

UNIVERSITÉ DE SHERBROOKE  
Faculté des sciences appliquées  
Département de génie mécanique

ÉTUDE EXPÉRIMENTALE DE LA FUSION ET LA SOLIDIFICATION  
DE LA PARAFFINE N-OCTODÉCANE

Mémoire de maîtrise ès sciences appliquées  
Spécialité: génie mécanique

Pierre UZABAKILHO

Sherbrooke (Québec), CANADA

Été 1995

14 -930



National Library  
of Canada

Acquisitions and  
Bibliographic Services

395 Wellington Street  
Ottawa ON K1A 0N4  
Canada

Bibliothèque nationale  
du Canada

Acquisitions et  
services bibliographiques

395, rue Wellington  
Ottawa ON K1A 0N4  
Canada

*Your file Votre référence*

*Our file Notre référence*

The author has granted a non-exclusive licence allowing the National Library of Canada to reproduce, loan, distribute or sell copies of this thesis in microform, paper or electronic formats.

The author retains ownership of the copyright in this thesis. Neither the thesis nor substantial extracts from it may be printed or otherwise reproduced without the author's permission.

L'auteur a accordé une licence non exclusive permettant à la Bibliothèque nationale du Canada de reproduire, prêter, distribuer ou vendre des copies de cette thèse sous la forme de microfiche/film, de reproduction sur papier ou sur format électronique.

L'auteur conserve la propriété du droit d'auteur qui protège cette thèse. Ni la thèse ni des extraits substantiels de celle-ci ne doivent être imprimés ou autrement reproduits sans son autorisation.

0-612-21839-2

## RÉSUMÉ

Dans ce travail, nous étudions le stockage de l'énergie par chaleur latente. Pour ces expériences, nous utilisons des matériaux à changement de phase à haute densité thermique au point de fusion. Nous parlons d'abord de la conception de l'élément de stockage et des raisons du choix des différentes dimensions de l'appareil.

Nous nous servons du n-octadécane comme matériau à changement de phase. Dans les expériences faites en laboratoire, on s'est intéressé au comportement de cette paraffine sous diverses températures. Les expériences sont d'abord faites avec une plaque sans ailette. Puis la plaque a été équipée d'une ailette et de cinq ailettes.

Pour chaque expérience, nous faisons l'analyse du phénomène de la fusion et de la solidification, et nous évaluons la fraction liquide. Nous faisons aussi une comparaison des différentes températures. Après l'étude des cas de la plaque sans ailette, nous faisons le même travail pour la plaque équipée d'ailettes, et nous comparons les deux cas par la suite, pour vérifier lequel donne une meilleure rentabilité.

## REMERCIEMENTS

Je voudrais exprimer mes reconnaissances aux personnes dont la contribution a été nécessaire à l'accomplissement de mes études.

Je remercie sincèrement d'abord mon directeur de recherche, Dr Marcel Lacroix, pour son soutien non seulement académique, mais aussi pour ses divers conseils et encouragements dans les différents moments que j'ai traversés au cours de mes études.

Je remercie aussi le programme de la francophonie qui m'a octroyé cette bourse d'étude, et la direction de la coopération au ministère de l'éducation, en particulière Madame Micheline Roberge et le Directeur Jean-Paul Broudehaux.

Je remercie également les professeurs André Laneville et Yves Mercadier pour les différentes améliorations qu'ils ont apportés sur la conception pour une meilleure qualité des résultats.

Ma reconnaissance s'adresse aussi aux étudiants du groupe qui m'ont initié au travail et à l'utilisation de l'équipement, surtout Jocelyn Millette sur la résolution de certains problèmes de conception.

Mes particuliers remerciements s'adressent à Abdelkader Hamid, avec qui nous avons réalisé toutes les expériences, sans qui l'accomplissement du travail aurait été fait non sans beaucoup de difficultés.

Mes remerciements s'adressent aussi aux techniciens qui n'ont ménagé aucun effort avec compétence à l'accomplissement du montage expérimental et des travaux de laboratoire.

En fin, je remercie mes parents, frères et soeurs de leur confiance et encouragements qu'ils n'ont cessés de témoigner en vers moi. Malgré la situation difficile qu'ils endurent.

## TABLE DES MATIÈRES

1	INTRODUCTION.....	1
1.1	Problématique .....	1
1.2	Aperçu sur certaines réalisations .....	3
1.3	Objectifs .....	11
2.	MONTAGE EXPÉRIMENTAL .....	12
2.1	L'élément de stockage .....	12
2.2	Le système de mesure des températures et d'acquisition des données .....	14
2.3	Montage générale .....	17
2.4	Matériaux et propriétés du MCP .....	18
2.5	Le fluide caloporteur .....	20
2.6	Déroulement d'une expérience typique .....	22
2.6.1	Préparation du banc à l'expérience .....	22
2.6.2	Déroulement de la fusion .....	22
2.6.3	Déroulement de la solidification .....	24
3.	LES EXPÉRIENCES RÉALISÉES ET LES RÉSULTATS .....	25
3.1	Les expériences réalisées avec la plaque sans ailette .....	25
3.1.1	Le phénomène de fusion pour 40, 50, et 60 degrés centigrades .....	25
3.1.2	Le phénomène de solidification .....	41
3.1.3	Autres expériences .....	47
3.2	Les expériences réalisées avec une plaque à ailettes .....	49
3.2.1	Le phénomène de fusion .....	50
3.2.2	Le phénomène de solidification .....	56
4.	CONCLUSION .....	60
	ANNEXE: LISTE DES SYMBOLES .....	64
	BIBLIOGRAPHIE .....	66

## LISTE DES FIGURES

Figure 2.1	L'élément de stockage .....	14
Figure 2.2	Schéma de la position des thermocouples .....	17
Figure 2.3	Le montage général .....	19
Figure 3.1	L'évolution de la température de la plaque .....	26
Figure 3.2	Images de l'évolution de la fusion sans ailette .....	31
Figure 3.3	Les profils des trois températures de la paraffine .....	32
Figure 3.4	L'évolution de la température de la paraffine (fond de la cavité) .....	34
Figure 3.5	L'évolution de la température de la paraffine (partie supérieure de la cavité) .....	36
Figure 3.6	La fraction liquide pour les différentes températures .....	40
Figure 3.7	Images de l'évolution de la solidification .....	43
Figure 3.8	Les profils de températures pour la solidification .....	45
Figure 3.9	Images de la présence de poche de paraffine liquide .....	49
Figure 3.10	Images de l'évolution avec ailette .....	52
Figure 3.12	Les profils de températures pour les ailettes .....	53
Figure 3.12	Fraction liquide pour la plaque sans ailette, avec une ailette et cinq ailettes .....	56
Figure 3.13	Images de la solidification avec cinq ailettes .....	57
Figure 3.14	Les profils de températures pour la solidification avec les ailettes .....	58

## LISTE DES TABLEAUX

TABLEAU 2.1	PROPRIÉTÉS DE L'ALUMINIUM .....	20
TABLEAU 2.2	PROPRIÉTÉS THERMOPHYSIQUES DE L'OCTADÉCANE .....	21
TABLEAU 3.1	GRASHOFF ET RAYLEIGH EN FONCTION DE LA TEMPÉRATURE ....	28
TABLEAU 3.2	TEMPÉRATURES DE LA PLAQUE ET LES INCERTUDES RESPECTIVES .....	37
TABLBAU 3.3	LA DURÉE DU CYCLE EN FONCTION DE LA TEMPÉRATURE .....	59

# I INTRODUCTION

## 1.1 Problématique

Les besoins croissants en énergie et le coût grandissant de celle-ci font que les recherches sur l'économie énergétique ainsi que sur les énergies nouvelles et renouvelables sont d'actualité. Certaines recherches s'orientent vers les moyens d'économiser cette énergie en utilisant des moyens moins coûteux et facilement accessibles.

Dans les régions froides, le chauffage consomme une grande quantité d'énergie, ce qui oblige les distributeurs à augmenter leurs productions qui s'accompagnent en général du coût élevé. Dans les régions chaudes, le soleil est quasiment disponible à longueur de journée et d'année. Le stockage de cette énergie destinée à une utilisation ultérieure dans les divers métiers domestiques permettrait d'alléger le coût de la facture d'électricité ou d'autres sources d'énergies. Le problème qui se pose est surtout de satisfaire la demande, surtout dans les cas où la demande d'énergie atteint des sommets, lesquels les producteurs ont de la difficulté à satisfaire. Il serait utile d'aplanir les sommets par la distribution de la charge des systèmes de production d'énergie, pendant les heures de faible demande, en appliquant le stockage de l'énergie. Ainsi, on rentabiliserait et uniformiserait le travail des appareils de productions de l'énergie à longueur de journée.

Actuellement, les recherches sont faites dans l'optimisation des systèmes énergétiques, puis intervient le facteur d'énergie non polluante. L'un des moyens



d'économiser l'énergie est le stockage. Les systèmes de stockage de l'énergie par chaleur latente, dans lesquels on utilise des matériaux à changement de phase (MCP), ont reçu, ces dernières années, une attention particulière.

La raison majeure de l'utilisation de ces systèmes correspond à la grande capacité énergétique dont disposent certains MCP pendant la fusion ou la solidification, comparativement aux systèmes à chaleur sensible. Le stockage par chaleur sensible exige de grands écarts de température, puisque la chaleur spécifique n'est pas généralement grande pour les matériaux. Cela consomme de grandes quantités d'énergie pour faire monter ces écarts de température. La clé du problème est de trouver le meilleur moyen de stocker ces énergies, afin de les utiliser quand la demande devient très grande.

L'avantage de certains MCP, qui est la grande capacité thermique pendant le changement de phase, fait que le stockage de l'énergie par chaleur latente est plus économique. Et il permet le stockage et la restitution de l'énergie à une température constante.

Les nouvelles techniques de stockage et d'utilisation sont nécessaires pour la récupération des différentes énergies alternatives (solaire, les pertes d'énergie dans les industries et d'autres).

En effet, le moyen qu'on propose est l'utilisation des matériaux à changement de phase. Pour les matériaux à changement de phase, plusieurs critères s'imposent pour faire le choix. Différents types de MCP ont été explorés pour le stockage de l'énergie, dont les hydrites, les sels et leurs mélanges, les acides, les paraffines et les

non-paraffines. Le choix du MCP est guidé par la gamme de température à laquelle l'application est destinée et par l'endroit de son utilisation.

Le présent travail porte sur la construction d'un modèle expérimental relié à l'étude des phénomènes se déroulant dans la fusion et la solidification de la paraffine. Ici, on se propose de fondre du N-octadécane et de suivre le processus de fusion, son comportement et son taux de fusion. On verra le phénomène de changement de phase. À la fin de la fusion, nous poursuivrons le parcours inverse en faisant la solidification. Les résultats obtenus serviront plus tard de base de données à valider des modèles numériques.

Si le stockage de l'énergie solaire par chaleur latente dans les régions chaudes est le cas qui intéresse par son abondance, ici on ne parlera pas du système ou des moyens de captage de l'énergie solaire. On ne traitera que du stockage par chaleur latente.

## **1.2 Aperçu sur certaines réalisations**

Au cours des dernières années, le souci d'économie d'énergie a été l'une des préoccupations dans la recherche sur l'énergie. Différents travaux de recherche ont été faits. Certaines études ont porté sur les différentes formes de l'élément de stockage, c'est-à-dire le contenant de la paraffine. La forme la plus utilisée est de géométrie rectangulaire. Il y a aussi la forme annulaire des appareils qui a été utilisée, comme dans le cas des tuyaux. La position qu'occupe l'échangeur dans l'élément de

stockage a été étudiée : il s'agissait d'une plaque verticale, horizontale ou oblique. Dans le cas présent, on utilisera la géométrie rectangulaire, avec la plaque verticale.

Pour la fusion complète de toute la paraffine se trouvant dans la cavité, les dimensions de cette dernière, surtout la hauteur de l'élément de stockage, ont une grande influence sur le taux de fusion. Pour cela diverses études ont été réalisées sur différents modèles et dimensions par *Hongjung Li* et ses collègues, et cela au nombre de Rayleigh faible (ordre de  $10^3$ ) [11]. Les dimensions ont une grande influence sur le caractère des écoulements qui se déroulent dans la cavité pendant la fusion. Le rapport entre les dimensions de la cavité a des effets sur l'écoulement, qui sont soit bidimensionnels ou tridimensionnels, selon que le rapport est grand ou petit [8]. C'est sur ce principe qu'on se base dans ce cas-ci pour la définition des grandeurs de l'enceinte.

Plusieurs travaux ont été faits dans un élément de stockage de géométrie rectangulaire, avec une plaque plane, verticale. Les études expérimentales faites ont été menées avec les différents nombres de Rayleigh. Dans la plupart des cas, le nombre de Rayleigh utilisé était inférieure à  $10^8$ . L'analyse numérique a été accomplie pour faire la comparaison avec les expériences faites. *Bénard* [2] a effectué les mêmes travaux, mais avec nombre de Rayleigh de  $10^9$ , ce qui est similaire à cette étude faite dans ce rapport, pour le nombre de Rayleigh élevé. On a regardé les phénomènes de conduction et de convection pendant la fusion dans un plan à deux dimensions.

L'échange de chaleur, entre l'élément chauffant et le MCP, peut se faire en utilisant différents caloporteurs. Les caloporteurs liquides possèdent en général une grande chaleur spécifique comparativement aux caloporteurs gazeux. Le travail sur les caloporteurs liquides a été fait avec plusieurs modèles d'éléments de stockage. *Marshall* [20] a cherché un modèle optimal à utiliser dans un collecteur solaire, selon le nombre d'échangeurs à utiliser dans le modèle et la distance entre ceux-ci. Puis, il a été démontré que l'eau pure est le meilleur caloporteur à cause de sa chaleur spécifique plus élevée. Il a aussi regardé la distribution spatiale des températures dans l'enceinte. Dans le cas qu'on étudie ici, l'eau sera utilisée comme caloporteur. Les différents types de chauffages ont été étudiés selon le caloporteur employé. Le régime d'écoulement du caloporteur a été, dans certaines situations, l'objet de recherches, et ce, pour voir son effet sur le taux de fusion ou de solidification.

En voulant améliorer la fusion ou l'extraction de la chaleur du MCP, on a introduit des ailettes dans la conception des appareils déjà utilisés. Dans cette étude, on va utiliser les ailettes pour la comparaison des différentes expériences qu'on va faire. La position, l'orientation, les dimensions et la forme des ailettes ont fait objet de recherches, afin de voir leur impact sur la fusion. La configuration des ailettes sur la paroi d'un tube échangeur de la chaleur a été l'objet d'étude dans le stockage de l'énergie. Avec les divers arrangements des ailettes sur la paroi du tuyau contenant le MCP, on trouve que la conduction prédomine au début de la fusion autour des ailettes et que les effets de la convection naturelle autour des ailettes deviennent forts à un nombre de Grashoff très élevé ( $10^5$ ). *Kengo Sasaguchi* a cherché l'arrangement d'ailette, qui donnait de meilleures performances de l'appareil[15]. De plus, on trouve

l'utilisation des ailettes dans les différentes formes (rectangulaires ou annulaires) d'éléments utilisés comme contenant de la paraffine. D'autres travaux visaient à observer la performance de l'échange de la chaleur. Avec différents matériaux, on a utilisé des ailettes.

Quant aux matériaux à changement de phase, les études ont été faites sur leurs propriétés. Le choix du MCP à utiliser peut reposer aussi sur la température qu'on impose à la plaque suivant le type d'application. Il en résulte un taux de fusion ou de solidification proportionnel à la température. Ici, encore, on a démontré que plus le front de fusion s'éloigne de la plaque, plus le flux de chaleur par convection naturelle devenait fort. Par contre, le flux de chaleur provenant de la conduction devient faible [16]. On va utiliser trois gammes de température, pour voir l'impact de la température sur le taux de fusion.

Dans ce cas-ci, le stockage s'effectuera dans des conditions où la température est proche des conditions normales (28 degrés centigrades), mais il y a des recherches sur plusieurs applications similaires qui intéressent l'activité économique. À de hautes températures, lors de l'utilisation des matériaux à changement de phase, on a envisagé les applications qui seraient utilisées dans le nucléaire, la métallurgie, l'énergie solaire ou autres. *Pantoloni* [22] et ses collègues ont envisagé divers schémas de la circulation du caloporteur dans la conception d'éléments permettant un meilleur échange de la chaleur dans l'exploitation. On a aussi considéré plusieurs types de MCP suivant les gammes de température de stockage. Ici, les sels comme le

chlorure de sodium (ClNa) et le Hitec (un mélange) ont fait l'objet d'études. Dans ces dernières, on a observé les phénomènes de transfert de la chaleur.

Ici, la circulation du caloporteur ne fait pas objet d'études. On considère le réservoir d'eau chaude comme élément principal. Le stockage à de basses températures s'avère bénéfique dans la climatisation des bâtiments pendant les périodes chaudes. Ici, *Wubben* [6] et al. ont travaillé sur le stockage de la glace pendant la nuit, où la consommation de l'énergie électrique est faible. Cette glace serait utilisée ultérieurement. Les études ont porté sur la formation de la glace selon les différents régimes d'écoulement de l'agent refroidissant. Ils ont trouvé que le régime de l'écoulement du caloporteur n'influence pas beaucoup la formation de la glace. Les travaux ont aussi regardé l'influence de la quantité du caloporteur sur la formation de la glace. Les effets de la longueur d'une ailette sur la paroi de l'échangeur ont, en outre, été examinés. Ici, l'effet escompté est comparable à certaines mesures de la présente étude.

On s'est intéressé aux matériaux utilisés selon la gamme de température de stockage mais aussi à l'état physique des matériaux : il y a des matériaux métalliques ou non organiques utilisés dans les stockages à haute température (500-1100 degrés), par exemple dans la récupération de l'énergie en métallurgie. Tomohiro a fait des études avec une capsule sphérique [26]. On utilise des matériaux organiques à des températures moyennes, comme dans les travaux domestiques. Il y a aussi le stockage à basse température qui a été effectué pour tempérer les maisons des zones chaudes, par

exemple par stockage de glace. La plage de température pour l'instant utilisée se limite entre 11 et 60 degrés centigrades.

Les effets optiques et le rayonnement ont été l'objet de travail en ce qui concerne les MCP transparents. On a considéré plusieurs types d'épaisseurs des contenants de MCP pour optimiser l'élément. *Makoto* [19] a étudié le stockage de l'énergie solaire en estimant l'effet du rayonnement sur la fusion à l'intérieur de l'élément de stockage. La paraffine qu'on utilise ici est transparente à l'état liquide, ce qui permettra de faire la visualisation. Puis, on travaille à des températures relativement faibles pour pouvoir estimer les effets du rayonnement dans ce cas, sont négligeable.

On caractérise les MCP selon plusieurs critères :

- La température de stockage : les matériaux de stockage à basse, moyenne ou haute température selon les besoins, le milieu et le type de caloporteur utilisé;
- Les propriétés thermophysiques du matériau : métallique, organique, non organique, etc;
- L'application pour laquelle le MCP est destiné.

L'autre problème qui peut se poser est que certains MCP peuvent être nocifs.

La complexité de changement de phase cyclique (fusion-solidification) est que les MCP perdent leurs propriétés thermophysiques après de nombreuses répétitions du cycle. Cette dégradation des propriétés peut se manifester par une variation du

point de fusion. En ce qui a trait aux MCP faits de plusieurs composants (comme les sels et autres), il peut s'opérer une séparation des différents constituants, ce qui empêche une reprise adéquate du cycle. Autrement, il faut refaire le mélange. D'autres MCP exigent des additifs afin de maintenir leur qualité. Dans ce cas-ci, l'utilisation d'une substance pure permet d'éviter ces inconvénients, et le nombre de cycles qu'on se propose d'effectuer est limité, pour qu'il n'y ait pas de détérioration des propriétés.

*Marks* [25] a particulièrement suivi le phénomène de solidification des sels dans le but de définir les propriétés thermophysiques des matériaux qui peuvent influencer sur le choix et la conception du contenant. La différence dans ce cas est que le MCP choisi présente une homogénéité dans sa composition. *Marks* a fait les analyses sur les dimensions des cristaux des sels utilisés. Les petits cristaux de sel offrent une meilleure fusion, puisqu'il y a un plus grand contact de la surface des cristaux avec le liquide déjà formé pendant la fusion. Après quelques cycles seulement, certains MCP peuvent perdre jusqu'à 75% de leur capacité de stockage selon le type d'additif utilisé, d'où la nécessité de faire un choix approprié du sel et de contrôler régulièrement le mélange.

La variation de la position du contenant du MCP (position verticale ou horizontale) a été aussi étudiée pour voir l'impact sur le cycle de fusion et sur la solidification [9].



La formation d'une couche solide de MCP sur les murs de déstockage est un phénomène intéressant à étudier. Il complique le déstockage des MCP à mauvaise conductivité.

Le phénomène de solidification a été étudiée par *Myrum* [21] et ses collègues dans le but de voir les effets néfastes du gel sur les infrastructures. Ce qui est intéressant pour le moment (l'utilisation de la paraffine dans ce cas comme dans celui étudié actuellement) peut permettre de faire une comparaison du comportement de la paraffine lors de la solidification. Ils ont solidifié la paraffine dans une conduite à divers régimes de l'écoulement du caloporteur. Ceci a été fait pour différents rapports longueur/diamètre du tuyau, afin de voir comment se forme la couche de paraffine solide le long du tube. Ces travaux ont été comparés à la formation de la glace dans les tuyaux pendant le gel. Ainsi, on a mieux compris les effets du gel qui entraînent des conséquences fâcheuses dans les canalisations.

Le régime de l'écoulement du caloporteur influence beaucoup le cycle de fusion et de solidification. Le schéma de circulation qu'on se propose, le caloporteur est sensé être stagnant l'échange de chaleur s'opère par convection naturelle.

Dans notre cas, on a continué dans le même sens vu que peu d'expériences ont été réalisées dans ce domaine. Les expériences qu'on se propose de faire sont basées sur la variation de la température du caloporteur et sur l'utilisation des ailettes.

### 1.3 Objectifs

L'objectif principal poursuivi est d'observer en laboratoire le comportement de la fusion et la solidification de la paraffine dans un élément de stockage ainsi que l'impact de ces phénomènes sur un élément de stockage et son exploitation. Il s'agira alors d'y apporter ultérieurement des améliorations. L'enceinte rectangulaire utilisée est munie d'une paroi amovible. La présence d'ailettes fixées à la paroi amovible a été aussi étudiée.

Dans le présent rapport sur le stockage de l'énergie par chaleur latente, on va approfondir les connaissances des phénomènes de changement de phase solide-liquide. Et l'on verra les problèmes qu'entraîne l'utilisation de la paraffine. Les résultats obtenus serviront à améliorer la conception et l'exploitation du système de stockage de l'énergie par chaleur latente ainsi que comme base de données pour la validation de codes d'un modèle numérique.

Dans le deuxième chapitre de ce travail, on décrit le montage expérimental et la marche à suivre dans une expérience. Dans le troisième chapitre, sont discutés les résultats obtenus. Plusieurs expériences en laboratoire ont été réalisées pour divers scénarios de fusion et de solidification de la paraffine. Pour accroître le taux de transfert de chaleur, la plaque qui échange la chaleur entre le liquide caloporteur et la paraffine a été équipée d'ailettes.

## II MONTAGE EXPÉRIMENTAL

### 2.1 L'élément de stockage.

Présenté sur la figure 2.1, l'élément de stockage est fait de plexiglas. L'épaisseur du plexiglas est de 0.8 cm. L'enceinte a une hauteur de 20 cm, une largeur de 25.4 cm et une profondeur de 70 cm.

Le volume total de l'enceinte est subdivisé en quatre cavités :

a) Une cavité contenant de la paraffine, dont les dimensions sont de  $y = 60$  cm de profondeur, de  $x = 4$  cm de largeur et de  $H = 20$  cm de hauteur : le rapport profondeur/largeur égale 15. Ce rapport a été pris pour minimiser les effets de la tridimensionnalité qui apparaissent dans les phénomènes d'écoulement lors de la fusion. Le choix des dimensions de la cavité est basé sur le rapport entre celles-ci. D'après *Mallison et de Vahl Davis* [8], les écoulements qui se déroulent dans la cavité lors de la fusion, peuvent avoir un caractère bidimensionnel ou tridimensionnel. On a pris un rapport très grand dans ce cas-ci pour que l'écoulement soit bidimensionnel et qu'il soit le plus près possible de la plaque. Les effets de bord seront certainement très faibles.

b) Une cavité contenant de l'eau, qui a la même profondeur et la même hauteur que la paraffine, mais de 21.4 cm de largeur. Une entrée d'eau par le haut et une sortie par le bas sont perforées sur l'élément, aux coins diamétralement opposés. On a voulu tirer avantage de la pression hydrostatique pour évacuer l'eau, en prenant la sortie au bas, puisque la partie supérieure de la plaque n'est pas rigoureusement étanche pour permettre l'évacuation par la pression de la pompe. Avec la pompe, on aurait provoqué des fuites d'eau vers la paraffine. Mais l'introduction de l'eau

chaude dans le réservoir par la partie inférieure aurait favorisé une circulation par gravitation à la suite d'une petite variation de la densité de l'eau. Si le schéma de circulation avait respecté cette dernière variante, on aurait diminué les effets de la stratification. La stratification est considérée négligeable.

Ces deux cavités que l'on vient de décrire sont séparées par la plaque en aluminium. L'épaisseur de la plaque est de 2 mm pour les expériences sans ailette. Elle est d'une épaisseur de 7 mm pour les expériences avec des ailettes. Des plaques aux épaisseurs différentes ont été choisies pour des commodités de fabrication. En effet, la fixation d'une ailette sur une plaque de 2 mm d'épaisseur abîme cette dernière. Si on fixe l'ailette par soudure, ce montage peut détériorer les dimensions ou les propriétés du métal.

La longueur de l'ailette est de 2 cm. C'est la moitié de la largeur de la cavité, ce qui correspond à l'épaisseur de la paraffine dans l'enceinte. L'épaisseur de l'ailette est de 1 mm et elle est en aluminium.

Dans l'utilisation des ailettes, une seule a été d'abord fixée à la partie inférieure de la cavité, à 2.5 cm du fond, afin d'accélérer la fusion, qui est faible dans cette zone. Puis, cinq ailettes ont été réparties entre cinq rangées de thermocouples. L'ailette est fixée le long de la profondeur de la plaque, d'une extrémité à l'autre.

c) Deux cavités sont situées aux extrémités de l'enceinte. Elles ont la même hauteur et la même largeur que l'élément de stockage, et elles ont chacune une profondeur de 3.8 cm. L'air étant un mauvais conducteur, elles en restent remplies et servent d'isolant dans la zone de la visualisation.

L'élément de stockage est couvert de polystyrène de 2.5 cm d'épaisseur, ce qui constitue l'isolation. Le tout est enveloppé d'aluminium.

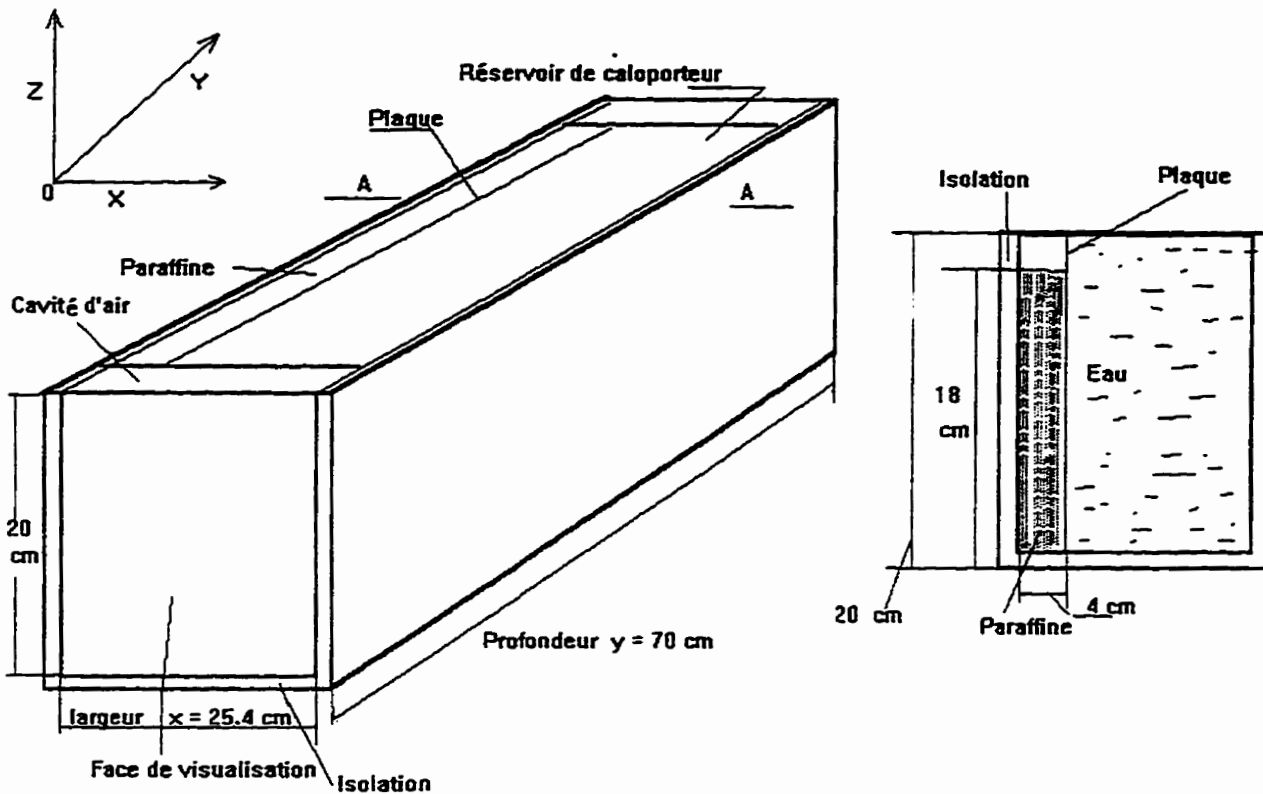


Figure 2.1 L'élément de stockage

## 2.2 Le système de mesure des températures et d'acquisition des données

Les éléments principaux du système de mesure sont :

a) un multiplexeur équipé de deux cartes d'acquisition de données de type DASH-8.

Chaque carte a 32 sorties de thermocouples, et les deux cartes sont montées en parallèle.

b) un micro-ordinateur équipé d'un logiciel *Labtech* d'acquisition de données. Le logiciel a la capacité d'enregistrer 52 thermocouples (valeurs) à la fois.

c) des thermocouples numérotés de 1 à 45 dans la paraffine et des thermocouples qui indiquent les conditions aux frontières.

Pour mesurer les températures, on a utilisé des thermocouples en cuivre-constantin. Ces thermocouples de type T-5747 ont une incertitude de  $\pm 1$  degré ( soit 0.75%). Ils travaillent sous des températures variant entre 0 et 328 degrés Celsius.

Avant l'installation, les thermocouples ont été étalonnés dans un bassin thermostaté de glycol, à l'aide d'un thermomètre à mercure gradué à 0.1 degré de précision. La température lue sur le thermomètre est comparée à celle du thermocouple affiché à l'écran du micro-ordinateur. On a estimé l'incertitude des températures obtenues pendant l'installation de thermocouples. Les résultats ont montré que l'erreur est conforme aux normes du manufacturier.

Les 45 thermocouples sont montés sur une matrice de cinq rangées sur neuf colonnes. Ces thermocouples sont immergés dans la paraffine. Sur la carte d'acquisition, les thermocouples sont montés en parallèle. La figure 2.2 montre la distribution des rangées de thermocouples dans la cavité contenant de la paraffine. Ces rangées sont disposées de façon à être entre deux ailettes successives si la plaque en est équipée.

Sur cette matrice, les thermocouples de chaque rangée sont séparés les uns des autres par un intervalle de 0.5 cm. Afin de minimiser l'erreur de position des thermocouples, un support a été conçu dans une plaque de plexiglas perforée pour les positions des thermocouples. Ce support, placé dans le milieu de l'enceinte de la paraffine, respecte les distances entre les thermocouples et les rangées. La distance entre deux rangées est de 3.5 cm, cette mesure étant prise à partir de la partie supérieure. La rangée inférieure est située à 2.5 cm du fond du banc d'essai, car, comme on le disait plus haut, la vitesse de fusion y est plus faible.

Sur ce support des thermocouples, des grandes fenêtres sont tracées entre les rangées pour permettre un meilleur échange de température dans toute la paraffine. Le support est fait de plexiglas, assurant une meilleure visualisation. Lors de l'utilisation des ailettes, quelques thermocouples supplémentaires ont été installés à l'extrémité de celles-ci ainsi qu'à la jonction de l'ailette fixée à la plaque. Ceci a permis de vérifier l'effet de l'ailette sur la transmission de la chaleur. Un thermocouple a aussi été installé au-dessus de la surface libre de la paraffine pour déterminer les conditions aux frontières.

On a également des thermocouples mesurant les températures à l'entrée et à la sortie de l'eau et trois thermocouples pour les prises de température sur la plaque du côté de l'eau chauffante. Les premiers permettent de contrôler les chutes de température et de comparer la température de la plaque face à l'eau. Les trois autres permettent de surveiller la température à laquelle on soumet la plaque.

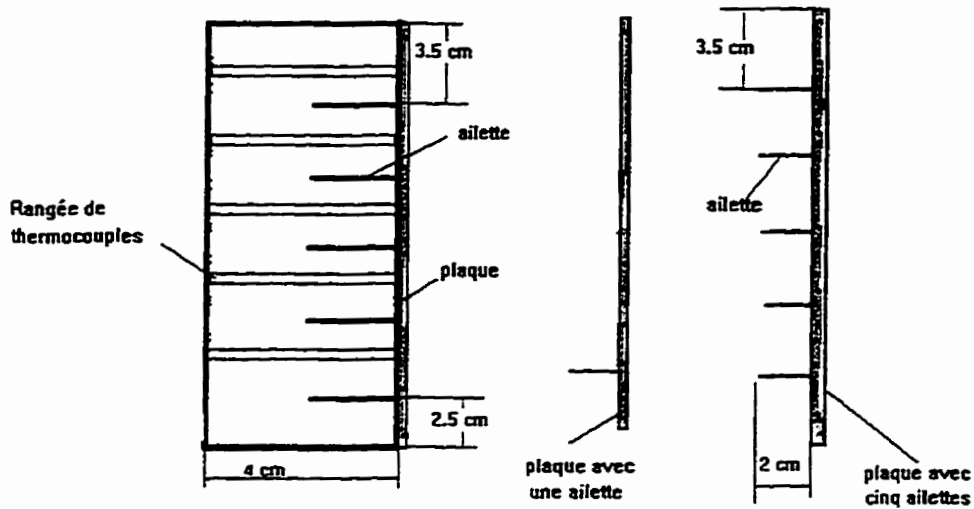


Figure 2.2 Schéma de la position des thermocouples

### 2.3 Montage général

Le montage général, comme illustré sur la figure 2.3, est fait de : 1) un élément de stockage ayant les dimensions déjà données; 2) un multiplexeur avec deux cartes d'acquisition; 3) 52 thermocouples qui relient l'élément de stockage au multiplexeur; 4) un micro-ordinateur équipé d'un logiciel d'acquisition des données; 5) un appareil muni d'un système de chauffage et équipé de résistances pour chauffer l'eau. Mais, étant donné l'impossibilité de dépasser 45 degrés Centigrades, l'introduction d'une autre résistance a été nécessaire pour atteindre des températures plus élevées.



Cet appareil comporte aussi un système de refroidissement. L'appareil permet de faire un bain à température constante et peut contenir huit litres de liquide. Le système de refroidissement peut amener la température à 60 degrés Celsius sous zéro. L'appareil a une pompe et un système de régulation de débit. La régulation peut se faire manuellement ou grâce à un système automatique. Dans ce cas, la régulation était manuelle. Le système d'éclairage et la caméra vidéo ont été utilisés pour la prise d'image. Finalement, deux petits tuyaux en plastique relient l'élément de stockage à l'appareil chauffant.

#### **2.4 Matériaux et propriétés du MCP**

On a utilisé du plexiglas pour fabriquer le banc d'expériences, et ce, pour deux raisons principales : d'une part, ce matériau permet la visualisation des phénomènes et, d'autre part, il est un mauvais conducteur (la conductivité  $k= 0.195 \text{ W/m.K}$ ) [6]. Il contribue aussi à l'isolation. La malléabilité du plexiglas est aussi un facteur considéré. Le problème de son utilisation est qu'une présence plus ou moins prolongée dans l'eau lui fait perdre ses propriétés. Il se déforme et les fuites deviennent intenses lors du chauffage. Cela complique la visualisation avec une présence de vapeur sur les parois du plexiglas et augmente les risques de mélange de l'eau avec la paraffine. De plus, le plexiglas ne peut pas supporter des températures élevées.

Pour la plaque utilisée, on se sert de l'aluminium à cause de la grande conductivité de ce métal et parce qu'il ne rouille pas facilement au contact de l'eau.

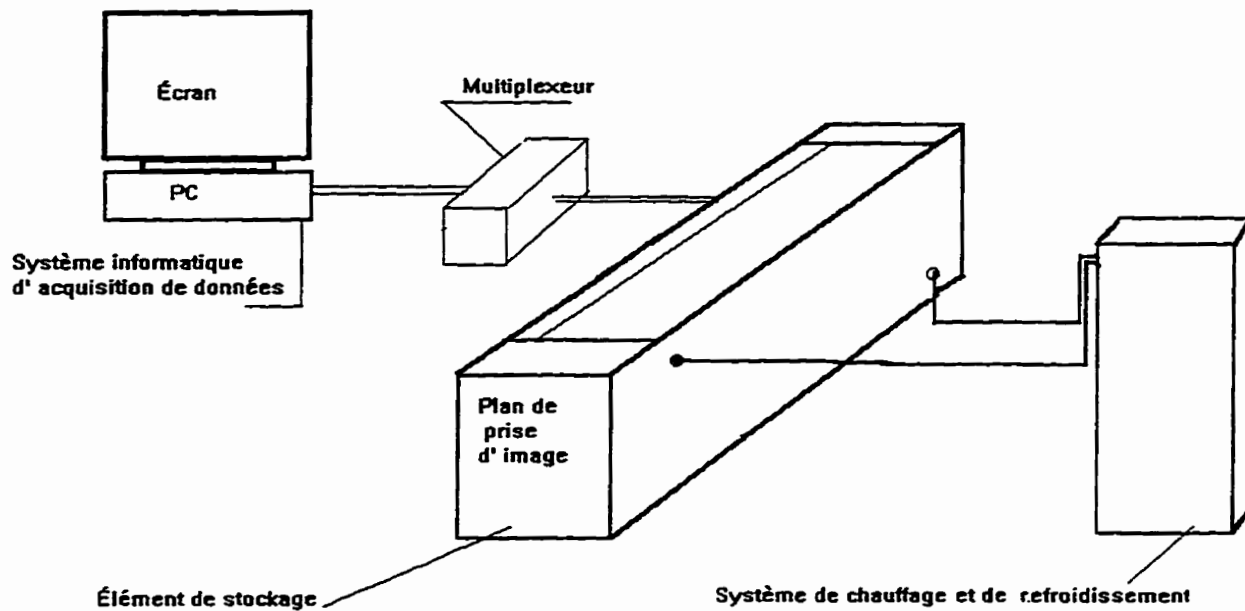


Figure 2.3 Le montage général

Au départ, on a appliqué sur la plaque une peinture noire pour éviter les effets de réflexion de la lumière lors de la visualisation. Quelques propriétés thermiques de l'aluminium sont présentées au tableau 2.1.

L'enceinte est couverte de polystyrène d'une conductivité  $k=0.023 \text{ W/m.K}$  [6].

La paraffine est choisie comme matériau à changement de phase pour les expériences. La paraffine utilisée est le N-octadécane à 99 % de pureté. La température de fusion donnée par le manufacturier est de 28 degrés Celsius. Comme matériau à changement de phase, la paraffine possède une chaleur latente très élevée et peut être trouvée partout. Plusieurs études ont déjà établi les propriétés thermophysiques de la paraffine.

Or, mis à part le coût élevé de la paraffine utilisée dans cette expérimentation, l'avantage des autres sortes de paraffines comme matériau de stockage de l'énergie est qu'elles ne sont pas très coûteuses. Le choix fait dans ce cas est basé sur la pureté du N-octadécane, pour permettre une meilleure visualisation. Mais un des inconvénients de l'utilisation de la paraffine, c'est que cette dernière présente un grand coefficient d'expansion (10%). Il faut en tenir compte pendant la conception des contenants d'un élément de stockage à paraffine. Le Tableau 2.2 présente les propriétés du N-ctadécane. Le symbole  $M$  indique les grandeurs physiques et  $\langle M \rangle$  la valeur moyenne.

## 2.5 Le fluide caloporteur

Le stockage de l'énergie se fait avec la circulation de l'eau chaude. Le déstockage s'effectue avec de l'eau froide. Le volume maximal est de  $25680 \text{ cm}^3$  d'eau, et il constitue le réservoir thermique de l'élément de stockage. Deux petits tuyaux en plastique relie l'appareil chauffant à l'élément de stockage.

L'eau est choisie comme caloporteur, car sa chaleur spécifique moyenne est grande ( $C_p=4.217 \text{ KJ/kg.K}$  dans les conditions normales).

TABLEAU 2.1: QUELQUES PROPRIÉTÉS DE L'ALUMINIUM

Température	300° K	400° K
Conductivité (W/m.k)	237	240
Chaleur spécifique (J/kg.K)	903	
Diffusivité thermique m/s	$97.10^6$	

TABLEAU 2.2 : PRAPRIÉTÉS THERMOPHYSIQUES DU N-OCTADECANE

M	<M>	M	L'erreur	Sources
Chaleur latente (J/Kg) : $L_f$	242 10 <sup>3</sup>	241 10 <sup>3</sup>	0.01	(86,87,90)
Conductivité (W/m.K)				
-liquide : $K_l$	0.152	0.157	0.03	(86,87,89,90)
-solide : $k_s$	0.376	0.390		
Chaleur spécifique (J/kg.K)				
-liquide : $C_{p_l}$	2240	2200	0.05	(86,87,90)
-solide : $C_{p_s}$	1900	1900	0.03	
Densité du liquide (kg/m <sup>3</sup> )				
à T= T <sub>f</sub>	776.8	776.8	0.0025	(87,88)
30 <sup>0</sup> c	775.53	775.53		
40 <sup>0</sup> c	768.43	768.43		
50 <sup>0</sup> c	761.50	761.50		
Densité du solide (kg/m <sup>3</sup> )	814	835	0.03	(87)
Coefficient d'expansion du liquide (k <sup>-1</sup> ) : $\beta$	0.9 10 <sup>3</sup>	0.91 10 <sup>3</sup>	0.015	(87,88)
Viscosité cinématique $\nu$ (m <sup>2</sup> /s) T= 30 <sup>0</sup> c	5.005 10 <sup>-6</sup>	0.01	0.01	(88)
35 <sup>0</sup> c	4.468 10 <sup>-6</sup>	0.01		
40 <sup>0</sup> c	4.013 10 <sup>-6</sup>	0.01		
45 <sup>0</sup> c	3.626 10 <sup>-6</sup>	0.01		
50 <sup>0</sup> c	3.294 10 <sup>-6</sup>	0.01		
Prandtl	52.14			

## 2.6 Déroutement d'une expérience typique

### 2.6.1 Préparation du banc à l'expérience

Après l'installation de tous les appareils expérimentaux, on prépare le banc d'essai pour une expérience. D'abord, la paraffine est à l'état solide dans des bouteilles. Celles-ci sont plongées dans un bain d'eau chaude, puis la paraffine fondue est versée dans l'élément de stockage. En prévision de l'effet d'expansion, on remplit l'enceinte de paraffine jusqu'à 18 cm des 20 cm de hauteur. Dans un des scénarios étudiés, on a procédé à une expérience pouvant être validée en utilisant une quantité de paraffine atteignant une hauteur de 5 cm. L'ailette s'est trouvée alors à la mi-hauteur de cette quantité (à 2.5 cm du fond).

La paraffine se solidifie en une journée plus de 12 heures, avec le refroidissement à 11 degré Celsius. Puis, on vérifie sur l'écran si la température à l'intérieur de la cavité est uniforme. Pour accélérer la solidification, on verse de l'eau froide dans le réservoir à eau. Tout ceci est mis en oeuvre pour éviter les poches de paraffine liquide. Les petits écarts de températures indiqués par les thermocouples peuvent être le résultat d'une fabrication plus ou moins uniforme des têtes des thermocouples.

### 2.6.2 Déroutement de la fusion

Après avoir vérifié que la paraffine a une température uniforme dans toute la cavité (environ 21 degrés Celsius), on remplit l'appareil chauffant d'eau, et on porte cette dernière à la température expérimentale, celle-là même qu'on impose à la plaque.

L'eau chauffée est introduite dans le réservoir thermique par la partie supérieure. Le lancement du système d'acquisition des données est fait en même temps, ainsi que la prise

de la première image qui indique le début de l'expérience. Le réservoir d'eau de l'élément de stockage est suffisamment grand, et considérant les débits à l'entrée et à la sortie qui sont faibles, on a considéré que l'eau du réservoir est stagnante.

Dans l'acquisition des données, l'enregistrement de la température de tous les thermocouples dans nos fichiers, est fait toutes les 20 secondes. La caméra vidéo, en plus de l'image, enregistre le temps d'exécution de l'expérience. On suit l'évolution du front de fusion. Le plan de l'enceinte sur lequel la visualisation est faite est couvert d'un papier coloré vert. Ceci a donné un bon contraste d'image. On a pratiqué une ouverture graduée de chaque côté dans ce papier, laquelle ouverture, graduée de chaque côté, laisse voir la zone contenant la paraffine. À l'autre extrémité, on utilise un papier suffisamment opaque pour éviter que la lumière s'introduise, et ce, afin d'obtenir une meilleure qualité d'image.

Les images prises par la caméra sont traitées avec le logiciel *Omnimet* qui permet de fixer l'image choisie et le temps correspondant pendant l'évolution du cycle de fusion et de solidification. Ainsi, on peut définir, d'une part, le pourcentage de la quantité fondue par rapport à celle du solide pendant la fusion. D'autre part, on détermine la quantité de la matière solidifiée par rapport à celle encore liquide lors du refroidissement.

Lors de la fusion de la paraffine, il s'est produit un problème de fuite, lié à l'expansion thermique et à la pression hydrostatique. Du silicone a permis de colmater les fuites, mais puisqu'elle ne supporte pas l'humidité, l'obturation a été réalisée avec d'autres plaques de plexiglas.

On doit souligner un autre phénomène : des bulles d'air (de l'air remarqué dans plusieurs autres recherches) s'échappaient de la surface formant l'interface solide-liquide de la paraffine (le front de fusion) pendant la fusion. Elles se forment généralement lors de la solidification de la

paraffine, de l'air se trouvant au-dessus de la surface libre de la paraffine. Il y a deux moyens pour les éliminer : couler la paraffine liquide sous vide dans les contenants ou pomper l'air de la paraffine déjà solidifiée dans le contenant.

### 2.6.3 Déroulement de la solidification

Alors qu'on a enregistré les dernières données et la dernière image à la fin de la fusion, la solidification est amorcée.

Après l'acquisition des données, on procède à la vidange de l'eau chaude du réservoir et de l'appareil chauffant. Cette opération prend environ cinq à dix minutes. On remplit l'appareil d'eau tiède pour le préparer au refroidissement et afin d'en amortir l'inertie thermique dans l'appareil. Puis, on le remplit d'eau froide, et on déclenche le système de refroidissement. L'eau froide provient du circuit d'alimentation du bâtiment. En période hivernale, la température est favorable, et on gagne du temps. C'est de même pour le chauffage : on prend l'eau chaude du circuit de l'immeuble.

Lorsque l'eau se trouvant dans l'appareil refroidissement descend à la température voulue (température fixée à 11 degrés), elle est introduite dans le réservoir à eau de l'élément de stockage. Puis, on redémarre de nouveau le système d'acquisition des données avec de nouveaux fichiers. La prise d'image du phénomène de solidification est relancée au même moment.

Il faut noter que le phénomène de solidification n'a pas été observé jusqu'à la fin. Le déstockage est un processus très long.

### 3 LES EXPÉRIENCES RÉALISÉES ET LES RÉSULTATS

L'objectif des expériences réalisées est de faire une étude sur le cycle de fusion-solidification du matériau à changement de phase (MCP), afin de préparer une banque de données qui pourra servir à la validation de codes de calcul numérique.

Plusieurs scénarios ont été faits avec différentes conditions de température imposées à la plaque, pour vérifier le taux de fusion. Puis, ces conditions ont été appliquées à une plaque sans ailette et à une avec ailettes.

Dans la première catégorie, le travail a porté sur l'évaluation des effets des différents écarts de température. Dans la deuxième, on a procédé à l'utilisation d'une ailette, puis de cinq ailettes. La comparaison de ces deux catégories d'expériences a permis de voir l'influence des ailettes sur le cycle de fusion-solidification.

#### 3.1 Les expériences réalisées avec la plaque sans ailette

##### 3.1.1 Le phénomène de fusion pour 40, 50 et 60 degrés Celsius

Pour la plaque sans ailette, trois variantes d'expériences ont été accomplies sous diverses températures. Les trois premières consistent à soumettre la plaque à des températures de 40, 50 et 60 degrés Celsius. La température initiale de la paraffine était de 21 degrés Celsius, soit la température ambiante du local.

Les températures imposées à la plaque ont eu respectivement des écarts de température d'environ  $\Delta T = 12^\circ\text{C}, 22^\circ\text{C}, 32^\circ\text{C}$  par rapport au point de fusion de la paraffine utilisée (28 degrés Celsius).



a) L'incertitude sur la température

On a calculé l'incertitude pour chacune des températures imposées à la plaque, avec la méthode d'analyses statistiques des données expérimentales [27]. Pour cela, on a déterminé la moyenne des températures sur la plaque au cours de toute une expérience. On a déterminé la déviation  $d_i$  de chaque température enregistrée (équation 3 - 1) sur la température qu'on s'est imposée pour l'expérience, Puis on a défini l'écart type moyenne  $\sigma$  (équation 3 - 3), ce qui permet de déterminer l'erreur. Sur la figure 3.1, on voit l'évolution de la température de la plaque au cours de l'expérience avec la plaque approche 60 degrés. La tendance de l'évolution des courbes est la même pour 40 et 50 degrés.

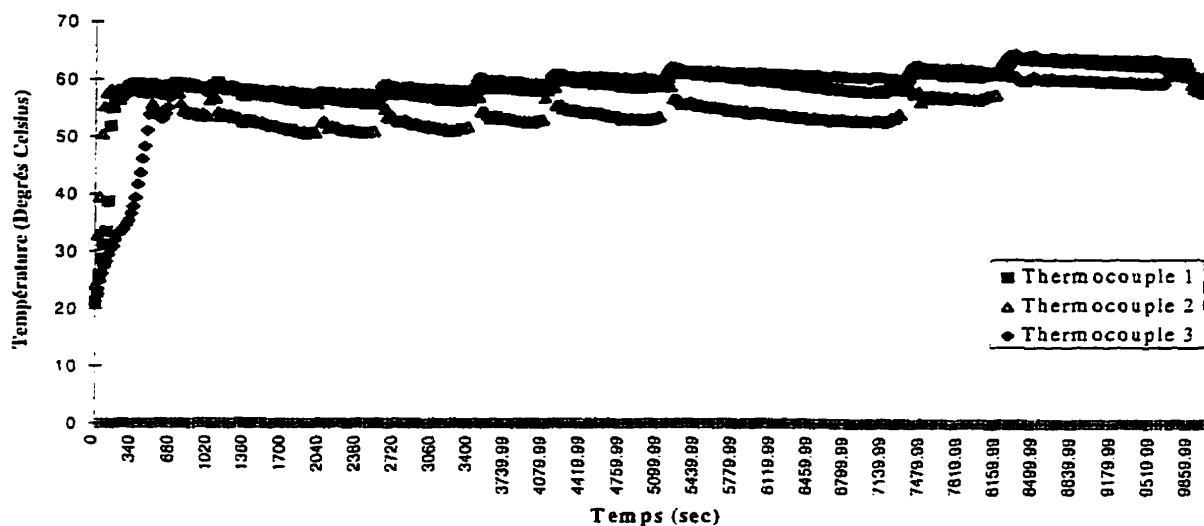


Figure 3.1 L'évolution de la température de la plaque

Le thermocouple n° 1 est dans le fond du réservoir, le thermocouple n° 2 dans le milieu et le thermocouple n° 3 dans la partie supérieure du réservoir à eau.

$$T_m = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m T_i \quad \text{et} \quad d_i = T_i - T_m \quad (3-1)$$

$$|\bar{d}_i| = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m |d_i| \quad (3-2)$$

$$\sigma = \left[ \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m |T_i - T_m|^2 \right]^{1/2} \quad (3-3)$$

La température moyenne ( $T_m$ ) de la plaque au cours de l'expérience est de 42 degrés. La déviation est de 3 degrés Celsius pour la plaque chauffée à une température de 40 degrés Celsius, ce qui donne une incertitude de 6%. Cette instabilité de température est remarquable sur la courbe de l'évolution de la température sur la plaque. On y voit une courbe irrégulière à cause de la variation de la température du caloporteur. L'irrégularité de la température aurait pu être corrigée en maintenant le débit du caloporteur constant et en effectuant le contrôle plus strict de la température de l'appareil chauffante.

Pour l'expérience où l'on fixe la température de la plaque à 50 degrés, la température moyenne de la plaque pour toute la durée de l'expérience est de 53 degrés, ce qui fait que l'erreur est de 3 degrés. La fusion dure 3 heures. À une température de 60 degrés sur la plaque, la durée de la fusion est de deux heures et demie. La température moyenne est de 58 degrés Celsius. L'erreur est d'environ 2 degrés Celsius, une incertitude de  $\pm 2$  (près de 4%).

La résistance thermique de notre réservoir est un facteur à ne pas négliger. Le remplissage du réservoir exige un certain temps, et au début de l'expérience, le réservoir est à une température inférieure à celle que l'on veut imposer à la plaque. Cela est visible sur la figure de l'évolution de la température de la plaque (Figure 3.1).

Pour la durée d'une expérimentation, l'erreur sur le temps est estimée en tenant compte du moment où on a commencé à verser l'eau dans le réservoir, avec le temps nécessaire pour remplir ce dernier, et la plaque a atteint la température voulue pour l'expérience après un certain temps, suite aussi à la résistance thermique du réservoir.

L'erreur sur le temps est très négligeable pour la fusion à 40 degrés Celsius. Le temps pour atteindre la température de la plaque est estimé entre quatre à dix minutes, ce qui est négligeable par rapport à la durée totale de l'expérience (six heures et demie). Mais il est moins négligeable pour la fusion avec cinq ailettes, car cette expérience dure 90 minutes. Donc, si on fait la fusion à une température élevée, il faut tenir compte, dans les résultats, de l'incertitude sur le temps, c'est-à-dire sur le temps nécessaire pour atteindre la température imposée à la plaque.

Pour la hauteur de la paraffine ( $L = 18$  cm,  $Pr = 52.14$ ,  $\beta = 0.9 \cdot 10^{-3}$ ), on a calculé le nombre de Grashoff et de Rayleigh des températures de la plaque.

$$Gr = g\beta(T_s - T_\infty)L^3 / \nu^2 \quad (3-4)$$

$$Ra = Gr Pr = g\beta(T_s - T_\infty)L^3 / (\nu\alpha) \quad (3-5)$$

TABLEAU 3.1 GRASHOFF ET RAYLEIGH EN FONCTION DE LA TEMPÉRATURE

T	40° C	50° C	60° C
Gr	$3.5 \cdot 10^6$	$9.97 \cdot 10^7$	$2.8 \cdot 10^8$
Ra	$1.8 \cdot 10^8$	$5.2 \cdot 10^9$	$1.4 \cdot 10^{10}$

Le comportement de la paraffine dans l'élément de stockage est analysé de trois façons : 1) par l'interprétation de l'image; 2) par l'évaluation de l'évolution de la température avec les

courbes indiquant la température des thermocouples choisis; 3) par la distribution des profils de température dans la cavité contenant de la paraffine. Ces profils sont considérés dans une seule dimension (1-D). Enfin, on a procédé à l'analyse de la fraction liquide.

#### b) L'interprétation de l'image

Avec les températures imposées à la plaque et le nombre de Rayleigh fonction de ces températures, on constate que le caractère des écoulements sur la plaque reste dans un régime laminaire à cause du nombre de Reynolds reste petit, qui fait que le nombre de Prandtl est très élevé. Mais on a observé, lors de l'expérience à 60 degrés Celsius, les mouvements ascendants de la paraffine liquide, et ceci, quand le front de fusion est encore proche de la plaque. Cela influence le taux de fusion et la forme du front de fusion. La figure 3.2 montre les images de l'évolution de la fusion. Ces écoulements résultent aussi de l'expansion (coefficient d'expansion  $\beta$ ), où on trouve

$$\beta = -\frac{1}{\rho} \left( \frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_p \quad (3 - 6)$$

la différence des densités qui provoquent les mouvements par gravitation. Le coefficient d'expansion est fonction de la dérivée partielle de la densité par rapport à la température. La paraffine liquide, dans la partie supérieure, a une température légèrement supérieure à celle du fond de la cavité. Il faut noter que ces mouvements ne se font pas de la plaque vers l'interface solide-liquide. Ils forment un contour partant du fond de la cavité, le long de la plaque, pour descendre de l'autre côté, sur l'interface.

Dans les premiers moments de la fusion, on observe sur le cliché que le front est parallèle à la plaque grâce à la prédominance de la conduction. Suite aux mouvements de la convection libre qui deviennent de plus en plus forts dans la paraffine fondue, le volume de la paraffine fondue est plus prononcé dans la partie supérieure de la cavité. Cela s'explique par la forme du front de fusion, qui au début est presque une ligne parallèle à la plaque, change d'orientation près de la surface libre, pour adopter une forme parabolique: la paraffine fondue, en montant le long de la plaque chauffante, accumule progressivement la chaleur de la plaque et arrive en haut avec une plus grande quantité d'énergie. Il y a alors une fusion plus intense dans cette région (Figure 3.2).

Quand la paraffine arrive à la surface libre, elle se répand par expansion sur la paraffine solide. C'est ce qui explique une des causes de la forme du front de fusion, quelques minutes après le début de la fusion. Ce moment varie selon la température imposée à la plaque.

La vitesse de la paraffine liquide ascendante est beaucoup plus grande près de la plaque chauffante que sur le front de fusion. La chaleur accumulée par la paraffine accélère la fusion dans la partie supérieure, et cette paraffine redescend le long de l'interface solide-liquide en libérant graduellement la chaleur. Elle arrive au fond de la cavité avec un minimum d'énergie, d'où une fusion faible dans cette zone. Les clichés pris par la caméra montrent la variation et le déplacement du front de fusion.

### c) La distribution de la température par les profils

Les profils de température montrent la variation de celle-ci dans une dimension (1-D). C'est pourquoi on a voulu représenter les profils de la partie supérieure et inférieure de la cavité. Au début de l'expérimentation, au temps  $t = 0$ , où les profils indiquent une température avoisinant les 19 - 21 degrés dans toute la paraffine, ces profils sont répartis dans un intervalle de temps  $\Delta t =$

130 minutes (pour la fusion à 40 degrés), et cette intervalle est de 50 minutes pour la fusion à 60 degrés avec une plaque sans ailette et de 20 minutes pour la fusion à 60 degrés avec cinq ailettes.

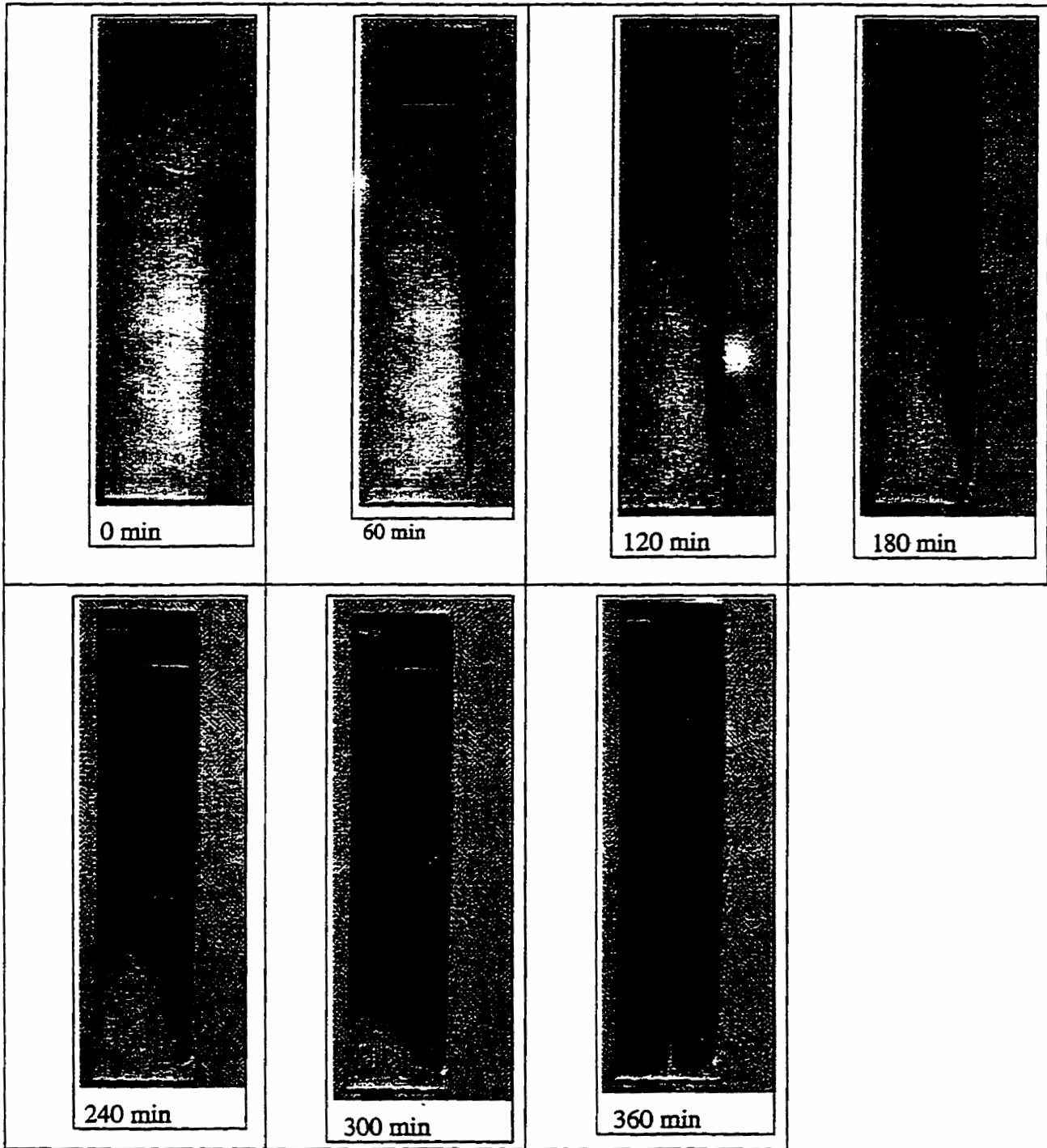


Figure 3.2 Images de l'évolution de la fusion sans ailette

La figure 3.3 montre les profils de températures en 1-D pour les trois températures. Pour la comparaison, on présente à gauche les profils de la partie inférieure, puis à leur droite ceux de la partie supérieure.

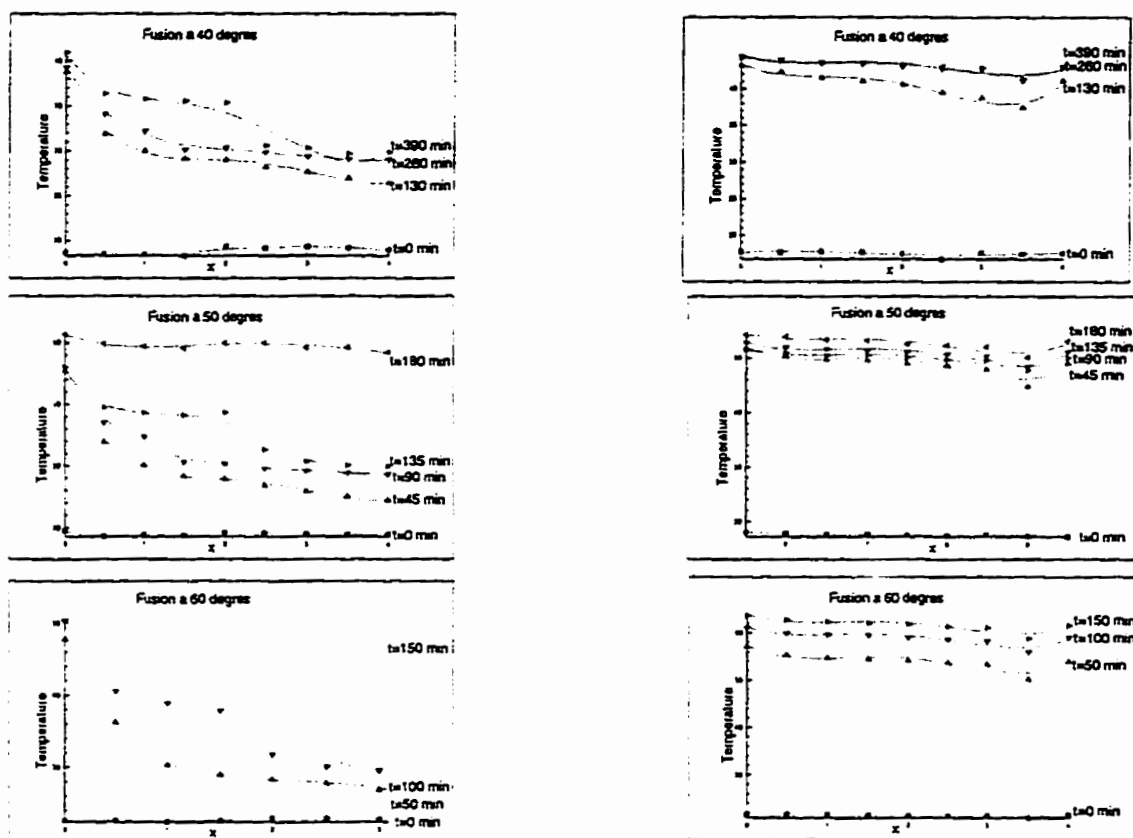


Figure 3.3 Les profils des trois températures de la paraffine

Après un temps très court (environ 2 minutes), on constate déjà la fusion sur la plaque, alors qu'à  $x = 4$  cm de la plaque, la température reste encore identique à celle de l'état initial. Après 3040 secondes, sur la plaque, la paraffine atteint 37 degrés. Cette température ne s'élèvera pas beaucoup pour atteindre 44 degrés. Elle ne variera que de 7 degrés au cours de l'expérience, tandis

que de l'autre côté, pour monter à cette même mesure, la température grimpera selon une plus lente progression à partir de la température initiale de 19 - 21 degrés.

En considérant la partie supérieure de l'élément de stockage, on voit que si la température monte directement pour dépasser 40 degrés sur la plaque, et après deux intervalles de temps (80 minutes). La température de la paraffine du côté opposé à la plaque sera presque la même que sur la plaque dans cette zone supérieure, et ce, durant toute l'expérience, ceci grâce à la convection dans cette zone.

L'analyse des profils montre que la température est plus élevée dans la partie supérieure de la cavité que dans le fond.

À côté de la plaque, la convection libre est influencée par les écoulements, et le nombre de Grashoff qui caractérise ces écoulements est proportionnel à la hauteur au 3<sup>e</sup> degré (équation de Grashoff). La convection influe beaucoup sur la fusion.

#### d) L'évolution de la température

Pour l'étude de l'évolution de la fusion, on a suivi l'évolution de la température de trois thermocouples. Trois points en abscisse ont été choisis dans la paraffine : sur la plaque, dans le milieu et du côté opposé à la plaque. Quand on observe le graphique de l'évolution de température en fonction du temps pour un thermocouple donné, on remarque le phénomène de fusion par une montée rapide de la température au point où le changement de phase a eu lieu. Cela se fait grâce au mélange de la paraffine déjà liquide, qui a une plus grande température comparativement à la



paraffine qui vient de dépasser le point de fusion (Figure 3.4). Pour un thermocouple plus éloigné de la plaque, la montée de la température est faible, alors que plus près de la plaque, la pente devient plus grande.

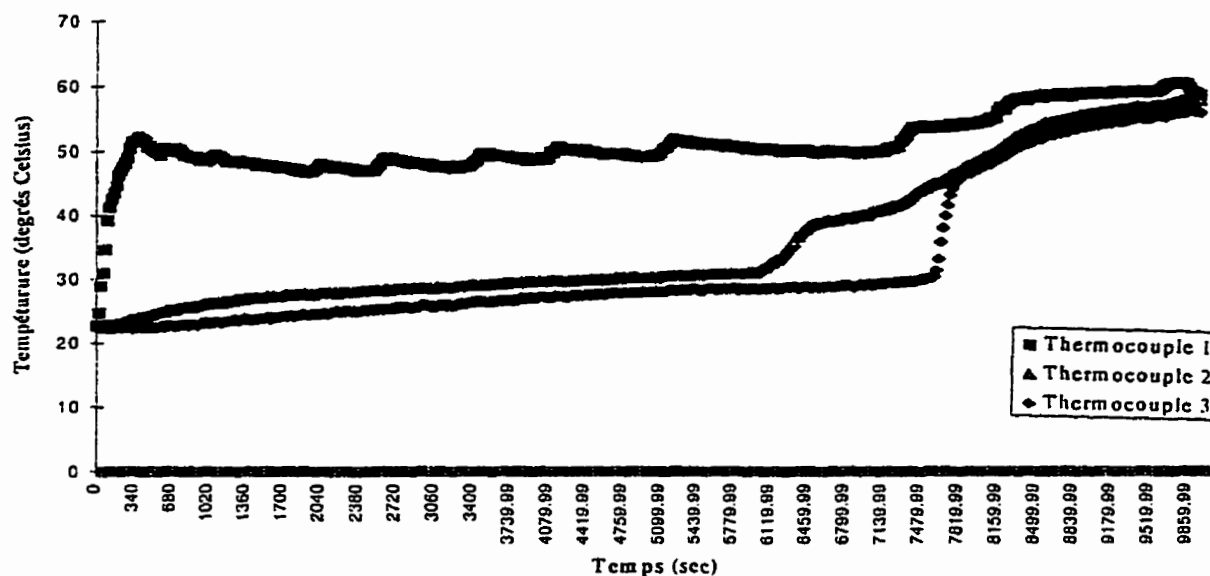


Figure 3.4 L'évolution de la température de la paraffine (fond de la cavité)

Ici, le thermocouple n° 1 est sur la plaque, le thermocouple n° 2 est dans le milieu de la cavité et le thermocouple n° 3 est à l'opposé de la plaque.

Loin de la plaque, la convection influence de moins en moins la fusion, surtout dans la partie inférieure. C'est que la hauteur de la paraffine solide diminue. Ensuite, le front de fusion s'éloigne de la plaque. La conductivité de la paraffine liquide est faible ( $K_l=0.152 \text{ W/m.K.}$ ). Vers la fin de la fusion, la paraffine demeure dans le fond de la cavité. À cet instant, la paraffine commence à chauffer par le haut. La fusion s'y avère très longue.

L'observation de l'évolution de la température en abscisse à ces trois points différents montre que du côté opposé à la plaque, le phénomène de conduction prédomine, et surtout au fond de la cavité. La courbe de ce point monte progressivement (pente faible) pour arriver à la fusion. On observe la même chose sur les profils de température près de la plaque (figure 3.4), où la fusion est très rapide, tandis qu'on remarque d'abord la conduction dans la paraffine solide qui atteint le point de fusion du côté opposé à la plaque, puis la fusion qui se manifeste par une pente plus forte de la courbe.

Comme on l'a déjà évoqué, aux trois points de l'abscisse sur les courbes de l'évolution de la température, la fusion est rapide près de la plaque et dans la partie supérieure de la cavité, alors que du côté opposé à la plaque, il y a d'abord une accumulation de chaleur sensible. Ceci explique le phénomène de la conduction et se voit aussi sur les profils de température, mais, pour l'évolution aux points choisis dans la partie supérieure (Figure 3.5), on voit que la fusion est rapide à la suite de la convection libre dans la zone de ces points, car les trois points atteignent la même température en temps très court, à cause de l'expansion de la paraffine liquide sur la surface libre de la paraffine solide. Ce qui fait que la fusion se produit presque en même temps. Le comportement de la courbe de chaque thermocouple, dans cette zone, diffère un peu l'un de l'autre.

Une comparaison des tendances de l'évolution de la température entre le fond de la cavité et la partie supérieure montre que la fusion dans la zone près de la surface libre est très rapide par rapport à ce qui se passe dans la zone inférieure (Figures 3.4 et 3.5).

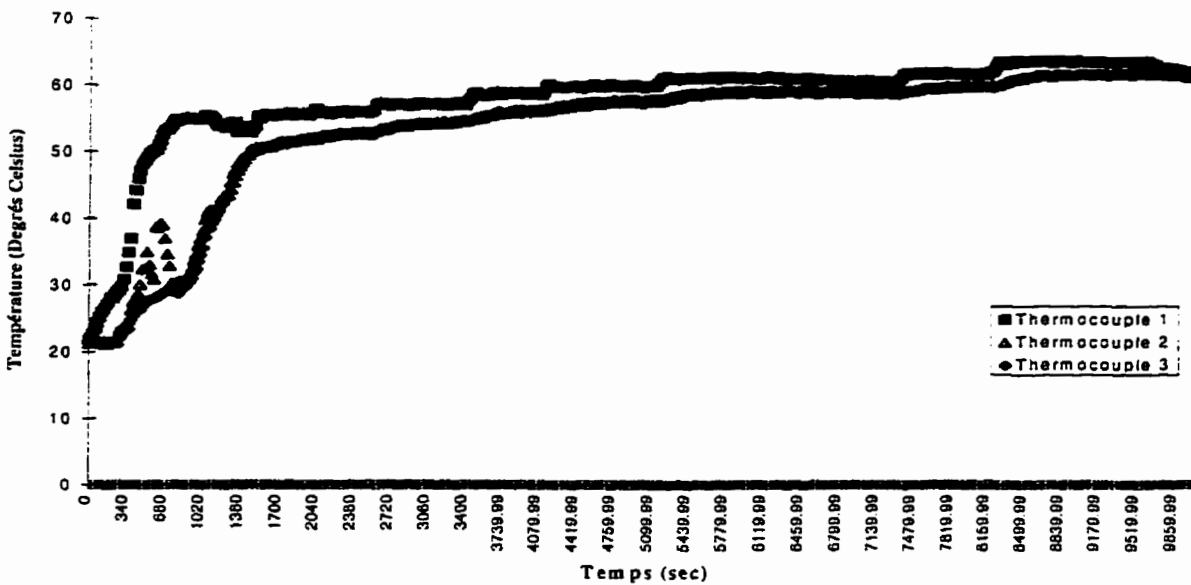


Figure 3.5 L'évolution de la température de la paraffine (partie supérieure de la cavité)

Une fusion à 40 degrés Celsius, dans nos conditions, dure 6 heures et 20 minutes, la fusion dans le fond de la cavité étant très lente jusqu'à la fin. Le thermocouple de la première rangée inférieure n'indique aucunement la fin de la fusion à 28° Celsius, puisqu'il ne se trouve pas dans le fond de la cavité, là où s'achève la fusion totale. On voit que celle-ci cesse à 40° Celsius.

e) La comparaison des trois températures de la fusion

La comparaison des températures à 40, 50 et 60 degrés Celsius indique que plus la température de la plaque croît, plus la courbe devient ascendante là où se déroule la fusion. La grande différence est remarquable sur le taux de fusion. Au tableau 3.2, avec les trois températures imposées à la plaque, on voit que la durée de la fusion varie considérablement dans les trois cas.

TABLEAU : 3.2 TEMPÉRATURES DE LA PLAQUE ET LES INCERTITUDES RESPECTIVES

Température voulue sur la plaque	Température moyenne sur la plaque	Incertitude sur la température	Durée moyenne de la fusion
40° C	42° C	± 6 %	6 h 30 min.
50° C	53° C	± 5 %	3 h
60° C	58° C	± 3.3 %	2 h 30 min.

Les écarts de température imposés à la plaque, par rapport au point de fusion, génèrent différents taux de fusion, ce qui conditionne la forme du front de fusion. La fusion à 40 degrés se déroule pendant 6 heures 20 minutes. Au tableau 3.1, le nombre de Rayleigh à 60 degrés Celsius est très grand, on s'approche du régime turbulent, ce qui joue aussi sur la forme du front de fusion dans la partie supérieure de la cavité. Pour 60 degrés Celsius, au début de l'expérience, le phénomène des mouvements ascendants de la paraffine liquide à côté de la plaque est facilement visible.

Quand on fait la comparaison des trois cas, on voit que la partie supérieure de la paraffine passe directement à la fusion, tandis que la partie inférieure y passe progressivement. Il y a d'abord la conduction avant la fusion dans cette dernière zone.

La comparaison de la fusion dans le fond avec celle de la partie supérieure de la cavité montre qu'il y a une stabilité dans la partie supérieure. La fusion s'achevant très vite dans cette zone, on voit que la température demeure presque constante durant toute la fusion. Dans les trois cas, tous les profils de température viennent se concentrer presque à une même température après

un court moment. Dans la partie inférieure on a l'effet inverse, la température évolue lentement. Quant à la zone supérieure, on voit que, dans les trois cas de températures, le comportement des courbes est le même (Figure 3.5).

Du côté opposé à la plaque chauffante (la paroi non-chauffée), on voit que le profil monte plus que sur les trois thermocouples précédents sur la matrice (Figure 3.3). Cela est dû à la chaleur venant de la partie supérieure de l'élément de stockage, qui contourne le plexiglas du côté externe et influence la paraffine par conduction thermique.

La fusion à 40 degrés prend beaucoup de temps, ce qui permet d'obtenir plusieurs profils de 40 minutes d'intervalle chacun. Ces profils révèlent le phénomène de changement de phase. Par le profil qui varie, on voit une partie où le profil a une pente plus forte, ce qui confirme le phénomène de changement de phase dans la zone. Ce phénomène est difficilement repérable si on augmente la température sur la plaque pour un grand intervalle de temps. Puis la fusion est rapide.

Vers la fin de la phase de fusion, on constate une augmentation considérable du volume de la paraffine, causée par l'expansion, ce qui entraîne des fuites. Le plexiglas ne supporte pas longtemps la température de 60 degrés. Des fuites et de la vapeur gênent la visualisation.

#### f) Résultats : La fraction liquide

Avec ces expériences, on a déterminé le volume fondu par rapport au volume total (la fraction liquide). La capacité de stockage de l'élément est déterminée par la fraction liquide. La fraction liquide est le rapport entre le volume solide fondu à l'instant  $t$  et le volume total du

matériau à changement de phase à l'état solide au début de l'expérience. Il y a plusieurs façons de déterminer la fraction liquide par rapport au volume total. Dans ce cas-ci, la mesure a été réalisée à partir des clichés pris avec la caméra vidéo. Avec le logiciel *omnimet*, on a digitalisé l'image. Sur celle-ci, on a fixé le contour de la paraffine fondue et celui de la paraffine solide. À partir de là, on a déterminé le pourcentage des deux fractions par rapport au volume total. Il faut souligner ici que l'incertitude sur le volume fondue et le volume solide est influencé par deux facteurs, qui viennent s'ajouter sur celui de la température qu'on a parlé plus haut. Il y a d'abord l'indice de réfraction dans les parois de Plexiglas, qui peuvent être rectifiée. Mais il y'a surtout le degré de coloration, selon lequel le logiciel prend sur l'image, la zone liquide et celle qui est encore solide. Cela est surtout compliqué au début et vers la fin de la fusion (figure 3.6). Dans toutes les mesures effectuées, l'incertitude sur la somme des deux volumes était moins 7 %. Nous avons préféré représenter ces résultats sur la figure 3.6 en pointillés.

La quantité de chaleur stockée par le MCP chauffé de la température  $T_1$  à la température  $T_2$ , en passant par la température de changement de phase  $T_f$  est la somme de la chaleur sensible accumulée dans la phase solide de  $T_1$  à  $T_f$ , de la chaleur latente à  $T_f$  et de la chaleur sensible dans la phase liquide de  $T_f$  à  $T_2$ . La fraction liquide pendant la fusion est fonction de la température soumise à la plaque.

On a mesuré de façon analogue l'énergie stockée sous les autres températures pour une fraction liquide à un temps donné.

On voit que la fraction augmente très vite à 60 degrés comparativement à 40 degrés.

$$Q_s = m \left( c_{ps} \int_{T_1}^{T_f} dT + L_f + c_{pl} \int_{T_f}^{T_2} dT \right) \quad (3 - 7)$$

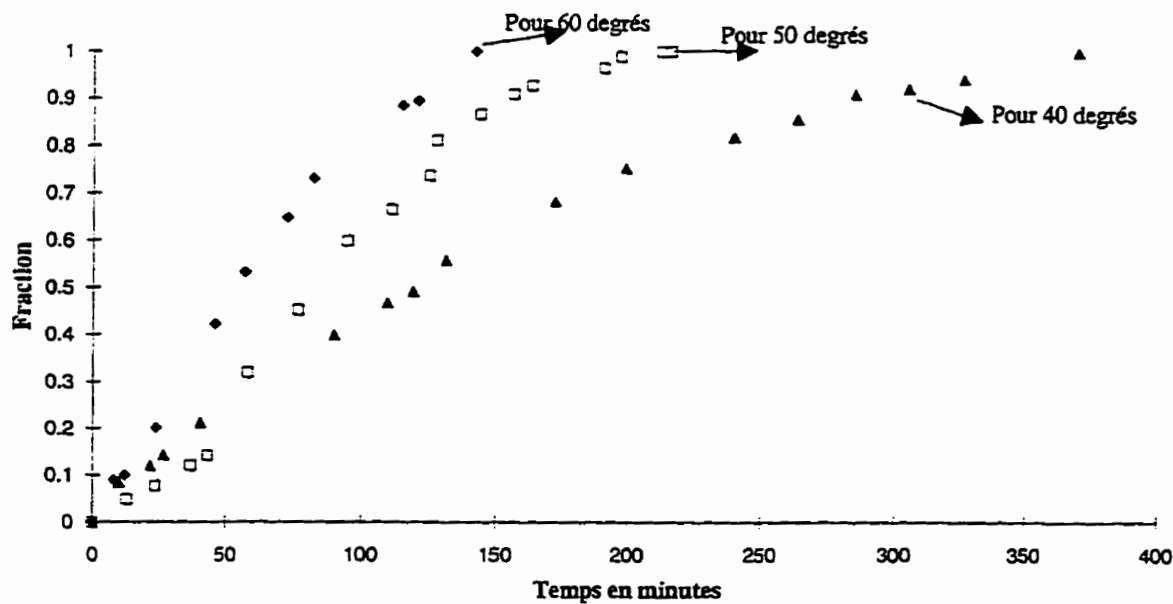


Figure 3.6 La fraction liquide pour les différentes températures de la plaque sans ailette

La masse de la paraffine contenue dans l'élément de stockage est définie par les dimensions de l'enceinte  $x=4$  cm,  $y=60$  cm,  $H= 18$  cm, où  $H$  est la hauteur de la paraffine dans l'enceinte.

Ni l'énergie extraite du liquide caloporteur pendant le stockage, ni l'énergie retirée de la paraffine liquide par le caloporteur pendant le déstockage n'ont été mesurées, d'autant plus que le débit du caloporteur n'était pas fixé.

La comparaison des résultats expérimentaux obtenus par C. Bernard, D. Gobin et F. Martinez [2] pour la fraction liquide, montre que la courbe tend à être une ligne droite pour l'intervalle entre 0.05 et 0.25. On voit aussi que la fraction liquide est difficilement définie au début de l'expérience et elle augmente en fonction de la température de la plaque. La constatation que

l'on retrouve dans le travail réalisé par C. -J. Ho et R. Viskanta [10]. L'évolution de la fraction liquide est influencée par les dimensions de l'enceinte et par la température imposée à la plaque.

### 3.1.2 Le phénomène de solidification

#### a) Interprétation de l'image

Après la fusion, la phase de solidification est amorcée. La température de la plaque est fixée à 11 degrés. Des difficultés de démarrage ont été rencontrées, comme au début du processus de fusion. La grande chaleur déjà accumulée dans le réservoir thermique pendant le chauffage faisait problème, car elle a pris plus de dix minutes pour se dissiper (descendre à 11 degrés). On a résolu ce problème en mettant d'abord de l'eau tiède pour amortir le choc thermique.

Le déstockage est fait avec de l'eau froide, laquelle est refroidie jusqu'à 11 degrés Celsius, enfin de voir le temps d'une solidification totale et les phénomènes qui l'accompagnent. On a préféré refroidir à 11 degrés Celsius qu'à 21 degrés, pour pouvoir accélérer la solidification qui est très lente. Ici aussi on n'a pas pris en considération le phénomène de la stratification.

Il était difficile de se fixer une valeur de température et de la maintenir constante sur la plaque (l'appareil chauffant ne pouvait pas maintenir la température constante). Le débit de l'eau à la sortie était faible par rapport au débit à l'entrée, d'où l'obligation d'interrompre périodiquement l'entrée de l'eau dans le réservoir, ce qui provoquait des perturbations de température de l'eau dans le réservoir thermique, difficilement maîtrisables.



L'instant initial de la solidification est difficile à déterminer, car remplir d'abord la cavité d'eau tiède pour amortir le choc thermique fait que le refroidissement sur la plaque a commencé avant que soit atteinte la température voulue.

Pour ce qui est du front de paraffine solide pendant le refroidissement, les clichés montrent que le front est presque parallèle à la plaque (Voir Figure 3.7, la zone noire est la paraffine liquide, et la zone blanche indique la paraffine solide). Ceci explique la prédominance de la conduction. Au début du refroidissement, on voit aussi une mince couche de paraffine solide se former sur la surface libre de la paraffine liquide : cela est causé par l'isolation du banc expérimental, mais surtout par ce que l'air au-dessus de la paraffine entre en contact avec la plaque déjà refroidie. Cet air va circuler en échangeant de la chaleur entre la plaque refroidie et la surface libre de la paraffine liquide.

On voit aussi une diminution considérable du volume de la paraffine, l'effet inverse de son très grand coefficient d'expansion.

#### b) Les profils de températures

Le temps de chute de la température est très petit, soit d'environ cinq minutes (voir les courbes).

La température chute de 40 degrés pour venir se stabiliser à 30 degrés centigrades, et avec le début du refroidissement, on voit que les températures dans toute la paraffine chutent presque

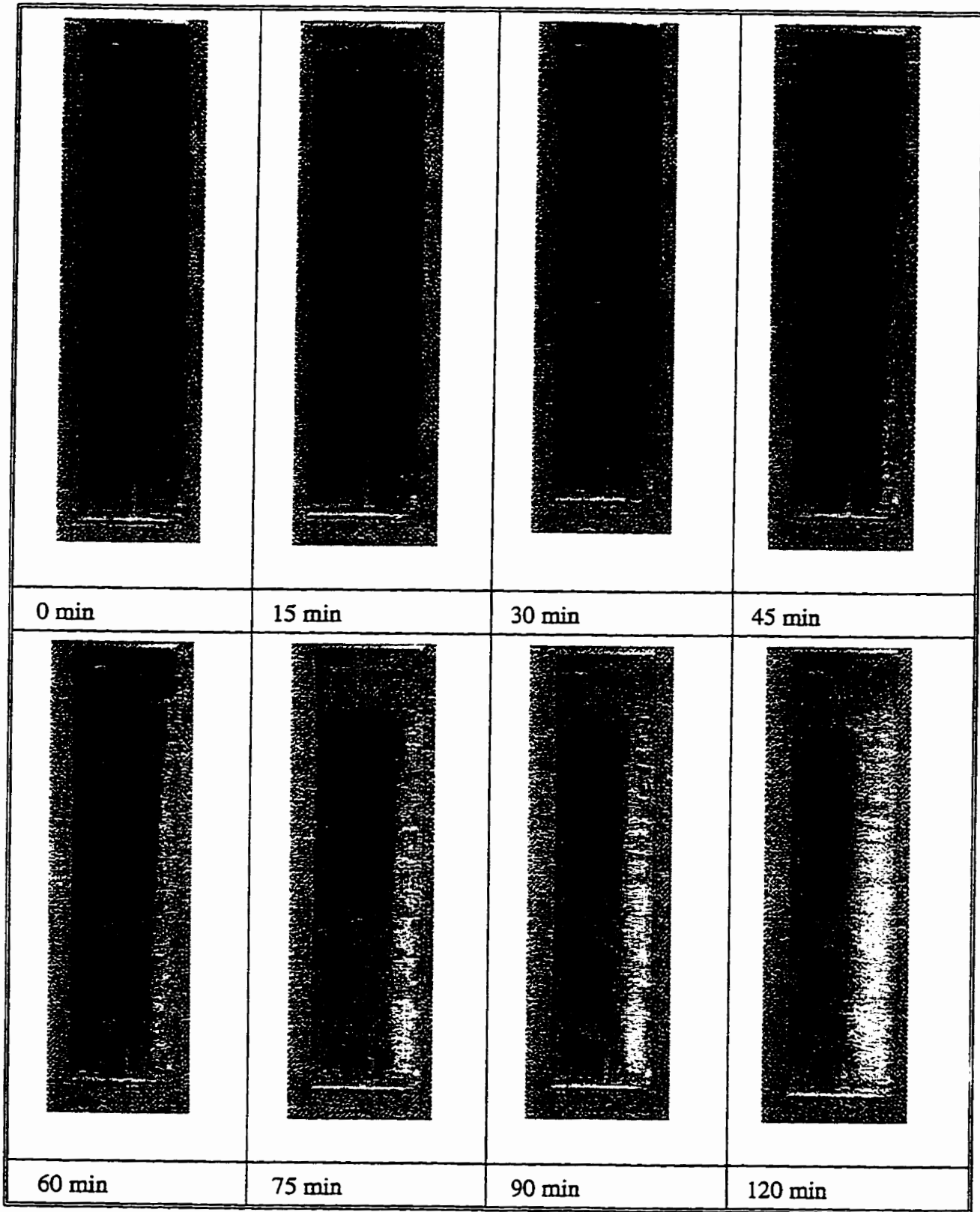


Figure 3.7 Images de l'évolution de la solidification sans ailette

toutes en même temps. Ceci confirme l'hypothèse que l'énergie stockée par chaleur sensible après la fusion n'est pas très grande. Ces températures se stabilisent près de la température de changement de phase (Figure 3.8). Une couche de paraffine solide commence à se former sur la plaque, une couche qui va isoler la paraffine liquide de la plaque, ce qui fait que la solidification continue lentement en raison de la mauvaise conductivité thermique de la paraffine solide ( $K_s = 0.376$  W/m.K), mais aussi à cause de l'écart de température très faible entre la paraffine devenant solide et la paraffine encore liquide. Les mouvements de convection naturelle ne sont pas favorisés, car l'écart de température est petit entre l'interface solide-liquide et la paraffine à 30° C.

Le coefficient de convection est fonction de la conductivité de la paraffine solide et inversement proportionnel à l'épaisseur de la couche de la paraffine déjà formée. À la température de changement de phase, on voit que la paraffine encore liquide va stagner longtemps à 30° C.

$$q' = h(T_s - T_m) \quad (3 - 8)$$

$$h = K_{ps} / X_s$$

Le phénomène de solidification se déroule presque seulement par conduction. L'écart de température entre l'interface solide-liquide et la paraffine liquide est très faible, pas de convection. La conductivité de la paraffine solide étant mauvaise, le front se déplace très lentement. Avec l'augmentation de l'épaisseur de la paraffine solide pendant le refroidissement, le déstockage s'effectue lentement.

En faisant la comparaison des profils de température dans la partie inférieure avec ceux de la partie supérieure, on remarque un phénomène inverse à la fusion qui se manifeste.

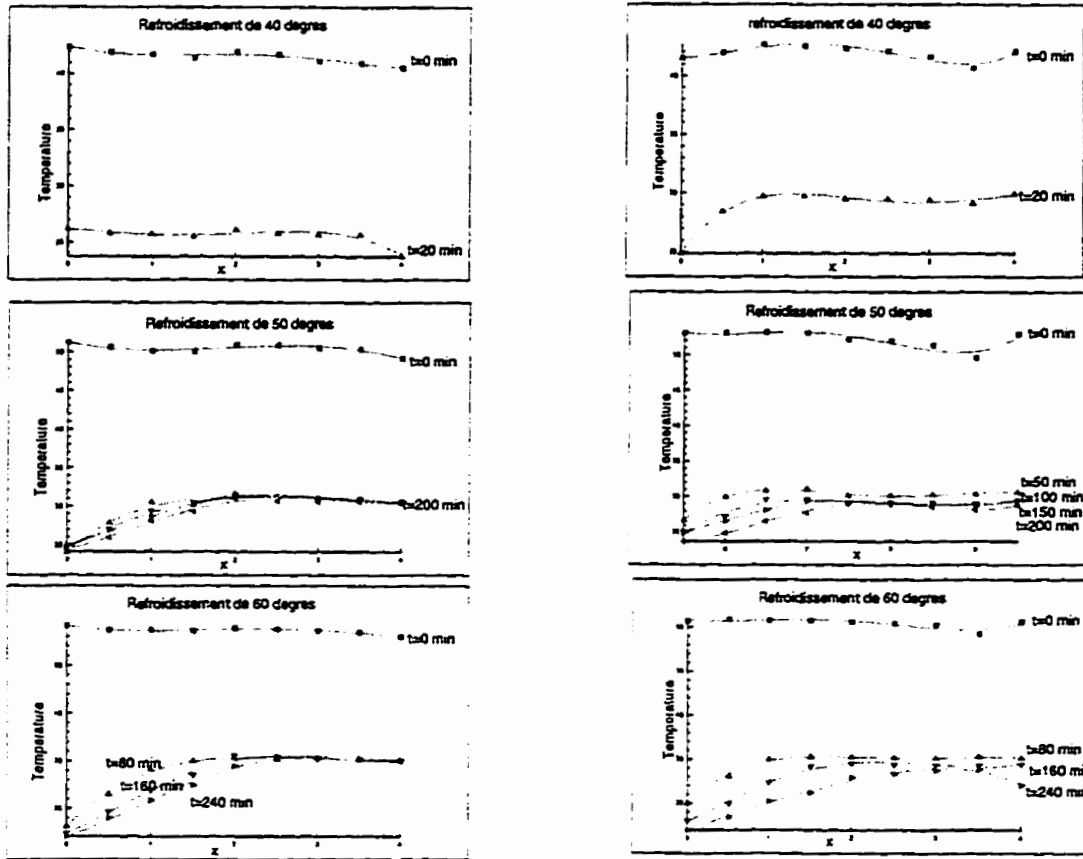


Figure 3.8 Les profils de température pour la solidification

Les profils en haut ont tendance à être dispersés, alors que dans la zone inférieure (Voir Figure 3.8), ils sont concentrés à une même température. La partie inférieure devient plus stable que la partie supérieure, ce qui représente un phénomène inverse à celui de la fusion. Dans cette même zone, la température près de la plaque continue à descendre graduellement.

c) La comparaison du refroidissement à partir des trois températures de fusion

Le refroidissement à partir de 40, 50 ou 60 degrés, dans les trois cas, se déroule presque dans le même intervalle de temps. Autrement dit, la chaleur sensible stockée pendant la fusion à 60 degrés n'est pas très grande comparativement à celle stockée dans un cycle à 40 degrés. On observe une grande chute de température entre le premier profil au temps  $t = 0$  et le suivant qui, dans les trois cas, vient se stabiliser aux environs de 30 degrés, (Figure 3.8) et cela, dans un intervalle de temps quasiment identique.

Les profils de température indiquent que près de la plaque, la paraffine est déjà à l'état solide et que la température continue de descendre graduellement jusqu'à 11 degrés sur les profils distincts. Au milieu de l'enceinte, les profils viennent se rencontrer à une même température (vers 30° C), et y demeurent pendant un long intervalle de temps. Cette température reste constante. Le facteur retardant la solidification correspond aussi à la grande densité thermique de la paraffine au changement de phase ( $L_f = 242 \cdot 10^3 \text{ J/kg}$ , c'est la chaleur latente).

On voit sur les images que la paraffine du milieu est encore liquide vers la paroi non-chauffée (Figure 3.7). Le profil du commencement du refroidissement est suivi des profils où toutes les courbes viennent se rejoindre à une température de près de 30 degrés, alors que la température près de la plaque continue à chuter en deçà du point de solidification. La paraffine sur la plaque forme une couche solide qui empêche l'échange par convection. La conduction de la paraffine solide est aussi très faible.

Il serait préférable de trouver une température optimale pour le stockage (la fusion), à laquelle la plaque est soumise. La chaleur sensible n'est pas grande et le chauffage à de grandes températures coûterait cher, à moins qu'on ne choisisse une grande taux de fusion. L'isolation influence aussi le comportement des profils de températures dans la partie supérieure.

On a voulu, en outre, déterminer l'évolution de la fraction liquide pendant le déstockage. Mais la difficulté réside dans le fait que le refroidissement prend un temps plus long. Ainsi, on ne pouvait mener le processus jusqu'au bout et revenir à la même température dans toute la cavité, où toute la paraffine est solidifiée.

### 3.1.3 Autres expériences

La quatrième option est de chauffer à 60° C et de refroidir à 11° C, mais le refroidissement est fait avant la fin de la fusion complète de la paraffine. Cette expérience visait à voir l'effet de la paraffine fondue sur la paraffine solide (non encore fondue). La cinquième variante d'expérience consiste à refroidir à peu près 21° C.

L'expérience de la fusion à 60 degrés Celsius, suivie du refroidissement à 11 degrés avant la fin de la fusion complète, n'a pas fourni beaucoup d'informations. Quand on amorce la solidification, on remarque que de l'autre côté de la cavité, l'interface solide-liquide demeure stationnaire. Quant à l'influence de la paraffine déjà fondue sur la paraffine encore solide, des effets thermiques remarquables n'ont pas été constatés. Ces effets liés au fait que la paraffine solide continue de fondre sous l'énergie stockée dans la paraffine liquide. La plaque a été soumise à une trop grande chute de température (11 degrés Celsius), alors que l'énergie stockée par chaleur

sensible n'est pas en grande quantité dans la paraffine liquide. On aurait obtenu les effets si on avait refroidi à une température qui se rapproche de la température de fusion. On constate que la température des thermocouples de la paraffine encore solide va demeurer sous le point de fusion, mais on n'est pas parvenu à détecter le déplacement du front de fusion. Pendant la solidification, le front de la paraffine solidifiée s'est joint au front de fusion, sans que celui-ci ait bougé.

Pour le refroidissement à 21 degrés Celsius, on n'a pas atteint la fin de la solidification. Les phénomènes remarqués au début de la phase sont aussi similaires que lors du refroidissement à 11 degrés Celsius. Mais une solidification avant la fusion complète aurait changé les résultats obtenus, puisque l'écart de température est de 7 degrés entre le point de fusion du N-octodécane et 21 degrés. Ici la fusion incomplète de toute la paraffine de la cavité aurait probablement fourni une meilleure information.

En ce qui à trait à la poche de paraffine liquide, on constate que durant le refroidissement, elle se forme, non pas dans le milieu de la cavité, mais le milieu de la paroi opposée à la plaque d'aluminium qui échange la température de la paraffine au caloporteur (Figure 3.9). Puis, la solidification s'est faite par le haut et au fond. Ceci explique que l'isolation extérieure protège suffisamment contre les pertes de chaleur et que le transfert de la chaleur s'opère beaucoup plus par la plaque d'aluminium.

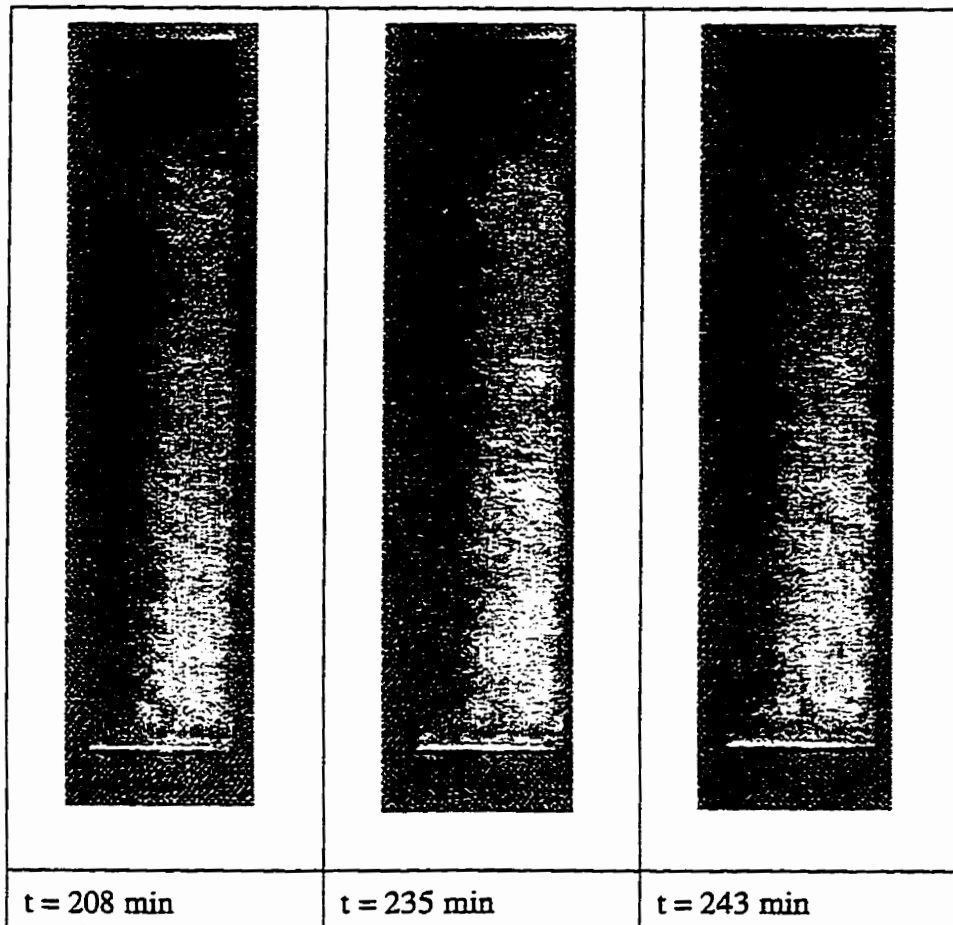


Figure 3.9 Images de la présence de la poche liquide sur la paroi non-chauffée

### 3.2 Les expériences réalisées avec une plaque à ailettes

Peu d'expériences avec des ailettes ont été jusqu'à présent réalisées dans ce domaine de recherche sur le cycle de fusion-solidification des MCP. Pour améliorer un système de stockage de l'énergie avec chaleur latente, on a équipé la plaque d'ailettes en aluminium de 2 cm de longueur. La conductivité de l'aluminium est donnée plus haut.



### 3.2.1 Le phénomène de fusion

Deux types d'expériences ont été réalisées. Elles diffèrent par le nombre d'ailettes conductrices fixées sur la plaque chauffante : les premières sont faites avec une plaque ayant une ailette, les deuxièmes avec une plaque à cinq ailettes. Toutes ces expériences sont effectuées à 60 degrés. Les résultats sont comparés ensuite avec ceux obtenus des expériences avec une plaque sans ailette. Puis le refroidissement est fait à 11 degrés.

Avec les ailettes, on remarque une chute rapide de la température dans la paraffine quand il y a une diminution du débit du caloporteur, alors que pour la plaque sans ailette, les perturbations du débit n'influençaient quasiment pas la température de la paraffine. L'explication à cela semble ne pas résider dans l'épaisseur de la plaque avec les ailettes qui est de 7 mm comparativement à 2 mm, mesure de la plaque simple, ceux dernières augmentent considérablement le flux de chaleur loin de la plaque dans la paraffine.

Pour les expériences à 60 degrés, il fallait chauffer beaucoup plus, puisque les tuyaux en PVC qui relient l'appareil chauffant et l'élément de stockage n'étaient pas bien isolés. Donc, on peut admettre que les pertes de chaleur sont plus prononcées à de grandes températures du caloporteur, la température ambiante étant au environ de 21 degrés Celsius.

En ce qui concerne la plaque à une ailette, cette dernière est placée dans la partie inférieure. Car la paraffine dans la partie inférieure de la cavité fond très lentement, pour augmenter la conduction dans la zone, l'échange par convection étant moins prononcée. Dans le but de suivre la conduction, un thermocouple est placé à l'extrémité de l'ailette, et un autre à la jonction de l'ailette et de la plaque (Figure 2.2).

#### a) Interprétation de l'image

La conduction devient importante dans le processus de fusion. Pendant la réalisation des expériences, on voit, en observant le cliché (Figure 3.10), que la fusion commence sur l'ailette. La fusion autour de l'ailette adopte la forme de celle-ci. Elle se conforme ainsi à la distribution du flux de chaleur. Une fusion plus prononcée s'opère près de la jonction de l'ailette et de la plaque. Cette fusion diminue graduellement à mesure qu'elle s'éloigne de la plaque.

On remarque aussi les bulles d'air sur la face inférieure de l'ailette. Or l'air est un mauvais conducteur. Cela diminue la fusion. L'air s'introduit dans la paraffine lors de la solidification, après avoir coulé la paraffine liquide dans la cavité. La paraffine aspire de l'air durant la solidification. Il se forme des poches d'air à l'intérieur, alors libérées à la fusion. Pour les expériences sans ailette, l'air est dégagé sur l'interface solide-liquide hors de la paraffine.

L'interface solide-liquide change de forme. On voit en effet les creux créés par la conduction dans la paraffine solide (Figure 3.10). On remarque que si l'on augmente le nombre d'ailettes, la fusion par conduction prédomine sur la convection. La distance entre les ailettes est petite. Les écoulements sur la plaque sont bloqués entre les ailettes. Les mouvements de convection intenses interviennent lorsque le front de fusion est au-delà de la longueur des ailettes, ce qui renforce la prédominance d'abord de la conduction sur la convection. L'ajout de l'ailette diminue les mouvements de convection libre. La hauteur de la plaque, qui influence les mouvements de convection entre les ailettes, est petite. Mais le contact de la paraffine avec la plaque est plus important.

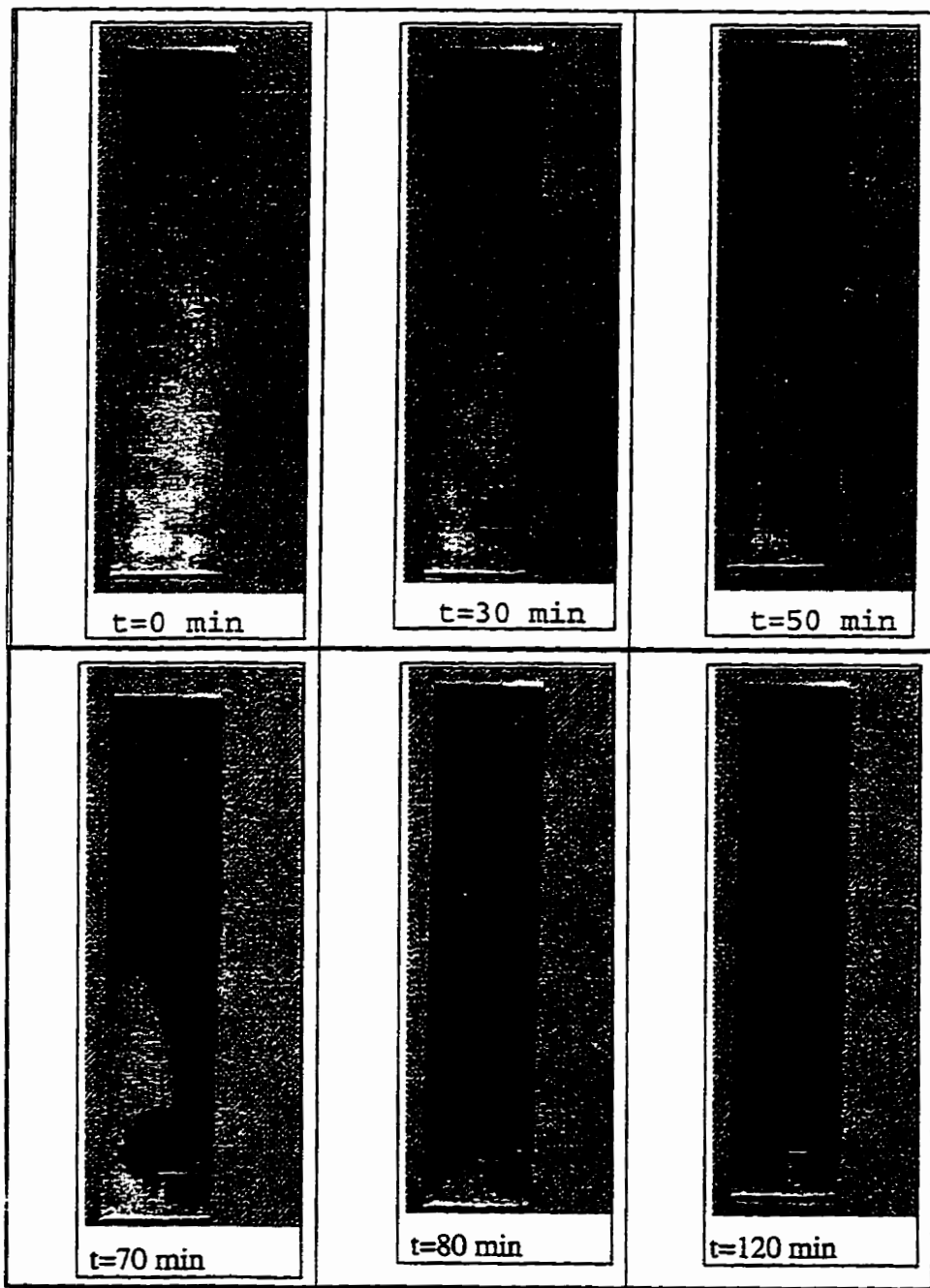


Figure 3.10 Images de l'évolution de la fusion avec ailette

b) Les profils de températures

Les profils de températures (Figure 3.11), avec l'ajout des ailettes, changent de comportement. Pour une plaque sans ailette, à la suite de la fusion qui est intense dans la partie supérieure, les profils sont concentrés à une même température, mais sur la plaque à cinq ailettes, les profils ont tendance à être uniformément répartis, comme dans la zone inférieure de la cavité.

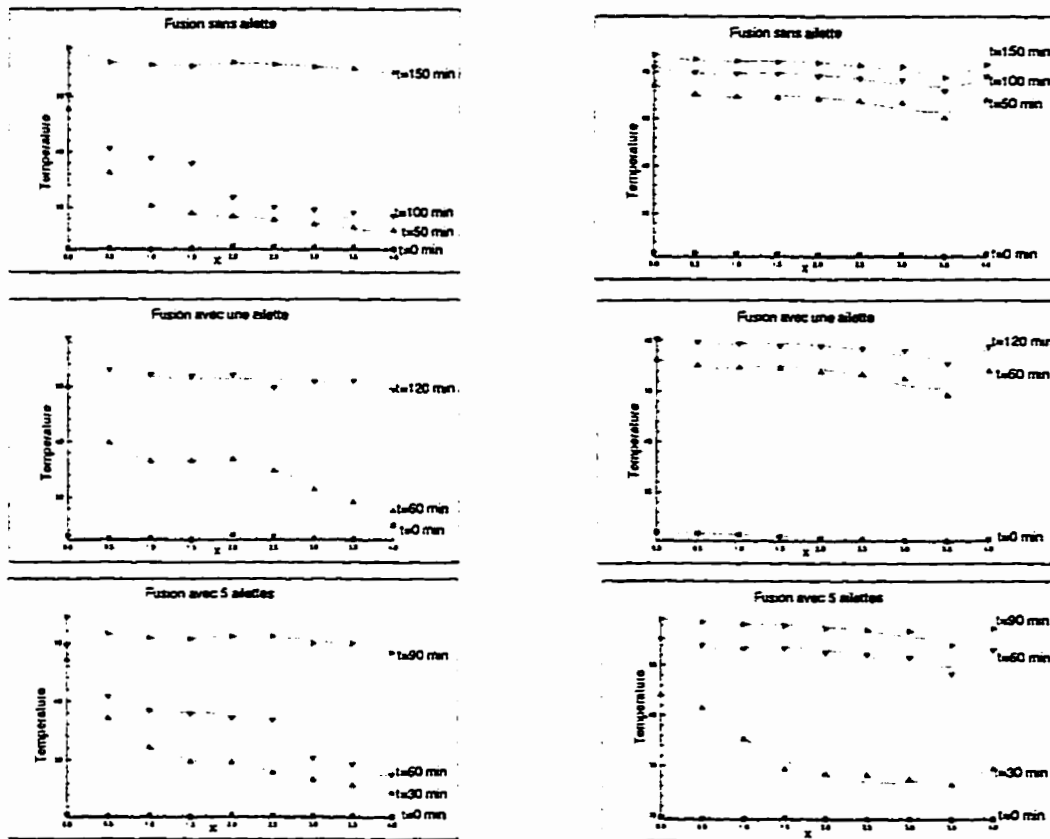


Figure 3.11 Les profils de températures pour les ailettes

La distribution des profils de températures diffère selon que des ailettes sont présentes ou non. Avec une plaque sans ailette, on voit que dans la partie supérieure de la cavité, les profils sont très peu distancés après quelques minutes. Dans le fond, pour les mêmes intervalles de temps, les profils sont très distincts. Mais dans le cas à une seule ailette située dans la partie inférieure, le changement n'est pas notable. Pour cinq ailettes, on voit que les profils ont tendance à être uniformément répartis dans toute la cavité, comme dans la zone inférieure (Figure 3.11) de la plaque sans ailette.

Sur les profils de température, il est difficile de remarquer les points où se déroule la fusion, puisque l'intervalle de temps choisi peut se situer parfois loin du moment de fusion. Les propriétés du métal et la forme de l'ailette n'ont pas été prises en considération.

#### c) L'évolution des températures

L'évolution de trois thermocouples choisis indique que dans la zone inférieure, la durée de l'accumulation de la chaleur sensible est devenue petite loin de la plaque, comparativement aux cas de la plaque sans ailette. Mais dans tous les cas, les courbes ont conservé la même allure d'évolution. Pour les thermocouples de la partie supérieure, si, avec la plaque sans ailette, il y a une fusion rapide presque au même moment dans toute la zone de la cavité, on constate que pour cinq ailettes, la tendance est la même mais avec une montée moins rapide des courbes, à cause de l'ailette en haut, qui augmente la conduction.

Le temps de fusion est réduit considérablement (Voir Tableau 3.3). Pour la plaque simple, le temps de la fusion à 60 degrés est de deux heures et demie, alors que pour une plaque à cinq ailettes, il est de 90 minutes.

Pendant les expériences, on a aussi rempli la cavité de paraffine jusqu'à une hauteur de 5 cm, et on l'a symétriquement reparti de part et d'autre de l'ailette. On doit faire une remarque : on obtient une fusion très rapide, puisqu'on a une petite quantité de paraffine à fondre, et à cause d'une grande quantité d'air chaud dans l'espace vide au-dessus de la paraffine.

#### d) Résultats : la fraction liquide

La plaque à ailettes et la plaque sans ailette ont des épaisseurs différentes. Mais connaissant les propriétés de l'aluminium, on peut apporter des corrections sur les résultats de la fraction liquide. Par contre, la fixation de l'ailette sur la plaque est censée être parfaite, pour minimiser les pertes dans la transmission.

Avec la fraction liquide, lors de la fusion avec les ailettes, on constate que la courbe de la température de la paraffine fondue en fonction du temps atteint le maximum en 90 minutes, alors que pour une plaque sans ailette, malgré sa petite épaisseur, on atteint le maximum après 150 minutes (Tableau 3.3).

La Figure 3.12 permet de voir le taux de fusion dans les trois cas et l'influence des ailettes sur la transmission de la chaleur. Il faut rappeler que les ailettes ont toutes la même forme et les mêmes dimensions et déterminer la fraction liquide au début de l'expérience un peu imprécis.

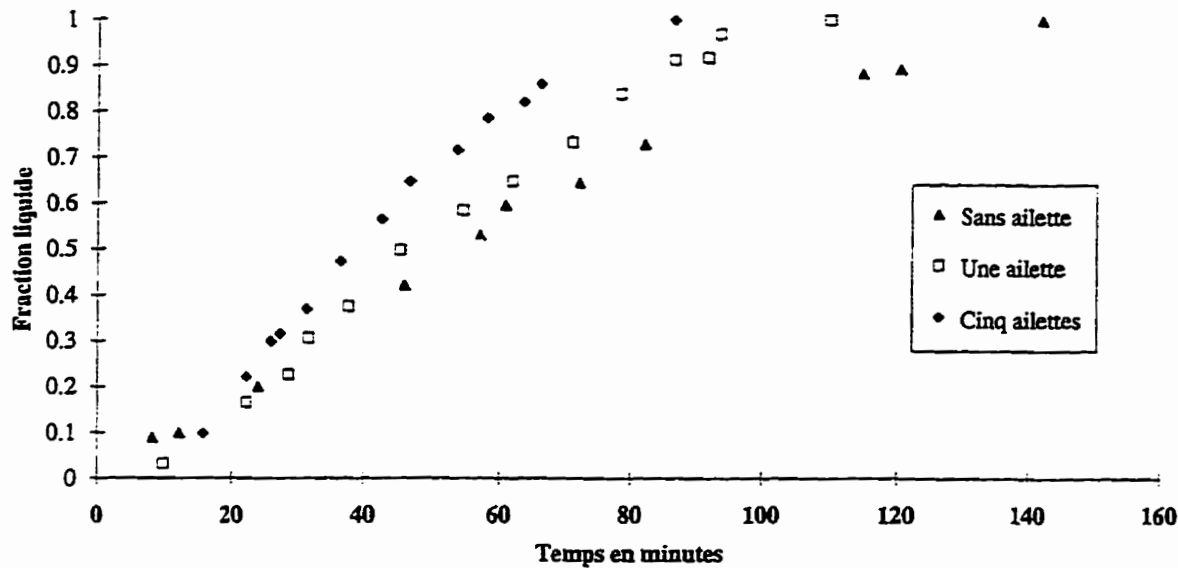


Figure 3.12 Fraction liquide pour une plaque sans, avec une ailette et 5 ailettes

### 3.2.2 Le phénomène de solidification

#### a) Interprétation des données

Le nombre d'ailettes influence considérablement le temps du cycle. Ce dernier diminue lorsque les ailettes sont plus nombreuses. Sur la plaque simple se forme une couche de paraffine qui ralentit le refroidissement. Les ailettes augmentant la surface de contact (Figure 3.13), la couche se forme sur celles-ci, ce qui augmente la quantité de paraffine se solidifiant. Puis, pendant la solidification, la conduction est plus forte. La convection, proportionnelle aux écarts de température, est faible.

Toute la paraffine liquide a une température stagnante près du point de fusion. L'effet inverse du flux de chaleur qui se manifeste pendant la fusion autour d'une ailette se reproduit avec la formation de la couche de paraffine solide.

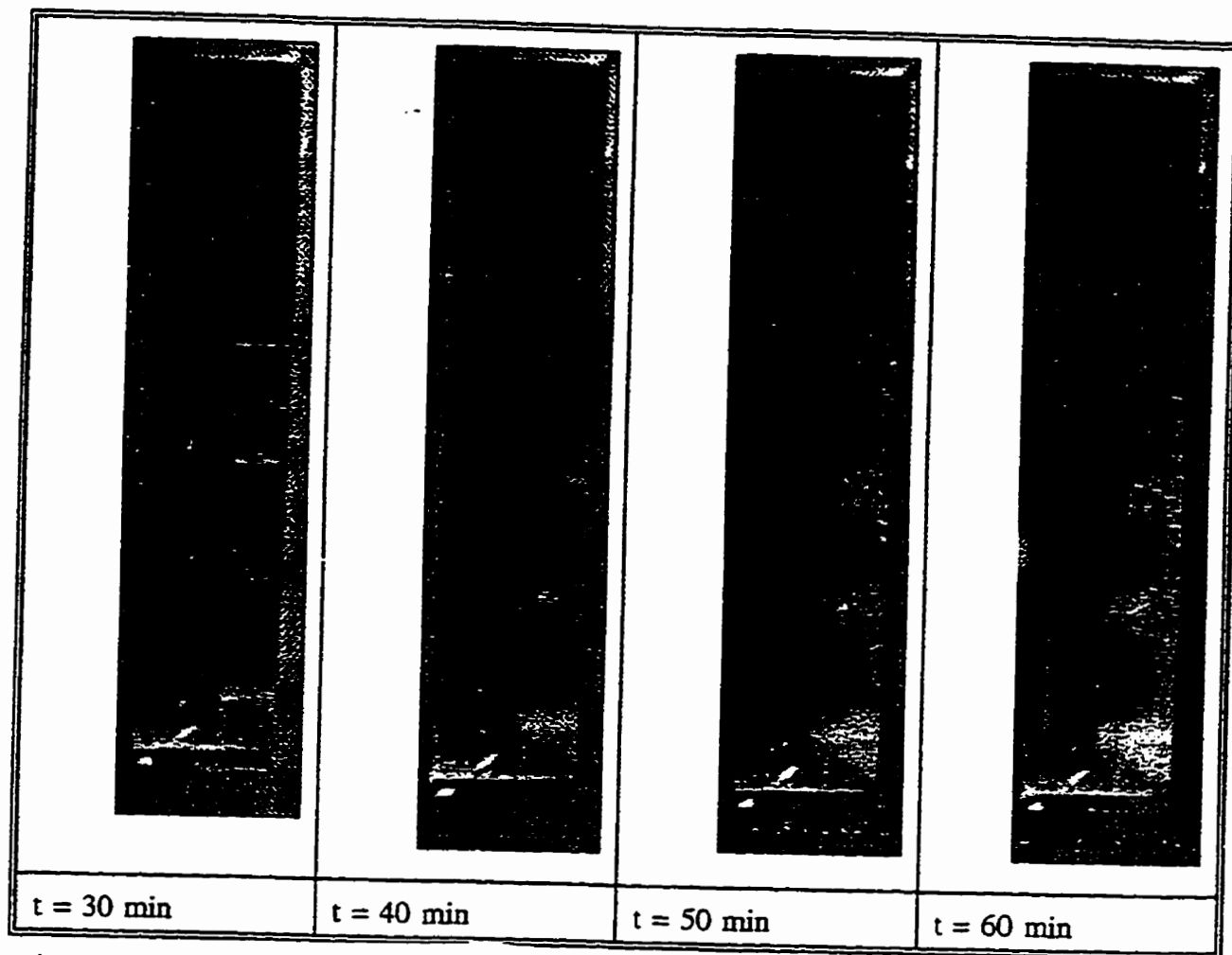


Figure 3.13 Images de l'évolution de la solidification avec ailettes



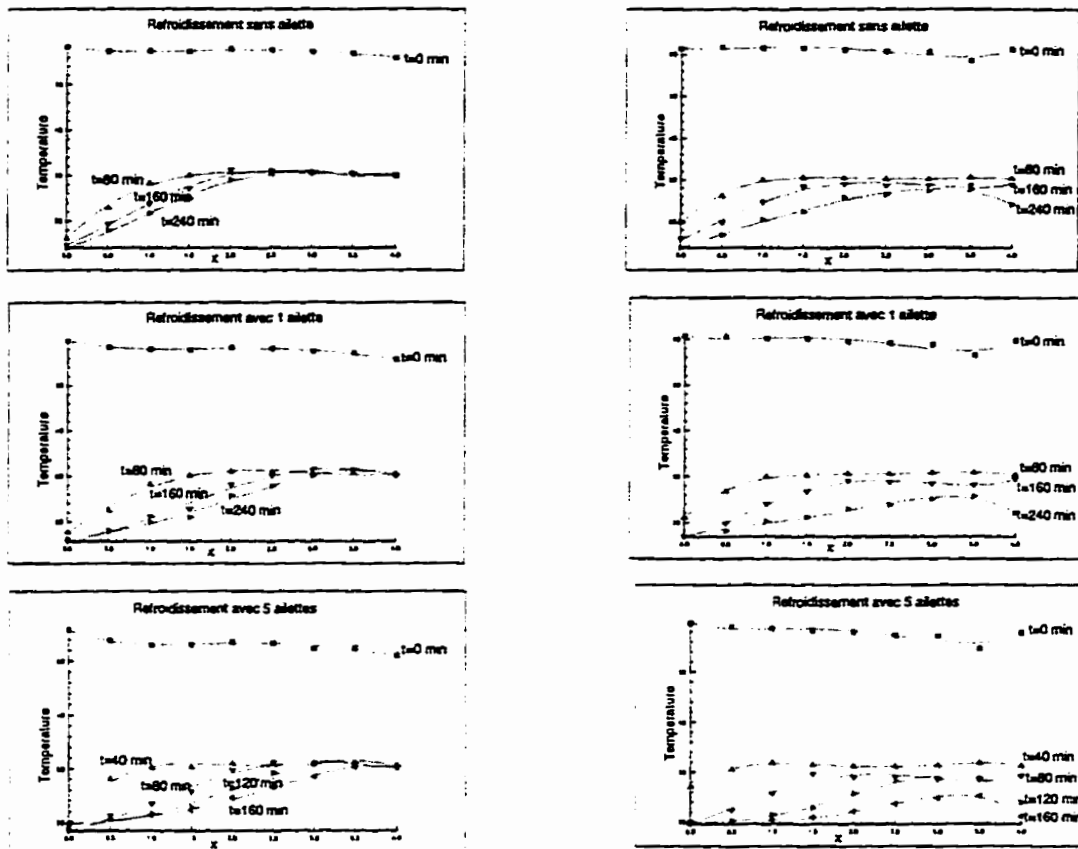


Figure 3.14 Les profils de température pour la solidification avec les ailettes

La comparaison des profils de température d'une plaque sans ailette avec ceux d'une plaque ayant des ailettes montre que ceux-ci, au refroidissement, sont aussi différemment répartis dans le temps et dans toute l'épaisseur de la paraffine, au lieu d'être concentrés à un même endroit sur les courbes pour une plaque simple, soit dans le milieu de la paraffine (Figure 3.14). Ce qui prouve l'apport des ailettes dans l'accélération de la solidification.

b) Résultats : la fraction liquide

La fraction liquide pendant la solidification n'a pas été déterminée jusqu'à la fin de l'expérience, ce phénomène étant très long à cause des facteurs déjà évoqués. Néanmoins, l'effet des ailettes se manifeste, puisque, avec cinq ailettes, on a effectué le refroidissement jusqu'à 95% de déstockage.

Si, pour la plaque sans ailette, au refroidissement, les profils indiquent une chute de température dans toute la paraffine et que cette température vient se stabiliser près du point de changement de phase, on a une diminution progressive de la température pour la paraffine se trouvant le long de la plaque. Dans le reste de la cavité, loin de la plaque, la température reste proche du point de fusion, sans grand changement pour un long intervalle de temps. Pour la plaque avec les ailettes, on constate que le comportement le long de la plaque et loin de cette dernière est presque le même, et qu'il se produit une diminution graduelle de la température dans toute la paraffine. C'est ce qui explique une solidification rapide. Les ailettes augmentent l'échange de chaleur par conduction. Cette conduction est prédominante dans la solidification. Ce comportement, dans le cas de cinq ailettes, est presque identique dans toute la cavité, alors qu'il y a des différences pour une plaque sans ailette entre la partie inférieure et la partie supérieure, comme on l'a mentionné plus haut.

TABLEAU 3.3 LA DURÉE DU CYCLE EN FONCTION DE LA TEMPÉRATURE

Température	40 C	50 C	60 C	60 C(1 ailette)	60 C (5 ailettes)
Fusion	385 min.	180 min.	150 min.	120 min.	90 min.
Solidification					150 min.

#### 4. CONCLUSION

L'objectif principal de ce travail de recherche était de concevoir d'un élément de stockage par chaleur latente en vue de voir les problèmes que pourrait susciter son exploitation. Ensuite on voulait faire une étude expérimentale sur le cycle de fusion-solidification de la paraffine afin de comprendre les phénomènes physiques qui en découlent.

Dans ce rapport, un aperçu général des travaux antérieurs a permis de voir les progrès dans la conception de divers appareils de stockage. L'analyse des phénomènes de convection et de conduction a été effectuée, ainsi que les études sur les dimensions du contenant. L'utilisation des ailettes, leur forme, leurs dimensions et leurs arrangements ont été étudiés pour voir leur impact sur la fusion et la solidification des MCP. Il a aussi été question des différents types de MCP.

À deuxième étape où on a vu la conception de l'élément de stockage, on a choisi la forme rectangulaire. Les dimensions prises sont basées sur le rapport largeur/profondeur afin d'éliminer les effets de la tridimensionnalité apparaissant lors de l'écoulement par gravitation. Ce rapport est de 15. Les parois de l'élément sont faites en plexiglas pour une meilleure visualisation. Mais le problème est qu'à 60 degrés, les fuites devenaient intenses. La plaque qui assure l'échange de la chaleur est en aluminium. Elle est amovible de façon à permettre de la remplacer. On a utilisé trois plaques : la première sans ailette, la deuxième avec une ailette et la troisième avec cinq ailettes.

Dans la troisième partie, lors du stockage, les effets de la dilatation de la paraffine ont provoqué des fuites. Il fallait non seulement prévoir l'espace de l'expansion qui est de 10% pour la paraffine, mais prévoir un petit trou pour l'échappement de l'air se trouvant dans l'espace réservé à l'expansion lors de la fusion. Ceci a causé des fuites à la suite de la pression qui monte pendant la fusion.

Dans la réalisation des expériences, on a vu que le degré de la température joue beaucoup sur la fusion. Plus on monte à de grandes températures, plus la fusion est rapide. La vitesse de la fusion est fonction de la température. À de hautes températures (ici 60 degrés), les mouvements de convection naturelle sont bien visibles lorsque le front de fusion est très proche de la plaque. Le choix de la température à soumettre à la plaque doit être fait compte tenu de plusieurs critères. Faire la fusion à une très haute température serait un gaspillage d'énergie, puisque la température sensible stockée après la fusion n'est pas grande. Et pour monter la température à un écart très grand après la fusion, cela consomme beaucoup d'énergie.

Le choix des dimensions du contenant (l'épaisseur de la paraffine dans le contenant) doit être coordonné avec la température de la plaque. À 40 degrés, la fusion prenait beaucoup de temps quand le front de fusion arrive dans le fond, du côté opposé de la plaque chauffante. Le flux de chaleur pour fondre la paraffine devenait faible. Mais, à 60 degrés, la fusion était très rapide. Donc, il faut optimiser le taux de fusion, qui est proportionnel à la température de la plaque, et trouver un équilibre entre celui-ci et les pertes en énergie qui s'opère, pour atteindre un certain degré de température après la fusion.

Les ailettes jouent un rôle important pendant la fusion. Mais l'ailette inférieure est plus importante, car c'est dans cette partie que la fusion est très faible. Pour cela, une seule ailette se trouvant dans la partie inférieure de la plaque donne des résultats satisfaisants. La fusion dans la partie supérieure de la cavité est assurée en grande partie par la convection naturelle. On pourrait aussi faire la conception de la plaque à plusieurs ailettes, mais avec des ailettes de longueurs différentes. La plus longue devrait être fixée dans la partie inférieure et la plus courte en haut, le tout prenant forme d'un escalier. On favorise la conduction avec les ailettes, mais aussi la convection par la paraffine qui s'échappe au-delà de chaque ailette.

L'autre avantage est qu'on peut coordonner la température aux les ailettes. C'est à dire qu'on ne chauffe pas à une très haute température, mais grâce aux ailettes, la fusion se fait rapidement. Avec la conductivité, le flux de chaleur de l'ailette atteint facilement toute la cavité.

La solidification est très lente après la formation de la couche de paraffine solide sur la plaque, et la paraffine possède une faible conductivité. C'est ici que le nombre d'ailettes joue un grand rôle dans le déstockage.

Quand on amorce le déstockage, la température dans toute l'enceinte chute presque en même temps, à cause des mouvements de la convection naturelle, et ceci, dans un très court laps de temps. Cela démontre que la chaleur sensible accumulée par la paraffine après la fusion est faible, d'où la préférence à ne pas chauffer à une grande température, à moins de choisir un grand taux de fusion. La température vient se stabilise près du point de fusion. Et commence une longue solidification.

Quant au caloporteur utilisé, l'eau, il a été choisi pour sa grande chaleur spécifique, mais il y a eu beaucoup de fuites. Il vaudrait mieux chauffer avec un autre caloporteur comme l'air. Mais l'utilisation de l'eau constitue en soi un test d'étanchéité. Il y a des fuites d'eau vers la paraffine, sous la plaque, puisque la pression est beaucoup plus forte du côté de l'eau que celui de la paraffine.

Pour l'élément de stockage, les parois de l'enceinte peuvent être faites d'un matériau qui supporte beaucoup plus l'humidité et la chaleur, et il faut laisser seulement les facettes de la visualisation en plexiglas. Ceci permettrait par exemple, de monter les parois de l'enceinte par soudure, ce qui résoudrait le problème d'étanchéité.

## ANNEXE

### LISTE DES SYMBOLES

$T_m$ : température moyenne

$d$ : incertitude

$T_i$ : température à l'instant  $t$

$n$ : nombre total des températures enregistrées

$T$ : température imposée à la plaque

$g$ : gravité

$T_s$ : température sur la plaque

$T$ : température de fusion

$L$ : hauteur de la paraffine

$\nu$ : viscosité cinématique

$\beta$ : coefficient d'expansion

$Pr$ : nombre de Prandtl

$Gr$ : nombre de Grashoff

$Ra$ : nombre de Rayleigh

$C_{ps}$ : chaleur spécifique de la paraffine à l'état solide (J/kg.K)

$C_{pl}$ : chaleur spécifique de la paraffine à l'état liquide (J/kg.K)

$T_1$ : température au temps  $t=0$

$T_2$ : température finale

$T_f$ : température de fusion

$L_f$ : chaleur latente (J/kg).

$M$ : masse

$Q_s$ : quantité de chaleur stockée

$h$ : coefficient de convection naturelle entre la paraffine solide et la paraffine liquide

$K_{ps}$ : coefficient de conductivité de la paraffine solide

$X_s$ : épaisseur de la paraffine solidifiée

$q^1$ : flux de chaleur par convection

$T_{\infty}$ : température de la paraffine liquide

$T_s$ : température de l'interface solide-liquide

$x$ : épaisseur de la paraffine de la paroi chauffée à la  
paroi froide

$y$ : Profondeur de la cavité

$H$ : Hauteur de la cavité



## BIBLIOGRAPHIE

- [1]. Bardon J.P., Vrignaud E., et Delaunay, (Aout-Séptembre 1979), *Étude expérimentale de la fusion et de la solidification periodique d'une plaque de paraffine*, Revue générale de thermique, Laboratoire de thermocinetique de Nantes, France, Vol. 30, N. 213 - 213, pp 501-510.
- [2]. Bénard C., Gobin D., Martinez F., (Novembre 1985), *Melting in rectangular enclosures : experiments and numerical simulations*, Journal of Heat Transfer, ERA 1028 - C.N.R.S., France, Vol. 107/795
- [3]. Bénard C., Gobin D., Gutierrez M., (octobre 1980), *Experimental results of a latent -heat solar-roof, used for breeding ckickens*, Solar energy, C.N.R.S/E.S.E., France, Vol. 26, N. 4, pp 347 - 359.
- [4]. Delaunay D., (Aout-Septembre 1991), *La thermique des Materiaux transferts de chaleur et caracterisation en cours de transformation*, Revue Générale de Thermique, Vol. 30, N. 356 - 357, pp 517 - 529
- [5] Eugene A. Wubben, Howard N. Shapiro, Ron M. Nelson, (Novembre 1989), *Production and storage of ice for cooling buildings*, Journal of solar energy engineering, Iowa Departement of natural resources, Des Moines and Departement of mechanical engineering, Iowa state university, Ames, Iowa, USA, Vol. 111, pp 338 - 344
- [6]. Frank P. Incropera, David P. DeWitt, (1990), *Funamentals of Heat and Mass Transfer*, School of Mechanical Engineering Prudue University, P 919.
- [7]. Gauchette M., Maye J.P., (Aout-Séptembre 1979), *Modèle dynamique de stockage thermique mixte (Chaleur sensible et chaleur latente) à basse température*, Revue générale de thermique, Laboratoire propre du C.N.R.S., France, Vol. 30, N. 212 -213, pp 537 - 541.

- [8]. Gobin D. (1984), *Changement d'état solide-liquide : Evolution temporelle du couplage entre la convection naturelle dans la phase liquide et la conduction dans la phase solide. Étude numérique et expérimentale*, Thèse de doctorat, Université Pierre et Marie Curie, Paris, France, p.315
- [9]. Hasan A., (fevrier 1994), *Phase change material energy storage system employing palmitic acid*, Solar Energy, Birzeit University, west Bank, Israel, Vol. 52, N. 2, pp 143 - 154
- [10]. C. J Ho, R. Viskanta, (Février 1984), *Heat transfer during melting from an isothermal vertical wall*, Journal of heat transfer, School of mechanical engineering, Purdue University, West Lafayette, Ind. 47907, USA, Vol. 106, pp 12 - 19
- [11]. Hongjun Li, Hsieh C.K., Goswami D.Y., (Mai, 1994), *Source and sink method of solution two-dimensional phase change for energy*, Journal of Solar energy engineering, Université de Floride, Vol. 116, Numéro 2, pp 100 - 107.
- [12]. John A. Duffie, William A. Beckman, (1974), *Solar Energy Thermal Processes*, Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin - Madison, Madison, Wisconsin, 386 p.
- [13]. Karki K. C., Sathyamurthy P.S., Patankar S.V., (Mai 1992), *Natural Convection in a partitioned cubic enclosure*, Journal of Heat Transfer, Université du Minnesota, Minneapolis, USA, Vol. 114, N. 2, pp 410 - 417
- [14]. Kengo Sagagushi, (1990), Departement of Machanical Engineering, Faculty of Engineering, Kumamoto University, Yoshinubo Sakomoto, (1990), Kawassaki Heavy Industry, Japan, *Effect of convection on Melting of Phase change Material around a finned tube*, Heat Transfer - Japanese Reasearch, Vol. 19, N. 5, pp 474 - 491.
- [15]. Kengo Sasagushi, (1990), Departement of Mechanical Engineering, Kumamoto University, Massamichi Yoshida, Ariake National College of Technology, Shuji Nakashima, Nikki Co. Ltd Japan. *Heat transfer characteristics of a latent heat thermal energy storage unit*

*with a finned tube (effects of fin configuration)*, Heat transfer - Japanese Research, Vol. 19, N. 1, pp 11 - 29, N. 7, pp 619 - 637

[16]. Kozo Katayama, Akio Saito, Yoshio Utaka, Akishiro Saito, Hideo Matsui, Hiromichi Maekawa et Saifullah A.Z.A., (avril 1981), *Heat transfer characteristics of the latent heat thermal energy storage capsule*, Solar energy, Tokyo Institute of technology, Japan, Vol. 27, N. 2, pp 91 - 97.

[17]. Lacroix M. (Avril 1993), *Numerical simulation of Shell-and-tube latent Heat thermal Energy storage unit*, Solar Energy, Université de Sherbrooke, Québec Canada, Vol. 50, N. 4, pp 354 - 367.

[18]. Lou D. Y.S., (avril 1982), *Solidification process in glauber salt mixture*, Solar Energy, Université du Texas à Arlington, USA, Vol. 30, N.2, pp 115 - 121

[19]. Makoto Nishimura, Yoshiyuki Bando et Michio Kuraishi, (avril 1989), *Direct solar energy storage using a semitransparent phase change material*, Heat Transfer - Japanese Research, Departement of applied chemistry, Gifu University, Japan, Erich W.P. Hahue, Institut für Thermodynamik und wärmetechnik, Universität Stuttgart, Allemagne, Vol. 18, N. 2, pp 68-80

[20]. Marshall R., Diestsche C., (Mars, 1982), *Comparisons of paraffin wax storage subsystem models using liquid heat transfer media*, Solar energy, Université Cardiff, pays de Gales, et l'université de Karlsruhe, Allemagne, Vol. 29, N. 6, pp 503 - 511.

[21]. Myrum T.A., Thuma S., (1992), *Freezing of paraffin flow downstream of an abrupt expansion*, Heat Mass Transfer, Mechanical Engineering Departement, Louisiana state University, Baton Rouge, La 70803, USA, Vol.35, N.2, pp 421 - 431

[22]. Pantaloni J., Larimi M., Guenoche H., Desaulty M., Boyer J., Petit J.P., et Huetz J., (Aout-septembre 1979), *Aperçu sur les possibilités de stockage thermique à haute température par Chaleur Latente*, Revue générale de thermique, Université de Provence, France, Vol. 30, N. 212 - 213, pp 475 - 486.

[23]. Raw W. Y., Lee S. L., (juillet 1990), *Applications of weighting function scheme on convection-conduction phase change problems*, Heat Mass Transfer, Departement of power Mechanical Engineering, National Tsing-Hua University, Hsinchu, Taiwan, Republic of China, Vol.34, N. 6, pp 1503 - 1513

[24]. Shaichiro Fukusako, Masahiko Yamada, et Myoung-Huan Kim, (Décembre 1993), *Melting Heat Transfer of liquid ice in rectangular cavity with a heated vertical wall*, Heat Transfer - Japanese Research, Departement of Mechanical Engineering, Hokkaido University, Japan, Vol. 22, N. 3, pp 250 - 268

[25]. Stephen B. Marks, (Janvier 1982), *The effect of crystal size on the thermal energy storage capacity of thickened glauber's salt*, Solar energy, Instute of Energy conversion, Delaware, U.S.A., Vol. 30, N. 1, pp 45 - 49.

[26]. Tomohiro Akiyama, Yoshio Ashizawa, Jun-ichiro Yagi, (octobre 1992), *Storage and release of heat in single spherical capsule containing phase change material with a high melting point*, Heat transfert - Japanese Reseach, Reseach Institute of mineral dressing and Metallurgy Tohoku Uniersity, Japan, Vol. 21, N. 2, pp 199 - 217.

[27]. J.P. Holman, 1989, *Experimental Methods For Engineer*, Professor of Mechanical Engineering Southern Methodist University (U.S.A), P. 549.