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	40-43	140

b) Les MPC organique :

Ils sont chimiquement stable, pas de ségrégation, avec une haute énergie de fusion, ils sont compatible avec les matériaux conventionnels de construction. , ces MPC sont recyclables leur chaleur latente et leur conductivité thermique sont faible. On les utilise pour le stockage de chaleur latente, parmi ces MPC les paraffines et les acides gras.

Les paraffines sont des matériaux organiques, appartenant à la famille des alcanes (seulement des atomes de Carbone et d'Hydrogène), c'est-à-dire des molécules linéaires d'hydrocarbures saturés. (C_nH_{2n+2} , avec seulement des liaisons simples, donc nombre maximal d'Hydrogènes).

On distingue deux catégories de paraffines, les liquides ($n=8$ à 19), les solides ($n=20$ à 40).

Les paraffines sont obtenues à l'aide de pétrole brut soit synthétiquement. Après raffinages, elles sont inodores, non toxiques et sans saveur. On distingue également deux formes de paraffines, celles à chaînes rectilignes qui sont les hydrocarbures n-paraffiniques, et celles à plusieurs branches qui sont les hydrocarbures iso-paraffiniques.

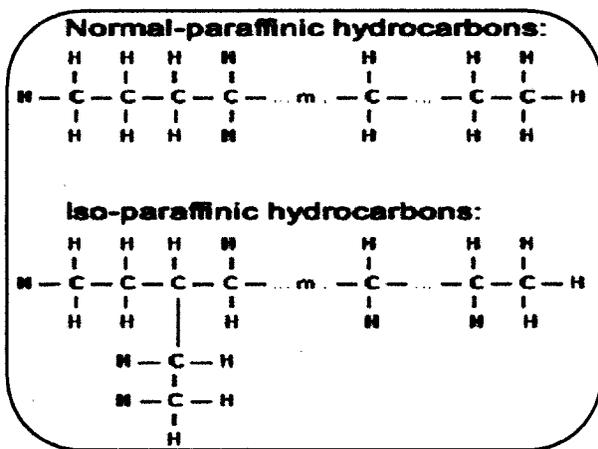


Fig.1.2 Formules semi-développées des paraffines

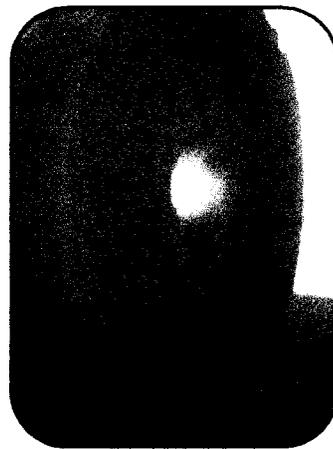


Fig.1. 3 Carotte de paraffine

Les paraffines sont les plus utilisés pour les applications de stockage d'énergie. En effet, plus le nombre d'atomes de Carbone augmente, plus la température de fusion et la chaleur latente augmentent. En passant de 1 à 100 atomes de Carbone, la température de fusion passe ainsi de 90,68 K à 388,4 K tandis que la chaleur latente passe de 58 kJ/kg à 285 kJ/kg.

c) Les avantages des cires de paraffine:

- ✓ Hystérésis négligeable.
- ✓ Faible pression de vapeur même à des températures élevées.
- ✓ Chimiquement stables.
- ✓ Pas de ségrégation de phase.
- ✓ Inerte chimiquement avec la plupart des matériaux.
- ✓ Aucun danger écologique.
- ✓ Faible dilation volumique lors du changement de phase.

Cependant les cires paraffiniques sont aussi :

- Facilement inflammables.
- Faible conducteur thermique, ce qui peut gêner dans des cinétiques rapides.

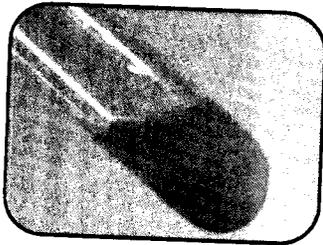


Tableau 1.2 : propriétés thermique des paraffines

	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(en C°)	5.5	16.7	28	36.7
Enthalpie de fusion (en Kj/Kg)	226	237	244	247
Masse volumique solide en(Kg/m ³)	825	835	814	856
Masse volumique liquide en (Kg/m ³)	771	776	774	778

d) Les MPC eutectique [3] :

Ces matériaux sont un mélange de sels possédant une température de fusion constante pour une valeur particulière de concentration. Ils peuvent être inorganiques et organiques ou composés. Peu de données sont disponibles sur les propriétés thermiques de ces matériaux.ils se caractérisent avec une chaleur latente volumétrique légèrement supérieurs à celle des composés organiques. Le comportement des eutectiques est semblable à celui des Hydrates salins. Il existe également des mélanges eutectiques organiques.



a) eutectique inorganique nitrate de magnésium

b) eutectique organique laurique

Fig1.4 les MPC eutectique[1]

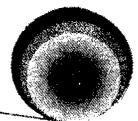


Tableau 1.3 : propriétés thermique des MPC eutectique.

Inorganiques	Point de fusion (en °C)	Chaleur latente de fusion (en kJ/kg)
MgCl, 6H ₂ O + Mg(NO ₃) ₂ , 6H ₂ O	58	132,3
Na ₂ SO ₄ , H ₂ O + NaCl, NH ₄ Cl	13	146
Mg(NO ₃), 6H ₂ O + NH ₄ NO ₃	51	131,3
Mg(NO ₃), 6H ₂ O + MgCl ₂ , 6H ₂ O	58	106
CaCl ₂ , 6H ₂ O + CaBr ₂ , 6H ₂ O	14	140
Organiques		
Acide Laurique - Caprique	18	120
Acide Laurique - Palmitique	33	145
Acide Laurique - Stéarique	34	150
Acide Palmitique - Stéarique	51	160

1.2.3. Certains phénomènes physiques qui influent sur le rôle des MPC :

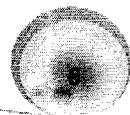
Certains phénomènes physiques ont un impact sur l'efficacité du stockage des MCP. Les trois principaux phénomènes sont, l'hystérésis, la surchauffe et la dilation.

a) L'hystérésis :

L'hystérésis se produit quand la solidification et la fusion du matériau ont lieu à des températures différentes. En effet, le stockage et la décharge de chaleur n'ont pas lieu aux mêmes températures, il en résulte donc une différence de chaleur absorbée pendant le chauffage, et celle restituée pendant le refroidissement. Quand on refroidit un liquide, on n'observe pas en général la solidification au moment où on atteint la température de fusion. Le matériau peut rester à l'état liquide jusqu'à plusieurs dizaines de degrés au dessous de la température de changement d'état. Lorsque la solidification se déclenche, elle dégage de la chaleur et si la masse de liquide est assez grande et les échanges de chaleur avec l'extérieur sont faibles le déclenchement de la solidification provoque une remontée de la température du matériau jusqu'à la température de changement d'état.

b) La surchauffe :

La surchauffe et le réchauffement du corps après son changement d'état. L'inconvénient est que le matériau va emmagasiner cette chaleur spécifique et donc voir sa température augmenter, perdant par cette occasion l'écart de température avec l'ambiant lié à l'absorption de chaleur latente.



c) La dilatation :

Lors du changement de phase, le matériau change aussi de masse volumique, donc pour une masse donnée de volume, il en résulte des problèmes de stockage en milieu clos. Les containers doivent pouvoir résister à cette augmentation de volume, donc de pression.

1.2.4. Critères de choix d'un MCP

a) Critères thermiques :

- ✓ La température de fusion du MCP doit correspondre à la plage de températures d'utilisation.
- ✓ Bonne conductivité thermique pour accélérer le changement de phase.
- ✓ Stabilité du matériau lors des cycles thermiques.

b) Critères physiques :

- ✓ Faible tension de vapeur, faible différence de densité entre l'état liquide et solide du matériau pour pouvoir stocker les deux phases dans le même volume.
- ✓ Forte densité : plus la densité est forte plus le volume à stocker est faible.
- ✓ Faible surfusion.
- ✓ Bonne chaleur latente de fusion, supérieure à celle des autres matériaux utilisables.
- ✓ Faible pression de vapeur.
- ✓ Faible variation de volume lors du changement d'état.

c) Critères chimiques :

- ✓ Stabilité chimique sur de longues périodes
- ✓ Compatibilité avec les matériaux en contact.
- ✓ Ininflammabilité pour des raisons de sécurité.
- ✓ Compatibilité avec les matériaux de stockage, transport.

d) Critères écologiques :

Non toxique et non polluant.

e) Critères économiques :

Abondance et faible coût

1.3. Le Domaine d'utilisation :

Les matériaux sont une source importante d'innovation de l'industrie que l'on trouve dans une large Platte de produits et d'application. Les MPC par exemple leur utilisation s'articule au tour de trois fonctionnalités :

- ✓ La capacité de garder le froid.
- ✓ La capacité de garder le chaud.
- ✓ La capacité de stocker la chaleur.



- Les MPC stockent de l'énergie de manière latente lors d'une transition solide liquide ; lors de cette transition les MPC vont utiliser la chaleur autour d'eux pour changer de phase laissant la température stable aux alentours.
- la force des MPC et d'être disponible dans de larges gammes de températures en fonction de l'application visée.
- Les MPC peuvent à eux seuls apporter les avantages compétitifs suivants :
Economiquement et écologiquement ça fait baisser de consommation d'énergie ; et Sociaux c'est le gain de confort.

1.3.1. Les principales applications :

a) Les principales applications industrielles des MPC sont les suivantes :

- ✓ Isolation des bâtiments.
- ✓ Climatisation passive.
- ✓ Récupération de la chaleur issue de l'incinération des déchets.
- ✓ Diminuer les effets exothermiques de réaction chimiques.
- ✓ Stockage d'énergie thermique.
- ✓ Refroidissements et transport de produits alimentaire ou de produits sensibles pharmaceutiques ou médicaux.
- ✓ Energie solaire.
- ✓ Système thermique dans l'aérospatiale.
- ✓ Refroidissement du moteur dans l'industrie automobile.
- ✓ Protection thermique de composants et circuits électroniques.
- ✓ Performance des textiles (t-shirt de sport) les MPC stockent la chaleur dégager par le corps pour la restituer quand le corps auras besoin cela permettra d'accroître la capacité de récupération des joueurs et donc leur performance.

1.3.2. La climatisation passive et le chauffage :

Selon une étude du CSTB les MPC ont une innovation pour améliorer les performance énergétique des bâtiments en intégrant les MPC dans les parois des bâtiments (cloisons , carreaux de plâtre, briques) il est alors possible de diminuer la température de 3 ° à 5 ° ce qui limite le recours au système de climatisation coûteux en énergie le changement de phase à lieu selon les matériaux choisis par exemple la paraffine entre 19 ° et 27 ° ; les températures correspondant aux valeurs limites respectivement fixées pour le confort de l'hiver et l'été.

1.3.3. Le stockage de l'énergie thermique :

Les MPC stockent l'énergie thermique de phase solide en liquide puis ils restituent la chaleur par le changement de phase liquide à solide, le choix des MPC le plus approprié est fondé sur certains nombres de facteurs. Incluant le prix, la chaleur latente, la conductivité thermique tant sur les phases liquide plus que solides, parmi les MPC connues pour cette application on trouve l'acétate de sodium tri-hydraté .ces dispositifs sont souvent utilisés en complément d'une installation solaire ou d'un échangeur thermique.



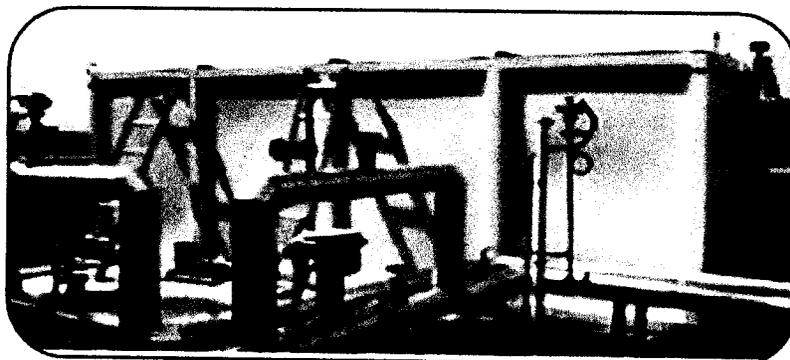


Figure 1.5 accumulateur de chaleur solaire développé par le DLR- german aerospace centre[19]

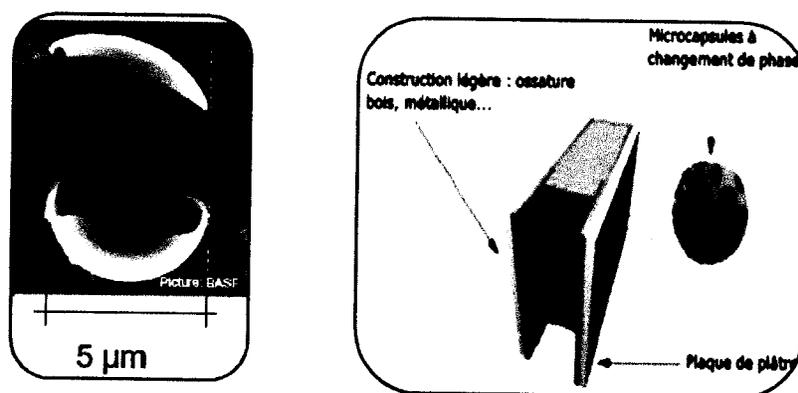


Figure 1.6. PCM encapsulé en polymère rempli de cire[2]

1.3.4. Le textile :

Dans ce domaine les MPC sont utilisés sous forme de microcapsules placés au cœur des fibres, qui absorbent stockent et libèrent de l'énergie de façon réactive afin de réchauffer lorsqu'il fait froid et/ou rafraîchir lorsqu'il fait chaud. Les MPC interviennent pour réguler les transferts de chaleur entre le corps humain et l'extérieur et les applications les plus nombreuses dans ce domaine se font actuellement autour :

- ✓ Des vêtements de travail et de sécurité.
- ✓ Des textiles techniques à usage médical.
- ✓ Des vêtements de montagnes et de sport.

1.3.5. L'isolation des bâtiments :

a) Les MPC micro encapsulé :

On trouve les MPC dans le bâtiment principalement sous forme de plaques où ils sont encapsulés. L'énergie stockée dans les parois et l'enthalpie de fusion n'est pas transmise à l'intérieur de l'édifice. En période de surchauffe, le MPC fond et la chaleur est emmagasinée ; lorsque le bâtiment se refroidit, ce dernier se solidifie et l'énergie stockée est restituée dans une certaine gamme de température du bâtiment. L'emploi des MPC dans un projet de rénovation, là où les demandes de maîtrise de l'énergie sont les plus fortes pour réduire les consommations d'été (climatisation tout en préservant un bon niveau de confort pour les bâtiments à faible inertie. le Centre Scientifique et Technique du Bâtiment

France propose également des Micronal® MPC. Ce matériau améliore le confort thermique d'été en lissant les pics de température de 3 à 4 °C et permet une économie de l'énergie de refroidissement du bâtiment. Il peut notamment être incorporé dans les enduits ou plaques de plâtre. La capacité d'absorption d'un enduit classique contenant un tiers de Micronal® MPC serait égale à celle d'un mur de briques creuses de 23 cm d'épaisseur et permettrait de réguler la température à des niveaux confortables entre 22 et 26° C.

b) La microémulsion : est un mélange de paraffine, un tensioactif, et de l'eau dans un rapport massique de 30%, 5%, et 65%, respectivement. Les particules PCM et de l'eau ne sont pas miscibles entre eux. La stabilité et la fluidité des particules PCM peut être obtenue grâce à des films minces (2-5 nm d'épaisseur) de le tensioactif polymère autour d'eux. le polymère tensioactif maintient la fluidité, et il est stable tandis que le PCM est sous un changement de phase. La résistance thermique du tensioactif polymère peut être négligeable. Il est considéré comme si le PCM à l'intérieur des particules est dans la phase liquide, et donc la circulation interne de la PCM se produit et le film tensioactif polymère est mobile. Mais quand le PCM est dans une phase solide, il n'y a pas de circulation interne du PCM. En conséquence, le coefficient de traînée par convection naturelle est plus faible pour le PCM dans le liquide de phase que celle pour le PCM dans la phase solide

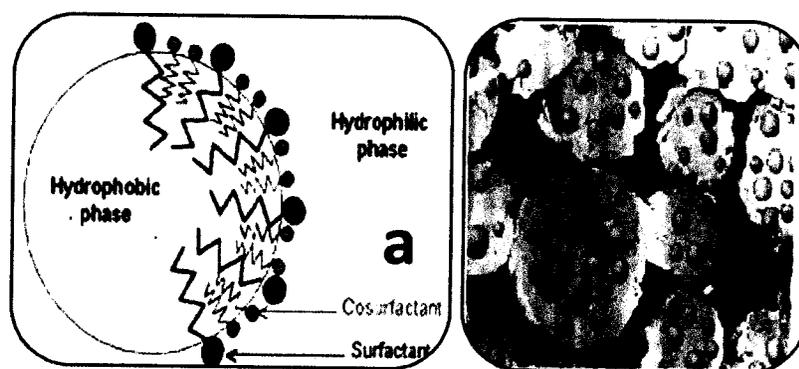


Figure 1.7 a) microémulsion ; b) micronodules dans des tissus. [1]

1.3. 6. Transport de produits alimentaire et médicaux :

les MPC sont utilisés dans l'industrie agroalimentaire, pharmaceutique et médicale pour limiter au maximum les variations de température que subissent les aliments ou les composants sensibles comme par exemple dans le cas du transport du sang ils se présentent la plus part du temps sous forme de petits sacs plastiques contenant les MPC choisis qui sont disposés au plus près du produit à conserver, aussi les MPC sont utilisés dans le catering (plateau de repas) le point de fusion des MPC dépend de la température à laquelle les aliments doivent être maintenus 60°C à 70°C sont les températures optimales pour que les aliments ne continuent pas à cuire mais soient assez chauds pour être mangés.

1.3.7. Utilisation des matériaux à changement de phase dans le domaine d'informatique [5]:

Des matériaux de changement de phase sont caractérisés par une brochette de propriétés uniques. Ils possèdent une différence prononcée des propriétés optiques et électroniques selon leur arrangement atomique, c.-à-d. s'ils sont amorphes ou cristallins. Le but ultime d'intégration pour la mémoire à accès sélectif de changement de phase (PCRAM) c'est les millions de bits aux gigabits de cellules de mémoire de changement de phase, qui peuvent être sans couture incorporées à une technologie des semi-conducteurs existante.

Afin d'être adapté par l'industrie des semi-conducteurs, les questions les plus importantes sont le coût de fabrication, la fonctionnalité de la mémoire, et l'évolutivité de la mémoire pour de futures technologies. En outre, plus petit la puce de mémoire et plus le nombre d'étapes de transformation requises, il sera sur une gaufrette donnée pour ne produire un morceau sans aucun défaut probable.

Des matériaux Phase-change avec des compositions sur l'attacher-ligne GeTe-Sb₂Te₃ ont été découverts en 1987 et sont fréquemment employés. La mémoire peut maintenir son information (conservation), et la capacité de la mémoire de résister à des conditions environnementales dures (par exemple, rayonnement, choc, températures, etc.). L'évolutivité d'une cellule de mémoire peut être décrite en termes de difficultés physiques liées à rétrécir les dimensions de la cellule de mémoire et en termes de l'évolutivité des caractéristiques de dispositif en fonction des dimensions de la cellule de mémoire.

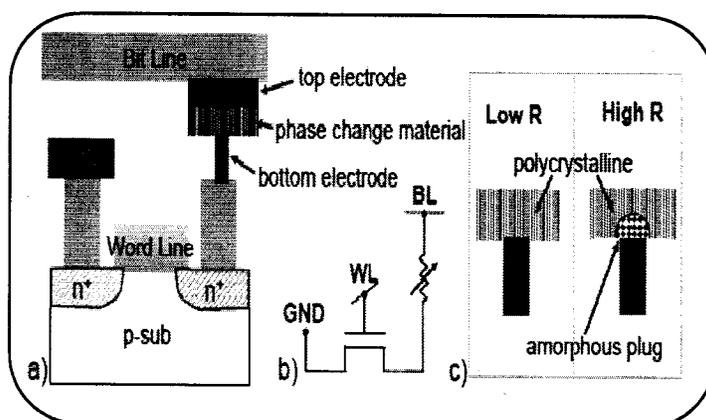


Fig1.8. La cellule de mémoire à changement de phase est composée d'une résistance variable en série avec un dispositif d'accès. [1]

1.3.8. Stockage solaire thermique :

a) La production de l'eau chaude :

Le principal problème lié à l'utilisation de l'énergie solaire thermique concerne son stockage. La production d'eau chaude sanitaire via la circulation d'eau au travers des panneaux solaire est directement dépendante de l'ensoleillement. L'utilisation des MPC a participé en partie à résoudre ce problème :

D'une part la quantité d'énergie stockée d'un ballon de même volume sera plus grande avec un MPC qu'avec de l'eau seule, et il sera possible d'accumuler une plus grande quantité de chaleur que celle nécessaire à une seule journée d'occupation, Par ailleurs nous pouvons élever indéfiniment la température du volume de stockage pour éviter le risque de vaporisation de fluide néfaste aux pompes de circulation, il est possible de stocker cette chaleur sous forme latente sans pour autant élever la température du matériau en utilisant par exemple les MPC dont la température de fusion se situe aux environ de 60 à 70 C°.

b) Les panneaux solaires à double vitre :

Le CSTB a étudié l'intégration de MCP dans un concept de façade vitrée intelligente dont la multifonctionnalité contribue à diminuer les consommations énergétiques, tout en améliorant le confort. Cette « paroi légère à hautes performances thermiques » est une double peau vitrée translucide avec deux doubles vitrages, dont l'élément extérieur assure la fonction de protection solaire, en intégrant un élément prismatique. L'élément intérieur joue le rôle de stockage thermique grâce à la présence d'un MCP à base de sels hydratés dans des briques de polycarbonate empilées. Les deux parois sont séparées par une lame d'air ventilée par des appareils intégrés en partie haute de la paroi et alimentés par une cellule photovoltaïque ; La ventilation est régulée par un système de pilotage gérant aussi l'ouverture et la fermeture des entrées et sorties d'air dans la paroi (voir fig1.9)

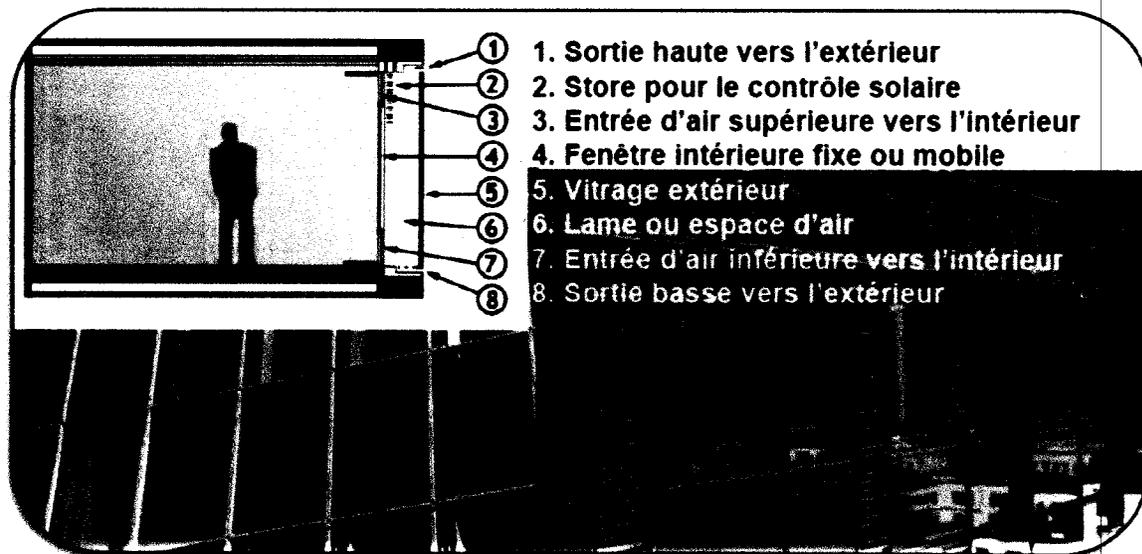


Figure 1.9. Paroi légère à hautes performances thermiques[8]

1.4. La production du froid :

1.4.1. Le type de compresseur utilisé pour le frigo domestique [6]:

a) Le compresseur :

Le compresseur a pour rôle de créer une Haute Pression d'un côté et une Basse Pression de l'autre et par conséquent, d'assurer la circulation du fluide dans le circuit frigorifique. Le but de l'utilisation du compresseur est d'augmenter la pression du fluide frigorigène provenant de l'évaporateur correspondant au degré de température de saturation plus élevée que la température ambiante et cela conduit à un échange de chaleur entre le fluide frigorigène et le milieu environnant, car il conduit à l'intensification du fluide frigorigène. Les compresseurs sont disponibles avec différents principes de fonctionnement. Il existe par exemple des compresseurs scroll, des compresseurs à vis, des compresseurs rotatifs, des turbocompresseurs et des compresseurs à piston.

b) Compresseurs à piston hermétiques :

La technologie la plus répandue est celle du cycle à compression de vapeur en utilisant des compresseurs à pistons. Au fil des années les constructeurs ont conçu des appareils extrêmement fiables avec des technologies propres aux réfrigérateurs : détendeur de type capillaire; condenseur à serpentin soudé sur treillis en fils d'acier, évaporateur roll-bond.

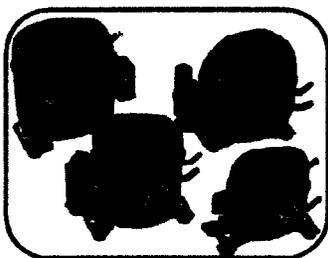


Figure 1.10. Compresseurs à piston domestiques noirs déplacement de 2 à 34 cm³ [6]

Le compresseur fait passer le réfrigérant à l'état de vapeur d'un niveau de pression basse (pression d'aspiration) à un niveau élevé (pression de refoulement). Dans un compresseur à piston hermétique, les fuites de réfrigérants sont inexistantes grâce à la parfaite étanchéité hermétique du circuit frigorifique sur le corps du compresseur. Aujourd'hui tous les compresseurs intégrés dans les réfrigérateurs domestiques sont des compresseurs à piston hermétiques.

Ils sont généralement livrés avec suffisamment d'huile pour vous éviter d'en rajouter (du moins pour les systèmes compacts). Dans les petits compresseurs, le refroidissement statique par l'air ambiant est généralement suffisant mais pour les compresseurs noirs plus puissants, le refroidissement par huile ou par ventilation est nécessaire.

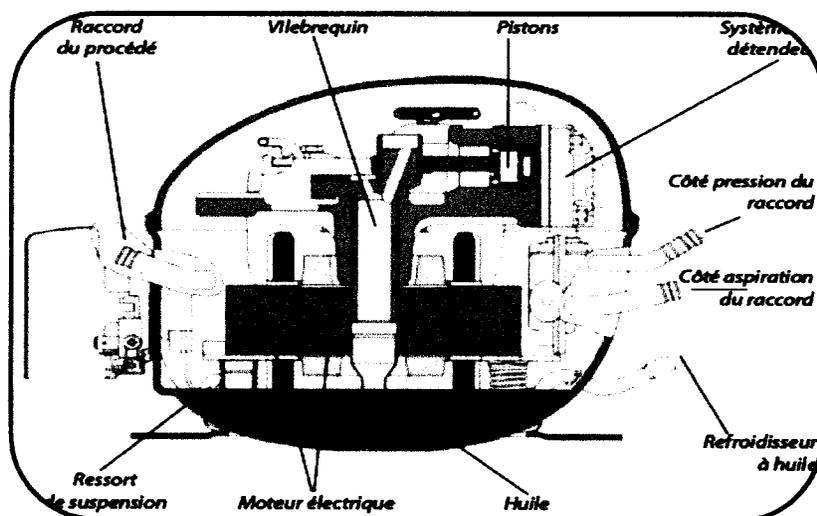


Figure 1.11.les composants du compresseur à piston[6]

1.4.2. L'installation frigorifique :

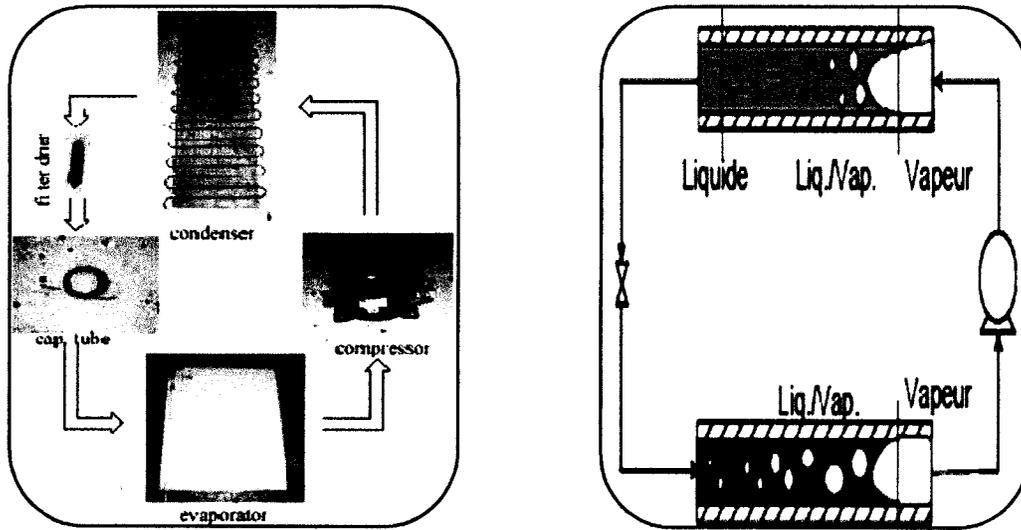


Fig1.12. a) l'installation frigorifique

;b) le cycle frigorifique [19]

a) Le compresseur :

Le compresseur aspire le gaz à basse pression et à basse température, l'énergie mécanique du compresseur va permettre une élévation de pression et de température, le gaz sort par le tuyau rouge.

b) Le condenseur :

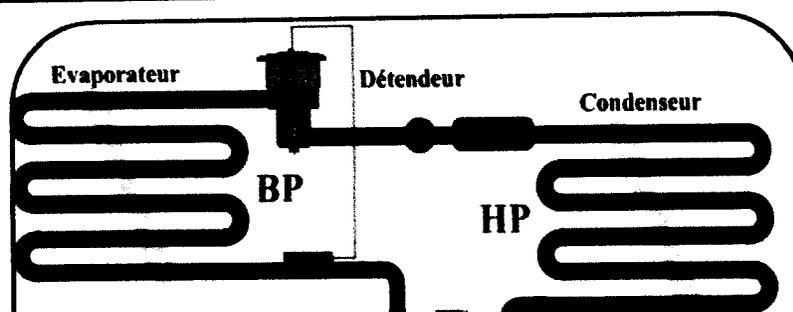
Les gaz chauds haute pression et haute température venant du compresseur se dirigent vers le condenseur, le condenseur est un échangeur qui va permettre aux gaz de se condenser par échange avec le fluide extérieur qui est l'air à température et pression constante, c'est la phase de condensation, et la vapeur se transforme en liquide.

c) Le détendeur :

Le liquide formé dans le condenseur est détendu par abaissement brusque de la pression au passage du détendeur. Le fluide sort du détendeur à l'état liquide (90%) et gazeux (10%) en perdant quelques calories.

d) L'évaporateur :

L'évaporateur est lui aussi un échangeur, le fluide liquide provenant du détendeur va entrer en ébullition dans l'évaporateur en absorbant de la chaleur au fluide extérieur qui est l'air en captant les calories du local à réfrigérer. On obtient donc du froid ; c'est la phase d'évaporation. Le gaz est ensuite aspiré par le compresseur pour un nouveau cycle.



1.5.2. La classification des fluides frigorigènes :

Les fluides frigorigènes sont divisés en deux grandes familles que sont :

- ✓ les composés inorganiques.
- ✓ les composés organiques

a) Les composés inorganiques :

Les fluides de cette famille sont ceux de la série 700. Le fluide le plus utilisé de cette famille est l'ammoniac (NH_3) et il est désigné par R717, R désigne Réfrigérant, Le 7 des centaines désigne la série 700, Le 17 représentant les deux derniers chiffres désigne la masse molaire du corps 14 pour l'azote N et 3 pour l'hydrogène H.

L'eau (H_2O) : R718

Le dioxyde de carbone (CO_2) : R744

b) Les composés organiques :

Les composés organiques sont des dérivés du méthane (CH_4) et de l'éthane (C_2H_6)

Ils se divisent en trois sous familles :

- ✓ Les corps purs.
- ✓ Les mélanges de corps purs.
- ✓ Les hydrocarbures.

1. Les corps purs :

Se regroupent en trois sous groupes suivant leur composition chimique, La caractéristique principale d'un corps pur est qu'il se condense et s'évapore à température et pression constante.

- ✓ les CFC (chlorofluorocarbone) le R12.
- ✓ les HCFC (hydrochlorofluorocarbone) le R22.

2. Les mélanges :

Les mélanges de corps purs se regroupent en deux sous groupes que sont :

- ✓ Les mélanges azéotropiques qui se comportent comme des corps purs Les mélanges azéotropiques sont les fluides frigorigènes de la série 500, exemple : le R502 (mélange de 48.8% de R22 et de 51.2% de R115).
- ✓ Les mélanges zéotropiques qui ne sont pas des corps purs se sont les fluides frigorigènes de la série 400, exemple : le R404A (mélange de 52% de R143a, de 44% de R125 et de 4% de R134a).

3. Les hydrocarbures :

Les fluides frigorigènes du type hydrocarbure proviennent essentiellement du raffinage du pétrole mais également du dégazolinage (récupération des hydrocarbures liquides) du gaz naturel. Ce sont



1.4.2. L'installation frigorifique :

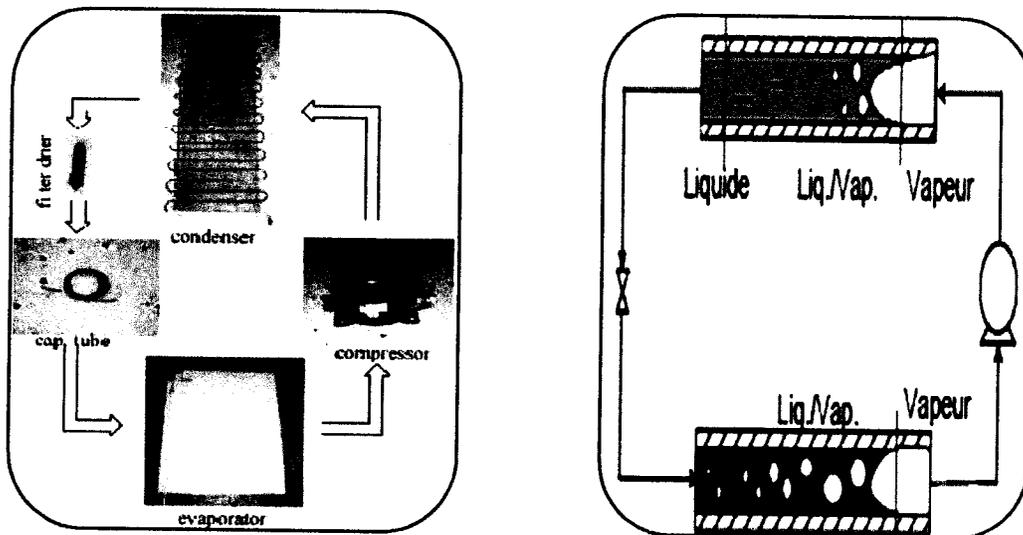


Fig1.12. a) l'installation frigorifique

;b) le cycle frigorifique [19]

a) Le compresseur :

Le compresseur aspire le gaz à basse pression et à basse température, l'énergie mécanique du compresseur va permettre une élévation de pression et de température, le gaz sort par le tuyau rouge.

b) Le condenseur :

Les gaz chauds haute pression et haute température venant du compresseur se dirigent vers le condenseur, le condenseur est un échangeur qui va permettre aux gaz de se condenser par échange avec le fluide extérieur qui est l'air à température et pression constante, c'est la phase de condensation, et la vapeur se transforme en liquide.

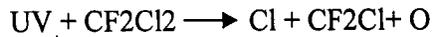
c) Le détendeur :

Le liquide formé dans le condenseur est détendu par abaissement brusque de la pression au passage du détendeur. Le fluide sort du détendeur à l'état liquide (90%) et gazeux (10%) en perdant quelques calories.

d) L'évaporateur :

L'évaporateur est lui aussi un échangeur, le fluide liquide provenant du détendeur va entrer en ébullition dans l'évaporateur en absorbant de la chaleur au fluide extérieur qui est l'air en captant les calories du local à réfrigérer. On obtient donc du froid ; c'est la phase d'évaporation. Le gaz est ensuite aspiré par le compresseur pour un nouveau cycle.

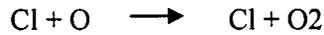
Cas du CFC R12 (CF₂Cl₂)



(Libération atome de chlore du CFC R12)



(Réaction du chlore libéré avec l'Ozone : Destruction Ozone)



(Réaction du ClO avec O et libération d'un atome de chlore à nouveau...)

Une fois ces produits rejetés, ils influenceront le processus d'appauvrissement de la couche d'ozone pendant des centaines d'années à venir. ; c'est pour caractériser la capacité de destruction de la couche d'ozone par les fluides frigorigènes qu'a été défini le potentiel d'action sur la couche d'ozone (PAO) le PAO du CFC R11 est égale à 1, ce fluide étant considéré comme celui ayant l'effet le plus destructeur sur la couche d'ozone. Un PAO de 0 signifierait que le fluide frigorigène considéré n'a aucun effet sur la destruction de la couche d'ozone.

Le tableau4 : Valeurs de PAO de quelques fluides frigorigènes.

FF	R11	R12	R22	R134a	R717	R507	R404A	R600
Famille	CFC	CFC	HCFC	HFC	inorganique	Azéotropique	Zéotropique	hydrocarbure
PAO	1	0.9	0.05	0	0	0	0	0

Les conséquences de la destruction de la couche d'ozone (augmentation des rayons UV B à la Surface de la Terre) sont les suivantes :

- ✓ L'augmentation des cancers de la peau.
- ✓ L'augmentation des cas de cataractes et autres lésions oculaires.
- ✓ La baisse des rendements agricoles et la destruction des forêts.
- ✓ La détérioration de la vie maritime et d'autres.

c) Réchauffement de la planète :

La température de la terre est maintenue par un équilibre entre l'effet réchauffant apporté du rayonnement solaire venant de l'espace et l'effet refroidissant des rayons infrarouges émis par la surface chaude de l'écorce terrestre et l'atmosphère qui remontent vers l'espace. Les gaz présents dans l'atmosphère et qui absorbent une partie de ce rayonnement IR sont appelés gaz à effet de serre. Il s'agit principalement du CO₂, de la vapeur d'eau, du méthane (CH₄) et de l'oxyde nitreux (N₂O) et des fluides frigorigènes rejetés dans l'atmosphère (principalement les CFC). La concentration des gaz à effet de serre va augmenter le pouvoir d'absorption des rayonnements IR et par suite augmenter la température moyenne autour de la surface de la planète : c'est le réchauffement de la planète.

Pour caractériser l'effet des fluides frigorigènes sur le réchauffement de la planète on a défini le Potentiel d'Action sur l'Effet de Serre (PAES) ou GWP (Global Warning Potential) qui est un index qui compare l'effet de réchauffement des différents gaz au fil du temps par rapport à des émissions équivalentes de CO₂ (exprimé en masse).



Tableau1.5 : Valeurs de GWP100 de quelques fluides frigorigènes.

FF	R11	R12	R22	R134a	R717	R507	R404A	R600
Famille	CFC	CFC	HCFC	HFC	inorganique	Azéotropique	Zéotropique	hydrocarbure
GWP ₁₀₀	3500	7300	1500	1200	< 1	3330	3260	3

1.5.4. L'isobutane R600a [9]:

Les Hydrofluorocarbures (HFC) : inoffensif pour la couche d'ozone, ce sont des gaz à effet de serre plus ou moins puissant consomme moins d'électricité. Parmi les (HFC) L'isobutane (R600a) : utilisé dans les réfrigérateurs plus récents son effet de serre est très nettement réduit par rapport aux précédents. Malheureusement, c'est un hydrocarbure extrêmement inflammable utilisé comme fluide frigorigène de très haute pureté (>99,5 %), le R600a assure une longue durée de vie au matériel en contact avec le produit.

Tableau1.6

Caractéristique standards	Valeurs limites
Aspect	clair
Teneur en vapeur à 20C°	2.2±0.2 bar
Composition :	≤0.4% volume
Propane	≥ 99.5% volume
Isobutane	≤ 0.25% volume
n- butane	≤ 0.01% volume
insaturés C4	
odeur	sans
Teneur en eau	≤ 0.0012% volume

Tableau1.7

caractéristique		unités	valeur
Formule chimique	(Ch ₃ 3Ch)		
Masse moléculaire		g.mol	58
Température d'ébullition	Sous 1.013 Bar	C°	-11.7
Masse volumique du liquide	à 15C°	Kg/dm ³	0.564
Masse volumique de la vapeur	à 15C°	Kg/dm ³	0.007
Limite inférieur d'inflammabilité	Dans l'air à 20C°	% en volume	1.8
Limite supérieur d'inflammabilité	Sous 1.01013 bar		9.4
Température d'auto-inflammation		C°	543

1.5.5. Les qualités du fluide frigorigène :

Les fluides frigorigènes ont pour rôle d'assurer les transferts de chaleur entre l'évaporateur et le condenseur de la machine. Ils évoluent cycliquement dans le circuit de la machine absorbant de la chaleur dans l'évaporateur et en cédant de la chaleur dans le condenseur. Divers fluides frigorigènes sont utilisés dans l'application des machines frigorifiques et des pompes à chaleur, le choix du fluide étant effectué en tenant compte des problèmes thermiques particuliers ainsi que d'un certain nombre de critères : thermiques, physiques, chimiques et économiques.

a) Qualités thermique

La chaleur enlevée à l'enceinte est égale à la chaleur de vaporisation du liquide frigorigène.
Une chaleur latente de vaporisation élevée, avec une forte chaleur spécifique à l'état vapeur.

b) Qualités physiques :

- ✓ Une pression d'évaporation supérieure à la pression atmosphérique ce qui permet une détection plus aisée de fuites éventuelles et empêche l'air et l'eau de pénétrer dans le circuit.
- ✓ Une faible température d'ébullition afin d'éviter d'installer un vide poussé pour obtenir l'ébullition.
- ✓ Un faible volume spécifique de la valeur saturé, ce qui augmentera la production de frigories, pour un même volume de vapeur aspiré par le compresseur.
- ✓ Une pression de condensation modérée ce qui assure une meilleure sécurité des joints dans la partie haute-pression et un meilleur rendement volumétrique du compresseur.
- ✓ Une température critique élevée pour éviter l'emploi de récipients à parois épaisses.
- ✓ l'inflammabilité, l'inexplosibilité et la non toxique.
- ✓ Une température de refoulement du compresseur (caractéristique intrinsèque de chaque fluide pour des conditions de fonctionnement données) relativement basse pour une plus grande longévité du Compresseur.

c) Qualités chimiques :

D'un point de vue chimique, le fluide devra :

- ✓ Ne présenter aucune action corrosive sur les métaux employés.
- ✓ Posséder des caractéristiques stables aux différentes températures auxquelles il est soumis.
- ✓ Ne pas altérer les caractéristiques chimiques de l'huile de lubrification du compresseur.

1.6. Le stockage de l'énergie thermique :

1.6.1. Définition :

En général, stocker de l'énergie consiste à l'emmagasiner pendant une période où elle est abondante ou moins coûteuse (solaire, tarifs de nuit...) pour l'utiliser pendant une période durant laquelle elle est rare ou plus chère.

1.6.2. Les trois modes de stockage thermique:

- ✓ Le stockage par chaleur sensible qui exploite la capacité calorifique d'un matériau [20]
- ✓ Le stockage par chaleur latente qui consiste à utiliser la transformation solide – liquide d'un Matériau à Changement de Phase (MCP) [21].
- ✓ Le stockage thermochimique qui exploite la chaleur de sorption mise en œuvre dans des processus physico-chimiques renversables d'absorption exothermique et de désorption endothermique d'un gaz [22].



a) Le stockage du froid par chaleur sensible :

Ainsi, à pression constante, si l'on réchauffe un corps (généralement solide ou liquide) de masse M et $c(T)$ la capacité thermique massique de la température initiale T_1 , à la température finale T_2 , on peut stocker une énergie donnée par sa variation d'enthalpie :

$$H_2 - H_1 = \int_{T_1}^{T_2} Mc(T)dT \quad (1.1)$$

Si $c(T) = \text{cte} = c$

$$H_2 - H_1 = M(c)(T_2 - T_1) \quad (1.2)$$

Si, ultérieurement, on met en contact ce corps en présence d'un système utilisateur à une température $T'_1 < T_2$, il pourra récupérer une quantité d'énergie égale à :

$$Mc(T_2 - T'_1) - |Q_{\text{perte}}|$$

Avec Q_{perte} perte de chaleur au cours du maintien à T_2 ou lors de l'échange, que l'on essaie de minimiser. D'après les conventions de la thermodynamique, cet échange de chaleur est négatif d'où les signes de valeur absolue. On dira que l'on a fait un stockage par chaleur sensible, précisons que si au cours de l'opération de stockage on a :

$T_2 > T_1$ On parlera de stockage du chaud.

$T_2 < T_1$ On parlera de stockage du froid (dans ce cas $T'_1 > T_2$ et le système à T'_1 cède de l'énergie)

La restitution de l'énergie vers des températures plus basses sera un déstockage du chaud dans le premier cas et la restitution de l'énergie vers des températures plus hautes sera un déstockage du froid dans le deuxième. Il est utile d'utiliser des matériaux à forte capacité thermique qui emmagasineront un maximum d'énergie. Mais ces matériaux doivent avoir d'autres propriétés comme une stabilité à long terme lors des cyclages thermiques, la comptabilité avec le récipient de stockage et également un coût raisonnable. Le classement du type de stockage par chaleur sensible dépend du milieu de stockage, en Particulier de son état physique. On définira ainsi:

- ✓ le stockage par un fluide (l'eau, l'huile, des sels fondus...).
- ✓ le stockage par un solide (pierre, métaux,...).

Le stockage par l'eau :

L'eau est le meilleur milieu pour le stockage aux faibles températures. Il a la capacité thermique massique la plus grande par rapport aux autres corps ($4185 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ à 20°C). Ainsi, pour une variation de température de 60°C , l'eau peut stocker 250 kJ/kg ou $2.5 \cdot 10^5 \text{ kJ/m}^3$. De plus, l'eau n'est pas chère et facilement disponible. Cependant, à cause de sa grande pression de vapeur, pour les applications à haute température, elle demande une isolation coûteuse et un réservoir de stockage qui résiste aux fortes pressions. L'eau est utilisable non seulement comme milieu de stockage mais aussi comme milieu de transport de l'énergie. Actuellement, l'eau chaude est le vecteur le plus utilisé dans les Systèmes d'applications de l'énergie solaire. Elle est utilisable dans un domaine de températures allant de 25 à 90°C .

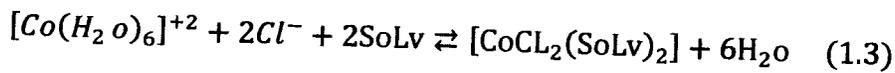


b) Stockage thermochimique :

Quelques études ont été consacrées au stockage thermochimique. Il consiste à utiliser une réaction chimique endothermique. En fournissant de l'énergie, on déplace l'équilibre vers la droite et par contact avec une source à température plus basse, on le déplace vers la gauche en libérant l'énergie de réaction.

Exemple :

Le chlorure de cobalt hexahydraté $CoCl_2 \cdot 6H_2O$ donne dans un solvant alcoolique (isopropanol) :



L'enthalpie de réaction est relativement importante (105 kJ/mol), mais le déplacement d'équilibre n'est en général pas suffisant. On trouve, par exemple, que l'énergie due au déplacement d'équilibre est inférieure à 10 % de l'énergie de type sensible. Le gain est donc dérisoire et ce type de stockage semble être resté au stade du laboratoire.

c) Le stockage par chaleur latente :

Ce type de stockage est une technique attractive. De plus, il permet de stocker la chaleur sous la forme de chaleur latente de fusion à une température constante, cette température correspondant à la température de la transition de phase. Pour donner des ordres de grandeur, l'énergie demandée pour fondre 1 kg de glace est 80 fois l'énergie demandée pour augmenter la température de 1 kg d'eau de 1°C, autrement dit et pour chiffrer l'énergie nécessaire, alors que l'on a besoin d'une énergie de 4,2 kJ pour diminuer la température de 1 kg d'eau d'une température de 1°C à 0°C, il faut 335 kJ pour compléter sa solidification en glace à $T = 0^\circ C$. Une autre image en est donnée figure (1.3).

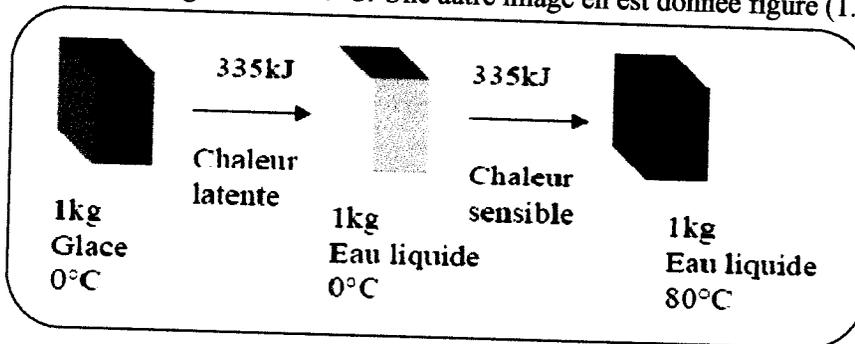


Figure 1.15 Equivalence entre la chaleur latente nécessaire pour fondre 1 kg de glace et la Chaleur sensible nécessaire pour chauffer l'eau liquide. [5]

On remarque donc que:

- ✓ La chaleur latente est beaucoup plus importante que la chaleur sensible (pour un écart de température pas trop important).
- ✓ Les points de fusion dépendent des corps utilisés; ce critère permet d'utiliser des matériaux différents en fonction des températures souhaitées. Ces matériaux sont les Matériaux à Changement de Phase (MCP).

Le stockage de chaleur par chaleur latente est très important puisque l'on peut stocker de plus grandes quantités d'énergie avec des masses plus faibles et des variations de température plus faibles. On peut s'attendre toutefois à ce qu'il demande une technologie plus élaborée que le stockage par chaleur sensible.

1.6.3. Domaine d'utilisation du système de stockage par chaleur latente :

Ce mode de stockage du froid trouve des applications vastes et multiples dans plusieurs domaines, tels que :

- ✓ La climatisation des grands bâtiments : centres commerciaux, aéroports, immeubles de bureaux.
- ✓ Le froid industriel : industrie pharmaceutique, agroalimentaire, entrepôts frigorifique.

- ✓ Installation de secours : stockage de produits chimiques ou explosifs, hôpitaux, protection de salles informatiques.

a) Les contraintes technologiques du stockage par chaleur latente :

Le stockage par chaleur latente utilise l'enthalpie de changement d'état pendant la fusion ou la solidification du milieu utilisé, mais il peut utiliser également la chaleur sensible nécessaire pour chauffer le solide jusqu'à son point de fusion. Il faut donc :

- ✓ Que le système de stockage supporte le changement de phase dans les limites des températures demandées pour ce changement.
- ✓ Que le système de stockage supporte le changement de phase avec le changement de volume qui lui est lié.
- ✓ Un conteneur capable de stocker les matériaux suivant leur nature.
- ✓ Une surface d'échange pour transférer l'énergie thermique entre la source de chaleur et le Matériau à changement de phase.

b) Les avantages du stockage par chaleur latente :

Par rapport au stockage par chaleur sensible, les principaux avantages du stockage par chaleur Latente peuvent être résumés ainsi:

Les matériaux utilisés, pour le confort thermique du bâtiment (20 à 30°C), peuvent stocker de 5 à 14 fois plus de chaleur que les matériaux de stockage à chaleur sensible.

- ✓ Quand la décharge d'énergie thermique a lieu, la température de la surface de MCP reste proche de la valeur de la température de changement d'état. On a donc un contrôle passif De la température de la surface.
- ✓ La quantité d'énergie de la décharge ne dépend donc que de la température de l'environnement.
- ✓ Le stockage par chaleur latente ne pose pas de problème de surchauffe saisonnière grâce à Sa faible masse.

1.7. Différents processus de stockage par chaleur latente [10] :

1.7.1. Les Fluides frigoporteurs diphasiques :

Les fluides frigoporteurs diphasiques et leurs applications font encore l'objet de recherche et de développement. Il s'agit de liquides comportant des parties solides en suspension qui peuvent fondre en échangeant de la chaleur latente. Ces fluides sont particulièrement intéressants pour le transport énergétique, ils sont utilisés pour leurs transformations de phases.

Plusieurs types sont à l'étude [11] :

- ✓ les coulis de glace ;
- ✓ les micros encapsulations ;
- ✓ les macros encapsulations ;
- ✓ les billes de gel ;
- ✓ Les clathrates ;

Les coulis de glace sont constitués d'eau ou de solutions aqueuses contenant des particules de glace. On peut alors transporter l'énergie latente de la glace sur de grandes distances. Compte tenu de la

grande valeur de la chaleur latente de la glace, une importante énergie peut être transportée pour un même débit, ou une même énergie a besoin d'un débit plus faible pour être transportée. Microémulsions sont constituées de très fines particules (quelques micromètres de diamètre, voire moins) des MCP obtenues par dispersion et stabilisées par des molécules tensioactives. Il s'agit généralement de microémulsions de paraffines dispersées dans de l'eau et stabilisées par des surfactants anioniques ou non ioniques.

Il est possible d'inclure jusqu'à 50 % de MCP, mais les viscosités importantes entraînent alors de fortes pertes de charge. De plus, ces dernières sont assez différentes suivant que le MCP est liquide ou solide. Les particules de MCP incorporé sont en général assez petites pour entraîner une surfusion gênante.

Les micros encapsulations sont constituées de MCP dispersés dans un liquide inerte, chaque goutte étant individualisée cette fois ci par un enrobage plastique rigide. Les techniques actuelles permettent d'obtenir des capsules de 1 à 5 mm de diamètre. Les enveloppes, ayant des épaisseurs de 2 à 10 nm, ne présentent pas de résistance thermique importante.

Le MCP est souvent constitué de paraffines ayant des températures de fusion autour de la température ambiante. L'utilisation simultanée de capsules contenant des MCP différents et donc de températures de fusion différentes est possible. Un des avantages par rapport aux microémulsions est que les pertes de charge restent comparables à celle de l'eau jusqu'à des teneurs en capsules dans le liquide inerte de 30 %. Ces pertes de charge sont évidemment identiques que le MCP soit liquide ou cristallisé.

1.7.2. Les Nodules encapsulés :

Le principe de ce stockage est d'utiliser un MCP confiné dans des récipients étanches de petites dimensions (quelques cm^3 à quelques L). Il suffit de les refroidir pour cristalliser leur contenu et de les mettre en contact avec la charge chaude pour le déstockage. Il existe ainsi, sur le marché, un certain nombre de produits. Ils sont constitués de briques, de poches, de plaques qui sont amovibles. Ils sont généralement refroidis dans des réfrigérateurs ou congélateurs puis disposés à l'endroit où l'on veut récupérer le froid. Il s'agit souvent d'aider au transport frigorifique de marchandises fragiles et d'un coût élevé. Sur un plan plus industriel, notons principalement l'utilisation de nodules sphériques. De tels nodules remplissent une cuve (figure 1.2) qui peut être traversée par un fluide frigoporteur tel que de l'eau glucosée. Lorsqu'on fait traverser la cuve par un liquide suffisamment froid, le MCP à l'intérieur des nodules cristallise, stockant l'énergie par chaleur latente. Si la cuve est, plus tard, parcourue par un liquide chaud (température supérieure à la température de fusion), l'encapsulation des MCP se divise principalement en deux catégories [11]:

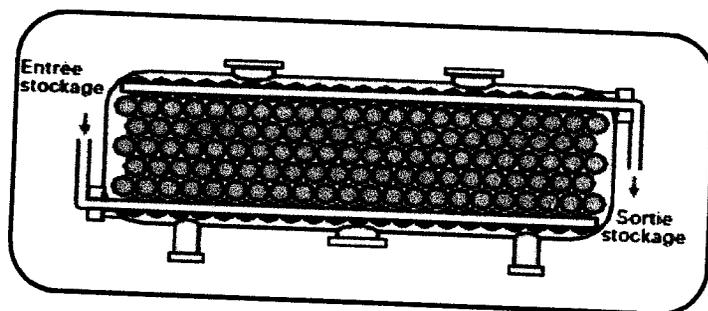


Figure 1.16. Schéma d'une cuve horizontale. [5]

a) La micro encapsulation :

La micro-encapsulation utilise soit des micro-émulsions constituées de particules très fines (quelques μm ou moins) de MCP stabilisées par des molécules tensioactives, soit des suspensions de particules de MCP stabilisées dans un polymère

b) La macro-encapsulation :

L'encapsulation macroscopique comprend plusieurs formes : des plaques, des capsules, des bâtonnets ou de sphères. Dans le cadre de ce travail nous étudierons ce dernier cas, qui présente des avantages pratiques comme nous allons le voir par la suite.

1.7.3. Les Bacs à glace :

C'est un système qui est actuellement très répandu à cause de sa simplicité et de la très longue expérience des installateurs. Il s'agit simplement d'une cuve contenant de l'eau en contact direct avec une batterie où circule un liquide froid qui peut être de l'eau glucosée ou le fluide frigorigène lui-même. Autour de ce circuit va se former de la glace remplissant complètement ou partiellement la cuve. Le déstockage s'effectue soit par pompage de l'eau à $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ mélangée à la glace (fusion externe) soit par circulation d'un liquide chaud (fusion interne) [11].

1.7.4. Les coulis de glace :

Les coulis de glace sont constitués d'eau ou de solutions aqueuses contenant des particules de glace. On peut alors transporter l'énergie latente de la glace sur de grandes distances. Compte tenu de la grande valeur de la chaleur latente de la glace, une importante énergie peut être transportée pour un même débit, ou une même énergie a besoin d'un débit plus faible pour être transportée. Les microémulsions sont constituées de très fines particules (quelques micromètres de diamètre, voire moins) de MCP obtenues par dispersion et stabilisées par des molécules tensioactives. Il s'agit généralement de microémulsions de paraffines dispersées dans de l'eau et stabilisées par des surfactants anioniques ou non ioniques.

1.8. Domaine d'utilisation des processus présentés :

1.8.1. Les coulis de glace [12]:

L'utilisation d'une nouvelle technique de stockage de froid : ' le coulis de glace' utilisé en France par la Laiterie Grangese révèle nettement avantageuse par rapport aux systèmes classiques. L'installation, évolutive, permet de réduire de façon notable la puissance des compresseurs, les quantités de fluide frigorigène, les volumes de stockage et les consommations d'électricité.

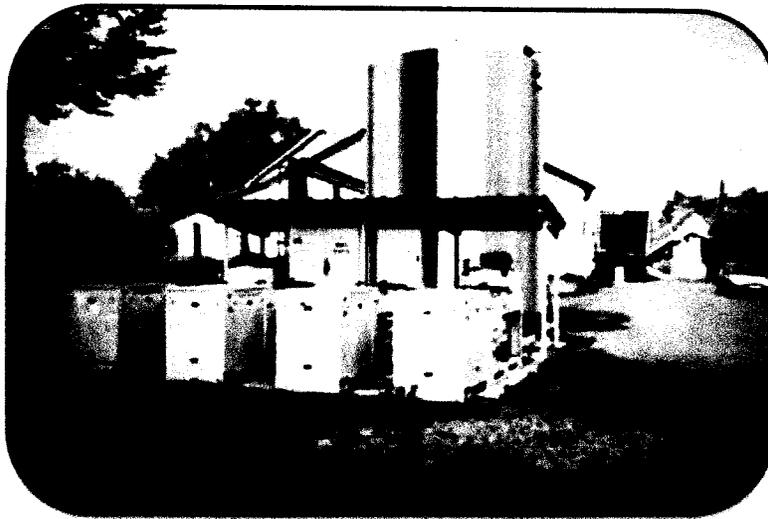


Figure 1.17. Laiterie Grange.

a) Un stock de frigories :

Le stockage de l'énergie frigorifique est une méthode couramment utilisée dans l'industrie laitière : il permet de réduire les pointes de consommation électrique et de différer la production frigorifique par rapport à la production de l'usine. Le principe généralement mis en œuvre est le stockage de glace dans un bac à glace. Cette technique nécessite toutefois un volume global de stockage et une quantité de fluide frigorigène très importants.

Se présente sous forme de micro-particules de diamètre voisin de 0,1 mm. Le coulis de glace est un fluide constitué d'eau, d'une solution incongelable et de ces micro-particules de glace en suspension. La solution reste parfaitement un fluide avec 30 % de glace, ce qui autorise l'utilisation des pompes traditionnelles pour la circulation du coulis en distribution d'énergie frigorifique. Les performances des échangeurs ont permis de concevoir des générateurs de coulis très compacts. Le coulis produit est stocké dans une cuve, l'énergie frigorifique ainsi accumulée pouvant être utilisée au moment des besoins et avec un haut pouvoir de restitution (meilleure surface d'échange entre phase solide et phase liquide que dans les systèmes traditionnels), cette restitution de l'énergie pouvant être considérée comme directement proportionnelle au débit du fluide de la pompe de distribution. La gamme de générateurs de coulis de glace modulaires s'étage de 8 kW à 80 kW (un échangeur de 80 kW pouvant produire 800 kg de coulis à l'heure). la laiterie fromagerie « Grange » produit annuellement 900 tonnes de cantal et 7 à 8 millions de litres de sérum avec un effectif de 14 personnes.

d) Les avantages de cette technologie :

La technologie du coulis de glace présente des avantages déterminants :

- ✓ La consommation d'énergie est diminuée de l'ordre de 15 %.
- ✓ Le volume de stockage de froid est réduit de moitié.
- ✓ La surface au sol est moindre.

En refroidissement direct, le coulis de glace peut être utilisé en contact direct avec les produits alimentaires pour réduire les temps de réfrigération (industries de la pêche, refroidissement des végétaux).

1.8.2. Avantages de la technologie des coulis de glace

- ✓ Puissance frigorifique élevée du fait de l'utilisation de la chaleur latente.
- ✓ Diamètre de canalisation faible.
- ✓ Les expérimentations menées tendent à prouver la qualité du froid par les systèmes de coulis de glace est améliorée avec une meilleure stabilité de la température.
- ✓ Si la durée des besoins de refroidissement d'un système existant nécessite d'être étendue, la puissance électrique n'a pas besoin d'être augmentée, puisque la production de froid peut être prolongée sur 24 heures.
- ✓ Plus faible quantité de frigorigène dans les circuits primaires.

1.8.3. Les inconvénients et limites :

- ✓ Nécessité d'un échangeur de chaleur supplémentaire entre le système frigorifique primaire et le système secondaire.
- ✓ La consommation d'énergie supplémentaire par la pompe pour alimenter le réservoir de stockage nécessite une pompe supplémentaire.
- ✓ Nécessité d'un système de contrôle pour suivre la qualité du coulis de glace.

1.8.4. Les domaines d'applications:

Les systèmes à coulis de glace peuvent être utilisés pour les applications frigorifiques dans les secteurs suivants :

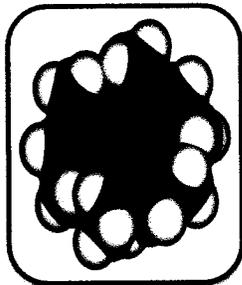
- ✓ Les supermarchés.
- ✓ Laiterie et fromagerie.
- ✓ Brasseries.
- ✓ Refroidissement rapide de produits alimentaires.
- ✓ Refroidissement des avions dans les aéroports (transport du froid sur de longues distances vers les lieux de stationnement).
- ✓ Refroidissement des parcs pharmaceutiques (analogues aux Technoparc, et à la recherche pharmaceutique).
- ✓ Immersion directe des produits alimentaires (ex : les crevettes).
- ✓ Stockage du froid dans l'industrie agroalimentaire, le fonctionnement d'air et les réseaux urbains de distribution de froid.
- ✓ Refroidissement pour les procédés chimiques.
- ✓ Arrêt immédiat d'un procédé chimique par injection directe de coulis de glace dans le réacteur de manière à absorber le plus de chaleur possible, pour des raisons de sécurité.



- ✓ Mélange du béton avec un coulis de glace d'une quantité telle qu'après la fusion des particules de glace, la masse d'eau ajoutée au béton est exactement celle désirée.
- ✓ La chaleur latente sera utilisée pour absorber la chaleur de réaction, en particulier dans la construction de routes et de tunnels ferroviaires, le système de refroidissement pourrait ainsi être de taille plus réduite ou même inutile.

1.8.5. Les clathrates :

Les clathrates (hydrates) de gaz sont des solides constitués de molécules de gaz (CFC, HCFC, butane, propane...) emprisonnées dans une « cage » de molécules, le tout formant une structure comme celle de la figure 1.19. L'eau et le gaz peuvent être séparés par réchauffement au-delà d'une certaine température, la chaleur de réaction étant bien plus grande que celle de la fusion de la glace. Le mélange de ces particules solides et d'eau liquide donne un fluide qui peut parfaitement être transporté dans une canalisation.



a) une clathrate



b) les billes de gel

Fig 1.19 fluide frigoporteur diphasique a) Clathrate Couronne d'éther "18-couronne-6" piégeant un ion potassium (en violet au centre). Les atomes d'oxygène sont représentés en rouge, les atomes de carbone en noir et les atomes d'hydrogène en blanc b) les billes de gel. [10]

1.8.6. Les billes de gel :

D'un diamètre de l'ordre de 1 mm, sont constituées d'une matrice polymère contenant 90 % d'eau. Elles sont dispersées dans un liquide organique de manière à former une suspension qui peut circuler si la fraction massique de billes ne dépasse pas 36 % environ. Au cours des différents cycles cristallisation-fusion le gel n'est pas détruit.

1.8.7. Les bacs de glace :

Il s'agit d'un réservoir de glace, disposé en parallèle ou en série avec le circuit d'eau glacée des installations de climatisation. Il permet d'accumuler du froid, particulièrement durant la nuit.

- ✓ Au moment du refroidissement (phase de stockage), il y a cristallisation ou solidification, en plus du refroidissement de l'eau et de la glace.
- ✓ Au moment du réchauffement (phase de déstockage du froid), il y aura fusion en plus du réchauffement de l'eau et de la glace.

La chaleur latente de solidification de l'eau est de 335 kJ/kg, il est donc possible de stocker 80 fois plus d'énergie dans un kg d'eau qui passe de 0,5° à -0,5°C que de 4° à 3°C.

a) Bacs à eau en tubes :

Au moment du stockage, un fluide réfrigérant (fluide frigorigène ou eau glucosée) circule dans les tuyauteries. La température du fluide voisine les -5°C . L'eau glacée, en contact direct avec ces tubes, va former un enrobage de glace. L'uniformité de la formation de la glace et de sa fusion est parfois renforcée par l'agitation de l'eau via la diffusion de bulles d'air. Il existe des bacs isolés préfabriqués pour ce type d'usage. Les tubes peuvent être en acier (noir, galvanisé ou inoxydable) ou en plastique.

Pour des applications industrielles dont les puissances de fonte sont très élevées et les températures d'eau sont très basses (1°C), le faisceau de tubes du bac de glace à fonte interne devrait être tellement grand que cela ne serait pas réalisable d'un point de vue économique. On choisit dans ce cas plutôt le système à fonte externe.

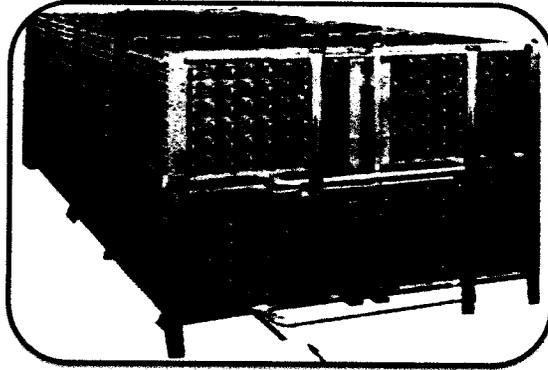
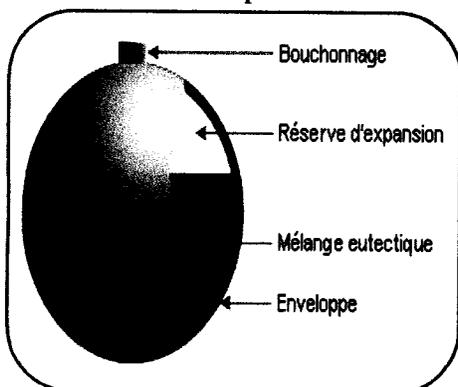


Figure 1.20. Bacs de glace[5]

1.8.8. Les nodules :

Les nodules sphériques étant utilisés en grande quantité, ce sont presque exclusivement des nodules contenant des phases aqueuses qui ont été développés. Ils ont l'avantage de posséder une grande chaleur latente pour un prix modéré. Ainsi, le MCP contenu dans le nodule est soit de l'eau seule soit une solution eutectique.

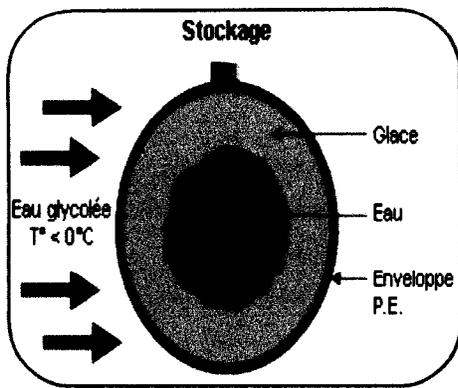


b) nodule de stockage du froid

Il s'agit d'une cuve fermée, sous pression ou non, remplie d'eau glucosée et de nodules. Ces nodules sont des grosses billes de 8 à 10 cm de diamètres (il existe également des nodules à facettes). Elles contiennent de l'eau plus un eutectique pour les températures négatives ou des sels hydratés pour les températures positives.

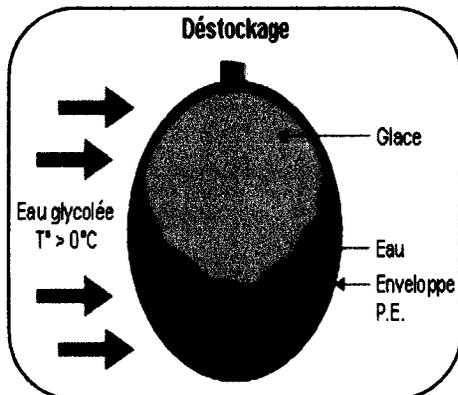
L'ensemble, encore appelé "**matériau à changement de phase**" est sélectionné pour l'importance de la chaleur latente liée à la solidification/fusion. L'enveloppe des nodules est réalisée en polyéthylène (PE).





b) Le stockage

- ✓ Entre les nodules circule de l'eau glucosée



c) Le déstockage

figure 1.21. le stockage et déstockage dans les nodules [5]

Phase de stockage : la température de l'eau est inférieure à la température de changement de phase des sels contenus dans les nodules, ce qui cristallise le contenu des nodules (les Seles).

Phase de déstockage : la température de l'eau est supérieure, les sels des nodules fondent. Le transfert thermique a donc toujours lieu par l'extérieur. Les nodules de qualité contiennent des germes de cristallisation pour éviter le phénomène de, ainsi qu'une protection contre les pics de cristallisation qui pourraient déchirer l'enveloppe.

a) Domaine d'utilisation :

- ✓ Pêche Industrie chimiques.
- ✓ Traitement du poisson Industrie pharmaceutiques.
- ✓ Commerce du poisson Teintureries.
- ✓ Salaisons Refroidissement du béton.
- ✓ Abattoirs de volailles Laboratoires.
- ✓ Boulangeries.
- ✓ Hôpitaux.
- ✓ Grands magasins Physiothérapie.
- ✓ Épiceries fines Gastronomie.
- ✓ Fruits et légumes Alimentation.

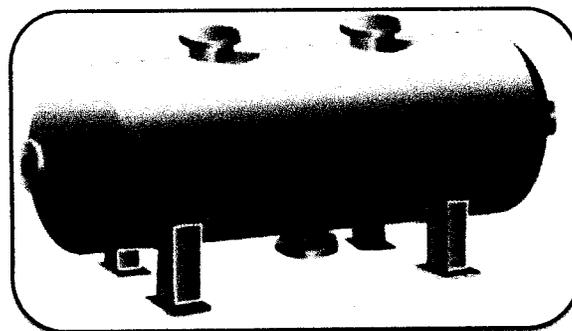


Figure 1.22 Cuve et nodule [5]

2.1 .Introduction :

En Algérie, au début du mois d'août 2011, la demande d'électricité a atteint un record de 8 746 MW (mégawatts), en enregistrant une hausse d'environ 1 000 MW par rapport au pic d'été de l'année précédente, soit l'équivalent d'une centrale électrique de forte puissance. Cette forte augmentation de la demande d'électricité est une conséquence directe du changement des habitudes de consommation, notamment du fait de l'utilisation de plus en plus répandue de la climatisation. 27% de la consommation est dirigée vers les réfrigérateurs. Ce que je veux dire c'est que l'Algérie devient un consommateur important de l'électricité et il faut profiter des énergies renouvelables et donner un bon soutien matériel à la recherche scientifique dans ce pays. Il ya plusieurs projets pour profiter des énergies renouvelables comme le projet de ADRAR (l'éoliennes), mais la volonté politique qui appuie l'avancement de ce projet et même d'autres projets dans le domaine est lente. De nombreuses recherches ont été réalisées dans les dernières années pour élaborer des options techniques afin d'améliorer la performance énergétique des réfrigérateurs domestiques. Elles peuvent être classées en trois catégories:

- 1) Améliorer l'isolation de la porte et du cabinet pour réduire les pertes de chaleur.
- 2) Développer les compresseurs à haut rendement.
- 3) Améliorer l'efficacité des échangeurs de chaleur, et en particulier de l'évaporateur qui est un élément clé de réfrigérateur.

Dans ce chapitre nous allons présenter le problème physique traité expérimentalement par le chercheur Azoug avec la résolution numérique, les équations de conservation ainsi les conditions limites imposées sur chaque grandeur.

Le but de son travail est d'étudier expérimentalement les effets de l'ajout d'un matériau à changement de phase dans le réfrigérateur en termes de performances et de capacité de stockage de chaleur et de comparer les résultats avec le système classique. L'utilisation d'un stockage de chaleur latente à froid tel que discuté dans le travail présenté appartient à la troisième catégorie.

L'étude expérimentale d'un réfrigérateur domestique équipé d'une unité de stockage latente sur la face inutilisée de l'évaporateur montre une amélioration de la performance du système et une réduction des fluctuations de température dans la cellule réfrigérée. Les résultats de performance et de capacité de stockage à froid et des mesures ont été obtenus et comparés à l'original système sans stockage. Les résultats indiquent que la réponse du réfrigérateur à l'ajout de MPC et son efficacité sont fortement dépendantes de la charge thermique. L'intégration du stockage de chaleur latente permet de fonctionnement continu sans alimentation électrique de 5-9h (à comparer à 1-3h sans MPC) et une augmentation de 10-30% du coefficient de performance, en fonction de la charge thermique.

2.2. Introduction sur Les travaux analytiques, numériques et expérimentaux qui précèdent le travail de Kamel Azoug :

De nombreuses recherches ont été réalisées dans les dernières années pour élaborer des options techniques afin améliorer la performance énergétique des réfrigérateurs domestiques. Elles peuvent être classées en trois catégories:

2.2.1 Améliorer l'isolation de la porte et du cabinet pour réduire les pertes de chaleur :

Par exemple, une économie moyenne de 25% l'économie d'énergie moyenne est observée par l'intégration du VIP (panneaux isolants sous vide) dans le cabinet [16]. L'inconvénient de cette technologie est liée au fait que le processus de fabrication est en crocher.

2.2.2 Développer des compresseurs à haute efficacité :

En conventionnelles réfrigérateurs, la technologie du compresseur habituel est le compresseur hermétique alternatif, conçu pour satisfaire les charges maximales. Ces compresseurs fonctionnent généralement à charge partielle, résultant en une réduction des performances et de l'augmentation des pertes à cyclique. Le compresseur à vitesse variable (VSC) et le compresseur à capacité variable (CCV) sont une alternative efficace pour contrôler la capacité frigorifique, qui lie continûment la vitesse du compresseur à la charge thermique [22] Embraco a développé un VCC pour le réfrigérateur domestique: les résultats des tests montrent jusqu'à 45% d'économie d'énergie en remplaçant un compresseur marche/arrêt conventionnel par la technologie du compresseur VCC [23] Il doit être noté qu'une augmentation de 20% du coût est également observée.

2.2.3 Améliorer l'efficacité des échangeurs de chaleur, et en particulier de l'évaporateur :

L'évaporateur est un élément clé de réfrigérateur. Le transfert de chaleur dans l'évaporateur nécessite une différence de température entre l'air et le fluide frigorigène:

Quand le coefficient de convection d'airs latéraux augmente, la différence de température entre la température d'évaporation et de l'air diminue. Pour une température de l'air du cabinet donnée, Il en résulte une température plus élevée d'évaporation, et par conséquent, une performance croissante du système.

Il faut noter que dans la plupart des réfrigérateurs européens, le transfert de chaleur entre l'évaporateur et la zone réfrigérée se fait principalement par la convection naturelle et le rayonnement avec un coefficient de transfert thermique d'air latéral faible [26].l'ajout d'une plaque de matériau à changement de phase sur un côté de l'évaporateur est une solution efficace, qui en résulte dans une augmentation du transfert de chaleur à l'échelle globale au niveau d'évaporateur à cause de la conduction à l'intérieur du MPC. Cerri 2003 a déjà simulé un réfrigérateur domestique y compris une basse quantité des MPC dans l'évaporateur. Dans cette étude, le coefficient de performance est amélioré de 12%.

Chapitre 2: Recherche bibliographique

Au cours des dernières recherches numériques de Azzouz et al., 2005, 2008 on a montré que l'ajout d'une épaisse plaque de MPC sur la face arrière d'un évaporateur du réfrigérateur peut entraîner une augmentation d'évaporation de température. Une augmentation de 25% du coefficient de performance et une diminution significative du nombre de démarrages / arrêts de compresseur ont été observées dans ce contexte.

2.3 Le prototype d'un réfrigérateur à haute énergie thermique :

La recherche des solutions aux problèmes posés par cet équipement répond particulièrement aux besoins d'une amélioration de performance du réfrigérateur, visant d'une part la sécurité alimentaire et d'autre part la réduction de la consommation d'électricité domestique. L'intégration de matériaux à changement de phase dans les réfrigérateurs domestiques est une solution technologique innovante et économique qui permet d'apporter une réponse à ces deux problèmes. Ce type de matériau se distingue par sa capacité à accumuler de façon réversible le froid dans un faible volume.

L'effet d'une plus grande inertie thermique due à l'utilisation de ces matériaux a pour conséquence de limiter le nombre d'arrêts-démarrages (chaque démarrage étant caractérisé par une surconsommation électrique [17], de privilégier certaines heures de fonctionnement dans la journée et de stabiliser la température pour une meilleure conservation des aliments.

Des essais ont été effectués pour plusieurs charges thermiques à différentes températures ambiantes. Les données montrent une nette réduction des fluctuations de température dans l'enceinte réfrigérée et une amélioration du comportement du système en termes d'autonomie et d'efficacité énergétique. En améliorant la stabilité de la température de conservation des aliments, on diminue le risque de développement bactérien. L'impact de l'inertie thermique sur le système frigorifique est présenté à partir de ses paramètres de fonctionnement (température d'évaporation et de condensation, consommation du compresseur, autonomie, temps de fonctionnement). C'est très utile pour réutiliser l'énergie dans le cas de période critique comme par exemple lors d'une coupure de courant. Un réfrigérateur congélateur dont les parois incorporeraient 10 litres de ce type de matériau, pourrait accumuler suffisamment d'énergie pour maintenir une température stable de produits pendant plus de 14 heures sans Redémarrage du groupe froid.

2.3.1. Description du dispositif expérimental :

Le réfrigérateur de base qui a servi à la conception du prototype est un réfrigérateur à une seule porte sans compartiment froid, de la marque **BOSCH: KS 30 R 425** L'isolant qui recouvre la paroi arrière de l'évaporateur a été retiré pour permettre d'insérer et de fixer sur l'évaporateur à l'aide une colle silicone le conteneur en Plexiglas du MPC. Le matériau à changement de phase est ainsi en contact direct avec l'évaporateur (Figure 2.1 et 2.2). Pour une meilleure rigidité de l'ensemble, le conteneur est constitué de 6 compartiments distincts de dimension : 300 x 200 x 5 mm. La régulation d'origine du réfrigérateur a été remplacée par un régulateur TOR, de manière à contrôler complètement le mode de régulation du réfrigérateur.

- ✓ Le volume intérieur du cabinet : 0.29 m^3 ($1.55 \times 0.6 \times 0.65 \text{ m}$)
- ✓ L'évaporateur : convection libre (surface d'échange : $0,48 \text{ m}^2$ la longueur : 4,1m, le diamètre hydraulique : 5.10^{-3} m la marque (Roll-bond) mur arrière positionné.

Chapitre 2: Recherche bibliographique

- ✓ Condenseur : convection libre (diamètre hydraulique : $3,3 \cdot 10^{-3}$ m, diamètre extérieur $5,3 \cdot 10^{-3}$ m, longueur 11,6m, UA valeur : 6,7 W/K). acier et tube métallique.
- ✓ Compresseur hermétique alternatif : (Danfoss TLES5-KK.220-240150).
- ✓ Réfrigérant : 29gd'isobutane (R600a).
- ✓ Commende marche/ arrêt et le dégivrage (retiré de la glace).
- ✓ Détendeur d type capillaire.

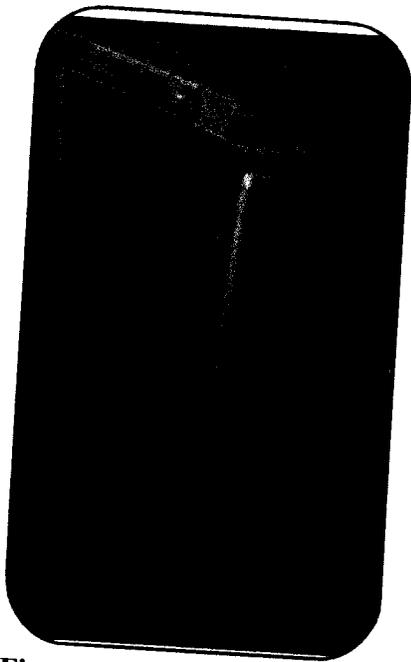


Figure 2.1 réfrigérateur bosch

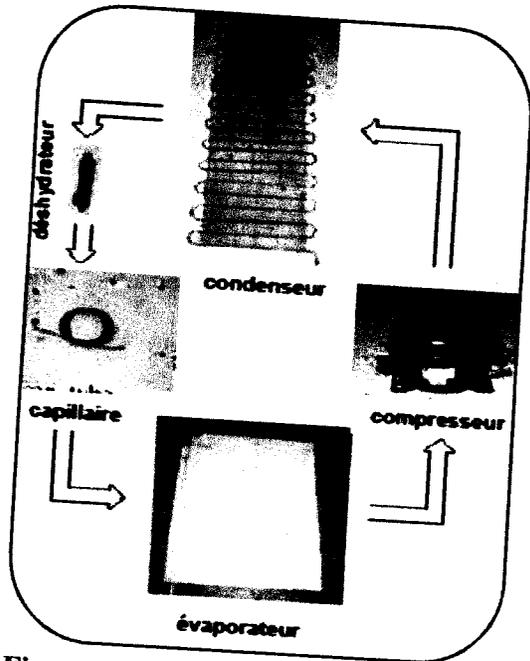


Figure 2.2 composant du réfrigérateur

La plaque du MPC est situé sur la face arrière de l'évaporateur comme il est indiqué dans la figure 2.3 il faut noter que la conséquence de cette modification est que les deux faces de l'évaporateur sont utilisés dans cette configuration. Deux configurations avec une quantité différente de MCP (épaisseur: 5 et 10×10^{-3} m) ont été utilisées pour l'exécution des tests. Des Température à divers endroit (compresseur, condenseur, évaporateur, armoire et la plaque du MPC) sont mesurés à l'aide des thermocouples de type T (cuivre / constantan). Tous les thermocouples ont été calibrés en utilisant une certaine procédure [29] installés à l'entrée et à la sortie des éléments constituant le prototype. L'incertitude sur la mesure de température est estimée à $0,5^\circ \text{C}$.

Comme indiqué sur la Figure 2.4. ; 45 thermocouples régulièrement espacés, sont placés dans le MCP pour mesurer la distribution spatiale de la température a chaque positions afin de dresser une cartographie thermique de l'ensemble du MPC. L'instrumentation de l'évaporateur et du condenseur a été réalisée de manière à permettre le suivi de l'état du frigorigène en plusieurs points du circuit. Comme il était difficile de placer les thermocouples en contact direct avec le fluide frigorigène (diamètre hydraulique assez faible), on a évalué les températures du fluide frigorigène par contact du thermocouple avec le tube du circuit en prenant soin d'isoler thermiquement le tout vis-à-vis de l'ambiance. La température de l'air dans l'enceinte frigorifique a été mesurée à plusieurs hauteurs à l'aide de thermocouples installés sur un support. Deux capteurs de pression (de précision 0,01 bar) placés à l'aspiration et au refoulement du compresseur permettent de déterminer la pression d'évaporation et de condensation.

Chapitre 2: Recherche bibliographique

Un wattmètre numérique (de précision +/- 1W), affichant simultanément la tension, le courant et la puissance permet de mesurer la puissance électrique consommée par le compresseur.

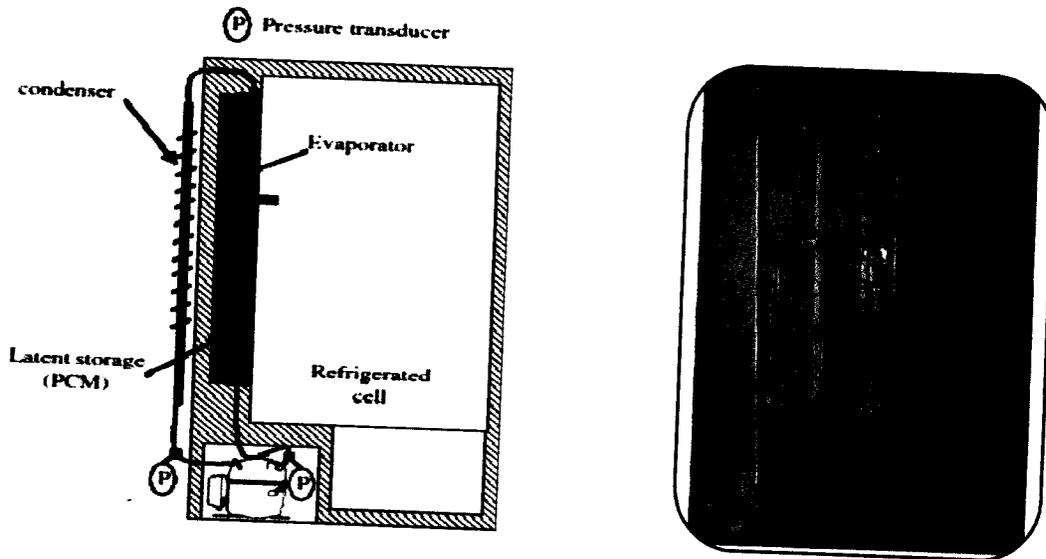


Figure 2.3 Représentation schématique du réfrigérateur avec PCM.

Comme on peut le voir dans la fig. 2.4 trois thermocouples sont utilisées pour mesurer la température de l'air dans l'armoire du réfrigérateur. Les valeurs moyennes de ces thermocouples sont utilisées pour calculer la température de l'air dans le compartiment principal, apparaissant sur les Figures 2.5. ; Le capteur utilisé pour entraîner le cycle du compresseur est situé au centre du compartiment. Le dispositif expérimental est équipé d'un système d'acquisition de données relié à un microordinateur, ce qui permet une vitesse d'échantillonnage élevée et le contrôle de toutes les mesures effectuées au moyen de transducteurs. Le tableau 2.1 résume les

Le tableau 2.1 résume les mesures effectuées et les incertitudes associées

La quantité mesurée	L'appareille d mesure	Les incertitudes
Température	Thermocouples	$\pm 0.5c^{\circ}$
pression	La pression des transducteurs	$\pm 0.01 \text{ bar dans le game}$ $\text{de } (0 - 5) \text{ bar}$
Humidité	Hygromètre à miroir refroidi	$\pm 1\% \text{ RH}$
Puissance	Wattmètre digitale	$\pm 0.5 \text{ W}$
Temps	ordinateur	$\pm 1 \text{ s/d}$

quantités mesurées et les incertitudes correspondantes.

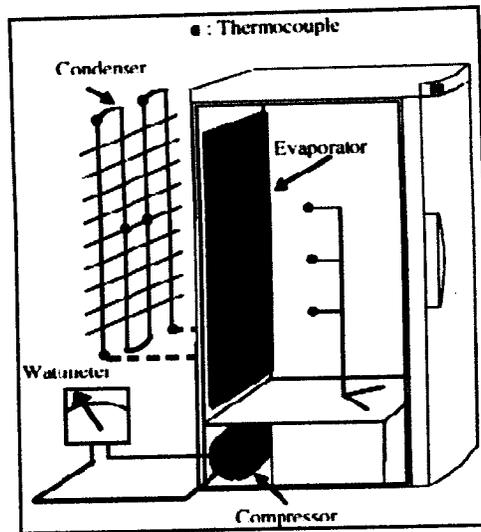


Figure 2.4 instrumentation des composants du réfrigérateur.

Les expériences ont été réalisées à l'intérieur d'une chambre environnementale, suffisamment grande pour contenir trois réfrigérateurs et les systèmes d'acquisition de données. La température et l'humidité de cette chambre environnementale sont contrôlées avec des incertitudes de $\pm 0,1^\circ \text{C}$ et des fluctuations de $\pm 1\%$, respectivement.

2.4. Procédure expérimentale et calcul:

2.4.1. Caractérisation thermique du réfrigérateur avec PCM :

La qualité de l'isolation d'une enceinte réfrigérée est caractérisée par son coefficient global de transmission de chaleur K , qui définit la puissance thermique échangée en régime Permanent par unité de surface moyenne géométrique de paroi, sous un écart de température de 1 K entre l'intérieur et l'extérieur de l'enceinte. La mesure du coefficient K du Réfrigérateur avec MPC est réalisée dans une cellule à température contrôlée. Une résistance chauffante fournissant une puissance de chauffage constante est placée à l'intérieur de l'enceinte réfrigérée ; à l'aide d'un rhéostat, on règle la puissance émise dans l'enceinte du réfrigérateur. Connaissant la puissance fournie à l'intérieur de l'enceinte du réfrigérateur à l'aide d'un wattmètre, on sait que les seules pertes sont celles dues à travers les parois. Dans ce test les rhéostats de chauffe à l'intérieur des réfrigérateurs sont étés fixés à 28 W et les réfrigérateurs ont étés gardés dans une pièce à une température constante de 8°C jusqu'a ce que l'équilibre thermique a été atteint, la température dans la chambre et dans les réfrigérateurs ont été mesurés à chaque minute pour que le rapproche à l'équilibre pourrait être surveillés.

a) L'isolation :

En régime permanent on a :

$$\phi_r = \phi_d = KS_{\text{moy}} \cdot (T_{\text{air}} - T_{\text{ext}}) \quad (2.1)$$

Où ϕ_r est la puissance fournie par la résistance thermique (W), mesurée par un Wattmètre, et ϕ_d est la puissance de déperditions thermiques par les parois (W).

Chapitre 2: Recherche bibliographique

Ainsi les pertes globales du réfrigérateur avec MPC, caractérisées par K , sont de l'ordre de 0,44 à 0,45 W/m² K, pour une dalle de MPC de 5 et 10 mm respectivement résultat quasi identique à celle sans PCM ($K_{\text{sans PCM}} : 0,44 \text{ W/m}^2\text{K}$).

$$S = \sqrt{S_i \cdot S_e} \quad (2.2)$$

S_i : la surface intérieur.
 S_e : la surface extérieur.

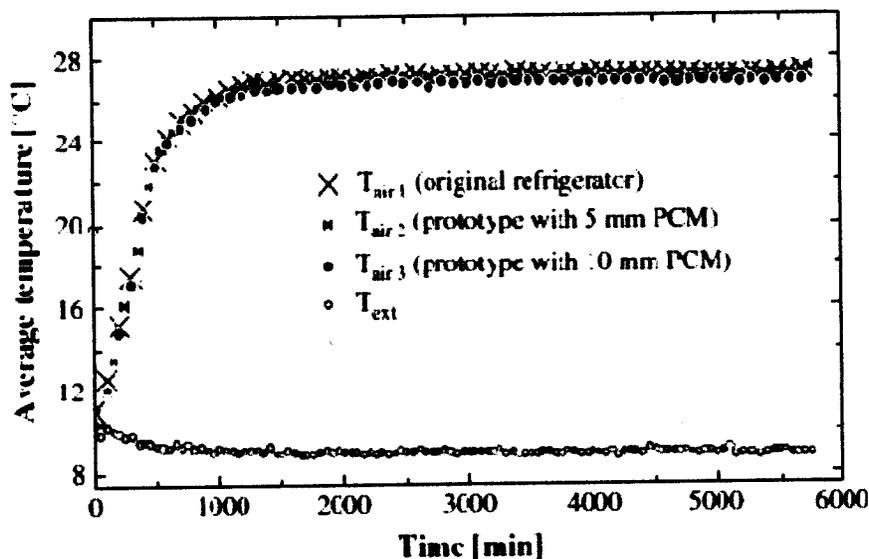


Figure 2.5 tests d'isolation compartiment moyen et température ambiante

2.4.2. Performance et test de capacité de stockage du froid :

Afin d'évaluer la performance énergétique et la capacité de stockage du réfrigérateur avec et sans chaleur latente de stockage, les expériences ont été réalisées pour différentes charges thermiques, sans utiliser ni MCP, ni eau ni mélange eutectique (point de congélation: -3°C) comme des MCP. Pour certains essais spécifiques, une charge thermique supplémentaire a été imposée en utilisant des appareils de chauffage électriques, équipés d'unités de contrôle à rhéostat pour l'ajustement de la chaleur. Pour chaque expérience, les températures, les pressions et l'énergie électrique ont été échantillonnées toutes les 60 s. Le tableau 2 donne la liste des essais expérimentaux.

2.4.3. Les expériences avec l'eau comme MPC :

Dans un premier temps, l'eau a été utilisée comme matériau à changement de phase. L'eau présente de nombreux avantages: forte chaleur latente, une bonne stabilité dans le temps et des propriétés thermo-physique parfaitement connus. Les résultats des différents tests peuvent être classés en trois catégories:

1. Des cycles au cours desquels le MCP a complètement fondu et ensuite complètement gelé
2. Des cycles au cours desquels le MCP ne doit pas fondre complètement (conditions de haute charge thermique)

Chapitre 2: Recherche bibliographique

3. Des cycles au cours desquels le MCP ne doit pas geler complètement (conditions de faible charge thermique).

Tableau 2.2 : les conditions expérimentales

Execution	$T_{ext} (c^{\circ})$	$\phi_d (W)$	$Q_{ev} (W)$
1	15	0	12.82
2	20	0	19.94
3	25	0	27.06
4	30	0	34.18
5	20	9	28.94
6	20	19	38.94
7	20	29	48.94

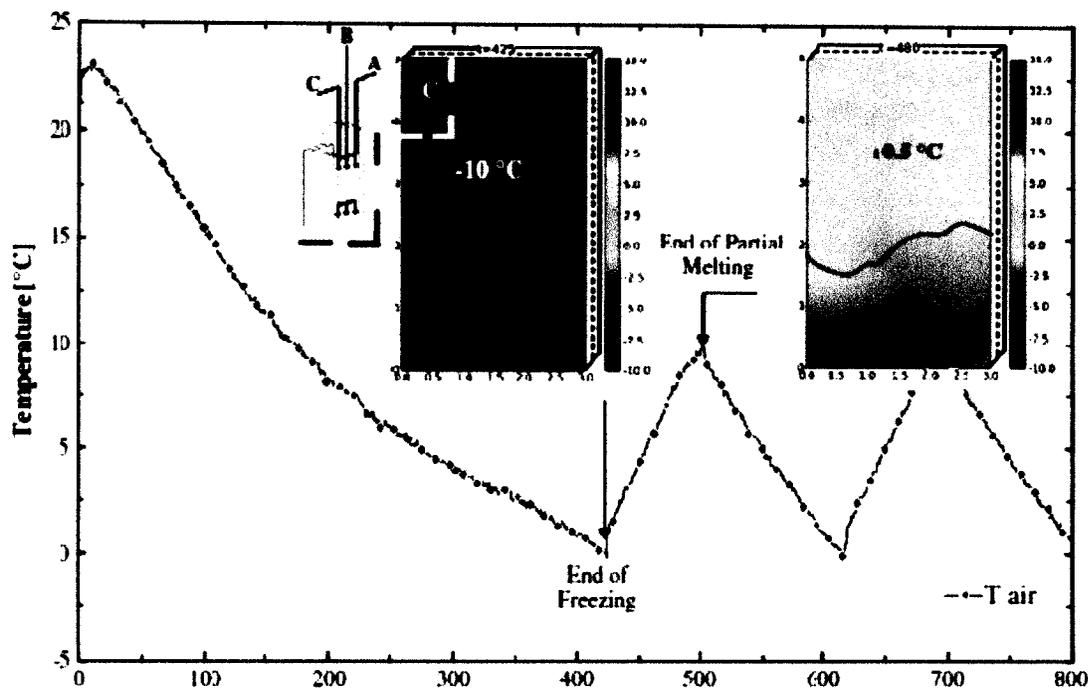


Figure 2.6 démonstration de l'évolution temporelle de la température de l'air dans le réfrigérateur et la température du PCM au début et à la fin du fondement partielle du PCM $T_{ext} = 20c^{\circ}$, pcm($T_{eau} = 0c^{\circ}$, épaisseur = 10mm R =29)

Il existe une situation où la capacité de refroidissement fournie par le MCP est suffisante lorsque le compresseur est à l'arrêt : une température suffisamment basse à l'intérieur de l'enceinte est maintenue pendant toute la période de fonte et le compresseur ne redémarre pas avant la fonte complète du MCP. Lorsque le MCP a complètement fondu, la température de l'air de l'enceinte augmente rapidement et le compresseur redémarre. Lorsque le compresseur est en marche, le MCP se transforme progressivement en glace. Lorsque le MCP est complètement solide, la température d'évaporation descend à $-15^{\circ}C$ ou moins, entraînant la température de l'armoire à atteindre rapidement la plus basse température acceptable. Alors, le compresseur s'arrête. Ceci est un cas typique de cycle pendant lequel le MCP a complètement fondu et ensuite devient complètement gelé.

Chapitre 2: Recherche bibliographique

La figure 2.8. Illustre le cas d'une faible charge thermique. Pendant la période "ON", le transfert de chaleur entre le bloc et la cellule frigorifique est supérieur à la capacité de refroidissement requise. La température de la cellule frigorifique descend rapidement sous la plus basse température acceptable (0°C) et le compresseur s'arrête avant que le bloc ne devienne complètement solide. La température obtenue dans la cellule frigorifique pendant l'opération de fusion peut diminuer et devenir même négative. C'est un cycle typique pendant lequel le MCP ne devient pas complètement solide.

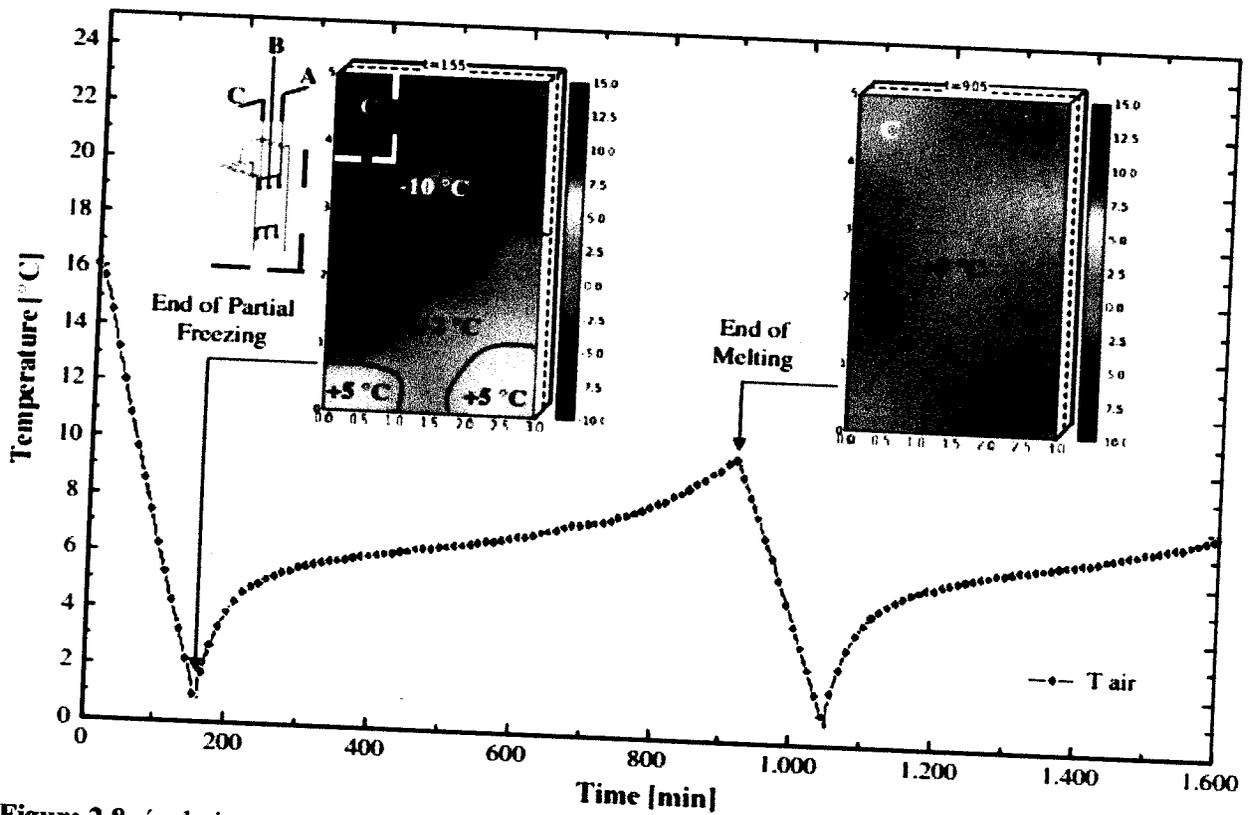


Figure 2.8 évolution temporelle de l'air dans le réfrigérateur et la température du PCM au début et à la fin du fondement de la congélation partiel du PCM
Pcm ($T_{\text{ext}} = 15^{\circ}\text{C}$, $T_{\text{eau}} = 0^{\circ}\text{C}$, épaisseur = 10mm, $R = 0$)

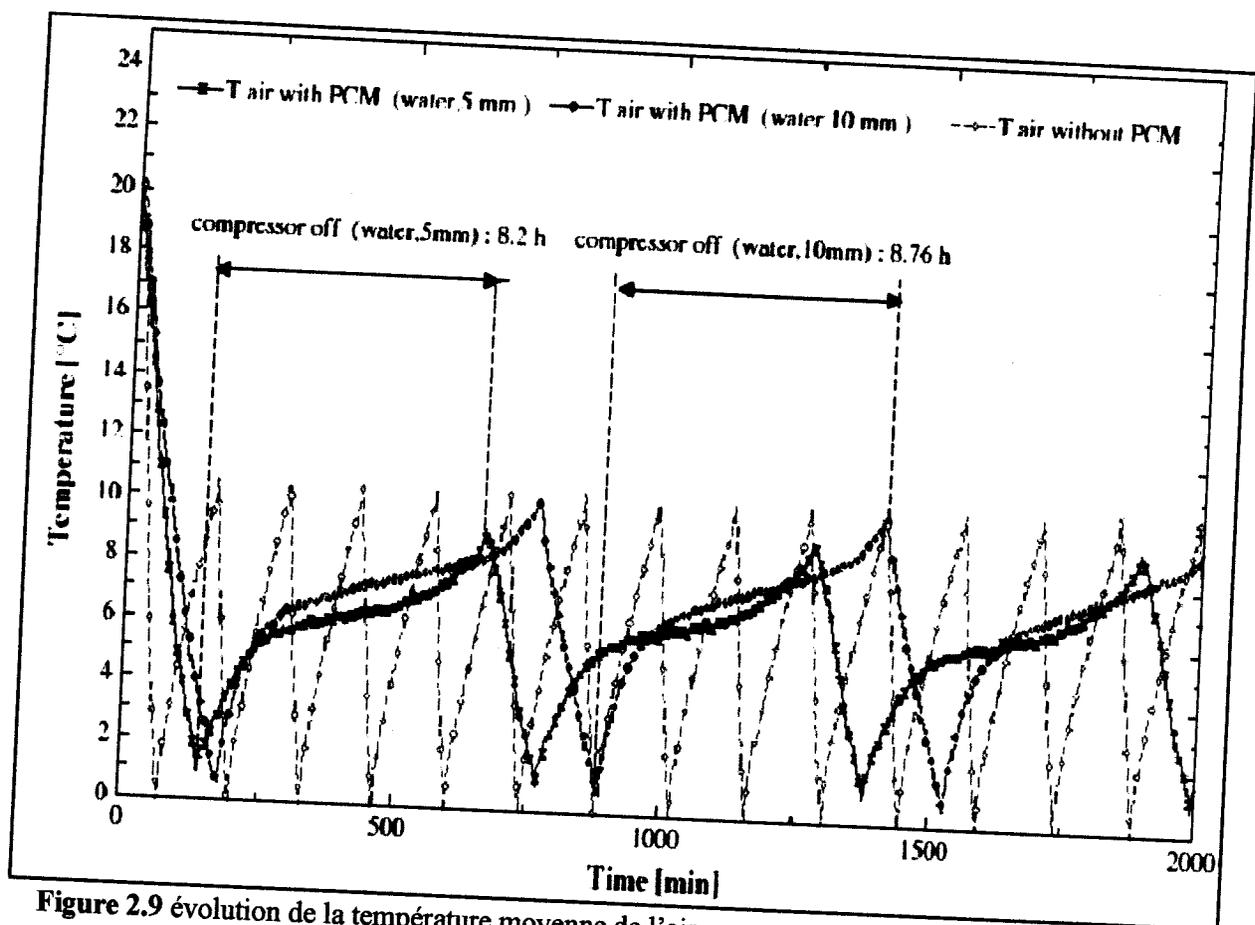


Figure 2.9 évolution de la température moyenne de l'air avec et sans PCM ($T_{ext} = 20^{\circ}C$, MPC (épaisseur = 10mm, $e = 5mm$ $R = 0 w$)

La figure 2.8 montre l'influence de la quantité du matériau à changement de phase (MCP) sur la température de l'enceinte ainsi que sur le nombre de démarrages et d'arrêts du compresseur. Le pourcentage du temps de fonctionnement (rapport du temps de fonctionnement sur celui du cycle total) est nettement inférieur à celui d'un système sans PCM. Il en résulte une réduction des fluctuations de température dans la cellule frigorifique et permet ainsi 5 à 9 heures de fonctionnement continu sans alimentation électrique, en fonction de la charge thermique (tableau 2.3). Le temps d'arrêt du réfrigérateur avec une plaque de MCP de 10 mm d'épaisseur peut sembler surprenant, car la capacité thermique, pour le volume du MCP ($2,8 \times 10^{-3} m^3$ pour une plaque de 10 mm) est deux fois plus grande que celle pour une plaque de 5 mm ($1,4 \times 10^{-3} m^3$). En fait, seulement 60% de la plaque de 10 mm d'épaisseur devient solide lorsque le compresseur s'arrête. (Fig. 2.9) ce qui correspond à une dalle de 6 mm complètement solide. Ainsi, le temps de fonctionnement de l'appareil dépend principalement de la charge thermique (tableau 2.3), et ne change pas de manière significative avec la différence de l'épaisseur de la plaque.

Chapitre 2: Recherche bibliographique

Tableau. 2.3 autonomie et temps de fonctionnement

Exécution	Charge thermique	Le temps de marche	Le temps de marche	Le temps de marche	Autonomie (temps d'arrêt)	Autonomie (temps d'arrêt)
	[w]	Sans PCM [mn]	L'eau-5mm [mn]	L'eau-10mm [mn]	L'eau-5mm[h]	L'eau_10mm[h]
1	12.82	31	78	94	9.2	9.5
2	19.94	33	108	124	8.2	8.78
3	27.06	35	110	126	7.22	8.03
4	28.94	37	114	130	7.03	7.15
5	34.18	32	115	131	5.38	5.88

2.4.4. Les expériences avec une solution eutectique aqueuse :

La Figure 2.9 montre les résultats obtenus pour un réfrigérateur avec une solution eutectique aqueuse où la température de changement de phase est de 3° C. Comme on s'y attendait, la capacité de stockage du système est légèrement plus petite que pour le cas où le MCP est de l'eau. Ceci est principalement dû au fait que l'enthalpie de solidification de l'eau est plus grande.

La masse totale du MCP dans le système de stockage de la chaleur latente est de 1,3 kg pour une plaque de 5 mm d'épaisseur. La chaleur latente du MCP a été estimée à 310 kJ / kg, ce qui donne une capacité totale de stockage du MCP d'environ 403 kJ. Comparativement, la capacité totale de stockage de l'eau est 462 kJ, ce qui correspond à une masse totale de 1,4 kg et une chaleur latente de 330 kJ / kg.

L'avantage de l'eutectique sur l'eau est sa capacité à maintenir une température plus basse dans l'enceinte du réfrigérateur lors de la fusion. Il est possible de voir sur la figure 2.11, une représentation de la température moyenne de l'air dans l'enceinte du réfrigérateur en fonction de la charge thermique, pour le cas d'un mélange eutectique (-3° C) et de l'eau (0 ° C). On peut voir qu'en augmentant la charge thermique, la température dans l'enceinte du réfrigérateur augmente. Par contre, les températures de l'air avec le mélange eutectique restent inférieures à celles obtenues avec l'eau comme MCP, et voisines de la valeur recommandée pour un réfrigérateur. [25].

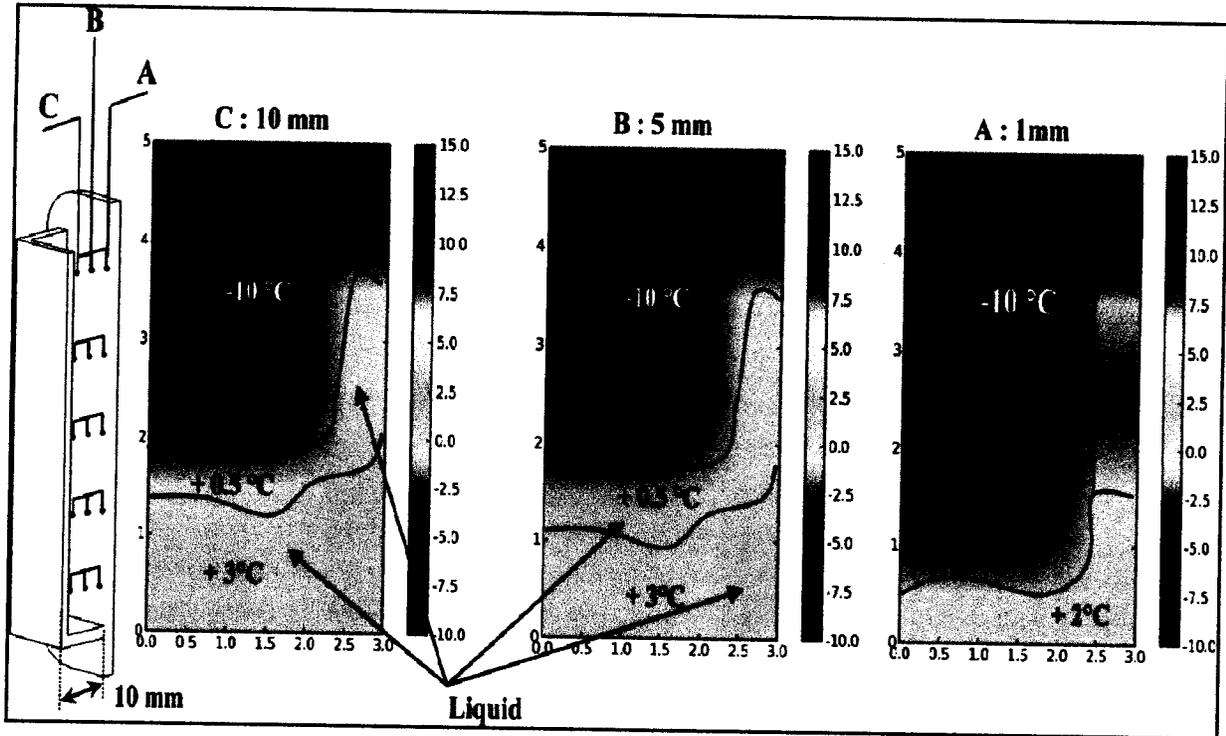


Figure 2.10. Caractère de température à différente distance de l'évaporateur

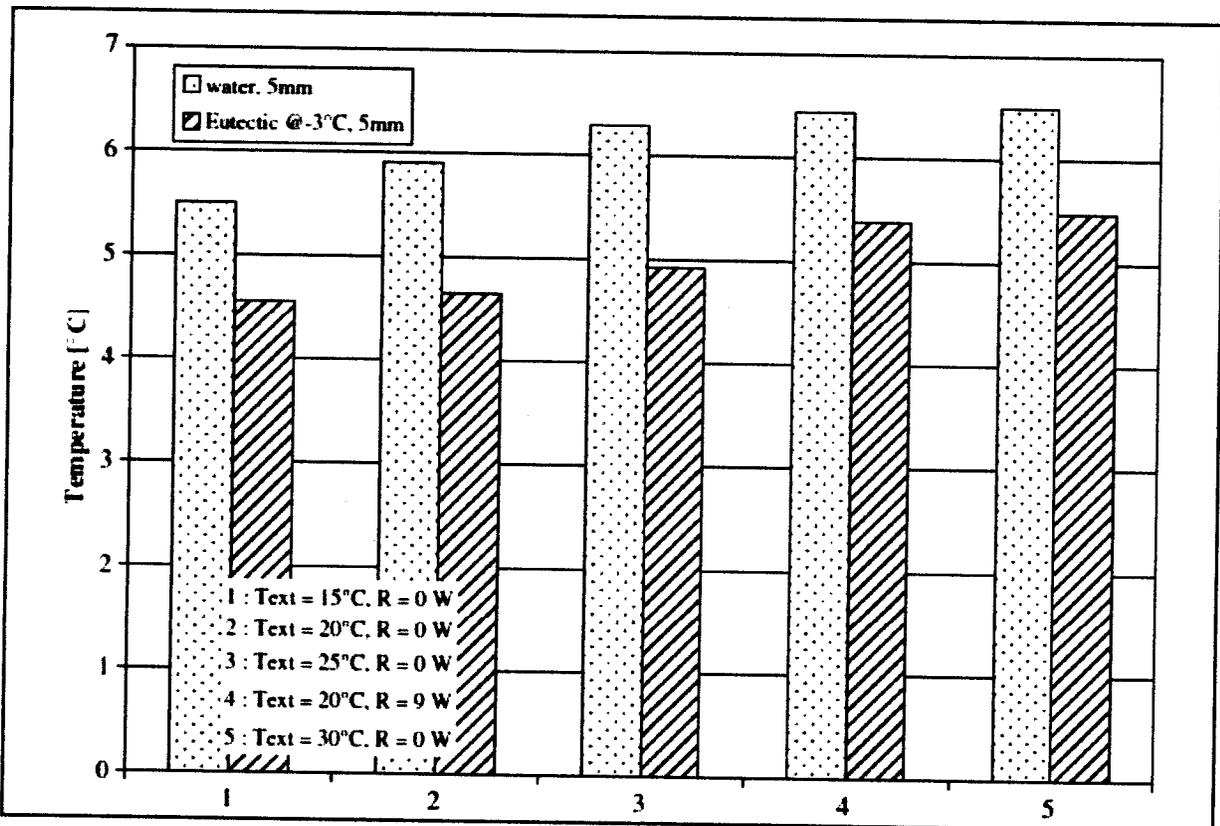


Figure 2.11 représentation de la température moyenne de l'air dans l'enceinte du réfrigérateur en fonction de la charge thermique

2.4.5. Des tests de performance énergétique :

La performance globale du réfrigérateur est estimée à l'aide du coefficient de performance du système (COSP), qui est le rapport entre la chaleur extraite par l'évaporateur et l'énergie électrique fournie au compresseur un cycle complet (temps de fonctionnement et d'arrêt).

$$COP = \frac{\phi_{ev}}{\dots}$$

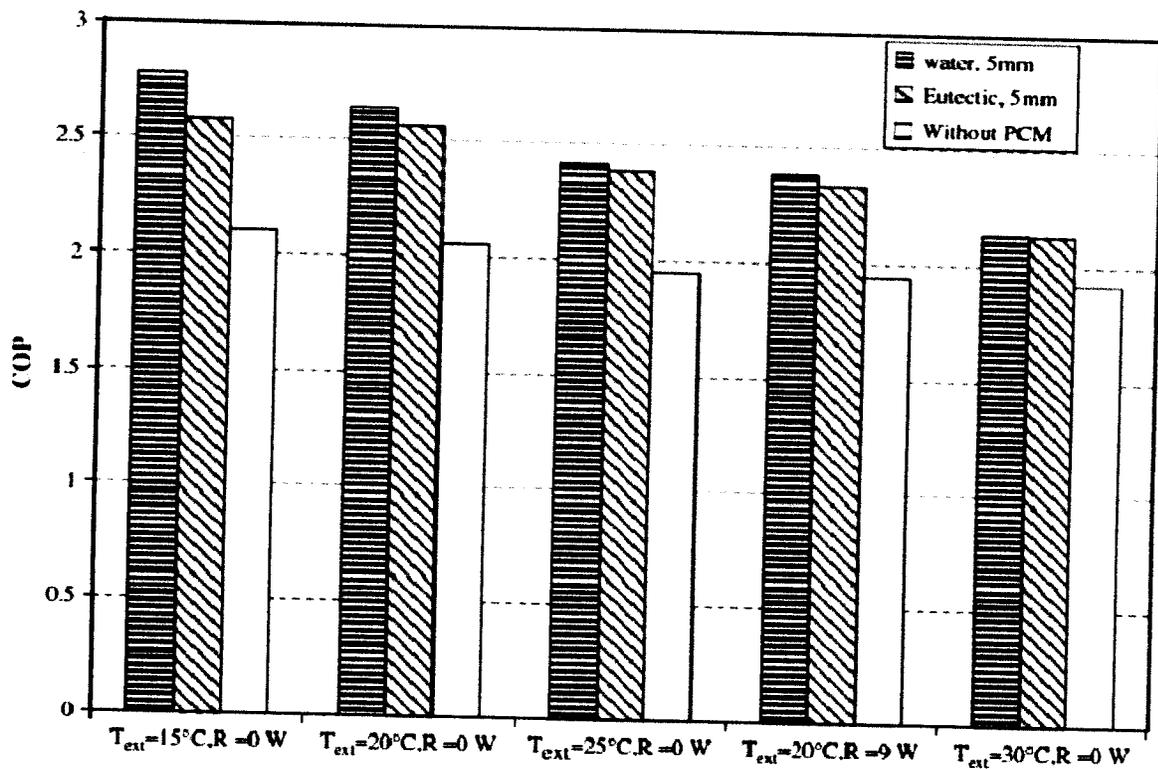


Figure 2.13 valeurs moyennes du COP pour différentes charges thermiques.

La figure 2.13 montre la variation du coefficient de performance en fonction de la charge thermique pour le réfrigérateur initial et pour une configuration où la plaque de MCP est de 5 mm d'épaisseur. D'une manière générale, on peut remarquer que la valeur du coefficient de performance du système est plus grande pour les configurations avec MCP. Il faut noter qu'une charge thermique élevée correspond à des cycles avec un MCP partiellement fondu et par conséquent une faible augmentation du coefficient de performance.

L'augmentation du coefficient de performance varie entre 10 et 30%, selon la charge thermique et la nature du matériau à changement de phase (eau ou mélange eutectique). L'augmentation du Coefficient de Performance est due à une température d'évaporation plus élevée et donc une plus grande capacité de refroidissement. Les figures 2.14 et 2.15 montrent la manière dont la pression d'évaporation est affectée par la présence du PCM. Pendant le temps de fonctionnement, la pression d'évaporation est contrôlée principalement par la température du changement de phase du matériau.

Cette pression est plus élevée en cas d'absence du MCP. Une augmentation moyenne de 0,14 bar avec le mélange eutectique et 0,11 bar avec l'eau est observée pour une charge thermique de 19,94W. Cette augmentation de la pression d'évaporation correspond à une augmentation de la température d'évaporation d'environ 3 K. Par conséquent, le flux massique extrait de l'évaporateur par le compresseur à débit volumétrique fixe est plus élevé que dans le cas sans MCP.

Chapitre 2: Recherche bibliographique

Un résumé des résultats obtenus lors de ces expériences est présenté dans le tableau 2.3. Dans tous les cas, les résultats montrent que la densité de la vapeur réfrigérante qui pénètre dans le compresseur est plus élevée que dans le cas sans PCM, et, par conséquent, une plus grande capacité de réfrigération.

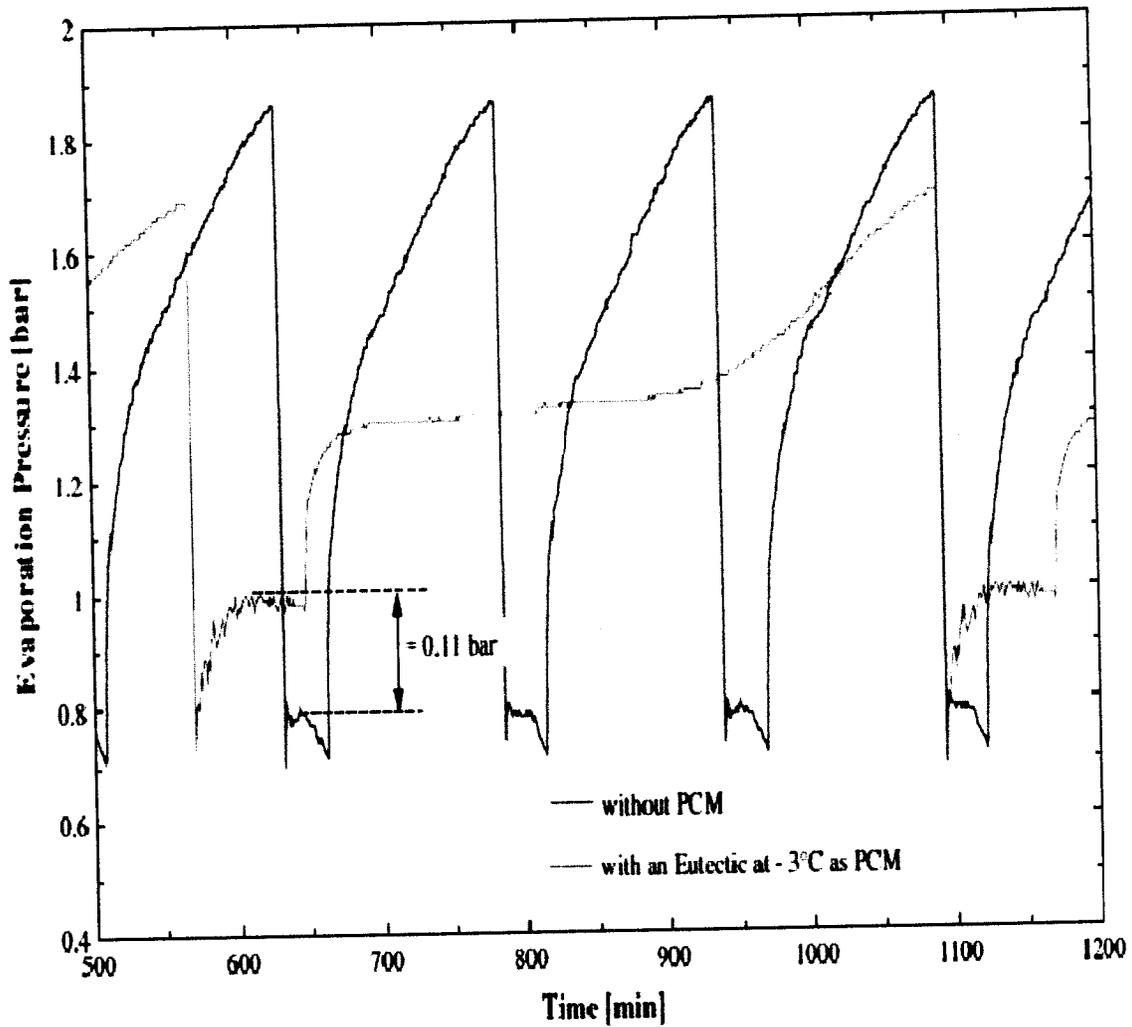


Figure 2.14. Evolution temporelle de la température d'évaporation avec et sans PCM.

$T_{\text{ext}} = 20^{\circ}\text{C}$, pcm(eutectique R = 0w e = 5mm)

Chapitre 2: Recherche bibliographique

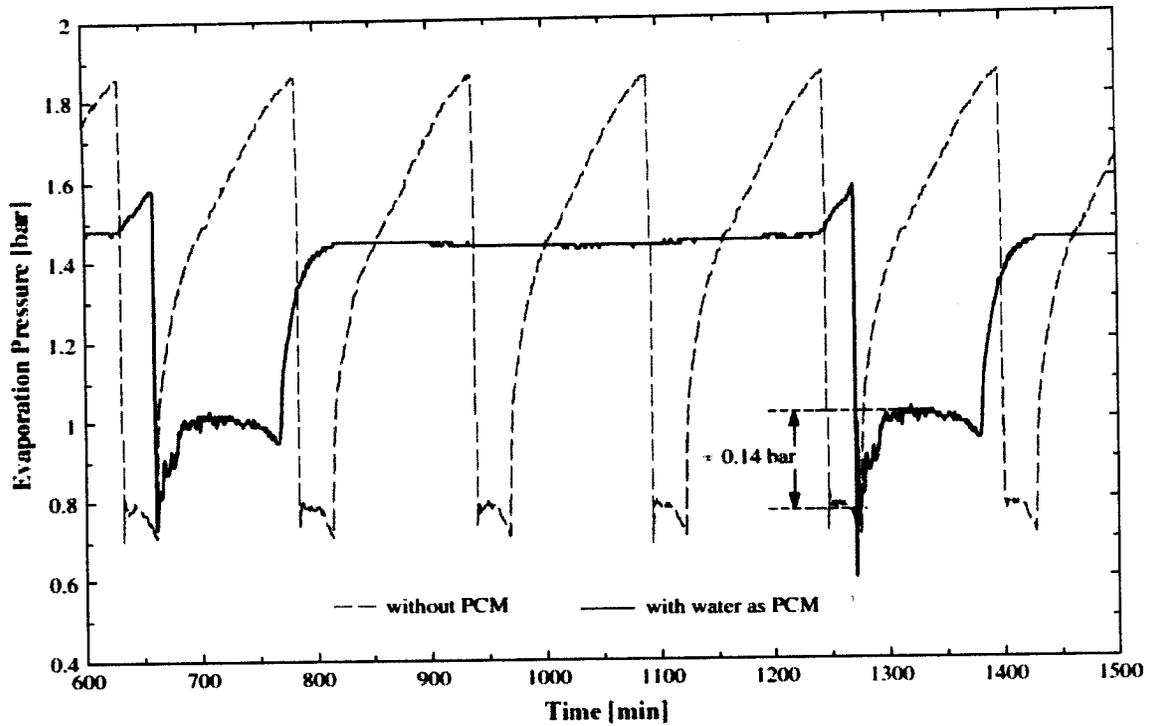


Figure 2.15. Evolution temporelle de la température d'évaporation avec et sans PCM

$T_{ext} = 20c^{\circ}$, pcm (l'eau e = 5mm) R = 0w

Tableau 2.4 Les valeurs moyennes des propriétés thermo physiques des frigorigènes pour des tirages différents.

essai	ϕ_{ev}	P_{ev}	P_{ev}	P_{ev}	T_{ev}	T_{ev}	T_{ev}	ρ	ρ	ρ
	[w]	Sans PCM	avec une solution eutectique	Avec de l'eau	Sans PCM	avec une solution eutectique	avec de l'eau	Sans PCM	avec une solution eutectique	avec de l'eau
		-	5mm	5mm	-	5mm	5mm	-	5mm	5mm
		[bar]	[bar]	[bar]	[c°]	[c°]	[c°]	[kg/m ³]	[kg/m ³]	[kg/m ³]
1	12.82	0.81	0.92	0.94	-17.39	-14.3	-13.7	2.306	2.589	2.65
2	19.94	0.86	0.96	0.99	-15.93	-13.2	-12.4	2.439	2.703	2.78
3	27.06	0.9	1.01	1.04	-14.81	-11.9	-11.2	2.545	2.835	2.91
4	28.94	0.89	1	1.04	-15.09	-12.2	-11.2	2.518	2.809	2.91
5	34.18	0.96	1.06	1.09	-13.21	-10.7	-9.97	2.703	2.966	3.05

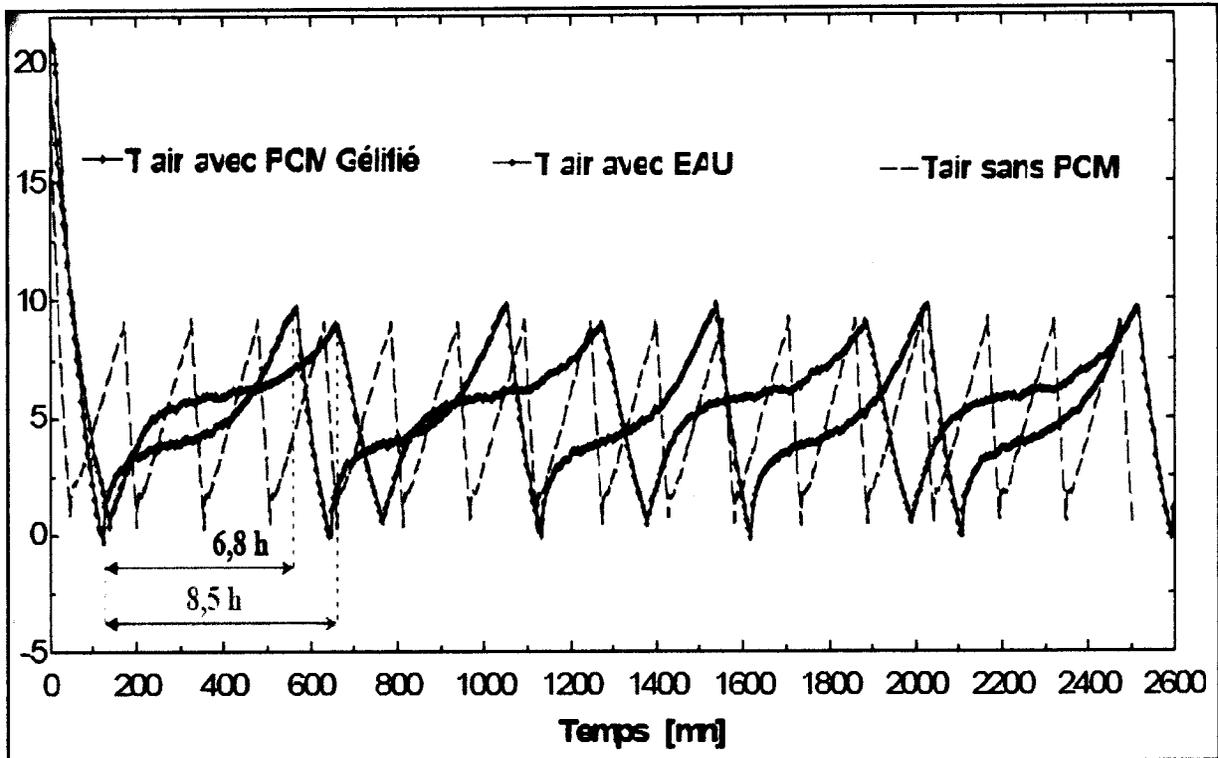


Figure 2.16 comparaison des résultats obtenue avec eau et MPC

2.5. Les équations de stocks et Navier : [30]

On appelle équation de Navier -Stocks l'ensemble des équations de bilans spécifiquement formulées pour les fluides newtoniens :

Nous avons six équations couplées qui expriment pour un fluide newtonien :

- ✓ L'équilibre local du fluide (équation d'état) (3.23).
- ✓ La conservation de la masse (équation de continuité) (3.23).
- ✓ La loi fondamentale de la dynamique (équation de bilan de quantité de mouvement) (3.24).
- ✓ Conservation de l'énergie (équation de bilan de l'énergie) (3.25)

Dans le cas de fluide dont la viscosité et la conductivité thermique varient assez peu avec les paramètres d'état et peuvent être supposées constantes, ces équations s'écrivent :

$$\begin{cases} \mu = \mu(P, \theta) \\ K = K(P, \theta) \end{cases} \quad (3.22)$$

Etat $\mapsto f(P, \theta) \quad (3.23)$

Continuité $\mapsto \frac{d\rho}{dt} + \rho \operatorname{div} \vec{V} = 0 \quad (3.24)$

Quantité de mouvement $\mapsto \rho \frac{d\vec{v}}{dt} = \rho \vec{F} - \operatorname{grad} \left(P - \frac{\mu}{3} \operatorname{div} \vec{V} \right) + \mu \Delta \vec{V} \quad (3.25)$

Energie $\mapsto \rho \frac{de}{dt} = r + \operatorname{div} (K \operatorname{grad} \theta) - P \operatorname{div} \vec{V} + \Phi_1 \quad (3.26)$

Chapitre 2: Recherche bibliographique

a) Navier-Stokes Incompressible :

$$\begin{cases} \rho \frac{d\vec{V}}{dt} = -\overrightarrow{\text{grad}p} + \mu\Delta\vec{V} + \vec{F}_{ext} \\ \text{div}\vec{V} = 0 \end{cases} \quad (3.27)$$

L'équation traduisant la conservation de la quantité de mouvement contient différents .

1. Le terme d'accélération: $\frac{d\vec{V}}{dt}$ Il se compose de deux parties distinctes qui sont respectivement le terme instationnaire et le terme d'advection qui est non linéaire, en coordonnées cartésiennes, on a :

$$\frac{d\vec{V}}{dt} = \frac{\partial\vec{V}}{\partial t} + U \frac{\partial\vec{V}}{\partial x} + V \frac{\partial\vec{V}}{\partial y} + W \frac{\partial\vec{V}}{\partial z} \quad (3.27)$$

Le terme d'advection rend les équations de Navier-Stokes non-linéaires. Par conséquent, on ne sait pas mathématiquement en déterminer une solution analytique exacte.

2. Le terme de pression : $-\text{grad}p$ Il apparaît que la pression intervient dans les équations uniquement par son gradient. En outre, ce terme est le seul qui soit générateur de mouvement. Ainsi, en incompressible seules les différences de pression sont motrices au sein d'un fluide.

3. Le terme de diffusion : $\mu\Delta\vec{V}$ Comme son nom l'indique ce terme représente les mouvements de diffusion. Ils correspondent aux frottements visqueux et sont donc responsables de la dissipation d'énergie au sein d'un écoulement. L'opérateur mathématique de la diffusion est un Laplacien qui est un opérateur isotrope. Il en résulte que la diffusion moléculaire agit de la même façon dans toutes les directions.

En mécanique des fluides, en supposant que le fluide est un milieu continu, on peut utiliser les lois classiques de conservation qui sont :

- ✓ Loi de conservation de la masse ou l'équation de continuité.
- ✓ Deuxième loi de Newton (principe de conservation de quantité de mouvement) ou les équations de quantité de mouvement.
- ✓ Loi de conservation d'énergie (premier principe de la thermodynamique) ou l'équation d'énergie.

Dans le cas laminaire, les problèmes d'écoulement de fluide peuvent être traités par la résolution de l'équation de quantité de mouvement, l'équation de continuité et l'équation d'énergie. Quand un écoulement permanent est laminaire, les lignes de courants représentent les trajectoires du fluide et sont des courbes fixes dans l'espace qui ne se mélangent pas au cours du mouvement. Les couches fluides glissent les unes sur les autres, sans qu'il y ait passage de particules d'une couche à l'autre.

CHAPITRE III



3.1. Introduction :

L'effet de la plus grande inertie thermique apportée par ces matériaux aura également pour conséquence : de limiter le nombre d'arrêt démarrage (chaque démarrage étant caractérisé par une surconsommation électrique), de privilégier certaines heures de fonctionnement dans la journée et de stabiliser la température pour une meilleure conservation des aliments.

Afin d'estimer le comportement et la performance du nouveau système et établir un dimensionnement optimal d'un prototype qui permettra de démontrer la faisabilité de ce concept, on développe une modélisation du fonctionnement du cycle à compression de vapeur En régime non établi couplé à un dispositif de stockage de froid.

La solidification (et la fusion) s'effectue au contact avec l'évaporateur, la deuxième face étant adiabatique (contact avec isolant thermique). Le processus de changement de phase dans le PCM appartient à une classe de problèmes dite à frontière mobile, et la solution recherchée consiste à déterminer, au cours du temps, le champ de température dans les deux phases solide et liquide, ainsi que la position de l'interface $s(t)$. Les hypothèses admises dans la modélisation du PCM sont :

- la conduction est le mode de transfert de chaleur dans le PCM.
- La convection est le mode de transfert de chaleur entre l'évaporateur et le MPC et le locale à réfrigéré.
- la résistance de contact avec l'évaporateur est négligeable.
- La méthode utiliser pour résoudre les équations c'est la méthode des volumes finis

En premier lieu nous avons présenté une partie de la recherche bibliographique dans ce chapitre ,c'est une modélisation du couplage entre un cycle à Compression de vapeur et un processus de changement de phase solide-liquide. Le modèle numérique présenté permet d'estimer l'impact énergétique lié à l'ajout d'un élément à chaleur latente dans un évaporateur. Les premiers résultats obtenus à partir des simulations numériques montrent clairement l'intérêt de l'intégration de cet élément dans un réfrigérateur domestique. Nous avons présenté dans la deuxième la formulation mathématique de notre problème .les conditions limites, et les équations de Navier-stocks simplifier à notre cas d'étude.

3.2. Le modèle mathématique :

Dans cette section, les hypothèses et l'ensemble des équations utilisées pour la modélisation du problème sont décrites. Le système est constitué de trois éléments différents: l'unité de changement de phase, le dispositif de compression de la vapeur et de la cellule réfrigérée (fig. 3.6). Les équations régissant ces éléments seront successivement décrites.

3.2.1. Transfert de chaleur par convection libre

$$\dot{Q} = hs\Delta T \quad (3.1)$$

\dot{Q} : flux thermique en w

H : coefficient de convection en wm^2 /K

S : surface d'échange en m^2

ΔT : différence du temps.

En régime instationnaire l'étude de transfert de chaleur par convection permet de déterminer les échanges de chaleur se produisant entre le fluide et une paroi . Le problème à résoudre avant de calculer le flux de chaleur consiste à déterminer H qui dépend de nombreux paramètres :

- ✓ Caractéristique du fluide ;
- ✓ Nature de l'écoulement ;
- ✓ La température ;
- ✓ La forme de surface d'échange.

Le fluide est mis en mouvement sous le seul effet :

- ✓ Des différences de températures de masses volumiques résultantes des différences de température sur les frontières.
- ✓ Les champs de forces extérieures (la pesanteur)

3.2.2. Le transfert de chaleur dans le PCM :

Le matériau à changement de phase considéré dans cette étude est une solution aqueuse eutectique (voir les propriétés thermo-physiques dans le tableau 1) dont la température de changement de phase peut être choisie dans la bande : - 9 à 0° C.

$L_f(KJ.Kg^{-1})$	280	la chaleur latente
$\lambda_s(wm^{-1}.K^{-1})$	1.8	la conductivité thermique à l'état solide
$\lambda_l(wm^{-1}.K^{-1})$	0.6	la conductivité thermique à l'état liquide
$\rho_s(Kg.m^{-3})$	1042	la densité à l'état solide
$\rho_l(Kg.m^{-3})$	1115	la densité à l'état liquide
$C_p(KjKg^{-1}.K^{-1})$	2592	la capacité calorifique

3.2.3. Modèle de cycle de compression de vapeur :

Afin d'obtenir les tendances qualitatives du système après avoir inclus le MCP, un modèle dynamique simplifié du réfrigérateur a été développé. Un certain nombre d'études dans la littérature sont dédiées à la réponse dynamique des machines de réfrigération afin d'améliorer le contrôle et l'efficacité énergétique de ces systèmes. Ici, les échangeurs de chaleur sont divisés en deux ou trois zones fixes, où le réfrigérant possède soit un flux monophasé ou diphasé. Ces modèles à paramètres regroupés assez précis pour prédire la réponse des caractéristiques moyennes du réfrigérant dans les échangeurs de chaleur (température, pression et débit).

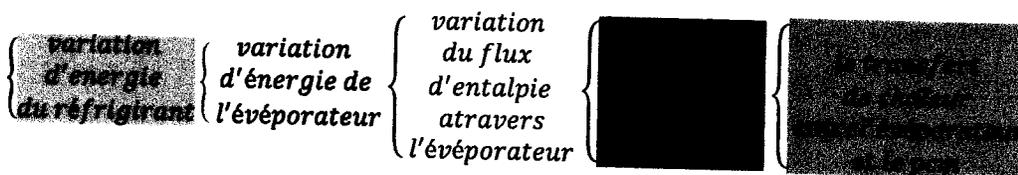
Ce modèle est décrit et approuvé par comparaison avec les mesures expérimentales obtenues pour un réfrigérateur sans MCP. Enfin, l'influence de la présence du MCP est analysée à l'aide de simulations numériques.

a) Les échangeurs de chaleur :

Il est couramment admis que la variation de la qualité de vapeur x est linéaire dans l'espace, pour permettre l'utilisation des propriétés moyennes du réfrigérant dans les échangeurs de chaleur. A partir de cette hypothèse, les valeurs moyennes spatiales des propriétés thermodynamiques du réfrigérant sont estimées de la même manière que les propriétés du mélange liquide-vapeur, pour une qualité frigorifique moyenne x . Cette hypothèse permet d'utiliser une forme paramétrique de l'équation énergétique. Ainsi, le bilan énergétique de l'évaporateur ajouté à la conservation de la masse donne l'équation suivante:

Pendant tout le temps de solidification (le compresseur en marche donc : $T_{pcm} = T_{solidification}$).

$$M_{er} \frac{dh_e}{dt} + M_{ew} \cdot C_{pew} \cdot \frac{dT_{ew}}{dt} + \dot{m}(h_{eo} - h_{ei}) - \text{[blacked out]} - \text{[blacked out]} = 0 \quad (3.5)$$



Et pendant la période de fusion (au moment de l'arrêt du compresseur) $T_{pcm} = T_{melting}$ et l'équation s'écrit comme suit :

$$M_{er} \frac{dh_e}{dt} + M_{er} C_{pew} \frac{dT_{ew}}{dt} - K_e S_e (T_a - T_{ew}) - K_{pcm} S_e (T_{pcm} - T_{ew}) = 0 \quad (3.6)$$

Dans ces équations, T_{MCP} est la température du matériel à changement de phase (MCP).

Le coefficient de transfert thermique global (K_e) entre l'évaporateur et la cellule frigorifique provient de la convection naturelle et le transfert de chaleur par rayonnement à l'intérieur de la cellule. Ce coefficient est caractérisé par l'état stationnaire des mesures expérimentales. Avec une hypothèse similaire pour la qualité frigorifique moyenne dans le condenseur, le bilan énergétique de cette composante donne :

$$M_{cr} \frac{dh_c}{dt} + C_{pcw} M_{cw} \frac{dT_{cw}}{dt} - \dot{m}(h_{ci} - h_{co}) + K_c S_c (T_c - T_{ext}) = 0 \quad (3.7)$$

Chapitre 3 : formulation mathématique du problème.

b) Compresseur et détendeur :

Les phénomènes transitoires sont négligés dans le compresseur et l'appareil d'expansion, ce qui donne uniquement des équations algébriques.

$$h_{c-out} = h_{eo} + \frac{\Delta h_{is}}{\eta_{is}} \quad (3.8)$$

Le débit masse du fluide frigorigène à travers le compresseur s'est écrit comme suit:

$$\dot{m} = \frac{N}{60} V_c \eta_v \rho_{eo}$$

N : est la vitesse de rotation du moteur en tours par minute,

η_v : est un rapport volumétrique estimée en fonction des pressions en amont et en aval,

V_c : est le volume de déplacement effectif du compresseur et

ρ_{eo} : est la densité de fluide frigorigène.

$$h_{co} = h_{ei} \quad (3.9)$$

Le processus d'expansion est considéré comme étant adiabatique. Par conséquent, l'équation du bilan énergétique s'écrit:

c) Modèle de cellule réfrigéré :

L'air dans la cellule du réfrigérateur est censé être à de l'uniforme température entouré par des murs caractérisés par un coefficient global de transfert de chaleur. La conservation de l'énergie liés à l'air dans la cellule réfrigérateur est représenté par :

$$M_a C_{Pa} \frac{dT_a}{dt} = K_{ref} S_{ref} (T_{ext} - T_a) C_{do} + K_e S_e (T_a - T_{ew}) + Q_{heat} \quad (3.10)$$

└─┘ └─┘ └─┘

La variation Transfert de chaleur entre l'air Transfert de chaleur entre l'air et
d'énergie d'air et l'environnement extérieur l'évaporateur

3.3. Ecoulements incompressibles de fluides newtoniens [13] :

3.3.1 Le milieu continu :

Pour traiter un problème de mécanique des fluides on se place généralement dans l'hypothèse des milieux continus. On oublie que le fluide est constitué de particules microscopiques et on considère que ses propriétés sont réparties de façon continue. Cela permet d'utiliser le calcul Différentiel et intégral pour résoudre les problèmes à traiter. On n'ignore pas complètement les phénomènes ayant lieu à l'échelle moléculaire ; ceux-ci seront pris en compte à travers leur influence Sur le milieu continu que l'on considère. Le fluide est alors régi par des grandeurs macroscopiques ; ces grandeurs que l'on va chercher à déterminer sont :

- ✓ les composantes de la vitesse (U, V, W).
- ✓ La pression La masse volumique
- ✓ La température (ou l'énergie ou l'enthalpie)

Chapitre3 : formulation mathématique du problème.

ces quantités d'intérêt sont locales, elles dépendent des coordonnées d'espace (x, y, z) et instantanées. Elles dépendent du temps. Pour les déterminer, on utilise des équations traduisant des Principes de conservation. Ces équations sont appelées les équations de Navier et stocks.

3.3.2. Modélisation du processus de fusion/solidification dans le PCM

Le processus de changement de phase dans le PCM appartient à une classe de problèmes dits à frontière mobile, et la solution recherchée consiste à déterminer, au cours du temps, le champ de température dans les deux phases solide et liquide, ainsi que la position de l'interface $s(t)$. Les hypothèses admises dans la modélisation du PCM sont (fig 3.1) :

- la conduction est le seul mode de transfert de chaleur dans le PCM.
- la résistance de contact avec l'évaporateur est négligeable.

Les équations de la chaleur dans les phases solide et liquide s'écrivent:

1. Conservation de l'énergie de la phase solide :

$$\rho_s C_{ps}(T) \frac{\partial T_s}{\partial t} = \left(\lambda_s(T) \frac{\partial T_s}{\partial x} \right) \quad (3.11)$$

2. Conservation de l'énergie de la phase liquide :

$$\rho_l C_{pl}(T) \frac{\partial T_l}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_l(T) \frac{\partial T_l}{\partial x} \right) \quad (3.12)$$

3. à l'interface (SOLIDE/liquide) : $T_s = T_l = T_f \Rightarrow$

$$\rho_s l \frac{\partial T}{\partial x} = \lambda_s \frac{\partial T_s}{\partial t} - \frac{\partial T_l}{\partial x} \quad (3.13)$$

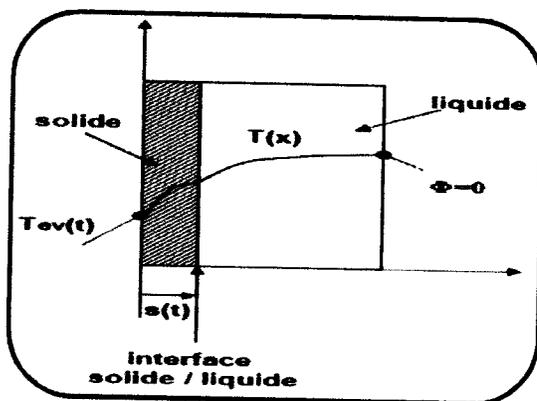


Figure 3.1 conditions limites à l'interface $x = s(t)$ [19]

3.3.3 Les équations gouvernantes

Les équations qui gouvernent le phénomène de la convection naturelle dans l'enceinte sont :

a) L'équation de continuité :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i) = 0 \quad (3.14)$$

Chapitre3 : formulation mathématique du problème.

(j=1,2,3 : indice de sommation)

Pour un fluide Newtonien incompressible, l'équation (3.31) se réduit à :

$$\frac{\partial y_j}{\partial x_j} = 0 \quad (3.15)$$

b) Les équations de quantité de mouvement :

D'après la deuxième loi fondamentale de la dynamique, le taux temporaire de changement de quantité de mouvement d'une particule fluide est égal à la somme des forces extérieures sur cette particule. L'équation de la dynamique sous forme tensorielle s'écrit alors comme suit :

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial(\rho u_j u_i)}{\partial x_j} = F_i - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial y}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial u_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] \quad (3.16)$$

Où :

$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i)$: Représente le taux de variation de la quantité de mouvement.

$\frac{\partial y}{\partial x}(\rho u_j u_i)$: Représente le taux net de transport de quantité de mouvement suivant la direction i, par mouvement du fluide.

F_i : représente les force du volume suivant la direction i.

$\partial p / \partial x_i$: représente les forces dues à la pression.

$\partial / \partial x_j \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial u_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right]$: Représente les forces nettes de viscosité.

L'équation (3.6) représente la conservation de quantité de mouvement (équation de Navier Stokes) d'un fluide visqueux incompressible pour un régime transitoire.

c) L'équation de l'énergie

Elle est obtenue par l'application du premier principe de la thermodynamique ,cette équation pour un fluide Newtonien incompressible, s'écrit sous la forme suivante :

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (u_i) = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial x_j^2} \quad (3.17)$$

Où :

$$\alpha = \frac{K}{\rho C_p}$$

α : La diffusivité thermique.

K : La conductivité thermique.

C_p : La chaleur spécifique à pression constante

Chapitre 3 : formulation mathématique du problème.

3.3.4. Modèle mathématique du problème étudié :

a) Equations dimensionnelles :

Considérons l'équation de quantité de mouvement suivant y qui est parallèle au vecteur de gravité g

$$\rho \left[\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(uv) + \frac{\partial}{\partial y}(vv) \right] = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial v}{\partial y} \right) - \rho g \quad (3.18)$$

Sachant que :

$$p' = p + \rho_0 g y \quad (3.10)$$

Avec :

p' : Pression hydrodynamique.

p : Pression totale.

$\rho_0 g y$: Pression hydrostatique.

On a encore :

$$-\frac{\partial p}{\partial y} = -\frac{\partial p'}{\partial y} + \rho_0 g \quad (3.19)$$

Rajoutant aux deux membres de l'équation (3.11) le terme $-\rho g$ on obtient :

$$-\frac{\partial p}{\partial y} + (-\rho g) = -\frac{\partial p'}{\partial y} + (\rho_0 - \rho) g \quad (3.20)$$

On écrit le terme qui se trouve à la droite de l'équation (3.12) sous la forme :

$$-\frac{\partial p'}{\partial y} + (\rho_0 - \rho) g$$

Négligeant la p' mais considérant que p est la pression hydrodynamique. On considère l'hypothèse de Boussinesq qui exige que :

$\rho_0 = \rho$ dans tous les termes des équations de mouvement, sauf dans le terme de gravité $-\rho g$ et en supposant que la masse volumique varie linéairement avec la température. En faisant un développement de Taylor d'ordre 1 de la masse volumique, on obtient :

$$\rho = \rho_0 + \left. \frac{\partial \rho}{\partial T} \right|_p (T - T_0) + o(\Delta T^2) \quad (3.21.a)$$

$$\rho = \rho_0 + \frac{1}{\rho_0} \left. \frac{\partial \rho}{\partial x} \right|_p (T - T_0) + o(\Delta T^2) \quad (3.22.b)$$

D'où :

$$\rho - \rho_0 = \beta \rho_0 (T - T_0) \quad (3.23)$$

Avec :

$$\beta = -\frac{1}{\rho_0} \left. \frac{\partial \rho}{\partial T} \right|_p \quad (3.24)$$

β : Le coefficient d'expansion thermique.

En substituant l'équation (3.14) dans (3.12) on aura :

Chapitre 3 : formulation mathématique du problème.

$$-\frac{\partial p}{\partial y} + (\rho_0 - \rho)g = -\frac{\partial p}{\partial y} + (T - T_0) \rho_0 g \beta \quad (3.25)$$

Avec les hypothèses du fluide Newtonien incompressible, l'hypothèse de Boussinesq est vérifiée, la convection naturelle bidimensionnelle se modélise alors comme suit :

A $t = 0$, le fluide est à la température ambiante et il est immobile.

$$u = v = 0 \text{ et } T = T_0$$

Pour $t > 0$, les sources de chaleur provoquant la convection dans l'enceinte on a :

b) Equation de continuité :

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (3.26)$$

c) Equation de quantité de mouvement suivant la direction X :

$$\rho_0 \left[\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(uu) + \frac{\partial}{\partial y}(uv) \right] = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial y} \right) \quad (3.27)$$

Avec les conditions aux limites :

Suivant X :

$$\text{A } x=0 \text{ et } x=L \quad 0 < y < H ; \quad u=0 \text{ (parois solides)}$$

Suivant Y :

$$\text{A } y=0 \text{ et } y=H \quad 0 < x < L ; \quad u=0 \text{ (parois solides)}$$

d) Equation de quantité de mouvement suivant la direction Y :

$$\rho_0 \left[\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(uv) + \frac{\partial}{\partial y}(vv) \right] = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \rho_0 g \beta (T - T_0) \quad (3.28)$$

Suivant X :

$$\text{A } x=0 \text{ et } x=L \quad 0 < y < H ; \quad v=0 \text{ (parois solides)}$$

Suivant Y :

$$\text{A } y=0 \text{ et } y=H \quad 0 < x < L ; \quad v=0 \text{ (parois solides)}$$

e) Equation de l'énergie :

$$\rho_0 c_p \left[\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(uT) + \frac{\partial}{\partial y}(vT) \right] = -\frac{\partial}{\partial x} \left(K \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K \frac{\partial T}{\partial y} \right) \quad (3.29)$$

Dans cette enceinte rectangulaire deux parois sont maintenues à des températures différents le haut à $T = 300\text{K}$ et le bas à $T = 350\text{K}$ la gauche assure le transfert par convection à 300K et $h = 50 \text{ W}/(\text{m}^2\text{°C})$, la paroi droite est adiabatique.

Suivant X :

$$\text{A } x=0 \quad \text{et} \quad 0 < y < H ; \quad T=300 \text{ K et } h= 50 \text{ W}/(\text{m}^2\text{°C})$$

$$\text{A } x=L \quad \text{et} \quad 0 < y < H ; \quad \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right| = 0$$

Suivant Y :

$$\text{A } y=0 \quad 0 < x < L ; = 0 \quad U=V=0, T=350 \text{ K}$$

$$y=H \quad 0 < x < L ; \quad U=V=0, T=350 \text{ K}$$

Chapitre 3 : formulation mathématique du problème.

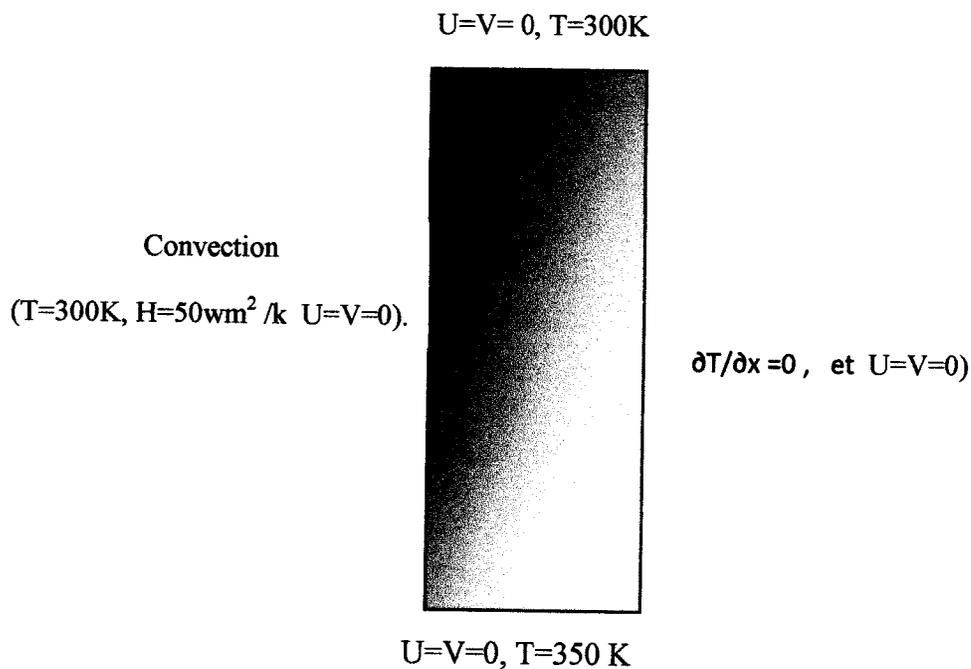


Figure 3.2 .Schéma représentant la configuration de la convection

f) Nombre de Nusselt :

La température moyenne du fluide $T_b(x)$ peut être définie par :

$$T_{f,m} = T_b(x) = \frac{\int_A u(x,y) \cdot T(x,y) dA}{\int_A u(x,y) \cdot dA} \quad (3.30)$$

Le nombre de Nusselt local est donné par :

$$Nu(x) = \frac{h(x)D_h}{\lambda_f} = \frac{q_w D_e}{\lambda_f (T_w - T_b)} \quad (3.31)$$

Nombre de Nusselt pour une facette :

$$Nu_{face} = \frac{1}{A_i} \int_{A_i} Nu(x) dx \quad (3.32)$$

Pour calculer le coefficient de frottement et les chutes de pression dans différentes sections respectivement par:

$$f = \frac{2 \cdot \tau_w}{\rho U^2} \quad (3.33)$$

$$\Delta P = \frac{f \cdot L \cdot \rho U^2}{2h} \quad (3.34)$$

CHAPITRE IV



4.1. Introduction :

Fluent est un logiciel de modélisation en mécanique des fluides. Ce logiciel est juste le solveur, il ne maille pas le système. Le maillage doit être réalisé avec un meilleur, (Gambit) qui est réalisé par le même éditeur. Le paramétrage se fait par une interface graphique. Ce logiciel permet la mise en place de script pour automatiser les processus de calcul.

Il est depuis peu intégré dans la fameuse suite de logiciel de simulation Ansys. Sa force vient du très grand nombre de modèles disponibles, pouvant faire face à de très nombreux aspects de la mécanique des fluides : Ecoulement diphasique (miscible, non miscible, cavitation, solidification), turbulence (LES, KE, Kw, SA, Reynolds stress), combustion (pré mélangé et non pré mélangé), transport de particules, écoulement en milieux poreux, maillages mobiles et dynamiques avec reconstruction du maillage. Les schémas temporels et spatiaux peuvent de plus être modifiés pour améliorer la convergence.

Les Travaux Pratiques proposés ont pour objet de présenter les logiciels GAMBIT (un meilleur) et fluent (un solveur des équations de Navier-Stokes), de faire des "expériences numérique" sur la simulation des écoulements "élémentaires" et d'analyser les résultats.

Le logiciel Fluent est basé sur la méthode des volumes finis, qui permet la résolution des équations qui régissent les écoulements (équation de conservation de la masse, équation de quantité de mouvement, équation de l'énergie). Fluent est associé à Gambit, à l'aide duquel on va définir la géométrie, le maillage, et les conditions aux limites. Après une brève présentation du problème, nous allons suivre les étapes suivantes :

1. Créer la géométrie en gambit,
2. Mailler la géométrie en gambit,
3. Mettre en place les types de condition aux limites, 'Boundary Types', en GAMBIT,
4. Mettre en place du problème sous fluent,
5. Résoudre.
6. Analyser les résultats.
7. Raffiner le maillage.

4.2. Le logiciel gambit :

Le logiciel Gambit est un mailleur 2D/3D; préprocesseur qui permet de mailler des domaines de géométrie d'un problème de CFD (Computational Fluid Dynamics). Il génère des fichiers *.msh pour Fluent. Fluent est un logiciel qui permet de résoudre et simuler des problèmes de mécanique des fluides et de transferts thermiques par la méthode des volumes finis. Le Gambit regroupe trois fonctions :

- ✓ définition de la géométrie du problème,
- ✓ le maillage et sa vérification,
- ✓ la définition des frontières (de conditions aux limites) et définitions des domaines de calculs.

4.3. Maillage sous Gambit :

4.3.1 Démarrage de Gambit :

Le chemin de l'application de Gambit est le suivant :

:/Fluent.Inc/ntbin/ntx86/Gambit.exe

Vous pouvez créer un raccourci dans la barre des tâches. S'il y a un problème d'exécution, supprimez tous les fichiers *.lok dans le répertoire **:/Fluent.Inc/ntbin/ntx86** et relancez Gambit.exe.

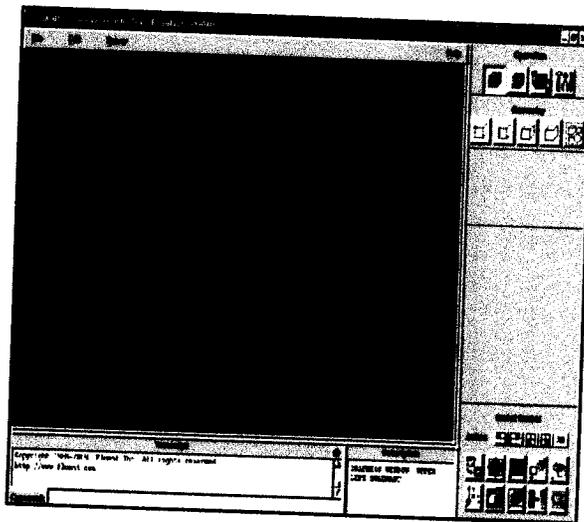


Figure 4.1- Lancement du Gambit[31]

4.3.2. Construction de la géométrie :

La finalité de la construction de la géométrie est de définir les domaines de calcul qui seront des faces dans un problème 2D et des volumes dans un problème 3D.

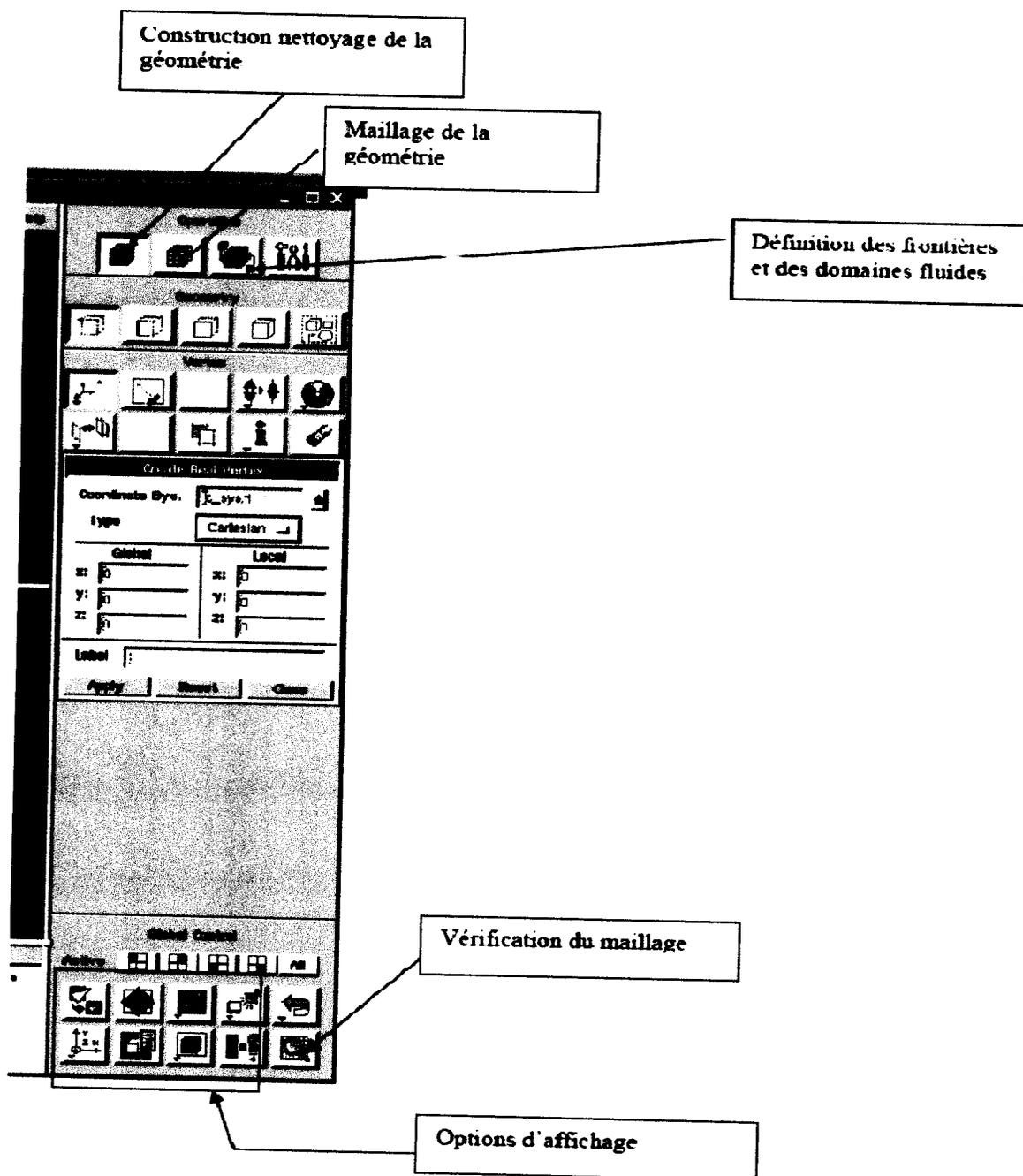


Figure 4.2 –opérations pour construire une géométrie[31]

4.3.3. Maillage

La génération du maillage (2D ou 3D) est une phase très importante dans une analyse CFD, vu l'influence de ses paramètres sur la solution calculée. Ce menu permet de mailler en particulier une ligne de la géométrie, à savoir disposer les nœuds avec des conditions particulières (utilisation d'un ratio pour modifier la pondération du maillage, application de formes différentes de maillage).

4.3.3.1. Choix du type de maillage

a) Maillage structuré (quadra/hexa) :

Il est beaucoup plus facile de le générer en utilisant une géométrie à multi bloc, il présente les avantages suivants :

- ✓ Economique en nombre d'éléments, présente un nombre inférieur de maille par rapport à un maillage non structuré équivalent.
- ✓ Réduit les risques d'erreurs numériques car l'écoulement est aligné avec le maillage. Ses inconvénients :
- ✓ Difficile à le générer dans le cas d'une géométrie complexe
- ✓ Difficile d'obtenir une bonne qualité de maillage pour certaines géométries complexes

b) Maillage non structuré (tri/tétra) :

Les éléments de ce type de maillage sont générés arbitrairement sans aucune contrainte quant à leur disposition.

*Ses avantages :

- ✓ Peut être généré sur une géométrie complexe tout en gardant une bonne qualité des éléments
- ✓ Les algorithmes de génération de ce type de maillage (tri/tétra) sont très automatisés

*Ses inconvénients :

- ✓ Très gourmand en nombre de mailles comparativement au maillage structuré
- ✓ Engendre des erreurs numériques (fausse diffusion) qui peuvent être plus importante si l'on compare avec le maillage structuré

c) Maillage hybride :

Maillage généré par un mélange d'éléments de différents types, triangulaires ou quadrilatéraux en 2D, tétraédriques, prismatiques, ou pyramidaux en 3D.

Ses avantages :

- ✓ Combine entre les avantages du maillage structuré et ceux du maillage non structuré

d) Techniques générales de génération du maillage :

Pratiquement, il n'existe pas de règle précise pour la création d'un maillage valable, cependant il existe différentes approches qui permettent d'obtenir une grille acceptable.

Nous pouvons résumer ces règles ainsi :

- ✓ Maintenir une bonne Qualité des éléments
- ✓ Assurer une bonne Résolution dans les régions à fort gradient

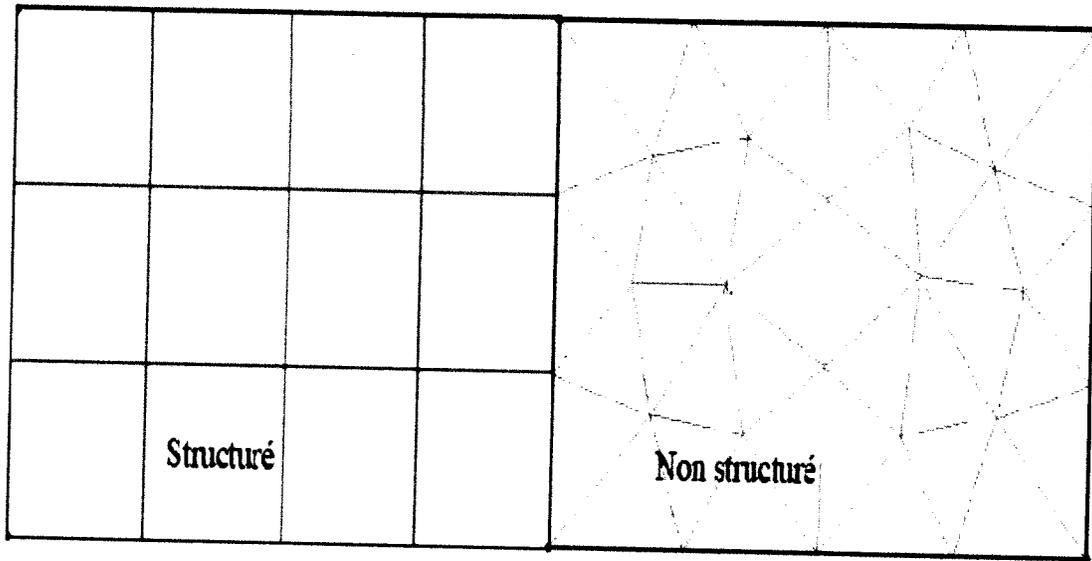


Figure 4.3 – maillage structuré et non structuré[31]

- ✓ Assurer un bon Lissage dans les zones de transition entre les parties à maillage fin et les parties à maillage grossier
- ✓ Minimiser le nombre Total des éléments (temps de calcul raisonnable)

e) Qualité d'un maillage :

La génération d'une très bonne qualité de maillage est essentielle pour l'obtention d'un résultat de calcul précis, robuste et signifiant. Une bonne qualité de maillage repose sur :

Une bonne résolution dans les régions présentant un fort gradient (couches limites, ondes de choc ... etc.) Enfin, la qualité de maillage a un sérieux impact sur la convergence, la précision de la solution et surtout sur le temps de calcul.

f) Lissage :

Le changement dans la taille des éléments de maillage d'une zone maillée à une autre doit être graduel, la variation de la taille des éléments de deux zones adjacentes ne doit pas dépasser 20%.

$$\frac{\Delta x_{i+1}}{\Delta x_i} \leq 1.2$$

g) Génération d'un maillage couche limite :

La notion de résolution concerne plus particulièrement les zones qui présentent un fort gradient, ainsi une bonne résolution permet de mieux décrire les phénomènes

physiques qui existent dans ces zones telles que les ondes de choc, ou les phénomènes liés à la couche limite.

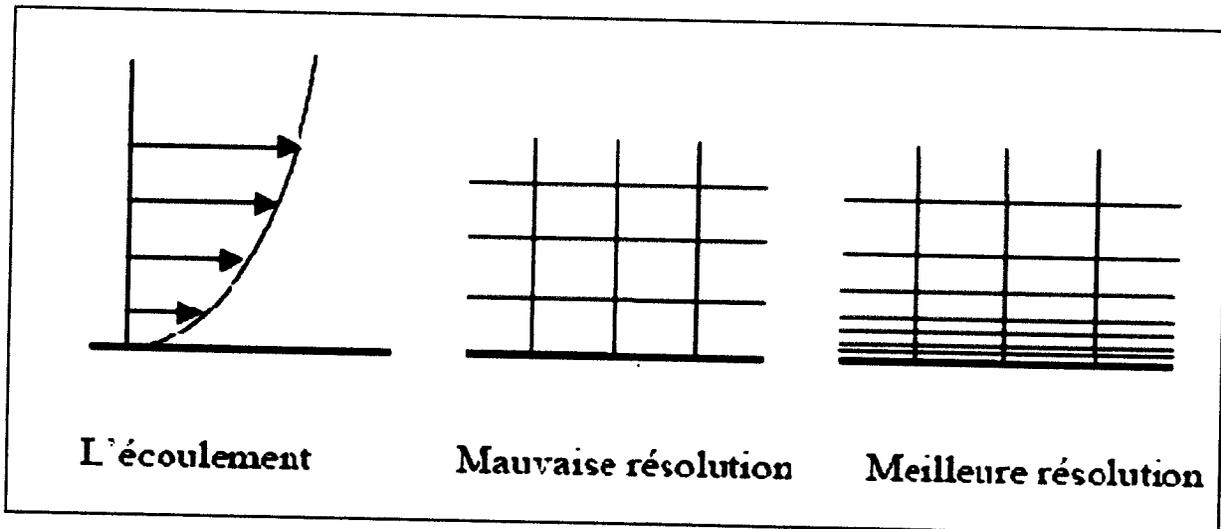


Figure 4.4 – Génération d'un maillage couche limite[31]

4.4. Conditions aux limites et définition de domaines

Le mailleur Gambit peut générer des maillages que beaucoup de solveurs peuvent utiliser, ainsi nous devons spécifier le logiciel solveur avec lequel on veut traiter le fichier maillage.

Comme conditions aux limites, on peut imposer un débit massique à l'entrée de la machine, en utilisant la condition Mass flow Inlet ou Velocity inlet, la pression à la sortie en utilisant la condition Pressure Outlet. La figure suivante résume les différentes conditions qu'on peut imposer pour un écoulement d'air en convection forcée turbulente. Ensuite, on procède à la définition des domaines de calcul.

4.4.1. Commande pour la construction de la géométrie :

Tableau.4.1

<i>Symbole</i>	<i>Commande</i>
	Point
	Segment
	Face
	Volume
	Group

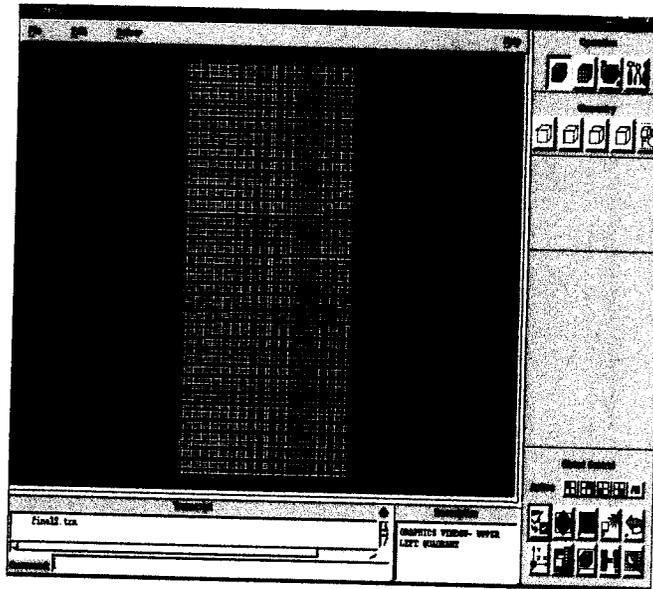
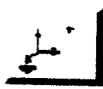


Figure 4.5 - Définition des conditions aux limites

4.4.2. Commande d'un point :

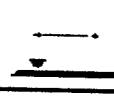
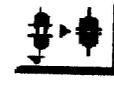
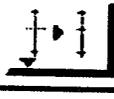
Tableau.4.2

<i>Symboles</i>	<i>Commande</i>	<i>Description</i>
	Créer point	Crée un point réel aux coordonnées spécifiées
	Glisser un point virtuel	Change la position d'un point virtuel au long d'un segment ou d'une face
	Connecter / séparer des points	Connecte des point réels ou virtuels/ sépare des points qui sont communs à deux ou plus d'une entités.
	Modifier la couleur d'un point	Change la couleur d'un point
	Déplacer/Copier un point	Déplace et/ou copie des points

	Convertir des points	Convertit les points non réels en points réels
	Récapituler Contrôle des points Recherche de points	Affiche les informations d'un point
	Supprimer un point	Supprime un point réel ou virtuel

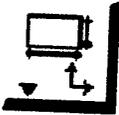
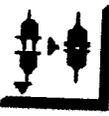
4.4.3. Commande d'un segment :

Tableau.4.3

<i>Symboles</i>	<i>Commande</i>	<i>Description</i>
	Créer un segment	Crée un segment réel à partir de points existants
	Connecter / séparer des segments	Connecte des segments réels ou virtuels/ sépare des segments qui sont communs à deux ou plus d'une entités.
	Modifier la couleur d'un segment	Change la couleur d'un segment
	Déplacer/Copier un segment	Déplace et/ou copie des segments
	Split Edges Merge Edges	Fractionner des segments ou merger des segments
	Convertir des segments	Convertit les segments non réels en segments réels
	Récapituler Contrôle des segments Recherche de segments	Affiche les informations d'un segment
	Supprimer un segment	Supprime un segment réel ou virtuel

4.4.4. Commande Relative à une face:

Tableau.4.4

<i>Symboles</i>	<i>Commande</i>	<i>Description</i>
	Former une face	Crée une face réelle à partir de segments existants
	V. Créer une face	Créer une face à partir d'une forme primitive
	Opérations booléennes	Union, soustraction et intersection de faces
	Connecter / séparer des faces	Connecte des face réelles ou virtuelles/ sépare des faces qui sont communes à deux ou plus d'entités.
	Modifier la couleur d'une face	Change la couleur d'une face
	Déplacer/Copier une face	Déplace et/ou copie des faces
	Split faces Merge faces	Fractionner ou merger des faces
	Convertir des faces	Convertit les faces non réelles en faces réelles
	Récapituler Contrôler des faces Rechercher des faces	Affiche les informations d'une face
	Supprimer une face	Supprimer une face réelle ou virtuelle

4.4.5. Commande relative à un volume :

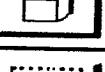
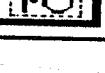
Tableau.4.5

<i>Symboles</i>	<i>Commande</i>	<i>Description</i>
	Former un volume	Crée un volume réel à partir de faces existantes
	VI. Créer un volume	Créer un volume à partir d'une forme primitive
	VII. Opérations booléennes	Union, soustraction et intersection de volumes
	Modifier la couleur d'un volume	Change la couleur d'un volume
	Déplacer/Copier un volume	Déplace et/ou copie des volumes
	Split volumes Merge volumes	Fractionner ou merger des volumes
	Convertir des volumes	Convertit les volumes non réels en volumes réels
	Récapituler Contrôler des volumes Rechercher des volumes	Affiche les informations d'un volume
	Supprimer un volume	Supprimer un volume réel ou virtuel

4.4.6. Commande de maillage :

Tableau.4.6

<i>Symbole</i>	<i>Commande</i>
	Couches limites

	Segment
	Faces
	Volume
	Groupe

4.4.7. Spécification de schéma des éléments face :

GAMBIT vous de spécifier un type d'élément de maillage surfacique, Chaque élément est associé avec un type de maillage

Tableau.4.7	
Option	descriptions
Quad	Spécifier que le maillage contient seulement des éléments quadrilatéraux
Tri	Spécifier que le maillage contient seulement des éléments triangulaires
Quad/Tri	Spécifier que le maillage contient seulement des éléments quadrilatéraux mais peut contenir des éléments triangulaires

4.4.8. Spécification Du type de maillage des éléments face :

GAMBIT vous donne les types de maillage suivant :

Tableau.4.8	
Option	description
Map	Crée un maillage régulier et structuré
Submap	Divisé une face de géométrie complexe en régions plus régulières et crée un maillage structuré en chaque région
Pave	Crée un maillage non structuré
Tri primitive	Divisé à three-side face into three quadrilateral régions and creates a mapped mesh in each region

Tableau.4.9 type de maillage

Wedge primitive	Create triangulaire element at the type of wedge –shaped face and create radial mesh outward from the tipe		
Tipe	Quad	Tri	Quad/Tri
Map	×		×
Submap	×		
Pave	×	×	×
Tri primitive	×		
Wedge primitive			×

4.5.1. Simulation sous fluent :

Ce manuel fournit une introduction à FLUENT, une explication de ses aptitudes, et des instructions pour paramétrer le solveur. Il explicite les étapes nécessaires pour réussir une simulation d'un problème en mécanique des fluides. Une attention particulière est donnée aux écoulements internes.

4.5.2.. Importation de la géométrie (*.msh)

Pour commencer la simulation il faut importer le fichier (*.msh) généré sous Gambit.

File → Read → Case...

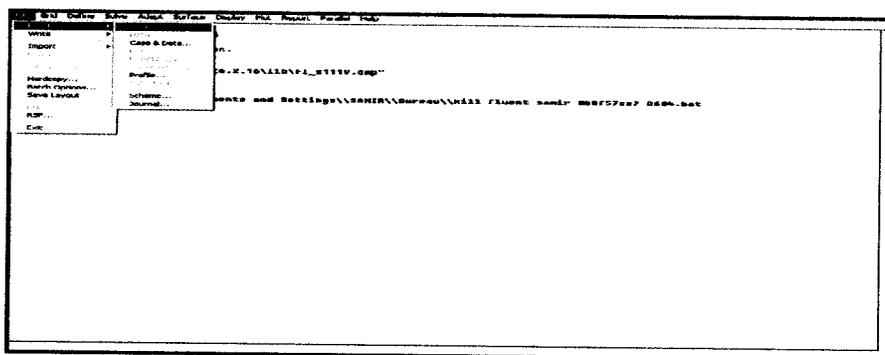


Figure 4.6 - Importation de la géométrie

4.5.3. Vérification du maillage importé :

Grid → Check

Ceci permet de vérifier si le maillage importé ne contient pas d'erreurs ou de volumes négatifs.

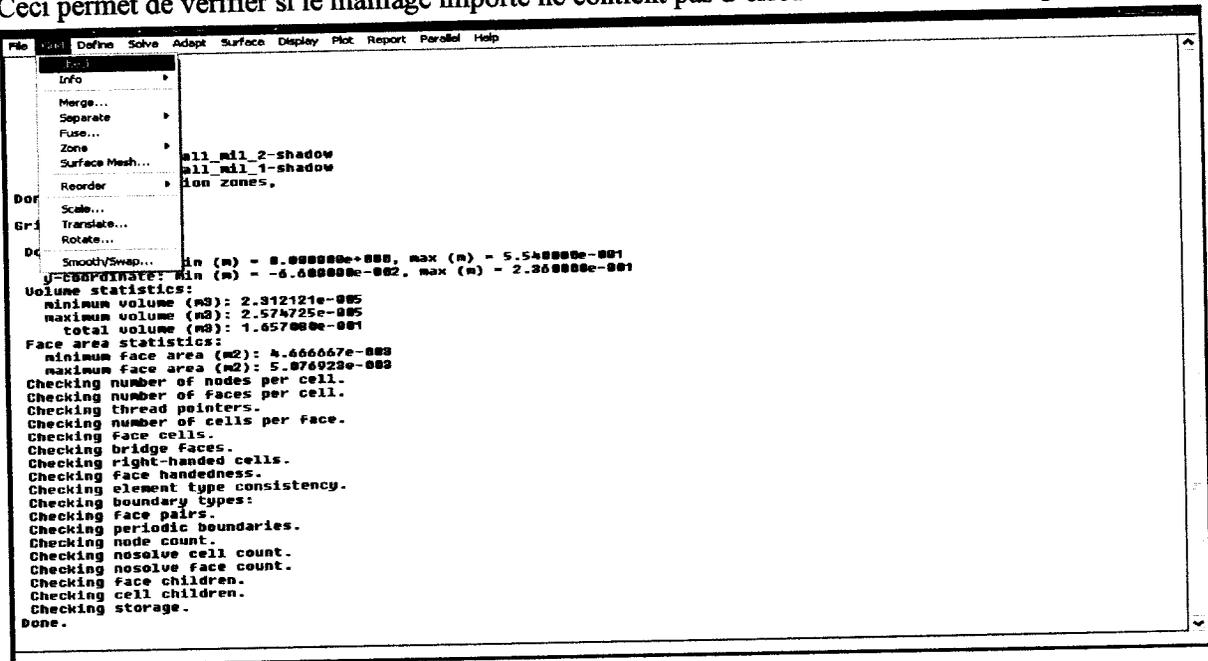


Figure 4.7 - Vérification du maillage sous Fluent

4.5.4. Lissage du maillage (Smooth and swap the grid) :

Grid → Smooth/Swap...

Pour s'assurer de la qualité du maillage, il est pratique de lisser le maillage, cliquez sur le bouton Smooth puis sur le bouton Swap. Répétez jusqu'à ce que FLUENT affiche que zéro faces sont swapped

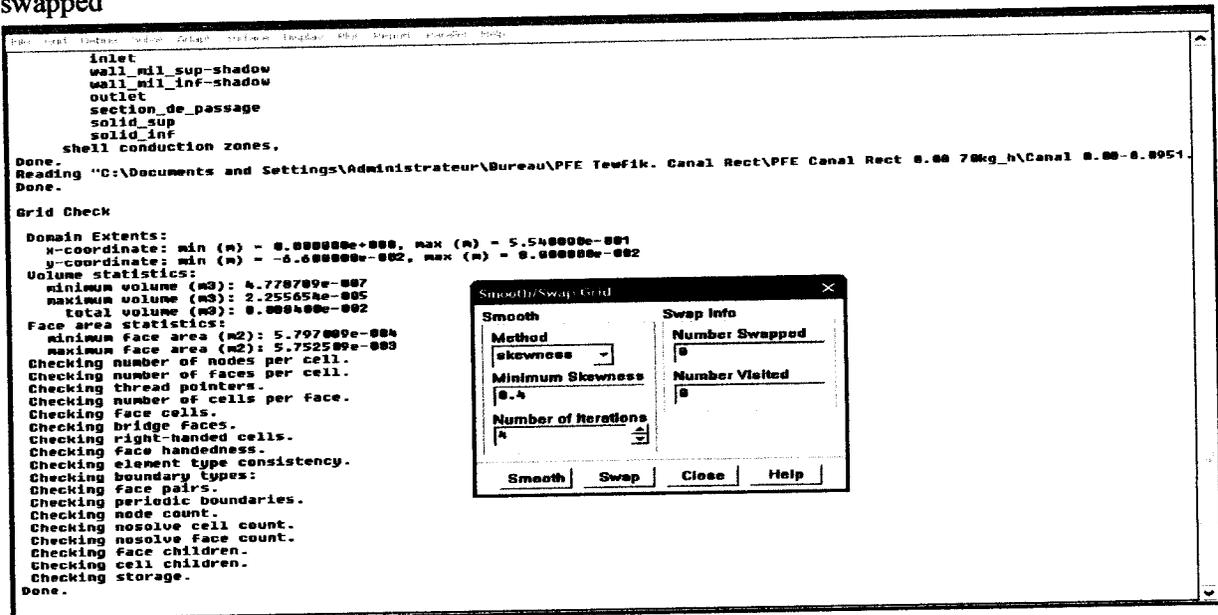


Figure 4.8 - Lissage du maillage

4.5.5. Vérification de l'échelle :

Grid → Scale

Il faut toujours vérifier que les dimensions affichées correspondent aux dimensions physiques du problème.



4.5.5. Vérification de l'échelle :

Grid —> Scale

Il faut toujours vérifier que les dimensions affichées correspondent aux dimensions physiques du problème.

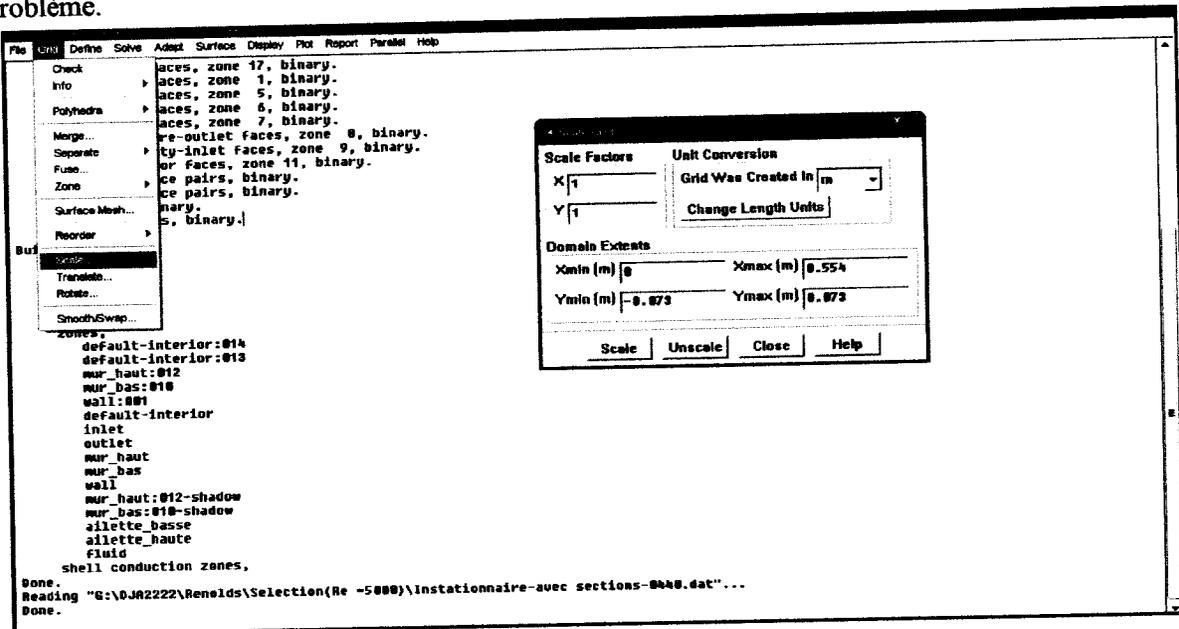


Figure 4.9 - Vérification des unités

4.5.6. Affichage de la grille :

Display —> Grid

Vous pouvez afficher le maillage et il est très judicieux de vérifier les conditions aux limites définies au préalable dans Gambit.

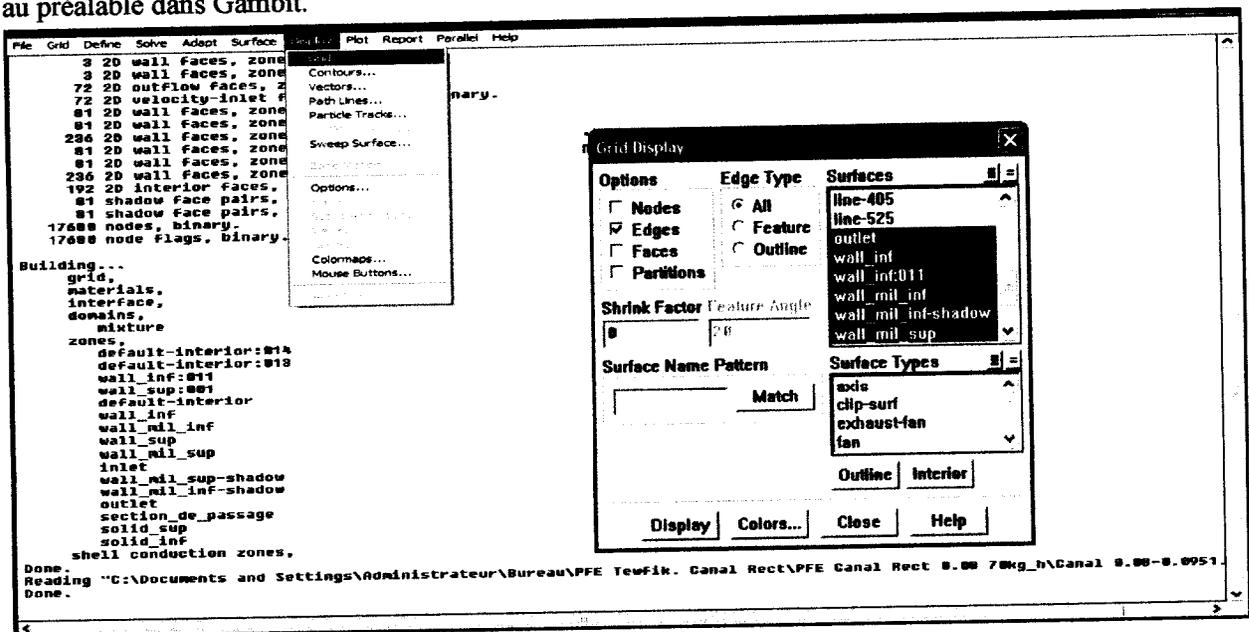


Figure 4.10 - Affichage de la grille et vérification des conditions

4.6. Operating conditions :

Define — Operating conditions

Avant de choisir les conditions aux limites, il faut choisir d'abord la valeur de la pression de référence « operating conditions ».

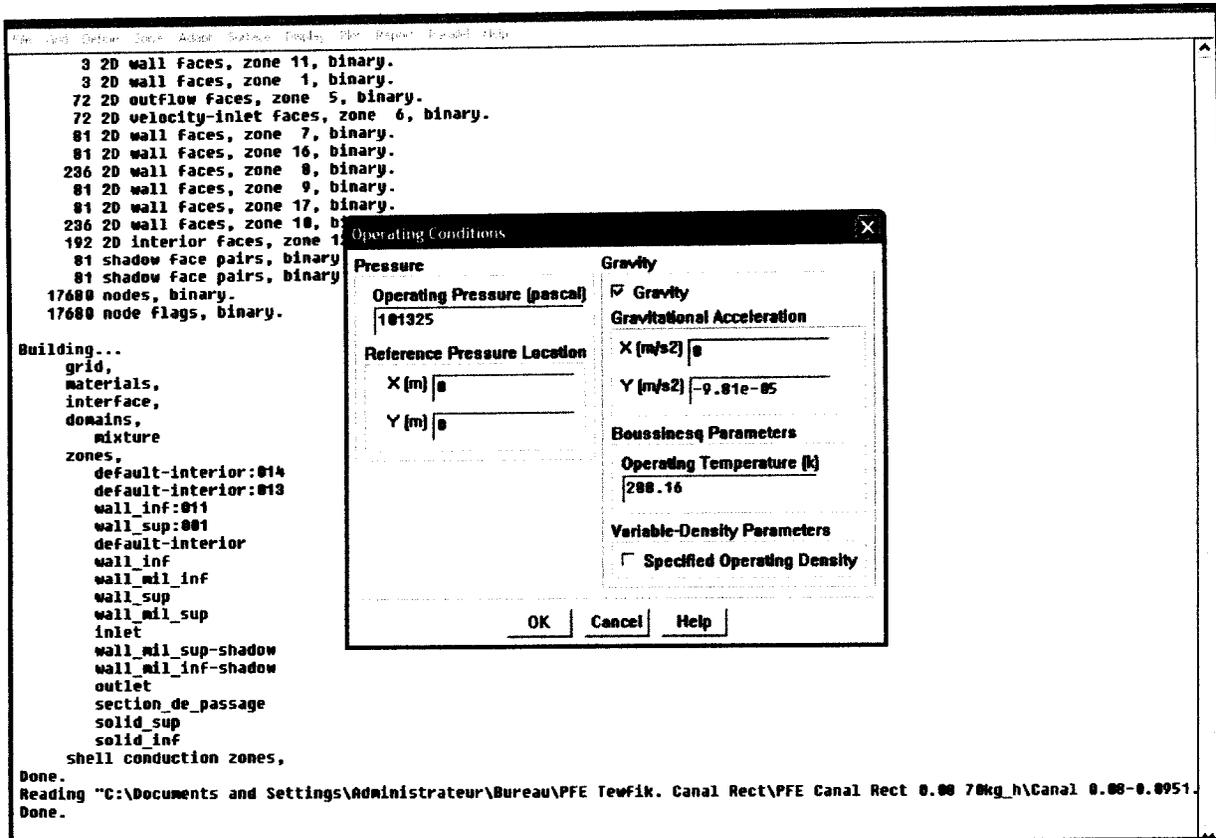


Figure 4.15 - Choix de la pression de référence

En effet, Fluent effectue tous les calculs, avec une pression appelée gauge pressure et ce afin d'éviter les erreurs d'ordre numérique lors du calcul pour des écoulements à faible nombre de mach. La relation liant la pression absolue à la « gauge pressure » est donnée par :

$$P_{abs} = P_{op} + P_{gauge}$$

Fluent prend par défaut la valeur de la pression atmosphérique comme operating pressure. Ensuite, il faut choisir les conditions aux limites :

4.6.1. Conditions aux limites usuelles :

Define — Boundary Conditions

Ensuite, il faut fixer les valeurs des conditions aux limites :

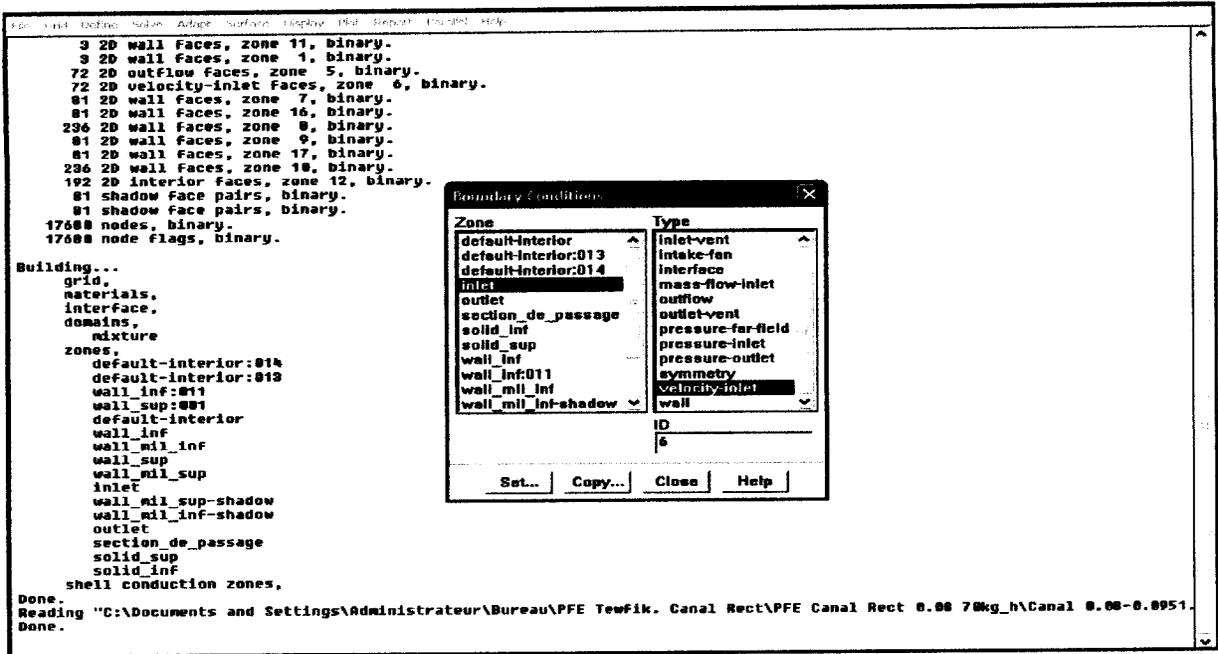


Figure 4.16 - Valeurs des conditions aux limites.

***Velocityinlet :**

Utilisée pour des écoulements incompressibles ou moyennement compressibles, quand la vitesse d'entrée est connue.

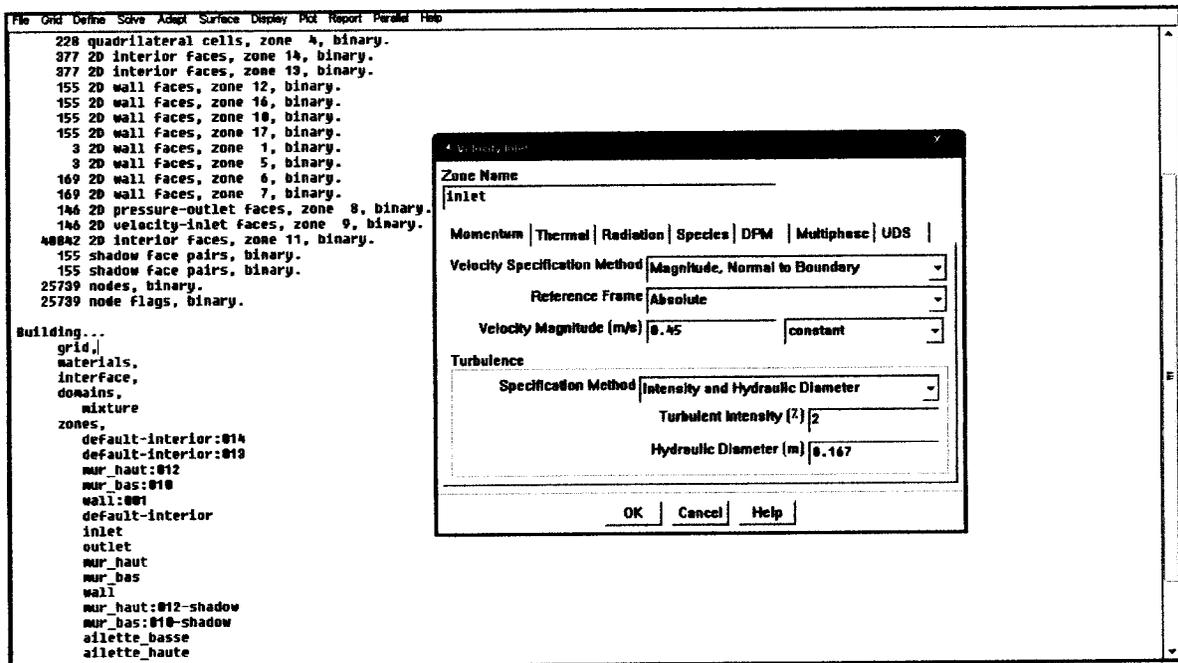


Figure 4.17 - Vitesse d'entrée

4.6.2. Choix d'ordre des équations et l'algorithme :

Solve → Controls → Solution...

Ceci permet de spécifier le degré d'ordre des équations à résoudre, ainsi l'algorithme.

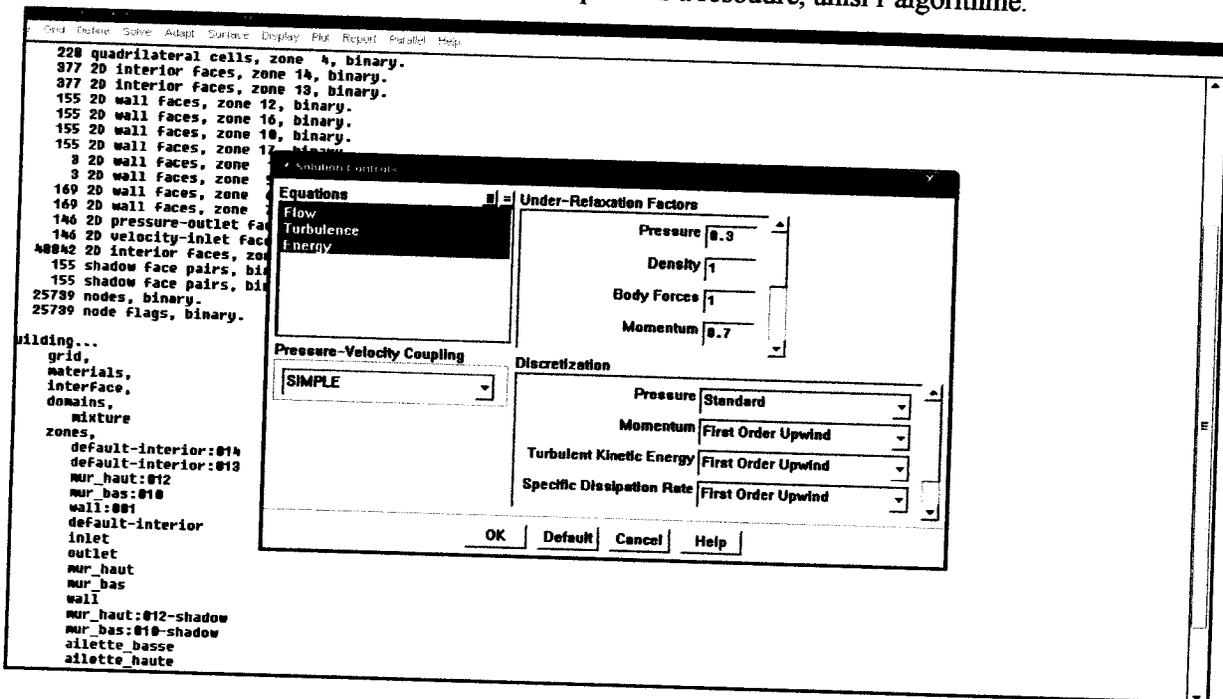


Figure 4.18 - Choix d'ordre des équations et l'algorithme

4.6.3. Initialisation :

Solve → Initialize → Initialize...

Cette fonction permet d'initialiser le calcul.

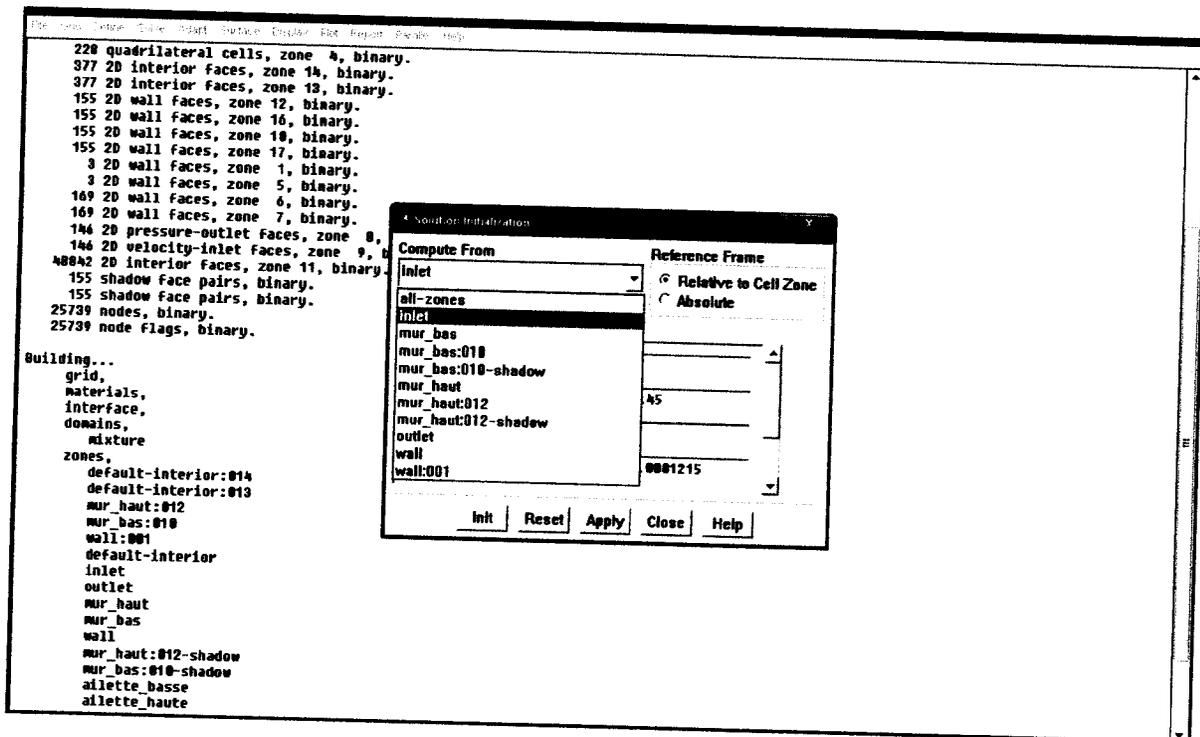
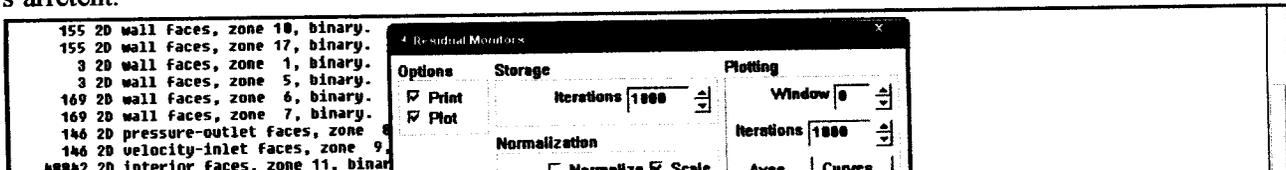


Figure 4.19 - Initialisation du calcul

4.6.4. Choix des critères de convergence :

Solve → Monitors → Residual...

Il s'agit ici de choisir les critères qui doivent être vérifiés pour que les calculs de la simulation s'arrêtent.



4.6. 6. Allures de l'évolution des résidus de calcul en régime stationnaire :

Display → residual

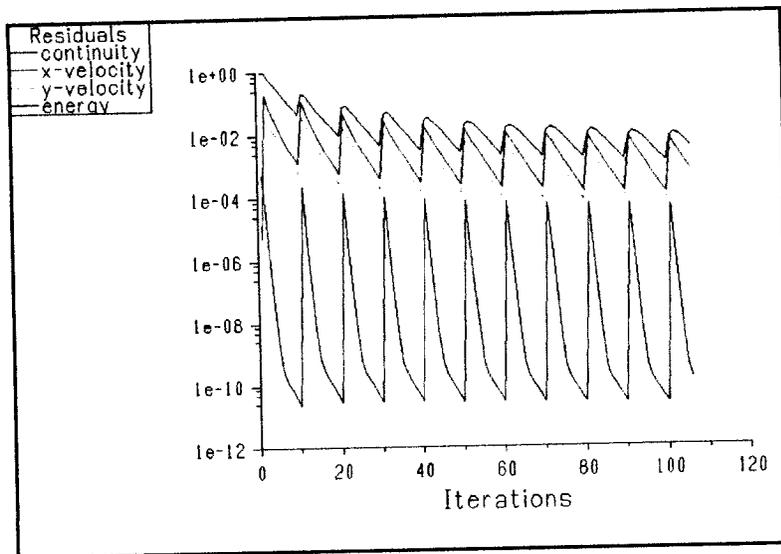


Figure 4.22 - Allures de l'évolution des résidus de calcul en régime instationnaire.

Remarque importante :

Les résidus sont calculés à partir des corrections dans les variables ; pression, vitesse, température... du problème entre la présente itération et l'itération précédente. Dans la plupart des cas, le critère de convergence par défaut dans fluent (résiduel) est suffisant. La solution converge quand les résidus atteignent 10^{-3} . Toutefois, dans certains cas il faut pousser les calculs à 10^{-4} voir 10^{-6} . Il n'y a pas de règle universelle.

CHAPITRE V

5.1. Introduction :

Dans ce chapitre nous allons nous intéresser à l'étude numérique du comportement instationnaire des MCP du point de vue dynamique et thermique dans la géométrie considérée. Nous procédons à la simulation du problème à l'aide du logiciel FLUENT. Nous présenterons le contour de vitesse ainsi de température en régime instationnaire. Nous présentons l'évolution de la vitesse et de la température le long de la paroi inférieure pour différentes sections choisies.

5.2 .Les résultats :

5.2.1 Contour des vitesses pour différentes positions le long de la plaque:

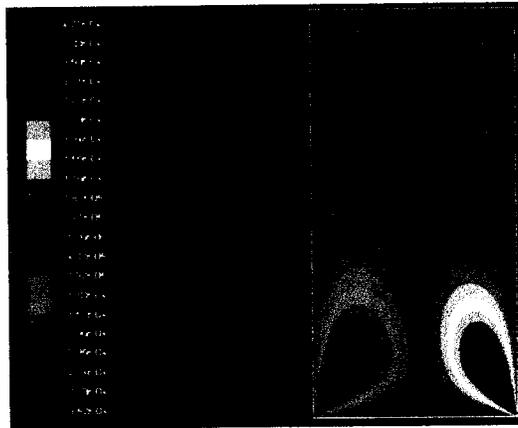


Figure 5.1- contour des vitesses radiales (y)

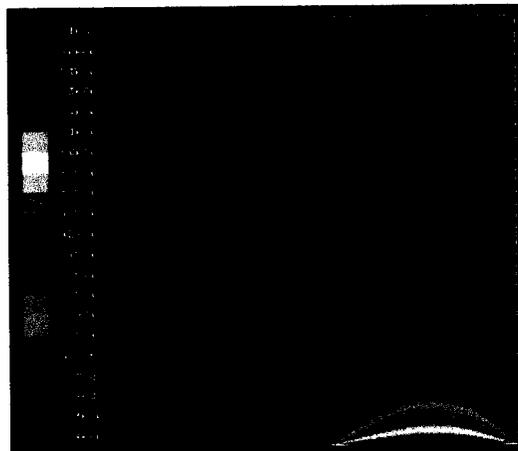


Figure5.2- contour des vitesses axiales (x)

5.2.2 La distributions des vitesses pour différentes positions le long de la plaque :

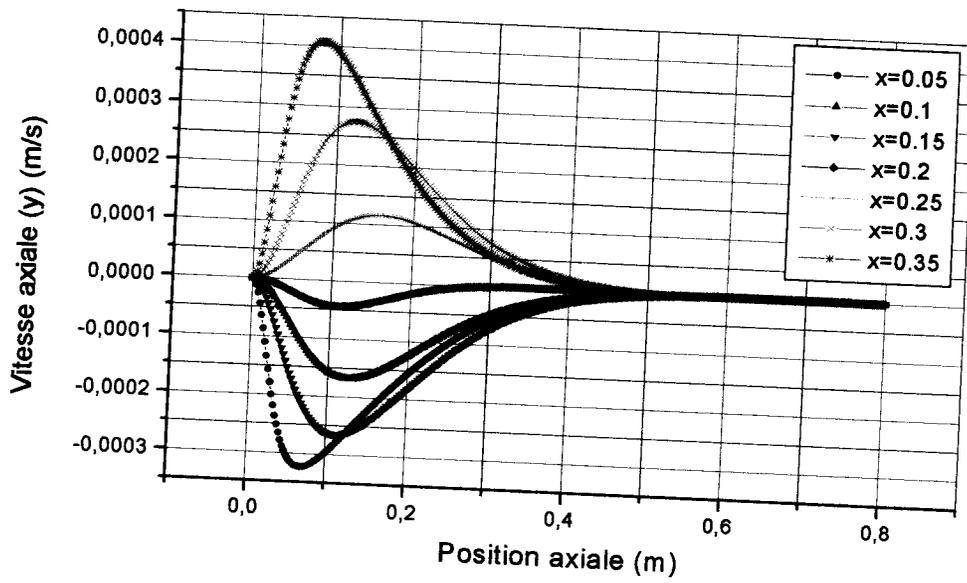


Figure 5.3- Profil des vitesses axiales pour différentes sections

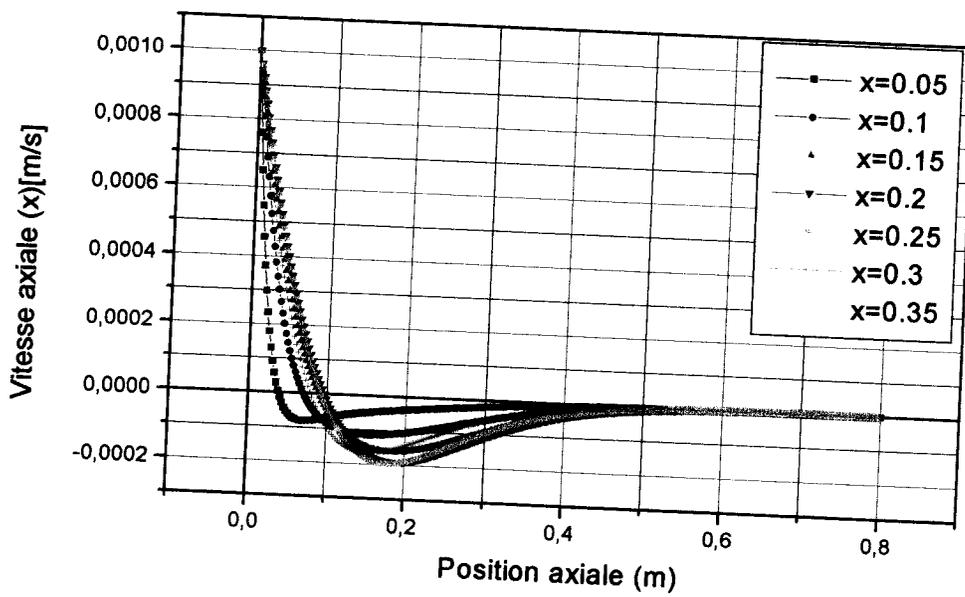


Figure 5.4- Profil des vitesses axiales pour différentes sections

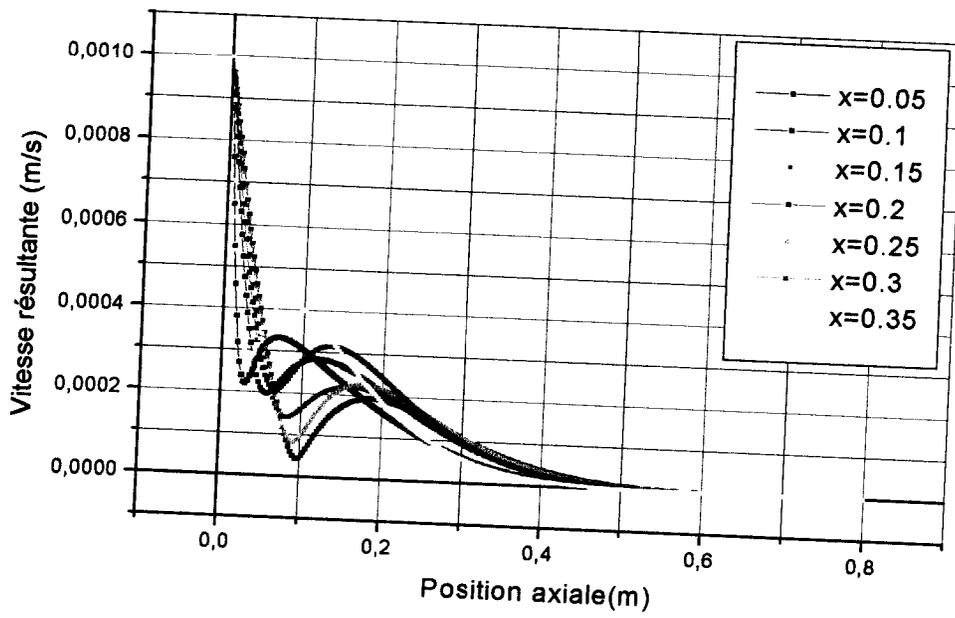


Figure 5.5- profil des vitesses résultantes pour différentes sections

5.2.3 Contour des températures pour différentes positions le long de la plaque:

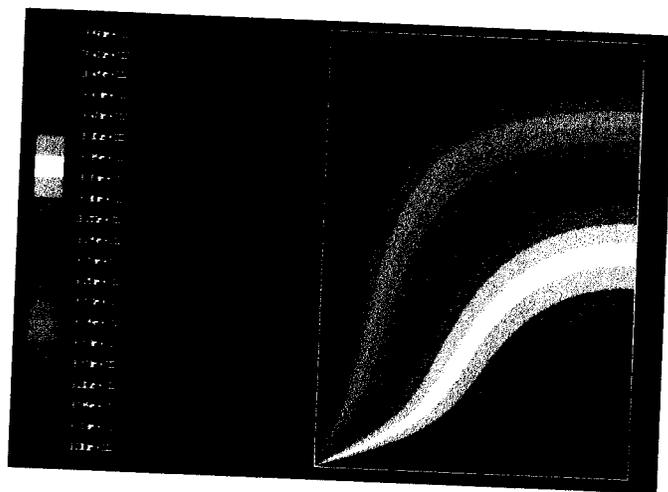


Figure 5. 6 - Contours de température

5.2.2 La distributions des vitesses pour différentes positions le long de la plaque :

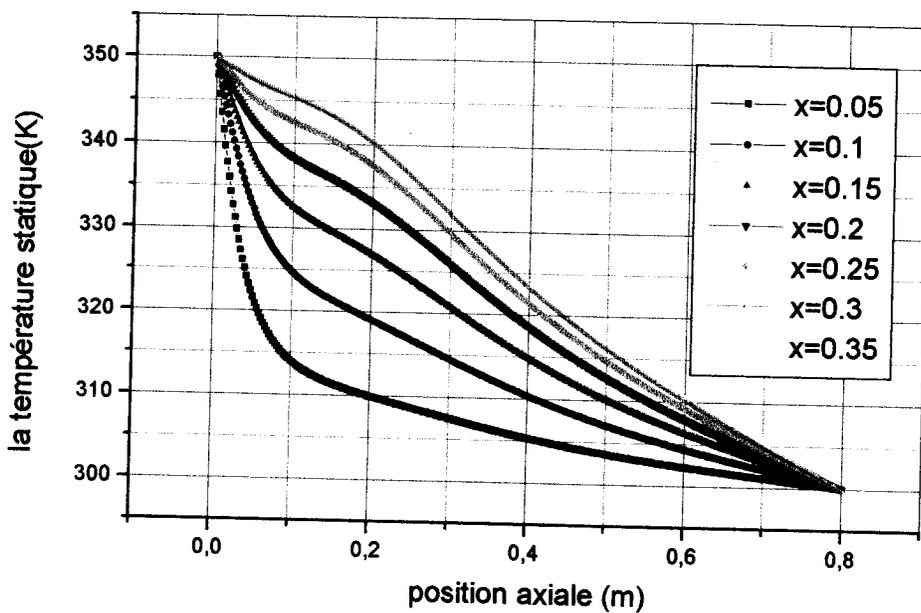


Figure 5.7- profil des températures statiques pour différentes sections

5.3. Interprétation des résultats :

Les résultats des simulations peuvent être classés en deux catégories:

1. Le comportement dynamique et thermique du PCM n'est pas complètement fondu (liée à une charge thermique élevée),
2. Le comportement Dynamique et thermique cycles au cours desquels le PCM est complètement fondu, puis complètement gelé.

Plusieurs facteurs entre dans l'étude de transfert de chaleur par changement de phase en régime instationnaire :

- ✓ La différence de température entre la paroi et le fluide.
- ✓ La vitesse du fluide.
- ✓ La capacité thermique massique du fluide.
- ✓ La surface d'échange.
- ✓ Les dimensions géométriques du problème.

Le refroidissement nécessaire lorsque le compresseur est arrêté. Dans ce cas, la température s'élève enfin au-dessus de la température maximale admise et le compresseur commence à fonctionner.

Si le refroidissement fourni par le PCM est suffisant lorsque le compresseur est arrêté, une basse température interne à l'intérieur de l'enceinte est maintenue pendant toute la période de fusion et le compresseur ne démarre pas jusqu'à ce que le PCM est fondu.

Lorsque le compresseur est activé, la température d'évaporation est reliée à nouveau à la température de changement de phase du PCM. Si

Conclusion générale

Ce travail de master présente une première étape dans la conception d'une amélioration d'un réfrigérateur (froid domestique) utilisant un matériau à changement de phase (MCP) pour le stockage du froid. Un modèle dynamique et thermique fondé sur les équations différentielles de conservation est utilisé pour prédire l'impact de l'énergie dû à l'ajout du MCP.

L'étude présentée dans ce mémoire porte sur l'étude du comportement dynamique et thermique d'un MCP (matériaux à changement de phase) à l'état liquide contenant dans une enceinte (cavité) parallélépipède de 0.4 m de largeur et 0.8 m de longueur d'une épaisseur de 1 cm. Cette enceinte est fixée entre un isolant et l'évaporateur d'un réfrigérateur domestique à fin de voir l'impact de l'ajout d'un MPC sur la réduction de la consommation de l'électricité par le compresseur et la réduction des fluctuations à l'arrêt et au démarrage du compresseur.

Notre travail est porté sur la simulation numérique de MCP en deux dimensions et en régime instationnaires. Les équations de conservation de masse, de quantité de mouvement et d'énergie ont été résolues numériquement par la méthode des volumes finis.

Des simulations numériques sont effectuées pour examiner l'effet thermique et dynamique du PCM sur l'efficacité énergétique du réfrigérateur de diverses conceptions et les conditions d'exploitation.

Les résultats de la simulation numérique ont été réalisés pour différentes sections dans la plaque du PCM thermiques, afin d'analyser le comportement dynamique (champs de vitesse axiales et radiales) et comportement thermique (champs de température).

Il a été démontré en outre les résultats de matériau à changement de phase assure un renforcement du transfert de chaleur de conduction de l'évaporateur vers le PCM dans le transfert de chaleur par convection naturelle à l'air.

Conclusion

Les Simulations ont montré également que la réponse du réfrigérateur à l'ajout de PCM et de son efficacité sont fortement dépendantes de la charge thermique. Ce modèle prédit une augmentation consistante de 15% dans le coefficient des performances.

Expérimentalement, il a été démontré que l'autonomie de l'appareil permettant une alimentation saine conservation sans gammes d'alimentation électrique entre 4 et 8 h, en fonction de la charge thermique, avec une seule épaisseur de 5 mm du PCM. Chose qui présente un point à développer au futur.



Nomenclature

Nomenclature

a	diffusivité thermique de PCM.
Cp	capacité calorifique massique ($J kg^{-1} K^{-1}$).
e	épaisseur (m).
h	l'enthalpie massique du fluide ($J kg^{-1}$).
m	la mass (kg).
\dot{m}	Le flux massique ($kg s^{-1}$).
N	la vitesse de rotation du moteur (rpm).
\dot{Q}	la charge thermique (W).
S	la position d'interface solid-liquid (m).
V	le volume (m^3).
x	la qualité de vapeur(-).
\bar{x}	la qualité moyen de vapeur (-).
COP	coefficient d'échange de performance.
K	coefficient d'échange globale ($w.m^{-2}.K$).
S	surface d'échange (m^2).
T	température (K).
t	temps (s).
L_f	chaleur latente de fusion du PCM, (Jkg^{-1}).
L	la longueur (m)
K	coefficient global de transmission de chaleur
r	apport de chaleur en volume
$\frac{\partial e}{\partial t}$	Taux de variation d'énergie interne par unité de volume
K	conductivité thermique
ρ_0 gy:	Pression hydrostatique

Symboles grecs

\bar{y}	Fraction moyen du vid (-).
η	La capacité (-).
λ	conductivité thermique, ($Wm^{-1}K^{-1}$).
ρ	masse volumique du fluide, ($kg m^{-3}$).
τ_{diff}	Le temps de diffusivité (s).
ϕ	densité du flux thermique, (Wm^{-2}).
η_v	est un rapport volumétrique estimée en fonction des pressions en amont et en aval.
μ	la viscosité.
θ	la température.
f	forces de volume qui se réduise en force de gravité.
Φ	le taux de dissipation volumique donné
β	Le coefficient d'expansion thermique.

Indices et exposants

a, α	diffusivité thermique.
P	pression du fluide, (bar).
c	condenseur.

Nomenclature

Ste	nombre de Stefan.
F _{ev}	frigorigène dans l'évaporateur.
K _{fc}	frigorigène dans le condenseur.
x	abscisse.
m _{rr}	masse du réfrigérateur.
a	air.
c	condenser, condensation.
co	condenser sortie.
c-out	compresseur sortie.
ci	condenseur entré.
cr	le réfrigérant dans évaporateur.
cw	condenseur paroi.
do	fermeture de porte.
e	évaporateur évaporation.
ei	évaporateur entré.
eo	évaporateur sortie.
er	évaporateur dans le réfrigérant.
ew	évaporateur au niveau du paroi.
ext	extérieur.
heat	échangeur.
is	isotropique.
l	liquide.
max	maximum.
pcm	matériau à changement de phase.
ref	réfrigérateur.
s	solide.
v	vapeur, volumétrique.

Références

Référence :

[1] *Phase Change Materials Science and Applications* Simone Raoux • Matthias Wuttig Editors

[2] le Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB) science direct 05/05/2011

[3] <http://www.cristopia.com/cristopia/francais/products/indproducts.html> 01/06/2011

[23]](Kouryetal., 2001).

[24] (Embraco, 2005).

[25] (Laguerre et al., 2002).

[26] Laguerreet al., 2007

[27] Zivi, 1964

[28] Kao et Kelly, 199

[29] Merlone et al. (2007).

Dictionnaire thermique arabe francais <http://www.larousse.fr/dictionnaires/francais-arabe/la%20temp%C3%A9rature> 6

[30] livre mécanique des fluides (traité des matériaux) Jean-François SINI

[31] thetis.enscbp.fr/sites/default/files/.../tutorial_gambit_pour_thetis.pdf

Résumé

Title:

Study thermal energy of a phase change material (MPC eutectique) used for cold storage

Abstract:

This study reports the results of a numerical investigation of laminar natural convection in a rectangular enclosure that contains an eutectic MPC decided between an insulator and the vaporator. Heat transfer occurs by exchange with the evaporator and air. This work is constituted of two parts, the theoretical part and the simulation part, in the first part we try to give general information on the phase change materials and their field of use. And we presented literature search on latent heat cold storage with MPC, it has a high density energy than other fluid, this allows us to store more energy in a small volume. In order to describe it to the temperature change at each point of the cell using we used fluent. Fluent is a software based on finite volume method, which allows solving the equations governing the flow (equation of mass conservation, equation of quantity motion, energy equation). Fluent is associated with Gambit, a better one that allowed us to define the geometry, meshing, and boundary conditions, the flow was laminar. We used origine to plotted curves making the flow velocity and a temperature change. everything was working standards in two dimensions, regime in the middle is unstationnair.

Azwe:

Tazrout thermoénergétique d MPC(eutectique) yesekhdam .

Agsul:

Nntey tazrawt numérique a trebga énergétique a MPC(eutectique) agbur deg anagbas rectangulaire ssenked asemmid tayult dayen yellam gar anaɛzul equd l'évaporateur an réfrigérateur Asmulti tazeyelt adyeqdec aqud asmesk nsen a evaporateur equd azwu .

Nntey amuzel zun n sin tazeddart .tazeddart théorique et tazeddart pratique. deg la première tazeddart nous avons ɛred n efk amata MPC equd nnsen tayult aseqdec.la deuxième tazeddart ssenked trecherche bibliographique yakenan asimmid tayult.

Ga uwttas amaqram n amuzel n ssenked et de simuler un amuzel teɥwa xdem deg tayult Ssenked chapitre qrte ɛiwen n fluent tadukli Gambit terssayes MVF.

Titre :

Etude thermo énergétique d'un matériau à changement de phase (MPC eutectique) utilisé à des fins de stockage de froid

Résumé : nous avons étudié numériquement le comportement énergétique d'un MPC eutectique contenu dans une enceinte rectangulaire qui présente un domaine qui existe entre un isolant et l'évaporateur d'une installation frigorifique. Le transfert de chaleur est réalisé par échange avec l'évaporateur et l'air. Notre travail se divise en deux parties une partie théorique et une partie simulation. Dans la première partie nous avons essayé de donner des généralités sur les matériaux à changement de phase et leurs domaines d'utilisations. Une recherche bibliographique concernant le stockage du froid par chaleur latente en utilisant les MPC eutectique été détaillée. Le MPC eutectique est un fluide semi newtonien, il possède une plus grande compacité que d'autres fluides utilisés dans ce domaine et il possède une grande densité énergétique, donc il permet de stocker plus d'énergie dans un petit volume. L'objectif de notre travail est de simuler à l'aide de fluent qui est un logiciel basé sur la méthode des volumes finis, qui permet la résolution des équations qui régissent les écoulements (équation de conservation de la masse, de quantité de mouvement et d'énergie). Fluent est associé à Gambit, un meilleur qui nous a permis de définir la géométrie, la mailler et déterminer les types des conditions aux limites. Nous avons tracé les dépendances qui présentent la vitesse d'écoulement et l'évolution de la température dans différentes sections choisis. Tout ce travail était en de deux dimensions, l'écoulement est considéré laminaire en régime instationnaire.

العنوان :

دراسة طاقوية حرارية لمادة متغيرة الطور , من نوعية سهلة الانصهار تستعمل لغرض التبريد.

الخلاصة:

نقوم في هذه الدراسة بدراسة عددية لتبادل حراري بين علبه مستطيلة الشكل تحتوي على مادة متغيرة الحالة ومبخر الثلجة وهذا لإظهار مدى أهمية إضافة هذه العلبه بين الحاجز والمبخر التغير الحراري بين هذه الجمل (علبه المادة المتغيرة والمبخر والهواء) يتم بواسطة التبادل الحراري نظرا لذيق الوقت اقتصرت دراستنا على إعطاء جملة من المعلومات حول الخصائص الحرارية الطاقوية لهذه المواد ومجال استعمالها ودراسة عددية ثنائية الأبعاد.

و يمكن تلخيص عملنا في جزأين الأول نظري حاولنا من خلاله إعطاء نظرة عامة على خصائص المواد المتغيرة ومجال استخدامها. وقمنا بعملية بحث حول أحدث ما توصل إليه الباحثين في ميدان التبريد باستخدام مادة متغيرة سهلة الانصهار وهي من الموائع الشبه النيوترونية ، و من خصائص هذه المواد أن لها كثافة طاقوية عالية، لذلك تسمح لنا بتخزين أكبر كمية من الطاقة في أصغر حجم ممكن، لدراسة طاقوية حرارية للمادة قمنا باستخدام برنامج يعتمد على طريقة الأحجام المحدودة، والتي تسمح بحل المعادلات التي تحكم تدفق (معادلة حفظ المادة، ومعادلة كمية الحركة، معادلة الطاقة) برنامج فلويت متعلق ببرنامج آخر يسمح لنا برسم الشكل الهندسي و تقسيمه إلى أجزاء صغيرة مع وضع الشروط المحدودة. و لرسم المنحنيات التي توضح لنا تغير درجة الحرارة في عدة نقاط من الخلية المدروسة وكذلك سرعة تدفق المائع. وهذا كله كان يجري في نظام متغير.