

Visa du chef de département  
Sciences et Technologies  
Signature:.....  
Date:.....

# REGULATION THERMIQUE DES CELLULES PHOTOVOLTAÏQUES PAR UN MATERIAU A CHANGEMENT DE PHASE

Mémoire de fin d'études pour l'obtention du diplôme  
de Master académique  
en «*Installations Energétiques*»

Encadreur: M.BENLEKKAM.  
M.A  
Signature: .....  
Date: .....

Réalisé par :  
Étudiante : BELLABBAS  
Fatiha  
Signature : .....  
Date : .....

Membres du jury

M. HAMDI. A	MAA	Président
M. ZEBBER. DJ	Professeur	Examineur
M. BENLEKKAM. M.A	MAA	Encadreur

## Liste des tableaux

Tableau 2.1	Distinction des points forts et faibles des composés inorganiques.....	10
Tableau 2.2	Distinction des points forts et faibles des composés organiques.....	11
Tableau 2.3	Distinction des points forts et faibles des composés eutectiques.....	11
Tableau 2.4	propriétés thermiques de certains MCP.....	12
Tableau 3.1	Les propriétés du matériau à changement de phase RT25.....	36
Tableau 3.2	Propriétés de l'aluminium.....	36

## Liste des figures

Figure 2.1	Famille de matériaux des MCP.....	9
Figure 2.2	Le transport de produits alimentaires .....	14
Figure 2.3	Récipients transporter sang et organes qui contiennent MCP .....	14
Figure 2.4	nouvel accumulateur de chaleur solaire.....	15
Figure 2.5	L'isolation des bâtiments.....	16
Figure 2.6	matériau a changement de phase RT.....	16
Figure 2.7	matériau a changement de phase SP.....	17
Figure 3.1	Représentation de l'enthalpie en fonction de la température.....	18
Figure 3.2	Courbe de refroidissement lent d'un métal pur en fonction du temps.....	19
Figure 3.3	Capacité calorifique incluant l'effet de la chaleur latente dans un petit intervalle $2\Delta T$ au voisinage de $T_f$ .....	22
Figure 3.4	Types de maillage utilisé par "FLUENT".....	25
Figure 3.5	Traitement près des parois dans le "FLUENT".....	26
Figure 3.6	Structure de base du code "FLUENT".....	27
Figure 3.7	Volume de contrôle pour la résolution en volumes finis.....	29
Figure 3.8	Schéma unidimensionnel illustrant un volume élémentaire entourant un nœud P.....	30
Figure 3.9	Schéma représentatif de l'algorithme SIMPLE.....	33
Figure 3.10	structure des conditions aux limites pour le système simulé.....	35
Figure 4.1	Comparaison entre les contours de température prédite numériquement et la température mesurée.....	40
Figure 4.2	Comparaison entre les températures prédites par le modèle 2D présente et les données de Haung et al.....	41
Figure 4.3	Fig.4.3- La position des points de mesure de la température dans le système PV/MCP.	41
Figure 4.4	les isocontours de l'évolution de la température au cours du temps.....	42
Figure 4.5	les isocontours fraction liquide.....	43
Figure 4.6	La variation de température avec le temps de la point inférieure section au point de section supérieure au centre du système PV / PCM pour des intervalles d'ailettes variées.....	46
Figure 4.7	La température de la surface du front mesurée pour des systèmes avec différents ailettes.....	47

## Sommaire

Sommaire	
Nomenclature	
Introduction général .....	9
<b>Chapitre 1 Recherche bibliographique</b>	
Recherche bibliographique.....	10
<b>Chapitre 2 Les matériaux à changement de phase</b>	
Introduction .....	13
2.1 Les types des matériaux à changement de phase (MCP) .....	13
2.1.1 MCP solide-liquide.....	14
2.1.1.1 Les MCP inorganiques.....	14
2.1.1.2 Les MCP organiques.....	14
2.1.1.3 Les MCP eutectiques.....	15
2.2 Quelques phénomènes ayant un impact sur l'efficacité du stockage.....	16
2.2.1 La surfusion.....	16
2.2.2 La surchauffe.....	16
2.2.3 La dilatation.....	16
2.3 Propriétés des matériaux à changement de phase.....	17
2.3.1 Considérations thermiques.....	17
2.3.2 Propriétés physiques.....	17
2.3.3 Considérations cinétiques.....	17
2.3.4 Considérations de stabilité et de compatibilité avec les autres matériaux.....	17
2.3.5 Considérations chimiques.....	17
2.3.6 Considérations économiques.....	17
2.4 Applications des MCP .....	18
2.4.1 Le transport de produits alimentaires .....	18
2.4.2 Les applications médicales.....	18
2.4.3 Le stockage de l'énergie thermique .....	19
2.4.4 L'isolation des bâtiments .....	19
2.5 Classe de MCP.....	20
2.5.1 Le matériau a changement de phase RT .....	20
2.5.1.1 Propriétés.....	21
2.5.2 Le matériau a changement de phase SP.....	21
2.5.2.1 Propriétés.....	21
Conclusion.....	21

## **Chapitre 3 Modélisation mathématiques**

### **du phénomène de changement de phase et position du problème**

Introduction.....	23
3.1 Les écoulements avec changement de phase.....	23
3.1.1 Modélisation thermique de la théorie de la Solidification.....	23
3.2 Les méthodes d'analyse des écoulements avec changement de phase .....	25
3.2.1 Méthode à maillage mobile.....	25
3.2.2. Méthode à maillage fixe .....	26
3.2.2.1. Méthode de la capacité effective.....	26
3.2.2.2. Méthode enthalpique .....	28
3.3 Méthodes numériques et présentation du code "FLUENT" .....	29
3.3.1 Méthodes des différences finies .....	29
3.3.2 Méthodes des éléments finis .....	29
3.3.3 Méthodes des volumes finis .....	29
3.4 Maillage .....	29
3.4.1 Qualité du maillage.....	30
3.4.2 Indépendance du maillage .....	31
3.4.3 Traitement près des parois .....	31
3.5 Présentation du code de calcul .....	32
3.5.1 Pré-processeur "GAMBIT" .....	33
3.5.2 Solveur "FLUENT" .....	33
3.5.3 Post-processeur "FLUENT" .....	33
3.6 Méthode de résolution des équations de transport.....	33
3.6.1 Schéma de discrétisation.....	33
3.7 Résolution numérique.....	36
3.7.1 Paramètre de contrôle de la convergence .....	36
3.7.1.1 Critère de convergence .....	37
3.7.1.2 Les paramètres de Sous-relaxation.....	37
3.8 Étapes de résolution du problème .....	37
3.9 Condition aux limites .....	38
3.10 Hypothèses .....	39
3.10.1 Hypothèses générales.....	39
3.10.2 Hypothèses liées au changement de phase.....	40
3.11 Formulations mathématique.....	40
Conclusion.....	42

## Chapitre 4 Résultats et discussions

Introduction.....	44
4.1 Résultats.....	44
4.2 Validation.....	44
4.3 L'effet du nombre des ailettes.....	45
Conclusion.....	52
Conclusion général.....	53
Bibliographique	
Liste des figures	
Liste des tableaux	
Résumé	
Abstract	
ملخص	

## Nomenclature

$c_p$	chaleur spécifique [ $J.Kg^{-1}.K^{-1}$ ]
$f_l$	fraction liquide
$L_s$	chaleur latente de fusion [ $J.Kg^{-1}$ ]
$T$	Température [K]
$T$	variable du temps [s]
$U$	vitesse suivant x [ $m.s^{-1}$ ]
$V$	vitesse suivant y [ $m.s^{-1}$ ]
$Q$	Quantité de la chaleur [ $J.Kg^{-1}.K^{-1}$ ]
$x, y$	coordonnées cartésiennes
$\Lambda$	conductivité thermique [ $W.m^{-1}.K^{-1}$ ]
$H$	Coefficient d'échange [ $W.m^{-2}.K^{-1}$ ]
$\tau_{xx}, \tau_{yy}$	contraintes visqueuses normales [ $N.m^{-2}$ ]
$\tau_{yx}, \tau_{xy}$	contraintes visqueuses tangentielles [ $N.m^{-2}$ ]
$\Delta t$	Pas de temps [s]
$B$	Coefficient de dilatation thermique [ $K^{-1}$ ]

## Indice

S	Solide
L	Liquide
MCP	Matériau changement de phase
N	Nombre des ailettes

## Bibliographie

- [1] Huang, M. J., Eames, P.C, and Norton, B., 2004. Thermal regulation of buildingintegrated photovoltaics using phase change materials, *J. Heat and Mass Transfer*, Vol. 47, No. 12-13, pp. 2715 – 2733;
- [2] Lamberg, P., Lehtiniemi, R., and Henell, A., 2004. Numerical and Experimental Investigation of Melting and Freezing Processes in Phase Change Material Storage, *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 43, pp. 277-287 ;
- [3] Huang, M.J., Eames, P.C., and Norton, B., 2006. Phase Change Materials for Limiting Temperature Rise in Building Integrated Photovoltaics. *Solar Energy*. 80, pp. 1121- 1130 ;
- [4] Huang, M.J., Eames, P., Norton, B. and Hewitt, N., 2011. Natural convection in an internally finned phase change material heat sink for the thermal management of photovoltaics. *J. Solar Energy Materials and Solar Cells*, 95(7), pp. 1596- 1603;
- [5] Ho, C.J. a, b., Tanuwijava, A.O. a., Chi-Ming, L. b, c, 2012. Thermal and electrical performance of a BIPV integrated with a microencapsulated phase change material layer, *Energy and Buildings* 50 (2012) 331– 338 ;
- [6] Biwole, P. a, b., Eclache, P. c, d., Frederic, K. c,d., 2013. Phase-change materials to improve solar panel’s performance, *Energy and Buildings* 62 (2013) 59–67 ;
- [7] Denis, B., 2011. Contribution au stockage d’énergie thermique en bâtiment, développement d’un système actif à matériaux à changement de phase, Arts et Métiers ParisTech - Centre de Bordeaux I2M-TREFLE ;
- [8] Lewandowski, A., Août 2012. Utilisation des MCP dans le bâtiment 3E ;
- [9] Maha, A., 2004. Nouveaux composants actifs pour la gestion énergétique de l’enveloppe légère des bâtiments, couplage matériaux a changement de phase, superisolation, apports solaires, Université Joseph Fourier, Grenoble ;
- [10] [www.techniques-ingenieur.fr/29/01/2016](http://www.techniques-ingenieur.fr/29/01/2016) ;
- [11] Eduard, O.P., 2013. Thermal energy storage (TES) using phase change materials (PCM) for cold applications, Universitat de Lleida ;
- [12] <http://www.rubitherm.de/30/01/2016> ;
- [13] Lewis. R. W., Morgan. K. 1979. Numerical Methods in Thermal Problems. Proceedings of the 1st Internaitonal Conference, Great Britain: Pineridge Press ;
- [14] Lame. G., Clapeyron B. P. E., Mémoire sur la solidification par refroidissement d'un bloc solide, *Ann. Chen. Phys.* 47, 1831, pp 250-60.,
- [15] Taine, J., Petit, J.P., 1995. Cours et données de bases-transfert de chaleur MDF a isothermes, E d. Dunod ;
- [16] Heim. D., 2002. Modelling building elements with the applcication of phase change materails. *Proceeding o fthe 4th Ph.D. Symposium in Civil Engineering*, pp. 248-255;
- [17] Boumahrat, A., Gourdin., Méthodes numériques appliquées, 1993 Alger. Edition TEC et Doc- PARIS ;
- [18] KORTI, A. N., 2000. Modélisation numérique du transfert de chaleur lors de la solidification des métaux, Mémoire de magister, Université Abou bekrbelkaid, Algérie ;
- [19] Sharma, D. G. R., Krishnan, M., Ravindran, C., 2000. Determination of the rate oflatent heat liberation in binary alloys, *Materials Characterization* 44 (2000) 309–320;
- [20] Hasio, J.S., 1985. An effecient algorithm for finite difference analyses of heat transfer with melting and solidification, *Numerical heat transfer*, (1985) vol 8, 653-666;
- [21] Fluent Incorporated. *Gambit 2.2User’s Guide, Modeling Guide*. Chapitre 4, 2005;
- [22] Fluent Incorporated. *Fluent 6.2User’s Guide, Using the solver*. Volume 3, Chapitre 26, 2005;
- [23] Patankar, S. V., 1980. *Numerical Heat transfer and Fluid Flow*, McGraw-Hill Book Company;
- [24] Roache, P. J., 1982. *Computational fluid dynamics*. Albuquerque, Hermosa Publishers, 446 p. (ISBN 0-913478-05-9);
- [25] Buchmann, P., 1995. Modélisation numérique de la convection naturelle en cavité et d’écoulements libres de jets : Application à la climatisation d’un local de grand volume, Thèse présentée au conservatoire des arts et métiers, Pagination multiple ;
- [26] Theodosiu, C., 2001. Modélisation des Systèmes Techniques dans le Domaine des Equipements des Bâtiments à l’aide des Codes de type CFD, Thèse soutenue devant l’INSA de Lyon ;
- [27] Launder, B. E., Jones, W. P., 1972. The Prediction of Laminarization with a Two-Equation Model of Turbulence, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 15, pp. 301-314;
- [28] Launder, B. E., Spalding, D. B., 1974. The numerical computation of turbulent flows. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 3, pp. 269-289;
- [29] Versteeg, H. K., Malalasekra, W., 1995. *An introduction to computational fluid dynamics*, Essex, Longman Scientific & Technical;
- [30] Leonard, A., 1974. Energy cascade in large-eddy simulations of turbulent fluid flows, *Adv. In Geophysics*, Vol. A, n°18, pp. 237-248;
- [31] Lepers, S., 2000. Modélisation des écoulements de l’air dans les bâtiments à l’aide des codes CFD, contribution à l’élaboration d’un protocole de validation, Thèse de doctorat de l’INSA de Lyon ;
- [32] Leonard, B. P., 1979. A stable and accurate convective modeling procedure based on quadratic upstream interpolation, *Computer Methods Applied in Mechanical Engineering*. 19 (1), pp. 59-98;

- [33] Nehari, T., Benlekkam, M., Nehari, D., 2016. The Effect of Inclination on the Passive cooling of the solar PV panel by using Phase change Material. INTERNATIONAL JOURNAL of RENEWABLE ENERGY RESEARCH. Vol.6, No.1;

# **Conclusion générale**

## Conclusion générale

L'objectif de ce travail est d'étudier la régulation thermique des panneaux solaires photovoltaïques à l'aide d'un matériau à changement de phase. La simulation numérique du système a été effectuée pour déterminer l'évolution de la température au cours du temps pour cinq configurations géométriques différentes commençant par un système PV/MCP sans ailettes et en augmentant le nombre des ailettes à chaque fois jusqu'à quatre. La simulation se fait par le code de calcul **Fluent**. Les équations qui régissent le problème sont les équations de conservation de la masse (continuité), de la quantité de mouvement et d'énergie. Pour le phénomène de changement de phase la méthode enthalpique a été adoptée.

Les résultats obtenus montrent l'influence du nombre des ailettes sur l'élévation de la température du système PV/MCP. L'utilisation des ailettes dans un système PV/MCP sous un flux de chaleur de  $750 \text{ W/m}^2$ , et une température ambiante de  $20^\circ\text{C}$  permet de maintenir la température du front du système de l'ordre de  $30^\circ\text{C}$  pendant 150 min pour une configuration à quatre ailettes, et qui dépasse cette valeur dans un système sans MCP qui atteint cette valeur après 5 min sous les mêmes conditions initiales.

L'amélioration de la performance thermique obtenue en utilisant des ailettes dans l'enceinte du MCP est importante. Les ailettes permettent une distribution de température plus uniforme au sein du système PV/MCP et soit maintenues. Les flux convectifs naturels dans le MCP fondu augmentent le transfert de chaleur dans le MCP, et d'améliorer encore la capacité de l'effet de contrôle thermique sur le PV. Cependant, l'augmentation du nombre d'ailettes peut limiter le mouvement de PCM fondu.

Finalement, les résultats obtenus ont rencontré un grand succès concernant l'amélioration des performances thermique du système PV/MCP.

# **Introduction générale**

## Introduction générale

Généralement, toutes les formes des énergies du monde sont d'origine énergie solaire. Le pétrole, le charbon et le gaz naturel. Le soleil peut être classé comme une source d'énergie très importante. Ainsi, tous les scientifiques ont convenu que l'énergie solaire est l'une des meilleures solutions pour l'approvisionnement en énergie dans de nombreuses régions du monde. L'avantage d'être gratuite, réside en la production d'énergie propre qui ne nuit pas à l'environnement et dispose de stocks incommensurables.

Au cours des dernières années, la demande en énergie électrique a augmenté en raison de la croissance de la consommation dans différents domaines industriels ou domestiques, la satisfaction en énergie électrique reste un axe de recherche très intéressant et pour vaincre cette demande plusieurs chercheurs ont basé leurs travaux sur l'amélioration de la production de l'électricité par les cellules photovoltaïques qui convertissent le rayonnement solaire en courant électrique.

L'élévation de la température associée à l'exploitation des cellules PV réduit sa puissance électrique. Comme ces dernières sont caractérisé à  $1000 \text{ W/m}^2$  et  $25^\circ\text{C}$ , en maintenant la température de la cellule à  $25^\circ\text{C}$  peut conserver son efficacité. L'utilisation d'un matériau à changement de phase intégré à un module PV peut réguler la montée de la température du PV, qui absorbe l'énergie sous forme de chaleur latente à une température de transition de changement de phase constante. Les MCP en phase de transition solide-liquide près de  $25^\circ\text{C}$  peut absorber l'énergie thermique excédentaire au cours du changement de phase, qui, autrement et peut maintenir la température de fonctionnement de PV à ou près de  $25^\circ\text{C}$ .

L'étude du phénomène de changement de phase d'un matériau sous l'effet de la convection a été un sujet d'un grand nombre de travaux. L'engouement pour l'étude de ces problèmes vient de nombreuses applications pratiques où le changement de phase peut être ensuite utilisé, principalement dans les systèmes de stockage d'énergie par chaleur latente, l'isolation des bâtiments. Bien que l'utilisation au refroidissement des cellules photovoltaïques (PV).

Il existe plusieurs techniques du refroidissement, refroidissement avec utilisation de systèmes de ventilation, refroidissement par conduites d'eau refroidie et refroidissement par un matériau à changement de phase peut conduire à une augmentation significative du rendement de conversion des cellules photovoltaïques. Récemment, les matériaux à changement de phase (MCP) ont été mis au point et utilisés pour réguler l'augmentation de température dans un système PV. Ces matériaux absorbent l'énergie sous forme de chaleur latente à une température constante.

L'objectif de ce travail est d'étudier le refroidissement des cellules photovoltaïques par un matériau à changement de phase. Le présent mémoire comporte quatre chapitres :

Le chapitre un est une synthèse bibliographique sur les différentes utilisations de Matériaux à Changement de phase.

Généralité sur matériaux à changement de phase on présentée dans le deuxième chapitre

Une modélisation des parois et la simulation numérique associée à l'aide du logiciel **Fluent**. Le problème et les équations gouvernantes pour la résolution numérique ainsi que la méthode utilisée sont présentée dans le troisième chapitre.

Dans le dernier chapitre sont présentés les différents résultats de la simulation. Ainsi l'évolution du front de fusion pour le matériau utilisé.

Finalement, une conclusion générale.

# **Chapitre 1**

## **Recherche bibliographique**

## Introduction

Les matériaux à changement de phase sont des matériaux intelligents qui reposent sur l'application d'un principe physique simple : ils se liquéfient en absorbant de l'énergie à partir d'une certaine température caractéristique pour chaque type de matériau (en général fixé par leur formulation) et restituent cette énergie lorsque la température de leur environnement est inférieure à celle-ci.

En raison de la bonne capacité de stockage d'énergie avec la grande chaleur latente, le matériau à changement de phase (MCP) peut être appliqué dans différents domaines : comme stockage d'énergie solaire, pour améliorer le confort thermique dans les bâtiments.

L'utilisation des MCP pour augmenter l'inertie thermique des bâtiments est une idée relativement ancienne puisque cette application apparaît dès 1940.

Les premiers systèmes utilisés sont les systèmes passifs où les matériaux à changement de phase sont incorporés dans les matériaux du bâtiment.

Beaucoup de chercheurs ont étudié la performance thermique de paroi avec MCP (plancher, plafond et mur vertical) par des expériences et simulations pour les constructeurs de bâtiments afin de limiter les consommations d'énergie dans les bâtiments et réaliser le confort thermique.

Dans ce qui suit, on présentera quelques travaux liés aux objectifs de la présente étude, et qui concernent le comportement thermique dans une paroi intègre du MCP.

**Huang et al [1]** ont fait une étude numérique validée expérimentalement pour le refroidissement d'une unité photovoltaïque utilisant un MCP dans une enceinte rectangulaire liée au PV, ils ont maintenu la température de la surface frontale inférieure à 40°C pendant 80 min, avec un MCP de température de fusion de 32°C, pour des cellules photovoltaïques caractérisées en 1000W/m<sup>2</sup> par une température d'opération optimale 25°C, en raison d'une faible conductivité thermique du MCP, des ailettes internes ont été utilisées pour bien répartir la température au sein du MCP, ce qui résulte une réduction significative de la température du PV.

**Lamberg et al [2]** ont fait une étude sur l'importance des matériaux à changement de phase dans le stockage de l'énergie thermique. Ils ont utilisé un logiciel de simulation FEMLAB pour la résolution du problème, en utilisant la méthode enthalpique et la méthode de la capacité calorifique effective pour la modélisation du changement de phase. Leurs résultats validés ont été obtenus par des données expérimentales. Et ont remarqué que les deux méthodes numériques ont donné de bonnes estimations pour la distribution de température de stockages dans les deux processus de fusion et de solidification. Cependant, ils ont conclu que la méthode de la capacité calorifique

effective avec une température de transition ( $\Delta T = 2^\circ\text{C}$ ) était la méthode la plus efficace quand on la compare aux résultats expérimentaux.

**Huang et al [3]** ont présenté une étude expérimentale d'un matériau à changement de phase pour l'isolation thermique d'un dispositif photovoltaïque. Ils ont comparé deux types de matériaux à changement de phase différents GR40 à une température de fusion de  $43^\circ\text{C}$  et RT25 avec température de fusion de  $26,6^\circ\text{C}$ . Les résultats montrent que l'utilisation RT25 réduit la température du front du système PV / PCM à moins de  $29^\circ\text{C}$  pendant 130 minutes sous  $750\text{W}/\text{m}^2$  et une température ambiante de  $23^\circ\text{C}$ , tandis qu'en cas du MCP GR40 le contrôle thermique n'est pas aussi efficace en comparaison avec le RT25. Finalement, ils ont conclu que les matériaux à changement de phase se trouvent capables de contrôler l'élévation de la température des dispositifs photovoltaïques.

**Huang et al [4]** ont présenté une évaluation expérimentale des effets de la convection et l'isolation cristalline dans un MCP en fonction de l'efficacité du transfert de chaleur au sein du système PV / MCP à ailettes. Les performances thermiques de MCP avec l'isolation cristallisation pour les différents arrangements d'ailettes internes sont présentées. Ils ont conclu que l'ajout d'ailettes internes permet d'améliorer le contrôle de la température d'un système PV/PCM.

**Ho et al [5]** ont étudié les performances thermiques et électriques d'un système PV/MCP pour trois conditions climatiques différentes, ils ont constatés que l'utilisation d'une couche MCP microencapsulé augmente l'efficacité de PV/MCP de  $0,13\%$  et  $0,42\%$  en été et en hiver respectivement.

**Biwole et al [6]** ont étudié l'utilisation de MCP pour maintenir la température des panneaux proche de la température ambiante. L'objectif principal de l'étude est la modélisation du transfert de chaleur et de masse dans un système composé d'un matériau à changement de phase impure situé à l'arrière d'un panneau solaire (SP). Le terme de flottabilité dans l'équation de conservation dynamique de Navier-Stokes est modifié par un terme supplémentaire qui remet la vitesse à zéro lorsque le MCP est solide. Les contours isothermes et le champ des vitesses sont calculés et comparés avec celles d'un dispositif expérimental. Leurs résultats ont montré que l'ajout de MCP à l'arrière d'un panneau solaire peut maintenir la température de fonctionnement du panneau inférieure à  $40^\circ\text{C}$  pendant 80 minutes sous  $1000\text{ W} / \text{m}^2$ .

## **Conclusion**

Les synthèses des travaux des recherches nous a permis de classer contributions dans les grands axes suivantes :

- La performance thermique de paroi avec MCP.
- L'impact de MCP comme système de refroidissement.
- Autre application du MCP dans différents domaines.

# **Chapitre 2**

## **Les matériaux à changement de phase**

## Introduction

Matériaux à changement de phase (MCP) sont des matériaux avec des capacités améliorées de stockage de chaleur découlant à partir de leur capacité de chaleur latente à une température de changement de phase spécifique.

La particularité de ces matériaux consiste à pouvoir stocker de l'énergie sous forme de chaleur latente. Dans le cadre du bâtiment, les matériaux à changement de phase (MCP) absorbent et libèrent la chaleur en fonction des variations de température, dues aux apports énergie en provenance ou aux pertes ver le milieu, qui font réagir le composé en provoquant « un changement de phase ». Le milieu localisé de l'autre côté de la paroi où est intégré le MCP ne ressent pas l'effet de la variation de température.

L'utilisation de ces matériaux dans différentes formes et applications telles que dans des panneaux muraux de construction et des plaques de MCP pour le contrôle thermique, et utilisé dans le bâtiment fait l'objet d'études très poussées pour les constructeurs de bâtiments afin de limiter les consommations d'énergie dans les bâtiments.

### 2.2 Les types des matériaux à changement de phase (MCP)

Parmi les MCP subissant cette transformation, nous avons trois groupes de matériaux : les inorganiques, les organiques et les eutectiques.

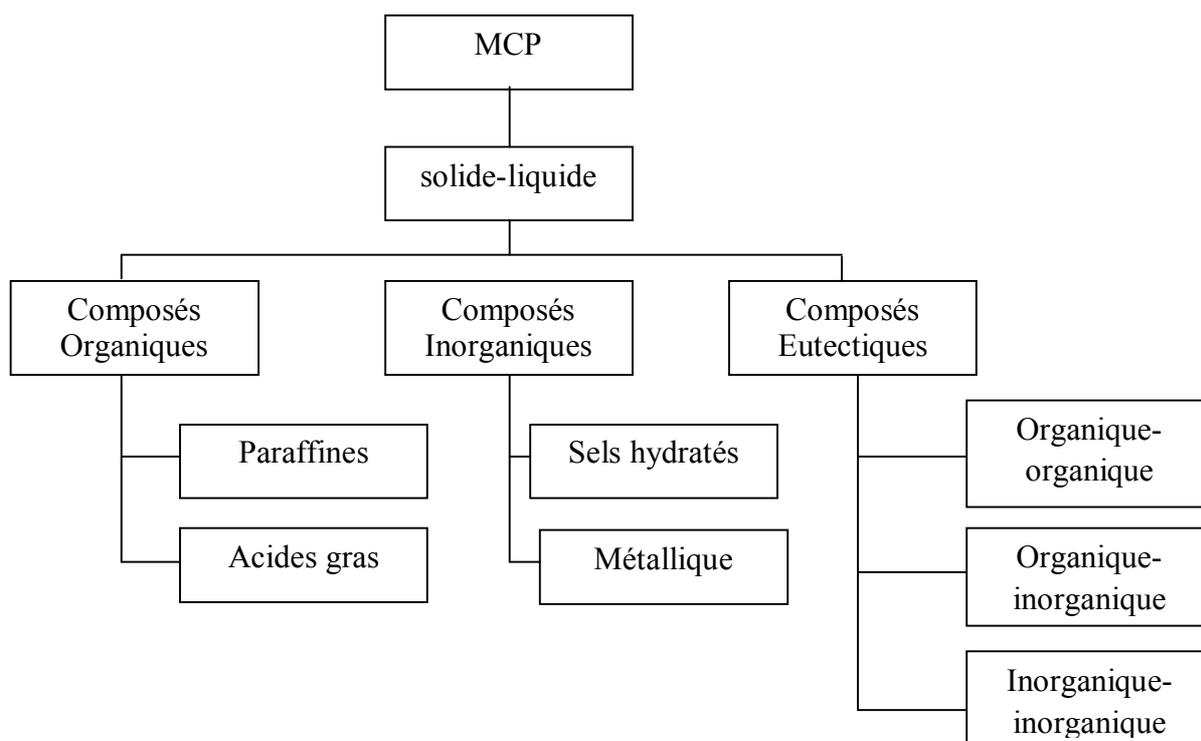


Fig.2.1- Famille de matériaux des MCP.

### 2.2.1 MCP solide-liquide

Les matériaux à changement de phase liquide-solide sont les plus prometteurs pour une application de stockage d'énergie sous forme de chaleur. En effet, ils ont une bonne chaleur de fusion sur une faible plage de températures. Pour ces raisons et par le fait que les deux autres types de changement de phase ne peuvent satisfaire les critères de sélection de matériaux à changement de phase, ce type de matériau est le meilleur choix possible.

Selon la littérature, trois principaux types de matériaux à changement de phase liquide-solide peuvent être utilisés :

#### 2.2.1.1 Les MCP inorganiques

Les matériaux ou les substances inorganiques ont une température ou une plage de températures de fusion comprise entre  $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$  et  $+1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Les plus utilisés sont : l'eau (température de fusion  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), les solutions aqueuses de sel (température de fusion inférieure à  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), des sels hydratés (température de fusion comprise entre  $5\text{ }^{\circ}\text{C}$  et  $130\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), des mélanges de sels, des mélanges de métaux (température de fusion supérieure à  $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). [7]

**Tableau 2.1- Distinction des points forts et faibles des composés inorganiques. [8]**

Points forts	Points faibles
- Importante enthalpie de transition (équivalente à environ deux fois la valeur de celle des composés organiques).	-Corrosion.
- Haute conductivité thermique.	- Phénomène de surfusion important nécessitant l'utilisation d'agent de nucléation afin d'être fiables.
- Plage de fusion étroite.	- Manque de stabilité thermique.
- Faible coût est facilement disponible.	
- Non-inflammable.	

#### 2.2.1.2 Les MCP organiques

Les matériaux ou les substances organiques ont une température ou une plage de températures comprise entre  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  et  $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Les plus utilisés sont essentiellement à base de paraffine, des acides gras et des alcools de sucre. Ils comportent certains inconvénients, comparés aux avantages des MCP inorganiques : ils ont une plus faible conductivité à l'état solide et à l'état liquide, ils ont une chaleur latente de fusion plus faible, ils sont inflammables. Par contre, ils ont des avantages majeurs ; ils sont disponibles dans une large gamme de températures et sont compatibles avec les matériaux conventionnels de construction, ils sont chimiquement stables et ne nécessitent pas l'utilisation d'agents de nucléation. Ils sont non réactifs la plupart du temps et ils sont recyclables. [7]

**Tableau2.2- Distinction des points forts et faibles des composés organiques. [8]**

Points forts	Points faibles
-Pas de corrosion.	- Faible enthalpie de transition.
-Pas de problème de surfusion.	- Faibles conductivités thermiques à l'état solide et à l'état liquide.
- Stabilité thermique et chimique.	- Inflammabilité.
- Compatibilité avec les matériaux conventionnels de construction.	- Exigent un large rapport surface/volume.
- Faible coût.	
- Recyclable.	

### 2.2.1.3 Les MCP eutectiques

Les MCP eutectiques sont des substances composées de plusieurs MCP purs. En général, ce sont des mélanges de MCP organiques et inorganiques (organique-organique, organique-inorganique, inorganique-inorganique). Ils ont deux principaux avantages ; ils ont un point de fusion net similaire à une substance pure et leurs chaleurs latentes volumétriques sont légèrement supérieures à celles des composés organiques purs. Leurs deux principaux inconvénients sont que l'on a peu de données disponibles sur les propriétés thermiques de ces matériaux et ils sont peu utilisés au niveau des systèmes industriels. [7]

**Tableau 2.3- Distinction des points forts et faibles des composés eutectiques. [8]**

Points forts	Points faibles
- Point de fusion net et similaire à une substance pure.	- Peu de données disponibles sur les propriétés thermiques de ces matériaux.
- Chaleur latente volumétrique légèrement supérieur à celui des composés organiques purs.	- Encore peu utilisés au niveau des applications industrielles.

**Tableau 2.4- propriétés thermiques de certains MCP [7].**

Matériaux		Température de fusion (°C)	Enthalpie de fusion (kJ/kg)
PCM Organiques	Eau	0	333.6
	Stéarate de butyle	19	140
	L'acide caprique-laurique	21	143
PCM Inorganiques	KF.4H <sub>2</sub> O	18.5	231
	Mn(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> .6H <sub>2</sub> O	25.8	125.9
	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> .10H <sub>2</sub> O	32	251
PCM Eutectiques	66,6%CaCl <sub>2</sub> .6H <sub>2</sub> O+33,3%Mgcl <sub>2</sub> . 6H <sub>2</sub> O	25	127
	48%CaCl <sub>2</sub> +4,3% NaCl+47,3%H <sub>2</sub> O	26.8	188
	47%Ca(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> .4H <sub>2</sub> O+53%Mg(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> 6H <sub>2</sub> O	30	136

### 2.3 Quelques phénomènes ayant un impact sur l'efficacité du stockage

#### 2.3.1 La surfusion

Quand on refroidit un liquide, on n'observe pas en général la solidification au moment où on atteint la température de fusion. Le matériau peut rester à l'état liquide jusqu'à plusieurs dizaines de degrés au-dessous de la température de changement d'état. Lorsque la solidification se déclenche, elle dégage de la chaleur et si la masse de liquide est assez grande et les échanges de chaleur avec l'extérieur faible, le déclenchement de la solidification provoque une remontée de la température du matériau jusqu'à la température de changement d'état. Ce phénomène réduit l'efficacité thermique des unités de stockage par chaleur latente par rapport à ceux par chaleur sensible. En effet, la décharge de la chaleur (pendant la solidification) a lieu à des températures inférieures de celles où le stockage de cette chaleur a eu lieu. On a donc une différence entre la chaleur absorbée pendant le chauffage est celle restitué pendant le refroidissement. [9]

#### 2.3.2 La surchauffe

La surchauffe d'un corps est le réchauffement de ce corps après son changement d'état (réchauffement de la phase liquide après la fusion du corps et de la phase vapeur après la vaporisation du corps). Si cette surchauffe s'effectue pendant une courte durée, elle n'est considérée que comme une chaleur sensible supplémentaire stockée dans le système. Si elle s'effectue pendant une longue durée, le stockage par chaleur latente perd l'essentiel de ses avantages par rapport au stockage par chaleur sensible. [9]

#### 2.3.3 La dilatation

Pendant le changement de phase de solide à liquide, le matériau change de densité et donc de volume. Cela peut poser problème dans quelques applications en particulier quand on utilise un conteneur fermé qui doit supporter l'augmentation de pression. [9]

## 2.4 Propriétés des matériaux à changement de phase

Un grand nombre de matériaux à changement de phase possèdent une température de fusion dans la gamme de températures (0--120°C) et Une chaleur latente élevée. Cependant les critères vont donc être définis pour faciliter le choix d'un MCP pour une application donnée. [9]

### 2.4.1 Considérations thermiques

- le niveau de la température de changement de phase qui dépend de l'application.
- la valeur de la chaleur latente de fusion (>130 kJ / kg pour être compétitif).
- Une grande conductivité thermique pour des cinétiques de charge et de décharge rapides.
- une faible pression de vapeur pour minimiser les problèmes de tenue en pression des systèmes de stockage.

### 2.4.2 Propriétés physiques

- un faible changement de volume lors du changement d'état pour le dimensionnement du stockage et sa tenue à la pression.
- une grande masse volumique pour que le MCP puisse réaliser un stockage suffisant dans le volume le plus faible possible.
- une fusion congruente lors de l'utilisation d'un corps composé.

### 2.4.3 Considérations cinétiques

- des cinétiques de charge et de décharge rapides.
- pas de surfusion qui détruit la cinétique et altère la possibilité de déstockage.

### 2.4.4 Considérations de stabilité et de compatibilité avec les autres matériaux

- stabilité du corps lors des cyclages thermiques.
- compatibilité avec les matériaux du réservoir de stockage pour chaque phase pour éviter tous les problèmes de corrosion, de réactivité chimique ou électrochimique.

### 2.4.5 Considérations chimiques

- Stabilité chimique des corps avec le temps et avec les niveaux de températures.
- un bon taux de cristallisation.
- Ininflammabilité.
- non-toxicité.

### 2.4.6 Considérations économiques

- un coût raisonnable.
- une bonne disponibilité.

## 2.5 Applications des MCP

### 2.5.1 Le transport de produits alimentaires

Les MCP sont utilisés dans l'industrie agroalimentaire, pharmaceutique et médicale pour limiter au maximum les variations de température que subissent les aliments, les médicaments ou les composants sensibles par exemple le cas du transport du sang. Ils se présentent la plupart du temps sous la forme de petits « sacs » plastiques contenant le matériau choisi, qui sont disposés au plus près du produit à conserver. [10]



Fig.2.2- Le transport de produits alimentaires. [10]

### 2.5.2 Les applications médicales

Dans le secteur médical, une des applications principales est le transport de sang Fig. 6 et organes. Récipients usagés pour ce travail des buts semblables à ceux qui sont expliqués avant. D'autres applications médicales peuvent être des coussinets chauds ou froids pour traiter la douleur locale dans le corps. [11]



Fig.2.3- Récipients transporter sang et organes qui contiennent MCP. [11]

### 2.5.3 Le stockage de l'énergie thermique

Les MCP stockent l'énergie en changeant de phase solide à liquide (fusion) puis ils restituent la chaleur par le changement de phase liquide à solide (solidification). Le choix de MCP le plus approprié est fondé sur un certain nombre de facteurs, incluant le prix, la chaleur latente et la conductivité thermique tant sur les phases liquides que solides.

Un MCP connu pour cette application est l'acétate de sodium tri-hydraté ayant un point de fusion vers 58 °C. Ce matériau a été mis en œuvre dans des conteneurs déplaçables par camions pour stocker la chaleur évacuée d'incinérateurs d'ordures ménagères. La restitution de l'énergie se fait alors à distance sur des stations équipées, à une température d'environ 50 °C.

Les cellules thermiques latentes utilisées pour stocker l'énergie sont également réalisées à partir de MCP. Ces dispositifs sont souvent utilisés en complément d'une installation solaire ou d'un échangeur thermique. [10]



**Fig.2.4- nouvel accumulateur de chaleur solaire. [10]**

### 2.5.4 L'isolation des bâtiments

On retrouve les MCP dans le bâtiment principalement sous la forme de plaque où les MCP sont encapsulés. L'énergie stockée dans les parois (enthalpie de fusion) n'est pas transmise à l'intérieur de l'édifice. En période de surchauffe, le MCP fond et la chaleur est emmagasinée ; lorsque le bâtiment se refroidit, le MCP se solidifie et l'énergie stockée est restituée.

Dans une certaine gamme de températures, le MCP accroît donc l'inertie thermique du bâtiment.

L'emploi de MCP dans un projet de rénovation, là où les demandes de maîtrise de l'énergie, sont les plus forts, apparaissent très prometteur pour réduire les consommations d'été (climatisation) tout en préservant un bon niveau de confort pour les bâtiments à faible inertie. L'emploi dans les structures très légères (construction à ossature bois, habitat préfabriqué, cabanes de chantiers, ..... ) apparaît comme un des débouchés privilégiés de cette technique. [10]

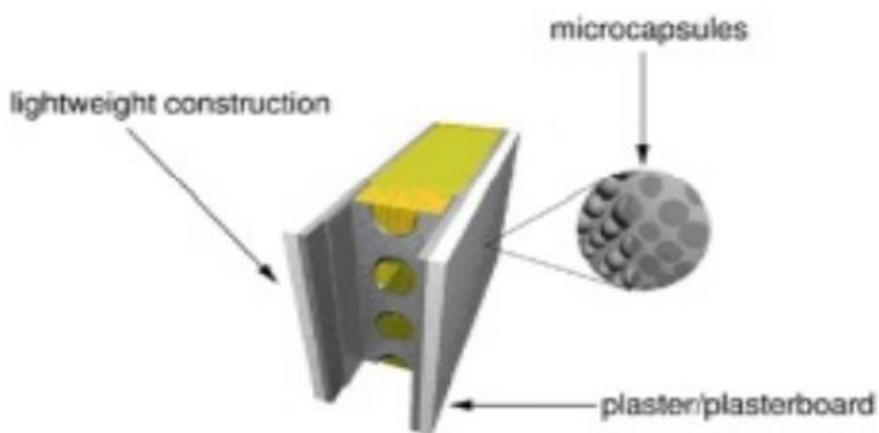


Fig.2.5- L'isolation des bâtiments. [10]

## 2.6 Classe de MCP

Les matériaux à changement de phase les plus utilisés

### 2.6.1 Le matériau a changement de phase RT

RT est une MCP pur, ce matériau de stockage de chaleur en utilisant les procédés du changement de phase entre le solide et le liquide (fusion et congélation) pour stocker et libérer de grandes quantités d'énergie thermique à une température presque constante. Les matériaux à changement de phase (MCP) fournissent un moyen très efficace pour stocker la chaleur et de froid. [12]



Fig.2.6- matériau a changement de phase RT. [12]

### 2.6.1.1 Propriétés

- La capacité de stockage d'énergie thermique élevée.
- Le stockage de la chaleur et de libérer lieu à des températures relativement constantes.
- Aucun effet de surfusion et est chimiquement inerte.
- Produits de longue durée de vie, avec des performances stables à travers les cycles de changement de phase.
- Plage de température de fusion entre  $-4^{\circ}\text{C}$  et  $100^{\circ}\text{C}$ .

### 2.6.2 Le matériau a changement de phase SP

La création de la chaleur latente mêle SP a conduit d'une nouvelle et innovante classe des MCP non inflammables. SP consiste en une composition unique d'hydrates de sel et de composés organiques qui rend vraiment le cycle stable sans détérioration au fil du temps. [12]



Fig.2.7- matériau a changement de phase SP. [12]

#### 2.6.2.1 Propriétés

- Une performance stable tout au long des cycles de changement de phase.
- Grande capacité de stockage thermique.
- SP pas inflammabilité.
- non toxique.
- Les températures de fusion différentes entre  $-21^{\circ}\text{C}$  et  $70^{\circ}\text{C}$  sont disponibles.

### Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons illustré les principaux types des matériaux à changement de phase MCP liquide-solide et décrit les points forts et faibles de chaque type. On a mis en évidence la diversité des applications et propriétés thermiques de certains MCP.

# **Chapitre 3**

**Modélisation mathématiques  
du phénomène de changement  
de phase et position du  
problème**

## Introduction

Ce chapitre expose le modèle mathématique ainsi que sa mise en œuvre sur ordinateur. Tout d'abord, présent Les écoulements et Les méthodes d'analyse avec changement de phase, Ensuite, un bref survol des méthodes disponibles pour la résolution de problèmes de changement de phase solide-liquide est effectué. Une description géométrique du système physique considéré est présentée. Finalement, une discussion sur la méthode numérique de résolution utilisée dans le code de calcul est exposée.

### 3.1 Les écoulements avec changement de phase

La solidification ou la fusion sont des phénomènes physiques qui ont beaucoup importance dans la littérature, Le fameux problème de ces phénomènes a été abordé par Jožef Stefan [13] et nommé par son nom plus tard, le physicien slovène qui a introduit l'étude générale de ces problèmes vers 1890, concernant la formation de glace, en effet cette problématique a été examinée plus tôt, en 1831, par Lamé et Clapeyron [14].

Il existe deux approches pour l'analyse des problèmes des changements de phase: Les méthodes à maillage mobile dans le temps, et la méthode à maillage fixe.

#### 3.1.1. Modélisation thermique de la théorie de la Solidification

La Fig 3.1 présente le comportement d'un métal pur lors de sa fusion, sa température diminue lentement à partir de  $T_1$  (phase liquide) selon la droite (a), jusqu'à la stabilisation à la température de fusion  $T_f$  où le métal commence à se solidifier le long de la verticale (b) qui représente la zone pâteuse ou se fait le changement de phase. La température descend en dessous de  $T_f$  selon la droite (c), où le métal sera complètement solidifié.

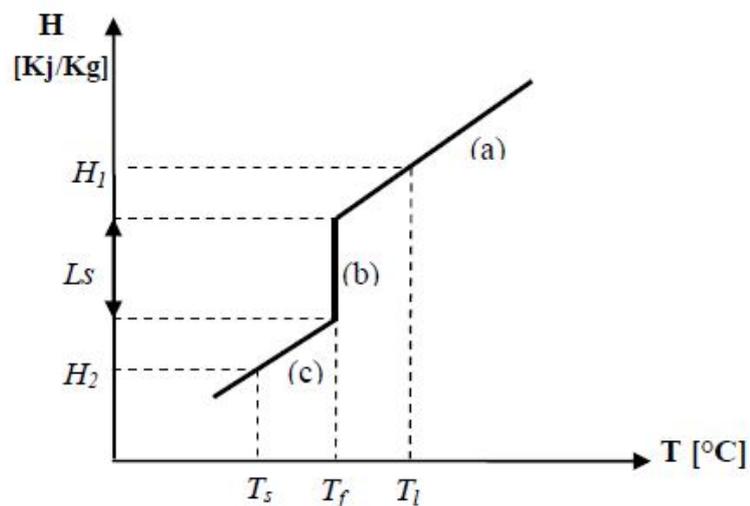
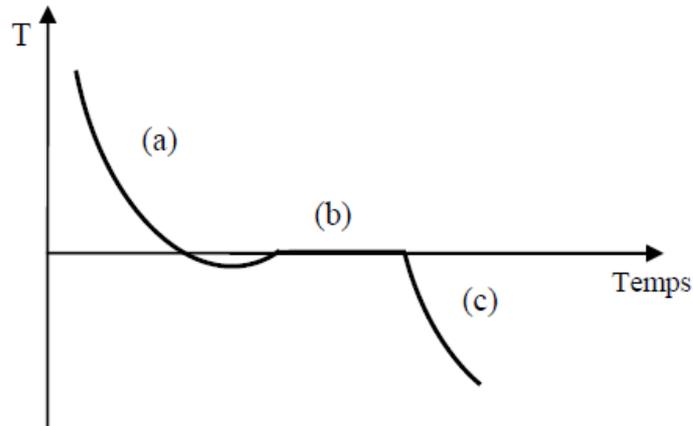


Fig. 3.1- Représentation de l'enthalpie en fonction de la température.



**Fig. 3.2- Évolution temporelle de la solidification d'un métal pur.**

Chaque palier représente un état spécifique du métal et la variation d'enthalpie dans chaque palier est donnée comme suit : [15]

$$\begin{aligned}
 \text{Palier (a) : } dH &= C_{pl} dT & \text{pour } T > T_f \\
 \text{Palier (b) : } dH &= L_s & \text{pour } T = T_f \\
 \text{Palier (c) : } dH &= C_{ps} dT & \text{pour } T < T_f
 \end{aligned}
 \tag{3.1}$$

Pour que le métal soit complètement solidifié, il faut lui enlever la quantité d'énergie  $\Delta H$  suivante :

$$\Delta H = C_{pl}(T_1 - T_f) + L_s + C_{ps}(T_1 - T_s)
 \tag{3.2}$$

Avec

$T_1$  : Désigne la température du métal à l'état liquide.

$T_s$  : Désigne la température du métal à l'état solide.

$T_f$  : Désigne la température de solidification (fusion).

$C_{pl}$  et  $C_{ps}$  sont les capacités thermiques du liquide et du solide, représentées par les pentes des paliers (a) et (b) sur le graphe.

Dans sa forme liquide, le métal possède la chaleur latente  $L_s$  par unité de masse plus la chaleur sensible représentée par la relation :

$$C_{pl}(T_1 - T_f) + L_s
 \tag{3.3}$$

Pour un métal pur, l'enthalpie est reliée à la température par [15]

$$\Delta H = \begin{cases} C_{pl} \Delta T + L_s \\ C_{ps} \Delta T \end{cases} \quad (3.4)$$

Pour un alliage, Le changement de phase se fait dans un intervalle de température  $[T_l - T_s]$ , ou l'enthalpie est une fonction de la température  $T_f$

$$\Delta H = \begin{cases} C_{pl} \Delta T + L_s & \text{pour } T \geq T_f \\ C_p \Delta T + f_l L_s & \text{pour } T_s < T < T_l \\ C_{ps} \Delta T & \text{pour } T \leq T_f \end{cases} \quad (3.4)$$

Pendant la solidification et/ou de fusion, une interface solide/liquide se forme et se déplace jusqu'à ce que le processus du changement de phase ait achevé. Réellement le front de fusion ne peut pas être localisé, car la température évolue dans chacune des phases séparément, en outre, la variabilité des propriétés thermo physique des phases solides et liquides du matériau qui pose un sérieux problème à la modélisation numérique. Alors, une méthode d'analyse des écoulements avec changement de phase est nécessaire pour vincre ses problèmes.

### 3.2 Les méthodes d'analyse des écoulements avec changement de phase

Généralement, il existe deux approches pour l'analyse des problèmes de changements de phase :

Les méthodes à maillage mobile dans le temps.

La méthode à maillage fixe.

#### 3.2.1 Méthode à maillage dynamique

Cette méthode permet de résoudre les équations de conservation en termes de température dans chaque phase, elle consiste à fixer le pas de temps et recalculer le pas d'espace à chaque itération de tel sorte que l'interface solide/liquide soit confondue avec un nœud de maillage d'une part et d'autre de fixer le pas d'espace et recalculer le pas de temps à chaque fois de façon à ce que le front de transition se déplace de nœud en nœud pour chaque pas de temps recalculé.

Les équations gouvernantes le transfert de chaleur sont :

#### Région liquide

$$C_{pl} \rho_l \left( \frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} \right) = \lambda_l \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \quad (3.5)$$

## Région solide

$$C_{ps} \rho_s \left( \frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} \right) = \lambda_s \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \quad (3.6)$$

A l'interface liquide-Solide, les deux équations (3.5) et (3.6) sont couplées par la condition de Stefan

$$\begin{cases} T_l = T_s = T_f \\ -\lambda_s \frac{\partial T_s}{\partial n} + \lambda_l \frac{\partial T_l}{\partial n} = \rho_s L_s \frac{\partial \xi}{\partial n} \end{cases} \quad (3.7)$$

$n$  désigne la normale au front et  $\xi$  la position du front de solidification.

Généralement, les solutions analytiques pour les modèles de Stephan restent très limitées pour des cas 1D avec des conditions aux limites et des propriétés thermo-physiques constantes. Dans les situations pratiques les conditions aux limites et les propriétés thermo-physiques sont variables et multiples ainsi que les géométries sont multidimensionnelles et irrégulières, ce qui nécessite des techniques numériques puissantes pour les étudier.

### 3.2.2. Méthode à maillage fixe

Cette méthode se divise en deux grandes approches où elle n'est pas intéressée par le front de transition, alors une seule équation d'énergie doit résoudre dans les deux phases.

Dans ces méthodes le maillage reste fixe au cours du temps et le front de transition peut se déplacer à l'intérieur du maillage, cette méthode pose des instabilités numériques due aux gradients de température dans la région pâteuse.

Dans cette famille de méthodes, les deux méthodes les plus utilisées sont la méthode de la capacité effective et la méthode enthalpique.

#### 3.2.2.1. Méthode de la capacité effective

La méthode de la capacité effective est l'un des premiers et largement méthodes adoptées pour l'analyse des processus de changement de phase. Heim [16] a présenté l'application de cette méthode pour le traitement des problèmes de changement de phase. La méthode de la capacité effective est gouvernée par une seule équation de conservation qui celle de l'énergie.

L'équation d'énergie est donnée par:[17][18][19][20]

$$\rho C_{eff} \left( \frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} \right) = \lambda \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \quad (3.8)$$

Avec

$$C_{\text{eff}} = \begin{cases} C_{ps} & \text{si } T < T_f \\ C_p + \frac{L_s}{T_l - T_s} \delta (T - T_f) & \text{si } T = T_f \\ C_{pl} & \text{si } T > T_f \end{cases} \quad (3.9)$$

La capacité thermique effective est une fonction de la température hautement non-linéaire dans la plage de la température de changement de phase.

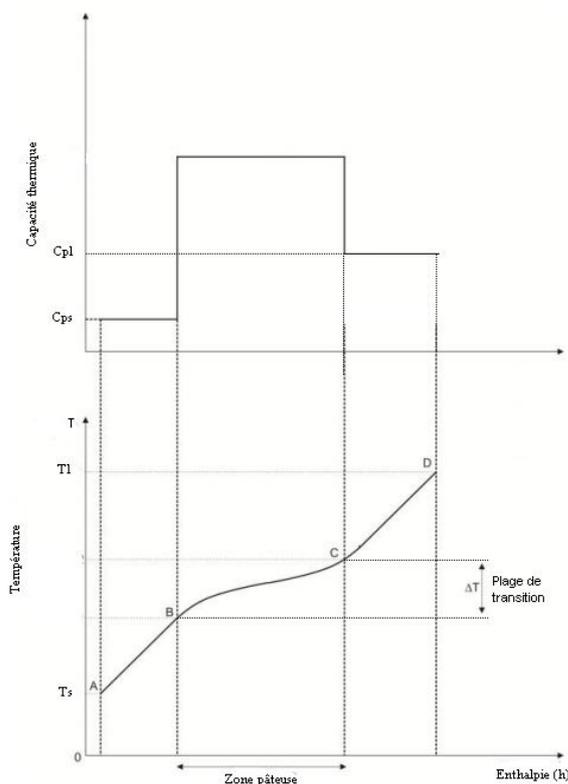


Fig. 3.3- Évolution de la capacité calorifique effective.

### 3.2.2.2. Méthode enthalpique

La méthode enthalpique implique la reformulation du problème de Stefan en termes de la propriété d'enthalpie en la considère comme variable dépendante de la température. Le modèle de transfert thermique que nous adoptons est basé sur une formulation enthalpique qui est adoptée par le code de calcul Fluent.

La forme enthalpique de l'équation de la conduction thermique est formulée mathématiquement dans le cas bidimensionnel comme suit [21][22]

$$\rho \left( \frac{\partial H}{\partial t} + U \frac{\partial H}{\partial x} + V \frac{\partial H}{\partial y} \right) = \lambda \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) - S_n \quad (3.12)$$

H : L'enthalpie du système prend alors la forme générale suivante :

$$H = C_p T + f_l L_s \quad (3.13)$$

Avec  $f_l = 1$  dans la région liquide,  $f_l = 0$  dans la région solide et  $0 \leq f_l \leq 1$  dans la région pâteuse où coexistent les deux phases. Dans la littérature,

On suppose très souvent que la chaleur latente varie linéairement avec la température comme suit :

$$f_l = \begin{cases} 1 & T > T_l \\ \frac{T - T_s}{T_l - T_s} & T_s \leq T \leq T_l \\ 0 & T < T_s \end{cases} \quad (3.14)$$

Après réarrangement on obtient

$$\rho C_p \left( \frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} \right) = \lambda \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) - S_n \quad (3.15)$$

$S_n$  : Représentent le terme source dans l'équation est donné par :

$$S_n = \rho L_s \left( \frac{\partial f_l}{\partial t} + U \frac{\partial f_l}{\partial x} + V \frac{\partial f_l}{\partial y} \right) \quad (3.16)$$

Le modèle enthalpique est considéré comme le plus efficace et le plus précis des méthodes à maillage fixe.

La méthode enthalpique a plusieurs limitations telles que :

1. Prends plus de temps de calcul en raison des petits pas de temps et d'espace.
2. La chaleur latente absorbée et rejetée lors d'un changement de phase n'a pas été entièrement représentée dans cette méthode.
3. Des oscillations de température se produisent près des conditions limites.

## **3.2 Méthodes numériques et présentation du code "FLUENT"**

On présente une étude de simulation numérique sur régulation thermique de la cellule photovoltaïque par un matériau à changement de phase MCP. La simulation numérique est effectuée à l'aide du code commercial **Fluent 6.3.26**.

### **3.3.1 Méthodes des différences finies**

C'est la méthode la plus ancienne, le principe fondamental de cette méthode consiste au domaine d'étude un maillage en nœuds dont la finesse permet de donner une approximation des contours du domaine. Ensuite, en appliquant le développement dans chaque nœud du maillage, ce qui permet d'obtenir un nombre d'équation algébrique égale au nombre des valeurs d'inconnues des grandeurs étudiées.

### **3.3.2 Méthodes des éléments finis**

La méthode consiste à mailler l'espace en régions élémentaires dans lesquelles on représente la grandeur recherchée par une approximation polynomiale. Le maillage peut être constitué de triangles ou de rectangles aux sommets desquels on recherche des volumes de l'inconnue en supposant que, dans ce domaine, l'inconnue varie linéairement en fonction des coordonnées. Une telle méthode nécessite donc de mailler tout l'espace étudié. Elle conduit à des tailles importantes en mémoire des calculateurs et à des temps de calcul longs qui nécessitent souvent des stations de travail pour la résolution des problèmes industriels.

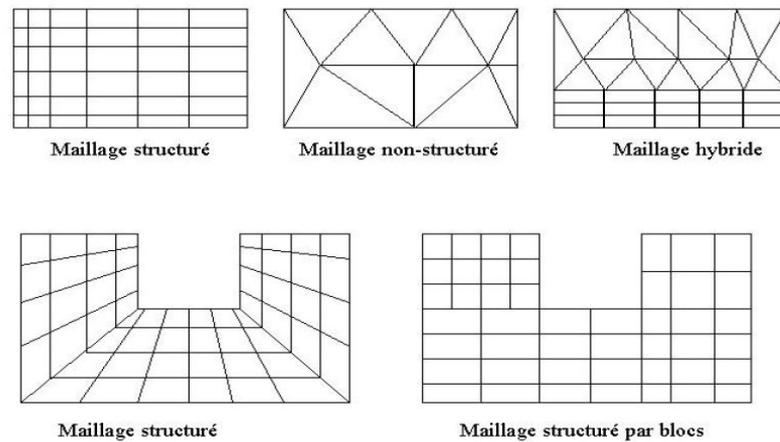
### **3.3.3 Méthodes des volumes finis**

La méthode des volumes finis est caractérisée par son avantage à satisfaire la conservation de masse, de quantité de mouvement et d'énergie dans tous les volumes finis ainsi que dans tout le domaine de calcul. Elle facilite la linéarisation des termes non linéaires dans les équations de conservation telle que le terme source par exemple. La méthode consiste à partager le domaine de calcul en plusieurs volumes, où chaque volume entoure un nœud.

## **3.4 Maillage**

Le code de calcul "FLUENT" dans sa version 6.3 traite plusieurs types de maillages structurés, non-structurés ou hybrides. Un maillage structuré est généralement composé de mailles quadrilatérales en deux dimensions (2D ou maillage surfacique) et hexaédriques en trois dimensions (3D ou maillage volumique), tandis qu'un maillage non-structuré va être composé de mailles quadrilatérales ou triangulaires en 2D et hexaédriques ou tétraédriques en 3D. Dans un maillage hybride les mailles proches des parois sont des quadrilatères en 2D et des hexaèdres en 3D et les mailles du reste du domaine sont des triangles en 2D et des tétraèdres en 3D. En proche

paroi, il est nécessaire d'avoir des mailles les plus petites possibles pour bien modéliser les écoulements à cet endroit, cette particularité est d'autant plus importante en régime turbulent, on l'appelle (l'inflation). En 3D, les mailles qui font les liaisons entre les hexaèdres et les tétraèdres sont des prismes ou des pyramides. La fig.3.4 représente les différents types de maillage utilisé par notre code.



**Fig 3.4- Types de maillage utilisé par "FLUENT".**

### 3.4.1 Qualité du maillage

Avant de poursuivre et de simuler des écoulements avec un maillage, il est nécessaire de s'assurer de sa qualité. Ce dernier joue un rôle important dans la précision et la stabilité du calcul numérique.

Sous "GAMBIT", la mesure de l'obliquité équiangle est normalisée comme suit [21]:

$$\max \left[ \frac{q_{\max} - q_e}{180 - q_e}, \frac{q_e - q_{\min}}{q_e} \right] \quad (3.17)$$

Où:

$q_{\max}$  : le plus grand angle de la face ou de la cellule.

$q_{\min}$  : le plus petit angle de la face ou de la cellule.

$q_e$  : angle d'une face ou cellule parfaitement régulière ( $60^\circ$  pour un triangle), ( $90^\circ$  pour un carré).

Notons que par définition  $0 \leq q_e \leq 1$ .

Pour que le maillage soit bien précis il est souhaitable de prendre en considération la variation de tailles entre deux cellules adjacentes n'exécède pas 20%. Le maillage doit être réalisé de sorte à minimiser la diffusion de l'erreur numérique.

### 3.4.2 Indépendance du maillage

Il est tout d'abord important de rappeler que le maillage peut être modifié dans la phase de simulation à l'aide du code "FLUENT". On peut par exemple, faire une adaptation de maillage à l'aide de l'option (adapt), selon divers critères permettant de définir des régions à l'intérieur du domaine de calcul. L'adaptation n'est toutefois permise que sur la base d'une première solution pour l'écoulement. L'indépendance du maillage a été réalisée en utilisant un raffinement de solution adaptatif, puisque des cellules peuvent être rajoutées là où elles sont nécessaires dans la grille après obtention des résultats de simulation. Le maillage initial a été adapté en mettant plus de cellules dans les régions où le gradient de vitesse est plus élevé qu'un niveau choisi. Ce processus a été répété jusqu'à ce que les résultats soient devenus indépendants du maillage. En effet, il existe une manière pratique dans "FLUENT", qui consiste en la surveillance de la valeur moyenne de certaines variables. Quand cette valeur cesse de changer, on cesse les itérations sans devoir attendre jusqu'à la convergence itérative, on adapte ensuite le maillage et on relance les itérations. La solution peut être considérée indépendante du maillage quand la valeur moyenne cesse de changer entre les adaptations [22].

### 3.4.3 Traitement près des parois

Dans le code de calcul "FLUENT", il existe deux approches pour modéliser l'écoulement près des parois fig3.5, l'une se base sur des formules semi empirique dites fonction de paroi pour lier la couche complètement turbulente et la paroi sans compte tenir les autres couches, l'autre consiste à raffiner le maillage de tel sorte que la distance entre le premier nœud et la paroi soit inférieur à l'épaisseur de la couche visqueuse.

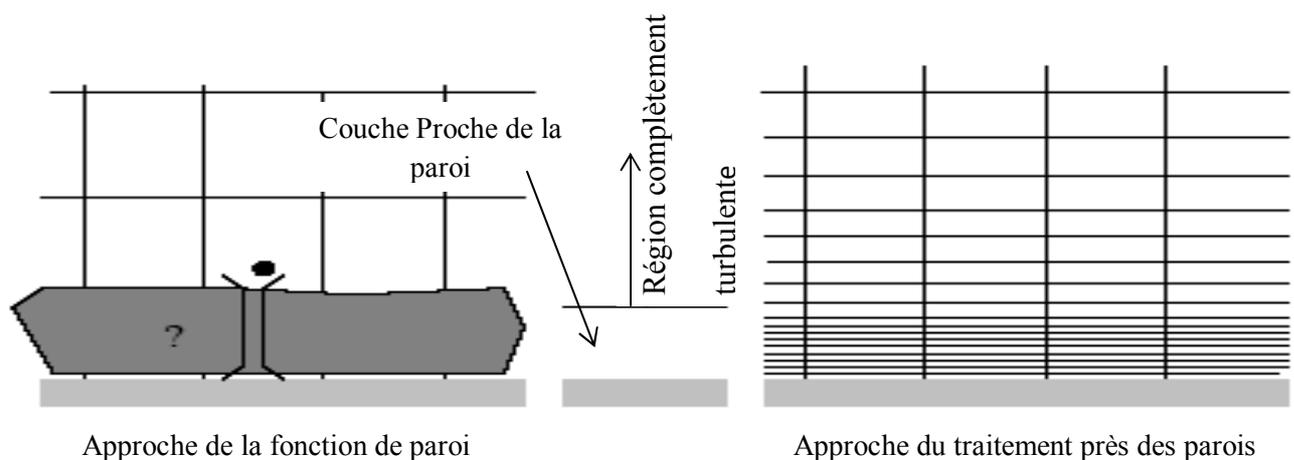


Fig 3.5- Traitement près des parois dans le "FLUENT".

### 3.5 Présentation du code de calcul

Le code de calcul "FLUENT" est commercialisé par le groupe ANSYS. Ce groupe est actuellement l'un des pôles de compétence en mécanique des fluides numérique les plus importants. Il développe et commercialise une solution complète sous forme de logiciels de CFD (Computational Fluid Dynamics) généralistes qui simule tous les écoulements fluides, compressibles ou incompressibles, impliquant des phénomènes physiques complexes tels que la turbulence, le transfert thermique, les réactions chimiques, les écoulements multiphasiques pour toute l'industrie. Les produits et services proposés par le groupe "FLUENT" aident les ingénieurs à développer leurs produits, à optimiser leur conception et à réduire leurs risques.

Ce code est largement utilisé dans l'industrie aéronautique, automobile et offre une interface sophistiquée qui facilite son utilisation. Le logiciel "FLUENT" modélise par la méthode des volumes finis des écoulements très variés dans des configurations plus ou moins complexes. Il est composé, comme tout logiciel de type CFD, de trois éléments clés qui sont : le préprocesseur, le solveur et le post-processeur. Nous détaillons ci-dessous ces trois éléments.

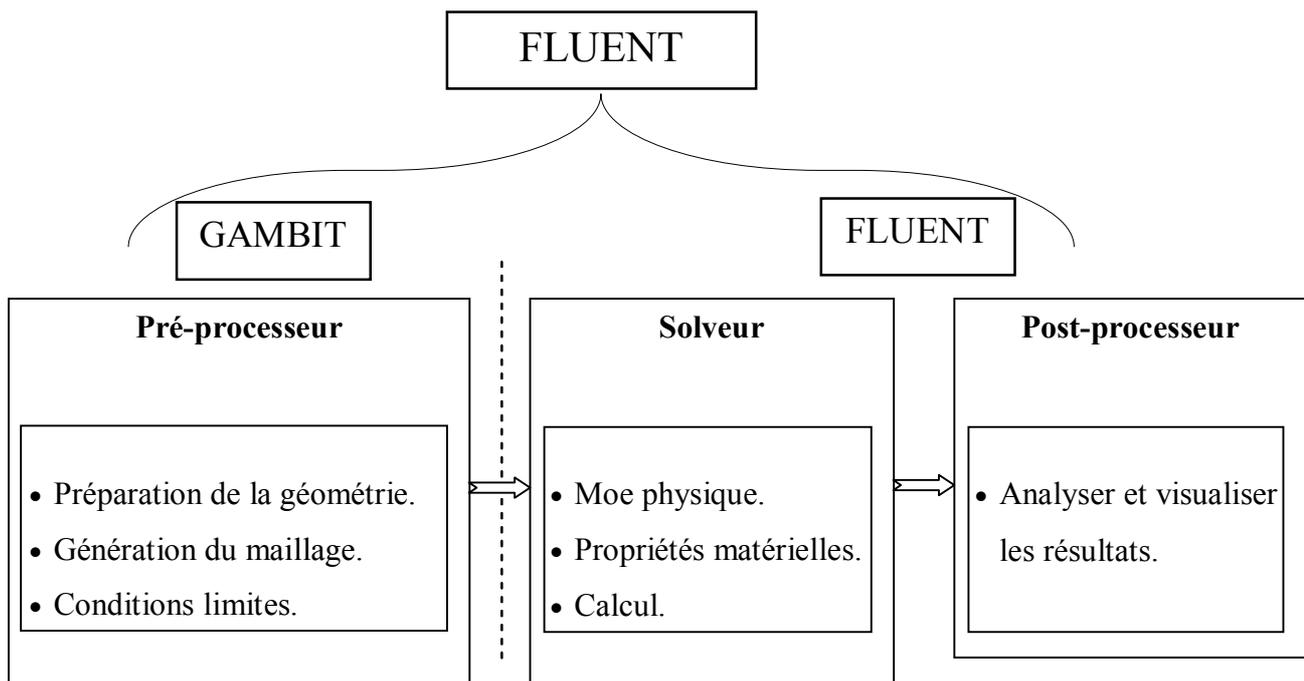


Fig.3.6- Structure de base du code "FLUENT".

### 3.5.1 Pré-processeur "GAMBIT"

Le générateur de maillage Gambit permet à l'utilisateur :

1. La construction du domaine de calcul et de subdiviser ce dernier en petits volumes de contrôle.
2. Définir les conditions aux frontières, ainsi la nature du domaine de calcul c'est-à-dire solide ou liquide.

### 3.5.2 Solveur "FLUENT"

Le code de calcul Fluent permet de résoudre les équations de conservations par la méthode des volumes finis. Cette méthode a l'avantage d'être conservatrice, c'est-à-dire que tout le flux sortant d'un volume de contrôle entre dans les volumes voisins. Les étapes de calcul dans le solveur sont les suivantes :

- Définition du modèle correspond aux phénomènes étudiés par l'intégration des équations de conservation sur chaque volume de contrôle, ainsi le type d'écoulement.
- Définition des conditions initiales et aux limites.
- Discrétisation des équations de conservation qui forme un système non-linéaire, aux dérivées partielles et complexe par des approximations en différences finies; pour le transformer en système algébrique,
- Résolution du système algébrique par un processus itératif ; utilisation d'un algorithme pour corriger la pression et les composantes de la vitesse afin d'assurer la conservation de la masse.

### 3.5.3 Post-processeur "FLUENT"

Le Post-processeur permet de visualiser les différents résultats à l'écran (champs de vitesse, champs de température, ligne de courant ...etc.).

## 3.6 Méthode de résolution des équations de transport

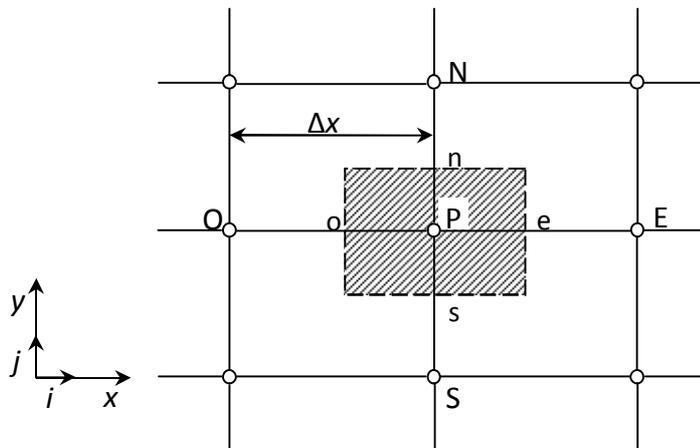
### 3.6.1 Schéma de discrétisation

Ces équations sont mises sous la forme générale suivante:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\varphi) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho U_i \varphi) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \Gamma_\varphi \frac{\partial \varphi}{\partial x_i} \right) + S_\varphi \quad (3.18)$$

Où  $\varphi$  représente une grandeur intensive telle que  $U_i, H_m, k, \varepsilon$  ou  $\overline{u'_i u'_j}$ , selon le modèle de

turbulence utilisé.  $\Gamma_\varphi$  est un coefficient de diffusion et  $S_\varphi$  un terme de source dont les expressions respectives dépendent du modèle de turbulence choisi. Sous cette forme générale, tous les termes non-convectifs ou non-diffusifs sont inclus dans le terme source  $S_\varphi$ .

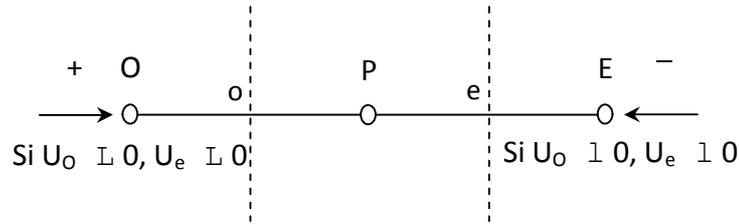


**Fig 3.7- Volume de contrôle pour la résolution en volumes finis.**

La figure 3.7 représente la discrétisation en volumes finis des équations de transport. Les différentes grandeurs de l'écoulement sont calculées au centre de chaque volume de contrôle, au point P, E, O, N et S. L'intégration de l'équation 3.18 dans un volume de contrôle fait intervenir les valeurs, ainsi que les flux de diffusion et de convection et de conservation de ces grandeurs aux frontières du volume de contrôle. Ainsi, pour le calcul des grandeurs au point P, leurs valeurs aux interfaces e, o, n et s sont également nécessaires. Plusieurs méthodes d'interpolation peuvent alors être utilisées connaissant leurs valeurs au centre des volumes de contrôle adjacents.

Les schémas d'interpolation employés dans les codes CFD sont en général basés sur la méthode de différences finies. Cette méthode appliquée à des volumes de contrôle est décrite par nombre d'auteurs comme Patankar [23] et Roache [24]. Des études doctorales comme celles de Buchmann [25] et Theodosiu [26] présentent également le détail des différents schémas d'interpolation utilisés dans les codes CFD. Dans ce paragraphe, l'accent est plutôt mis sur les critères à prendre en compte pour assurer à la fois la stabilité et la bonne précision des résultats CFD.

On note ainsi que bien qu'une approximation par différences finies centrées des termes de diffusion au deuxième ordre soit adaptée à la majorité des problèmes, cette technique ne donne pas de résultats satisfaisants en ce qui concerne les termes convectifs. En effet, la méthode des différences centrées ne prend pas correctement en compte la direction de l'écoulement. La figure 3.8 permet d'illustrer ce défaut majeur.



**Fig.3.8- Schéma unidimensionnel illustrant un volume élémentaire entourant un nœud P.**

Les valeurs d'une entité  $\varphi$  aux interfaces  $e$  et  $o$  sont déterminées par une approximation linéaire à l'aide des expressions suivantes :

$$\varphi_e = \frac{1}{2}(\varphi_P + \varphi_E) \quad (3.19)$$

$$\varphi_o = \frac{1}{2}(\varphi_O + \varphi_P) \quad (3.20)$$

Sur la base de ces deux dernières expressions, on peut noter que les points situés en amont et aval ont le même poids pour le calcul des valeurs à l'interface quelle que soit la vitesse de l'écoulement. Mais il peut exister un fort transport de la gauche vers la droite (ou inversement) de l'interface. Dans un tel cas, cette formulation n'est plus valable parce qu'elle peut générer des instabilités numériques quand le transport à travers une face d'un volume de contrôle est prépondérant par rapport à la diffusion. Le nombre de Peclet de maille permet à cet effet de quantifier l'importance relative des phénomènes convectifs et diffusifs :

$$Pe_{maille} = \frac{\rho U \Delta x}{\Gamma_\varphi} \quad (3.21)$$

Où  $\rho U$  et  $\Gamma_\varphi$  sont considérés constants le long de  $\Delta x$ . On a ainsi pu constater que lorsque le nombre de Peclet de maille construit sur la dimension du maillage et de la vitesse à l'interface est supérieur à 2, la discrétisation centrée des termes convectifs, en régime permanent, conduit à des instabilités numériques [27]. Pour éviter ces instabilités numériques, des approximations décentrées sont proposées. Les échanges diffusifs sont modélisés de la même façon que dans le schéma à différences centrées. En revanche, les échanges convectifs n'ont lieu que de l'amont vers l'aval de l'écoulement. Ce schéma amont (upwind) est précis au premier ordre sur la base d'un développement de Taylor. Il est inconditionnellement stable du point de vue numérique mais susceptible d'introduire une diffusion numérique « artificielle » pouvant affecter la précision du calcul Launder [28].

Pour éviter que la précision du calcul ne soit affectée par les effets de la diffusion numérique, on peut raffiner le maillage et/ou aligner le maillage sur l'écoulement. Malheureusement, le raffinement du maillage reste limité par la puissance de calcul des ordinateurs. De plus, l'alignement du maillage sur l'écoulement n'est possible qu'avec un écoulement simple dont la direction principale peut être alignée au maillage. En effet, lorsque que les écoulements sont complexes, il est difficile d'aligner le maillage sur le mouvement. Il faut donc recourir à des méthodes de discrétisation spatiale d'ordre plus élevé pour réduire la diffusion numérique. Ainsi, des schémas d'ordre 3 et plus ont été proposés mais l'implémentation des conditions aux limites s'est avérée difficile à réaliser. Ces derniers schémas sont en outre peu stables. Un compromis satisfaisant entre la stabilité et la précision du calcul prédominant convectif a été trouvé avec les approximations amont (upwind) au second ordre [29].

On peut citer également le schéma d'ordre supérieur, QUICK, proposé par Leonard [30] et qui a été utilisé dans l'étude doctorale de Lepers [31]. Ce dernier a pu noter que comparé à un schéma amont (upwind) au deuxième ordre, le schéma Quick n'améliore pas beaucoup la précision des résultats numériques.

Pour notre étude, le schéma d'interpolation QUICK (Quadratic Upwind Interpolation [32]) est utilisé. Ce schéma calcule la valeur à l'interface d'une grandeur, en fonction de ses valeurs au centre des volumes de contrôle adjacents et de volumes plus éloignés en amont de l'interface considérée.

### 3.7 Résolution numérique

#### 3.7.1 Paramètre de contrôle de la convergence

La façon d'obtenir une solution convergée est un des éléments essentiels de prédiction d'écoulement au moyen des codes CFD. Le code "FLUENT" propose différentes techniques pour accélérer le processus de convergence est augmentée si une bonne estimation de la solution est donnée comme condition initiale. Nous avons recours à plusieurs techniques décrites ci-dessous :

##### 3.7.1.1 Critère de convergence

La résolution numérique des problèmes de type CFD nécessite un processus itératif. Pour apprécier la convergence du processus itératif, des critères de convergence doivent être pris en compte. Ainsi, la convergence du processus itératif est déterminée par le concept de résidu.

Après l'étape de discrétisation, l'équation de conservation d'une variable  $\phi$  donnée sur une cellule de centre P peut s'exprimer comme suit :

$$a_p \cdot \phi_p = \sum_{nb} a_{nb} \phi_{nb} + b \quad (3.22)$$

Où :  $a_p$  et  $a_{nb}$  représentent les contribution convectives et diffusives, l'indice  $nb$  est lié aux centre de cellules adjacentes. Représente la contribution de partie constante du terme source  $\Phi_\phi$ .

Le résidu normalisé a alors pour expression :

$$R^\phi = \frac{\sum_{\text{Domaine}} \left| \sum_{nb} a_{nb} \cdot \phi_{nb} + b - a_p \cdot \phi_p \right|}{\sum_{\text{Domaine}} |a_p \cdot \phi_p|} \quad (3.23)$$

Ces expressions des résidus sont valables pour toutes les grandeurs sauf la pression, dans le cas de cette grandeur, le résidu est déterminé à partir de l'équation de continuité :

$$R^C = \sum_{\text{Domaine}} |taux\ de\ création\ de\ matière\ dans\ le\ domaine| \quad (3.24)$$

### 3.7.1.2 Les paramètres de Sous-relaxation

A cause de la non linéarité des équations résolues, il est possible, pour atténuer les fluctuations de la solution, de réduire les variations des variables d'une itération à une autre en introduisant une sous-relaxation. Il n'existe pas des règles générales concernant des meilleures valeurs des coefficients de sous-relaxation, mais il existe des recommandations pour chacune des grandeurs, généralement basé sur des connaissances empiriques.

### 3.8 Étapes de résolution du problème

Les principales étapes utilisées dans notre simulation sont les suivantes:

1. Détermination du domaine de calcul (construction de la géométrie).
2. Discrétisation du domaine de calcul (maillage).
3. Identification des conditions aux limites.
4. Choix du modèle mathématique.
5. Choix de l'algorithme de solution.
6. Solution du modèle mathématique.
7. Visualisation et interprétation des résultats.

### 3.9 Condition aux limites

Les conditions aux limites sont nécessaires pour la solution de n'importe quel système d'équations aux dérivées partielles. On retrouve des conditions de flux de chaleur d'insolation, la température ambiante, et les coefficients de transfert de chaleur par convection sont présentés sur la figure ci-dessous.

Les paramètres thermo-physiques du MCP (RT25) et l'Aluminium utilisés pour la simulation sont montrés dans le tableau 3.1 et 3.2.

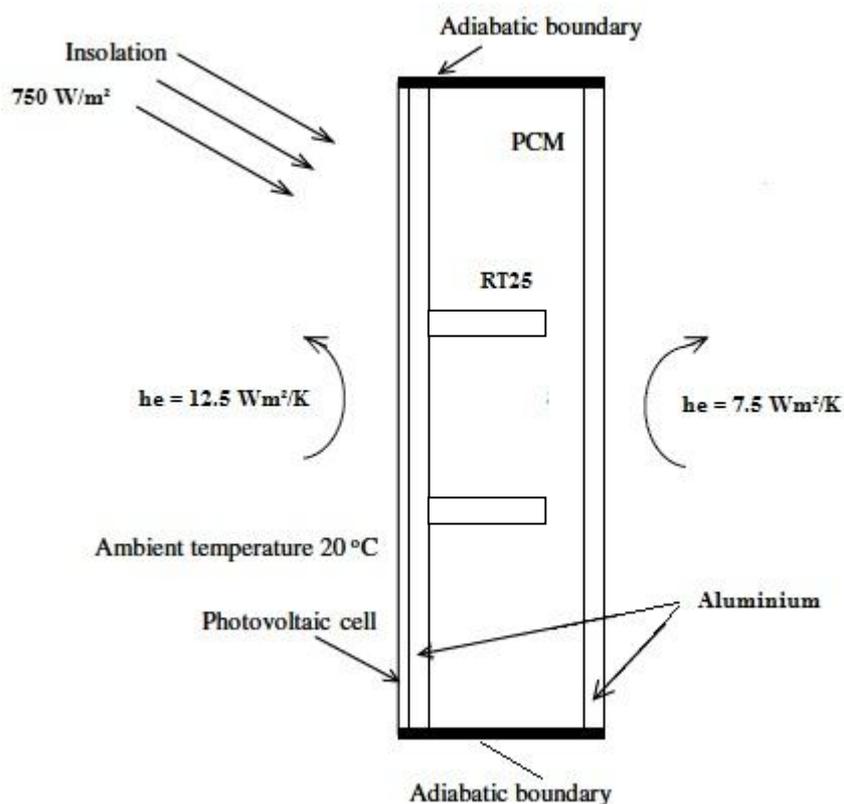


Fig.3.10- La structure des conditions aux limites pour le système simulé.

Tableau 3.1- Les propriétés du matériau à changement de phase RT25 [1].

Propriétés	Valeurs
Masse volumique $\rho$ [Kg/m <sup>3</sup> ]	785
Chaleur spécifique $C_p$ [J/Kg k]	1797.6
Conductivité thermique $\lambda$ [W/mK]	0.19
Chaleur latente $L_f$ [J/Kg]	232000
La viscosité dynamique $\mu$ [Kg/ms]	0.001798
Coefficient de dilatation thermique [K <sup>-1</sup> ]	0.001
Température du solidus [K]	299
Température du liquidus [K]	303

Tableau 3.2- Propriétés de l'aluminium. [1]

Propriétés	Valeurs
Masse volumique $\rho$ [Kg/m <sup>3</sup> ]	2675
Chaleur spécifique $C_p$ [J/Kg k]	2415.525
Conductivité thermique $\lambda$ [W/mK]	211

### 3.10 Hypothèses

Il est maintenant nécessaire d'effectuer un certain nombre d'hypothèses afin d'établir les équations qui décrivent la physique de ce problème. Ces hypothèses ont été divisées en deux catégories. La première catégorie comprend les hypothèses couramment utilisées à propos de la géométrie, de l'écoulement et des transferts thermiques. La seconde catégorie traite des hypothèses particulières à la modélisation du changement de phase, beaucoup plus contraignantes.

#### Hypothèses générales

1. Le problème est bidimensionnel
2. L'écoulement est considéré incompressible et la convection naturelle est prise en compte par le biais de l'hypothèse de Boussinesq.
3. L'écoulement demeure laminaire.
4. Le fluide est considéré newtonien.

#### Hypothèses liées au changement de phase

1. Une méthode enthalpique est retenue.
2. Le MCP est parfaitement pur. Il n'y a pas de bulles d'air emprisonnées dans le MCP et le changement de phase est isotherme.
3. Le MCP est homogène et isotrope.
4. Aucune parcelle de MCP solide ne se détache pour aller dans l'écoulement tant qu'elle n'est pas entièrement fondue (pas de particule en suspension).
5. Le MCP solide ne tombe jamais (immobilisé) même s'il est complètement entouré de liquide.

### 3.11 Formulations mathématique

#### ➤ Equation de conservation de masse

$$\frac{\partial \rho p}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u p)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v p)}{\partial y} = 0 \quad (3.25)$$

Pour un fluide incompressible la masse volumique demeure constante et on a  $\frac{\partial \rho p}{\partial t} = 0$

Donc

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

u et v sont les composantes de la vitesse du fluide dans les directions x et y, respectivement.

➤ **Equation de quantité de mouvement**

Suivant (Ox)

$$\rho \left( \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right) = \left( \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} \right) - \frac{\partial p}{\partial x} + s_x \quad (3.27)$$

Suivant (Oy)

$$\rho \left( \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} \right) = \left( \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} \right) - \frac{\partial p}{\partial y} + \rho g \beta (T - T_{ref}) + s_y \quad (3.28)$$

Avec les composants du tenseur des contraintes visqueuses sont données par

$$\begin{aligned} \tau_{xx} &= \mu \left[ 2 \frac{\partial u}{\partial x} \right] \\ \tau_{yy} &= \mu \left[ 2 \frac{\partial v}{\partial y} \right] \\ \tau_{yx} = \tau_{xy} &= \mu \left[ \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right] \end{aligned} \quad (3.29)$$

$p$  : présente la pression.

$\rho g \beta (T - T_{ref})$  représente le terme de l'approximation de Boussinesq. La masse volumique du fluide varie avec la température et cette variation de la masse volumique est la cause du mouvement du fluide. Si la variation est faible, on peut traiter la masse volumique comme constante dans les termes transitoire et convectif et la traiter comme uniformément variable dans le terme source.

$s_x$  et  $s_y$  représentent les termes sources dans les directions x et y, respectivement, utilisées pour modifier les équations de la quantité de mouvement dans la région pâteuse. Le modèle de Darcy pour les milieux poreux est utilisé pour modifier les vitesses dans les régions solide et pâteuse :

$$s_x = Au \text{ et } s_y = Av \quad (3.30)$$

Avec :

$$A = C \frac{(1-f_l)^2}{f_l^3 + 0.000001} \quad (3.31)$$

C et  $f_l$  représentent la constante du darcy et la fraction massique, respectivement

$$f_l = \begin{cases} 1 & \text{si } T > T_l \\ \frac{T - T_s}{T_l - T_s} & \text{si } T_s < T < T_l \\ 0 & \text{si } T < T_s \end{cases} \quad (3.32)$$

### ➤ Equation de conservation d'énergie

$$\rho C_p \left( \frac{\partial T}{\partial t} + U \frac{\partial T}{\partial x} + V \frac{\partial T}{\partial y} \right) = \lambda \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) - S_n \quad (3.33)$$

$S_n$  : Représente le terme source dans l'équation est donne par :

$$S_n = -\rho L_s \left( \frac{\partial f_l}{\partial t} + U \frac{\partial f_l}{\partial x} + V \frac{\partial f_l}{\partial y} \right) \quad (3.34)$$

### Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons rappelé quelques notions théoriques liées aux phénomènes de transfert de chaleur et le changement de phase, ainsi que les méthodes numériques associées au code de calcul Fluent qui permettent de résoudre un problème de transfert de chaleur avec changement de phase. La géométrie du problème et les conditions aux limites ont été présentées, afin d'établir les équations de conservation.

# **Chapitre 4**

## **Résultats et discussions**

## Introduction

Nous présentons dans ce chapitre les résultats de la simulation numérique obtenue par le code de calcul Fluent. Le problème étudié est le refroidissement des cellules photovoltaïques par un matériau de changement de phase rempli dans une enceinte rectangulaire derrière le module solaire PV, et on a étudié l'influence du nombre des ailettes à l'intérieur du MCP sur la régulation thermique des cellules PV.

La géométrie considérée et les conditions aux limites ont été présentées dans le chapitre 03. Ainsi, la génération du maillage et la simulation numérique ont été faits respectivement dans un mailler Gambit et le code de simulation Fluent.

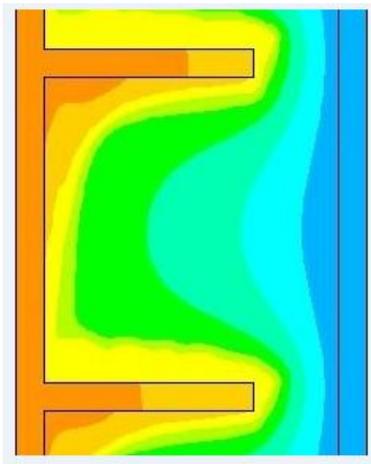
### 4.1 Résultats

Les Fig.4.4, Fig.4.5 et Fig.4.6, présentent les contours isothermes et l'évolution temporelle de la température. La présente simulation a été validée ensuite, nous nous concentrons notre attention sur l'effet du nombre des ailettes  $N$  sur l'amélioration du refroidissement des cellules photovoltaïques par une variation de  $N=0$  jusqu'à  $N=4$ .

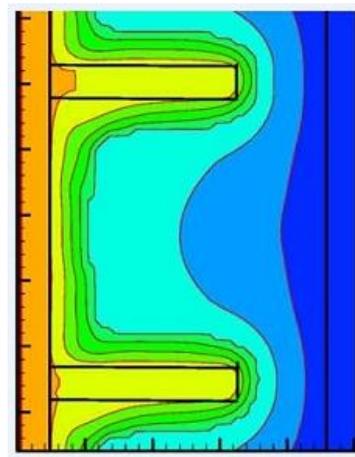
### 4.2 Validation

Le modèle numérique a été développé par T. Nehari et al [31] a été validé par les résultats expérimentaux et numériques de Huang et al [1], pour les isocontours et l'évolution de la température au cours du temps fig.4.1 et fig.4.2.

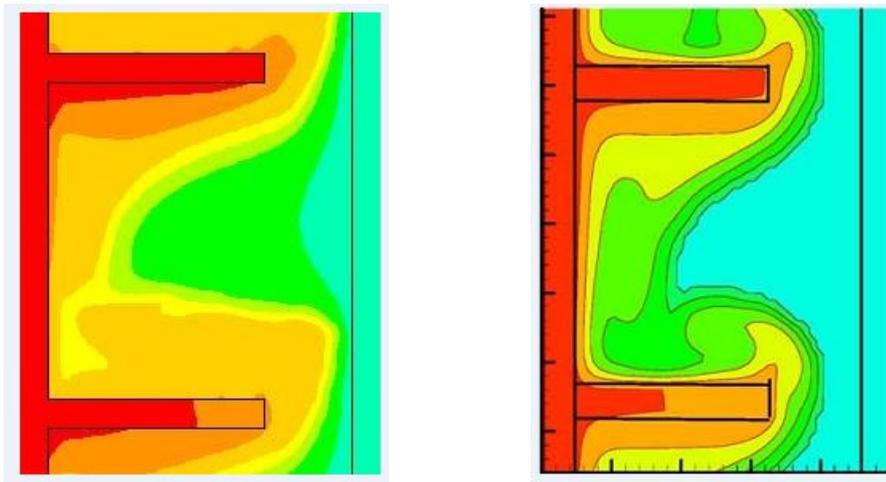
(a)Présentation des résultats numériques



(b)Expérimentale de Haung et al. [1]

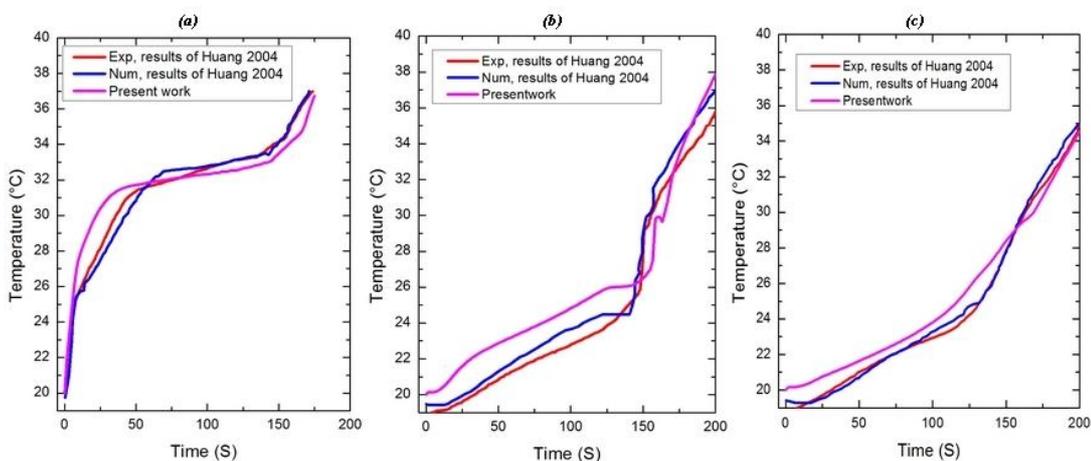


T à 50 min.



T à 100 min.

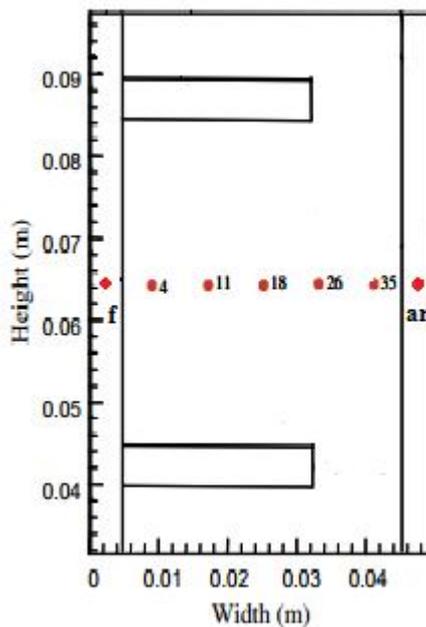
**Fig.4.1- Comparaison entre les contours de température prédite numériquement et la température mesurée.**



**Fig. 2 – Comparaison entre les températures prédites par le présent modèle numérique et les données de Huang et al. [3] (a) l'avant (le point  $P_f$ ), (b) à l'intérieur du PCM (point  $P_{int}$ ) et (c) l'arrière (le point  $P_{ar}$ ).**

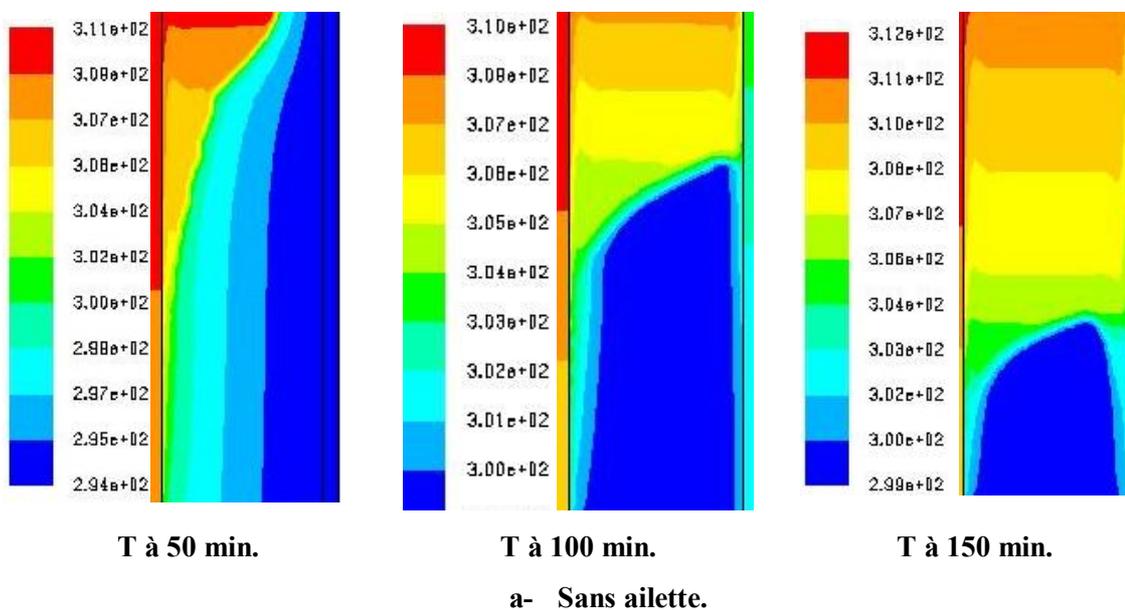
### 4.3 L'effet du nombre des ailettes

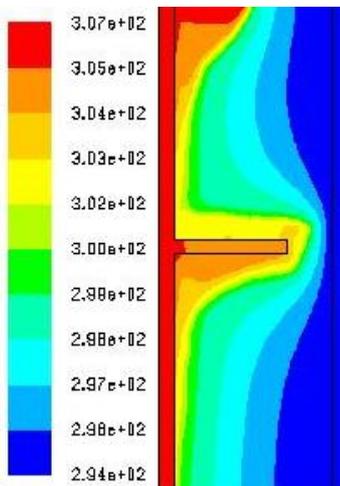
Pour améliorer le processus de refroidissement du module PV, nous avons proposé de varier le nombre des ailettes à l'intérieur de l'enceinte du MCP. La Fig.4.6 montre l'évolution de la température au cours du temps des points choisis comme montre la Fig.4.3, pour les cinq configurations géométriques proposées.



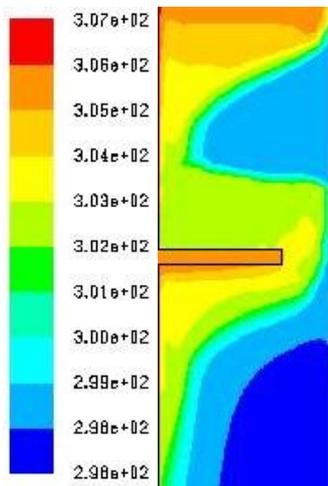
**Fig.4.3- La position des points de mesure de la température dans le système PV/MCP.**

La distribution de la température à l'intérieur du système et sur le front du système PV/MCP en fonction du temps pour un flux de chaleur de  $750 \text{ W/m}^2$  est présentée sur la Fig.4.6. Lorsque le nombre des ailettes métalliques sont augmentées dans le système, la cavité profonde qui se forme dans la surface supérieure du MCP dans la configuration sans ailettes fig.4.5-a lors de la fusion est divisé en plusieurs petites cavités de forme d'entonnoir peu profond entre les ailettes fig.4.5-e.

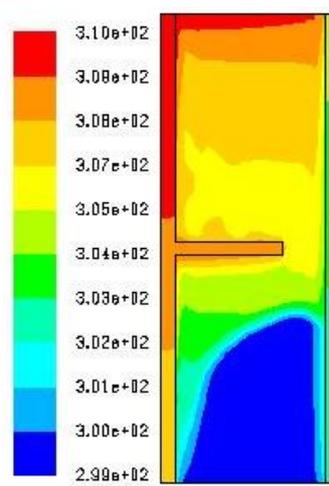




T à 50 min.

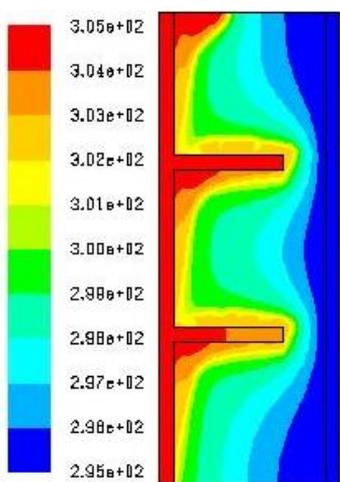


T à 100 min.

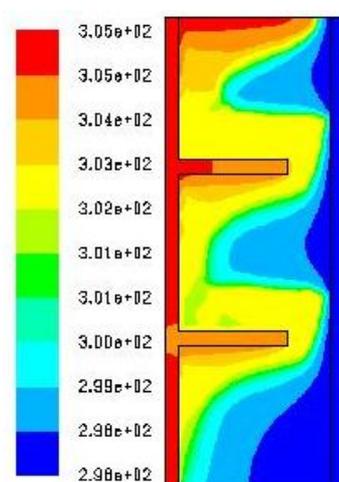


T à 150 min.

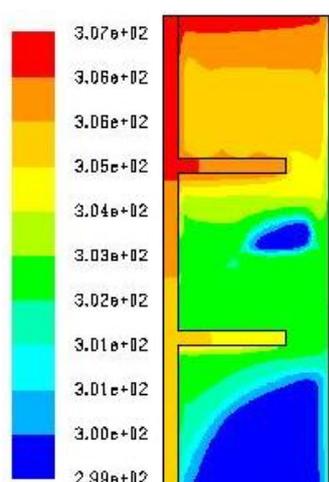
## b- Une ailette.



T à 50 min.

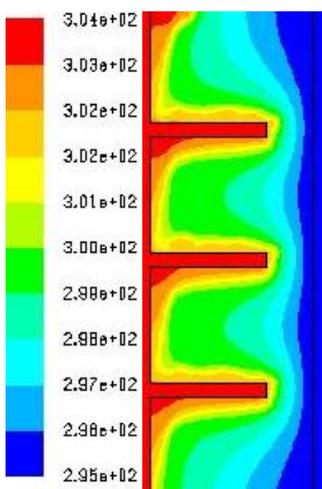


T à 100 min.

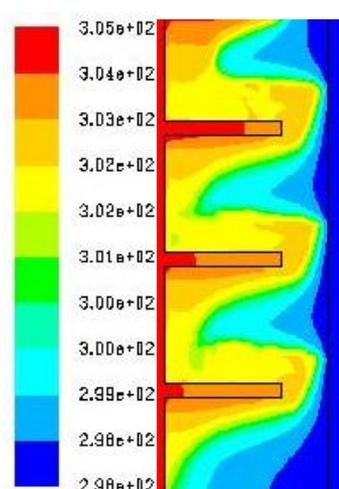


T à 150 min.

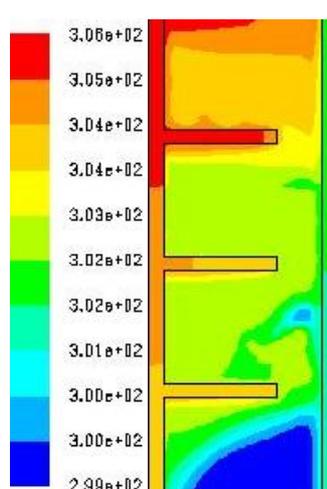
## c- 2 ailettes.



T à 50 min.

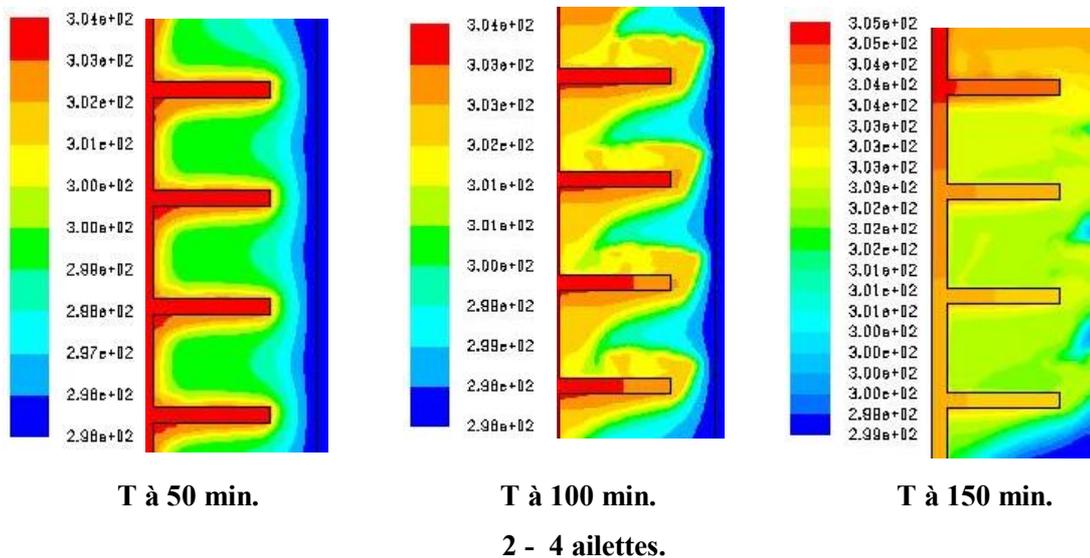


T à 100 min.

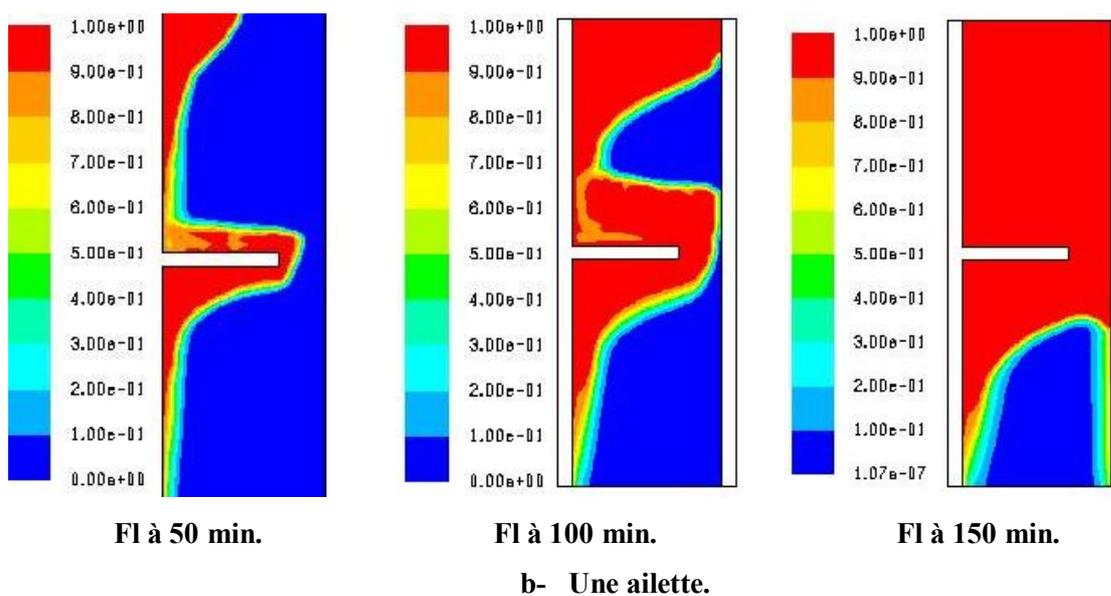
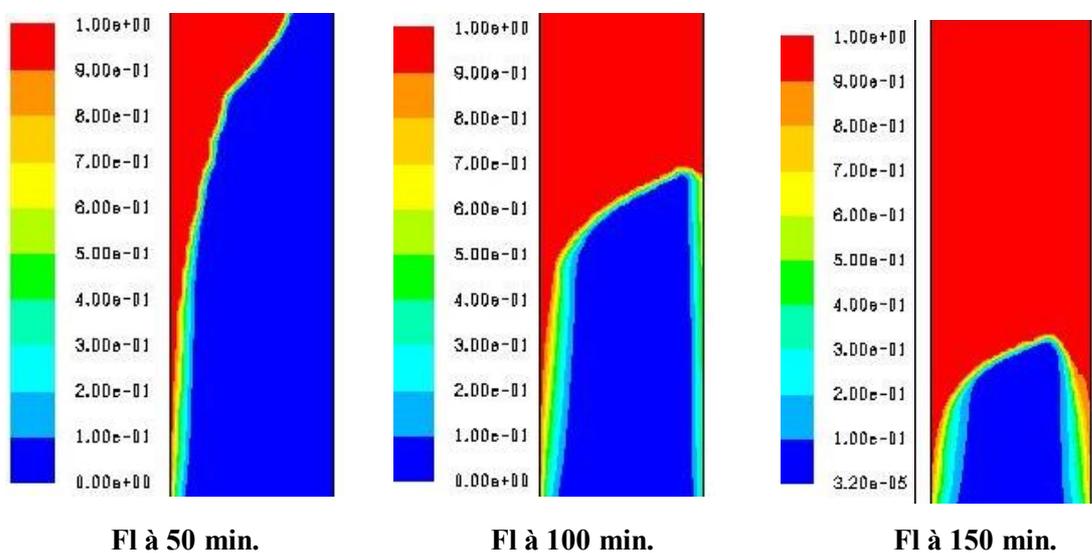


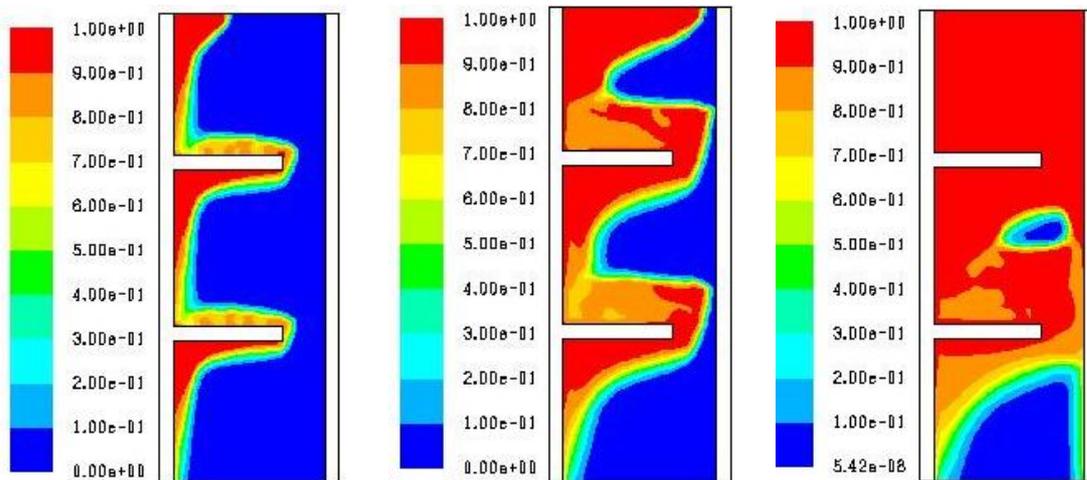
T à 150 min.

## d- 3 ailettes.



**Fig.4.4 - les isocontours de l'évolution de la température en (k) au cours du temps.**



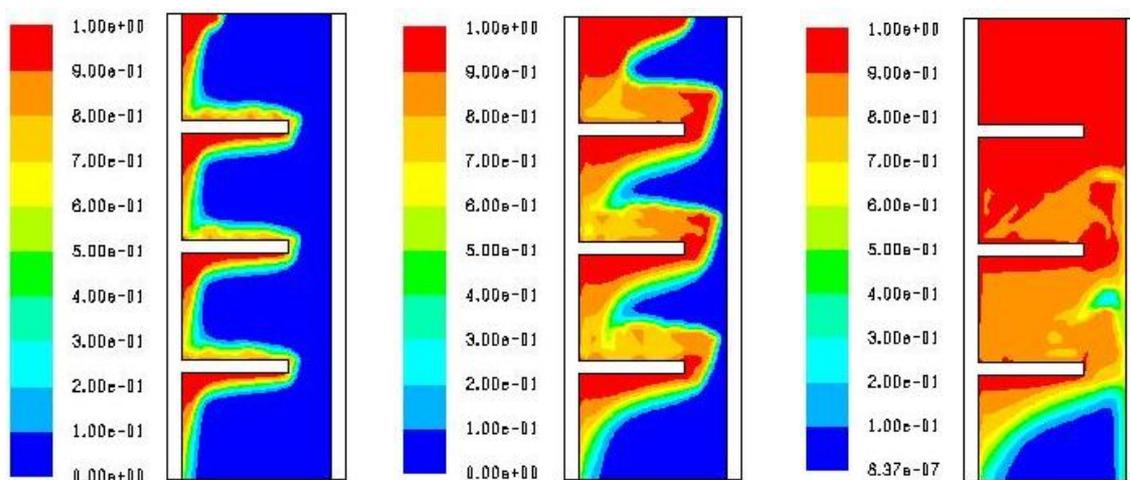


**Fl à 50 min.**

**Fl à 100 min.**

**Fl à 150 min.**

**c- 2 ailettes.**

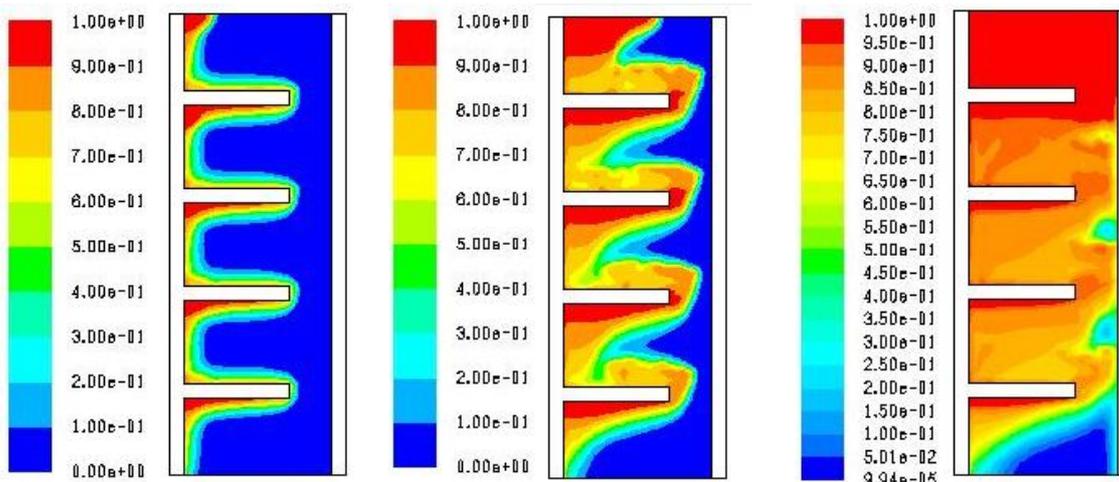


**Fl à 50 min.**

**Fl à 100 min.**

**Fl à 150 min.**

**d- 3 ailettes.**



**Fl à 50 min.**

**Fl à 100 min.**

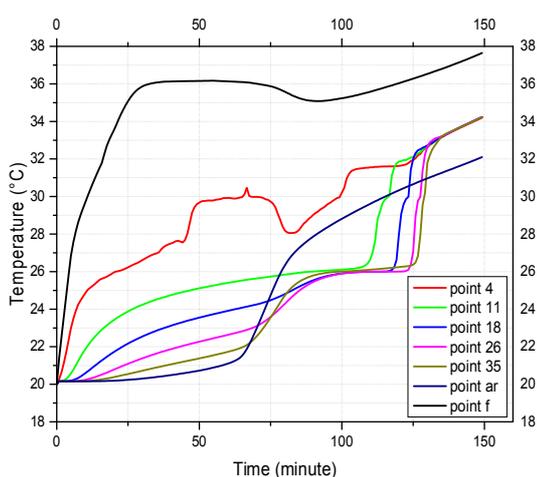
**Fl à 150 min.**

**e- 4 ailettes.**

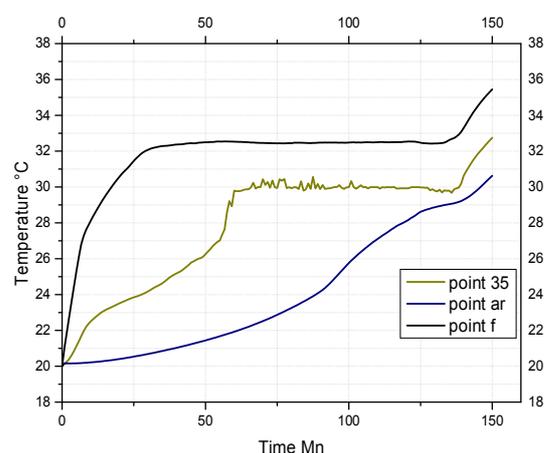
**Fig.4.5 – les isocontours defraction liquide.**

L'augmentation du nombre d'ailettes réduit la formation d'une cavité profonde dans la surface supérieure du PCM (mode sans ailette) et stabilise la distribution de la température dans le système PV/MCP.

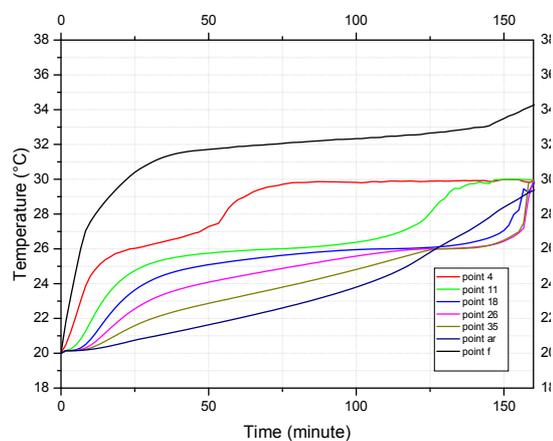
Comme la conductivité thermique du MCP est très faible  $0.19 \text{ W/m.K}$ , par rapport celle de l'aluminium, on peut voir que la température du front du système PV/MCP sans ailettes augmente rapidement, elle est  $36^\circ\text{C}$  après 50 min d'après la Fig.4.6.a, par rapport les autres configurations, ou la température est inférieure de l'ordre de  $6^\circ\text{C}$  pour la configuration avec quatre ailettes, qui représente une grande différence, alors l'augmentation du nombre d'ailettes a augmenté le transfert de chaleur à l'intérieur du MCP, autrement-dit, elles ont transporté la chaleur au fond du MCP et réduit l'élévation de la température sur la surface frontale du système. Les ailettes consistent à améliorer le processus de la fusion du MCP et cette dernière permet d'absorber l'excès de l'énergie incidente sur le PV sous forme chaleur latente à un intervalle de température constant.



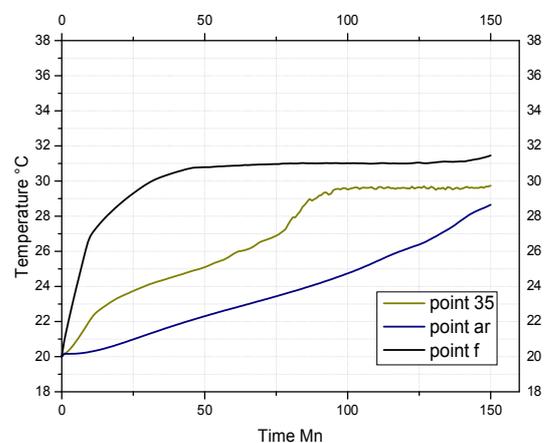
**a- Sans ailette.**



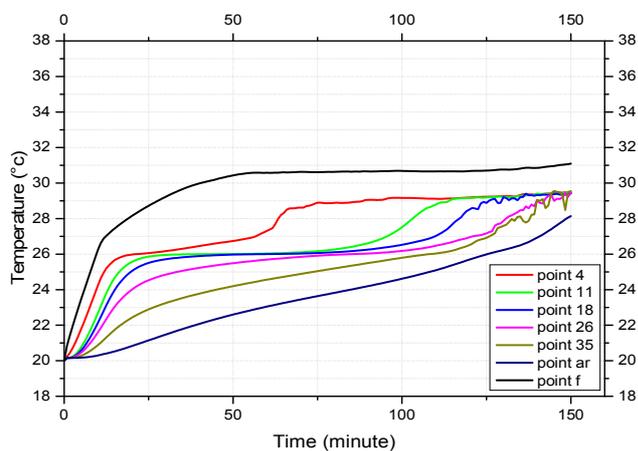
**b- Une ailette.**



**c- 2 ailettes.**



**d- 3 ailettes.**

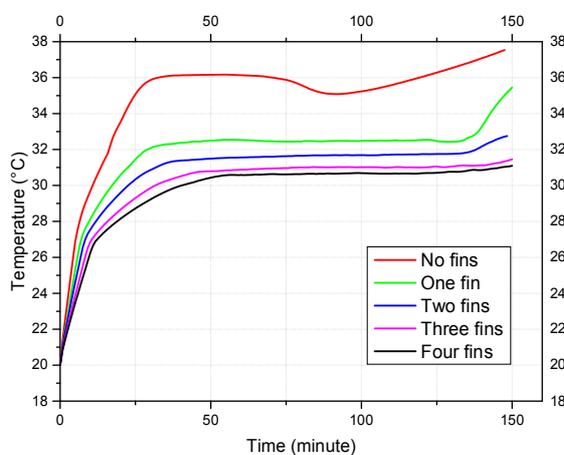


#### e- 4 ailettes.

**Fig.4.6- La variation de température avec le temps de la point inférieure section au point de section supérieure au centre du système PV / PCM pour des intervalles d'ailettes variées.**

La Fig.4.7, montre que la température du front du système est diminuée de 36°C (système sans ailettes) jusqu'à 30°C (système avec quatre ailettes) après 50 min, alors sont des résultats très intéressants, environ de 6°C de régulation thermique qui consiste à augmenter le rendement du module PV, cela dû aux ailettes qui ont augmenté le taux de transfert de chaleur vers le MCP et par la suite refroidir le module PV attaché à la surface frontale.

L'utilisation d'un nombre d'ailettes supérieures permet de maintenir la température du panneau PV environ de 30°C pour 150 min (4 ailettes), par comparaison à un système qui atteint cette température après cinq min lorsqu'on n'utilise pas le MCP derrière le PV Huang et al. [1], Cela prouve l'importance du MCP sur le contrôle de l'élévation de la température des modules PV.



**Fig.4.7- La température de la surface du front mesurée pour des systèmes avec différents ailettes.**

## **Conclusion**

L'utilisation des ailettes dans un système PV/MCP contribue à l'amélioration de ses performances thermiques. Les ailettes permettent une distribution de température plus uniforme au sein du système PV/MCP. Les flux convectifs naturels dans le MCP fondu augmentent le transfert de chaleur dans le MCP et d'améliorer encore la capacité de l'effet de contrôle thermique sur le PV. Cependant, l'augmentation du nombre d'ailettes peut limiter le mouvement de PMC fondu.

## Résumé

L'augmentation de la température des cellules photovoltaïques réduit leur efficacité, mais l'utilisation d'un matériau à changement de phase MCP intégré aux modules PV peut maintenir leurs températures proches de l'ambiante. Le présent travail consiste à étudier l'utilisation d'un MCP sur la régulation thermique des modules PV par la variation du nombre des ailettes étendues au fond du MCP de 0 jusqu'à 4, un modèle bidimensionnel de transfert de chaleur dans un système composé d'un MCP dans une enceinte rectangulaire attachée à un panneau PV a été utilisé pour résoudre les équations de Navier–Stokes et de l'énergie par la méthode des volumes finis. Les résultats obtenus ont été comparés avec des données expérimentales et numériques, un bon accord a été obtenu pour les deux contours isothermes et l'évolution temporelle de la température. Les résultats obtenus montrent que l'utilisation d'un MCP derrière un PV peut maintenir sa température à environ 36° une durée de 150 min pour la configuration sans ailettes et 30°C pendant 150 min pour une configuration à quatre, sous un flux de chaleur de 750 W/m<sup>2</sup> et une température ambiante de 20°C.

**Mots-clés :** Régulation thermique, Cellules photovoltaïques, matériau à changement de phase.

## Abstract

The increase of the temperature of photovoltaic's cells reduces their efficiency, but the use of a phase change materials PCM linked to the PV device can maintain their temperatures close to the ambient. The present work is dedicated to the study of the use of a PCM on the thermal regulation of the PV cells by the variation of the number of fins extends into the PCM from 0 to 4. A 2D A two-dimensional (2D) numerical model of heat transfer in a system composed of a phase change material situated in the back of a solar panel was used to solve the unsteady equations of energy and Navier–Stokes by using the implicit finite volume method. The obtained results have been compared with experimental and numerical of other researchers was obtained for both the isothermal contours and time evolution of the temperature. The obtained results shown that the use of PCM can maintain the temperature 36°C for 150 min for no fins configuration and 30°C for 150 min for a four fins system under 750 W/m<sup>2</sup> heat flux and 20°C of ambient temperature.

**Keys words :** thermal regulation, photovoltaic's cells, phase change materials.

إن ارتفاع درجة حرارة الخلايا الكهروضوئية يقلل من فعاليتها، ولكن استخدام مواد متغيرة الحالة MCP مدمجة في الوحدات الكهروضوئية PV يحافظ على درجة حرارتها قريبة من درجة حرارة المحيط. يتطرق هذا العمل لدراسة استخدام مواد متغيرة الحالة MCP في التنظيم الحراري للوحدات الكهروضوئية وذلك بتغيير عدد الجنيحات الممتدة إلى عمق MCP من 0 إلى 4 ، نموذج ثنائي الأبعاد للتبادل الحراري في نظام مكون من MCP في علبة مستطيلة موصولة مباشرة بلوحة كهروضوئية استعمل لحل معادلات انحفاظ كمية الحركة "نافيير- ستوكس" و معادلة الطاقة بطريقة الحجم محدد.

النتائج المتحصل عليها قورنت مع معطيات تجريبية و رقمية، وقد لاحظنا توافق جيد بالنسبة لدرجات الحرارة العامة للنظام و تغيرات درجات الحرارة بدلالة الزمن. النتائج أثبتت أن استعمال مواد متغيرة الحالة MCP مع نظام PV يحافظ على درجة حرارته في حدود 36 درجة مئوية لمدة 150 دقيقة في نظام بدون جنيحات، بينما يخفض درجة الحرارة إلى 30 درجة مئوية لمدة 150 دقيقة في نظام ب 4 جنيحات ، في ظل إشعاع حراري  $750 \text{ W} / \text{m}^2$  ، وفي درجة الحرارة العادية 20 درجة مئوية.

**الكلمات المفتاحية :** التنظيم الحراري ، الخلايا الكهروضوئية، متغيرة الحالة.