



HAL
open science

Stockage d'énergie thermique par changement de phase solide/liquide dans les milieux poreux

Mohamed Moussa El Idi

► **To cite this version:**

Mohamed Moussa El Idi. Stockage d'énergie thermique par changement de phase solide/liquide dans les milieux poreux. Thermique [physics.class-ph]. Université Paris-Est, 2021. Français. NNT : 2021PESC0031 . tel-03644411v2

HAL Id: tel-03644411

<https://theses.hal.science/tel-03644411v2>

Submitted on 19 Apr 2022

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



UNIVERSITÉ PARIS-EST

ÉCOLE DOCTORALE SCIENCE INGÉNIERIE ET ENVIRONNEMENT

T H È S E

pour l'obtention du diplôme de
Docteur de l'Université Paris-Est
Spécialité : Sciences de l'ingénieur

Par

Mohamed Moussa EL IDI

Stockage d'énergie thermique par changement de phase solide/liquide
dans les milieux poreux

Soutenue le 6 Janvier 2021 devant le jury composé de :

Souad HARMAND	Professeur Université Polytechnique Hauts-de-France	Présidente
Véronique MICHAUD	Professeur École polytechnique fédérale de Lausanne	Rapporteur
Patrick GLOUANNEC	Professeur Université Bretagne Sud	Rapporteur
Stéphane VINCENT	Professeur Université Gustave Eiffel	Examineur
Cherif LAROUCI	Maître de Conférences, HDR ESTACA	Examineur
Mahamadou TANKARI	Maître de Conférences Université Paris-Est Créteil	Co-encadrent
Mustapha KARKRI	Maître de Conférences, HDR Université Paris-Est Créteil	Directeur de Thèse

Résumé

Le développement des systèmes photovoltaïques et des véhicules électriques est dépendant de celui des batteries. La gestion thermique efficace des batteries est nécessaire pour leur assurer une meilleure performance, une autonomie et une durée de vie optimale. Les systèmes de refroidissements actifs (air/ liquide) sont les plus utilisés comme systèmes de gestion thermique. Cependant, ces systèmes sont coûteux en matière de consommation énergétique, d'investissement et de maintenance. L'utilisation de matériaux à changement de phase (MCP) pour l'absorption de la chaleur générée par les cellules peut représenter une alternative moins coûteuse et plus facile à mettre en œuvre. Cependant, les MCP possèdent une faible conductivité thermique ($0.15-0.4 \text{ W/(m. K)}$) qui limite les capacités d'échanges thermiques et réduit la cinétique de changement de phase solide liquide. Afin d'augmenter la capacité d'échange thermique entre la batterie et le MCP, des matériaux à haute conductivité thermique, comme les mousses métalliques peuvent être ajoutés. En effet les mousses métalliques (MM) possèdent des caractéristiques spécifiques telles qu'une porosité élevée (entre 0.8 et 0.98), une grande conductivité thermique et une large surface de contact par unité de volume. Cela les installe dans une position de bonne solution potentielle pour l'intensification du transfert thermique. Dans ce travail de thèse, la gestion thermique des batteries type Li-ion par un composite MM-MCP a été étudiée expérimentalement et numériquement à l'échelle d'une cellule. Dans une première partie, des composites MM- MCP ont été développés et caractérisés. Les résultats recueillis ont révélé une conductivité thermique élevée des composites par rapport au MCP pur. Par ailleurs, un modèle analytique de prédiction de la conductivité thermique effective a été développé. Dans une deuxième partie et dans le but de comprendre les mécanismes de transfert lors du changement de phase, des études numériques et expérimentales ont été menées conjointement et de nouveaux dispositifs expérimentaux ont été développés. Dans cette partie, l'impact de la morphologie et des propriétés de la mousse sur la cinétique de changement de phase solide- liquide a été étudié. Les résultats obtenus ont permis de classer le composite paraffine RT27- Mousse d'aluminium comme le meilleur candidat pour garder la température d'une cellule Li-ion dans l'intervalle des températures souhaitées ($15^{\circ}\text{C}-30^{\circ}\text{C}$). La dernière partie a été consacrée à l'étude des phénomènes thermiques dans une cellule Li-ion type : 18650, au dimensionnement, à l'optimisation et à la mise en place d'un système de gestion thermique passif pour les batteries Li-ion. Une nouvelle plateforme expérimentale a été conçue et utilisée pour étudier le comportement thermique des cellules de batterie. Plusieurs scénarios de variations de profil de courant de sollicitation et de la température ambiante ont été testés. Les sources de chaleur dans une cellule Li-ion ont été mises en évidence. En outre, il a été observé que la température de la cellule dépend de plusieurs paramètres : l'intensité du courant, la durée des cycles charge/décharge et la température ambiante. Les résultats expérimentaux et numériques ont prouvé que l'ajout d'une mousse d'aluminium permet une gestion thermique plus efficace de la cellule. Les résultats ont révélé qu'une différence de température d'environ 11°C a été enregistrée sur la surface externe de la cellule. L'étude d'optimisation a montré qu'une sous-estimation de l'épaisseur de MCP (masse de MCP nécessaire) conduit à des températures extrêmes.

Cependant l'ajout d'une masse supplémentaire du MCP n'a pas une grande influence sur la température de la surface des cellules.

Abstract

The development of photovoltaic systems and electric vehicles is dependent on the development of batteries. Efficient thermal management of batteries is necessary to ensure better performance, autonomy and optimal lifespan. Active cooling systems (air/liquid) are the most widely used thermal management systems. However, these systems are costly in terms of energy consumption, investment and maintenance. The use of phase change materials (PCM) for the absorption of heat generated by Li-Ion cells can represent a cheaper and easier to implement alternative. However, PCMs have a low thermal conductivity (0.15- 0.4 W/(m. K)) which limits heat exchange capacities and reduces solid-liquid phase change kinetics. In order to increase the heat exchange capacity between the battery and the MCP, a material with high thermal conductivity, such as metal foams, can be added. Indeed, metal foams have specific characteristics such as high porosity (porosity between 0.8 and 0.98), high thermal conductivity and a large contact surface per unit volume. This qualifies them to be a good solution to intensify heat transfer. In this thesis work, the thermal management of Li-ion batteries by a PCM-Metal, Foam composite has been studied experimentally and numerically at the scale of a cell and a battery. In a first part, metal foam-PCM composites were developed and characterized. The collected results revealed a high thermal conductivity of PCM-Metal, Foam Composites compared to pure PCM. In addition, an analytical model for predicting the thermal conductivity of PCM-Metal Foam composites was developed. In a second part and in order to understand the transfer mechanisms during solid-liquid phase change, numerical and experimental studies were carried out. In this part, the impact of the morphology and properties of the foam on the solid-liquid phase change kinetics was studied. The results obtained allowed to classify the paraffin RT27- Aluminum Foam composite as the best candidate to keep the temperature of a Li-ion cell within the desired temperature range (15°C- 30°C). The last part was devoted to the study of thermal phenomena in a typical Li-ion cell: 18650, to the designing, optimization and implementation of a passive thermal management system for Li-ion batteries. A new experimental bench was designed and used to study the thermal behavior of Li-ion batteries in the scale of a cell. Several scenarios of variations in the load current profile and ambient temperature were applied to the cell. Heat sources in a Li-ion cell were highlighted. In addition, it was observed that the cell temperature depends on several parameters: current intensity, duration of charge/ discharge cycles and ambient temperature. Experimental and numerical results proved that the addition of an aluminum foam allows a more efficient thermal management of the cell. The optimization study showed that an underestimation of the thickness (mass of MCP required) leads to extreme temperatures. However, the addition of an additional mass of MCP does not have a great influence on the cell surface temperature.

Remerciements

À l'issue de ces trois années de thèse, je souhaite exprimer toute ma gratitude envers ceux qui ont rendu son accomplissement possible.

Je tiens, en premier lieu, à exprimer ma grande gratitude à mon directeur de thèse Monsieur Mustapha Karkri, sans qui cette thèse n'aurait pas pu être réalisée. Je le remercie, pour sa patience, son soutien et ses conseils tant sur le plan scientifique qu'humain. Merci de m'avoir offert l'opportunité de réaliser cette recherche doctorale pleine de défis scientifiques enrichissants.

Je souhaite remercier les membres du jury de ma soutenance pour leurs lectures détaillées et leur critique constructives qui permettront de juger mon travail.

J'adresse ma sincère reconnaissance à Monsieur Mohamadou Abdou Tankari, Maître de conférences- UPEC pour son accompagnement durant le montage du banc d'essai expérimental destiné à l'étude des phénomènes thermiques dans une cellule Li-Ion et pour sa participation à l'évaluation de la thèse en tant qu'examinateur.

Je profite de cette occasion pour exprimer ma gratitude à Monsieur Florian HUET, Ingénieur d'études et responsable de l'atelier de mécanique OSU-EFLUVE- UPEC, d'avoir participé à la conception et la fabrication du dispositif expérimental destiné à l'étude de la fusion d'un MCP incorporé dans une mousse métallique et du banc d'essai expérimental destiné à l'étude des phénomènes thermiques dans une cellule Li-Ion.

Je remercie tous les membres du laboratoire CERTES, en particulier mes collègues doctorants pour les moments passés au laboratoire ou en conférences.

Un grand merci à ma famille et mes amis. Je leur dédie ce travail.

Table des matières

Résumé	2
Abstract	4
Remerciements	5
Introduction générale	14
Nomenclature	16
Chapitre 1: Synthèse bibliographique	17
1.1. Introduction	17
1.2. Stockage d'énergie thermique	17
1.2.1. Stockage par chaleur sensible	17
1.2.2. Stockage par chaleur latente	18
1.2.3. Stockage thermochimique	18
1.3. Matériaux à changement de phase	18
1.3.1. Classification des différents types de MCP	20
1.3.1.1. Les MCP inorganiques	21
1.3.1.2. Les MCP organiques	21
1.3.1.3. Les MCP eutectiques	22
1.4. Intensification de la conductivité thermique des MCP	23
1.4.1. Ajout du graphite expansé	23
1.4.2. Mousse Métallique (MM)- MCP	25
1.4.3. Mousse de Cuivre- MCP	27
1.4.4. Mousse d'aluminium - MCP	28
1.4.5. Mousse de Nickel- MCP	30
1.5. Les généralités sur les batteries Li-ion	31
1.5.1. Introduction	31
1.5.2. Principe de fonctionnement d'un accumulateur Li-ion	31
1.6. Les phénomènes thermiques dans les batteries Li-ion	32
1.6.1. La chaleur irréversible	33
1.6.2. Chaleur de variation de l'entropie	33
1.6.3. L'influence de la température sur les performances et sur la durée de vie des batteries Li-ion	33
1.7. Gestion thermique des batteries électrochimiques par les MCP	33
1.7.1. Les systèmes de gestion thermique actifs	34
1.7.2. Les systèmes de gestion thermique passifs	36
1.7.2.1. Gestion passive par utilisation des caloducs	36
1.7.2.2. Gestion passive par MCP	37
1.8. Conclusion	41

Chapitre 2: Élaboration et étude expérimentale des propriétés thermo-	
physiques des composites Mousse métallique- Matériaux à changement de	
phase -----	44
2.1. Introduction-----	44
2.2. Préparation des échantillons -----	44
2.2.1. Méthode d'imprégnation sous-vide -----	44
2.3. Caractérisation des propriétés thermophysiques par la méthode Hot Disk et	
PCGT -----	47
2.3.1. Le Hot Disk -----	47
2.3.2. Plaque Chaude Gardée Transitoire (PCGT) -----	49
2.4. Résultats -----	53
2.4.1. Propriétés thermophysiques de la paraffine RT27 et RT35HC pure -----	53
2.4.2. Conductivité thermique à l'état solide (Hot Disk) -----	54
2.4.3. Conductivité thermique à l'état liquide (PCGT) -----	55
2.4.4. Capacité calorifique à l'état solide -----	57
2.5. Modélisation de la conductivité effective -----	57
2.6. Conclusion :-----	60

Chapitre 3: Modélisation et étude numérique de changement de phase	
solide-liquide dans un milieu poreux -----	62
3.1. Introduction-----	62
3.2. Modélisation d'écoulement de fluide dans une mousse métallique -----	62
3.2.1. Cellule élémentaire représentative -----	62
3.2.1. Perméabilité-----	62
3.2.2. Coefficient d'inertie -----	63
3.2.3. Modélisation de la perméabilité et de coefficient d'inertie -----	63
3.3. Méthode de changement d'échelle-----	65
3.3.1. Méthode des volumes moyens -----	65
3.3.2. Loi de Darcy -----	66
3.3.3. Formulation de Brinkman-----	66
3.3.4. Formulation de Forchheimer -----	67
3.4. Modélisation de changement de phase solide-liquide d'un MCP - Mousse	
métallique-----	67
3.4.1. Modèle physique-----	68
3.4.2. Modèle mathématique -----	68
3.4.2.1. Équation de la continuité -----	68
3.4.2.2. Équations de conservation de quantité de mouvement-----	68
3.4.2.3. Équations de conservation de l'énergie-----	69
3.4.2.4. Surface spécifique -----	70
3.4.2.5. Modélisation de la conductivité thermique effective-----	70
3.4.3. Coefficient de transfert thermique local-----	71
3.5. Résultats -----	72

3.5.1.	<i>Convergence des calculs</i>	72
3.5.2.	<i>Étude de sensibilité aux maillages</i>	72
3.5.3.	<i>Dispositif expérimental</i>	74
3.5.4.	<i>Comparaison des résultats numériques/ expérimentaux et validation du modèle numérique</i>	76
3.5.4.1.	<i>Comparaison de l'évolution de la fraction liquide</i>	76
3.5.4.2.	<i>Comparaison de l'évolution de la température</i>	78
3.5.5.	<i>Etude paramétrique et mécanismes de transferts thermiques</i>	79
3.5.6.	<i>Effet de la morphologie de la mousse sur le changement de phase</i>	82
3.5.6.1.	<i>Effet de la porosité sur le changement de phase</i>	82
3.5.6.2.	<i>Effet de la densité des pores sur le changement de phase</i>	83
3.5.7.	<i>Effet du type de la mousse sur la cinétique de changement de phase</i>	83
3.5.8.	<i>Effet des conditions aux limites sur la cinétique de changement de phase</i>	85
3.5.8.1.	<i>Effet des conditions de chauffage et de refroidissement sur la fraction liquide</i>	87
3.5.8.2.	<i>Évolution temporelle de l'énergie stockée</i>	88
3.5.9.	<i>Effet des pertes thermiques par convection</i>	89
3.6.	<i>Conclusion</i>	90
Chapitre 4: Étude expérimentale du comportement thermique des cellules Li-ion; dimensionnement et optimisation d'un système de gestion thermique passif		
		91
4.1.	<i>Introduction</i>	91
4.2.	<i>Description du banc expérimental</i>	91
4.3.	<i>Étude expérimentale des phénomènes thermiques dans une cellule Li-ion</i>	92
4.3.1.	<i>Déroulement des essais</i>	93
4.3.2.	<i>Évolution de la température et de la densité de flux de la cellule</i>	93
4.3.3.	<i>Étude de l'influence de courant de charge/ décharge sur la température de la cellule</i>	94
4.3.4.	<i>Étude de l'impact de la fréquence des essais sur la température de la cellule en régime permanent</i>	95
4.3.5.	<i>Étude de l'influence de la température ambiante sur la température de la cellule</i>	96
4.4.	<i>Gestion thermique par l'utilisation d'un composite MM- MCP : Étude numérique</i>	97
4.4.1.	<i>Modèle physique</i>	97
4.4.1.	<i>Calcul de la quantité de MCP nécessaire</i>	98
4.4.2.	<i>Optimisation de la quantité de MCP utilisée</i>	99
4.1.	<i>Gestion thermique par utilisation d'un composite MM- MCP : Étude expérimentale</i>	104
4.1.1.	<i>Dispositif expérimental</i>	104
4.1.2.	<i>Évolution de la température de la cellule</i>	108
4.1.3.	<i>Distribution de la température sans convection forcée</i>	109
4.1.4.	<i>Distribution de température- avec convection forcée</i>	113
4.1.5.	<i>Impact de l'ajout d'une mousse métallique et de la convection forcée</i>	114
4.1.6.	<i>Comparaison entre la température de la cellule prédite et mesurée</i>	116
4.2.	<i>Modélisation thermoélectrique</i>	121

4.3.	Modélisation électrique d'une batterie Li-ion-----	121
4.3.1.	<i>Modèle électrochimique</i> -----	122
4.3.2.	<i>Modèles heuristiques (boîtes noires)</i> -----	122
4.3.3.	<i>Modèles empiriques</i> -----	122
4.3.4.	<i>Modèles par circuit électrique équivalent</i> -----	122
4.3.5.	<i>Modèle de Randles</i> -----	123
4.3.6.	<i>Choix du modèle</i> -----	123
4.4.	Modélisation thermique de la batterie-----	124
4.4.1.	<i>Les sources de chaleur</i> -----	124
4.4.1.1.	<i>La chaleur irréversible</i> -----	124
4.4.1.2.	<i>La chaleur réversible</i> -----	125
4.4.2.	<i>Modélisation thermique</i> -----	125
4.5.	Caractérisation thermophysique des cellules-----	126
4.6.	Modélisation sur MATLAB Simulink-----	126
4.6.1.	<i>Identification des paramètres : Analyse temporelle du modèle dynamique</i> -----	129
4.6.2.	<i>Principe de la méthode des moindres carrés</i> -----	130
4.6.3.	<i>Identification des trois paramètres</i> -----	130
4.6.4.	<i>Validation</i> -----	130
4.7.	Conclusion-----	133
	Conclusion générale et perspectives-----	135
	Annexe I: Définitions élémentaires-----	137
	Annexe II : Généralité sur les milieux poreux et les matériaux cellulaires-----	140
	Annexe III : Présentation COMSOL Multiphysics-----	146
	Références-----	149

Listes des figures

Figure 1: Le principe de fonctionnement d'un MCP [4]-----	19
Figure 2: Classement des MCP [8] -----	20
Figure 3: Mousse de Nickel -----	26
Figure 4: Protocole d'élaboration d'un composite MM-MCP par imprégnation sous-vide [37] -----	26
Figure 5: Dispositif expérimental [40] -----	29
Figure 6: Dispositif expérimental [48] -----	29
Figure 7: Densités d'énergie massiques et volumiques des différentes batteries [64] -----	31
Figure 8: Principe de fonctionnement d'un accumulateur Li- ion (en décharge) -----	32
Figure 9: Les différents systèmes de refroidissement à air [70]-----	35
Figure 10: Les différentes configurations des systèmes de refroidissement à liquide [70] ----	36
Figure 11: Refroidissement des batteries Li-ion par des caloducs [78]-----	37
Figure 12: Le modèle physique d'Al-Hallaj [83].-----	38
Figure 13: Les deux configurations étudiées dans la référence [54] -----	39
Figure 14: Dispositif expérimental publié dans la référence [54]-----	39
Figure 15: Dispositif expérimental, XFM120. -----	45
Figure 16: MM- MCP dans le moule en verre-----	45
Figure 17: Protocole d'élaboration -----	46
Figure 18: Mesure de la masse de l'échantillon -----	47
Figure 19: Photo du Hot- Disk TP2500. -----	48
Figure 20: Évolution de la température -----	49
Figure 21: Schéma descriptif de la Plaque Chaude Gardée Transitoire -----	50
Figure 22: Moule en aluminium utilisé pour les composites en phase liquide.-----	52
Figure 23: La partie inférieure de la PCGT : échantillon préparé instrumenté.-----	52
Figure 24: Étude en DSC : (a) chauffage RT27, (b) refroidissement RT27, (c) chauffage RT35HC, (d) refroidissement RT35HC [106]-----	53
Figure 25: Évolution de la température et de la densité de flux thermique, échantillon 3. ---	56
Figure 26: Évolution de la température et de la densité de flux thermique, échantillon 2. ---	56
Figure 27: Évolution de la température et de la densité de flux thermique, échantillon 1. ---	57
Figure 28: Représentation du modèle Tétrakaidécaèdre [113]-----	58
Figure 29: Coupe 2D partielle de la cellule tétrakaidécaèdre -----	60
Figure 30 : Polyèdres représentatifs de la structure de la mousse : (a) Dodécaèdre, (b) Cellule de Kelvin -----	63
Figure 31: Représentation du VER [130]-----	66
Figure 32: Modèle physique : composite mousse-MCP -----	68
Figure 33: Maillage EF -----	73
Figure 34: Etude de sensibilité au maillage -----	73
Figure 35: Schématisation du dispositif expérimental-----	74
Figure 36 : Photo du dispositif expérimental -----	74
Figure 37: Composite mousse/ paraffine inséré dans le bac-----	75
Figure 38: Interface LABVIEW développée dans le cadre de cette étude -----	76
Figure 39: Comparaison des résultats numériques et expérimentaux (front de fusion) -----	77
Figure 40: Comparaison de l'évolution de la fraction liquide -----	77
Figure 41: Conversion des images binaires, (a) : photo, (b) : première conversion et (c) deuxième conversion-----	77

Figure 42: Schéma du dispositif expérimental de Y. Zhao et al [44].	78
Figure 43: Comparaison de l'évolution temporelle de la température	79
Figure 44: Champs de température, de phase et de vitesse durant la fusion de RT27	80
Figure 45: Champs de température, de phase et de vitesse durant la fusion de RT27- Mousse d'Aluminium	81
Figure 46: Impact du nombre de Rayleigh sur la fusion du MCP	81
Figure 47: Effet de la porosité sur la fusion	82
Figure 48: Effet de la porosité sur la solidification	83
Figure 49: Effet de la densité des pores sur le temps de fusion	84
Figure 50: Effet de la densité des pores sur le temps de solidification	84
Figure 51: Effet de la conductivité thermique des mousses sur la fusion du MCP	85
Figure 52: Cycle de chauffage et refroidissement	86
Figure 53: Évolution de la fraction liquide	87
Figure 54: Énergie stockée	88
Figure 55: Effets des pertes par convection (flux constant).	89
Figure 56: Effets des pertes par convection (flux sinusoïdal).	90
Figure 57: Banc d'essai expérimental	92
Figure 58: Cellule instrumentée (Chambre climatique type ESPEC- 642)	92
Figure 59: Profil charge/ décharge	93
Figure 60: Évolution de la température ambiante (Température de la salle)	94
Figure 61: Évolution de la température	94
Figure 62: Évolution de la densité de flux thermique	94
Figure 63: Influence du courant sur l'évolution de la température	95
Figure 64: Influence de la fréquence sur la température	96
Figure 65: Influence de la température ambiante	96
Figure 66: Courbes de SOH mesurées en fonction du temps pour des cycles de 1 C et à différentes températures [160].	97
Figure 67 : Modèle physique	99
Figure 68 : Modèle physique simplifié	99
Figure 69: Évolution de la fraction liquide	100
Figure 70 : Effet du système de gestion thermique sur la température de la cellule	100
Figure 71 : Schématisation des capteurs de la température	101
Figure 72: Influence de l'ajout d'une mousse sur l'état thermique de la cellule.	102
Figure 73 : Champ des phases	102
Figure 74 : Champs des températures	103
Figure 75: Impact de l'épaisseur du composite	104
Figure 76: Moule en aluminium utilisé dans le cadre de cette étude	105
Figure 77: Photographie des trois moules	105
Figure 78: Protocole de remplissage des moules	106
Figure 79: Intégration de la cellule dans le moule 3D.	106
Figure 80: Mousse métallique en tube	107
Figure 81: Cellule logée dans la chambre climatique	107
Figure 82: Positions des thermocouples (a) : photo, (b) : Schématisation	108
Figure 83: Évolution de la température mesurée avec et sans système de gestion thermique	109
Figure 84: Évolution de la température- 3mm- RT27 pure, sans convection	110
Figure 85: Évolution de la température RT27 pure- 5mm, sans convection forcée	110

Figure 86: Évolution de la température RT27 pure- 7mm, sans convection forcée-----	111
Figure 87: Influence de la masse du MCP sur la température de la cellule, sans convection forcée-----	111
Figure 88: Évolution de la température MA- RT27- 3mm, sans convection forcée -----	112
Figure 89: Évolution de la température MA- RT27- 7mm, sans convection forcée -----	112
Figure 90: Évolution de la température RT27 pure- 3mm, convection forcée-----	113
Figure 91: Évolution de la température RT27 pure- 7mm, convection forcée-----	113
Figure 92: Influence de la masse du MCP utilisé avec convection forcée -----	114
Figure 93: Impact de l'ajout d'une mousse métallique sur la température de la cellule sans convection forcée-----	115
Figure 94: Impact de l'ajout d'une mousse métallique sur la température de la cellule avec convection forcée. -----	115
Figure 95: Influence de la convection forcée sur l'état thermique de la cellule -----	116
Figure 96 : Comparaison entre les résultats numériques 2D et expérimentaux, RT27 pure -	116
Figure 97: Comparaison entre la température de la cellule simulée et mesurée, MA- RT27-	117
Figure 98: Représentation 3D du moule avec MCP -----	118
Figure 99 : Fluxmètre « disque »-----	118
Figure 100 : Cellule de batterie instrumentée par un fluxmètre « disque »-----	118
Figure 101: Densité de flux radiale et axiale -----	119
Figure 102: Flux radial et flux axial -----	119
Figure 103: Comparaison entre les résultats numériques et expérimentaux -----	120
Figure 104: Comparaison entre les résultats numériques et expérimentaux-----	120
Figure 105: Modèle électrothermique de la batterie -----	121
Figure 106: Modèle de Randles -----	123
Figure 107: Modèle de Randles Modifié (MRM)-----	124
Figure 108 : Caractérisation thermique des cellules par Hot- Disk-----	126
Figure 109: Interface du modèle Simscape -----	127
Figure 110: Modèle électrique sous Simscape -----	128
Figure 111: Modèle thermique sous Simscape -----	129
Figure 112: Schématisation de la méthode d'identification -----	130
Figure 113: Comparaison des profils de la tension obtenus numériquement et expérimentalement-----	131
Figure 114: Résistance R_1 en fonction du SOC-----	131
Figure 115: Résistance R_0 en fonction du SOC-----	131
Figure 116: Capacité C en fonction du SOC-----	132
Figure 117: Comparaison de la température numérique et expérimentale -----	132
Figure 118: Erreur relative -----	133
Figure 119: Exemple des mousses métalliques (a), à cellules fermées et (b) à cellules ouvertes [192] -----	140
Figure 120: Mousse métallique à cellule ouverte (SEM image)-----	142
Figure 121: Aperçu des différentes "familles" de méthodes de production des matériaux métalliques cellulaires [200] -----	143
Figure 122: Schématisation de la tortuosité -----	144
Figure 123: Présentation de l'interface COMSOL-----	147

Liste des tableaux

Tableau 1: Propriétés thermophysiques de certains MCP inorganiques -----	21
Tableau 2: Propriétés thermophysiques de certaines paraffines -----	22
Tableau 3: Propriétés thermophysiques de certains MCP eutectiques -----	23
Tableau 4: Avantages et inconvénients des différents MCP -----	24
Tableau 5: Propriétés thermo-physiques de certains composites graphite expansé- MCP----	25
Tableau 6: Propriétés des mousses métalliques-----	26
Tableau 7: Propriétés thermophysiques de certains composites Mousse en Cuivre- MCP ---	28
Tableau 8: Propriétés thermophysiques de certains composites Mousse en Nickel- MCP----	30
Tableau 9: Avantages et inconvénients des différents systèmes de gestion thermique des batteries Li-ion-----	41
Tableau 10: Propriétés des mousses métalliques -----	46
Tableau 11: Taux d'imprégnation des échantillons -----	47
Tableau 12 : Conductivité thermique de RT27 et RT35HC -----	54
Tableau 13: Conductivité thermique effective Hot Disk. -----	54
Tableau 14: Comparaison des résultats de la présente étude avec ceux de la littérature-----	55
Tableau 15 : Conductivité thermique effective à l'état liquide -----	56
Tableau 16: La diffusivité thermique et capacité calorifique des composites -----	57
Tableau 17 : Comparaison entre les résultats expérimentaux de la présente étude et les modèles de prédiction de la conductivité.-----	60
Tableau 18: Comparaison entre les résultats expérimentaux de la présente étude avec le modèle de Boomsma et Boomsma corrigé.-----	60
Tableau 19: Propriétés thermophysiques des mousses métalliques-----	85
Tableau 20 : Temps de solidification -----	89
Tableau 21: Propriétés thermophysiques de la batterie-----	126

Introduction générale

La demande énergétique mondiale ne cesse d'augmenter et elle continuera à augmenter dans les prochaines décennies. Face à ce constat, les énergies renouvelables apparaissent comme une solution qui permet de satisfaire les besoins mondiaux croissants tout en respectant les contraintes environnementales. Cependant, l'inconvénient de ces énergies réside dans leur production intermittente et irrégulière. Dans ce cadre, le stockage de l'énergie suscite beaucoup d'intérêt puisqu'il permet de surmonter ces inconvénients. Les matériaux à changement de phase (MCP) solide-liquide sont une réponse possible à ce problème. Ils ont la capacité de stocker et de libérer l'énergie thermique lors du passage d'une phase à une autre.

Les MCP sont utilisés dans différents domaines telsque, la construction des bâtiments, le stockage d'énergie solaire, le refroidissement des composants électroniques, les systèmes de climatisation, l'industrie textile etc. Mais leur utilisation est freinée par la complexité du phénomène de changement de phase solide-liquide, qui est lié à la dynamique des transferts de chaleur et de masse, à la distribution spatio-temporelle des évolutions, et au comportement particulier des MCP lors du changement de phase qui introduit une singularité importante au sein du modèle de transferts thermiques. Une compréhension et une analyse de ces phénomènes de transferts et de changement de phase se révèlent donc indispensables pour la conception d'un système de stockage d'énergie sous forme de chaleur latente. L'utilisation des MCP est par ailleurs pénalisée par leur faible conductivité thermique. La conductivité thermique de cires de paraffine est d'environ 0.15- 0.4 W/(m.K). Afin d'améliorer la conductivité thermique, il est nécessaire d'ajouter à ce matériau des charges conductrices de chaleur. L'une des pistes utilisées pour remédier à ce problème consiste à imprégner les MCP dans un milieu poreux de haute conductivité thermique.

Les mousses métalliques (MM) sont des milieux poreux à matrice métallique, qui possèdent des caractéristiques spécifiques telles qu'une porosité élevée (porosité entre 0.8 et 0.98), et une grande conductivité thermique. Ce qui les qualifie à être une bonne solution pour intensifier le transfert thermique lors de la fusion et de la solidification du MCP.

L'un des défis consiste à trouver les propriétés thermophysiques de ces composites MM- MCP et les conditions de chauffage et de refroidissement optimales permettant une utilisation efficace pour une gestion passive des batteries Li-ion. Le conditionnement thermique optimal des batteries Li-Ion est indispensable pour leur assurer une meilleure performance, ainsi qu'une autonomie et une durée de vie optimales. Les méthodes classiques se basent sur un contrôle thermique actif forcé ou naturel souvent encombrant et coûteux avec une efficacité limitée. Dès lors, l'utilisation des composites MCP de manière passive représente une alternative et une voie intéressantes.

Ce manuscrit propose une étude expérimentale et numérique sur le comportement thermique des composites Paraffine/ Mousse métallique et leur utilisation pour la gestion thermique efficace et optimale des batteries Li-Ion.

Le premier chapitre est consacré à l'étude bibliographique présentant les différents types de stockage thermique. Les différentes méthodes d'amélioration de la conductivité thermique des MCP et l'intensification du transfert de chaleur lors de changement de phase solide-liquide y sont détaillées. Ensuite, les problèmes thermiques des batteries Li-ion sont mis en évidence. Enfin, les différents systèmes de gestion thermique et les performances de ces systèmes ont été présentés.

Le deuxième chapitre est consacré à l'élaboration des composites Mousse métalliques/ Paraffine et l'identification de leurs propriétés thermophysiques, et à la modélisation de la conductivité thermique effective de ces composites. Les techniques ainsi que les appareils de caractérisation y sont présentés.

Le troisième chapitre est dédié à la modélisation de changement de phase solide-liquide dans les milieux poreux et à l'étude numérique de l'effet du matériau, de la morphologie de la mousse métallique et des conditions de chauffage/ refroidissement sur la cinétique de changement de phase. Un nouveau banc expérimental est développé pour valider le modèle numérique.

Le dernier chapitre s'intéresse à l'étude des phénomènes thermiques dans une cellule Li-ion type 18650, au dimensionnement, à l'optimisation d'un système de gestion thermique passif et à la modélisation thermoélectrique pour ce type de batterie. Une nouvelle plateforme pour l'étude du comportement thermique de ces cellules est alors présentée. Ce manuscrit est finalisé par une liste de références bibliographiques et des annexes.

Nomenclature

m	masse, kg	<i>Symboles grecs</i>	
V	volume, m ³	μ	viscosité dynamique, Pa.s ⁻¹
ρ	masse volumique, kg.m ⁻³	ε	Porosité
L_f	chaleur latente, J.kg ⁻¹	β	coefficient de dilatation thermique, K ⁻¹
K	Perméabilité, m ²	τ	temps adimensionnel
C	coefficient d'inertie	<i>Indices et exposants</i>	
k	conductivité thermique, W.m ⁻¹ .K ⁻¹	P	matériau à changement de phase
b	fraction liquide	F	Mousse métallique
h	coefficient d'échange convectif, W.m ⁻² .K ⁻¹	l	liquide
C_p	chaleur spécifique J.kg ⁻¹ .K ⁻¹	s	Solide
T	Température, K	eff	effective
t	Temps, s	$Li-ion$	batterie, type li-ion
q	densité de flux thermique, W.m ⁻²		
r	rayon, m		
H	hauteur, m		
Re	nombre de Reynolds		
Pr	nombre de Prandlt		
Ra	nombre de Rayleigh		
Nu	nombre de Nusselt		
Fo	Nombre de Fourier		
Ste	nombre de Stefan		

Chapitre 1: Synthèse bibliographique

1.1. Introduction

Dans ce chapitre, on va aborder l'étude bibliographique tout en commençant par citer les différents types de stockage d'énergie thermique, et par présenter les MCP, leurs caractéristiques physiques et leur principe de fonctionnement. On présente également les différentes techniques d'amélioration de la conductivité thermique des MCP notamment, l'intensification par l'ajout de mousses métalliques. Par la suite, on met en évidence le rôle de la température sur les performances des batteries Li-Ion et la nécessité d'un système de gestion thermique pour ce type de batteries. Enfin, une exploration de la littérature sur les systèmes de gestion thermique des batteries Li-Ion sera faite.

1.2. Stockage d'énergie thermique

Le stockage d'énergie thermique, peut- être défini comme étant l'accumulation de l'énergie thermique lorsqu'elle est abondante pour la restituer –après- lorsqu'elle devient rare. La plupart des systèmes présentent un décalage entre l'offre et la demande de l'énergie. Le stockage permet de compenser ce déséquilibre entre l'approvisionnement et la consommation d'énergie. On distingue trois types de stockage thermique :

- Stockage par chaleur sensible ;
- Stockage par chaleur latente ;
- Stockage thermochimique réalisé grâce à la chaleur dégagée lors d'une réaction chimique.

1.2.1. Stockage par chaleur sensible

Le stockage par chaleur sensible est basé sur la variation d'enthalpie provoquée par un changement de température d'un matériau inerte à l'état solide, liquide ou gazeux. La quantité d'énergie mise en jeu pour chauffer un matériau (un corps) de masse m à pression constante de la température T_1 à la température T_2 est de capacité calorifique massique c_p et est donnée par la relation suivante :

$$Q_{sensible} = \Delta H = \int_{T_1}^{T_2} m \cdot c_p(T) dt \quad (1)$$

Si la capacité calorifique massique du matériau est indépendante de la température sur l'intervalle $[T_2, T_1]$ ou la variation est négligeable sur cet intervalle, l'équation 1 devient :

$$Q_{sensible} = m.C_p (T_2 - T_1) \quad (2)$$

La quantité d'énergie stockée dépend alors de la capacité calorifique du corps, et de l'écart entre sa température initiale et finale. Le premier critère de sélection d'un matériau pour le stockage de la chaleur sensible est sa capacité calorifique. Le choix d'un matériau pour une application bien précise est aussi influencé par d'autres facteurs tels que la marge de température de l'application, le volume et la masse nécessaire du matériau.

1.2.2. Stockage par chaleur latente

Dans le cas d'un stockage par chaleur latente, l'énergie est stockée sous forme d'un changement d'état physique (solide-liquide). En effet, lorsqu'un matériau change de phase à une température appelée, température de fusion (T_f) ou un intervalle de température, une certaine quantité d'énergie est absorbée lors de ce processus de changement de phase. En réalisant le procédé inverse, l'énergie est déstockée et le matériau revient à son état physique initial. L'énergie absorbée est appelée chaleur latente de fusion (L_f) et l'énergie déstockée est la chaleur latente de solidification (L_s). La chaleur latente est généralement beaucoup plus élevée que la capacité calorifique, ce qui permet de stocker plus de chaleur dans un volume réduit par comparaison avec un stockage thermique par chaleur sensible. Contrairement au stockage sensible, ce type de stockage peut être efficace pour des différences de température très faibles. Le changement de phase d'un corps pur se produit à une température bien précise [1,2]. Dans le cas d'un changement de phase d'un mélange homogène, le changement de phase peut avoir lieu sur un intervalle de température qui est plus ou moins large en fonction des propriétés du mélange et en coexistence de deux phases solide et liquide.

1.2.3. Stockage thermochimique

Le stockage thermochimique repose sur l'utilisation d'une réaction endothermique réversible. Les procédés de stockage thermochimique sont définis selon deux critères : le procédé est-il ouvert ou fermé, et le réacteur est-il intégré ou séparé du système de stockage. Ce type de stockage est beaucoup plus compliqué en comparaison aux deux autres types que nous avons évoqués. Les produits doivent être séparés pendant le stockage et une mise en contact des réactions doit être faite pendant le déstockage. Comme l'énergie est stockée par réaction chimique, elle peut être stockée à la température ambiante.

1.3. Matériaux à changement de phase

Les matériaux à changement de phase (MCP) offrent la possibilité d'emmagasiner et de restituer une forte quantité de chaleur au moment de leur changement de phase dans des volumes réduits. La Figure 1 présente le principe de fonctionnement des MCP. Le premier critère de sélection d'un MCP est la chaleur latente. Le choix d'un MCP pour une application bien précise est aussi influencé par d'autres contraintes :

- **Température de fusion** : La température de fusion est très importante dans le choix d'un MCP pour une application industrielle précise. Il faut que la

température de fusion s'accorde avec la température de fonctionnement du système. Le choix d'un MCP sans prise en considération de ce critère peut conduire à ne pas utiliser le changement de phase et donc travailler uniquement en sensible. La détermination préalable de la température du fonctionnement du système est cruciale dans le choix du MCP adéquat.

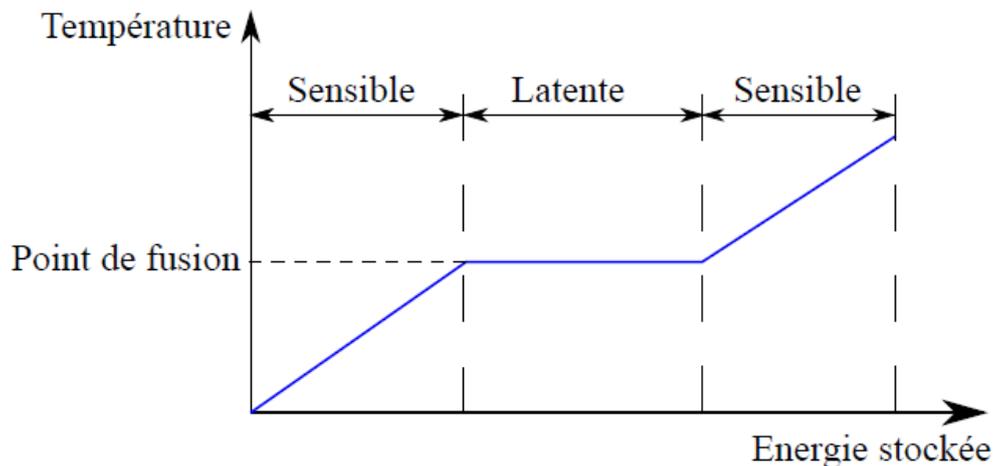


Figure 1: Le principe de fonctionnement d'un MCP [4]

- **Conductivité thermique :** Dans de nombreuses applications le MCP est utilisé pour stocker/ déstocker de l'énergie thermique dans un intervalle de temps bien précis. La valeur de la conductivité thermique du MCP est déterminante dans la cinétique de changement de phase. Une conductivité thermique élevée permet d'accélérer le changement de phase.
- **Surfusion :** Contrairement à la fusion qui s'amorce toujours à la même température, la cristallisation ne se fait pas à la température d'équilibre liquide-solide (température de fusion), mais à une température plus basse qui est la température de cristallisation. Il s'agit de la différence entre la température de fusion et la température de cristallisation. Le liquide est alors surfondu ou métastable. La cristallisation d'un liquide métastable est appelée aussi la rupture de métastabilité, elle peut se faire par action mécanique (vibrations, choc), ou par l'atteinte de la température de nucléation à laquelle le premier germe de solide apparaît. La réduction de la surfusion est nécessaire pour que la chaleur stockée soit resituée à la même température et pour réduire le déphasage entre les cycles de stockage/ déstockage.
- **Stabilité au cyclage thermique :** Les cyclages thermiques correspondent aux cycles successifs de stockage/ déstockage (fusion/ solidification). Ils peuvent avoir comme conséquence, la dégradation des propriétés thermophysiques du MCP et la diminution de son efficacité. Il est très important d'étudier l'effet de cycles (fusion/ solidification) sur la température de fusion, la chaleur spécifique et la chaleur latente d'un MCP. S. D. Sharma et al [3] ont étudié la stabilité et la dégradation des propriétés thermophysiques de la paraffine. Après 300 cycles, la paraffine 53 a perdu environ 10% de sa chaleur latente et a gardé sa chaleur spécifique. Les

résultats ont montré une bonne stabilité de la paraffine et une très faible dégradation des propriétés thermophysiques. 300 cycles est relativement peu par rapport à une application industrielle.

- **Expansion volumique :** Il s'agit de l'augmentation du volume lors du changement de phase solide-liquide. Ceci constitue un problème au niveau du dimensionnement de l'unité de stockage, en particulier lorsqu'on utilise un conteneur fermé. Il faut prévoir un volume plus grand que le volume du MCP à l'état solide pour contenir le MCP à l'état liquide. Une faible expansion volumique permet de stocker les deux phases dans le même volume.
- **Stabilité chimique :** Le MCP utilisé dans une unité de stockage thermique sera mis en contact avec un matériau qui constitue l'enceinte de confinement. Il faut donc s'assurer de la compatibilité du MCP utilisé avec le matériau qui constitue son encapsulation.
- **Coûts et disponibilité :** L'utilisation d'un MCP pour une application industrielle nécessite sa disponibilité à grande échelle. De plus, au vu des quantités, le prix est également très important dans la mesure où il a un impact direct sur le temps de retour sur investissement. Des durées de retour sur investissement trop importantes limitent l'attractivité d'un MCP.

1.3.1. Classification des différents types de MCP

Les MCP sont classés en trois grandes familles : MCP organiques, MCP inorganiques et MCP eutectiques [4-6]. Chaque famille est composée de plusieurs sous-familles. La Figure 2 présente les différentes familles MCP.

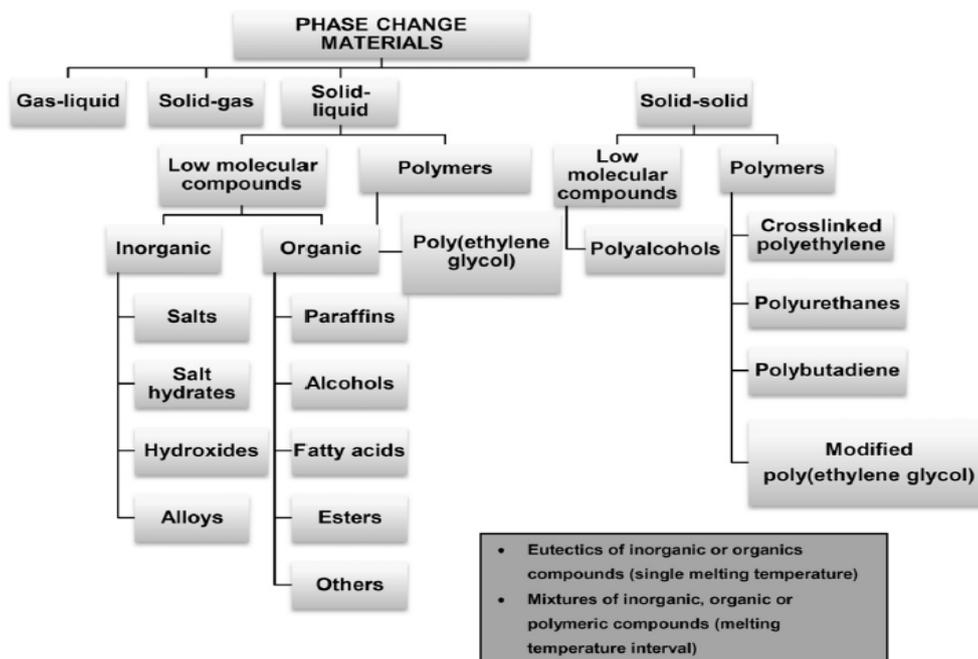


Figure 2: Classement des MCP [8]

1.3.1.1. Les MCP inorganiques

La famille des MCP inorganiques est composée principalement de : sels, hydrates de sels et métaux.

Les hydrates de sels sont les premiers utilisés comme MCP pour stocker de l'énergie thermique par changement de phase [7-9]. Ce sont des composés salins inorganiques contenant de l'eau. Ils sont obtenus par mélange d'un sel et d'une quantité d'eau –en principe- bien définie. Les hydrates de sels possèdent généralement une grande densité énergétique (2 fois plus grande que la densité énergétique des MCP organiques), une faible expansion volumique lors de changement de phase et une bonne conductivité thermique en comparaison avec d'autres MCP. On peut distinguer trois types de comportements des sels hydratés lors de la fusion qui sont : la fusion congruente, la fusion semi-congruente et la fusion non-congruente. La fusion congruente se produit dans le cas où le sel est complètement soluble dans l'eau d'hydratation à la température de fusion de sel. Le deuxième comportement, celui de la fusion semi-congruente se produit dans le cas où il y a un équilibre entre la phase solide et liquide lors d'une transition. Le dernier comportement se produit dans le cas où le sel n'est pas entièrement soluble dans l'eau de l'hydratation. Les sels hydratés ont des problèmes de ségrégation de phase, de dégradation de la chaleur latente après un millier des cycles (une chute qui peut arriver à plus de 74% pour certains MCP) et de surfusion.

Les métaux comprennent essentiellement les métaux à point de fusion bas. Ce type de MCP n'a pas encore été envisagé sérieusement pour des applications de stockage thermique en raison de pénalités de poids. Le Tableau 1 présente les propriétés thermophysiques de certains MCP inorganiques.

MCP	T_{fusion}	k_{MCP}	L_f
	$^{\circ}C$	$W/(m.K)$	kJ/kg
$LiClO_3 \cdot 3H_2O$ [10]	8.0	--	253
$KF \cdot 4H_2O$ [11,12]	18.5-19	--	231
$CaCl_2 \cdot 6H_2O$ [11-13]	28-30	1.08-0.54	190-200
$Na_2HPO_4 \cdot 12H_2O$ [12]	35-45	0.514-0.476	279.6
$Zn(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$ [14]	36	0.464	146.9

Tableau 1: Propriétés thermophysiques de certains MCP inorganiques

1.3.1.2. Les MCP organiques

Les MCP organiques peuvent être classés en deux catégories : les paraffines et les non-paraffines [15-17].

Les paraffines [18-21] ce sont des sous-produits de distillation du pétrole. Ils sont un mélange des alcanes de C_1 à C_{24} . Ce sont des molécules de formule C_nH_{2n+2} et de formule développée $CH_3-(CH_2)_n-CH_3$. Les paraffines entre C_5 et C_{15} sont des liquides et le reste sont des solides cireux. Une propriété importante des paraffines est à noter : plus la chaîne carbonée est longue plus la température de fusion est élevée. Les paraffines sont non toxiques, chimiquement stables et inertes en dessous de $500^\circ C$ [22]. Le Tableau 2 présente les propriétés thermophysiques de certaines paraffines.

MCP	Formule chimique	T_{fusion}	k_{MCP}	L_f
		$^\circ C$	$W/(m.K)$	kJ/kg
n-Hexadecane [23,24]	$C_{16}H_{34}$	18.0	0.2	210-238
n-Heptadecane [23,24]	$C_{17}H_{36}$	19.0	0.2	240
Paraffine [25]	$C_{16} - C_{18}$	20.0	-	152
Paraffine [4,25]	C_{17}	21.7	-	213
Paraffine [4,25]	C_{18}	90-	0.2	189
n-Octadecane [18,23,24]	$C_{18}H_{38}$	28.0	0.15	200-245
n-Nonadecane [18,23,24]	$C_{19}H_{40}$	28.0	0.36	245-250
n-Eicosane [18,23,24]	$C_{20}H_{42}$	36		247.0
n-Henelcosane [18,23,24]	$C_{21}H_{44}$	39.0	0.15	201.0

Tableau 2: Propriétés thermophysiques de certaines paraffines

1.3.1.3. Les MCP eutectiques

Un eutectique est un mélange de deux corps purs ou plus qui fond et se cristallise à température constante contrairement aux mélanges habituels. Les eutectiques se comportent comme des corps purs du point de vue du changement de phase. Ce type de MCP peut être classé en trois sous-familles à savoir, des mélanges de matériaux organiques, des matériaux inorganiques ou encore des mélanges organiques et inorganiques. De nombreuses études dans la littérature ont porté sur les matériaux eutectiques pour le stockage d'énergie thermique par changement de phase. Le Tableau 3 présente la température de fusion et la chaleur latente de certains MCP eutectiques.

MCP	T_{fusion}	L_f
	$^{\circ}C$	kJ/kg
45% $CaCl_2 \cdot 6H_2O$ + 55% $CaBr_2 \cdot 6H_2O$ [5]	14.7	140
66.6% $CaCl_2 \cdot 6H_2O$ + 33.3% $MgCl_2 \cdot 6H_2O$ [26]	25	127
48% $CaCl_2$ + 4.3% $NaCl$ + 0.4% KCl + 47.3% H_2O [26]	27	188
40% $CH_3COONa \cdot 3H_2O$ + 60% NH_2CONH_2 [5]	30	200.5
61.5% $Mg(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$ + 38.5% NH_4NO_3 [26]	52	125
53% $Mg(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$ + 47% $Al(NO_3)_3 \cdot 9H_2O$ [26]	61	148
59% $Mg(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$ + 41% $MgBr_2 \cdot 6H_2O$ [26]	66	168
14% $LiNO_3$ + 86% $Mg(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$ [26]	72	180
66.6% urea + 33.4% NH_4Br [26]	76	161

Tableau 3: Propriétés thermophysiques de certains MCP eutectiques

Le Tableau 4 résume les avantages et les inconvénients des différents matériaux à changement de phase.

1.4. Intensification de la conductivité thermique des MCP

L'amélioration de la conductivité thermique d'un MCP a pour but d'intensifier le transfert de chaleur lors de changement de phase et d'augmenter l'efficacité énergétique des systèmes de stockage par chaleur latente utilisant des MCP. La conductivité thermique des MCP peut être améliorée par l'ajout de particules hautement conductrices de chaleur, d'ailettes, de graphite expansé, par encapsulation et par l'imprégnation dans des mousses métalliques ou d'autres milieux poreux très conducteurs de la chaleur.

Dans ce qui suit, nous présentons une revue bibliographique sur les techniques d'amélioration de la conductivité thermique par l'ajout du graphite expansé ou par l'imprégnation dans une mousse métallique.

1.4.1. Ajout du graphite expansé

Le graphite est une espèce d'origine minérale de formule chimique « C ». Il constitue avec d'autres minéraux, les allotropies naturelles du carbone. Il a une bonne stabilité chimique et une conductivité thermique élevée qui peut varier de

$100 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ à $200 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$. Le graphite expansé est préparé par oxydation du graphite en présence d'acide nitrique et d'acide sulfurique [27].

	Avantages	Inconvénients
Organique	<ul style="list-style-type: none"> • Disponibilité dans une large gamme de températures • Pas de ségrégation de phase • Stabilité chimique • La surfusion est négligeable • La compatibilité avec le matériau de construction. • Sobriété écologique • 100% recyclables 	<ul style="list-style-type: none"> • Faible chaleur latente • Faible conductivité thermique • Dilatation volumique élevée. • Inflammables • Coût élevé par rapport aux sels hydratés
Inorganique	<ul style="list-style-type: none"> • Grande chaleur de fusion • Disponibilité • Conductivité thermique élevée • Faible dilatation volumique • Bon marché • Ininflammables 	<ul style="list-style-type: none"> • La ségrégation • Perte d'efficacité liée aux cycles de fusion/solidification • La surfusion • La corrosivité • Déshydratation liée aux cycles thermiques
Eutectique	<ul style="list-style-type: none"> • Densité de stockage volumétrique légèrement supérieure à des composés organiques. • Ils ont un point de fusion net similaire à une substance pure 	<ul style="list-style-type: none"> • Seules les données limitées sont disponibles sur les propriétés thermodynamiques. • L'utilisation de ces matériaux est très récente pour l'application de stockage thermique

Tableau 4: Avantages et inconvénients des différents MCP

L'amélioration de la conductivité thermique par l'ajout du graphite expansé a été largement étudiée dans la littérature. Sari et al [27], dans leurs études, ont proposé une technique pour améliorer la conductivité thermique de la paraffine par l'ajout du graphite expansé en variant sa fraction massique. Le graphite utilisé a une surface de contact par unité de masse de $46 \text{ m}^2/\text{g}$ et une masse volumique apparente de $300 \text{ Kg}/\text{m}^3$. Les résultats ont montré que l'ajout de 10% de graphite expansé permet de réduire le temps de fusion et d'augmenter la conductivité thermique effective de 3.73%. Lin et [28], ont utilisé du graphite expansé pour améliorer la conductivité thermique de la paraffine commercialisée, RT44. Les échantillons étudiés sont élaborés par compression uniaxiale dans une enceinte cylindrique. Ils ont une masse volumique située entre $300 \text{ kg}/\text{m}^3$ et $900 \text{ kg}/\text{m}^3$. Les résultats ont montré que l'utilisation du graphite expansé permet d'améliorer la conductivité effective d'un composite paraffine RT44/graphite expansé de la façon suivante : la conductivité effective des composites paraffine/graphite expansé est de $4.3 \text{ W}/(\text{m.K})$ pour une masse volumique de $300 \text{ kg}/\text{m}^3$ mais il peut atteindre $10.7 \text{ W}/(\text{m.K})$ pour une masse volumique de $900 \text{ kg}/\text{m}^3$.

Tang et al [29] ont développé un composite eutectique d'acides gras et des matériaux composites à changement de phase diatomite en mélangeant de l'acide palmitique (AP) et de l'acide caprique (AC). Le rapport de masse entre l'acide palmitique et l'acide caprique est de 13.6%. Du graphite expansé a été ajouté ensuite dans le but d'améliorer la conductivité de ces composites. Les eutectiques AP-AC ont été mélangés avec 40g diatomite avec différentes masses (10, 20 et 40g), pour former trois composites (échantillons différents). D'autres études dans la littérature ont montré que l'utilisation du graphite expansé permet d'améliorer d'une façon considérable la conductivité thermique des MCP. Karkri et al. [30] ont étudié l'effet du graphite recyclé sur les mécanismes du transfert de chaleur dans les composites RT50-GE. Une nette amélioration du transfert de chaleur a été observée. Ces travaux de recherche ont fait l'objet de plusieurs publications [31-33].

Le Tableau 5 présente les propriétés thermophysiques de certains composites GE-MCP issus de la littérature.

MCP	<i>pourcentage</i>	k_{MCP}	$k_{composite}$	$L_{f,composite}$
	%	$W/(m.K)$	$W/(m.K)$	kJ/kg
Paraffine [34]	26.6	0.2	16.6	185
N-octadecane [35]	16.7	0.27	1.07	189
Polyéthylène glycol [36]	94	0.299	1.324	161
Paraffine [37]	6.27	0.2697	4.676	-
Paraffine [30]	20	0.24	0.9	-

Tableau 5: Propriétés thermo-physiques de certains composites graphite expansé- MCP

1.4.2. Mousse Métallique (MM)- MCP

Les mousses métalliques à grande porosité et à cellules ouvertes sont des milieux poreux à matrice consolidée. Elles possèdent des propriétés spécifiques qui les qualifient à être une bonne solution pour améliorer la conductivité thermique effective des MCP. Parmi ces propriétés : une grande porosité, une large surface de contact par unité de volume, une grande conductivité thermique. Les mousses métalliques (MM) les plus utilisées sont : les mousses de cuivre, d'aluminium, et de nickel. La Figure 3, présente une image à l'échelle microscopique d'une mousse de nickel de porosité 95%. L'incorporation d'un MCP dans une mousse métallique permet d'augmenter la conductivité thermique et d'intensifier le transfert de chaleur selon les propriétés de la mousse métallique utilisée. Le Tableau 6 présente les propriétés thermophysiques des différentes mousses et une estimation de leurs prix [38]. Le procédé le plus utilisé pour l'élaboration des composites MM- MCP est l'imprégnation sous-vide [39,40]. Le principe consiste à imposer une pression inférieure à 0.7mbar à une température inférieure à la température de fusion. Ensuite, une température

supérieure à la température de fusion est maintenue jusqu'à la fusion totale du MCP. Après cela, une pression $P=P_{atm}$ est maintenue jusqu'à l'équilibre entre la pression à l'intérieur de l'enceinte sous-vide et l'environnement. Le refroidissement du composite se fait à la pression ambiante et à une température inférieure à la température de fusion dans (ou non) un réfrigérateur. La Figure 4 présente le principe de procédé d'imprégnation sous-vide d'un composite MM- MCP. Un autre protocole sera présenté dans le cadre de ces travaux [41].

Matériau	ρ	k	T_f	Prix
	kg/m^3	$W/(m.K)$	K	Euro(€)/tonne
Cuivre	8933	350-401	1086	6016
Aluminium	2700	205-230	660	1800
Nickel	8907	88-93	4120	-

Tableau 6: Propriétés des mousses métalliques

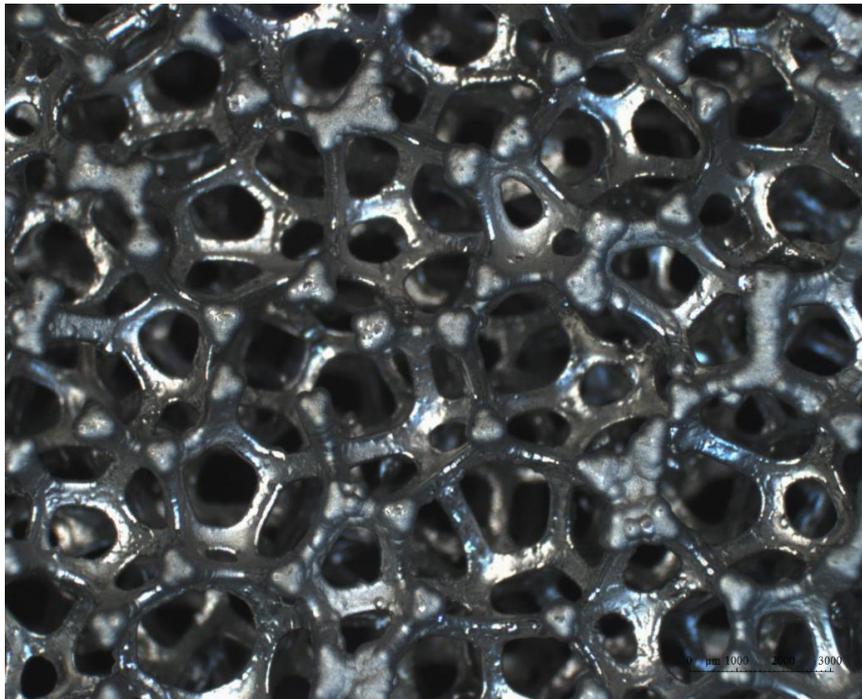


Figure 3: Mousse de Nickel

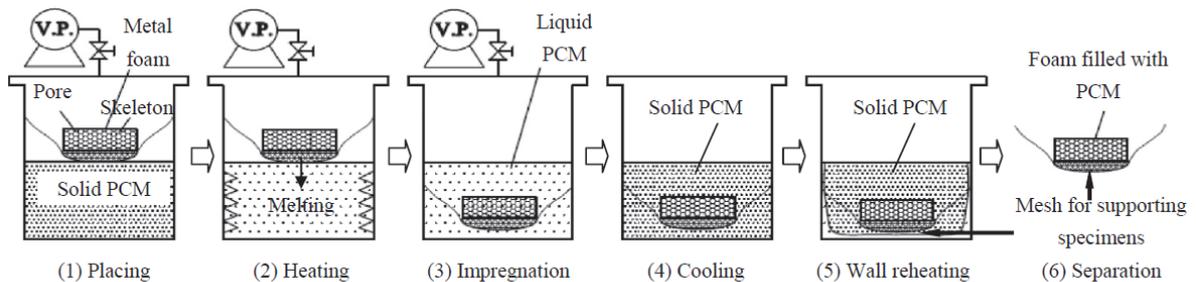


Figure 4: Protocole d'élaboration d'un composite MM-MCP par imprégnation sous-vide [37]

1.4.3. Mousse de Cuivre- MCP

Les mousses de cuivre (MC) possèdent des larges surfaces de contact, mais leur grand avantage est leur conductivité thermique très élevée qui fait d'elles un bon candidat pour plusieurs applications à fort transfert de chaleur. L'utilisation des mousses métalliques en cuivre est limitée par leur prix, elles sont très chères par rapport aux autres mousses métalliques. La conductivité thermique élevée du cuivre le rend adapté à des applications à fort transfert de chaleur. Dans la littérature, plusieurs études expérimentales et numériques ont été menées sur l'utilisation de ces mousses pour améliorer la conductivité thermique des MCP. Plusieurs mousses de cuivre avec des propriétés structurelles différentes (porosités et densités de pores) sont utilisées pour intensifier le transfert de chaleur dans les MCP lors de changement de phase solide-liquide.

Dans [42] et [43], Tian et Zhao ont mené des études expérimentales sur l'influence de l'ajout d'une MC sur la conductivité du MCP et sur l'intensification du transfert de chaleur durant la fusion et la solidification. Les résultats ont montré que l'ajout d'une mousse de cuivre permet d'intensifier le transfert de chaleur de 5 à 20 fois dans les échantillons MC- MCP par rapport au MCP pur. Les auteurs ont observé aussi que l'ajout d'une mousse métallique en cuivre permet la réduction du temps de fusion et de solidification de la paraffine [42]. La Figure 5 présente le dispositif expérimental utilisé dans le cadre des travaux de recherche menés par Zhao et al [44]. Les résultats de cette étude montrent que l'ajout d'une mousse de cuivre permet d'intensifier le transfert de chaleur de 3 à 10 fois en fonction de la densité des pores. Xiao et al [40] ont étudié la conductivité thermique effective d'un composite Paraffine- Mousse de cuivre. Ils ont étudié également l'impact de la taille des pores sur la conductivité thermique effective. Plusieurs mousses de cuivre de même porosité et de différentes tailles des pores ont été testées. La conductivité thermique effective du composite a été considérablement améliorée. La conductivité thermique effective du composite peut atteindre 5.2 W/(m.K) contre 0.2 W/(m.K) dans le cas de la paraffine pure. Les résultats ont montré que l'impact de la taille des pores sur la conductivité effective est négligeable.

Dans [45], les mécanismes de transfert de chaleur lors du changement de phase solide-liquide dans un composite Paraffine- Mousse métallique en cuivre ont fait l'objet d'une étude à la fois expérimentale et numérique. Le modèle numérique développé dans le cadre de cette étude a donné un bon accord avec les résultats expérimentaux. Les auteurs ont montré que durant le processus de fusion de la paraffine incorporée dans une mousse en cuivre, le mode de transfert thermique dominant est la conduction thermique. Les résultats ont montré -aussi- que la convection naturelle est plus faible dans le cas d'un composite Paraffine- Mousse de cuivre que dans le cas de la paraffine pure. Mancin et al. [46] ont étudié expérimentalement l'effet de la densité des pores sur la cinétique de changement de phase solide-liquide de la paraffine- Mousse Métallique. Il s'agit d'imposer une puissance constante et de suivre le processus de changement de phase. Trois puissances ont été étudiées : 6,25, 12,5 et 18,75 KW/m^2 . Les auteurs ont montré que l'ajout d'une mousse métallique en cuivre accélère le changement de phase. Les

résultats ont montré que la densité des pores a une faible influence sur la cinétique de changement solide-liquide. En outre, les auteurs ont remarqué que le front de fusion a une forme plus droite dans le cas de la paraffine incorporée dans une mousse métallique en cuivre que dans le cas de la paraffine pure. Dans [47], les auteurs ont étudié l'amélioration des propriétés thermiques du Nitrate de Sodium ($NaNO_3$) en utilisant une mousse métallique. Les meilleurs résultats ont été trouvés pour une mousse de cuivre d'une porosité de 90% et une densité de pores de 10PPI. Baby et Balaji [48] ont étudié expérimentalement l'influence de l'orientation sur composites MM- MCP à grande porosité. Il s'agit de n-Eicosane incorporé dans une mousse de cuivre de porosité 86% et une densité de pores de 10 PPI. La Figure 6 présente le dispositif expérimental utilisé dans le cadre de cette étude [48]. Il a été constaté que l'orientation a un effet négligeable sur le transfert de chaleur. Dans [49], les auteurs ont mené une étude expérimentale et numérique sur les propriétés thermiques d'un composite mousse en cuivre- MCP. Les résultats ont mis en exergue le non-équilibre thermique entre le MCP et la mousse en cuivre. En effet, la conductivité thermique du cuivre est très élevée par rapport à celle du MCP et conduit à un champ de température différent dans la mousse en cuivre et dans le MCP.

Le Tableau 7 présente les propriétés thermophysiques MCP- Mousse en cuivre issue de la littérature.

	T_{fusion}	\mathcal{E}	k_{MCP}	$k_{composite}$	$H_{composite}$
MCP	°C	%	$W/(m.K)$	$W/(m.K)$	kJ/kg
Alcool myristylique[50]	36.5	83.3	0.2	1.502	218
Acétate de sodium trihydraté [51]	56.75	92.4	0.59	5.49	271.09
Paraffine [52]	55	94	0.25	6.38	170.71
Paraffine [53]	55	98	0.27	2.124	199
Paraffine [54]	44	90-97	0.2	7.6	270

Tableau 7: Propriétés thermophysiques de certains composites Mousse en Cuivre- MCP

1.4.4. Mousse d'aluminium - MCP

Les mousses en aluminium (MA) sont –également- largement utilisées, pour améliorer la conductivité thermique des MCP et intensifier le transfert de chaleur dans ces matériaux. L'application de ce type de mousses est limitée à des MCP de basse et moyenne température de fusion. Les MCP à haute température de fusion, les sels ($NaCl$, KNO_3 , KCl , $MgCl_2$ et $Nano_3$) sont largement utilisés dans les centrales solaires à

concentration [55–59], ce qui limite l'utilisation des mousses en aluminium dans des applications pareilles.

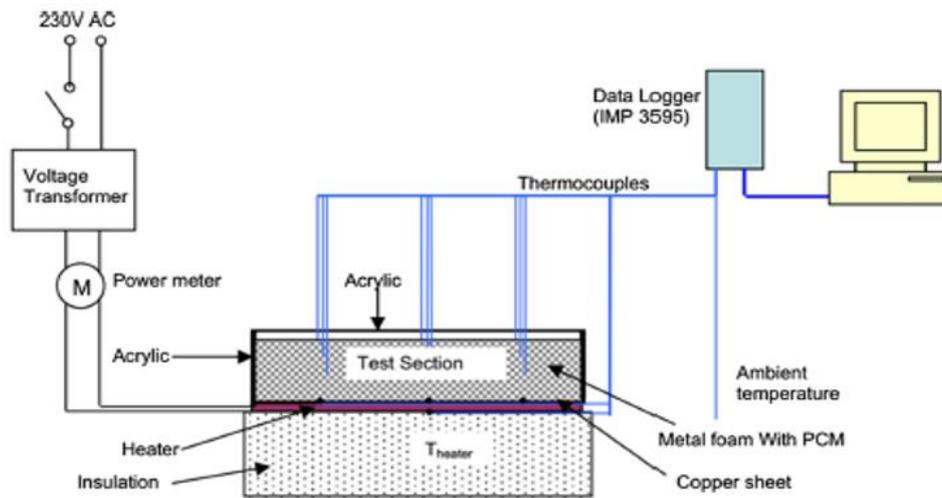


Figure 5: Dispositif expérimental [40]

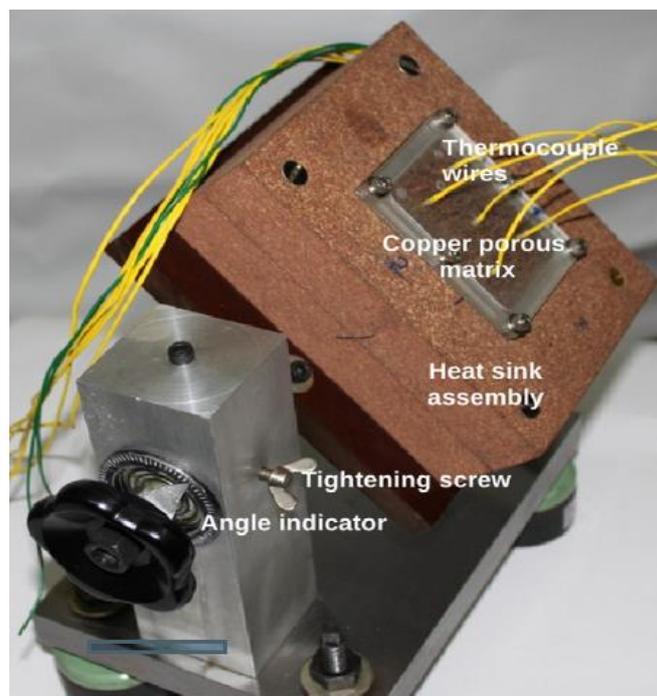


Figure 6: Dispositif expérimental [48]

Dans la littérature, plusieurs chercheurs ont étudié l'influence de l'incorporation du MCP dans les mousses d'aluminium sur la cinétique de changement de phase du MCP. Zhang *et al.* [67] ont étudié expérimentalement et numériquement l'effet de l'ajout d'une MA sur le temps de fusion de la paraffine. Il s'agit d'une MA de porosité 90%. Les résultats ont montré un bon accord entre les résultats issus du modèle numérique développé par les auteurs et les résultats expérimentaux. Il a été démontré que l'incorporation de la paraffine dans une MA permet de réduire le temps de fusion de la paraffine de 26 à 28%. Dans [72], l'effet de la porosité d'une MA sur la conductivité effective d'un composite MA- MCP a été étudié. Deux MA de porosité 77% et 95% ont

été examinées. Il a été remarqué que plus la porosité est faible, plus la conductivité effective est élevée. Sriharsha S. *et al.* [60] ont étudié l'effet de la taille des pores sur la conductivité thermique effective d'un composite MA- Paraffine. Il a été démontré que la taille des pores a un effet non négligeable sur la conductivité effective. En effet, lorsque la taille des pores diminue, la conductivité thermique effective augmente. El Idi *et al.* [61] ont montré que la morphologie de la mousse métallique a une grande influence sur la cinétique de changement de phase d'un MCP incorporé dans une mousse d'aluminium.

1.4.5. Mousse de Nickel- MCP

Les mousses de Nickel (MN) sont largement utilisées pour améliorer la conductivité thermique des MCP, malgré leurs conductivités thermiques relativement faibles ($90W/(m.K)$). L'avantage du Nickel par rapport au cuivre et l'aluminium est sa température de fusion élevée d'environ $1455^{\circ}C$.

Dans [39], l'amélioration de la conductivité thermique de la paraffine par l'ajout d'une MN a grande porosité a été étudiée. Les échantillons sont élaborés grâce à la technique d'imprégnation sous vide. La conductivité thermique du composite MN-Paraffine a été multipliée par 3 en comparaison à de la paraffine pure. Les auteurs ont remarqué que la température de la fusion a diminué d'environ $0.55^{\circ}C$. Dans [50], la conductivité thermique effective du composite MN- Alcool myristylique a été étudiée par les auteurs. Les résultats ont montré que la conductivité thermique de l'Alcool myristylique a été multipliée par 1.8 et la chaleur latente a été réduite de 29%. Il a été observé aussi que la température de fusion a été légèrement augmentée et celle de la solidification légèrement diminuée. Oya et al [62] ont étudié expérimentalement l'amélioration de la conductivité de l'Erythritol par l'ajout d'une MN. La conductivité de l'Erythritol pur a été multipliée par 16. Des travaux de recherche ont été entamés récemment au CERTES sur le sujet [63]. Le Tableau 8 présente les propriétés thermophysiques de certains MN- MCP issus de la littérature.

	T_{fusion}	ε	k_{PCM}	$k_{composite}$	$H_{composite}$
MCP	$^{\circ}C$	%	$W/(m.K)$	$W/(m.K)$	kJ/kg
Paraffine [64]	62.4	96.46	0.162	2.268	188
Erythritol [62]	118	84	0.733	11.72	354.7
Paraffine [65]	38-41	90	0.19	4.37	143
Paraffine [66]	40	97	0.2	1	---
Alcool myristylique [50]	37	--	0.2	0.36	218
Paraffine [39]	61	97	0.305	0.915	---
Paraffine [63]	18.12	95	0.256	1.4	

Tableau 8: Propriétés thermophysiques de certains composites Mousse en Nickel- MCP

1.5. Les généralités sur les batteries Li-ion

1.5.1. Introduction

Les premières batteries au lithium datent de l'année 1912, et ont été commercialisées pour la première fois en 1970 [67,68]. Les premières batteries au lithium commercialisées ont connu un grand échec à cause de l'emballement thermique [69]. Les batteries au lithium ont connu leurs grands succès en 1991. Il s'agit des batteries lithium-ion commercialisées par Sony. Le format standard de ces batteries est "18650", qui est une cellule cylindrique de 18 mm de diamètre et 65 mm de longueur. Ces batteries ont suscité beaucoup d'intérêt grâce à leur grande densité énergétique. La densité énergétique des batteries Li-ion peut aller jusqu'à 200 Wh/kg. La Figure 7 présente la densité énergétique des différents types de batteries électrochimiques commercialisées [64]. Les batteries Li-ion permettent un stockage très compact, offrant des opportunités de gain de poids et d'espace pour une capacité de stockage d'énergie donnée.

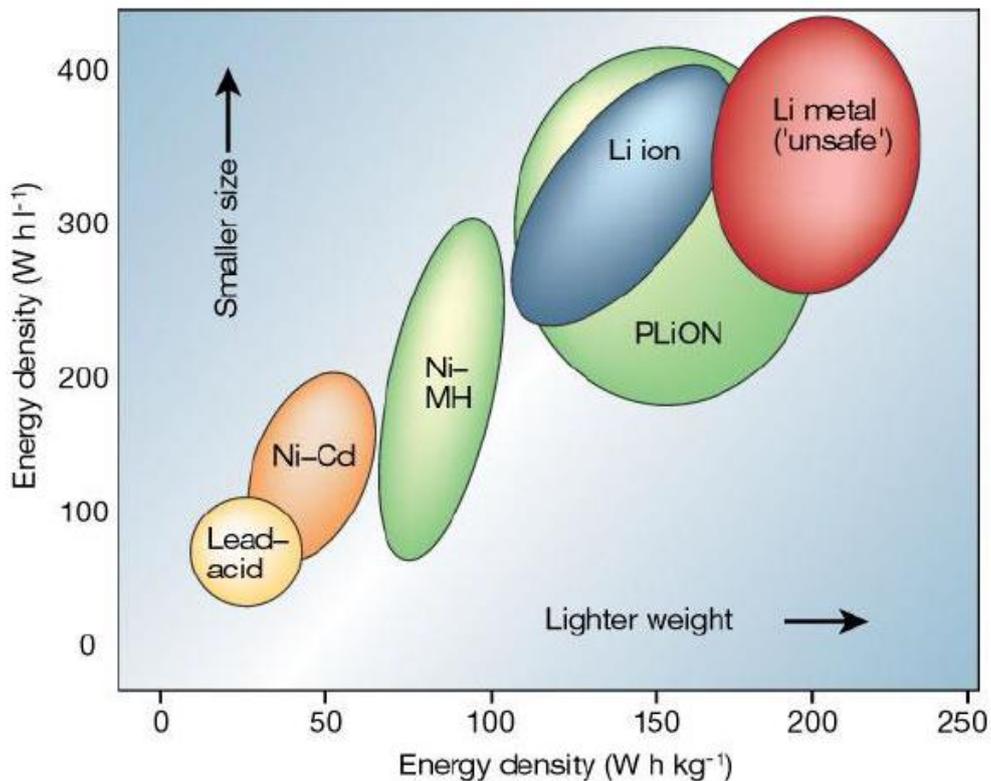


Figure 7: Densités d'énergie massiques et volumiques des différentes batteries [64]

1.5.2. Principe de fonctionnement d'un accumulateur Li-ion

Un accumulateur Li-ion est un système de stockage d'énergie électrique sous forme chimique. Le stockage/ déstockage se fait par échange d'ions Lithium à travers un électrolyte entre l'anode composée généralement de graphite ou d'oxyde de titane et la cathode composée d'un oxyde métallique. L'anode est l'électrode négative et la

cathode est l'électrode positive [68,70,71]. La Figure 8 présente le principe de fonctionnement d'un accumulateur Li-ion.

Lors d'une décharge de l'accumulateur, la réaction d'oxydation qui se produit à l'anode libère un ou des électrons dans le circuit extérieur. Ces électrons circulent alors jusqu'à la cathode où ils participent à la réaction de réduction (gain d'un ou plusieurs électrons). Simultanément, les anions et les cations migrent dans la solution électrolytique entre les deux électrodes afin de préserver l'équilibre des charges. Lorsque l'anode est complètement oxydée (ou la cathode totalement réduite), ces réactions s'achèvent et la batterie est déchargée. Quant à la charge, elle est réalisée en appliquant un courant électrique aux électrodes afin d'engendrer les réactions inverses. Les équations d'oxydoréduction du système peuvent être résumées comme suit [70]:

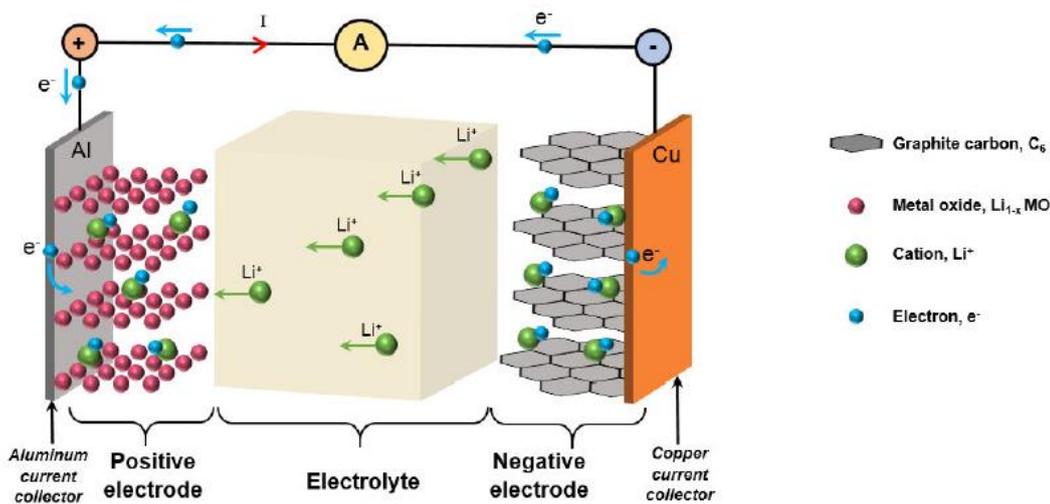
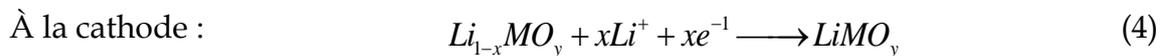


Figure 8: Principe de fonctionnement d'un accumulateur Li-ion (en décharge)

L'annexe I présente quelques définitions élémentaires liées aux batteries Li-ion

1.6. Les phénomènes thermiques dans les batteries

Li-ion

Les cellules Li-ion sont des systèmes de stockage de l'énergie électrique sous forme chimique. Deux sources interviennent dans la génération de la chaleur dans une batterie. La première est associée à la chaleur générée par effet Joule, considérée irréversible, et la seconde correspond à la génération de chaleur produite à l'interface entre l'électrolyte et les électrodes, c'est-à-dire d'origine thermodynamique et réversible [67,71,72].

1.6.1. La chaleur irréversible

Il s'agit de la chaleur de polarisation. Le produit d'un courant par la surtension correspond à un effet Joule [73]. La source de chaleur de type effet Joule peut-être déterminé par l'équation suivante :

$$Q_{Joule} = Q_{Polarisation} = (U - U_{ocv}) \cdot I = R_{interne} I^2 \quad (5)$$

1.6.2. Chaleur de variation de l'entropie

La deuxième source de chaleur est une source de type thermodynamique. Cette quantité de chaleur, de nature thermodynamique, est réversible. C'est-à-dire selon la signature de courant et de l'entropie, cette quantité d'énergie peut être positive ou négative. Le dérivé de la tension $\frac{\partial U_{ocv}}{\partial T}$ a pour origine la variation de l'entropie.

Actuellement, les modèles de la littérature ne calculent pas ce terme, mais utilisent des interpolations de courbes issues de la littérature [71].

$$Q_{Entropie} = T \cdot \frac{\partial U_{ocv}}{\partial T} \cdot I \quad (6)$$

1.6.3. L'influence de la température sur les performances et sur la durée de vie des batteries Li-ion

Les accumulateurs Li-ion sont particulièrement sensibles au niveau des températures auquel ils sont utilisés [68,71,74]:

- Une faible température d'utilisation diminue considérablement l'autonomie.
- Utilisation au-delà de 45°C accélère le vieillissement des accumulateurs et augmente la chaleur produite.
- Un déséquilibre thermique engendre une hétérogénéité des puissances fournies individuellement par chaque élément et diminue les performances globales de la batterie.
- Une température élevée engendre un court-circuit ou une surtension.

1.7. Gestion thermique des batteries électrochimiques par les MCP

Comme nous l'avons vu précédemment, il y a de nombreux problèmes thermiques dans une batterie Li-ion. Par conséquent, la gestion thermique de ces batteries est indispensable pour leur assurer une meilleure performance, une autonomie et une durée de vie optimale [75].

Plusieurs technologies sont utilisées pour gérer la thermique des batteries et éviter une élévation excessive de leur température. Il y a deux méthodes pour maîtriser la température d'une batterie électrochimique : réduction de la chaleur produite par des modifications internes au niveau des matériaux et de la chimie de la batterie ou par un système de gestion thermique externe pour améliorer la dissipation de la chaleur de la batterie [76]. Les systèmes de gestion externe sont les circuits d'air, les circuits de refroidissement à liquide, les boucles de refroidissement à deux phases ou l'utilisation d'un MCP ou des composite à base d'un MCP [77]. Cependant, certaines évolutions peuvent être observées sur la gestion thermique interne [76]. Il peut y avoir une modification de l'épaisseur de l'électrode, du matériau, de l'anode ou de la cathode. L'électrolyte peut être utilisé comme réfrigérant grâce à des micro-canaux intégrés dans les électrodes [78].

Actuellement, les systèmes de gestion thermique externe sont les plus utilisés. Les principaux problèmes de ces systèmes sont leur mise en œuvre complexe, leur coût, manque de fiabilité et surtout, le fait qu'ils consomment constamment de l'énergie pour assurer la gestion thermique de la batterie. Le stockage thermique de la chaleur latente (LHTES), grâce à l'utilisation de MCP, représente une alternative attirante qui permet une gestion thermique passive et garantit que la température de la batterie reste dans la plage souhaitée. En fait, lorsque le MCP est en phase solide et que la température monte jusqu'à la température de fusion, il devient liquide et stocke de l'énergie. De la même manière, lorsqu'il est en phase liquide et que la température descend en dessous de sa température de fusion, il redevient liquide et libère l'énergie stockée.

1.7.1. Les systèmes de gestion thermique actifs

Les systèmes de gestion thermique actifs des batteries Li-Ion sont classés en deux grandes familles : Les systèmes de refroidissement à air (Convection naturelle ou forcée) et les systèmes de refroidissement à liquide.

Les systèmes de refroidissement à air sont classés en deux sous-familles : les systèmes avec échangeur thermique et les systèmes sans échangeur thermique. La Figure 9 présente les différentes configurations des systèmes de gestion thermique par un système de refroidissement à air. Les systèmes de convection forcée sont les plus utilisés [68,74,77]. En effet, le coefficient de transfert de chaleur est beaucoup plus élevé dans le cas d'une convection forcée que dans le cas d'une convection naturelle. Les avantages de ces systèmes sont leur accès direct, leur faible viscosité, leur poids léger, leur configuration simple, leur faible coût et leur maintenance aisée. Cependant, la capacité calorifique spécifique de l'air est faible, ce qui limite son application pour un fonctionnement pour des courants élevés. Une distribution uniforme de l'air est difficile à obtenir. Les systèmes de refroidissement à air peuvent être améliorés par l'ajout des ailettes.



(a) Passive air cooling

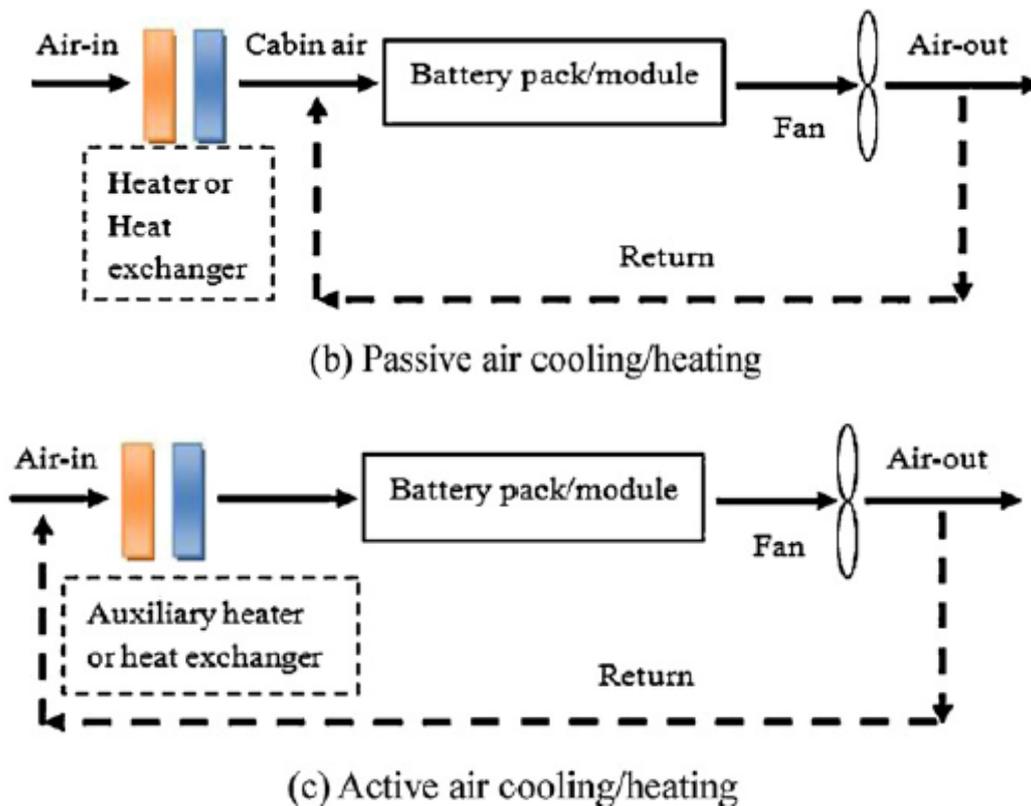
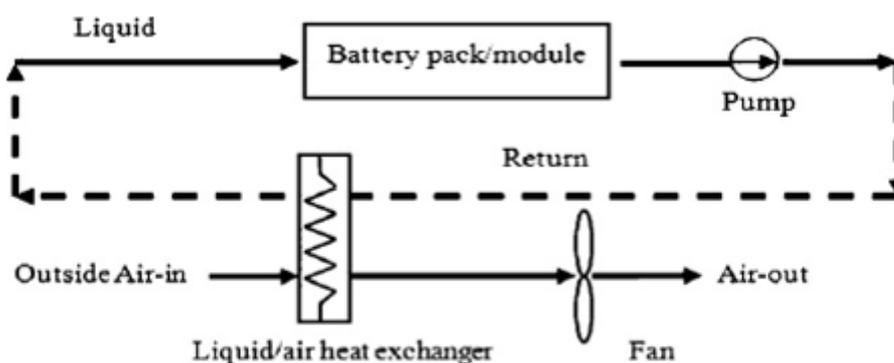
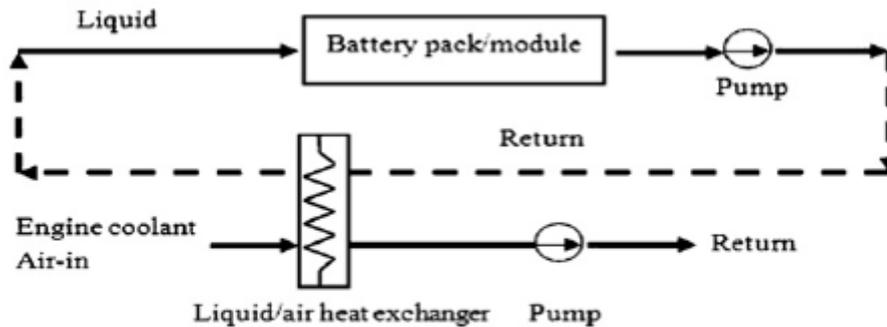


Figure 9: Les différents systèmes de refroidissement à air [70]

Les systèmes de refroidissement à liquide sont –généralement– composés d’un circuit de circulation de liquide fermé (étanche), une pompe pour faire circuler le liquide et un échangeur pour évacuer la quantité de chaleur absorbée par le liquide. La Figure 10 donne un aperçu sur les différentes configurations de ces systèmes de refroidissement [77]. Les liquides les plus utilisés sont l’eau, les glycols, les huiles et l’acétone [68,74,77]. Les systèmes de refroidissement à liquide sont plus efficaces que ceux à air. En effet, les liquides généralement utilisés ont une capacité calorifique spécifique plus élevée que l’air [68,79]. Cependant, ils sont beaucoup plus complexes et plus coûteux. En effet, ces systèmes comportent généralement une pompe, un réseau de tuyauterie et un récipient pour le liquide de refroidissement afin d’éviter les fuites. Ils sont également plus coûteux en matière de maintenance [68,80].





(b) Active moderate cooling/heating

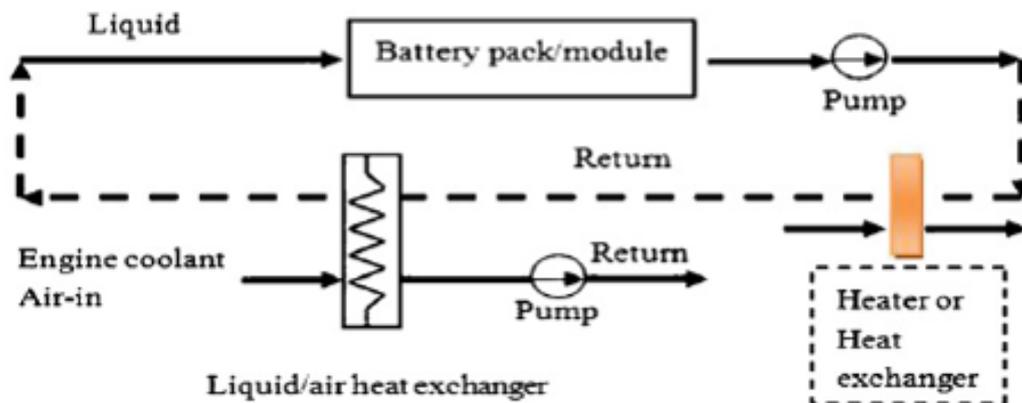


Figure 10: Les différentes configurations des systèmes de refroidissement à liquide [70]

1.7.2. Les systèmes de gestion thermique passifs

Les systèmes de gestion passifs peuvent être classés en trois groupes : les systèmes à liquide (changement de phase liquide- vapeur) [81–83], les caloducs[84] et les MCP.

1.7.2.1. Gestion passive par utilisation des caloducs

Il existe trois types de caloducs : les plats, les tubulaires, les pulsés. Un caloduc est une enceinte hermétique qui renferme un fluide à l'état d'équilibre liquide-vapeur. À l'extrémité du caloduc située près de l'élément à refroidir (batterie Li-ion), le fluide à l'état liquide se vaporise en absorbant de l'énergie thermique émise par la source chaude. La vapeur circule alors dans le caloduc jusqu'à l'autre extrémité située au niveau d'un système de refroidissement, qui dans plusieurs cas, il s'agit de l'air ambiant où elle la vapeur se condense pour retourner à l'état liquide. La condensation permet de céder de l'énergie thermique à la source froide (souvent l'air ambiant). Le liquide doit alors retourner à l'évaporateur, à l'aide des forces de gravité [77,85].

Les caloducs à pulsation sont des alternatives intéressantes. On trouve plusieurs études dans la littérature qui se sont intéressées à la gestion thermique des batteries par intégration des caloducs. La Figure 11 présente un système de refroidissement des batteries Li-ion prismatiques par des caloducs [85]. Les études faites [86–89] montrent

que les caloducs sont capables d'assurer une gestion thermique de la batterie, car ils abaissent la température maximale à l'intérieur de celle-ci. Cependant, cela n'est pas suffisant, car la température est encore trop élevée par rapport à l'objectif de 25 °C comme température maximale que la batterie devrait atteindre.

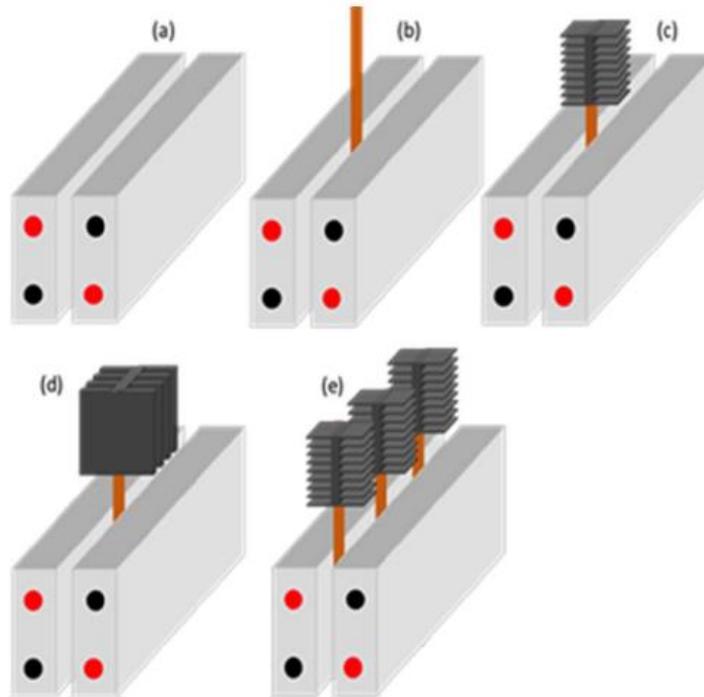


Figure 11: Refroidissement des batteries Li-ion par des caloducs [78]

1.7.2.2. Gestion passive par MCP

L'utilisation des MCP pour la gestion thermique des batteries Li-ion a été proposée pour la première fois en 2000 par Al-Hallaj et Selman [90]. Les auteurs ont étudié numériquement l'influence de l'utilisation d'un MCP sur le champ de température d'une batterie. Il s'agit d'une batterie composée de 8 cellules cylindriques de 100 Ah. Il est question d'insérer l'ensemble des cellules dans un banc de MCP. Les simulations numériques sont réalisées sur PDEase2D™ basé sur la méthode des éléments finis. La Figure 12 présente le modèle physique étudié numériquement dans [90]. Le MCP utilisé est la paraffine RT55 avec une température de fusion d'environ 56°C. Les résultats pour une décharge 1C pour différentes profondeurs de décharge (DOD=0,25, 0,50, 0,75 et 1,0), ont montré que l'utilisation de MCP permet d'avoir un champ de température plus uniforme par comparaison avec une gestion active par convection forcée. En 2004, Khateeb et al. [91] ont publié une étude sur la gestion thermique d'une batterie Li-ion d'un scooter électrique par un MCP. Il s'agit d'une batterie composée de deux modules de 18 cellules de 12 Ah soumises à des cycles de charges- décharge de 2.4C à des températures ambiantes différentes (0°C, 30°C et 40°C). Trois configurations ont été étudiées, à savoir : MCP pur, composite MM- MCP et un composite MM- MCP avec des ailettes en aluminium. Les résultats de la simulation numérique ont montré que l'ajout de la mousse métallique et les ailettes en aluminium est nécessaire pour garder la température de la batterie dans la plage souhaitée pour

trois cycles consécutifs. Les résultats –aussi– ont mis en exergue l'importance de la température de fusion. Ces résultats sont en accord avec d'autres résultats de la littérature [92]. En 2005, l'équipe d'Al-Hallaj a publié plusieurs études sur l'utilisation de MCP pour la gestion thermique [92,93]. En 2008, Sabbah et al [94] ont conduit une étude expérimentale et numérique qui a eu pour objet de comparer un système de gestion actif avec un système de gestion passif. Il s'agit d'un système de circuit d'air forcé et un système de gestion passif par un MCP de température de fusion entre 52-55°C. La batterie est composée de 68 modules de 20 cellules (3.7 et 1.5Ah). L'étude a été menée sous deux températures ambiantes 25°C et 45°C. Dans le cas du refroidissement par un circuit d'air, plusieurs vitesses ont été étudiées. Les résultats expérimentaux ont montré que dans les conditions les plus extrêmes (décharge rapide avec température ambiante élevée) la gestion thermique par le MCP est plus efficace que le circuit d'air forcé.

En 2010, Duan et al [95] ont publié une étude expérimentale sur l'utilisation d'un MCP pour la gestion thermique d'une batterie Li-ion. Ils ont remplacé les accumulateurs électriques par des éléments cylindriques chauffants. Le MCP utilisé a une température de fusion de 50°C. Plusieurs expériences ont été menées par les auteurs. Les résultats ont montré que l'utilisation du MCP permet de diminuer le pic de température et d'avoir une distribution de température plus uniforme dans la batterie. Ces résultats sont en bon accord avec d'autres études de la littérature [68,71,77].

Toutes ces études confirment que les MCP permettent de baisser les températures des batteries Li-ion et d'avoir un champ de température plus uniforme. Ces études montrent aussi la limite d'utilisation des MCP due essentiellement à leur faible conductivité thermique et la régénération des MCP. Les systèmes de gestion passifs par des MCP ont principalement deux problèmes : le premier se rapporte à leurs faibles conductivités thermiques et le deuxième concerne la régénération (évacuation de la chaleur stockée). Comme nous l'avons évoqué précédemment dans ce chapitre, la conductivité des MCP peut être améliorée par l'ajout de graphite expansé ou par l'ajout d'une mousse métallique [96]. Le problème de régénération peut être résolu par l'ajout d'un système de gestion actif [71,74].

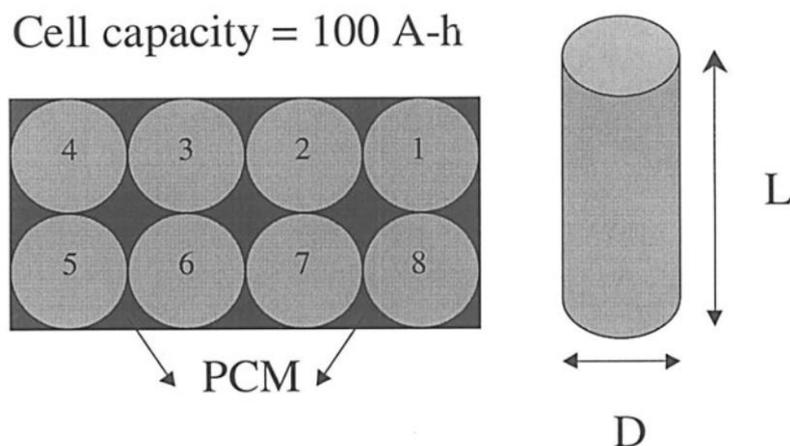


Figure 12: Le modèle physique d'Al-Hallaj [83].

À partir de l'année 2014, plusieurs chercheurs ont étudié numériquement et expérimentalement l'utilisation des composites MCP- Mousse métallique et Graphite expansé- MCP pour une gestion thermique passive ou semi-active en ajoutant un système actif dimensionné à une puissance minimale dans le but de remédier aux problèmes évoqués plus haut de la gestion thermique passive par un MCP. Dans [54], les auteurs ont mené une étude expérimentale dont le but est de comparer l'efficacité de la gestion thermique des batteries Li-ion par un MCP pur et un composite MM-MCP. La Figure 13 présente les deux configurations étudiées dans le cadre de cette étude. La Figure 14 présente le dispositif expérimental. Le MCP utilisé est la paraffine RT 44HC. Sa température de fusion est de 42°C. La mousse utilisée est une mousse en cuivre. Les cellules Li-ion ont une capacité de 10 Ah. Le comportement thermique de la batterie a été suivi pour des cycles de décharge de 0,5C, 1C et 3C à une température ambiante de 25°C. Les résultats ont montré que l'ajout d'une mousse de cuivre permet d'avoir des températures plus basses avec un champ de température plus uniforme.

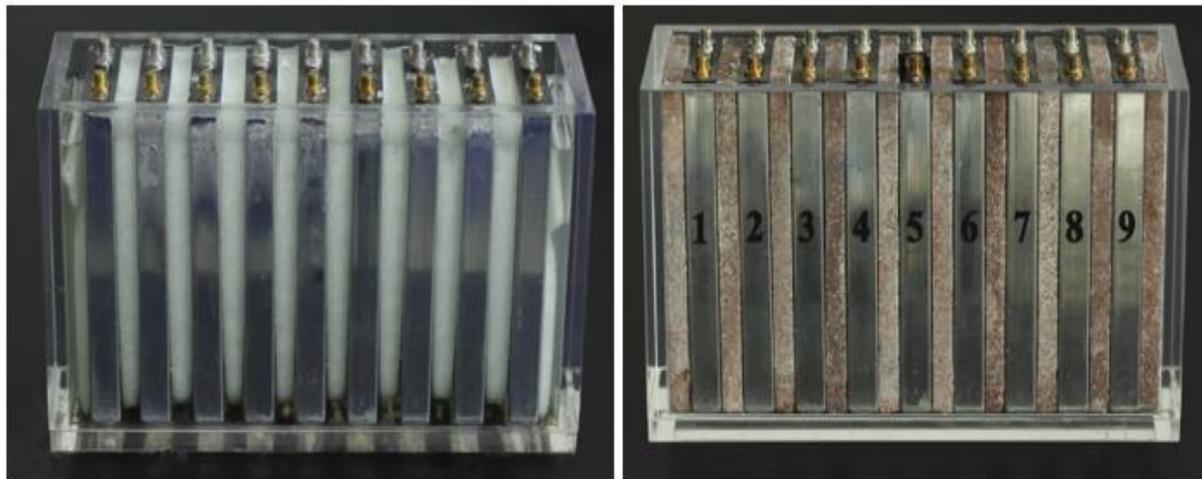


Figure 13: Les deux configurations étudiées dans la référence [54]

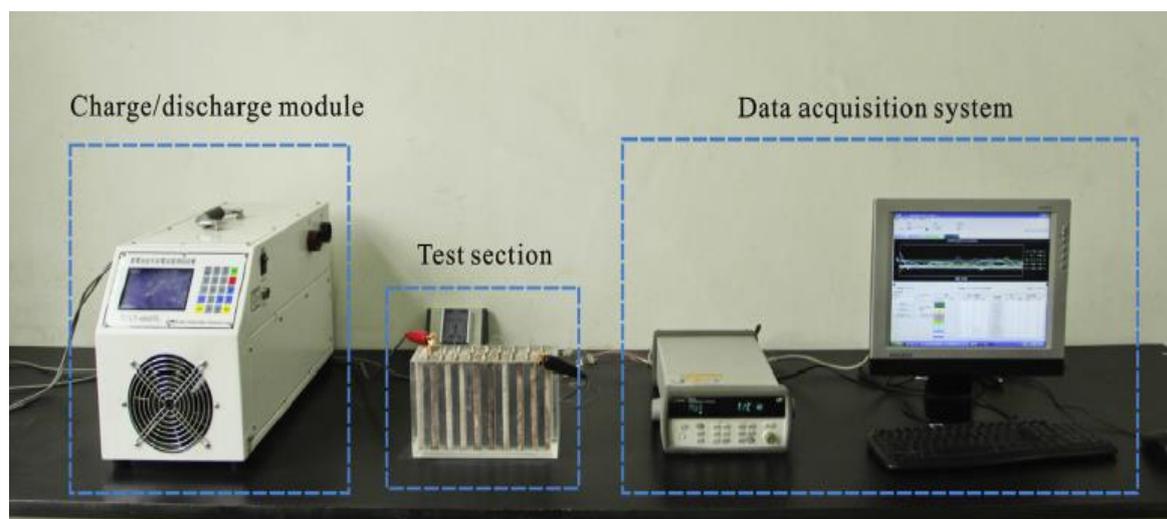


Figure 14: Dispositif expérimental publié dans la référence [54]

Dans [97], une étude expérimentale et numérique sur la gestion thermique d'une batterie Li-ion par un composite paraffine- graphite expansé a été entreprise. Différentes paraffines dont les températures de fusion sont 36°C, 44°C et 52°C, ont été testées. Les auteurs ont utilisé des éléments chauffants qui reproduisent le même comportement thermique que les cellules.

L'objectif était de maintenir la température de la cellule en dessous de 50°C. La température ambiante était de 27°C. Les composites MCP ayant une température de changement de phase trop élevée ou trop basse ne sont pas adaptés au système de gestion thermique de la batterie. Le composite avec une température de changement de phase moyenne entre 40°C et 45°C est recommandé. Les composites paraffines/GE à haute densité fournissent non seulement une conductivité thermique élevée, mais aussi une chaleur latente élevée dans un volume fixe.

Dans [98] Hémerly et al. ont mené une étude expérimentale qui avait pour objectif de comparer l'efficacité thermique d'un système de refroidissement à air et un système de gestion semi-passif par un MCP combiné avec une circulation de liquide pour régénérer le MCP. Le MCP utilisé est la paraffine commerciale (Rubitherm RT28 HC) avec une température de fusion de 28 °C. Les cellules ont été remplacées par des éléments chauffants qui reproduisent le même comportement thermique des cellules. La batterie étudiée est composée de 27 éléments.

Le refroidissement à air par convection forcée a été étudié pour différentes vitesses : 0 m/s, 1 m/s, 2 m/s et 3 m/s. Le système semi-passif était composé de deux plaques de refroidissement en contact avec des boîtes en aluminium à ailettes. Ces ailettes permettent de n'utiliser qu'une petite quantité de MCP qui facilite la solidification. À partir d'un bilan thermique les auteurs ont calculé la quantité de MCP nécessaire pour maintenir la température de la cellule autour de 30 °C pour un taux de décharge de 3C. Le refroidissement liquide a été effectué avec de l'eau régulée à 22 °C pendant la charge de la batterie. Ils ont testé 5 cycles de charge/décharge de la batterie (0,5C, 1C, 2C et 3C). Les résultats ont montré que le MCP améliore considérablement l'uniformité de la température à l'intérieur de la batterie. Cependant, le MCP ne donne pas de meilleurs résultats que le refroidissement par air en termes de température maximale à l'intérieur de la batterie.

L'utilisation des composites MCP est prometteuse pour la gestion thermique des batteries. Certains systèmes sont déjà commercialisés, on cite AllCell® [99]. AllCell® a développé une technologie utilisant un composite à changement de phase couplé à une batterie pour sa régulation thermique.

Le Tableau 9 résume les avantages et les inconvénients des différents systèmes de gestion thermique des batteries Li-ion.

	Avantages	Inconvénients
Convection naturelle	Faible coût initial Aucun coût opérationnel Facile à intégrer Refroidissement passif	Faible coefficient de transfert de chaleur Dépend de la température de l'air ambiant Réduction limitée de la température Répartition inégale des températures Faible efficacité Insuffisant pour les taux élevés
Convection forcée	Simple Faible coût initial Faible coût de maintenance	Faible coefficient de transfert de chaleur Dépend de la température de l'air ambiant Consommation d'électricité des ventilateurs Répartition inégale des températures Faible efficacité Insuffisant pour les conditions extrêmes
Liquide	Un transfert de chaleur plus important Une répartition plus uniforme de la température Une efficacité accrue	Coût initial élevé Coût opérationnel élevé Complexe Risques de fuite Durée de vie courte Consommation d'électricité pour les pompes Insuffisant pour les conditions extrêmes
Caloducs	Une conductivité plus élevée Un transfert de chaleur plus important Une efficacité accrue	Coût initial élevé Coût opérationnel élevé Complexe Risques de fuite Consommation d'électricité
MCP	Faible coût Faible maintenance Refroidissement passif Une efficacité accrue Une répartition plus uniforme de la température Jouer dans des conditions extrêmes	Faible conductivité Risque de fuite Régénération de la PCM Risque de sur refroidissement Différence de volume avec changement de phase

Tableau 9: Avantages et inconvénients des différents systèmes de gestion thermique des batteries Li-ion

1.8. Conclusion

Dans ce chapitre, un état de l'art a été proposé. Un rappel sur les différents types de stockage de l'énergie thermique et les différents MCP utilisés pour stocker l'énergie thermique sous forme latente est présenté. Les MCP sont connus pour leur faible conductivité thermique qui réduit la cinétique de stockage/déstockage de l'énergie

thermique. Différentes techniques utilisées pour améliorer la conductivité thermique des MCP ont été abordées. Un accent particulier a été mis sur l'ajout d'une mousse métallique ou de graphite expansé. Les batteries Li-ion, étant les plus utilisées dans les véhicules électriques, les systèmes photovoltaïques et les smartphones, sont au cœur de cette étude. Ainsi, le comportement thermique des batteries Li-ion est détaillé. Les sources de génération de la chaleur au sein d'une batterie Li-ion sont décrites, ainsi que les principaux défis thermiques des batteries Li-ion. Une augmentation de la température peut conduire à un emballement thermique et/ou à un déséquilibre électrique des cellules. Le fonctionnement des batteries Li-ion sous des températures élevées accélère le vieillissement et en basse température augmente la résistance interne. Pour faire face à ces problèmes thermiques, la gestion thermique des batteries Li-ion est nécessaire et obligatoire. Les différents systèmes de gestion thermique des batteries Li-ion sont présentés. Les systèmes à air en convection forcée sont faciles à mettre en œuvre. Les propriétés thermiques de l'air (faible capacité calorifique, faible conductivité thermique) réduisent leur efficacité et empêchent de garantir une gestion thermique avec les spécifications données avec les batteries Li-ion. Les systèmes de refroidissement avec un liquide constituent une alternative efficace. Cependant, leur utilisation présente certains problèmes. Ils sont coûteux et la mise en œuvre est compliquée, surtout à cause des risques de fuite. Une possibilité supplémentaire consiste en l'utilisation des caloducs. Enfin, il y a l'utilisation des MCP et les composites MCP.

Dans la littérature, de nombreuses études numériques et expérimentales ont été menées sur l'utilisation des composites MCP pour la gestion thermique des batteries Li-ion. Cependant, la majorité des études faites se focalisent sur le maintien de la température des batteries dans un intervalle de 40 °C à 60 °C. 60°C est la température maximale de sécurité que peut atteindre une batterie Li-ion. Or, l'intervalle de température optimale se situe entre 15 °C et 35 °C, selon les constructeurs. La présente étude vise à maintenir la température des batteries en deçà de 27 °C par l'utilisation de MCP est d'après les données des constructeurs des batteries, les températures d'utilisation des batteries optimales se situent entre 15 °C et 35 °C. Ainsi cette étude vise à maintenir la température des batteries en deçà de 27 °C par l'utilisation d'un composite MM- MCP. Les études s'accordent sur le fait que le refroidissement à air en convection forcée est simple à mettre en œuvre et pas très coûteux mais qu'il n'est pas performant pour maintenir la température dans l'intervalle de fonctionnement optimal. Le refroidissement liquide est performant mais complexe à mettre en œuvre et présente la durée de vie la plus courte ce qui le rend coûteux. Le refroidissement des batteries par un MCP ou un composite MCP combine la facilité de mise en œuvre et de fonctionnement, le faible coût et la performance. Cependant, les MCP peuvent avoir un problème de régénération. Les performances des MCP peuvent être améliorées de plusieurs façons :

- L'optimisation de leurs propriétés thermo physiques, à savoir : la chaleur latente de changement de phase, la température de fusion et de cristallisation, l'expansion volumique ;

- L'amélioration de leur conductivité thermique par l'ajout des matériaux à haute conductivité tels que des ailettes, des mousses métalliques à grande porosité, du graphite expansé, etc. ;
- L'utilisation des configurations en cascade avec différents MCP qui ont des températures de fusion différentes ;
- L'optimisation géométrique du système ;
- L'optimisation de la masse du MCP.

Dans la suite de ce travail, une étude approfondie a été menée sur l'élaboration et l'optimisation des propriétés thermo physiques des composites MM- MCP, suivie par une étude numérique de l'effet de la morphologie de la mousse et des conditions de chauffage/ refroidissement sur le changement de phase solide- liquide de ces composites. Une analyse des phénomènes thermiques dans une cellule de batterie est proposée. L'étude est faite à l'aide d'un nouveau banc expérimental monté dans le cadre des travaux de cette thèse. Le but de cette étude étant de maintenir la température de la cellule de batterie en deçà de 27 °C à l'aide d'un composite MCP. Le choix de ce composite est la suite d'une étude d'optimisation des propriétés de la mousse métallique et du MCP. Ensuite, une gestion thermique par un composite MA-paraffine RT27 est appliquée sur cette cellule.

Chapitre 2: Élaboration et étude expérimentale des propriétés thermophysiques des composites Mousses métalliques- Matériaux à changement de phase

2.1. Introduction

Dans ce chapitre nous présentons en premier lieu le procédé d'élaboration des composites mousses métalliques- paraffines et en seconde étape leur caractérisation thermophysique et la modélisation de leur conductivité thermique effective en fonction de la structure, la conductivité thermique de la mousse métallique et du MCP. Nous présenterons également les dispositifs expérimentaux utilisés pour l'élaboration et la caractérisation de ces composites.

2.2. Préparation des échantillons

2.2.1. Méthode d'imprégnation sous-vide

Les échantillons sont préparés par imprégnation sous vide. Plusieurs études dans la littérature ont montré l'efficacité de l'utilisation de cette méthode pour la préparation des composites matériaux cellulaires - MCP [39,40,100-102]. Le dispositif expérimental utilisé dans ce projet est présenté sur la Figure 15. Il est composé d'une étuve modèle XFM120 (fournie par France Etuve) équipée d'une pompe à vide. Des thermocouples gainés de type T sont insérés à l'intérieur de l'étuve pour suivre l'évolution de la température interne. La pompe à vide permet d'imposer de basses pressions qui peuvent aller jusqu'à 0.04 mbar. Un écran tactile permet d'imposer la température et la pression souhaitées. La paraffine à l'état solide et la mousse métallique sont placées dans un moule en verre et ensuite introduites dans l'étuve, Figure 16. La Figure 17 présente les étapes du protocole d'élaboration.

Le principe consiste à imposer une pression de 0.4mbar à température ambiante pour protéger la pompe à vide et éviter qu'elle extraie de l'air chaud, Figure 17 (b). Ensuite, une température supérieure à la température de fusion est maintenue jusqu'à la fusion totale de la paraffine, Figure 17 (c). Après cela, une pression $P=P_{atm}$ est maintenue jusqu'à l'équilibre entre la pression à l'intérieur de l'étuve et la pression ambiante. Le refroidissement du composite est fait à pression ambiante et à une température inférieure à la température de fusion dans un réfrigérateur.

L'incorporation de la paraffine dans la mousse métallique est évaluée par le calcul du taux d'imprégnation. Le taux d'imprégnation est le rapport entre la masse théorique de l'échantillon calculée et la masse mesurée, équation 7. La masse de l'échantillon après incorporation est mesurée à l'aide d'une balance de haute précision fournie par OHAUS, *Figure 18*.

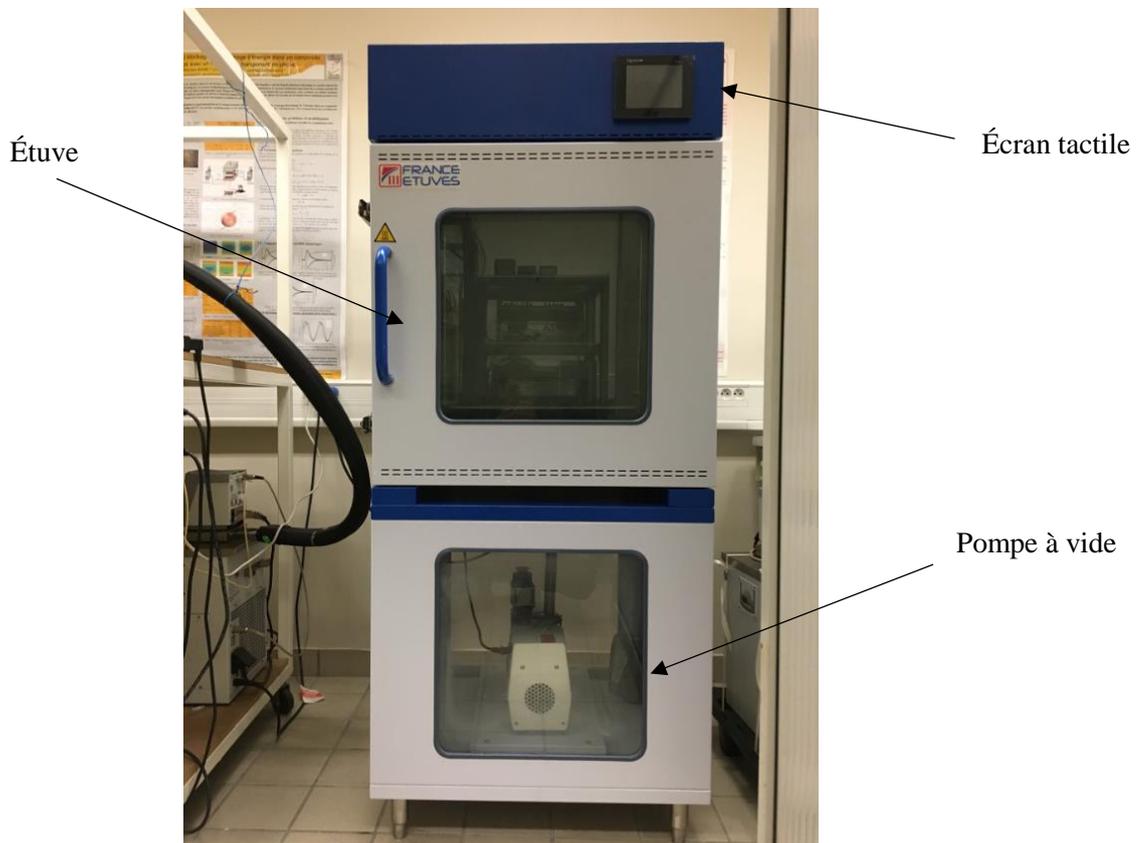


Figure 15: Dispositif expérimental, XFM120.

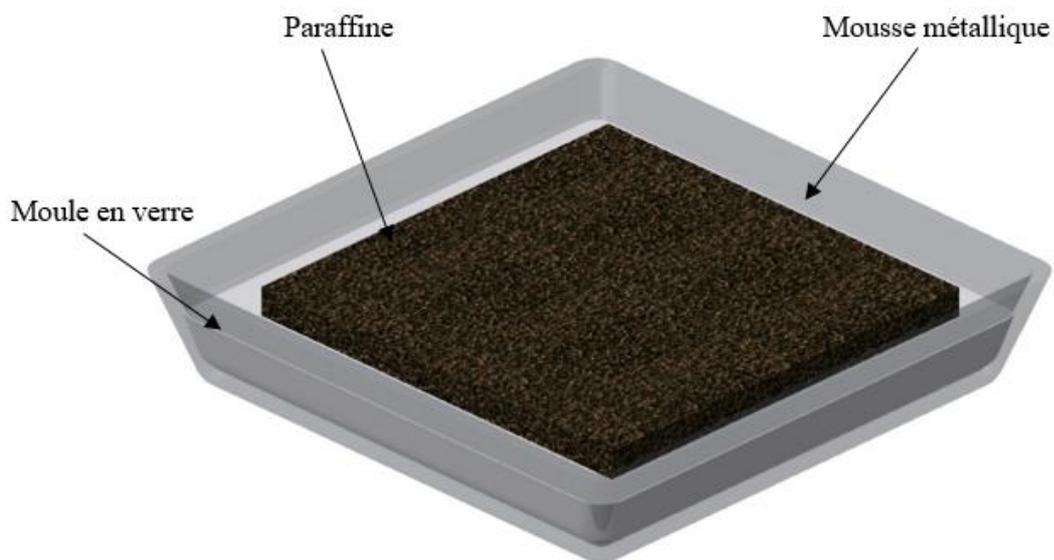


Figure 16: MM- MCP dans le moule en verre

$$\alpha = \frac{m_{exp,MCP}}{\varepsilon \rho_{MCP} V_c} = \frac{m_{mousse\ remplie} - m_{mousse\ vide}}{\varepsilon \rho_{MCP} V_c} \quad (7)$$

Avec $m_{exp,MCP}$ la masse de la paraffine incorporée dans la mousse métallique, ρ_{MCP} la masse volumique de la paraffine, V_c le volume du composite, $m_{mousse\ vide}$ est la masse mesurée de la mousse métallique vide, sans la paraffine et $m_{mousse\ remplie}$ est la mousse du composite mesurée après imprégnation en suivant le protocole d'élaboration.

Les mousses métalliques utilisées sont des mousses de Nickel et d'Aluminium et sont fournies par la société GoodFellow France. Leurs propriétés structurales et thermophysiques sont présentées dans le *Tableau 10*. Cinq composites sont élaborés en utilisant deux paraffines RT27 et RT35HC. Le *Tableau 11* présente la composition de ces échantillons et leur taux d'imprégnation. On constate que les échantillons ont un taux d'imprégnation supérieur à 96% et inférieur -strictement- à 100%. Cette différence peut être attribuée à la perte de masse pendant le démoulage et à la modification de la densité de la paraffine durant la solidification.

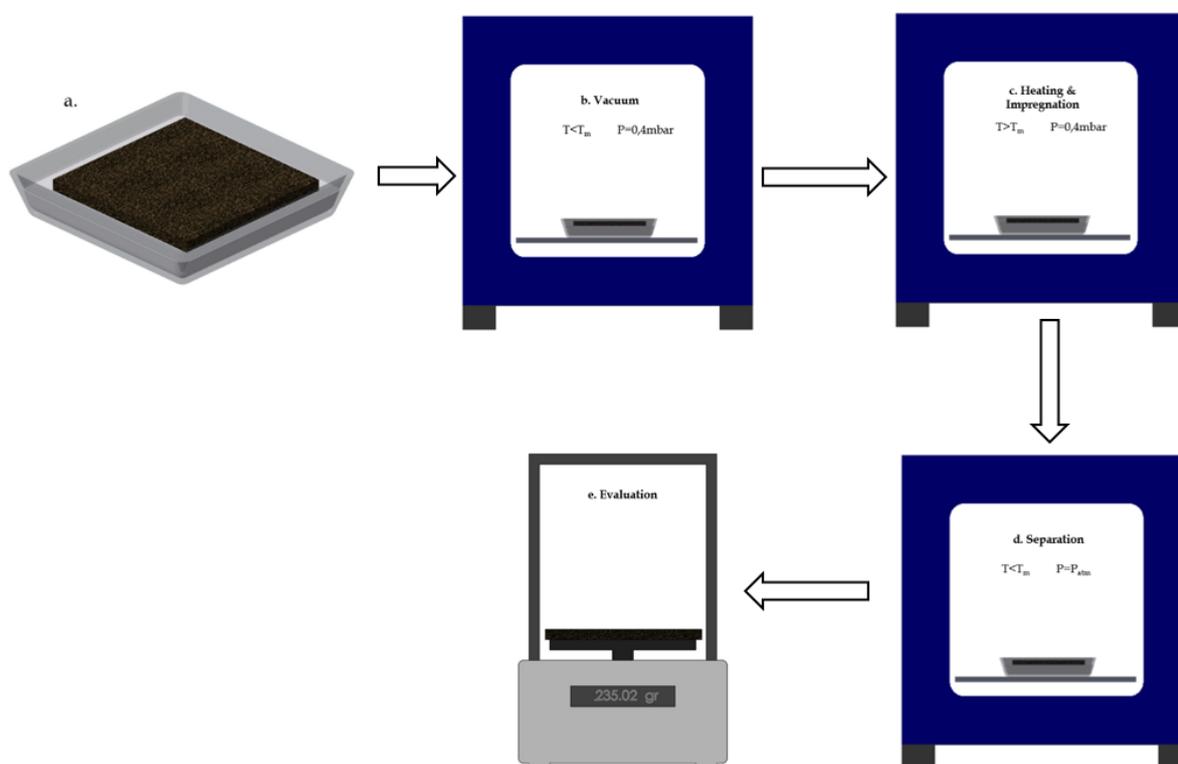


Figure 17: Protocole d'élaboration

Matériau	Porosité	d_p	ρ	λ	C_P
		mm	$Kg.m^{-3}$	$W.m^{-1}.K^{-1}$	$J.kg^{-1}.K^{-1}$
Aluminium	0.93	0.55	2700	218	963
Nickel1	0.952	0.9	8900	91.4	444
Nickel2	0.95	2.3	8900	91.4	444

Tableau 10: Propriétés des mousses métalliques

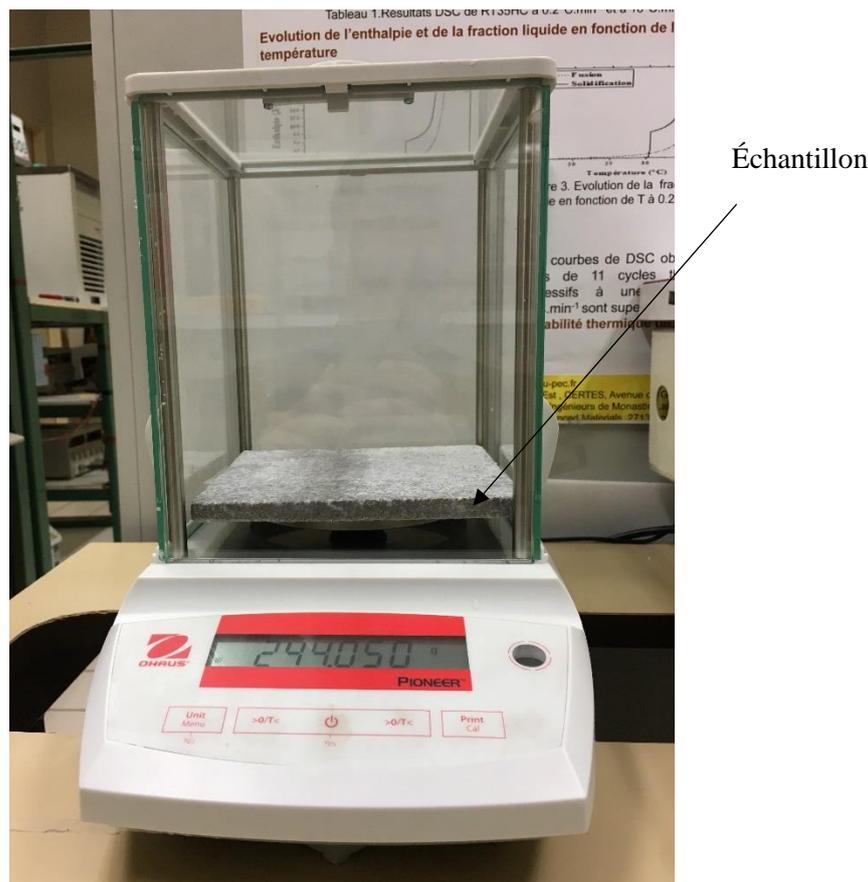


Figure 18: Mesure de la masse de l'échantillon

Échantillon	1	2	3	4	5
Composition	Nickel 1/ RT35HC	Nickel 2/ RT35HC	Aluminium /RT27	Nickel 1/ RT27	Nickel 2/ RT27
Imprégnation %	96	98	97	96	97

Tableau 11: Taux d'imprégnation des échantillons

2.3. Caractérisation des propriétés thermophysiques par la méthode Hot Disk et PCGT

2.3.1. Le Hot Disk

L'analyseur Hot Disk permet de déterminer quatre propriétés thermophysiques, deux d'entre elles sont mesurées, les deux autres sont déduites : la conductivité thermique et la diffusivité thermique sont déterminées directement, l'effusivité thermique et la capacité thermique volumique sont déduites. Les travaux de S. Gustafsson sur le ruban chaud [103] ont conduit à la proposition de cette technique en 1989. Le principe de la méthode Hot Disk consiste à imposer à l'échantillon étudié une puissance thermique constante pendant un temps donné et de relever simultanément

l'évolution de la température grâce à une sonde. La sonde est un élément résistif qui joue deux rôles, elle est à la fois un capteur de température et une source de chaleur mince. Elle est constituée d'un film de Nickel de $10\mu\text{m}$ enrobé d'un film en Kapton de 25 à $30\mu\text{m}$ ou de $100\mu\text{m}$ en mica. Un circuit en double spirale est dessiné sur le film métallique. La température de l'enroulement est mesurée par l'intermédiaire d'une mesure de résistance dans un pont électrique. La variation de la résistivité du nickel avec la température garantit une mesure précise, elle est suffisamment élevée : environ $0,004\text{ K}^{-1}$. Le choix de la sonde à utiliser est déterminé par la taille de l'échantillon et la dimension des éléments qui le composent. En effet, le diamètre de la sonde doit être inférieur à la distance de tout point de la sonde à la frontière latérale de l'échantillon. Le diamètre de la sonde doit être largement supérieur à la taille maximale des particules constituant le matériau.

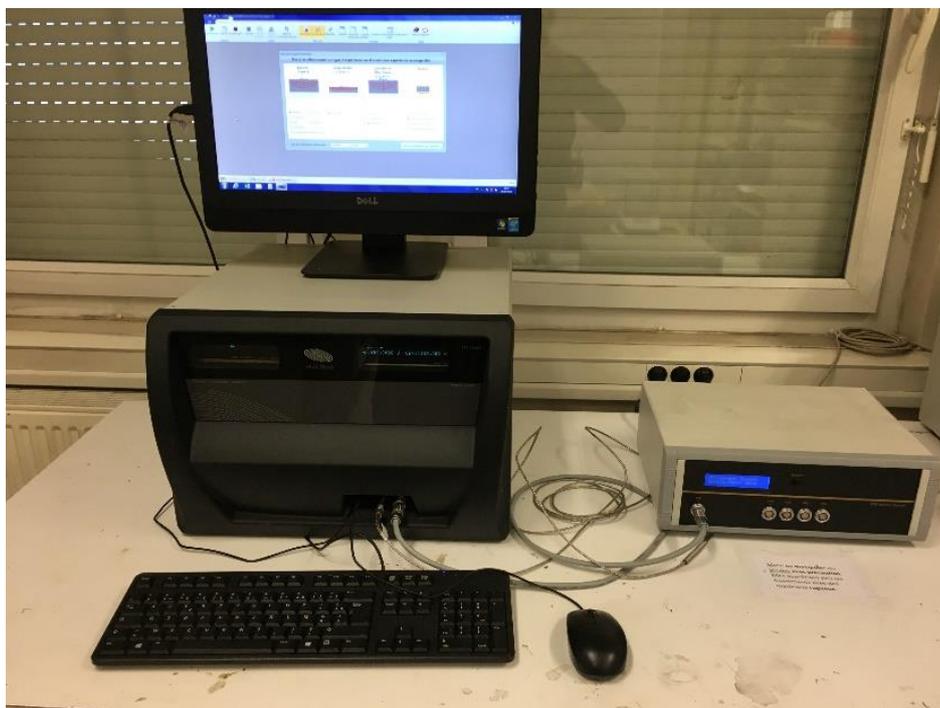


Figure 19: Photo du Hot- Disk TP2500.

Dans cette étude un Hot Disk TPS 2500 fourni par ThermoConcept a été utilisé, Figure 19. Les propriétés des échantillons caractérisés dans ce chapitre sont présentes dans le Tableau 11. Le dispositif expérimental utilisé est composé du Hot Disk, un switch multisonde un ordinateur et un four. La sonde est reliée au switch multisonde qui est à son tour relié au Hot Disk. Le Hot Disk est relié à un ordinateur qui permet l'enregistrement et le post-traitement des données. La température ambiante de l'essai est suivie par une deuxième sonde disposée à proximité de l'échantillon. Les mesures effectuées sur nos échantillons ont été faites en utilisant une sonde 4922 d'un rayon de $14,61\text{mm}$. Les puissances appliquées sont comprises entre 0.250W et 0.5W pendant 20s et 40s . 200 points de mesure de température sont enregistrés avec un pas de 0.1s pour une durée de 20s et un pas de 0.2s pour une durée de chauffe de 40s . Un exemple d'augmentation de température est présenté dans la Figure 20. La conductivité thermique et la diffusivité thermique sont ensuite déterminées par le modèle thermique implanté dans le logiciel. Il est nécessaire de supprimer certains points au

début et à la fin de la courbe d'évolution temporelle de la température pour prendre en considération les conditions expérimentales. Les temps les plus courts ne doivent pas être pris en considération pour minimiser l'effet de la résistance de contact et aussi en raison de la présence des couches isolantes sur la sonde et aussi pour minimiser l'effet de la résistance de contacts [103]. L'échantillon est considéré comme un milieu semi-infini. Par conséquent, la profondeur de pénétration doit être inférieure à la distance la plus courte entre n'importe quel point de l'extrémité de l'échantillon et n'importe quel point du capteur. Les mesures sont faites respectivement pour les composites MM- RT27 et MM- RT35HC à 22°C et 25°C. La caractérisation est faite en 4 étapes. En effet, premièrement l'échantillon est disposé dans le four qui est thermo régulé à la température souhaitée le temps que tout l'échantillon soit à la température requise. Un poids est utilisé pour immobiliser l'échantillon en question, en configuration asymétrique. La deuxième partie consiste à choisir les paramètres de mesure dans le logiciel : la configuration, la référence de la sonde, la puissance et le temps de chauffe et la profondeur de pénétration. En effet, il existe deux configurations, la configuration symétrique dans le cas où le capteur est inséré entre deux échantillons de même nature et de même dimension, et la configuration asymétrique qui consiste à insérer le capteur entre l'échantillon à caractériser et un isolant avec des propriétés thermophysiques connues. La troisième et la quatrième étapes consistent à lancer les mesures et traiter les résultats. Pour s'assurer de l'uniformité de la température, une pause de 20 minutes est respectée entre deux mesures consécutives.

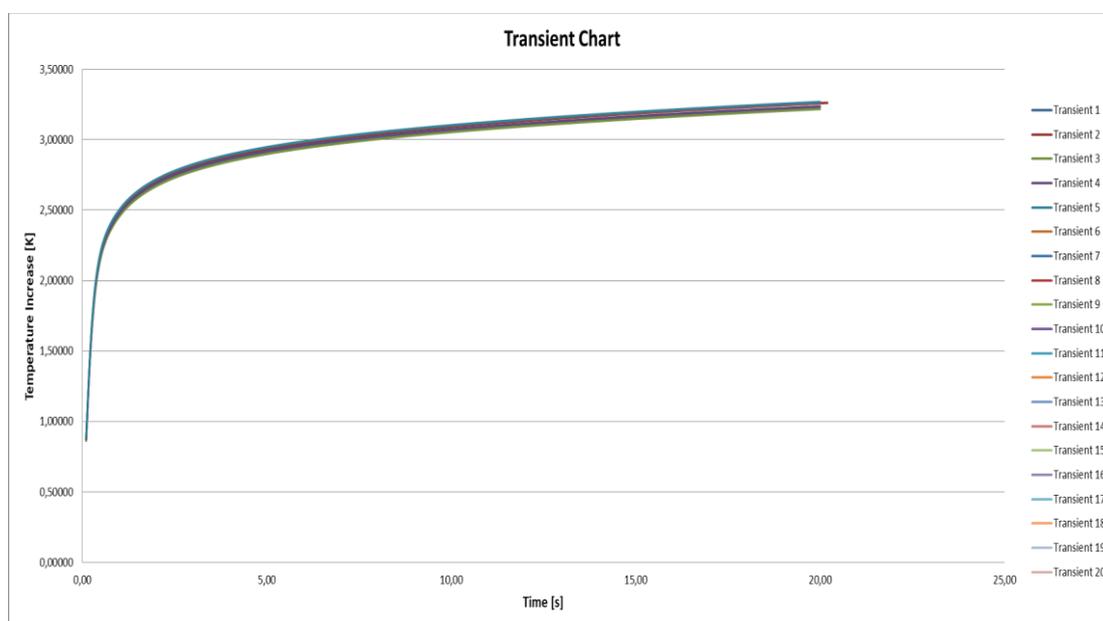


Figure 20: Évolution de la température

2.3.2. Plaque Chaude Gardée Transitoire (PCGT)

On trouve dans la littérature plusieurs méthodes expérimentales permettant de déterminer la chaleur spécifique et la chaleur latente des matériaux. Parmi les méthodes le plus utilisées figurent le DTA (Differential Thermal Analysis) ou le DSC (Differential Scanning Calorimetry). Ces méthodes utilisent des échantillons de petites

tailles. Les mousses métalliques peuvent contenir des pores de l'ordre de millimètres de taille. Pour en tenir compte, il faut travailler avec des échantillons de taille plus grande. Afin de déterminer la conductivité thermique, la capacité calorifique à l'état liquide et la chaleur latente de fusion et de solidification, nous avons utilisé la méthode des plaques chaude gardée transitoire (PCGT) développée au Laboratoire CERTES [104–106]. Ce dispositif expérimental (PCGT) est constitué de deux échangeurs à plaques, deux bains thermostatés deux fluxmètres (fournis par Captec France) et des thermocouples reliés à un système d'acquisition NI (Modules National Instruments). Le schéma descriptif du dispositif expérimental est présenté sur la Figure 21. Cette méthode consiste à mesurer simultanément le flux thermique et la température de part et d'autre des deux faces d'un échantillon en utilisant un fluxmètre et un ou plusieurs thermocouples. L'échantillon est entouré par une plaque de mousse en polyéthylène expansé de même épaisseur afin d'en isoler les faces latérales, ce qui permet de réduire le problème de transfert de chaleur à un problème 1D. L'ensemble est placé entre deux plaques légèrement serrées (la pression est contrôlée). À l'intérieur de chaque plaque circule de l'huile H10 dont la température est régulée par un bain thermostaté avec une précision de $\pm 0,3$ °C (modèle Julabo F34 HE). Chaque bain possède un volume de 25 litres et le domaine de température de travail est compris dans l'intervalle $[-30^{\circ}\text{C}; 200^{\circ}\text{C}]$. L'utilisation de bains thermostatés permet d'imposer avec précision la température désirée pour chacun des échangeurs à plaques.

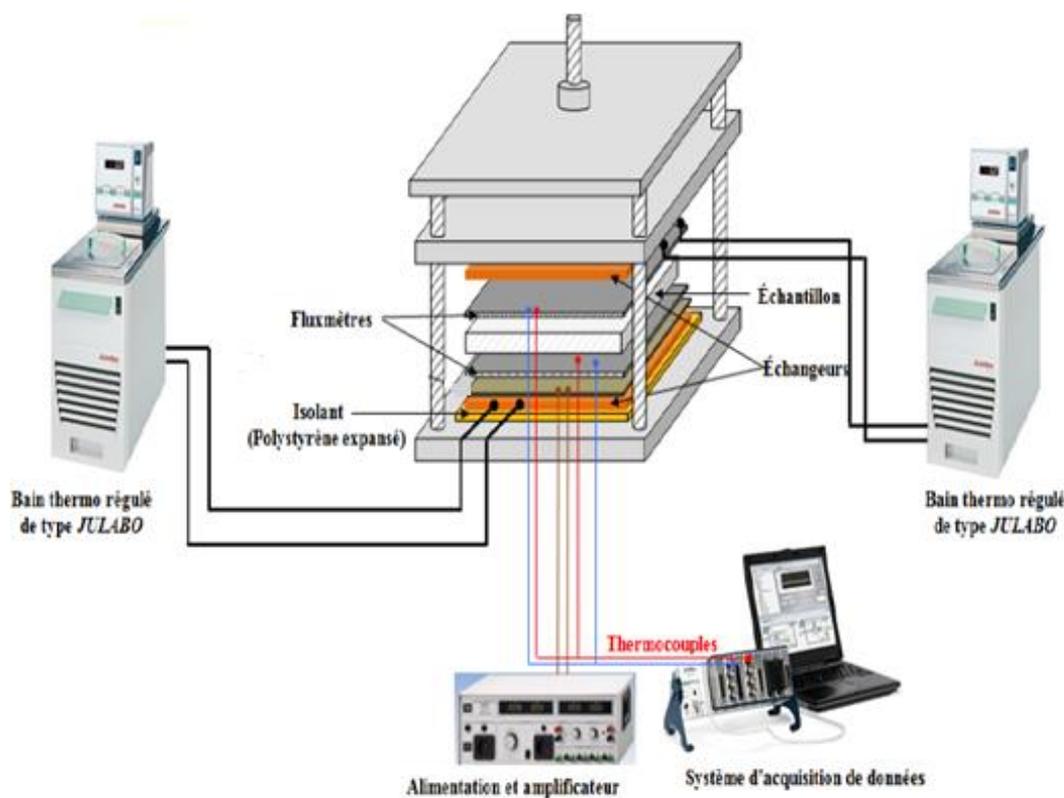


Figure 21: Schéma descriptif de la Plaque Chaude Gardée Transitoire

Le principe consiste à imposer un gradient de température (conductivité thermique) ou une température constante (capacité calorifique spécifique ou chaleur latente) par

les deux plaques échangeuses et de suivre l'évolution de la température et de la densité de flux au niveau des deux faces de l'échantillon, jusqu'à régime permanent. Pour déterminer la conductivité thermique à l'état liquide, on maintient les deux plaques échangeuses à la même température, au-dessus de la température de fusion jusqu'à l'état isothermique. Ensuite, on augmente la température de la plaque échangeuse haute jusqu'à l'obtention d'un flux constant (régime permanent). La conductivité thermique de l'échantillon (λ_{eff}) est calculée à partir de la relation suivante :

$$\lambda_{eff} = \frac{(q_{inf} + q_{sup}).e}{2\Delta T} \quad (8)$$

Avec $\Delta T = |T_1 - T_2|$ et e est l'épaisseur de l'échantillon.

La capacité calorifique est -aussi- déterminée en suivant l'évolution de la température et du flux thermique. Une température supérieure à la température de fusion est imposée jusqu'à l'équilibre thermique. Ensuite, la température est augmentée de la même façon jusqu'à l'équilibre thermique : la même température est imposée à la plaque échangeuse haute et basse. La chaleur stockée dans l'échantillon durant ce processus est calculée à partir de l'expression suivante :

$$Q_{sensible} = \int_{t_{initial}}^{t_{final}} \Delta\phi . dt = C.(T_{finale} - T_{initiale}) \quad (9)$$

$\Delta\phi = |\phi_1 - \phi_2|$ est la différence de flux entre les deux faces de l'échantillon, $C(J.m^{-2}.K^{-1})$ la capacité thermique de l'échantillon, $T_{initiale}$ est la température initiale et T_{finale} est la température finale. La capacité calorifique massique est ensuite déduite :

$$C_p = \frac{C}{\rho.e} \quad (10)$$

À l'état liquide la paraffine incorporée dans la mousse métallique coule sous l'effet de la gravité ce qui conduit à une mousse métallique vide. Pour remédier à ce problème un nouveau moule en aluminium a été conçu avec des dimensions qui sont plus grandes que l'échantillon pour tenir compte de l'expansion volumique de la paraffine. La Figure 22 présente une schématisation du moule en aluminium. La Figure 23 fournit une photographie d'un échantillon préparé pour la caractérisation.

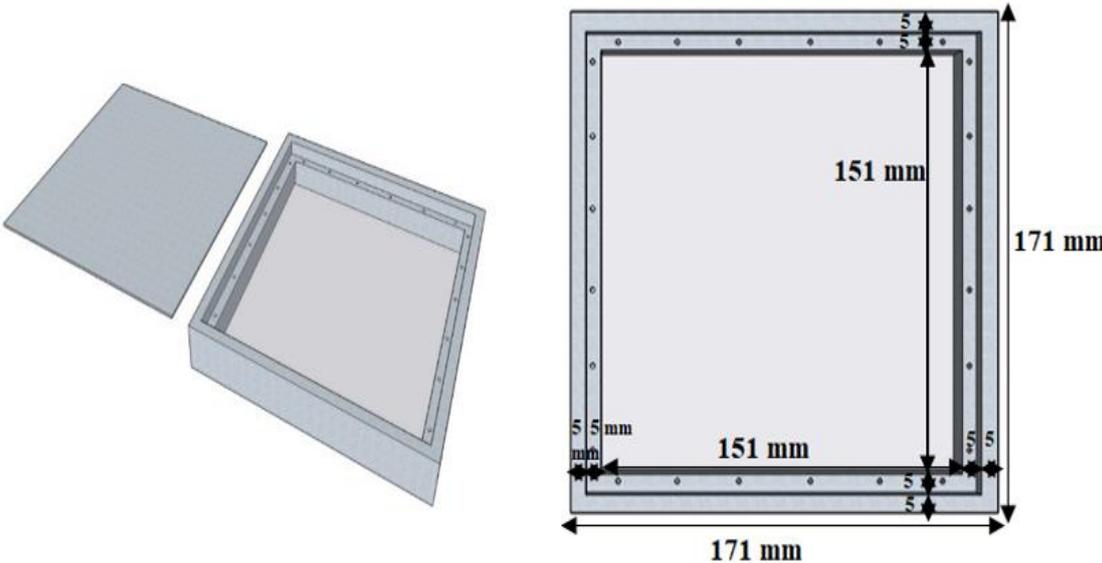


Figure 22: Moule en aluminium utilisé pour les composites en phase liquide.

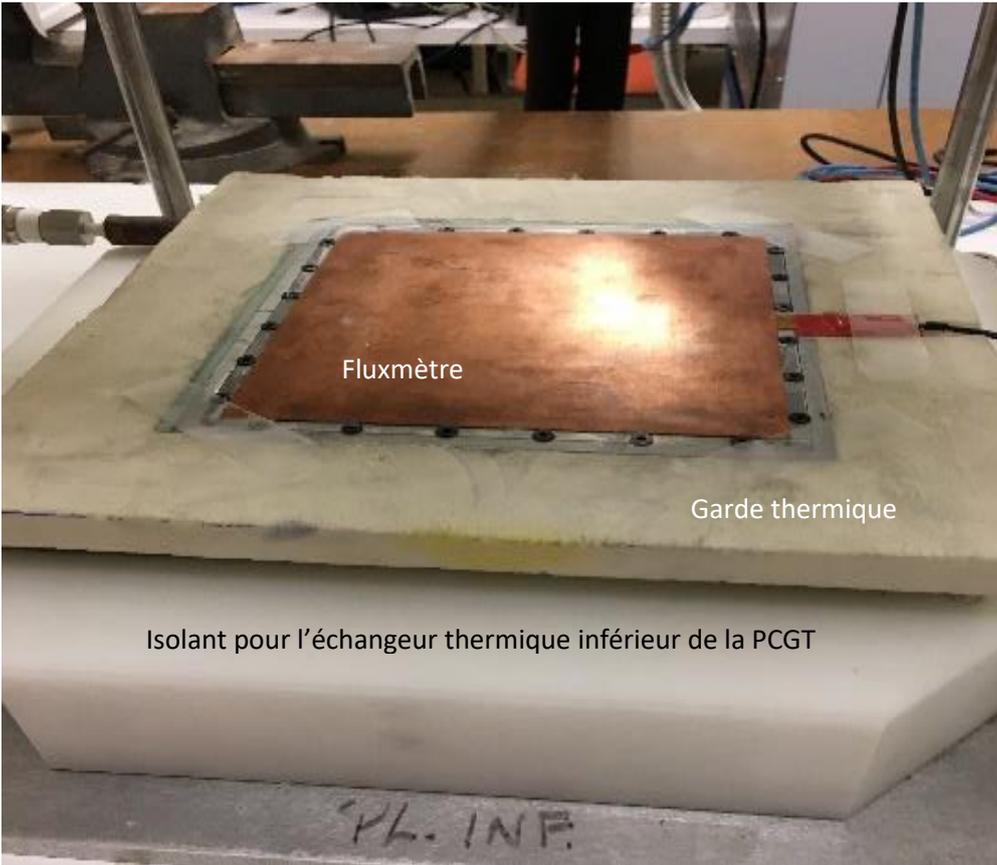


Figure 23: La partie inférieure de la PCGT : échantillon préparé instrumenté.

2.4. Résultats

2.4.1. Propriétés thermophysiques de la paraffine RT27 et RT35HC pure

Les propriétés thermiques de la paraffine RT27 et RT35HC sont déterminées par DSC et par Hot Disk. La chaleur latente et la température de fusion sont déterminées par une analyse DSC à compensation de puissance à l'aide d'un calorimètre Diamond de Perkin Elmer [107]. Les points de fusion et de solidification de la paraffine RT27 ont été retrouvés respectivement à 25.15°C et 24.45°C, et sa chaleur latente de fusion et de solidification sont respectivement : 146.769J/g et 146.139J/g. La fusion et la solidification de la paraffine RT35HC s'effectuent à 35.82°C et 32.2°C respectivement. Les chaleurs latentes de fusion et de solidification de la paraffine RT35HC sont de 211.53J/g et 208.48J/g respectivement. Les capacités calorifiques à l'état solide et liquide de la paraffine RT27 sont de 1704.98J/(kg.K) et 1704.98J/(kg.K) respectivement. La paraffine RT35HC a une capacité calorifique à l'état solide de 1569.35J/(kg.K) et à l'état liquide de 2000.394J/(kg.K).

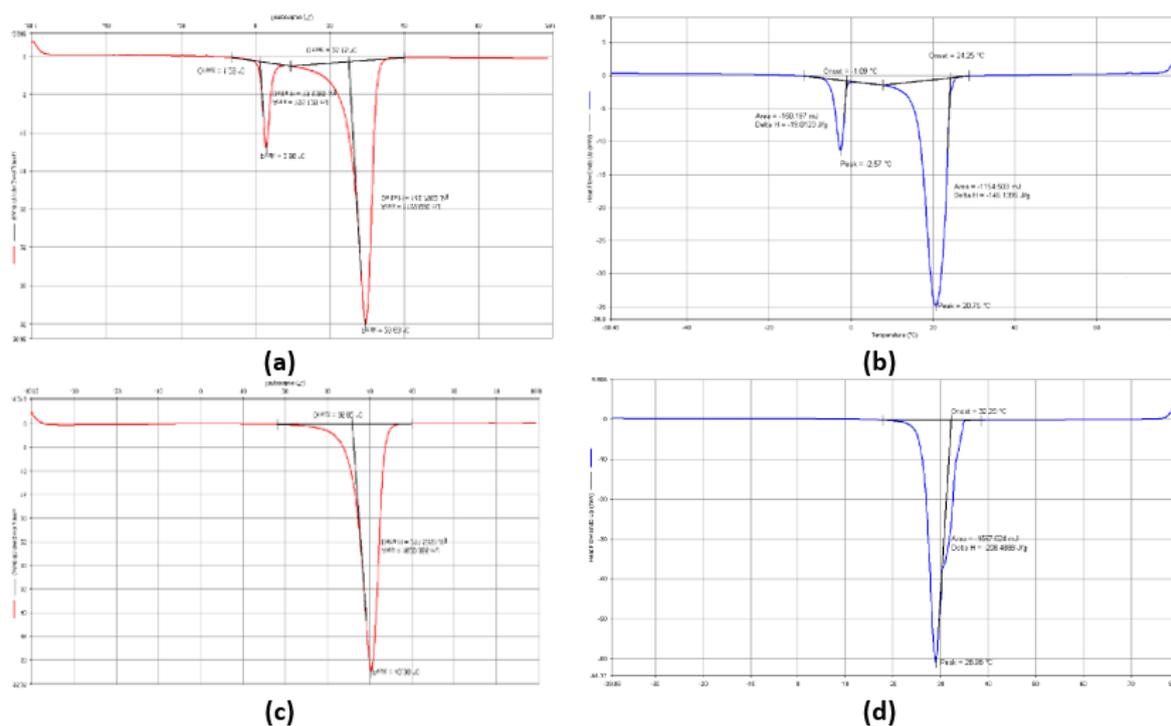


Figure 24: Étude en DSC : (a) chauffage RT27, (b) refroidissement RT27, (c) chauffage RT35HC, (d) refroidissement RT35HC [107]

La conductivité thermique à l'état solide et liquide est déterminée par l'analyseur Hot Disk [107]. Les résultats de la caractérisation par Hot Disk sont présentés dans le Tableau 12.

	Conductivité solide	Conductivité liquide
	$W.m^{-1}.K^{-1}$	$W.m^{-1}.K^{-1}$
RT27	0.2345	0.1877
RT35HC	0.3341	0.1867

Tableau 12 : Conductivité thermique de RT27 et RT35HC

2.4.2. Conductivité thermique à l'état solide (Hot Disk)

Dans cette partie, les résultats de la conductivité thermique effective des composites obtenus par la méthode Hot Disk sont présentés. Le Tableau 13 regroupe les résultats des différents composites. La conductivité effective de ces composites est dépendante de la porosité et de la conductivité thermique de la mousse. On constate que l'utilisation d'une mousse en aluminium et de nickel permet de multiplier la conductivité thermique de la paraffine par 15 et par 5 respectivement. Les deux mousses de nickel utilisées dans cette étude ont presque la même porosité, mais un diamètre de pores différents. Par comparaison entre les conductivités thermiques des composites paraffine/ nickel, on remarque que la morphologie de la mousse (diamètre de pores) a un faible effet sur leur conductivité effective. L'effet de la morphologie de la mousse sur la cinétique de changement de phase de la paraffine imprégnée dans une mousse métallique sera l'objet d'une étude numérique dans le chapitre suivant.

	Conductivité thermique	Incertitude
	$W/(m.K)$	
Échantillon 1	1.44	± 0.031
Échantillon 2	1.5	± 0.02
Échantillon 3	4.49	± 0.02
Échantillon 4	1.66	± 0.017
Échantillon 5	1.3	± 0.021

Tableau 13: Conductivité thermique effective Hot Disk.

Le Tableau 14 présente une comparaison des résultats trouvés dans le cadre de cette étude et celles de la littérature. Les résultats montrent un grand impact de la porosité, de la conductivité thermique de la MM et de la conductivité thermique du MCP sur la conductivité effective d'un composite MM- MCP. Dans [65] les auteurs ont déterminé la conductivité thermique effective d'un composite MN- paraffine (0.19 W/(m.K)) qu'ils ont trouvée à 4.37 W/(m.K). La conductivité élevée de ce composite MN- Paraffine par rapport à nos échantillons 1, 2, 4 et 5 est expliquée par la faible porosité de l'échantillon étudié dans [65] qui est de 90% par rapport à nos échantillons qui est d'environ 95%. Ces résultats corroborent avec ceux trouvés dans [66]. La conductivité d'un composite MN- paraffine (0.2W/(m.K)) caractérisé dans [66] est de 1.16 W/(m.K). La MN utilisée a une porosité de 97%.

Composite	Porosité de la mousse	Conductivité du MCP	Conductivité du composite
	%	$W/(m.K)$	$W/(m.K)$
Alcool myristique-Mousse de Nickel [108]	97	0.1701	0.48
Paraffine-Mousse de graphite [109]		0.22	4.98
Paraffine-Mousse de cuivre [110]	97.3	0.065	3.11
Paraffine-Mousse de Nickel [66]	97	0.2	1.16
Sodium acétate trihydraté-Mousse de cuivre [51]	92	0.59	6.8
Paraffine-Mousse de Nickel [65]	90	0.19	4.37
Échantillon 1	95.2	0.334	1.44
Échantillon 2	95	0.334	1.5
Échantillon 3	93	0.24	4.49
Échantillon 4	95.2	0.24	1.66
Échantillon 5	95	0.24	1.33

Tableau 14: Comparaison des résultats de la présente étude avec ceux de la littérature

2.4.3. Conductivité thermique à l'état liquide (PCGT)

Dans ce paragraphe, les résultats de la conductivité effective des composites sont présentés. Trois composites ont été caractérisés par la méthode plaque chaude gardée transitoire.

Les figures 25, 26 et 27 présentent -respectivement- l'évolution de la densité de flux thermique et la température pour l'échantillon 3, l'échantillon 2 et l'échantillon 1. Le Tableau 15 présente les résultats de la conductivité thermique effective à l'état liquide de ces échantillons. Les résultats montrent que la conductivité thermique à l'état liquide est proche de celle à l'état solide. Les résultats montrent également une différence relativement faible entre la conductivité thermique à l'état solide et à l'état liquide, $0,1W/(m.K)$ - $0,3W/(m.K)$, même s'il existe une différence non négligeable entre la conductivité liquide de la RT35HC à l'état liquide et à l'état solide.

	Conductivité thermique	Incertitude
	$W/(m.K)$	
Échantillon 1	1.44	± 0.031
Échantillon 2	1.5	± 0.021
Échantillon 3	4.15	± 0.024

Tableau 15 : Conductivité thermique effective à l'état liquide

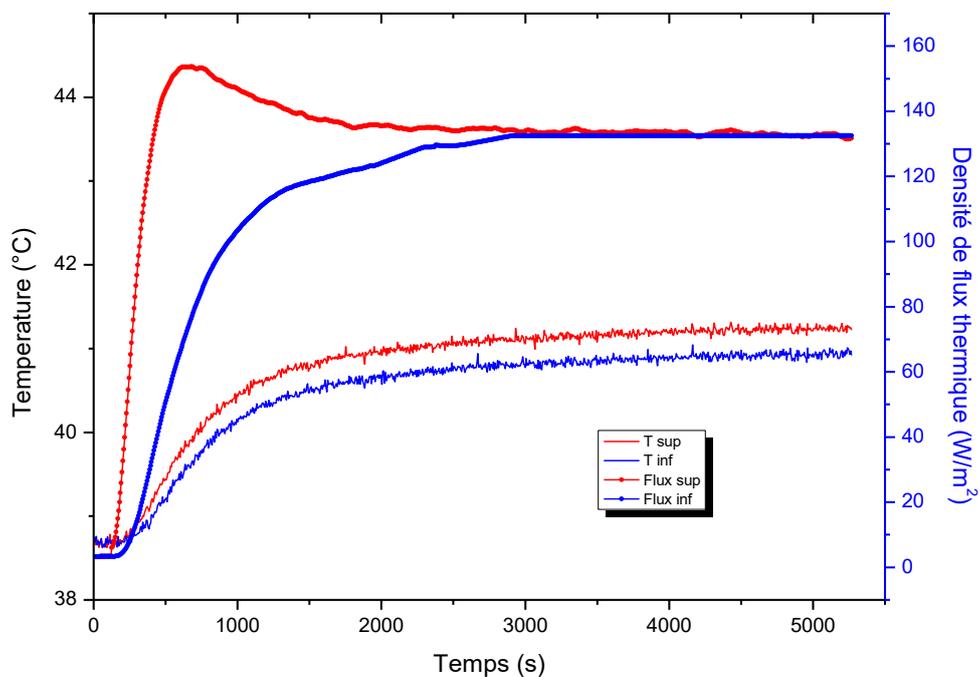


Figure 25: Évolution de la température et de la densité de flux thermique, échantillon 3.

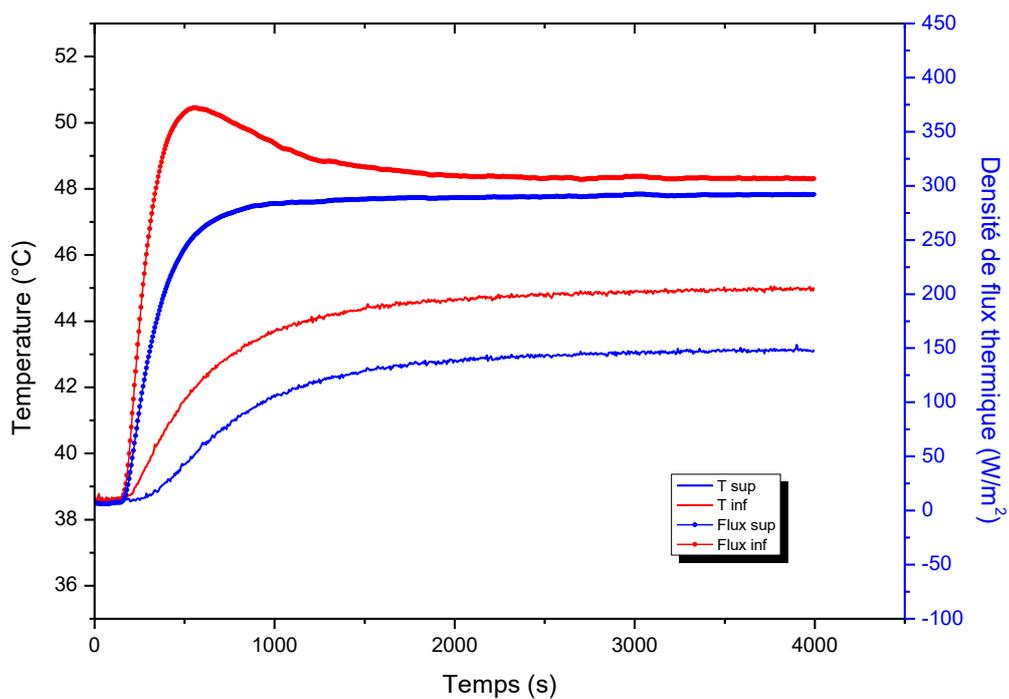


Figure 26: Évolution de la température et de la densité de flux thermique, échantillon 2.

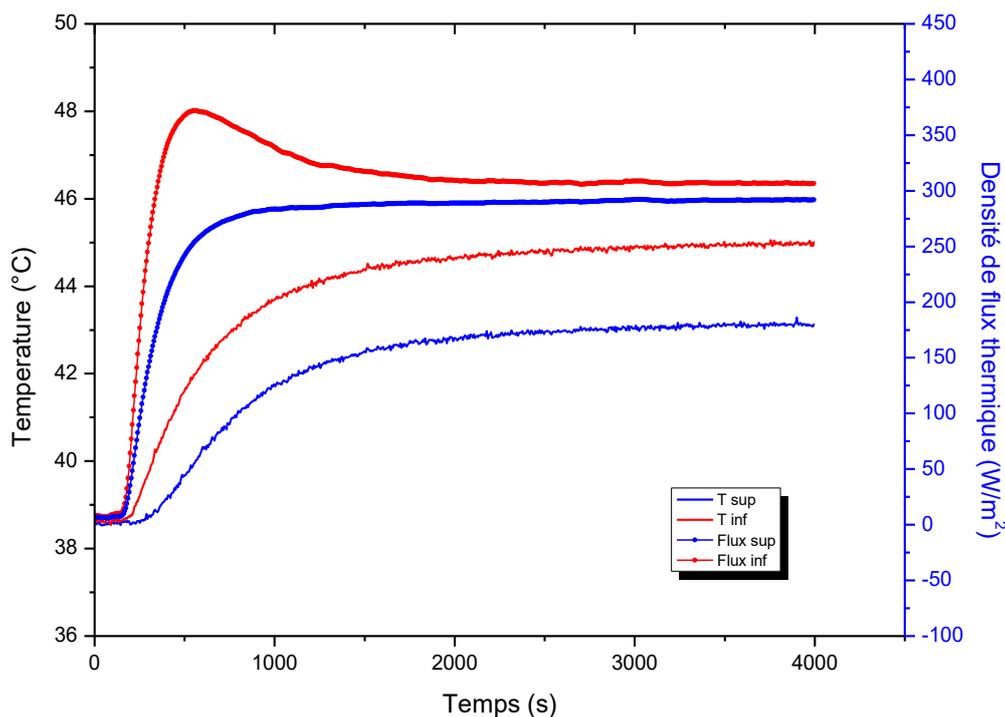


Figure 27: Évolution de la température et de la densité de flux thermique, échantillon 1.

2.4.4. Capacité calorifique à l'état solide

Le Tableau 16 présente la diffusivité et la capacité calorifique à l'état solide des échantillons déterminés par le Hot Disk.

	Diffusivité thermique	Capacité calorifique massique
	mm^2/s	$J/(kg.K)$
Échantillon 1	0.920	1247.26
Échantillon 2	0.757	1474.42
Échantillon 3	2.157	2259.68
Échantillon 4	0.899	1548.14
Échantillon 5	0.937	1178.18

Tableau 16: La diffusivité thermique et capacité calorifique des composites

2.5. Modélisation de la conductivité effective

La prédiction de la conductivité thermique effective d'un composite MM- MCP est importante pour la simulation numérique du comportement thermique et pour l'étude des mécanismes de transfert thermique lors du changement de phase et/ou à l'état liquide et l'état solide. La modélisation de la conductivité thermique effective de ce type des composites est complexe, elle dépend de la porosité, de la morphologie de la mousse (taille des pores, forme des cellules, forme des ligaments...), de la conductivité thermique du MCP et de la conductivité thermique de la mousse métallique. Dans la littérature de nombreuses études ont essayé de développer des modèles analytiques,

empiriques et semi-empiriques de prédiction de la conductivité thermique effective d'un composite mousse métallique en se basant sur des structures géométriques similaires. Calmidi et Mahajan [111,112] ont développé un modèle analytique semi-empirique qui permet de déterminer la conductivité effective en fonction de la porosité. Le modèle a été validé par comparaison avec des résultats expérimentaux des composites Mousse métallique- Eau et Mousse métallique- Air. De même, Bhattacharya et al [113] ont développé un modèle analytique en se basant sur une géométrie 2D (bidimensionnelle). La cellule unitaire a été considérée comme hexagonale. Les expériences réalisées par [113] ont montré que ce modèle de prédiction donne un bon accord pour des composites de mousse d'aluminium-Air, Aluminium- Eau, Mousse de carbone- Air et Mousse de carbone- Eau. Boomsma et Poulikakos [114] ont développé un modèle plus sophistiqué de prédiction en se basant sur une géométrie 3D qui considère que les cellules d'une mousse métallique ont une forme de tétrakaidécaèdre. La topologie des mousses métalliques est très proche des cellules tétrakaidécaèdre [115-117]. On rappelle que le tétrakaidécaèdre est l'un des 13 polyèdres décrits par Archimède. Il admet 24 sommets, 36 arêtes et 14 faces, Figure 28. Ce modèle donne une meilleure précision.

Le Tableau 17 présente la comparaison entre nos résultats expérimentaux et ceux des modèles de prédiction de Calmidi et al [111], Bhattacharya et al [113] et Boomsma et al [114]. Les résultats montrent que le modèle de Boomsma et al présent un meilleur accord avec nos résultats expérimentaux. Une correction est portée sur le modèle de Boomsma [114] en changeant la valeur de e à 0.3415 qui donne une meilleur accord. Avec e est le rapport entre r : la longueur du nœud cubique et la longueur du ligament L (voir Figure 29). Le Tableau 18 présente une comparaison entre les résultats expérimentaux de la présente étude, le modèle de Boomsma et al et le modèle de Boomsma corrigé. Dans ce qui suit de ce travail nous utiliserons le modèle Boomsma corrigé.

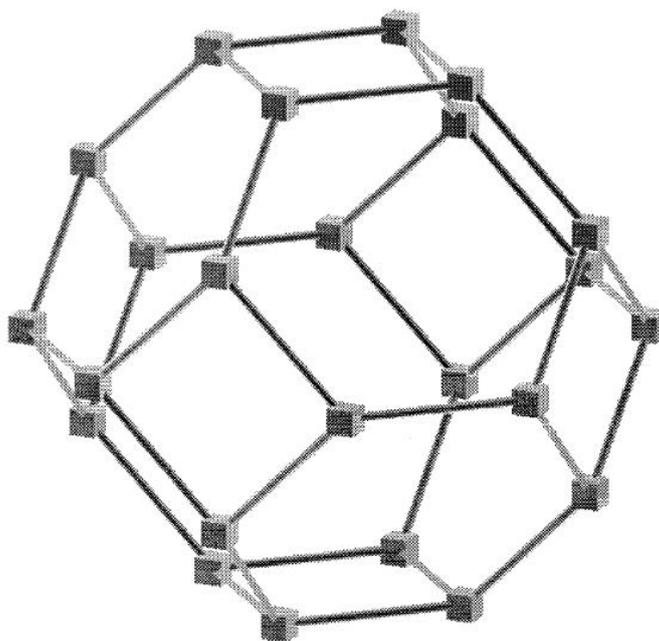


Figure 28: Représentation du modèle Tétrakaidécaèdre [114]

Modèle de Bhattachyra [113]:

$$k_e = A(\varepsilon k_f + (1-\varepsilon)k_s) + \frac{1-A}{\frac{\varepsilon}{k_f} + \frac{1-\varepsilon}{k_s}} \quad (11)$$

Modèle de Calimidi et Mahajan [111]:

$$k_e = \left\{ \frac{2}{\sqrt{3}} \left[\frac{r \left(\frac{b}{L} \right)}{k_f + \left(1 + \frac{b}{L} \right) \frac{(k_s - k_f)}{3}} + \frac{(1-r) \left(\frac{b}{L} \right)}{k_f + \frac{2}{3} \left(\frac{b}{L} \right) (k_s - k_f)} + \frac{\frac{\sqrt{3}}{2} \frac{b}{L}}{k_f + \frac{4r}{3\sqrt{3}} \left(\frac{b}{L} \right) (k_s - k_f)} \right] \right\} \quad (12)$$

Avec : $\frac{b}{L} = \frac{-r + \sqrt{r^2 + \frac{2}{\sqrt{3}}(1-\varepsilon) \left[2 - r \left(1 + \frac{4}{\sqrt{3}} \right) \right]}}{\frac{2}{3} \left[2 - r \left(1 + \frac{4}{\sqrt{3}} \right) \right]}$ et $r = 0.09$

Boomsma et Poulikakos [114] :

$$R_A = \frac{4\lambda}{(2e^2 + \pi\lambda(1-e))k_s + (4 - 2e^2 - \pi\lambda(1-e))k_f} \quad (13)$$

$$R_B = \frac{(e - 2\lambda)^2}{(e - 2\lambda)e^2k_s + (2e - 4\lambda - (e - 2\lambda)e^2)k_f} \quad (14)$$

$$R_C = \frac{(\sqrt{2} - 2e)^2}{2\pi\lambda^2(1 - 2\sqrt{2}e)k_s + 2(\sqrt{2} - 2e - \pi\lambda^2(1 - 2\sqrt{2}e))k_f} \quad (15)$$

$$R_D = \frac{2e}{e^2k_s + (4 - e^2)k_f} \quad (16)$$

$$\lambda = \sqrt{\frac{\sqrt{2}(2 - (5/8)e^3\sqrt{2} - 2\varepsilon)}{\pi(3 - 4\sqrt{2}e - e)}}, e = 0.339 \quad (17)$$

$$k_{eff} = \frac{1}{\sqrt{2}(R_A + R_B + R_C + R_D)} \quad (18)$$

	Mesure	Bhattachyra et al [113]	Calmidi et al [118]	Boomsma et al[114]
	$W/(m.K)$	$W/(m.K)$	$W/(m.K)$	$W/(m.K)$
Échantillon 1	1.44	1.868	2.02	1.782
Échantillon 2	1.55	1.932	2.08	1.857
Échantillon 3	4.49	5.683	5.73	5.288
Échantillon 4	1.66	1.836	1.967	1.661
Échantillon 5	1.3	1.462	1.911	1.592

Tableau 17 : Comparaison entre les résultats expérimentaux de la présente étude et les modèles de prédiction de la conductivité.

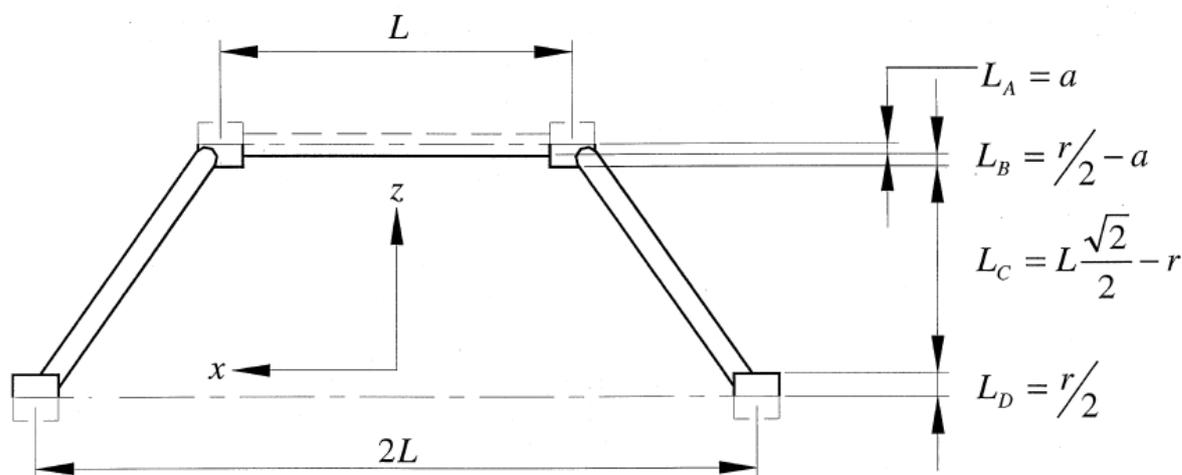


Figure 29: Coupe 2D partielle de la cellule tétrakaidécaèdre

	Mesure	Boomsma et al	Boomsma et al corrigé	Erreur
	$W/(m.K)$	$W/(m.K)$	$W/(m.K)$	%
Echantillon 1	1.44	1.782	1.618	11
Echantillon 2	1.55	1.857	1.677	7.5
Echantillon 3	4.49	5.288	4.561	1.5
Echantillon 4	1.66	1.661	1.523	8.2
Echantillon 5	1.3	1.592	1.428	8.9

Tableau 18: Comparaison entre les résultats expérimentaux de la présente étude avec le modèle de Boomsma et Boomsma corrigé.

2.6. Conclusion :

Dans cette étude, un procédé de fabrication des composites Mousses métalliques a été présenté et un protocole expérimental a été mis en place. Des composites types Mousse d'aluminium- Paraffine (RT27 et RT35HC) et Mousse de Nickel- Paraffine (RT27 et RT35HC) ont été élaboré. Les propriétés thermophysiques de ces composites

ont été étudiées grâce à la méthode plaque chaude gardée transitoire et un Hot Disk. Les résultats ont montré que l'utilisation des mousses métalliques améliore considérablement le transfert de chaleur en gardant l'avantage des MCP. Les résultats ont montré aussi que la structure de la mousse de nickel n'a pas un grand impact sur la conductivité effective. Ensuite, nos efforts ont été focalisés sur les modèles analytiques de la prédiction de la conductivité thermique effective afin qu'on puisse simuler numériquement le comportement thermique de ces composites dans le but d'optimiser leurs propriétés thermophysiques. Plusieurs modèles de la littérature ont été présentés et comparés. Le modèle de Boomsma et al [114] a donné un meilleur accord avec les résultats expérimentaux. Une correction a été apportée à ce modèle pour qu'il s'accorde encore mieux avec nos résultats expérimentaux. Dans ce qui suit, nous utilisons le modèle de Boomsma corrigé.

Chapitre 3: Modélisation et étude numérique de changement de phase solide-liquide dans un milieu poreux

3.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous nous intéressons en premier lieu à la modélisation de changement de phase solide-liquide d'un MCP dans une mousse métallique à grande porosité et à cellules ouvertes. Ensuite, à l'étude numérique de l'effet du matériau, de la morphologie de la mousse métallique et de conditions de chauffage/refroidissement sur la cinétique de changement de phase. Les simulations numériques sont faites par éléments finis avec le logiciel COMSOL Multiphysics, version 5.3a.

L'annexe II présente une généralité et des définitions élémentaires sur les milieux poreux et les matériaux cellulaires.

3.2. Modélisation d'écoulement de fluide dans une mousse métallique

3.2.1. Cellule élémentaire représentative

Les mousses métalliques peuvent être considérées comme une suite des cellules élémentaires. Dans la littérature il existe trois modèles géométriques pour les mousses métalliques : le dodécaèdre, la cellule de Kelvin et la cellule de Weaire. Parmi ces modèles, la cellule de Kelvin proposé par Sir William Thomson qui est devenu plus tard Lord Kelvin en 1887 est couramment utilisée par les chercheurs pour décrire les mousses métalliques ouvertes et périodiques. La cellule de Kelvin est composée de six faces planes quadrilatérales et huit faces hexagonales légèrement courbées, Figure 30.

3.2.1.Perméabilité

La perméabilité traduit la facilité avec laquelle le fluide s'écoule dans le milieu poreux sous l'effet d'un gradient de pression. La perméabilité notée K dépend uniquement de la porosité et de la géométrie de la matrice solide [119]. Dans ce que suit nous ferons une étude sur la perméabilité des mousses métalliques à grande porosité.

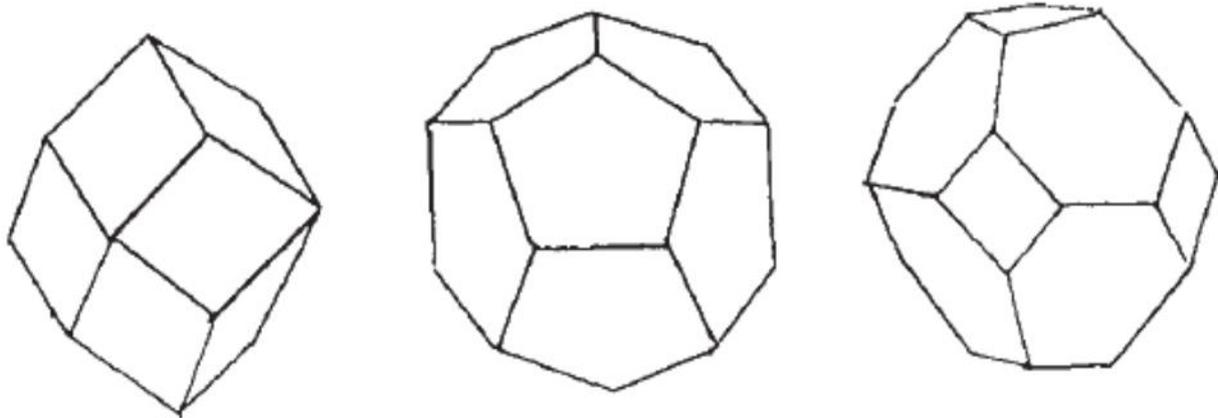


Figure 30 : Polyèdres représentatifs de la structure de la mousse : (a) Dodécaèdre, (b) Cellule de Kelvin

3.2.2. Coefficient d'inertie

Le coefficient d'inertie a été introduit pour la première fois en 1901 par Forchheimer [120,121], pour prendre en considération les effets inertiels.

3.2.3. Modélisation de la perméabilité et de coefficient d'inertie

Afin de simplifier la modélisation des propriétés mécaniques et thermophysiques des mousses métalliques, plusieurs travaux dans la littérature ont considéré la mousse comme un ensemble des Cellules Unitaires Représentatives (CUR) répétitives (périodiques). Une cellule unitaire d'une mousse métallique est généralement un polyèdre de 12 à 14 faces [122,123], chaque face à une forme pentagonale ou hexagonale. Du Plessis et al [7], ont établi des modèles pour estimer le diamètre de pores, et la surface spécifique en fonction de la porosité et tortuosité en se basant sur un CUR cubique, et autres modèles pour estimer la perméabilité, le coefficient d'inertie (Coefficient de Forchheimer) en fonction de porosité, diamètre de pores et tortuosité en basant sur un CUR Tétrakaidécaèdre. Calmidi [8] a développé un modèle pour estimer le diamètre des ligaments en fonction de la porosité, du diamètre des pores et une fonction de forme, ce modèle est basé sur une CUR cubique. Le modèle de Calmidi présente un écart maximal de $\pm 7\%$ par rapport aux valeurs mesurées pour les diamètres des pores et des ligaments [8]. Calmidi et Mahajan [9, 10] ont utilisé une approximation de la CUR sous forme de dodécaèdre pour développer des modèles de calcul de propriétés thermophysiques des mousses métalliques.

Les équations de Navier-Stokes restent valables à l'échelle des pores. Pour modéliser la perméabilité, le principe est d'écrire les équations de Navier stockes au niveau local d'un CUR (Cellule unitaire représentative) et de calculer la contrainte de cisaillement, qu'on peut l'approcher pour des faibles nombres de Reynolds à la force de frottement et pour les grands nombres de Reynolds à la force de Trainée. La

comparaison entre les équations de Navier-Stokes et les équations de Darcy-Forscheimer-Brinkmann conduit à trouver la perméabilité. Les travaux de Calmidi et Mahajan [111] ont conduit à une formule empirique permet de calculer la perméabilité et le coefficient d'inertie en fonction du diamètre de pores, diamètre de ligaments et la porosité. Du Plessis et al [117] ont proposé des formules en fonction du diamètre de pores et la tortuosité. Tadrict et al [124], ont développé une corrélation empirique pour estimer la perméabilité et le coefficient d'inertie en fonction de la porosité et du diamètre de pores. Dukhan [125] a déterminé expérimentalement les pertes de charges d'un écoulement d'air dans une mousse métallique et à partir de l'estimation des pertes de charges à proposer des corrélation qui permettent de déterminer la perméabilité et le coefficient d'inertie. Plus récent, Yang et al [126] ont développé un modèle analytique qui permet d'estimer la perméabilité des mousses des porosités compris entre 0.55-0.98 et densité des pores 5PPI- 100PPI.

Calmidi et Mahajan [111] :

$$K = 0.00073d_p^2(1-\varepsilon)^{-0.0024} \left(\frac{d_f}{d_p} \right)^{-1.11} \quad (19)$$

$$C_f = 0.00212d_p^2(1-\varepsilon)^{-0.132} \left(\frac{d_f}{d_p} \right)^{-1.63} \quad (20)$$

Du Plessis et al [117] :

$$K = \frac{\varepsilon^2 d_f^2}{36\chi(\chi-1)} \quad (21)$$

$$C_f = \frac{2.05\chi(\chi-1)}{\varepsilon^2(3-\chi)} \frac{\sqrt{K}}{d} \quad (22)$$

Tadrict et al [124] :

$$K = \frac{\varepsilon^2 d_f^2}{\alpha(1-\varepsilon)^2} \quad (23)$$

$$C_f = \frac{\beta(1-\varepsilon)}{\varepsilon^3} \frac{\sqrt{K}}{d_f} \quad (24)$$

Dukhan [125], cette formule permet d'estimer la perméabilité en fonction de la porosité :

$$K = a_1 e^{b_1 \varepsilon} \quad (25)$$

a_1 et b_1 sont des constantes.

Yang et al [126] :

$$\frac{K}{d^2} = \frac{\varepsilon^2 \left(1 - (1 - \varepsilon)^{1/3}\right)^2}{36\beta \left[(1 - \varepsilon)^{1/3} - (1 - \beta\varepsilon)\right]} \quad (26)$$

β est définie comme le rapport entre le périmètre représentatif d'un pore et le périmètre d'un cercle typique de référence.

Dans la suite de ce chapitre et les chapitres qui suivront, nous travaillerons avec le modèle développé par Calmidi et Mahajan [111].

3.3. Méthode de changement d'échelle

Les milieux poreux en général ont une morphologie et une géométrie très complexe. Une description rigoureuse des phénomènes physiques ne peut être obtenue que par le biais de la résolution des équations de continuité de la mécanique des fluides classiques et de conservation de l'énergie à l'échelle microscopique. Les phénomènes de transport et de transfert sont alors décrits par des équations de bilan macroscopique à l'échelle d'un volume élémentaire représentative (VER).

3.3.1. Méthode des volumes moyens

Les phénomènes de transport et de transfert, tels que l'écoulement des fluides et le transfert de chaleur, sont assez difficiles à quantifier dans les milieux poreux en raison de leurs structures poreuses complexes. Les milieux poreux ont des structures irrégulières à l'intérieur et sont donc hétérogènes, mais ils peuvent être homogènes s'ils sont examinés macroscopiquement. La méthode des volumes moyens est largement utilisée dans la littérature par les chercheurs pour modéliser les phénomènes de transport et de transfert dans les milieux poreux à l'échelle macroscopique. Elle permet de démontrer les équations de bilan macroscopique à partir des équations microscopiques. La méthode des volumes moyens traite les milieux poreux comme une structure continue comprenant de nombreux volumes élémentaires représentatifs (VER). Le VER, d'une part, doit être suffisamment grand par rapport à la taille caractéristique des pores pour contenir assez de cellules et de pores permettant de réaliser des moyennes fiables des grandeurs physiques sur la cellule et, d'autre part, il doit être assez petit par rapport au volume de l'échelle macroscopique afin que le milieu puisse être considéré comme continu [127] [128-130]. La valeur moyenne d'une grandeur physique peut varier sur un VER si ce volume n'est pas assez grand par rapport aux tailles des pores.

Par définition, la moyenne volumique $\langle \varphi \rangle_{REV}$ d'une grandeur φ est déterminée par intégration volumique sur tout le domaine comme suit [115,130]:

$$\langle \varphi \rangle_{REV} = \frac{1}{V_{REV}} \int_{V_{REV}} \varphi dV \quad (27)$$

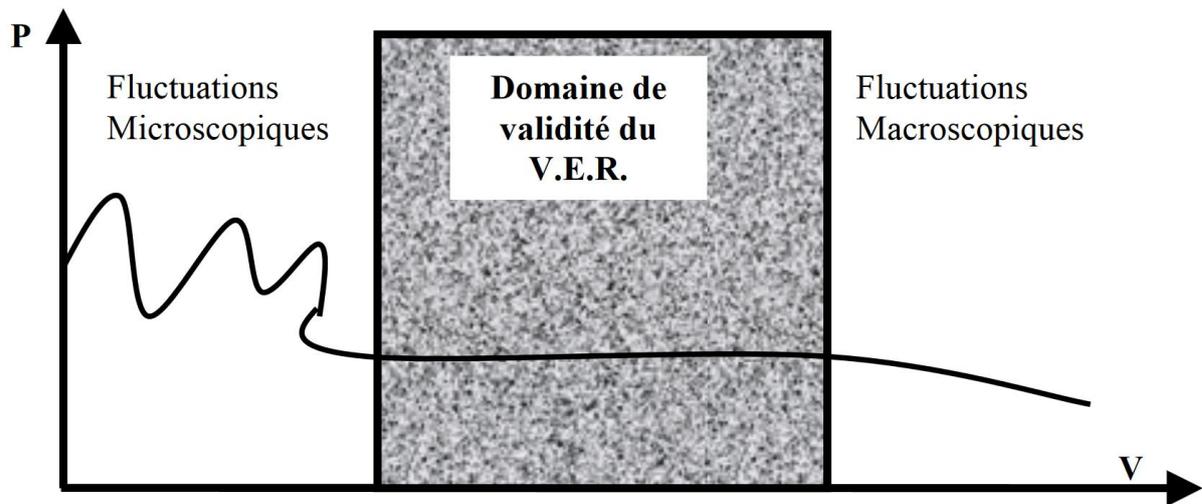


Figure 31: Représentation du VER [131]

3.3.2. Loi de Darcy

La dynamique des fluides homogènes dans les milieux poreux a été décrite pour la première fois par la loi de Darcy, établie en 1856 [132]. C'est une loi empirique établie sur des fondamentaux expérimentaux. Cette loi, établie à partir d'écoulements unidirectionnels sur des colonnes de sables, a mis en évidence la proportionnalité du gradient de pression appliqué et le débit d'eau traversant la colonne de sable. Depuis, les sciences hydrogéologiques sont basées sur la loi de Darcy même pour les écoulements multidirectionnels. Elle s'écrit :

$$\vec{\nabla}P = -\frac{\mu}{K}\vec{V} \quad (28)$$

Où K est la perméabilité, μ la viscosité dynamique du fluide et $\vec{\nabla}P$ le gradient de la pression appliquée. La loi de Darcy ne prend pas en considération l'effet de la nature du fluide ni l'effet inertiel.

3.3.3. Formulation de Brinkman

Le modèle de Darcy ne prend pas en compte l'effet de bords, c'est-à-dire les conditions aux limites en vitesse au niveau de frontières. Cette hypothèse ne peut être considérée comme physiquement réaliste pour les milieux poreux à haute perméabilité où au moins une partie de contrainte visqueuse est limitée dans le domaine des fluides. L'équation de Brinkman, qui explique le passage du flux Darcy au flux libre visqueux, est idéale pour les régimes poreux à haute perméabilité [133]. Pour tenir en compte la force visqueuse exercée par le fluide sur les particules, les ligaments (dans le cas d'une mousse) d'un milieu poreux, Brinkmann a étendu la loi de Darcy en introduisant un terme équivalent au terme de diffusion visqueuse de la loi de Stokes :

$$\bar{\nabla}P = -\frac{\mu}{K}\bar{V} + \frac{\mu_{eff}}{\varepsilon}\bar{\nabla}^2V \quad (29)$$

Cette loi empirique est connue sous le nom de la formulation de Darcy- Brinkman. Le premier terme de droite de l'équation est le terme de Darcy et le deuxième est appelé le terme de Brinkman. Brinkman justifie cette loi empirique par le fait que, pour les faibles valeurs de la perméabilité K , l'équation 29 dégénère en loi de Darcy, équation (29), et lorsque la perméabilité tend vers l'infini, on retrouve l'équation de Stokes. La difficulté dans l'utilisation de ce modèle réside dans l'évaluation de la viscosité équivalente μ_{eff} . Dans ce qui suit, on considère la viscosité du fluide comme viscosité équivalente.

3.3.4. Formulation de Forchheimer

L'équation de Darcy est suffisante pour décrire un écoulement de faible intensité dans un milieu poreux. Lorsque la vitesse de l'écoulement augmente, l'effet inertiel, non linéaire devient important et l'équation de Darcy devient insuffisante pour décrire l'écoulement du fluide. Pour tenir d'effet inertiel Ward [134] propose une extension de l'équation de Darcy et l'équation devient comme ceci :

$$\bar{\nabla}P = -\frac{\mu}{K}\bar{V} + \frac{C_f}{\sqrt{K}}\rho_f|\bar{V}|V \quad (30)$$

Le premier terme du second membre est le terme de Darcy et le second terme est connu sous le nom de terme de Forchheimer, b étant une constante adimensionnelle. L'étude de Ward a montré que pour des vitesses relativement faibles, le terme de Darcy est prédominant, l'équation de Darcy constitue alors une bonne approximation de l'équation de Darcy-Forchheimer. En revanche, pour des vitesses d'écoulement assez élevées, le terme convectif de Forchheimer devient prépondérant [120,121].

3.4. Modélisation de changement de phase solide-liquide d'un MCP - Mousse métallique

Afin de simplifier le calcul, le problème est considéré comme étant bidimensionnel, le MCP en phase liquide est considéré comme un fluide newtonien incompressible avec l'approximation de Boussinesq et en régime laminaire.

3.4.1. Modèle physique

Le modèle physique est représenté par la Figure 32. Il s'agit d'un composite, MM-MCP, de dimensions $L \times H$ et d'une cavité rectangulaire de même dimension dans le cas d'un MCP pur. La mousse choisie est une mousse en aluminium de porosité 0.93 et de densité de pores de 40PPI. Le MCP utilisé dans cette modélisation est la paraffine RT27. Le composite est initialement à une température uniforme T_{ini} . La paroi ouest est maintenue isotherme à une température T_w et les autres parois sont considérées comme adiabatiques.

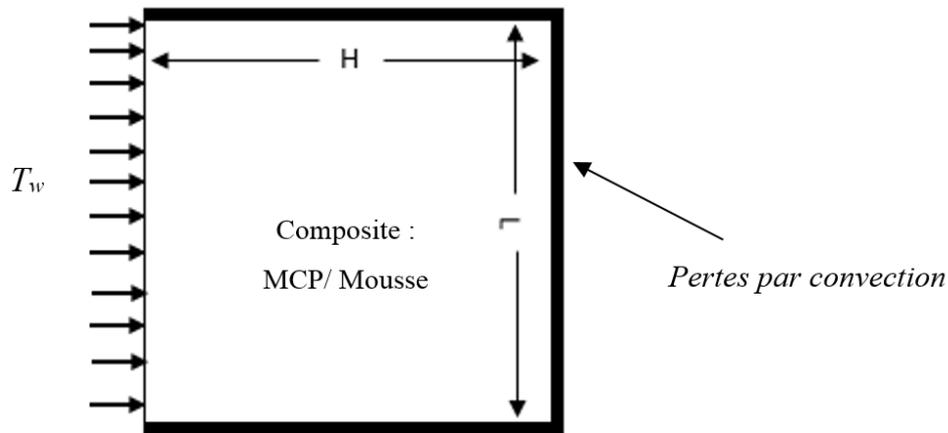


Figure 32: Modèle physique : composite mousse-MCP

3.4.2. Modèle mathématique

La formulation mathématique est basée sur la méthode de volume moyenne [127], et sur l'équation de Darcy [132] avec l'extension de Brinkmann [133] et Forchheimer [134]. Les termes sources figures dans ces équations pour modéliser le changement de phase du MCP [135-138], ceci est bien détaillé dans le chapitre qui traite de la modélisation et l'étude numérique de la fusion et la solidification d'un MCP pur.

3.4.2.1. Équation de la continuité

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (31)$$

3.4.2.2. Équations de conservation de quantité de mouvement

$$\frac{\rho_f}{\varepsilon} \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\rho_f}{\varepsilon^2} (\vec{V} \cdot \nabla) u = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\mu}{\varepsilon} \nabla^2 u - \left(\frac{\mu}{K} + \frac{\rho_f C}{\sqrt{k}} |u| \right) u + S_u \quad (32)$$

$$\frac{\rho_f}{\varepsilon} \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\rho_f}{\varepsilon^2} (\vec{V}\vec{V}) \cdot v = -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\mu}{\varepsilon} \nabla^2 v - \left(\frac{\mu}{K} + \frac{\rho_f C}{\sqrt{k}} |v| \right) v + S_u + \rho_f g \beta (T - T_{ref}) \quad (33)$$

S_u et S_v sont des termes sources, ils sont déduits à partir de la loi de Karman-Cozeny. $S_u = A \frac{(1-b)^2}{B^3 + b} u$, $S_v = A \frac{(1-b)^2}{B^3 + b} v$ C est le coefficient d'inertie [m⁻¹], K perméabilité [m²], μ viscosité dynamique, ε porosité de la mousse métallique, b est la fraction liquide du MCP, β coefficient d'expansion thermique.

3.4.2.3. Équations de conservation de l'énergie

Dans la littérature, des nombreux travaux se sont intéressés à l'étude du transfert de chaleur par convection dans les milieux poreux. Il existe deux modèles différents : le modèle d'équilibre thermique local et le modèle de non-équilibre thermique local. Le premier modèle suppose l'équilibre thermique en tout point de la matrice solide et le fluide, c'est-à-dire l'égalité de température en tout point, ce qui conduit à un seul champ de température. Mais l'hypothèse de l'équilibre thermique local n'est plus valide dans le cas où il y a une grande différence entre les propriétés thermophysiques entre le solide et le fluide [139,140]. Au cours des dernières années, plusieurs travaux ont étudié le non-équilibre thermique local dans un milieu poreux et plusieurs formules ont été développées pour déterminer le coefficient de transfert convectif entre la matrice solide et le fluide [141,142].

La modélisation de l'équation de la conservation d'énergie est faite par l'approche, Non Local Thermal Equilibrium (LNTE) du fait de la grande différence entre les propriétés thermophysiques entre le MCP et la mousse métallique :

Dans le MCP :

$$\varepsilon \rho_p C_p \frac{\partial T_p}{\partial \tau} + \rho_p C_p \left(u \frac{\partial T_p}{\partial x} + v \frac{\partial T_p}{\partial x} \right) = k_{peff} \nabla^2 T_p + h_{pF} a_{pF} (T_F - T_p) \quad (34)$$

Avec $b(T)$ est la fraction liquide de MCP.

Pour tenir compte de la chaleur latente lors de la transition solide-liquide, on introduit la fonction gaussienne suivante :

$$D(T) = e^{\left[\frac{-(T-T_m)^2}{(\Delta T/4)^2} \right] / \sqrt{\pi (\Delta T/4)^2}} \quad (35)$$

Cette fonction vaut zéro partout sauf dans la zone de la transition. Son intégrale vaut 1, ce qui assure la conservation de l'énergie latente lors de la transition [143] [144]. La fonction $b(T)$ et $D(T)$ permet de définir la chaleur spécifique modifiée et la conductivité thermique du MCP:

$$C_{P-P} = C_{P-P_s} + (C_{P-Pl} - C_{P-P_s})b(T) + L_f D(T), \quad k_p(T) = k_{P_s} + (k_{Pl} - k_{P_s})b(T) \quad (36)$$

Dans la mousse métallique :

$$(1-\varepsilon)\rho_F C_{P-F} \frac{\partial T_F}{\partial \tau} = k_{F\text{eff}} \nabla^2 T_F - h_{PF} a_{PF} (T_F - T_P) \quad (37)$$

3.4.2.4. Surface spécifique

La surface spécifique est définie comme étant la surface totale des ligaments en (m²) par unité de volume (m³). Les mousses commerciales ont une surface spécifique comprise entre 100 et 1000 m²/m³ [116]. Plusieurs modèles ont été développés dans la littérature :

$$a_{sf} = \frac{\text{Surface des vides interstitiels}}{\text{Volume total du milieu}} \quad (38)$$

Calmidi et Mahajan [111]:

$$a_{sf} = \frac{3\pi d_f (1 - e^{-(1-\varepsilon)/0.004})}{(0.59d_p)^2} \quad (39)$$

Fourier and Du Plessis [145]:

$$a_{sf} = \frac{3}{d} (3 - \chi)(\chi - 1) \quad (40)$$

3.4.2.5. Modélisation de la conductivité thermique effective

Dans ce chapitre, nous utilisons le modèle Boosma et al [114], corrigé que nous avons développé dans le chapitre 2.

$$R_A = \frac{4\lambda}{(2e^2 + \pi\lambda(1-e))k_s + (4 - 2e^2 - \pi\lambda(1-e))k_f} \quad (41)$$

$$R_B = \frac{(e - 2\lambda)^2}{(e - 2\lambda)e^2 k_s + (2e - 4\lambda - (e - 2\lambda)e^2)k_f} \quad (42)$$

$$R_C = \frac{(\sqrt{2} - 2e)^2}{2\pi\lambda^2(1 - 2\sqrt{2}e)k_s + 2(\sqrt{2} - 2e - \pi\lambda^2(1 - 2\sqrt{2}e))k_f} \quad (43)$$

$$R_D = \frac{2e}{e^2 k_s + (4 - e^2) k_f} \quad (44)$$

$$\lambda = \sqrt{\frac{\sqrt{2}(2 - (5/8)e^3 \sqrt{2} - 2\varepsilon)}{\pi(3 - 4\sqrt{2}e - e)}}, e = 0.341 \quad (45)$$

$$k_{eff} = \frac{1}{\sqrt{2}(R_A + R_B + R_C + R_D)} \quad (46)$$

3.4.3. Coefficient de transfert thermique local

Les ligaments de la mousse métallique ont une forme cylindrique. La valeur de h_{sf} peut être calculée (incertitude $\pm 15\%$) [115], par la formule empirique établie par Zukauskas d'un écoulement à travers un cylindre [146]. Le coefficient d'échange est déduit à partir des relations de Zukauskas.

$$Nu_u = \begin{cases} 0.76 Re^{0.4} Pr^{0.37} \frac{k_p}{d} & 0 < Re \leq 40 \\ 0.52 Re^{0.5} Pr^{0.37} \frac{k_p}{d} & 40 < Re \leq 1000 \\ 0.26 Re^{0.6} Pr^{0.37} \frac{k_p}{d} & 1000 < Re \leq 20000 \end{cases} \quad (47)$$

Dans la littérature on trouve également d'autres modèles de Calmidi et al [111] et de Shih [147]. Dans la suite de ce travail, nous avons choisi les modèles développés par Zukauskas.

Calmidi et al [111] :

$$Nu_{sf} = \frac{h_{sf} d_f}{k_f} = C_T Re_{d_f}^{0.5} Pr^{0.37} = 0.52 \sqrt{\frac{u d_f}{\varepsilon \nu}} Pr^{0.37} \quad (48)$$

Shih et al [147] :

$$Nu_{sf} = \frac{h_{sf} D_p}{k_{se}} = a Re_{D_p}^b = a \left(\frac{\rho u D_p}{\mu} \right)^b \quad (49)$$

3.5. Résultats

Tous les calculs ont été effectués sur un PC de bureau (station de travail) : DELL PRECISION TOWER 7910. Ses caractéristiques : Deux processeurs (Intel® Xeon® CPU E5-2640 v4 @ 2.40 GHz), 32 Go de RAM, Windows 7 64 bits. Le temps de calcul est d'un à plusieurs jours. Les modèles mathématiques sont implantés dans COMSOL Multiphysics. COMSOL Multiphysics est un logiciel de simulation numérique multiphysique puissant basé sur les méthodes des éléments finis (FEM), une présentation détaillée du logiciel est dans l'annexe III.

3.5.1. Convergence des calculs

Pour assurer une bonne convergence des calculs, plusieurs critères interviennent. La taille des mailles doit être adoptée selon les physiques étudiés. Des tailles des mailles grandes peuvent conduire à faire diverger le calcul ou d'avoir des résultats erronés. En général, des maillages bien raffinés conduisent à des résultats précis. Mais, des mailles trop fines peuvent conduire -aussi- à la divergence de calcul. En effet, dans le cas d'une méthode directe si la variation de la variable (par exemple : température, vitesse,...) est trop faible d'un nœud à l'autre, la résolution qui fait survenir l'inversion de matrice n'aboutira pas à la convergence. En plus du choix d'un maillage adopté et rigoureux, le choix de pas de temps est important pour la convergence et la facilité de calcul. Comme dans le cas de maillage, le pas de temps doit être adopté aux physiques étudiées (fort gradient, changement rapide,...) pour pouvoir résoudre la physique d'un temps à un autre. Cependant, un pas de temps trop petit alourdit très fortement le calcul et sature la mémoire.

Dans ce travail, le pas de temps maximal est fixé à 1 seconde. La gestion du pas de temps est faite par différenciation rétrograde d'ordre deux (BDF) avec des pas strict. Un solveur direct est utilisé, basé sur PARDISO (Parallel Direct Sparse Solver Interface) [148], couplé à une méthode de Newton constant pour la méthode de calcul non linéaire avec un facteur d'amortissement de 0.4, un nombre d'itérations maximal de 200 et la mise à jour de la Jacobien à chaque itération. Ce choix est justifié par nos équations EDP fortement non-linéaires. Le paragraphe suivant présente une étude de sensibilité aux maillages afin de choisir un maillage rigoureux.

3.5.2. Étude de sensibilité aux maillages

La première source des erreurs dans un modèle numérique (méthode des éléments finis, méthode des volumes finis,...) et la taille des maillages. Le maillage Éléments Finis pour la résolution utilisé dans le cadre de cette étude est présenté sur la Figure 33. Pour étudier l'effet du maillage sur le modèle numérique développé dans le cadre de cette thèse, une étude de sensibilité au maillage a été effectuée. L'impact de la taille du maillage sur l'évolution de la fraction liquide de la paraffine a été étudié pour quatre maillages de taille différents. La Figure 34 présente l'évolution de la fraction liquide pour les quatre maillages. Les résultats ont montré que pour la différente taille de maillage nous avons la même évolution de la fraction liquide avec un écart maximal d'environ 2%. Il est évident que pour un maillage plus raffiné, nous avons une

précision meilleure. Nous pouvons voir que le maillage choisi n'a pas une grande influence sur l'évolution temporelle de la fraction liquide. On peut donc déduire la stabilité de notre modèle numérique. Dans la suite de notre étude, nous travaillerons avec un maillage de 16140 Éléments.

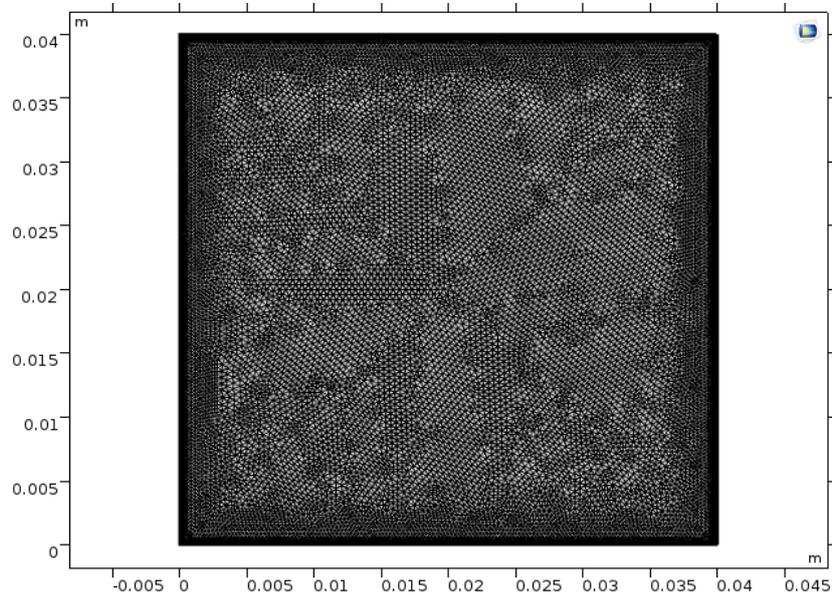


Figure 33: Maillage EF

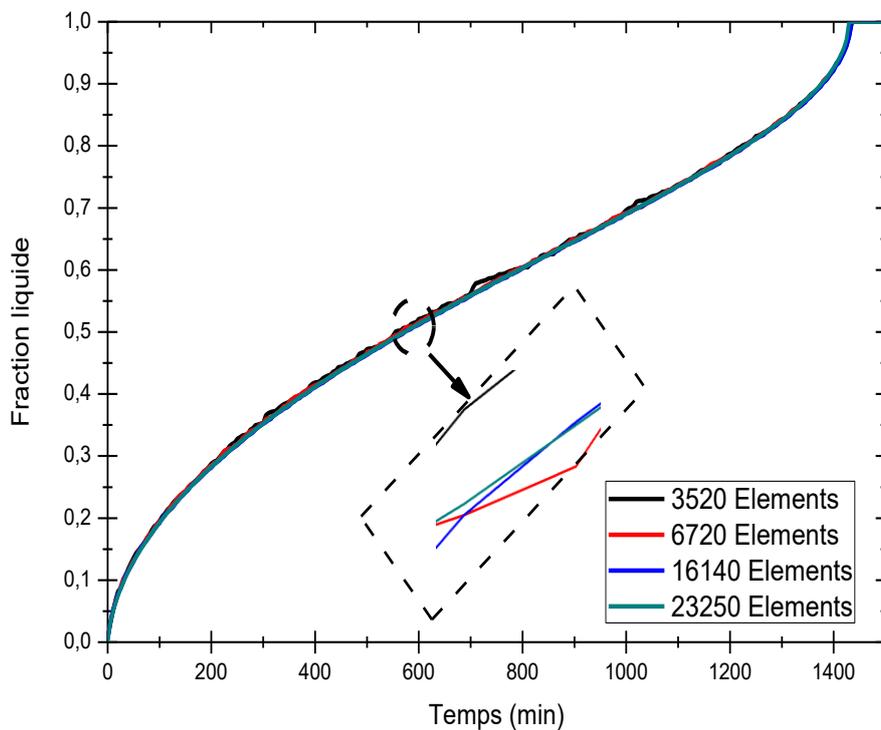


Figure 34: Etude de sensibilité au maillage

3.5.3. Dispositif expérimental

Le dispositif expérimental est destiné à étudier la fusion et la solidification de la paraffine imprégnée dans une mousse métallique. Il est constitué d'un bac en plexiglas qui sert à loger l'ensemble mousse remplie avec de la paraffine, un fluxmètre thermique qui a deux rôles : il permet de mesurer le flux de chaleur réel fournie par la résistance chauffante et à réguler la température ou la densité de flux thermique imposée comme une condition limite, une résistance électrique de puissance 50 Ohm fournie par la société Captec, un générateur de courant DC et une caméra CCD. Grâce à l'élément chauffant, on peut réaliser des cycles de charge de chaleur tout en observant le front de fusion/solidification. Le schéma descriptif du dispositif est présenté sur la Figure 35. La Figure 36 présente une photo du dispositif expérimental.

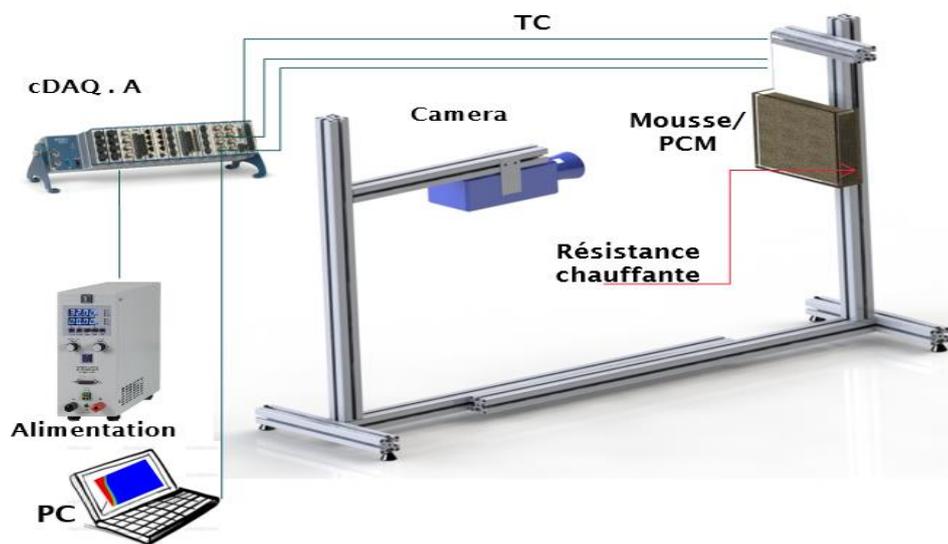


Figure 35: Schématisation du dispositif expérimental

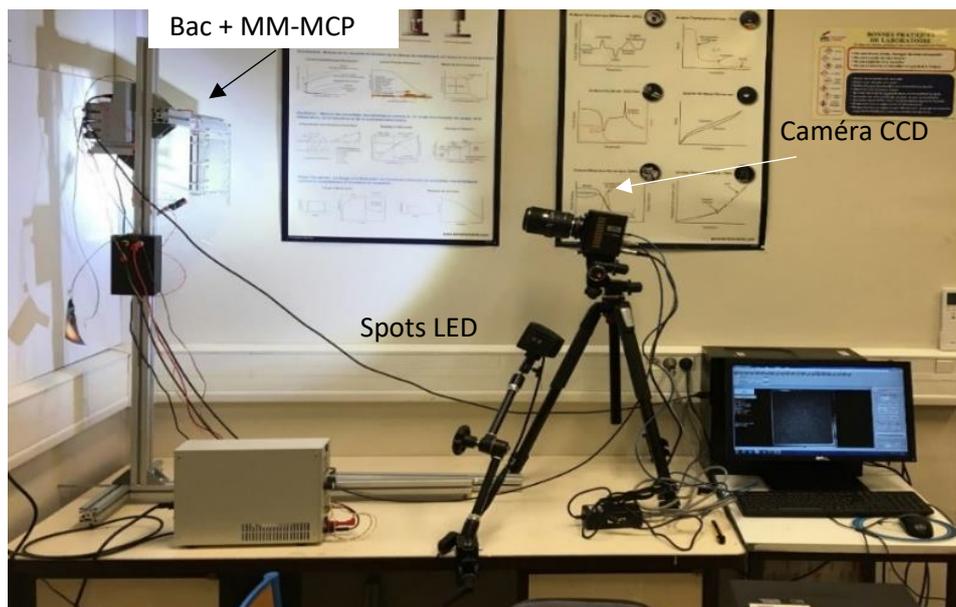


Figure 36 : Photo du dispositif expérimental

Le bac est en plexiglas et ses dimensions sont 150mm*162mm*10mm. Le plexiglas a une faible conductivité thermique comparable à celle des MCP purs. Le procédé expérimental consiste à imposer un flux (constant ou sinusoïdal) ou une température fixe supérieure à la température de fusion de la paraffine étudiée grâce à une résistance électrique chauffante de 50 Ohm. La résistance chauffante est insérée dans le bac, côté gauche. Un fluxmètre est placé sur la face de la résistance pour mesurer le flux thermique émis par la résistance. Les données sont recueillies toutes les 5 secondes par une centrale d'acquisition Keithley 2700 de National Instruments et sont traitées à l'aide d'un programme développé sous le logiciel LabVIEW. La propagation du front de fusion est suivie par une caméra rapide CCD, Photron mini wax 50. Le pilotage de la caméra et des instruments de mesure est assuré par LabVIEW. La Figure 38 présente l'interface du programme LabVIEW développée pour piloter l'ensemble des instruments utilisés dans le cadre de cette étude.

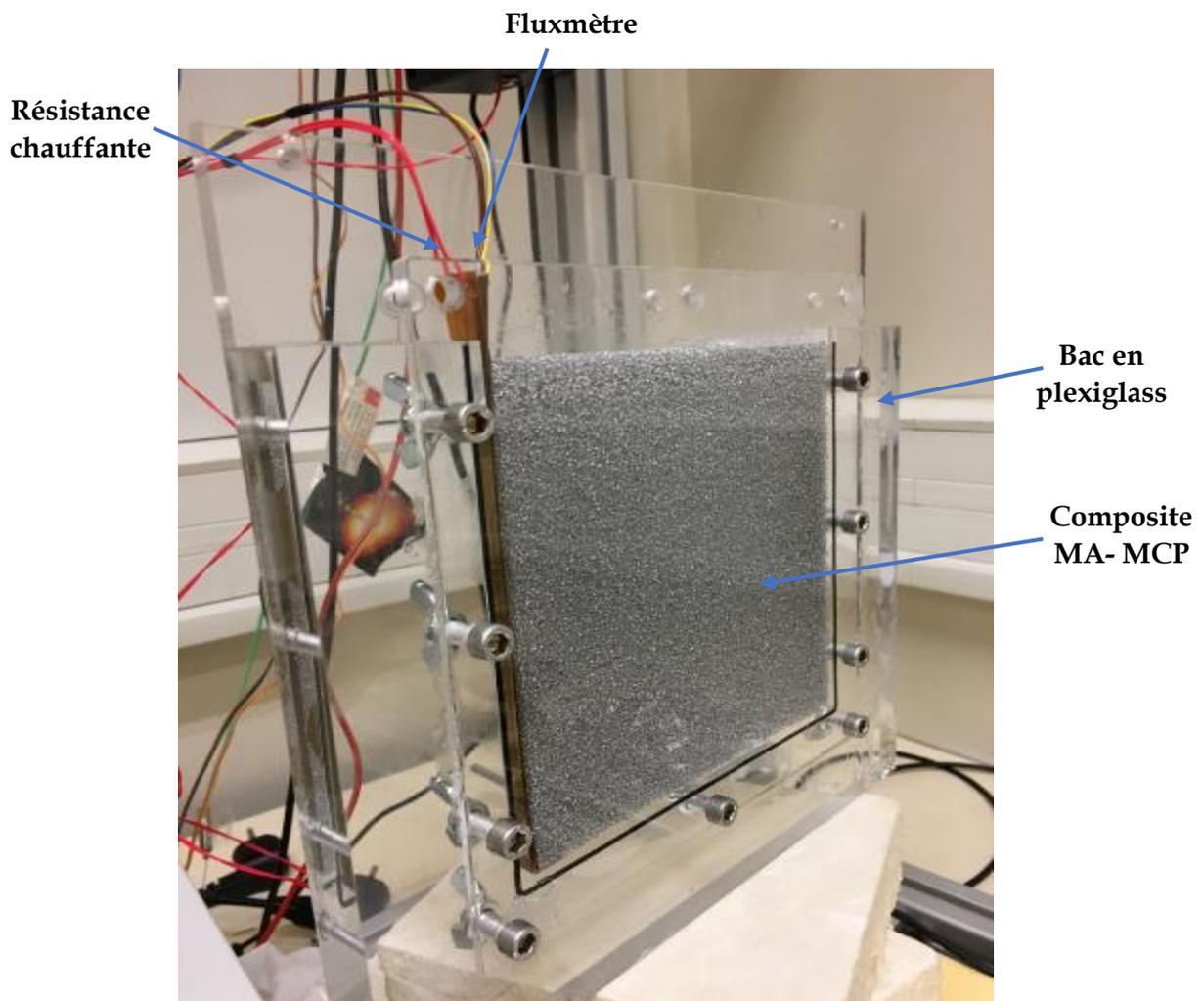


Figure 37: Composite mousse/ paraffine inséré dans le bac

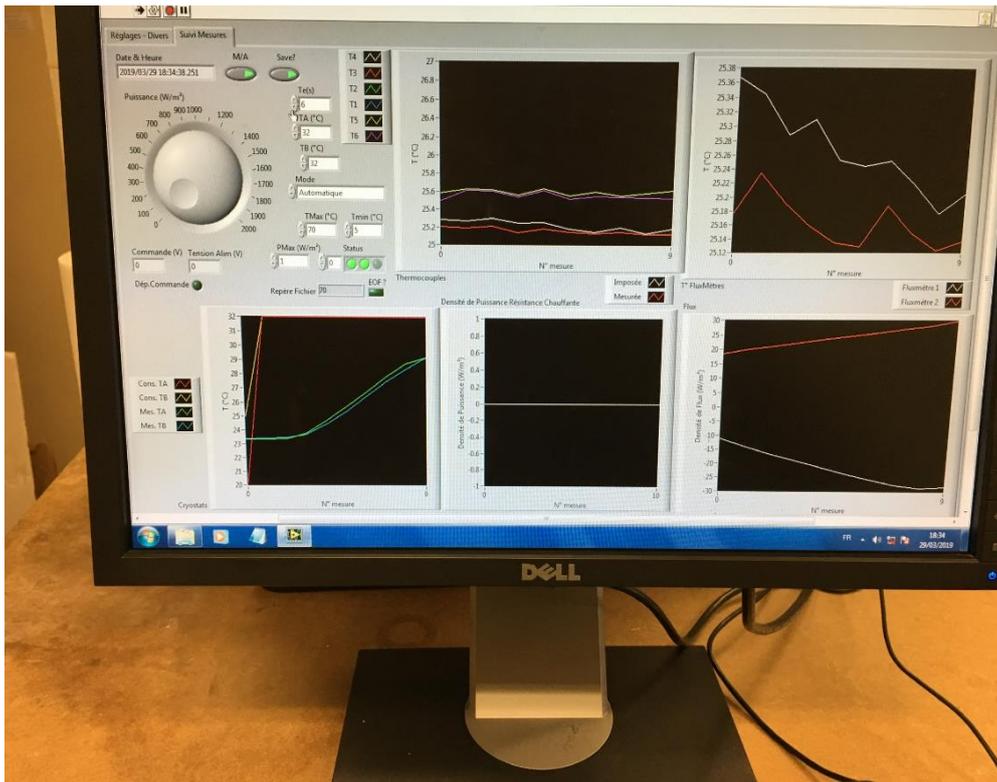


Figure 38: Interface LABVIEW développée dans le cadre de cette étude

3.5.4. Comparaison des résultats numériques/ expérimentaux et validation du modèle numérique

Le modèle numérique développé a été validé par comparaison avec des résultats expérimentaux. Nous comparerons l'évolution temporelle de la fraction liquide et de la température.

3.5.4.1. Comparaison de l'évolution de la fraction liquide

La Figure 40 présente une comparaison de l'évolution de la fraction liquide expérimentale et numérique pour un composite Mousse de Nickel/ RT27, pour une durée d'environ 7 heures. Il s'agit d'une mousse de nickel de dimension 150*150*10mm, de porosité 0.95 et un diamètre de pores de 2,3mm remplie avec de la paraffine RT27. Le composite est initialement en équilibre thermique à la température 21°C qui est la température ambiante. À l'instant $t>0$, une température $T_w=31°C$ est imposée à la paroi ouest. Le coefficient de pertes par convection au niveau des autres parois est estimé à $3W.m^{-2}K^{-1}$. La fraction liquide de la paraffine a été calculée grâce à un programme Matlab. Le procédé de calcul de la fraction liquide expérimentale consiste à convertir les images prises par la caméra CCD à des images binaires. Ensuite, la fraction liquide est déduite à partir de calcul des pixels blancs et des pixels noirs. La conversion est faite en deux étapes. La Figure 41 présente les étapes de la conversion des photos en des images binaires : photo de la caméra CCD, première étape et deuxième étape. On constate qu'il y a un bon accord entre les résultats expérimentaux

et numériques ce qui nous permet de valider notre modèle numérique. L'écart est expliqué par l'effet des pertes par convection.

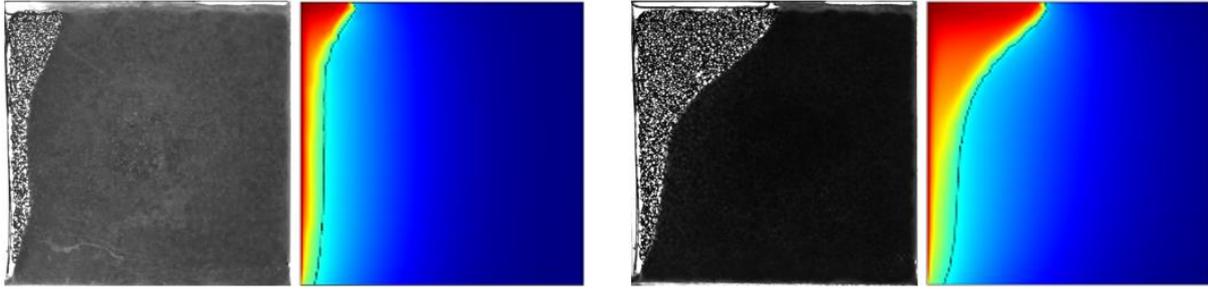


Figure 39: Comparaison des résultats numériques et expérimentaux (front de fusion)

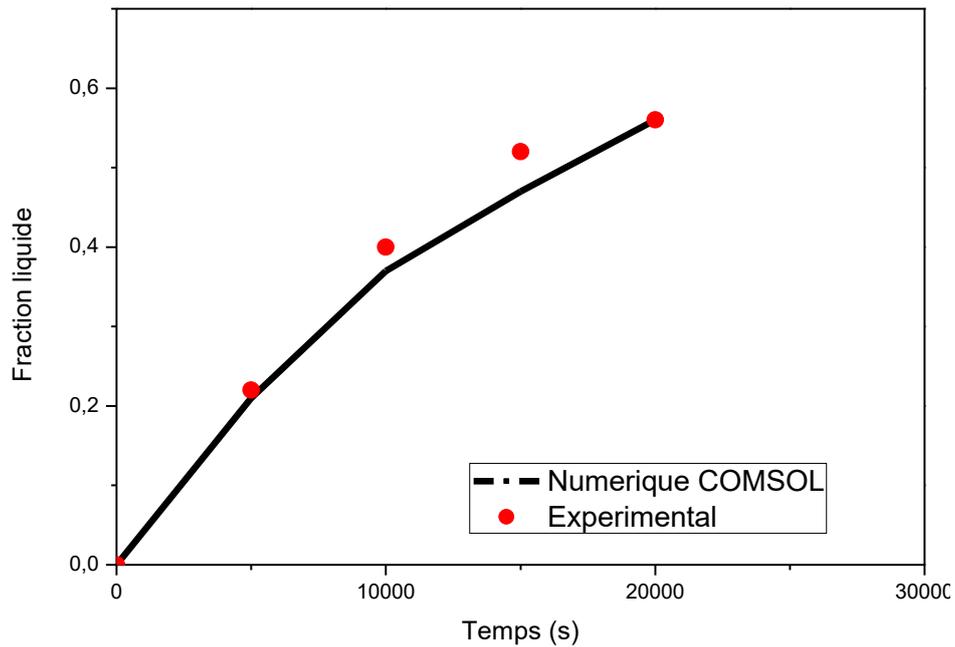


Figure 40: Comparaison de l'évolution de la fraction liquide

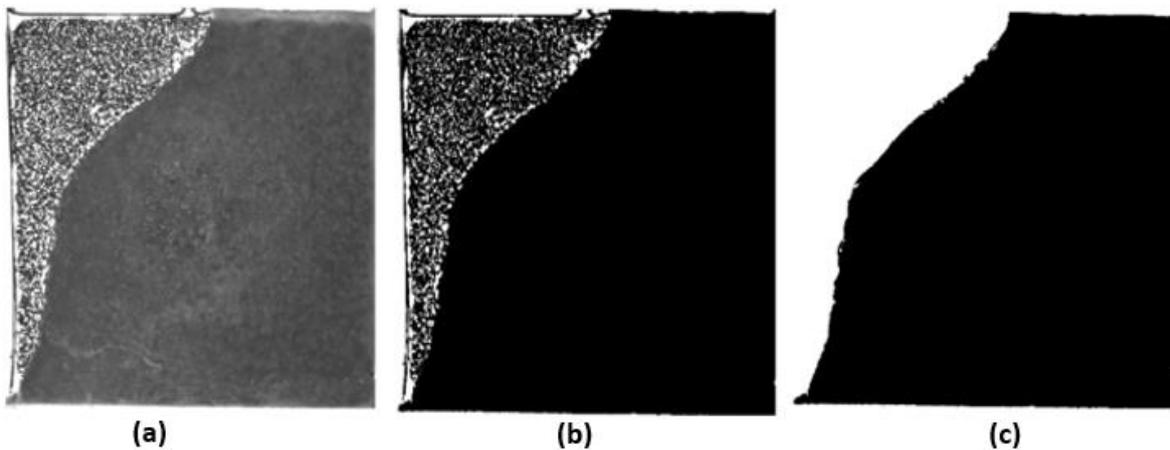


Figure 41: Conversion des images binaires, (a) : photo, (b) : première conversion et (c) deuxième conversion

3.5.4.2. Comparaison de l'évolution de la température

Une étude comparative avec les résultats expérimentaux et numériques de C. Y. Zhao et al. [44], et Y. Zhao's [149] a été effectuée. Dans ces travaux on s'est intéressé à la fusion de la paraffine RT58 dans une mousse de cuivre de dimensions (200 mm, 120 mm, 25 mm), de densité de pores 10 PPI et de porosité 0.95. Le modèle étudié est représenté par la Figure 42. La Figure 43 illustre l'évolution de la température moyenne $T(x, y = 8 \text{ mm})$ obtenu par Y. Zhao et al. [44], et Y. Zhao's et notre modèle mathématique. Les deux modèles numériques, comme les mesures expérimentales, présentent un palier qui caractérise la fusion de RT58. L'écart de la température maximale entre notre modèle et les mesures expérimentales est de l'ordre de 1°C . De plus durant la fusion de la paraffine, entre $t = 1200\text{s}$ et environ $t = 4100\text{s}$, on constate un bon accord entre les résultats de notre modèle et les résultats expérimentaux de Y. Zhao. Après la fusion, notre modèle numérique et celui de Y. Zhao et al. [44] surestiment, respectivement, la température $T(x, y = 8 \text{ mm})$, avec un écart de la température maximale entre notre modèle et les résultats expérimentaux de l'ordre de 1°C . Cet écart peut s'expliquer par une surestimation du coefficient de perte convective, mais aussi par les modèles semi-empiriques utilisés pour estimer la perméabilité, le coefficient d'inertie et les autres propriétés. Dans l'ensemble, on constate un bon agrément entre les valeurs mesurées et celles issues des calculs numériques. Cela valide l'approche théorique proposée pour étudier le comportement thermique des composites MM- MCP.

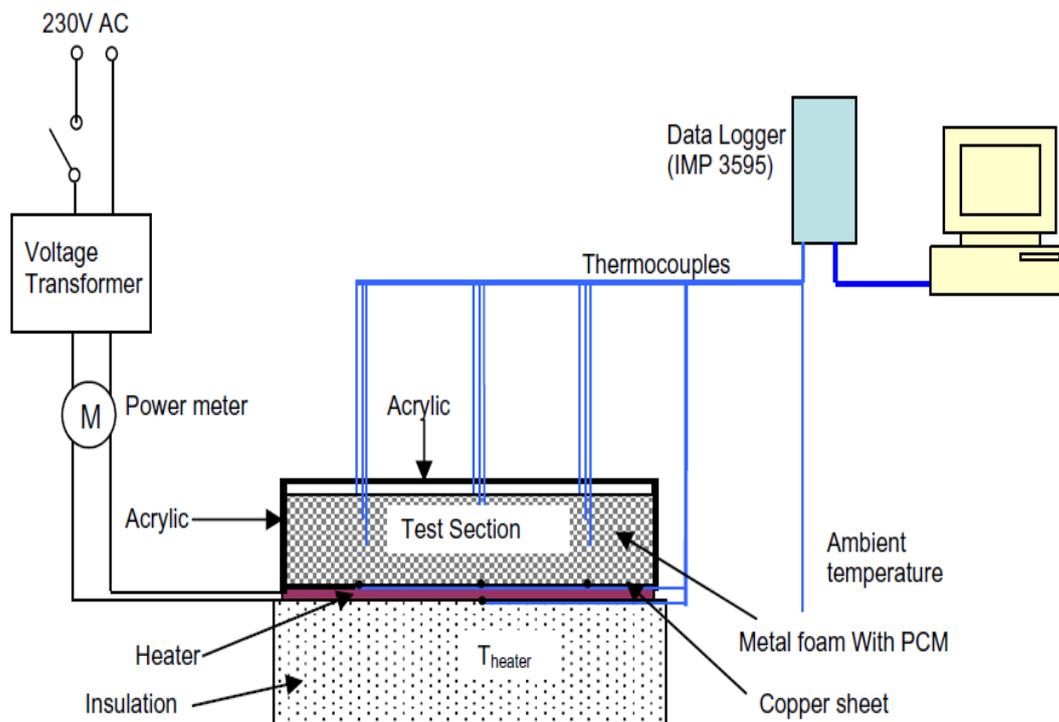


Figure 42: Schéma du dispositif expérimental de Y. Zhao et al [44].

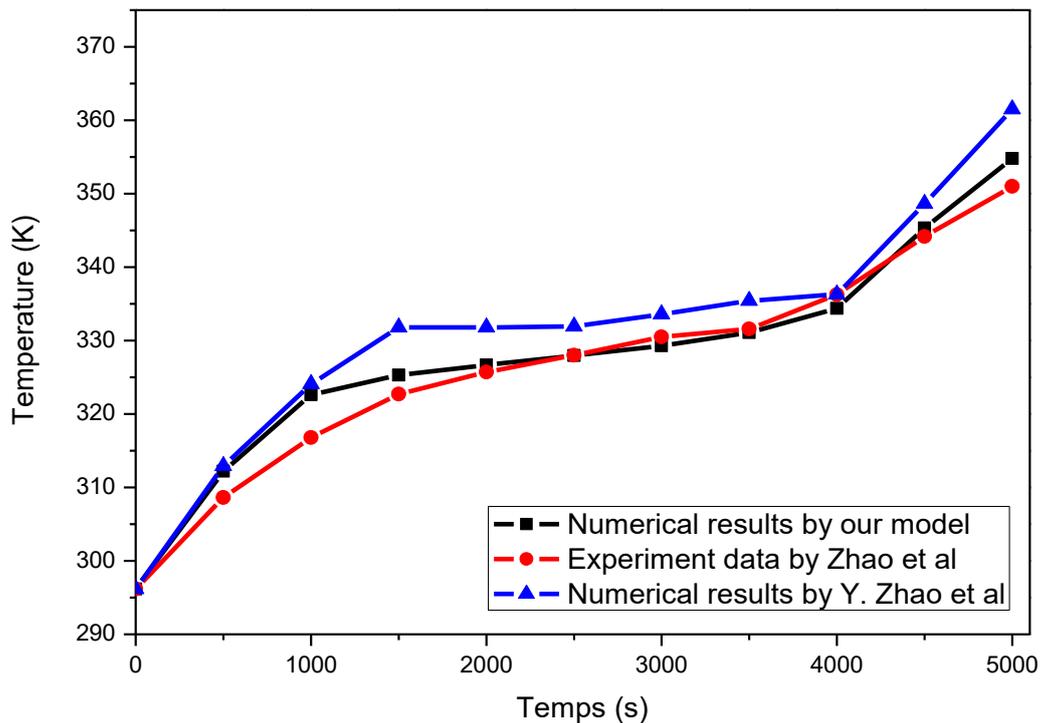


Figure 43: Comparaison de l'évolution temporelle de la température

La comparaison des résultats numériques avec les résultats expérimentaux nous a permis de valider notre modèle numérique.

3.5.5. Etude paramétrique et mécanismes de transferts thermiques

Dans cette section, nous nous intéressons à l'étude des mécanismes de transfert thermique et la forme du front de fusion d'un MCP pur et d'un MCP incorporé dans une mousse métallique. Ceci a été beaucoup étudié dans la littérature, nous le présentons d'une façon très succincte. Le modèle physique est représenté par la Figure 32. Il s'agit d'un composite, MM- MCP, de dimensions $L \times H$ et d'une cavité rectangulaire de même dimension dans le cas d'un MCP pur. La mousse choisie est une mousse en aluminium de porosité 0.93 et de densité de pores de 40PPI, le MCP est la paraffine RT27. Le composite est initialement à une température uniforme $299.15K$ ($26^\circ C$). La paroi ouest est maintenue isotherme à une température $T_w = 30^\circ C$ et les autres parois sont considérées comme adiabatiques (Figure 32). La paraffine pure est initialement aux mêmes conditions thermiques que le composite mousse d'aluminium/ RT27. Nous présentons les résultats de la fusion de la paraffine RT27 dans les mêmes conditions que le composite RT27- Mousse d'aluminium avec $T_w = 30^\circ C$. La Figure 44 présente le champ de température, de vitesse et le champ de phase de la paraffine RT27 durant la fusion. La zone rouge indique la phase liquide et la zone bleue indique la phase solide. Les vecteurs noirs représentent le champ des vitesses. Nous observons qu'après environ 30 minutes, l'interface solide-liquide est –

presque- parallèle à la paroi chaude, ce qui indique que la conduction thermique est le mécanisme de transfert de chaleur domine. Après 3 heures, nous observons la modification de la forme de l'interface solide-liquide. Le liquide près de la paroi chaude (source de chaleur) est chauffé et remonte sous l'effet des forces de flottabilités. En effet, lors de la solidification/fusion, certains éléments du MCP migrent de la partie liquide vers la partie solide et inversement. Par conséquent, la convection naturelle sera générée grâce à la circulation du MCP liquide causée par la différence de masse volumique. Les vecteurs de vitesse montrent clairement la circulation du MCP liquide. La forme courbe de l'interface solide-liquide est due aux phénomènes de convection naturelle. Ces résultats sont en très bon accord avec la littérature [150–154].

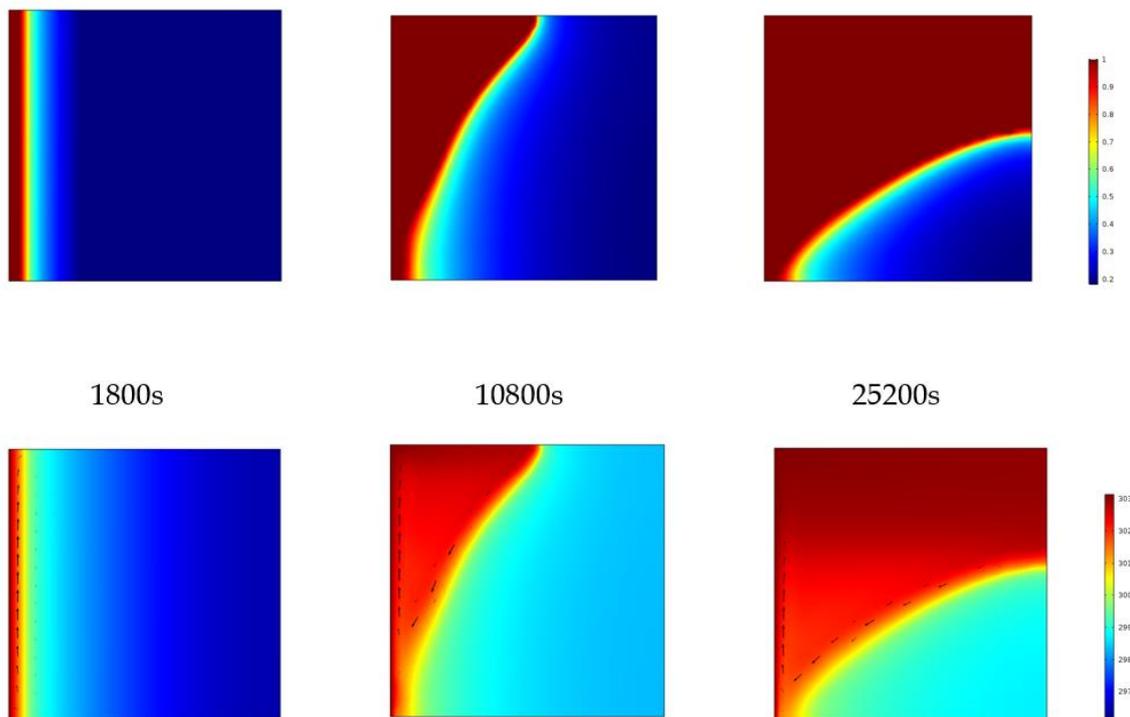


Figure 44: Champs de température, de phase et de vitesse durant la fusion de RT27

La Figure 45 présente l'évolution du champ de température, de vitesse et de phase d'un composite paraffine RT27- Mousse d'aluminium durant la fusion. Le champ de phase et de température montre que la conduction thermique est le principal mécanisme de transfert de chaleur pendant la fusion. En effet, une densité des pores élevée (40PPI) réduit la perméabilité et supprime la convection naturelle. Pour mettre en évidence la dominance de la conduction thermique lors de changement de phase solide-liquide d'un MCP dans une mousse métallique, trois nombres de Rayleigh ont été investigués. La Figure 46 présente l'évolution de la fraction liquide de la paraffine RT27 durant le processus de fusion pour les trois nombres de Rayleigh. On constate que le nombre de Rayleigh a un faible effet sur la cinétique de changement de phase solide-liquide. Ces résultats sont en accord avec les résultats trouvés par [44,155–157].

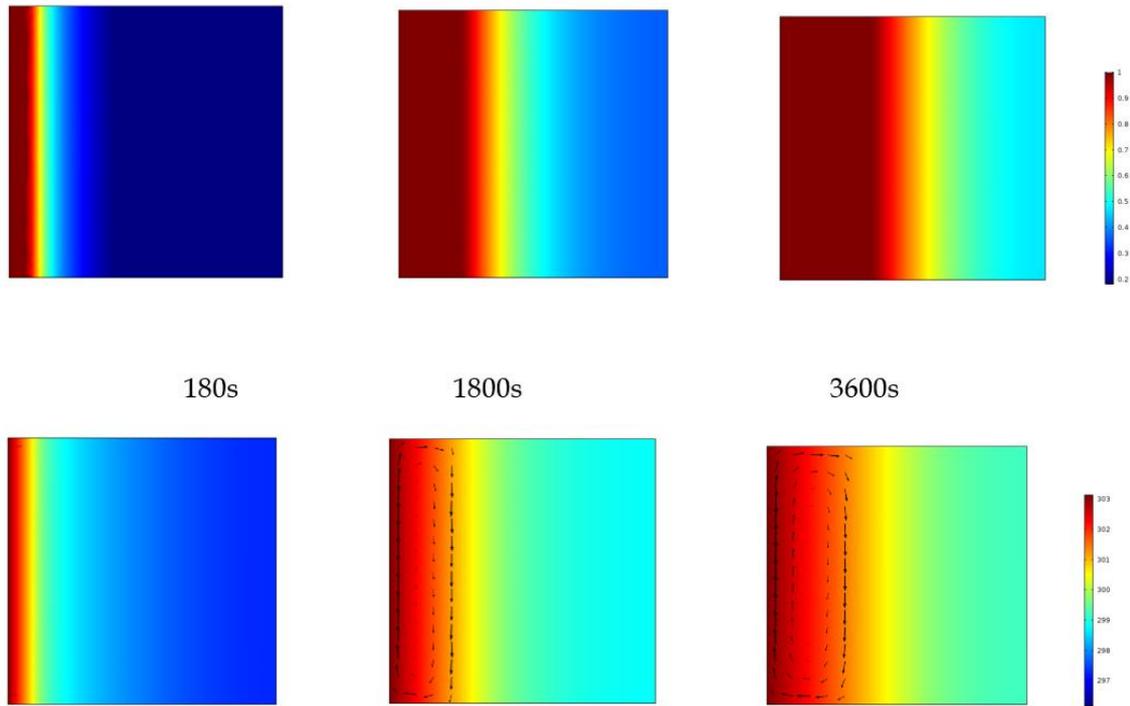


Figure 45: Champs de température, de phase et de vitesse durant la fusion de RT27- Mousse d'Aluminium

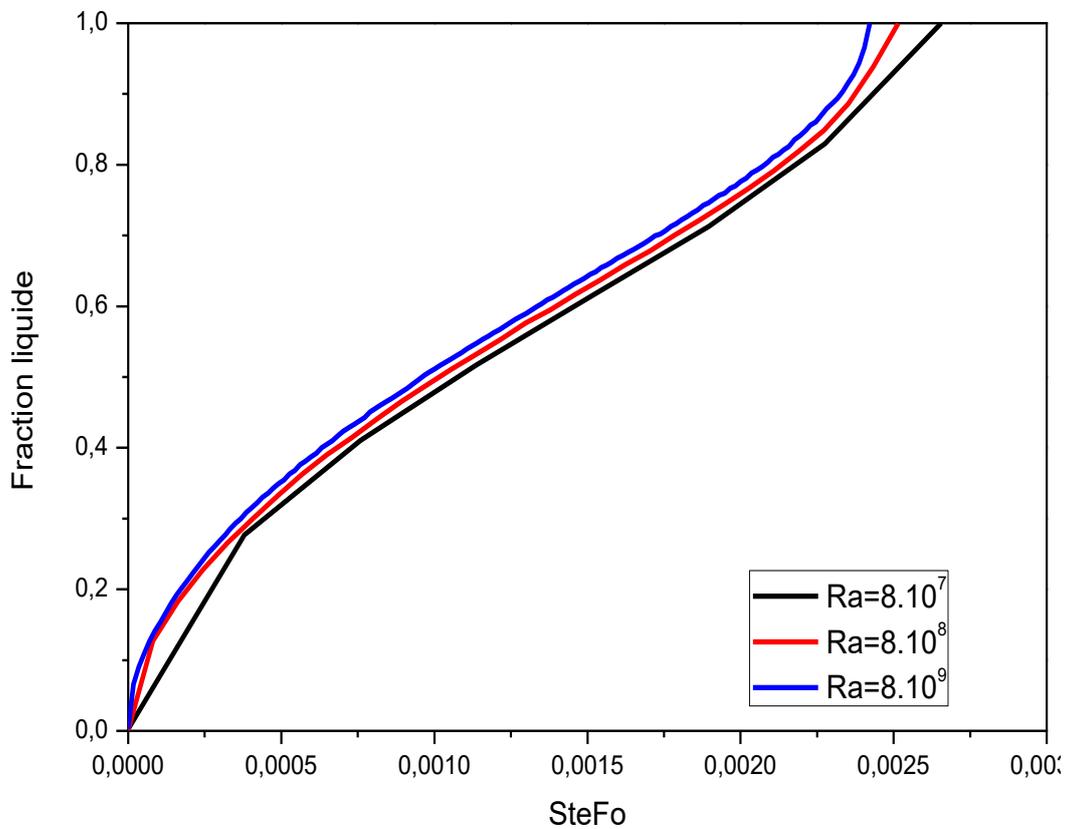


Figure 46: Impact du nombre de Rayleigh sur la fusion du MCP

3.5.6. Effet de la morphologie de la mousse sur le changement de phase

Dans l'objectif de faciliter l'interprétation de nos résultats, nous avons introduit les nombres adimensionnels suivants :

$$Ste = \frac{C_{pp} |T_w - T_b|}{L_f}, \quad Fo = \frac{\alpha_p t}{H^2}, \quad Ra = \frac{g \beta |T_w - T_b| H^3}{\alpha_p \nu}, \quad \tau = Ste Fo \quad (50)$$

3.5.6.1. Effet de la porosité sur le changement de phase

Afin d'étudier l'effet de la porosité, la mousse d'aluminium imprégnée de RT27 avec une densité de pores de 40 PPI (Pores Per Inch) a été étudiée. Les figures 47 et 48 présentent l'évolution de la fraction liquide du MCP pour différentes porosités (0.80, 0.84, 0.87 et 0.93) et en fonction du temps SteFo. On constate que lorsque la porosité diminue, le MCP fond plus rapidement (Figure 47) et la cinétique de stockage diminue avec l'augmentation de la densité des pores. Il s'avère que pour la porosité 0.80 le temps de fusion est plus court que celui de la fusion pour le composite avec une porosité de 0.93. Ceci démontre qu'une faible porosité favorise le transfert de chaleur et augmente la cinétique de stockage/déstockage d'énergie thermique. En effet, une faible porosité donne une fraction volumique métallique plus élevée et une fraction volumique de la paraffine avec une conductivité thermique plus élevée. Une faible porosité intensifie le transfert thermique, mais diminue la densité énergétique du composite MM- MCP.

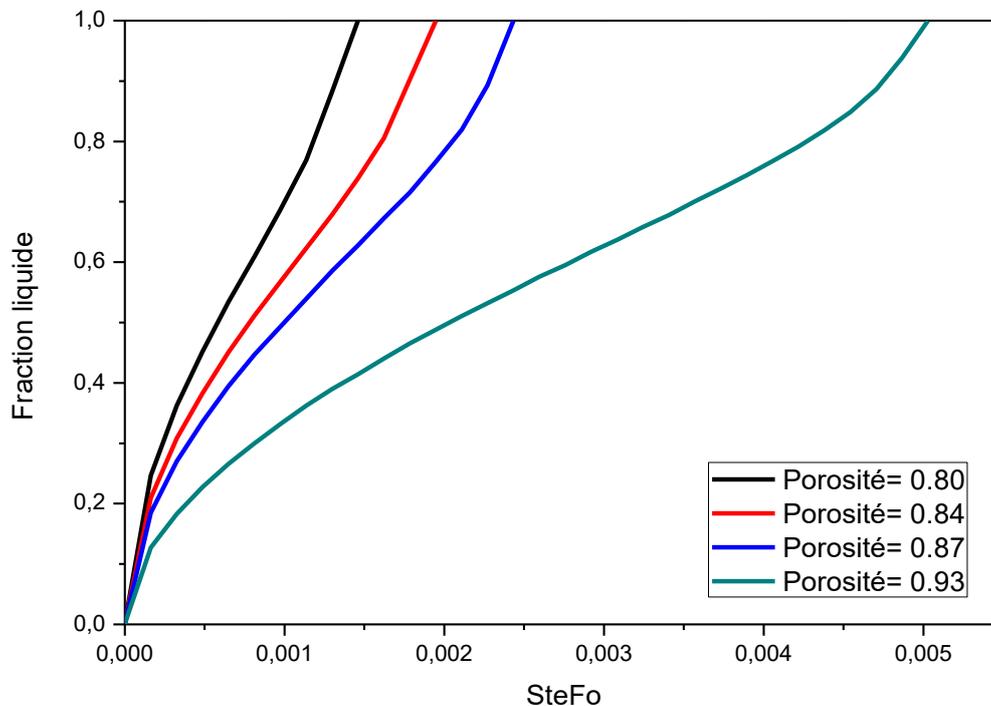


Figure 47: Effet de la porosité sur la fusion

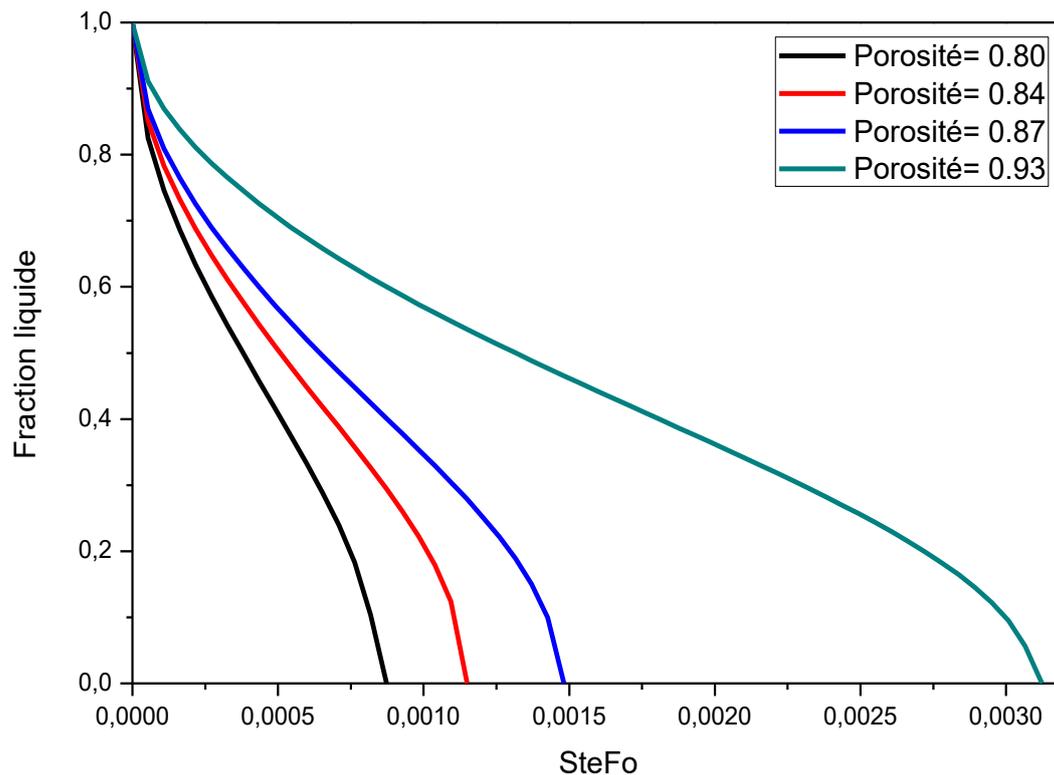


Figure 48: Effet de la porosité sur la solidification

3.5.6.2. Effet de la densité des pores sur le changement de phase

Pour étudier l'effet de la densité des pores, nous avons considéré une mousse avec une porosité de 0.93. Quatre densités de pores ont été choisies : 5 PPI (Pores per inch), 10 PPI, 20 PPI et 40 PPI. La Figure 49 présente l'évolution temporelle de la fraction liquide du MCP en fonction de la densité de pores. On constate que la fusion du MCP augmente avec la densité des pores. En effet une grande densité des pores signifie une surface de contact élevée, ce qui conduit à un meilleur échange d'énergie entre le MCP et la mousse métallique. Nous constatons le même comportement lors de la solidification, Figure 50.

3.5.7. Effet du type de la mousse sur la cinétique de changement de phase

En vue d'étudier l'effet de la conductivité thermique des mousses métalliques sur la cinétique de fusion du MCP, nous avons considéré trois types de mousses de même porosité (0.93) et densité de pores (40 PPI), Figure 51. Le travail entrepris consiste à étudier l'évolution de la fraction liquide en fonction du temps. D'après les résultats obtenus, la conductivité thermique des mousses influence fortement le mécanisme du transfert de chaleur durant la fusion et la solidification de MCP. On constate que la cinétique de fusion est plus rapide pour le composite cuivre/MCP que pour le composite Nickel/MCP. On voit bien qu'après environ 1890 secondes, la totalité de MCP contenu dans la mousse de cuivre est fondue, contre seulement 60% dans la

mousse aluminium et de 37% dans la mousse de nickel. D'après ses résultats, on peut conclure que la cinétique de stockage/déstockage est fortement dépendante de la conductivité thermique de la matrice.

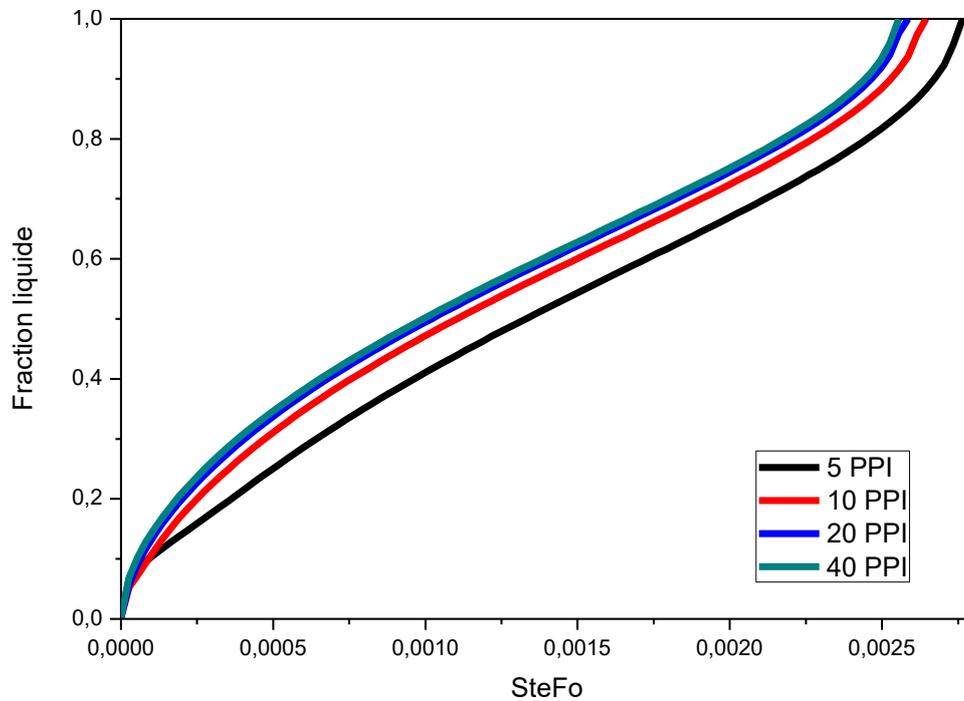


Figure 49: Effet de la densité des pores sur le temps de fusion

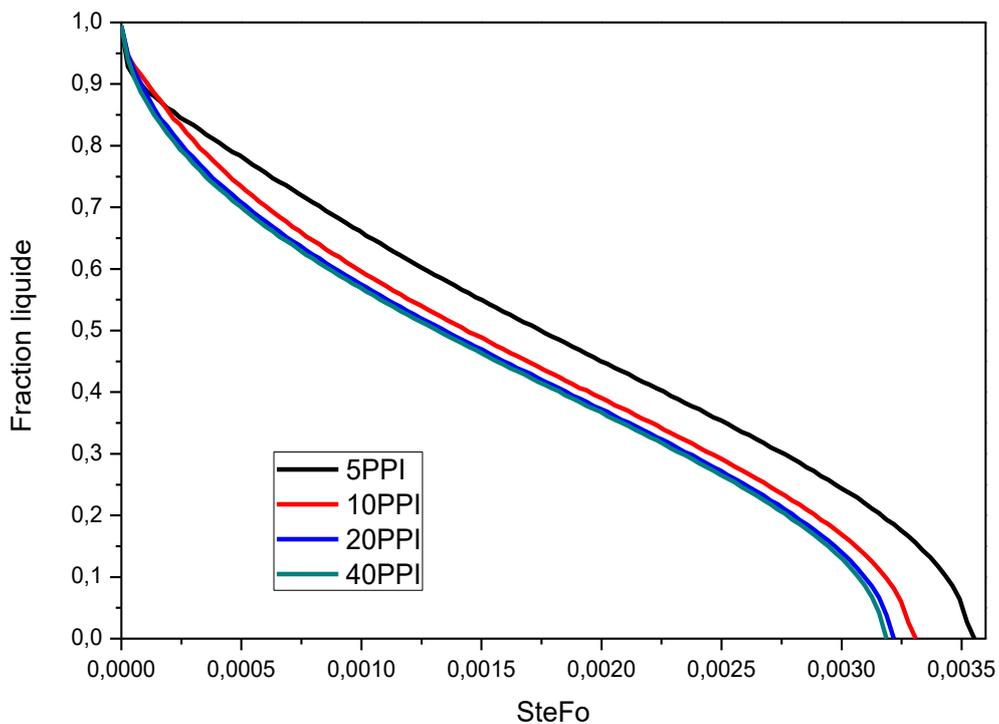


Figure 50: Effet de la densité des pores sur le temps de solidification

Propriétés	Aluminium	Nickel	Cuivre
Masse volumique ($kg.m^{-3}$)	2700	8890	8960
Chaleur spécifique ($J.K^{-1}.kg^{-1}$)	900	456	385
Conductivité thermique ($W.K^{-1}.m^{-1}$)	220	70	401

Tableau 19: Propriétés thermophysiques des mousses métalliques

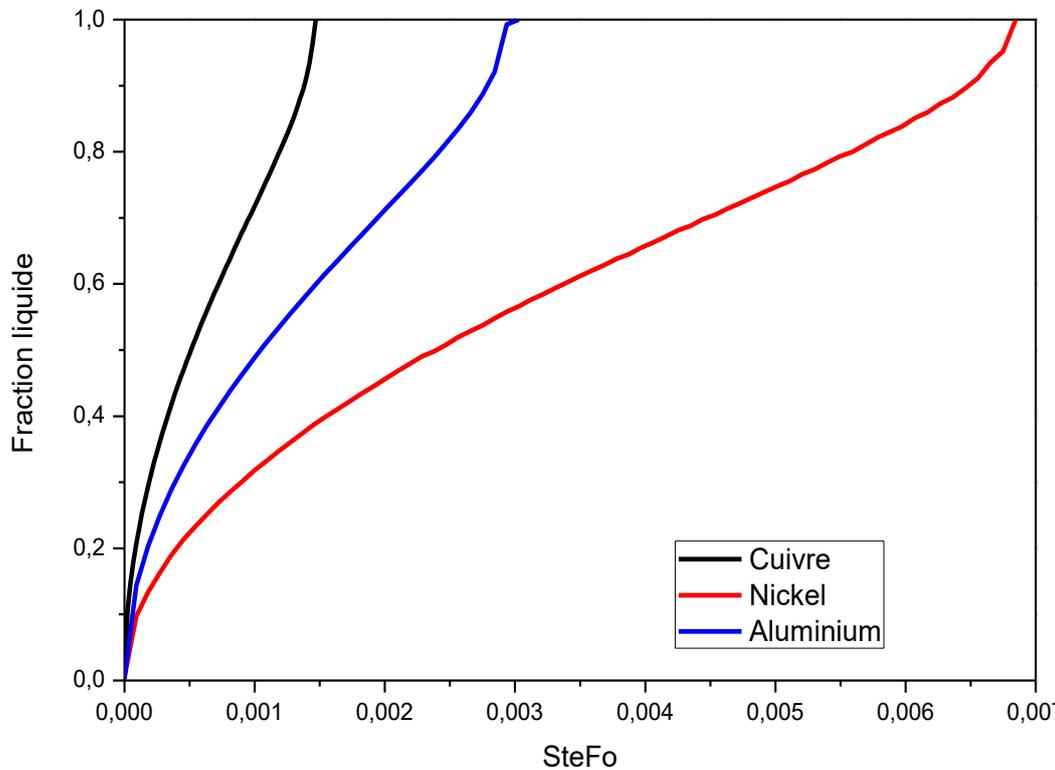


Figure 51: Effet de la conductivité thermique des mousses sur la fusion du MCP

3.5.8. Effet des conditions aux limites sur la cinétique de changement de phase

L'un des défis consiste à trouver les propriétés thermophysiques, structurelles de la mousse métallique et les conditions de chauffage et de refroidissement optimales permettant une utilisation efficace de ces composites pour stocker l'énergie thermique. Dans la littérature, de nombreux travaux de recherche numériques et expérimentaux se sont intéressés à l'étude de l'effet de la conductivité thermique et de la microstructure de la mousse métallique sur la conductivité thermique effective des composites PCM/mousse métallique et la cinétique de changement de phase. Cependant, les études sur l'effet des conditions de chauffage et de refroidissement, en particulier dans un processus continu (chauffage et refroidissement cycliques), font défaut.

Dans cette partie, nous nous intéressons de l'influence des conditions de chauffage/refroidissement sur la cinétique de changement de phase d'un MCP incorporé dans

une mousse métallique. Les composites MCP sont généralement utilisés pour le stockage de l'énergie solaire qui a un comportement sinusoïdal et pour la gestion thermique des composants électroniques qui dissipent la chaleur avec un flux constant [158]. L'objectif de la présente étude est de comparer la cinétique de fusion et solidification de la paraffine RT27 incorporée dans une mousse d'aluminium pour un chauffage/ refroidissement sinusoïdal et constant.

Afin d'étudier l'effet des conditions aux limites (chauffage et de refroidissement) sur la cinétique du changement de phase, une étude cyclique de chauffage et de refroidissement a été réalisée. Dans cette section, nous présentons une étude sur le chauffage et le refroidissement cycliques des composites MM- MCP utilisé comme unité de stockage d'énergie.

Le composite sélectionné pour cette étude est un composite paraffine RT27/ Mousse d'aluminium avec une porosité de 0.93 et une densité des pores de 40PPI. Le choix de ce composite est le résultat de l'étude précédente. Deux types de chauffage et de refroidissement cycliques ont été appliqués au composite, paraffine RT27/ Mousse d'aluminium (0,93, 40PPI). Le premier est un flux constant de $\pm 1800 \text{ W/m}^2$ imposé au niveau de la paroi pendant 120min. Le second est une fonction sinusoïdale, comme le montre la Figure 52. L'équation ci-dessous présente les conditions aux limites au niveau de la paroi du composite :

$$q_w = \begin{cases} 1800 \text{ W/m}^2, & (0 \leq t \leq 60 \text{ min}) \\ -1800 \text{ W/m}^2, & (60 < t \leq 120 \text{ min}) \end{cases}, \quad \text{Chauffage/ Refroidissement constant} \quad (51)$$

$$q_w = 900 \times \pi \times \sin\left(\pi \times \frac{t}{60}\right), \quad \text{Chauffage/ Refroidissement sinusoïdal}$$

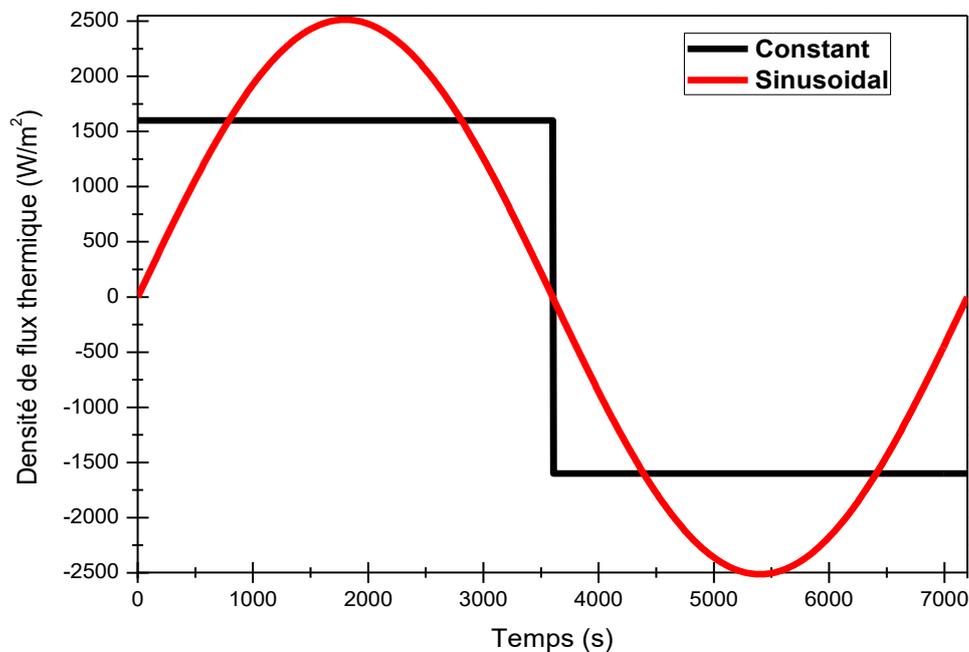


Figure 52: Cycle de chauffage et refroidissement

3.5.8.1. Effet des conditions de chauffage et de refroidissement sur la fraction liquide

La Figure 53 présente l'évolution de la fraction liquide de la paraffine RT27 pour les deux types de chauffage et de refroidissement : sinusoïdal et constant. Dans le cas d'un chauffage constant, la fusion de la paraffine se déclenche après 40s, et après environ 5 minutes dans le cas d'un chauffage sinusoïdal. En effet, dans le cas d'un chauffage constant, la densité de flux imposé est constante et dans le cas sinusoïdal, la densité de flux est nulle à l'instant initial et augmente avec le temps d'une manière sinusoïdale pour atteindre son maximum après 30 minutes. On constate que pour les mêmes conditions et avec la même puissance fournie nous avons une fusion plus rapide pour un chauffage sinusoïdal que pour un chauffage constant. La paraffine est totalement fondue dans une durée plus courte dans le cas d'un chauffage sinusoïdal en comparaison au constant (Voir Figure 53). On trouve le même comportement durant la solidification. Dans les deux cas, la paraffine n'est pas totalement solidifiée. En effet, le transfert thermique est moins intense durant la solidification que la fusion. La paraffine RT27 à une conductivité thermique plus faible à l'état liquide qu'à l'état solide ce qui donne une conductivité thermique effective plus faible du composite à l'état liquide.

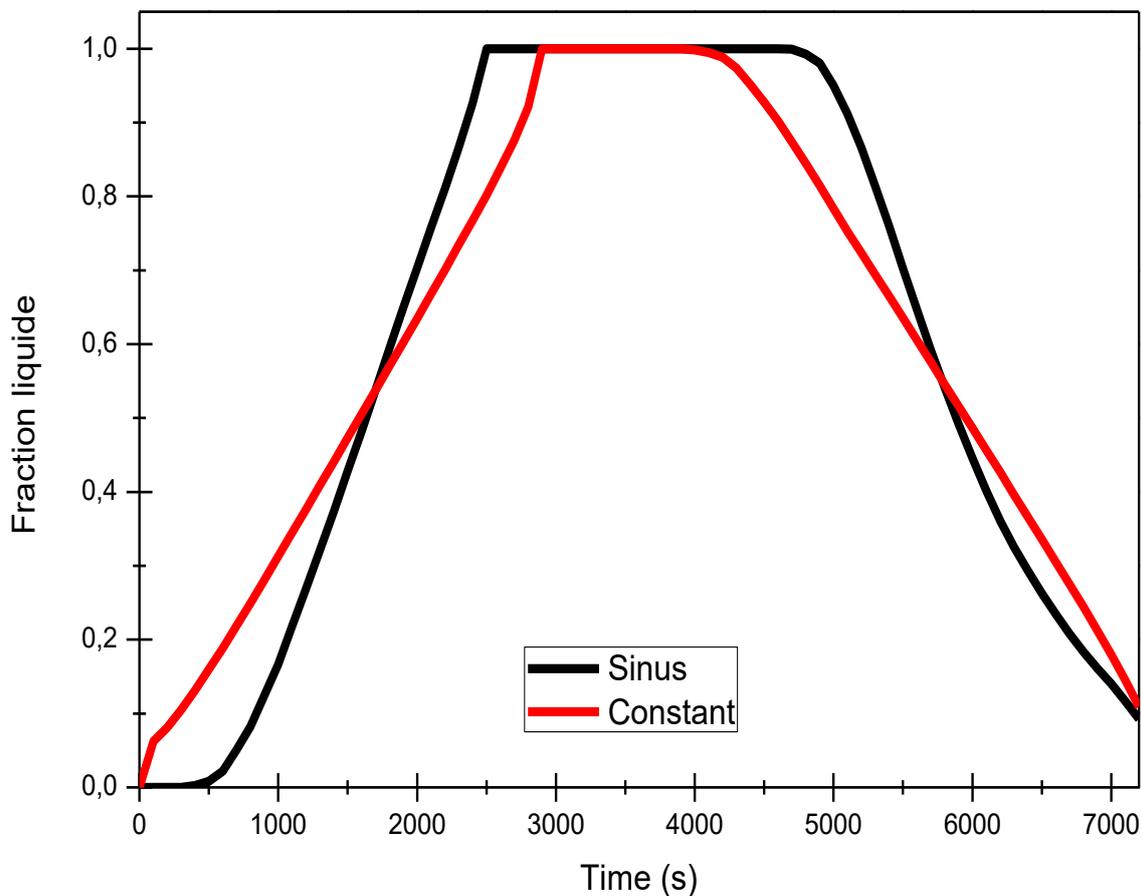


Figure 53: Evolution de la fraction liquide

3.5.8.2. Évolution temporelle de l'énergie stockée

L'énergie stockée dans un élément numérique est calculée comme suit :

$T < T_f$:

$$Q_s = \varepsilon \rho_{ps} C_{p_{ps}} (T_P - T_0) + (1 - \varepsilon) \rho_f C_{p_f} (T_S - T_0) \quad (52)$$

$T = T_f$:

$$Q_s = \varepsilon \left[\rho_{ps} C_{p_{ps}} (T_m - T_0) + \frac{\rho_{ps} + \rho_{pl}}{2} L_F \right] + (1 - \varepsilon) \rho_f C_{p_f} (T_m - T_0) \quad (53)$$

$T > T_f$:

$$Q_s = \varepsilon \left[\rho_{ps} C_{p_{ps}} (T_m - T_0) + \frac{\rho_{ps} + \rho_{pl}}{2} L_F + \rho_{pl} C_{p_{pl}} (T_P - T_m) \right] + (1 - \varepsilon) \rho_f C_{p_f} (T_S - T_0) \quad (54)$$

L'énergie totale stockée est ensuite calculée par intégration de la bonne expression. La Figure 54 présente l'évolution de l'énergie stockée durant la fusion et la solidification de la paraffine. Le profil obtenu a la même allure que l'évolution de la fraction liquide.

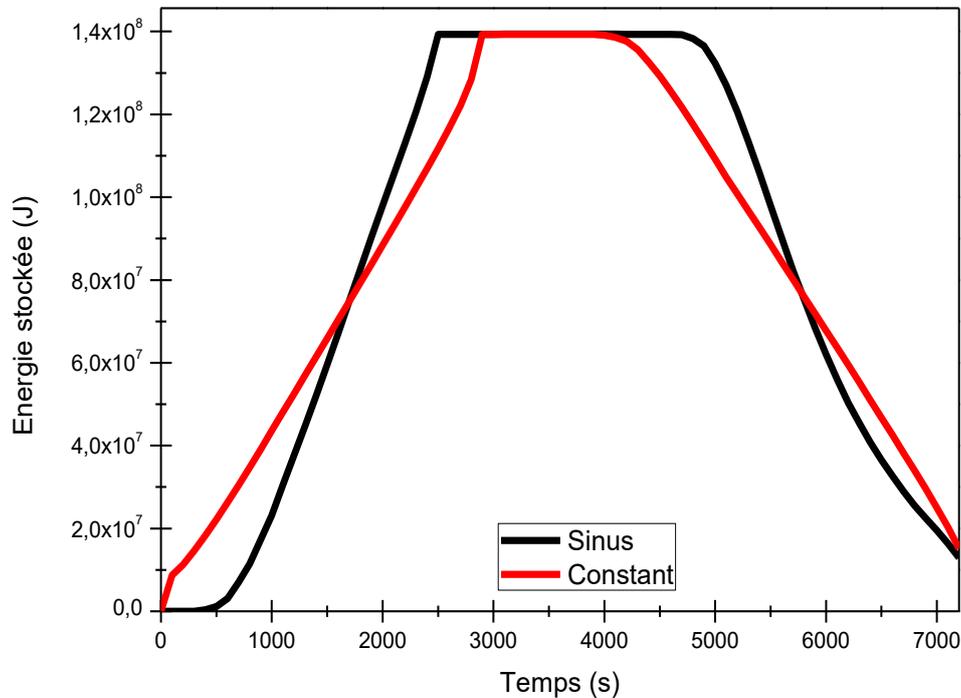


Figure 54: Énergie stockée

3.5.9. Effet des pertes thermiques par convection

Les effets des pertes par convection sont évalués pour différents coefficients ($5\text{W}/\text{m}^2$, $10\text{W}/\text{m}^2$ et $15\text{W}/\text{m}^2$). La température ambiante est de 294.15K . La Figure 55 présente l'évolution de la fraction liquide avec et sans perte par convection pour un chauffage/ refroidissement constant et la Figure 56 pour le cas sinusoïdal. On constate que les pertes par convection ils n'ont pas un grand impact durant le processus de fusion. Initialement le composite est en équilibre thermique avec son environnement, il n'y a pas de pertes par convection. La température de la paroi (paroi est) augmente avec le temps pour atteindre son maximum après une heure (la durée de chauffage). En revanche, la température de la paroi est à son maximum au début du processus de solidification. Le transfert thermique est moins intense durant la solidification que la fusion. En effet, la paraffine RT27 à une conductivité thermique plus faible à l'état liquide qu'à l'état solide ce qui donne une conductivité thermique effective plus faible du composite à l'état liquide. Par conséquent, les pertes thermiques par convection sont plus importantes durant le processus de solidification que pendant la fusion. Le Tableau 20 présente une comparaison de temps de la solidification complète de la paraffine pour les deux types de refroidissement. Les résultats montrent que l'impact des pertes par convection est plus important dans le cas d'un refroidissement sinusoïdal que constant.

Coefficient convectif	$5\text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$	$10\text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$	$15\text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$
Constant	7200 secondes	7200 secondes	7100 secondes
Sinusoïdal	6900 secondes	6500 secondes	6400 secondes

Tableau 20 : Temps de solidification

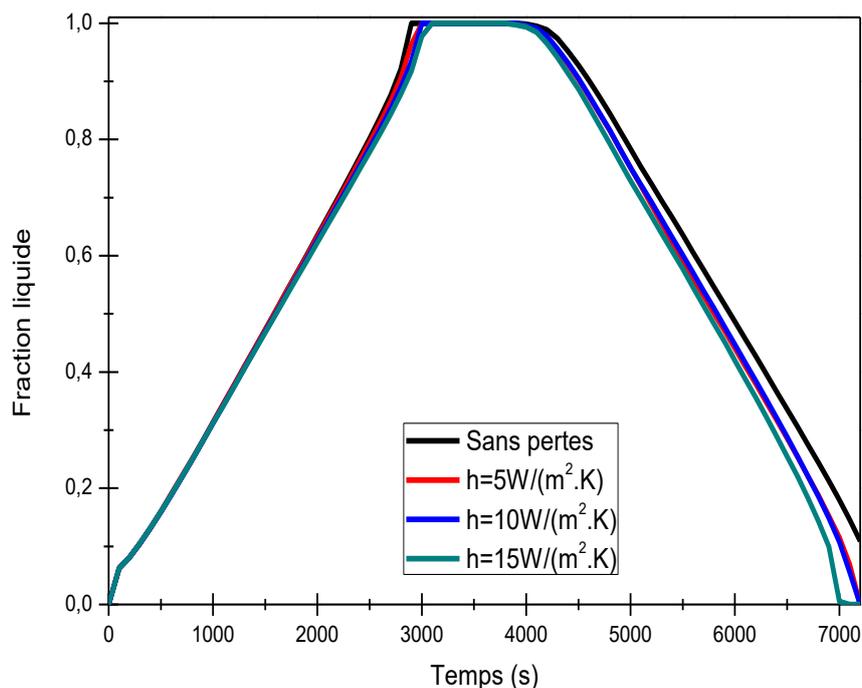


Figure 55: Effets des pertes par convection (flux constant).

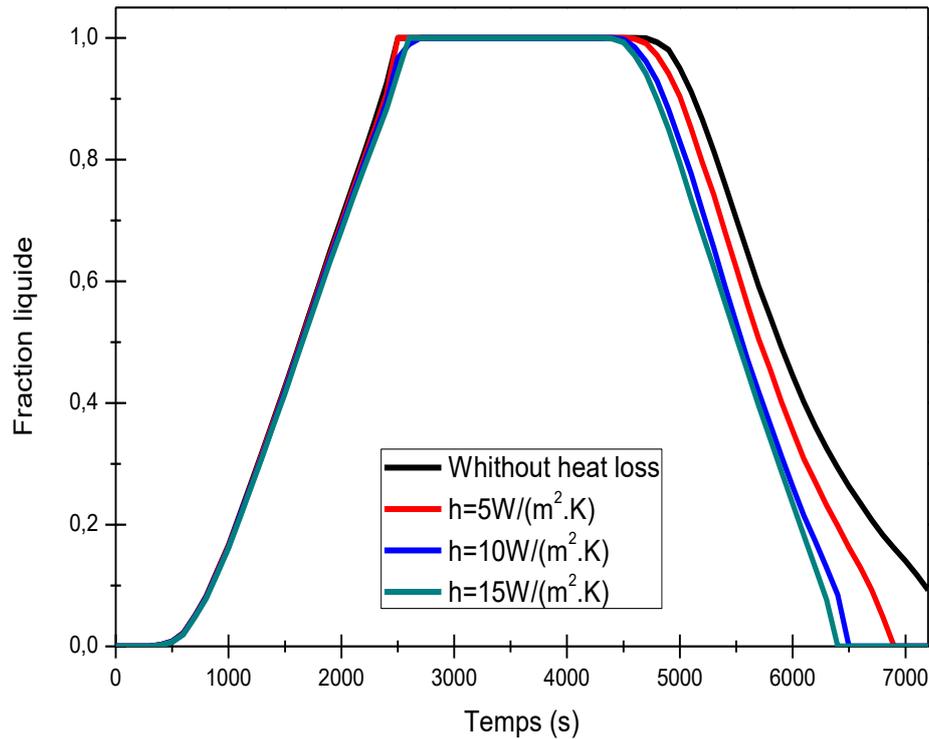


Figure 56: Effets des pertes par convection (flux sinusoidal).

3.6. Conclusion

Le problème du stockage et déstockage d'énergie thermique dans un composite MM- MCP a été abordé. Un modèle numérique a été présenté et validé. Un dispositif expérimental a été développé afin de valider les résultats numériques du modèle développé. La convection naturelle reste relativement faible lors de la fusion et la solidification. Les résultats ont démontré que la fusion et la solidification du MCP sont très sensibles à la conductivité thermique des mousses. La fusion et la solidification sont plus rapides pour une densité des pores plus élevée. L'influence des conditions de chauffage et de refroidissement sur la cinétique de changement de phase durant la fusion et la solidification a été étudiée. Les résultats ont démontré que la fusion et la solidification totale du MCP incorporé dans une mousse métallique sont plus rapide avec un chauffage/ refroidissement sinusoïdal. Les pertes thermiques par convection ont un impact plus important dans le cas sinusoïdal que dans le cas constant. Les composites développés et caractérisés seront utilisés pour étudier l'état thermique des batteries types Li-ion.

Chapitre 4: Étude expérimentale du comportement thermique des cellules Li- ion; dimensionnement et optimisation d'un système de gestion thermique passif

4.1. Introduction

Ce chapitre est dédié à l'étude expérimentale des phénomènes thermiques dans des batteries type Li-ion, au dimensionnement d'un système de gestion thermique optimale par un composite MM- MCP à l'échelle d'une cellule et au développement d'un modèle électrothermique simplifié qui permet de reproduire le comportement thermique et électrique d'une cellule Li-ion. La première partie décrit la démarche réalisée pour mettre en place un banc d'essai expérimental et présente l'étude expérimentale des phénomènes thermiques dans une cellule Li-ion type 18650. La deuxième partie présente les travaux de dimensionnement et d'optimisation numérique sous COMSOL Multiphysique d'un système de gestion thermique passif par un MM- MCP, suivie par une étude expérimentale. La troisième et dernière partie décrit un modèle numérique électrothermique et présente la démarche suivie pour l'implanter en MATLAB Simulink/ Simscape et le valider.

4.2. Description du banc expérimental

Le banc d'essai expérimental mis au point est représenté sur la Figure 57. La cellule étudiée de capacité 2600 mAh, est branchée à une alimentation à courant continu qui assure la charge de la batterie et à une charge active qui assure la décharge. La cellule est cylindrique de dimensions : $r=9.255\text{mm}$; $H=70\text{mm}$. Ce sont des cellules Li-ion fournies par l'entreprise VARTA. La Figure 57 (a) présente une photo de ces cellules. Leurs caractéristiques sont fournies par le fabricant. Des relais électromécaniques sont insérés permettant l'ouverture et la fermeture du circuit électrique. Deux thermocouples de type K sont collés sur la surface latérale de la cellule pour en mesurer la température en différentes positions de la surface. La Figure 57 (b) présente le positionnement des thermocouples. Un fluxmètre cylindrique enrobe la cellule pour mesurer le flux thermique radial dissipé par la cellule. Un programme LabVIEW est élaboré pour piloter les cycles charge/décharge des batteries. Il permet d'assurer à la fois la commande des relais de l'alimentation et de la charge active ainsi que l'acquisition des mesures. La cellule étudiée est suspendue par ses câbles d'alimentation afin d'éviter les échanges thermiques par conduction entre la surface de la cellule et l'environnement extérieur, Figure 58. La cellule instrumentée est logée

Étude expérimentale du comportement thermique des cellules Li-Ion, dimensionnement et optimisation d'un système de gestion thermique passif 92

dans une chambre climatique de type ESPEC-642 fournie par ES Equipements Scientifiques. La chambre climatique est équipée d'un ventilateur qui permet de garder une température homogène dans la chambre climatique. Ceci provoque une faible convection forcée dans le cas d'une température constante imposée.

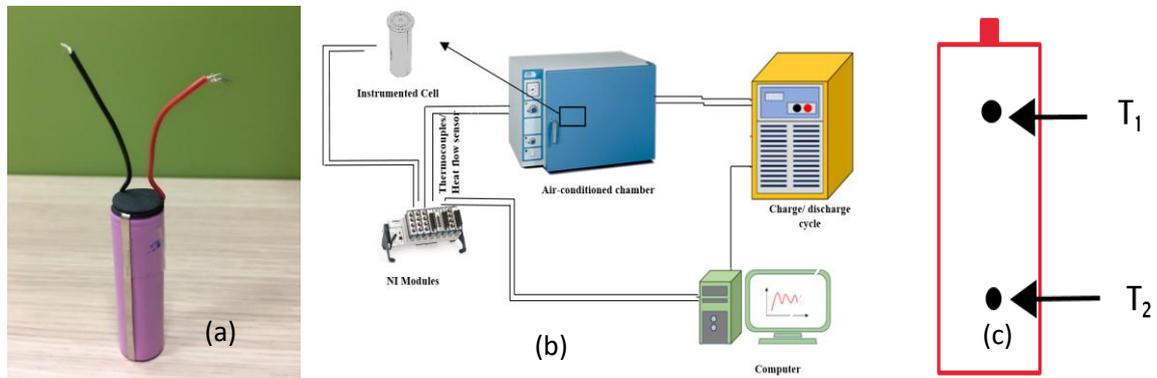


Figure 57: Banc d'essai expérimental

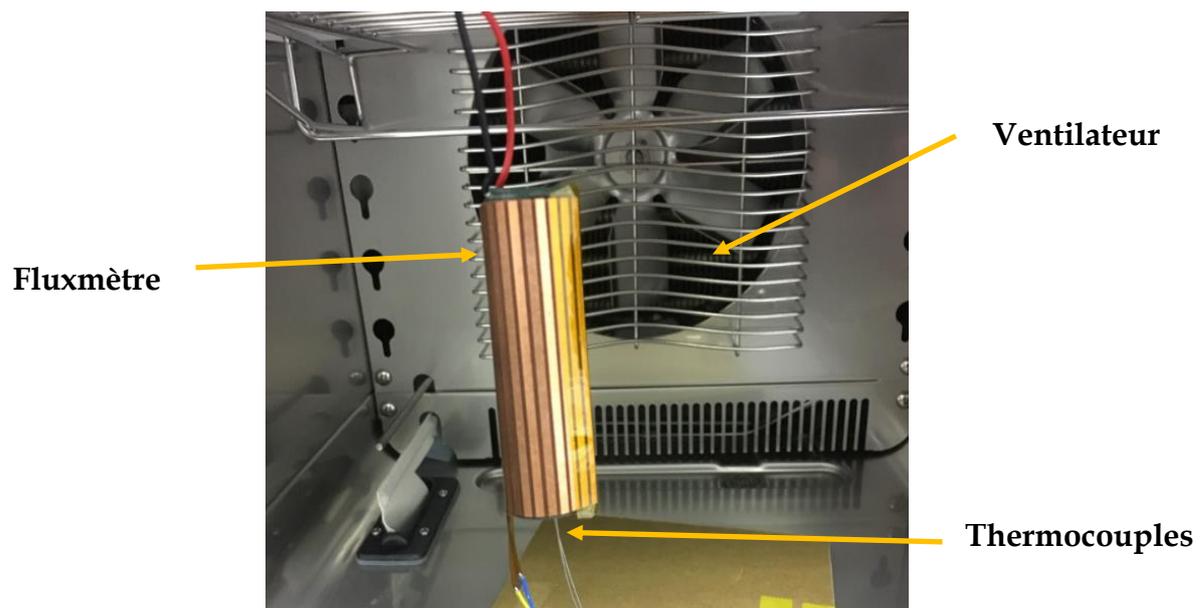


Figure 58: Cellule instrumentée (Chambre climatique type ESPEC- 642)

4.3. Étude expérimentale des phénomènes thermiques dans une cellule Li-ion

Pour se rapprocher des conditions d'utilisations des cellules, l'étude qui sera présentée dans cette section est faite sous convection naturelle : la porte de la chambre climatique est ouverte, la température de la salle est d'environ 22°C.

4.3.1. Déroulement des essais

Les essais ont été réalisés pour différents courants et pour une tension maximale de 4V et sans pause entre deux cycles consécutifs. Un cycle correspond à une charge suivie d'une décharge. La Figure 59, présente les profils de tension et de courant lors d'un essai 1C (2.6A). 1C signifie que si la cellule, pleinement chargée, est déchargée par un courant de 2.6 A, elle va atteindre sa tension d'arrêt après une heure de décharge. Les essais sont arrêtés une fois le régime permanent atteint. En effet, la température augmente au début et tend vers une valeur constante qui caractérise le régime permanent. La Figure 60 présente l'évolution de la température ambiante. On observe une légère augmentation de la température ambiante mesurée, elle varie entre 21.9°C et 22.2°C.

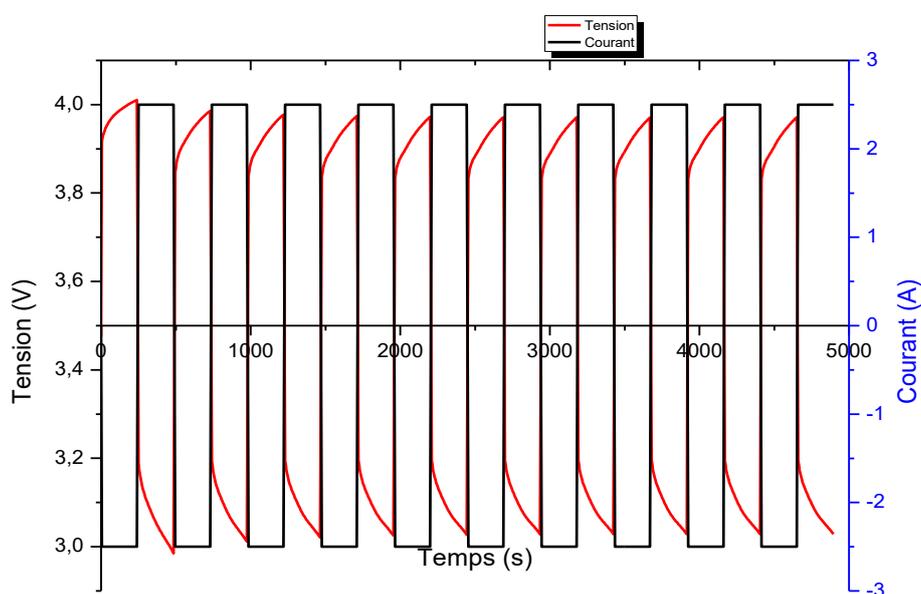


Figure 59: Profil charge/ décharge

4.3.2. Évolution de la température et de la densité de flux de la cellule

La Figure 61, présente l'évolution de la température de la cellule pour un cycle de charge/ décharge à 1C (2.6A). D'après la littérature, deux sources interviennent dans la génération de la chaleur dans une cellule. La première est générée par effet Joule, considérée comme source irréversible, et la deuxième source est de nature réversible, qui correspond à la chaleur produite à l'interface entre l'électrolyte et les électrodes, est d'origine thermodynamique [71,84,159,160]. Globalement, nous observons dans cette figure une légère diminution de la température lors de la charge et également une augmentation lors de la décharge. On constate qu'au bout d'un cycle, la chaleur absorbée par la réaction lors de la charge et totalement restituée lors de la décharge. Ce phénomène réversible est dû à la variation d'entropie causée par l'insertion/désinsertion des ions Li^+ dans la structure cristalline du matériau actif de l'électrode négative.

Étude expérimentale du comportement thermique des cellules Li-Ion, dimensionnement et optimisation d'un système de gestion thermique passif 94

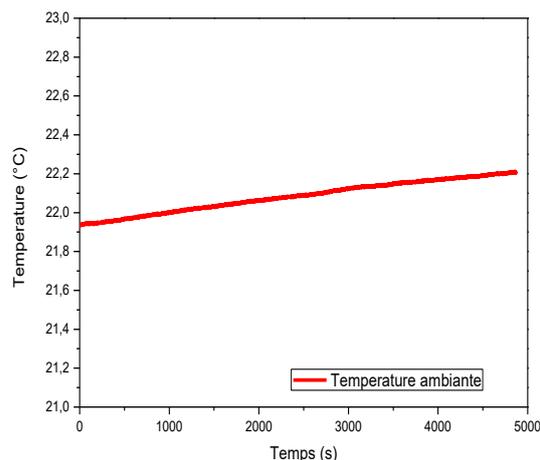


Figure 60: Évolution de la température ambiante (Température de la salle)

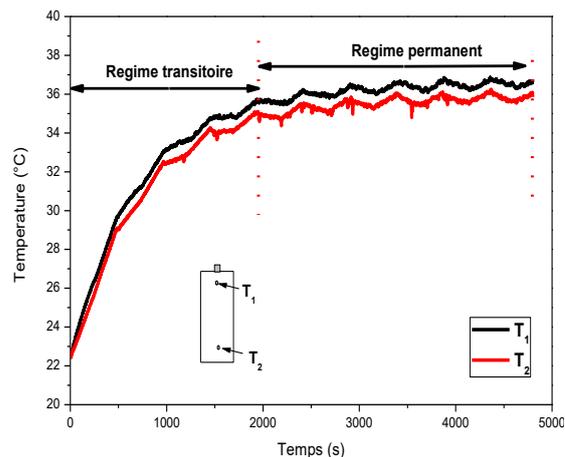


Figure 61: Évolution de la température

La Figure 62 présente l'évolution de la densité de flux thermique surfacique de la cellule. On remarque que le profil obtenu a la même allure que la température. On distingue clairement deux régimes, un transitoire et un permanent. Les résultats trouvés dans cette étude pour la cellule 18650 sont en accord avec les résultats trouvés par R. Rizk et al [160]. Dans [160], les auteurs ont étudié le comportement thermique d'une batterie lithium-ion prismatique d'une capacité de 60Ah. Les cellules étudiées dans le présent travail ont une densité de flux thermique radiale plus élevée sous une sollicitation de 1C par rapport aux cellules prismatiques étudiées dans [160].

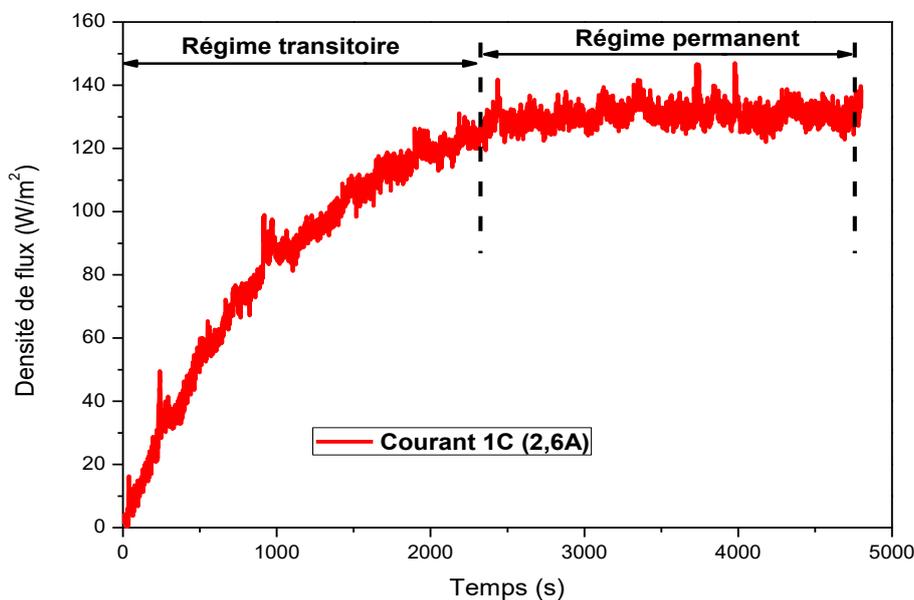


Figure 62: Évolution de la densité de flux thermique

4.3.3. Étude de l'influence de courant de charge/ décharge sur la température de la cellule

La Figure 63 présente l'évolution de la température de la cellule en fonction de la capacité de la batterie (1C, 4/5C, 2/5C) qui correspond à 2.6A, 2A et 1A; la

Étude expérimentale du comportement thermique des cellules Li-Ion, dimensionnement et optimisation d'un système de gestion thermique passif 95

température ambiante de la salle est d'environ 22.4°C. On observe que plus le courant est élevé, plus la température surfacique de la cellule est élevée. En effet, les deux sources de chaleur réversible et irréversible sont dépendantes du courant de sollicitation. La chaleur réversible générée par la cellule est proportionnelle au courant ($Q_{rev} = T \cdot \frac{\partial U_{ocv}}{\partial T} \cdot I$) et la chaleur irréversible est proportionnelle au carré du courant de sollicitation ($Q_{irr} = RI^2$).

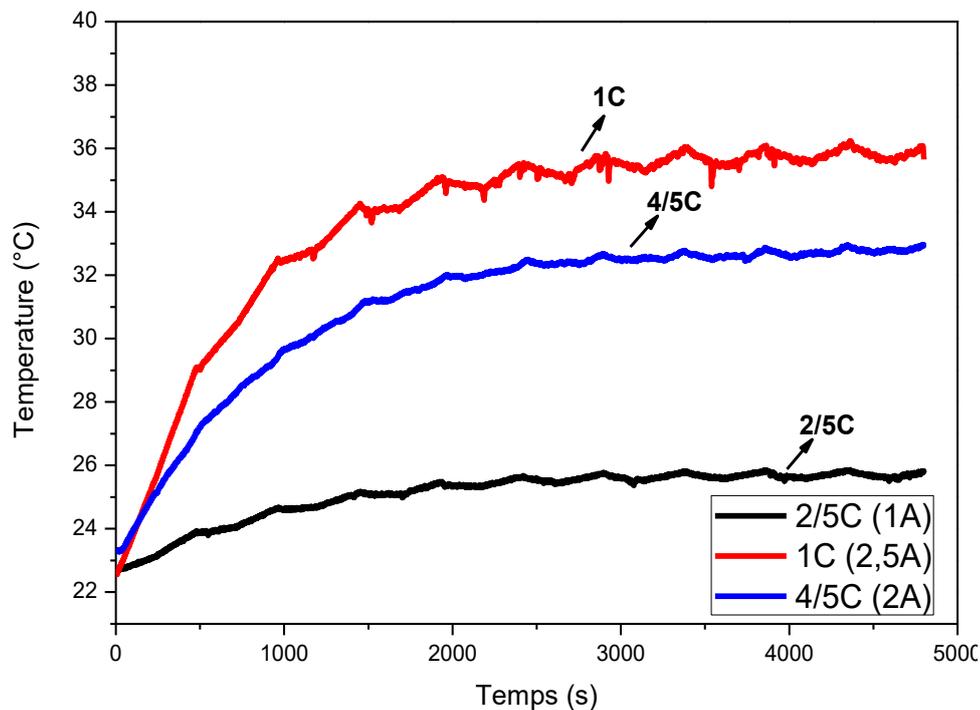


Figure 63: Influence du courant sur l'évolution de la température

4.3.4. Étude de l'impact de la fréquence des essais sur la température de la cellule en régime permanent

Dans cette section, nous étudions l'influence de la fréquence sur la température en régime permanent. Tous les tests sont faits en régime 4/5C, c'est-à-dire en courant de 2A. La fréquence est le nombre de périodes par unité de temps ce qui correspond à l'inverse de la période.

La période est la durée d'un cycle charge/ décharge. La Figure 64 présente l'évolution temporelle de la température mesurée par le thermocouple T₁ en fonction de la fréquence. Il est clair que la fréquence a un grand impact sur le pic de température. En effet, un temps plus long de sollicitation conduit à une entropie plus élevée et par la suite à des températures plus élevées. Notre choix est porté sur l'étude avec une fréquence de 8 minutes pour laquelle nous avons une faible température de la cellule avec une variation quasi négligeable ($\Delta T < 1^\circ\text{C}$).

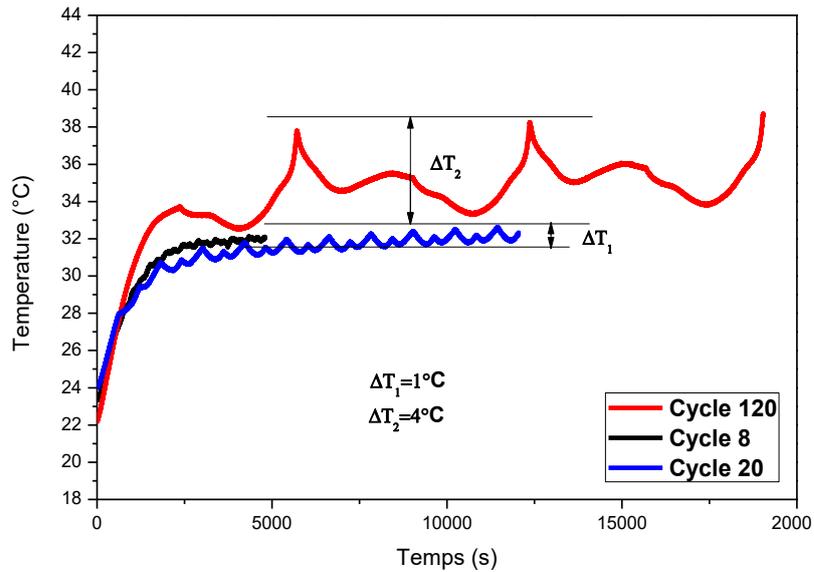


Figure 64: Influence de la fréquence sur la température

4.3.5. Étude de l'influence de la température ambiante sur la température de la cellule

Dans le but d'étudier l'impact de la température ambiante sur l'évolution temporelle de la température de la cellule, la chambre climatique a été réglée à une température constante. Quatre températures ont été étudiées 12°C , 23°C , 28°C et 37°C . Les tests sont faits en régime 4/5C, c'est-à-dire en courant de 2A pour dix cycles de 20 minutes. La Figure 65 présente l'évolution temporelle de la température mesurée par le thermocouple T_1 en fonction de la température ambiante. Les résultats montrent que dans le cas des températures ambiantes 23°C et 28°C , la température de la cellule converge vers la même valeur.

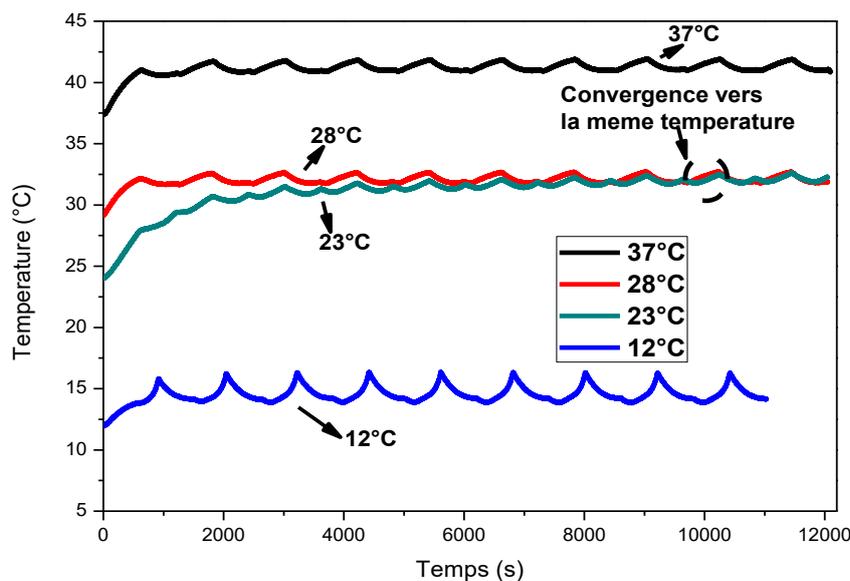


Figure 65: Influence de la température ambiante

4.4. Gestion thermique par l'utilisation d'un composite MM- MCP : Étude numérique

Dans cette section nous nous intéressons au dimensionnement et à l'optimisation d'un système de gestion passif par un composite MM- MCP. L'objectif est de garder la cellule à une température au-dessus de 27°C sous une sollicitation de 1C. Les études faites dans [161] sous un courant de 1C ont montré que la température de fonctionnement pour une durée de vie optimale pour les cellules Li-ion 18650 est 25°C. En dessous de 25°C, le taux de vieillissement augmente avec la baisse de la température, tandis qu'au-dessus de 25°C, le vieillissement est accéléré avec l'augmentation de la température (Figure 66). La fusion de la paraffine RT27 se déclenche à une température de 25.15°C, ce qui fait d'elle un MCP approprié pour garder la température de la cellule entre 25°C et 28°C.

La chaleur réellement dissipée par la cellule a été calculée à partir des résultats expérimentaux présentés précédemment dans ce manuscrit et grâce à un code de calcul développé sous Matlab. COMSOL Multiphysics (Version 5.3a) et Matlab sont utilisés pour simuler le comportement thermique du MCP et du composite MM- MCP utilisés pour absorber la chaleur dégagée par la cellule.

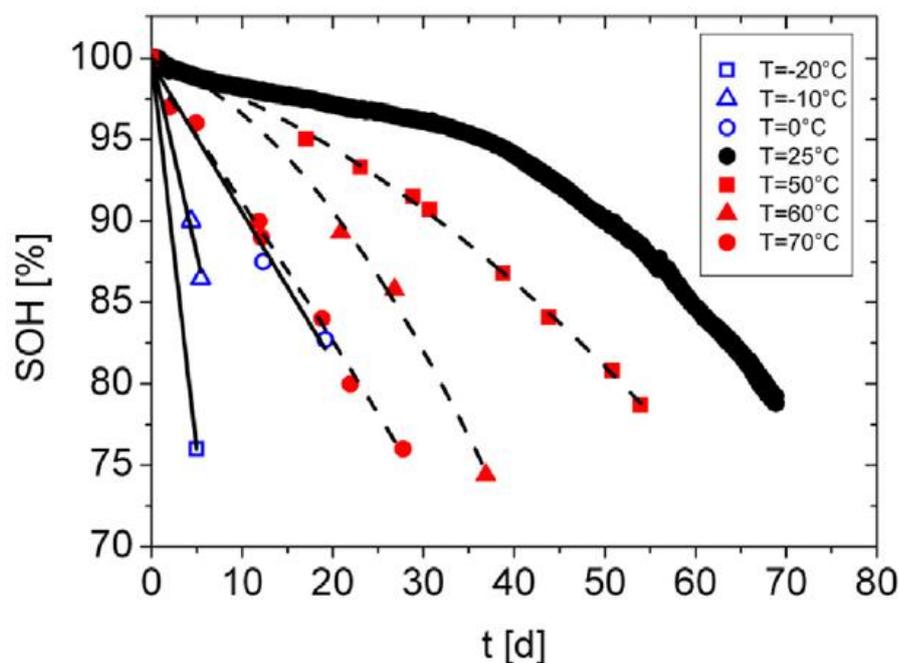


Figure 66: Courbes de SOH mesurées en fonction du temps pour des cycles de 1 C et à différentes températures [161].

4.4.1. Modèle physique

Pour simplifier les simulations numériques, le problème est considéré en 2D. Le modèle physique est représenté par la Figure 67. La Figure 68 présente le modèle

Étude expérimentale du comportement thermique des cellules Li-Ion, dimensionnement et optimisation d'un système de gestion thermique passif 98

physique simplifié avec des conditions aux limites choisies. Il s'agit d'une cellule Li-ion entourée soit par un MCP pur soit par un composite MM- MCP. La mousse en aluminium a une porosité de 0.93 et une densité de pores de 40PPI. Le choix de cette mousse avec ces caractéristiques est fait en se basant sur les résultats du chapitre 3. Les parois externes sont considérées adiabatiques. Notre choix pour le MCP est porté sur la paraffine RT27. Ce choix est justifié par sa température de fusion autour de 27°C. Les propriétés thermophysiques de la paraffine RT27 et du composite Mousse d'aluminium RT27 ont été présentées dans le chapitre 2.

4.4.1. Calcul de la quantité de MCP nécessaire

Pour déterminer la quantité nécessaire de la paraffine RT27 pour absorber la chaleur dissipée par la cellule, il fallait en premier lieu calculer la chaleur totale dissipée par la cellule. La quantité de la chaleur est l'intégrale de la densité de flux.

$$Q_{Li-ion} = \int_{t_1}^{t_f} \iint_S q_{Li-ion} ds dt \quad (55)$$

L'intégrale est calculée numériquement par la méthode des trapèzes en utilisant un code développé sous Matlab. La masse de MCP est ensuite déduite comme suit :

$$Q_{Li-ion} = mCp_{Ps}(T_{ini} - T_{PF}) + mL_f + mCp_l(T_{final} - T_{PF}) \quad (56)$$

$$m = \frac{Q_{Li-ion}}{Cp_{Ps}(T_{ini} - T_{PF}) + L_f + Cp_l(T_{final} - T_{PF})} \quad (57)$$

Avec T_{PF} est la température maximale à ne pas dépasser (température de dimensionnement), dans notre cas 27°C. L'épaisseur de la couche du MCP qui entoure la cellule est calculée à partir du volume de MCP nécessaire qui est déduit à partir de la masse :

$$e = \Delta r = \sqrt{\frac{V_{PCM} + \pi r_{Li-ion}^2 H_{Li-ion}}{\pi H}} - r_{Li-ion} \quad (58)$$

L'épaisseur calculée est de 2.8mm. Nous l'approximons à 3mm.

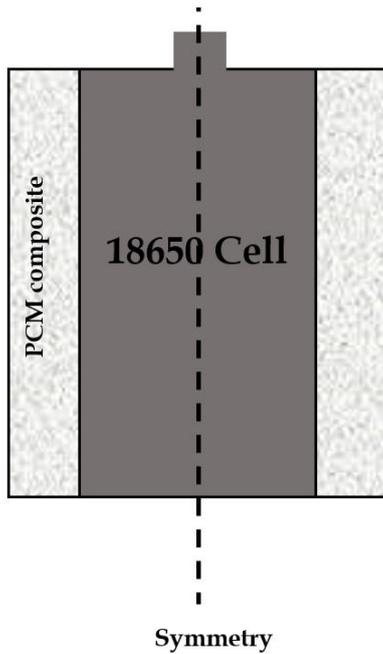


Figure 67 : Modèle physique

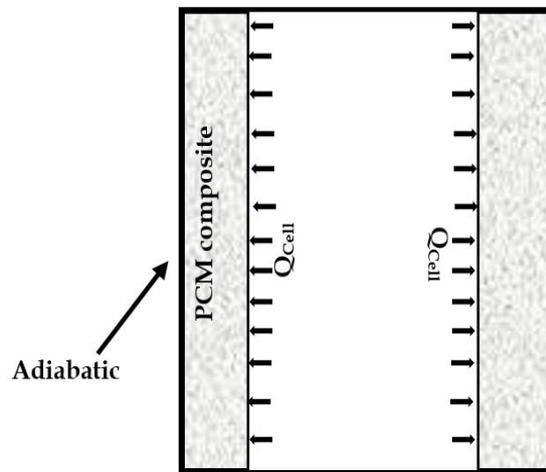


Figure 68 : Modèle physique simplifié

4.4.2. Optimisation de la quantité de MCP utilisée

La Figure 69 présente l'évolution de la fraction liquide pour la paraffine pure et pour le composite paraffine/ mousse d'aluminium. Les résultats montrent que la fusion se déclenche en premier dans le cas d'un MCP pur (RT27) que dans le cas d'un composite MM- MCP (MA- RT27), mais avec une cinétique de fusion plus faible. On observe que la fusion de la paraffine pure se déclenche après 45 minutes et après 62 minutes dans le cas de la paraffine incorporée dans la mousse d'aluminium. En effet, l'ajout d'une mousse métallique améliore la conductivité thermique et intensifie le transfert thermique. La faible conductivité thermique du MCP ralentit la propagation de la chaleur ce qui conduit à des températures plus élevées à l'interface entre cellule/ MCP qu'à l'interface cellule/ composite MM- MCP. Par conséquent, le MCP pur atteint la température de la fusion avant le MCP incorporé dans la mousse métallique. À la fin de la simulation numérique, nous remarquerons dans le cas d'une gestion thermique passive avec du MCP pur, la paraffine n'est pas totalement fondue, donc nous perdons l'avantage de MCP qui est le stockage de chaleur sous forme de chaleur latente au contraire du MCP incorporé dans une mousse métallique à grande porosité. Les résultats numériques montrent qu'à la fin de la simulation 20% de la paraffine est restée à l'état solide dans le cas de la paraffine pure. D'où l'importance de l'incorporer dans une mousse métallique.

La Figure 70 présente l'évolution de la température moyenne de la surface de la cellule dans les deux cas, sans et avec un système de gestion thermique. La température moyenne expérimentale est : $\frac{T_1 + T_2}{2}$. Les résultats montrent que l'ajout

Étude expérimentale du comportement thermique des cellules Li-Ion, dimensionnement et optimisation d'un système de gestion thermique passif 100

d'un MCP pur ou un composite MM- MCP permet de réduire considérablement la température de la cellule. La température de la cellule sans système de gestion thermique est de 37°C, avec de la paraffine RT27 pure elle devient 27.7°C et avec une gestion thermique par un composite MA (0.93, 40PPI)- Paraffine RT27 elle vaut 26.4°C. En conclusion, la paraffine RT27 pure permet de réduire la température de la cellule de 9.3°C et le composite paraffine RT27- Mousse d'aluminium (0.93, 40PPI) de 10.6°C. En outre, on observe que la durée du régime transitoire a été réduite dans les deux cas. En effet, la durée du régime transitoire sans un système de gestion thermique est d'environ 2000 secondes contre environ 700 secondes dans le cas d'un système de gestion thermique. Initialement, dans les deux cas étudiés la paraffine RT27 est à l'état solide à 22°C, il commence à absorber la chaleur générée par la cellule, à l'instant où la fusion se déclenche la température de la cellule se stabilise à une température autour de la température de la fusion de la paraffine RT27 (27°C).

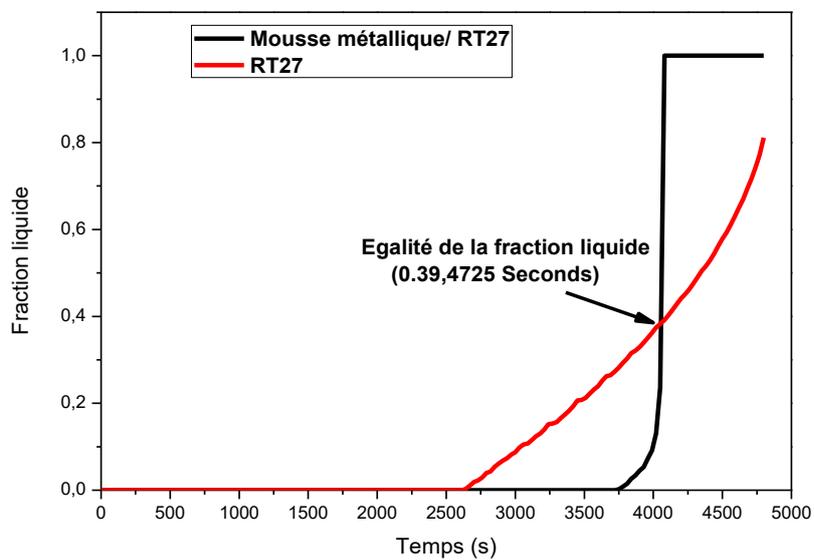


Figure 69: Évolution de la fraction liquide

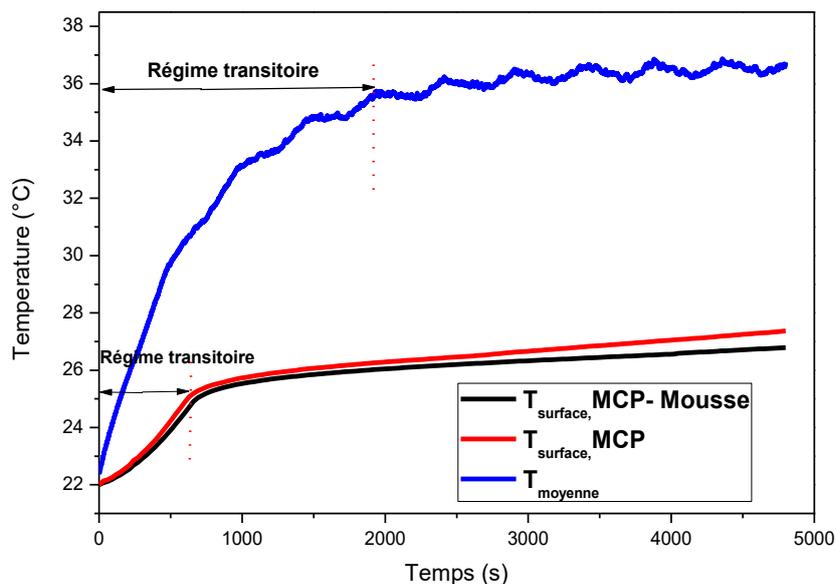


Figure 70 : Effet du système de gestion thermique sur la température de la cellule

Étude expérimentale du comportement thermique des cellules Li-Ion, dimensionnement et optimisation d'un système de gestion thermique passif 101

Afin de comparer les performances thermiques de deux systèmes : gestion thermique avec de la paraffine pure et gestion thermique avec de la paraffine incorporée dans une mousse métallique, nous avons suivi l'évolution de la température au niveau de la surface de la cellule (T_{Surface}) et aux interfaces (voir Figure 71). La Figure 72 présente l'évolution de la température moyenne de la surface de la cellule et de la surface externe dans les deux cas (cellule-MCP pur et cellule-MM-MCP). Les résultats montrent que la paraffine incorporée dans la mousse d'aluminium permet une gestion thermique plus efficace avec un champ de température plus uniforme. La différence entre la température au niveau de la surface T_{Surface} et T_{board} est de 0.2°C dans le cas de la paraffine RT27 incorporée dans la mousse d'aluminium et de 1.3°C dans le cas de la paraffine pure. En effet, l'ajout d'une mousse d'aluminium intensifie le transfert de chaleur lors de changement de phase solide-liquide [61,162-168]. Les figures 73 et 74 présentent respectivement les champs de phase et les champs de température de RT27 pure et du composite MA- RT27 pendant les 500 dernières secondes. On constate clairement que le champ de température est plus uniforme dans le cas de cellule - MA- RT27 que dans le cas cellule -paraffine RT27.

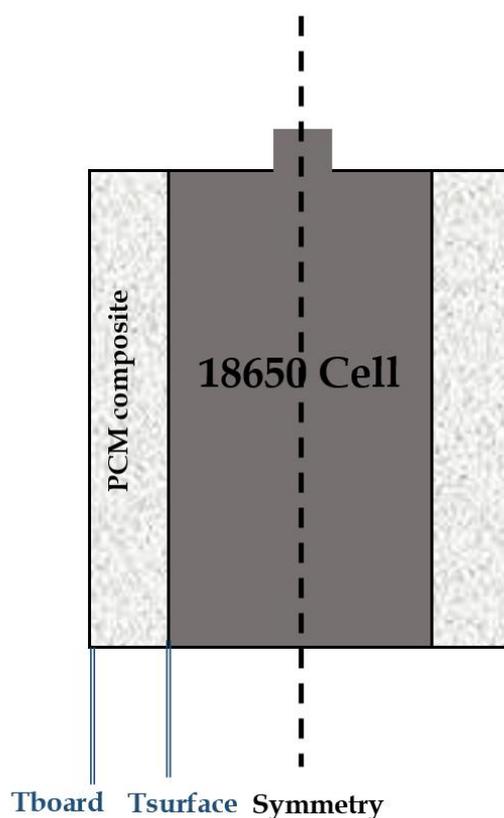


Figure 71 : Schématisation des capteurs de la température

Étude expérimentale du comportement thermique des cellules Li-Ion, dimensionnement et optimisation d'un système de gestion thermique passif 102

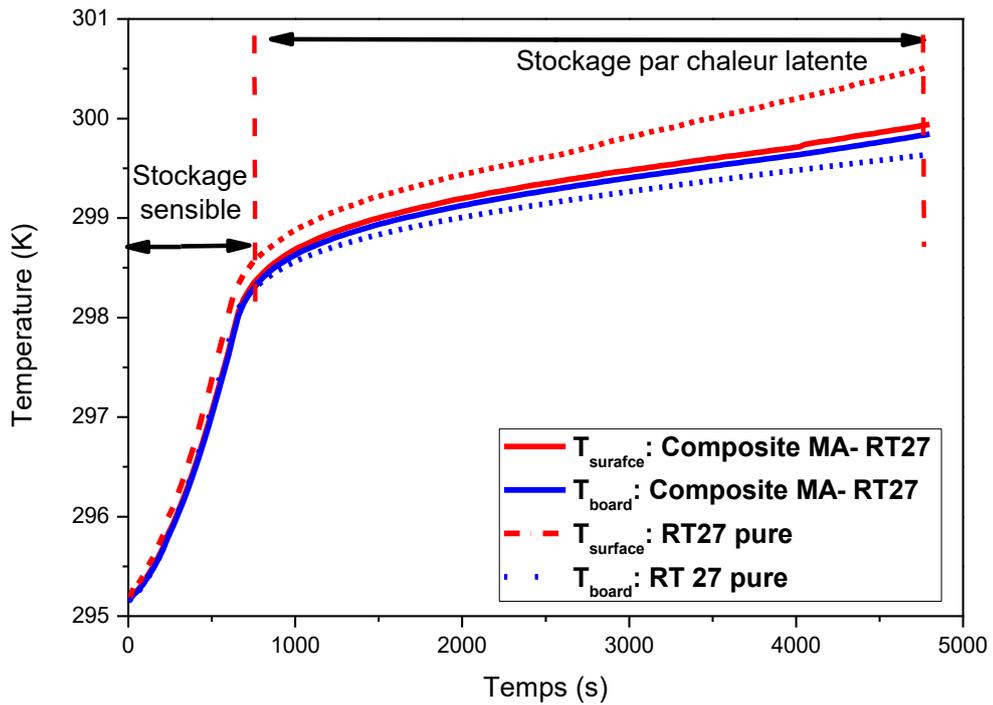


Figure 72: Influence de l'ajout d'une mousse sur l'état thermique de la cellule.

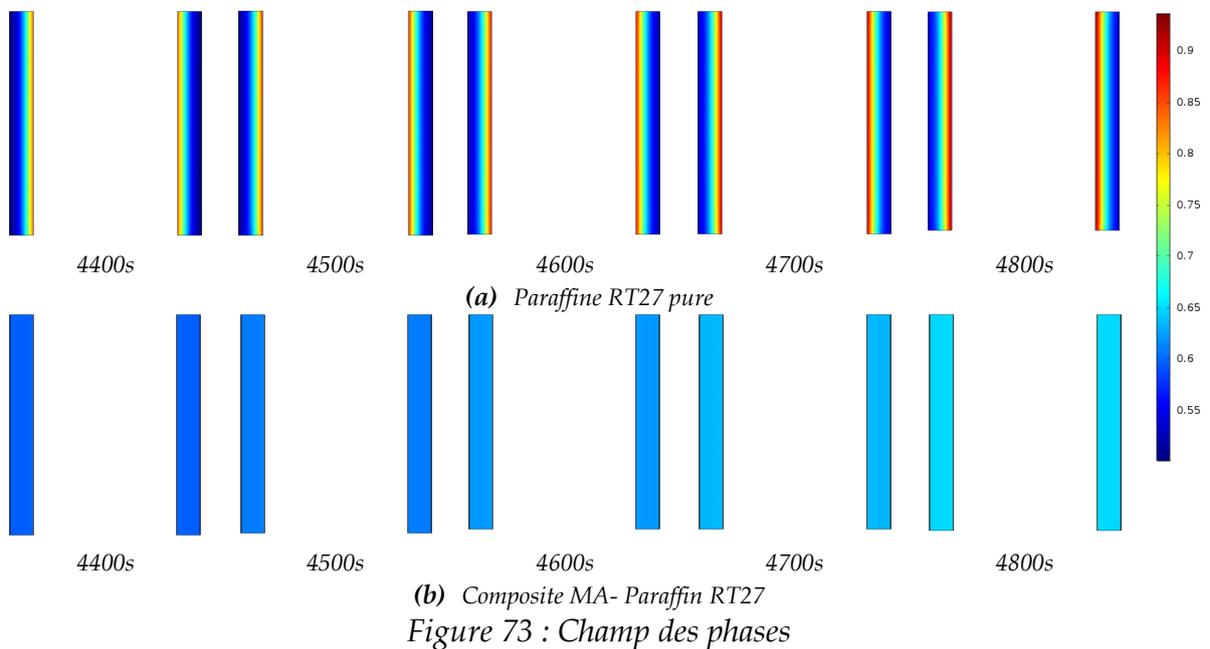


Figure 73 : Champ des phases

Étude expérimentale du comportement thermique des cellules Li-Ion, dimensionnement et optimisation d'un système de gestion thermique passif 103

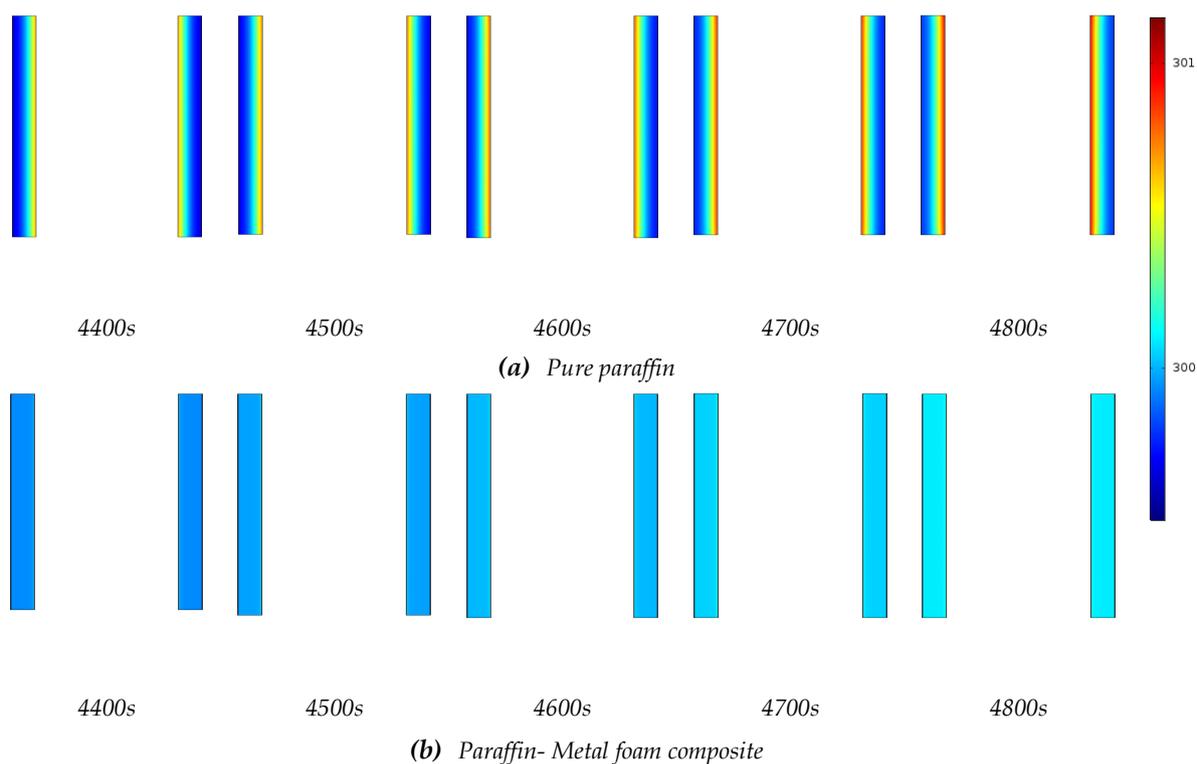


Figure 74 : Champs des températures

Afin d'optimiser la quantité de MCP utilisée, les performances du composite paraffine RT27/ Mousse d'aluminium sont évaluées pour différentes épaisseurs (2mm, 3mm, 4mm, 5mm et 6mm). La Figure 75 présente une comparaison de l'évolution de la température de la surface de la cellule pour les différentes épaisseurs étudiées. Une sous-estimation de l'épaisseur (masse nécessaire) conduit à des températures extrêmes, Figure 75. La température de la cellule avec une épaisseur de 2mm atteint 33°C, alors que la température de la cellule sans système de gestion thermique atteint 37°C. La comparaison de l'évolution de la température pour les épaisseurs supérieures à 3mm (épaisseur calculée) montre que dans la phase du stockage sensible, la différence en température peut atteindre 2°C alors que dans la phase du stockage par chaleur latente la différence est relativement faible. Globalement, l'ajout d'un volume de plus de MCP n'a pas une grande influence sur la température de la cellule. Cependant, le système sera d'autant plus lourd que le volume de composite est plus important.

L'étude d'optimisation numérique nous a permis d'exclure une sous-estimation de la quantité nécessaire de MCP. Cependant, elle est faite dans des conditions idéales simplifiées en 2D. Pour se rapprocher des conditions réelles, la section suivante sera l'objet d'une étude paramétrique d'optimisation expérimentale.

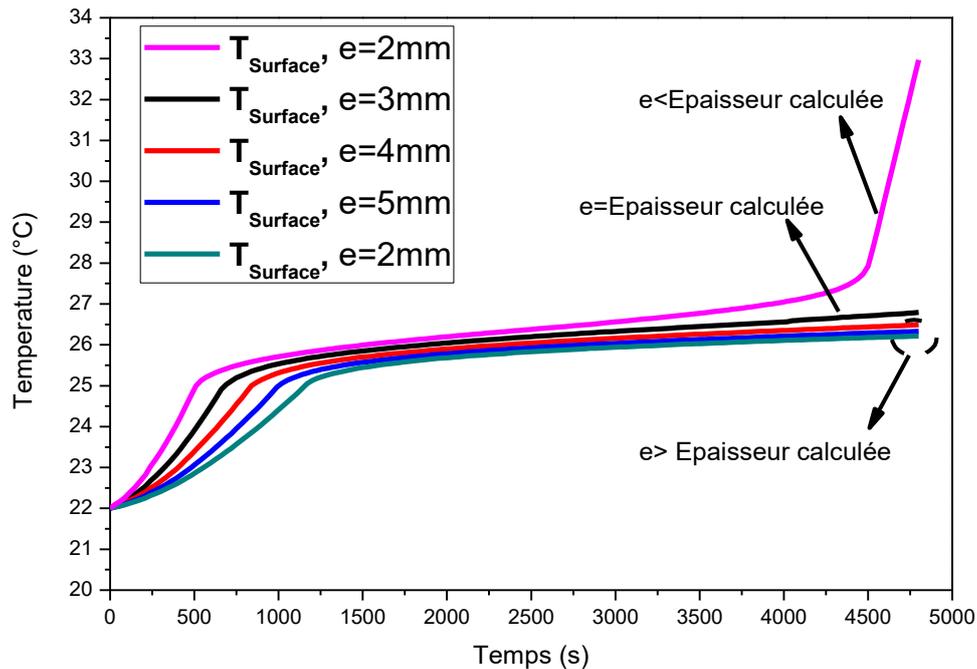


Figure 75: Impact de l'épaisseur du composite

4.1. Gestion thermique par utilisation d'un composite MM- MCP : Étude expérimentale

4.1.1. Dispositif expérimental

La cellule étudiée est mise dans un moule en aluminium. La Figure 76 présente une photographie du moule utilisé. Le moule est sous forme de deux cylindres coaxiaux creux en aluminium, de hauteur h et d'épaisseurs e , e_1 et e_2 . Le cylindre intérieur est de même diamètre que la cellule. Entre les deux cylindres, on insère le MCP avec ou sans mousse métallique. Une rainure est prévue à l'interface cellule-cylindre interne. Elle sert à loger les capteurs de température et les câbles des fluxmètres. Le dimensionnement de ces moules prend en compte l'expansion volumique du MCP. L'aluminium est choisi pour son bon compromis entre les propriétés thermiques, masse volumique et coût. Dans le but d'étudier l'impact de la masse de MCP, 3 moules avec différentes épaisseurs (3 mm, 5 mm et 7 mm) ont été fabriqués. L'ensemble des moules a été fabriqué par impression 3D métallique. Une photographie des trois moules est fournie sur la Figure 77.

La paraffine liquide est injectée dans le vide conçu pour la contenir. Après le remplissage, l'ensemble est refroidi dans la chambre climatique à une température imposée de 22°C. La Figure 78 (a) fournit une photographie lors du remplissage et la Figure 78 (b) après le remplissage.

Étude expérimentale du comportement thermique des cellules Li-Ion, dimensionnement et optimisation d'un système de gestion thermique passif 105



Figure 76: Moule en aluminium utilisé dans le cadre de cette étude

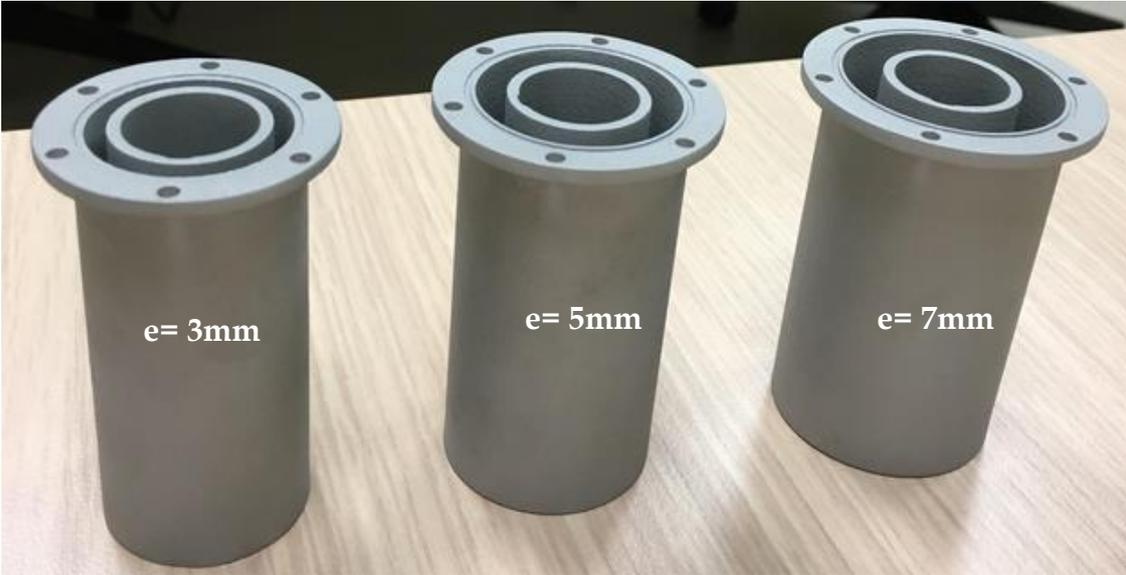


Figure 77: Photographie des trois moules

Étude expérimentale du comportement thermique des cellules Li-Ion, dimensionnement et optimisation d'un système de gestion thermique passif 106

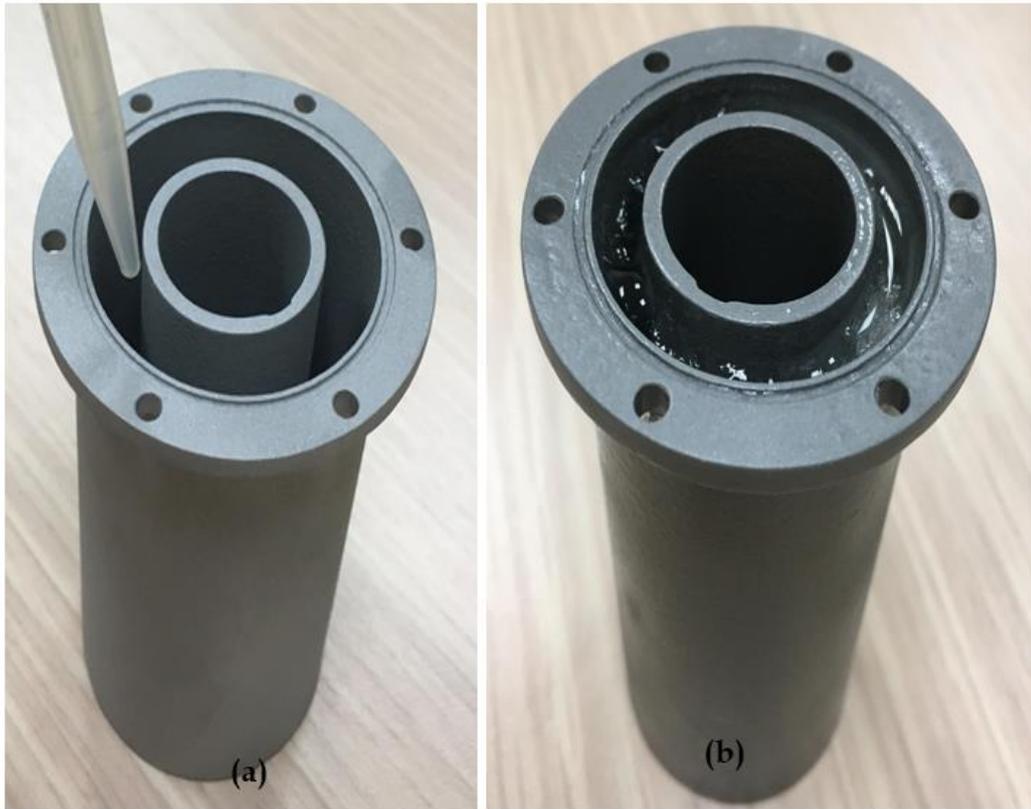


Figure 78: Protocole de remplissage des moules

Avant d'insérer la cellule dans le moule, une protection de toutes les connexions est nécessaire pour éviter tout contact direct entre le moule en aluminium et les accumulateurs. La Figure 79 schématise le procédé d'intégration de la cellule dans le moule.

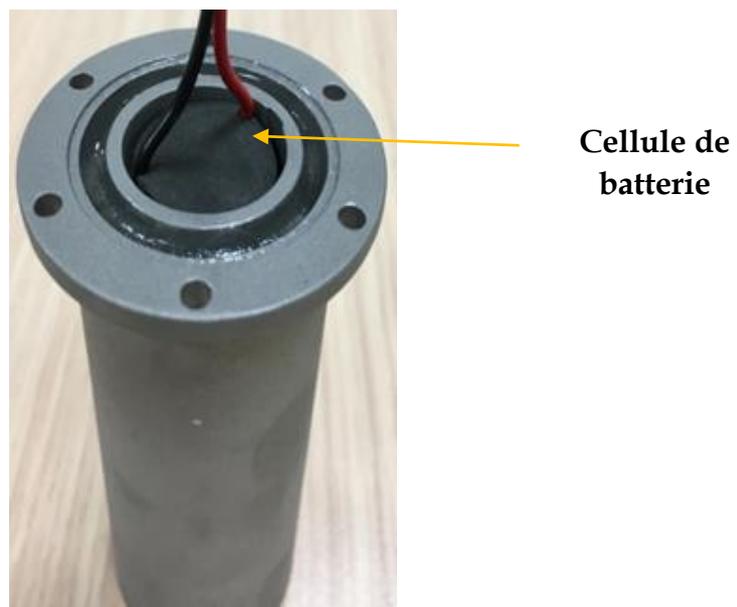


Figure 79: Intégration de la cellule dans le moule 3D.

Étude expérimentale du comportement thermique des cellules Li-Ion, dimensionnement et optimisation d'un système de gestion thermique passif 107

Dans le cas d'un composite MM- MCP, la mousse métallique a été coupée par un système de découpe laser par l'entreprise EROSFER sous forme de tubes de dimension $h \times e$ (Figure 80). Les tubes sont remplis de paraffine en suivant le protocole d'imprégnation sous vide décrit dans le chapitre 2.



Figure 80: Mousse métallique en tube

Après remplissage et instrumentation, la cellule plus le moule sont logés dans une chambre climatique. La base du moule est isolée par une couche de polystyrène expansé, Figure 81.

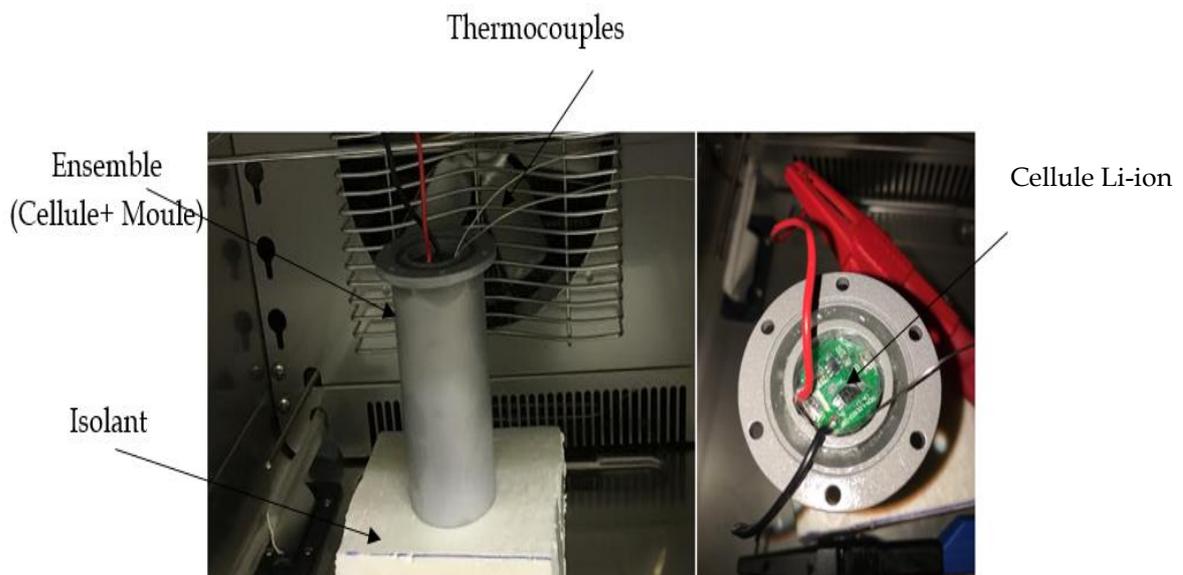


Figure 81: Cellule logée dans la chambre climatique

Étude expérimentale du comportement thermique des cellules Li-Ion, dimensionnement et optimisation d'un système de gestion thermique passif 108

Pour évaluer l'efficacité de l'utilisation de la paraffine RT27 et le composite MA-RT27 et leur capacité à absorber la chaleur générée par la cellule au cours des cycles charge/ décharge, l'évolution de la température radiale a été suivie aux niveau des interfaces grâce aux quatre thermocouples de type K : T_1 , T_2 , T_3 et T_4 . La Figure 82 (a) montre la cellule instrumentée dans la chambre climatique et la Figure 82 (b) présente l'empilement des thermocouples.

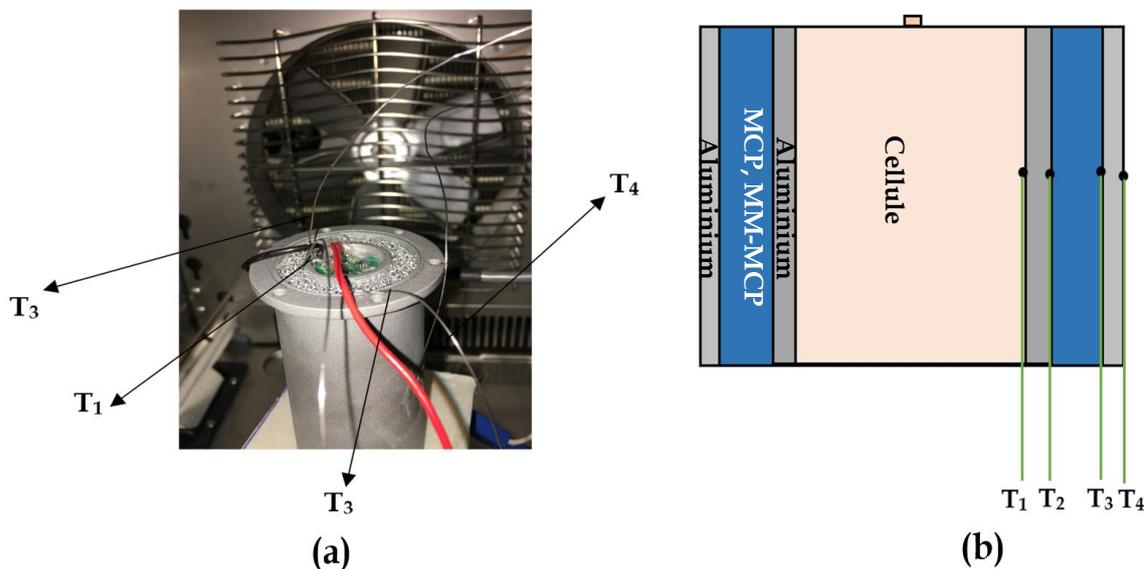


Figure 82: Positions des thermocouples (a) : photo, (b) : Schématisation

4.1.2. Évolution de la température de la cellule

La Figure 83 présente l'évolution de la température mesurée par le thermocouple T_1 en fonction du temps. Les résultats présentés pour les trois cas étudiés, à savoir la convection naturelle (cellule sans système de gestion thermique), la paraffine RT27 et le composite MA (porosité 0.93, densité de pores 40PPI) - Paraffine RT27 sont déroulées dans les mêmes conditions, à savoir : un courant 1C (2.6A) pour dix cycles charges/ décharges de 8 minutes a été imposé. Dans le cas d'une gestion thermique par la paraffine RT27 pure et par un composite paraffine/ Mousse d'aluminium, la température imposée est de 22°C. Pour ces cas, la ventilation est active pour favoriser l'échange thermique entre l'évaporateur (condenseur dans le cas d'un chauffage) et l'air à l'intérieur dans la chambre climatique.

Les résultats montrent que l'ajout d'un MCP pur ou un composite MM- MCP permet de réduire considérablement la température de la cellule. Les courbes en noir et bleu présentent respectivement l'évolution temporelle de la température de la cellule dans le cas d'une gestion avec de la paraffine RT27 pure et du composite MA-paraffine RT27. Les deux courbes montrent que le régime permanent est atteint après deux cycles contre cinq cycles dans le cas de la convection naturelle. En comparant les températures de la cellule en régime permanent nous observons que la température de la cellule avec de la convection naturelle a atteint 36.7°C, tandis qu'avec de la paraffine RT27 pure elle atteint 26.5°C et avec une gestion thermique par un composite paraffine RT27- Mousse d'aluminium (0.93, 40PPI) atteint 25.6°C. En conclusion, la

paraffine RT27 pure permet de réduire la température de la cellule de 10.2°C (écart moyen en régime permanent) et avec le composite paraffine RT27- Mousse d'aluminium (0.93, 40PPI) de 11.2°C (écart moyen en régime permanent).

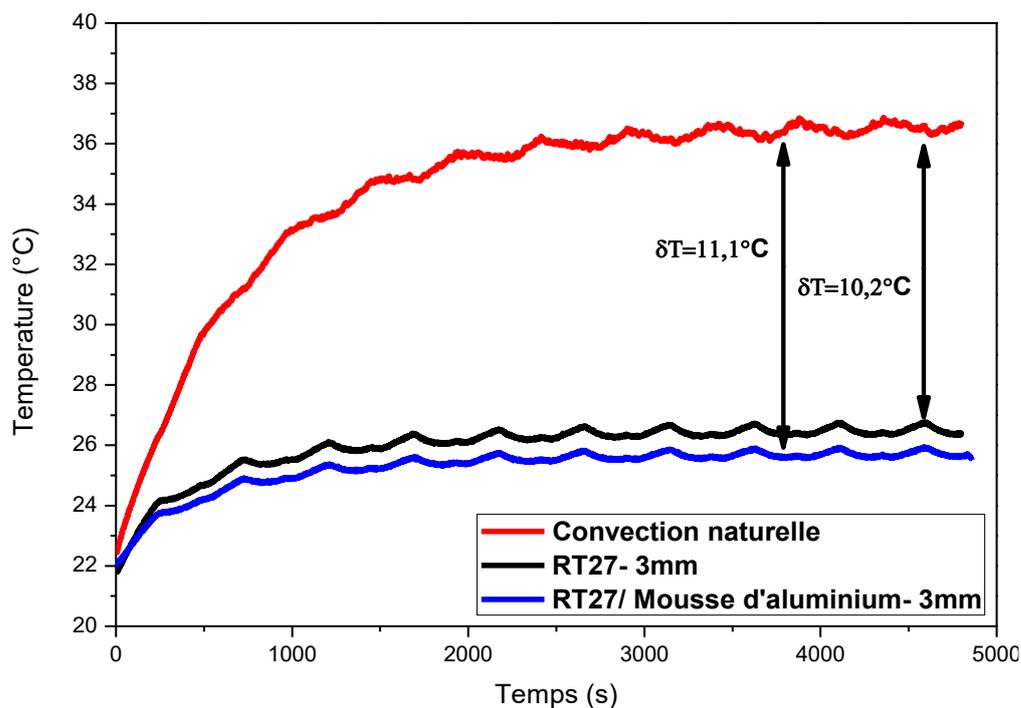


Figure 83: Évolution de la température mesurée avec et sans système de gestion thermique

4.1.3. Distribution de la température sans convection forcée

Afin d'éviter les pertes thermiques de la cellule vers l'air ambiant et pour simuler le cas où la cellule est placée dans un endroit très confiné (module de batterie), des essais sans convection forcée sont faits. L'ensemble est mis dans la chambre climatique initialement en équilibre thermique à 22°C, isolé de tout échange thermique avec le milieu ambiant.

Les figures 84, 85 et 86 présentent respectivement l'évolution de la température enregistrée dans le cas d'une gestion thermique par de la paraffine pure RT27, $e=3\text{mm}$, $e=5\text{mm}$ et $e=7\text{mm}$. Les résultats montrent la fusion totale de la paraffine dans le cas d'une épaisseur de 3 mm, ce qui conduit à des températures élevées par rapport aux autres cas. Ceci corrobore les résultats de l'étude numérique présentés précédemment dans ce chapitre. Une sous-estimation de la quantité de MCP pour absorber la chaleur générée par la cellule conduit à des températures élevées. Par contre l'écart entre la température de la cellule (T_1) et la paraffine (T_2) est inversement proportionnel à l'épaisseur. Le plus petit écart est observé dans le cas d'une épaisseur de 3mm. En effet, l'augmentation de l'épaisseur de la paraffine augmente la résistance thermique à cause de sa faible conductivité thermique, ce qui conduit à un transfert thermique moins intense dans le cas d'un solide pur et ou d'un liquide pur. Pour confirmer cette hypothèse, nous avons comparé sur la même figure l'évolution de la température de la cellule pour les trois épaisseurs étudiées sans convection, Figure 87. En phase solide, on observe une température plus faible dans le cas $e=3\text{mm}$ par rapport aux autres cas.

Étude expérimentale du comportement thermique des cellules Li-Ion, dimensionnement et optimisation d'un système de gestion thermique passif 110

En outre après la fusion totale de la paraffine RT27 on observe une inflexion au niveau de la courbe représentative de l'évolution de la température de la cellule.

Les résultats montrent la quasi-disparition des fluctuations provoquées par la variation de l'entropie de la cellule pour T_2 , T_3 et T_4 . En effet, elles se sont dissipées dans l'épaisseur e_1 du moule en aluminium.

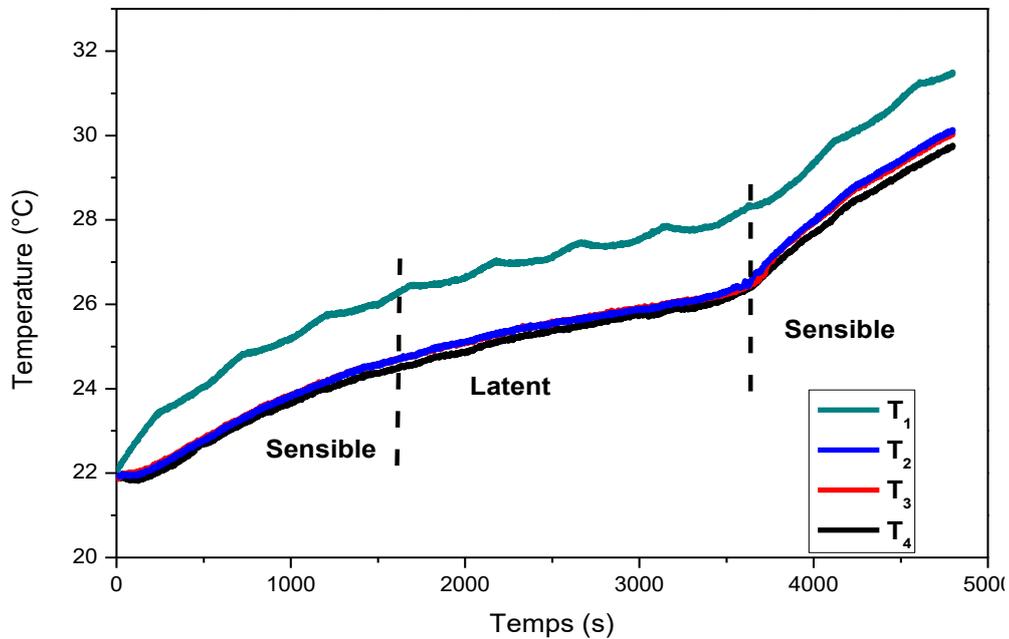


Figure 84: Évolution de la température- 3mm- RT27 pure, sans convection

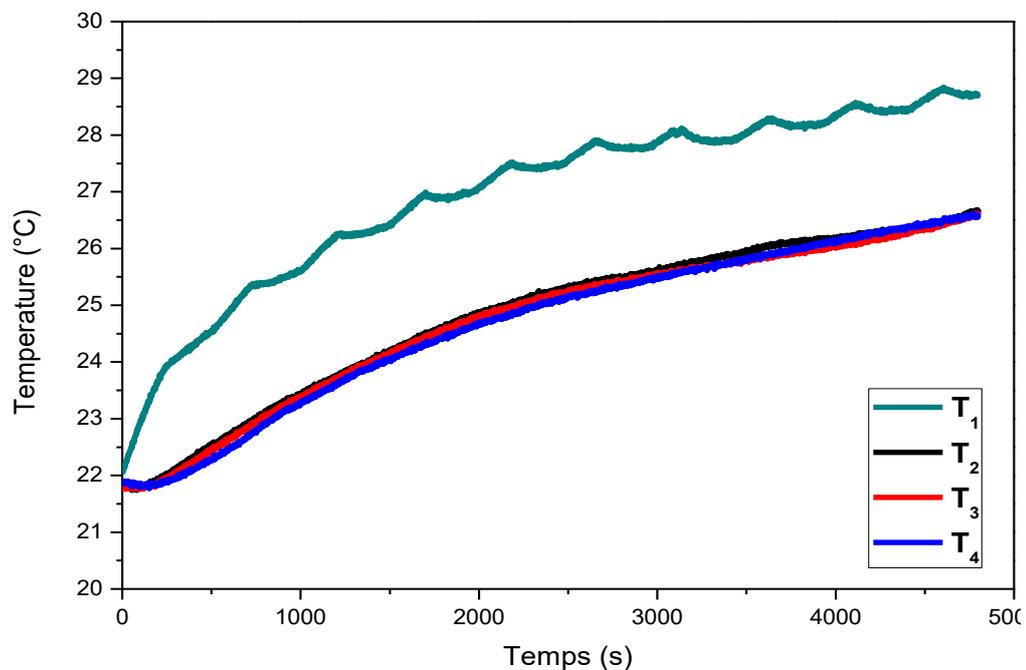


Figure 85: Évolution de la température RT27 pure- 5mm, sans convection forcée

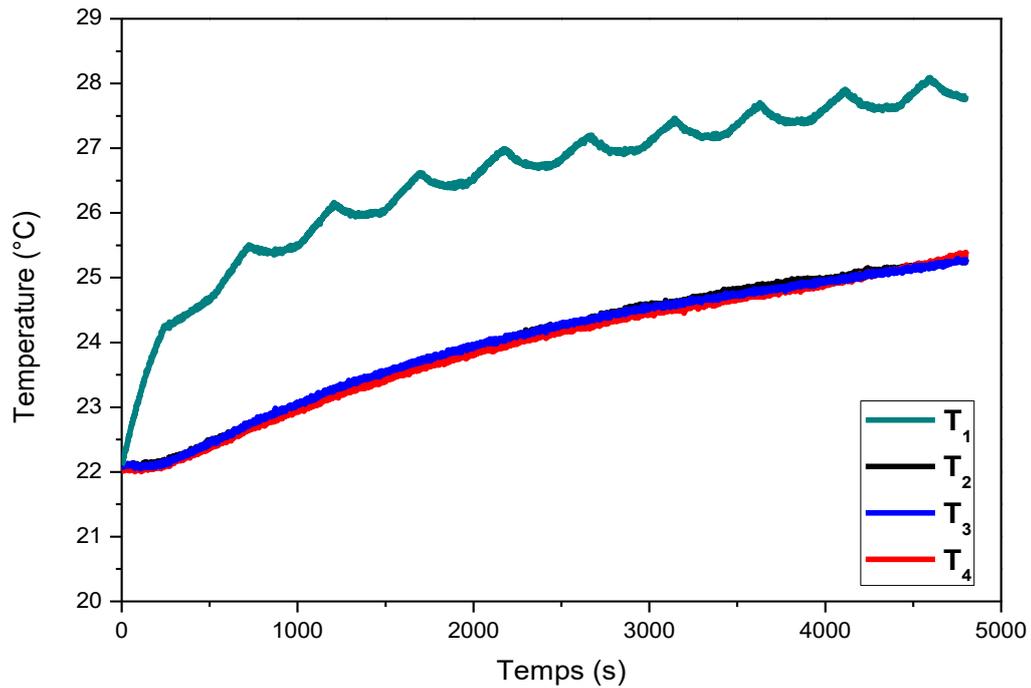


Figure 86: Évolution de la température RT27 pure- 7mm, sans convection forcée

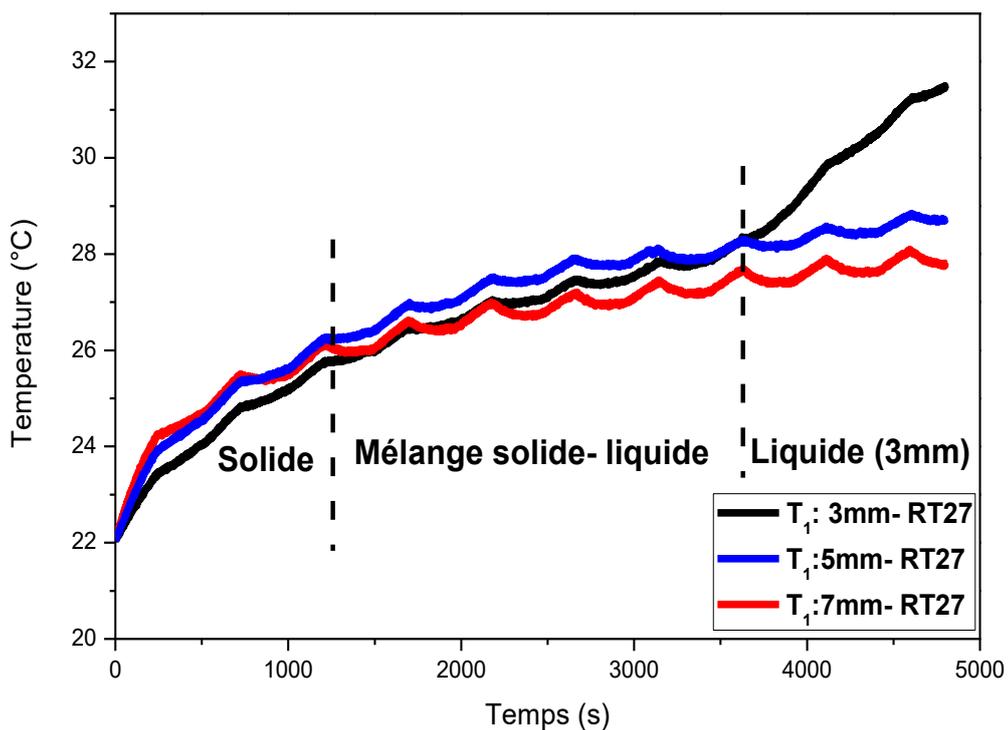


Figure 87: Influence de la masse du MCP sur la température de la cellule, sans convection forcée

L'évolution de la température dans le cas d'un composite MM- MCP sans convection forcée a été évaluée pour les épaisseurs 3mm et 7mm. L'évolution des températures mesurées T_1 , T_2 , T_3 et T_4 sont présentées sur la Figure 88, $e=3\text{mm}$ et sur la Figure 89, $e=7\text{mm}$. Les résultats montrent que l'ajout d'une mousse métallique a

Étude expérimentale du comportement thermique des cellules Li-Ion, dimensionnement et optimisation d'un système de gestion thermique passif 112

permis de réduire d'une façon notable l'écart de température entre la cellule et le composite MM- MCP à cause de l'amélioration de la conductivité effective du composite RT27/ Mousse métallique. L'écart entre T_1 et T_2 est de 2.5°C dans le cas de la paraffine RT27 pure et de 1.6°C dans le cas MA-RT27, $e=7\text{mm}$. Ces résultats sont en accord avec les résultats de l'étude numérique.

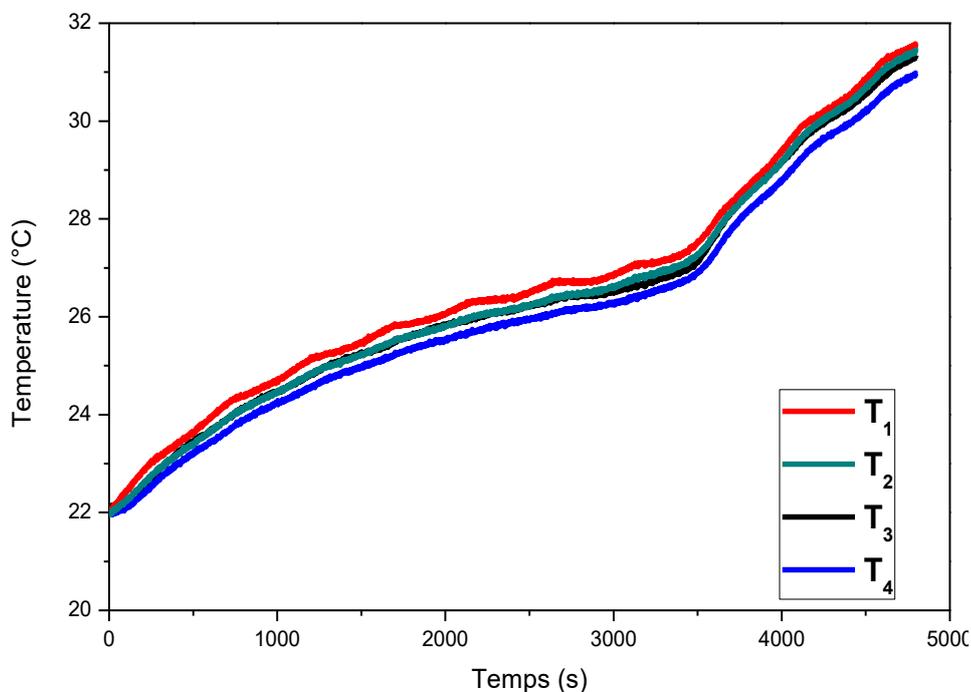


Figure 88: Évolution de la température MA- RT27- 3mm, sans convection forcée

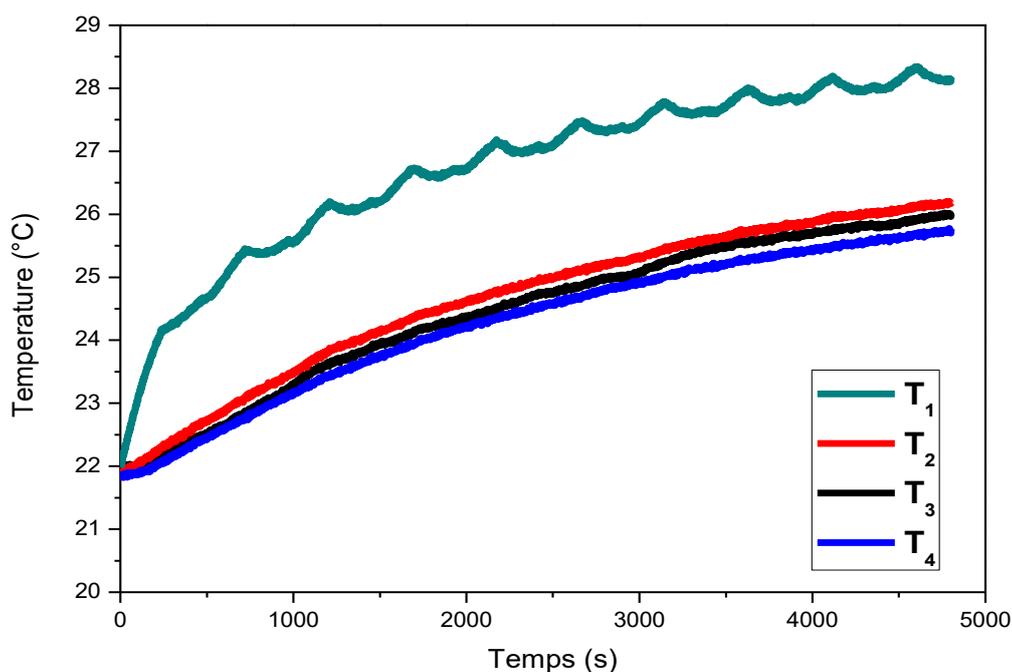


Figure 89: Évolution de la température MA- RT27- 7mm, sans convection forcée

4.1.4. Distribution de température- avec convection forcée

Afin de tester l'effet de la convection sur l'état thermique de la cellule, la ventilation est activée dans le but d'assurer une température homogène dans la chambre climatique (22°C). Les figures 90 et 91 présentent respectivement l'évolution temporelle de la température enregistrée pour la paraffine pure RT27, $e = 3\text{mm}$ et $e = 7\text{mm}$. Les résultats montrent que le régime permanent est atteint plus rapidement dans le cas de 3mm avec une homogénéité thermique suivant l'épaisseur ($T_2 = T_3$). Il est intéressant de constater aussi que dans les deux configurations étudiées, la paraffine n'est pas totalement fondue à la fin du test. Ceci peut être attribué aux pertes thermiques par convection forcée.

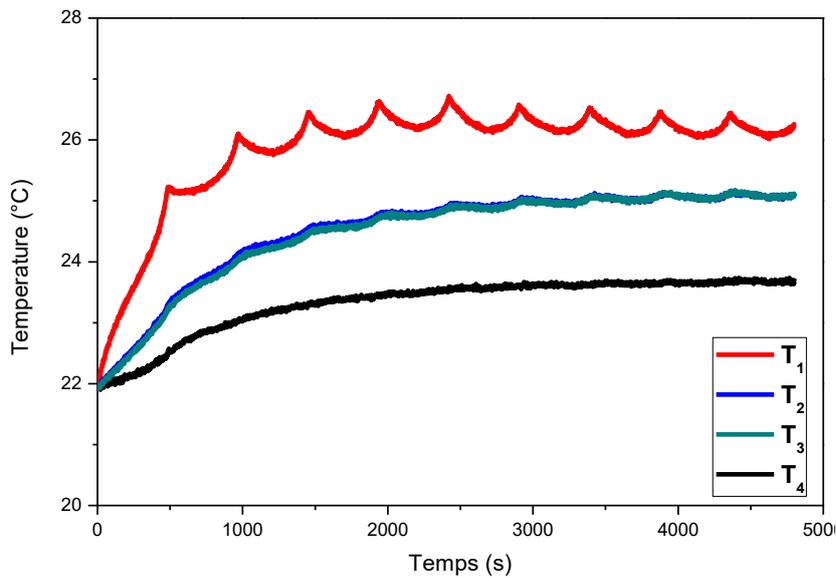


Figure 90: Évolution de la température RT27 pure- 3mm, convection forcée

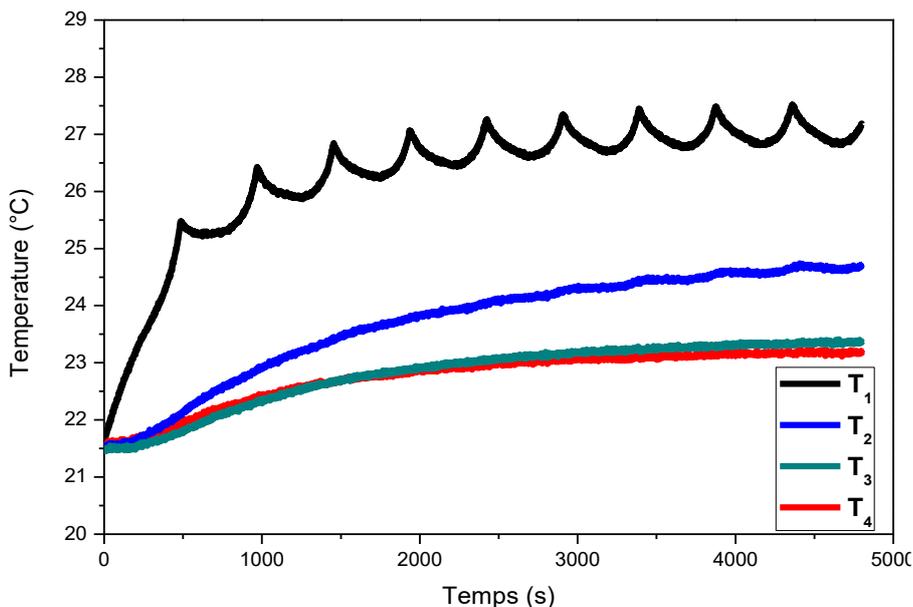


Figure 91: Évolution de la température RT27 pure- 7mm, convection forcée

L'impact de la quantité de MCP utilisée est évalué pour les trois épaisseurs étudiées ($e=3\text{mm}$, $e=5\text{mm}$ et $e=7\text{mm}$) dans le cas d'une température ambiante imposée avec ventilation (convection forcée). Les essais sont déroulés dans les mêmes conditions : courant 1C (2.6A) pour dix cycles charges/ décharges de 8minutes sous une température ambiante de 22°C . La Figure 92 présente l'évolution temporelle de la température de la surface de la cellule mesurée par le thermocouple T_1 pour les différentes épaisseurs étudiées. Les résultats ont montré que l'augmentation de l'épaisseur du MCP a un impact négatif sur la gestion thermique de la cellule. En effet, le MCP a une faible conductivité thermique, ce qui diminue l'intensité du transfert de chaleur vers l'extérieur. Dans ce cas il faut combiner ce système avec un système de gestion actif (air, liquide caloporteur.).

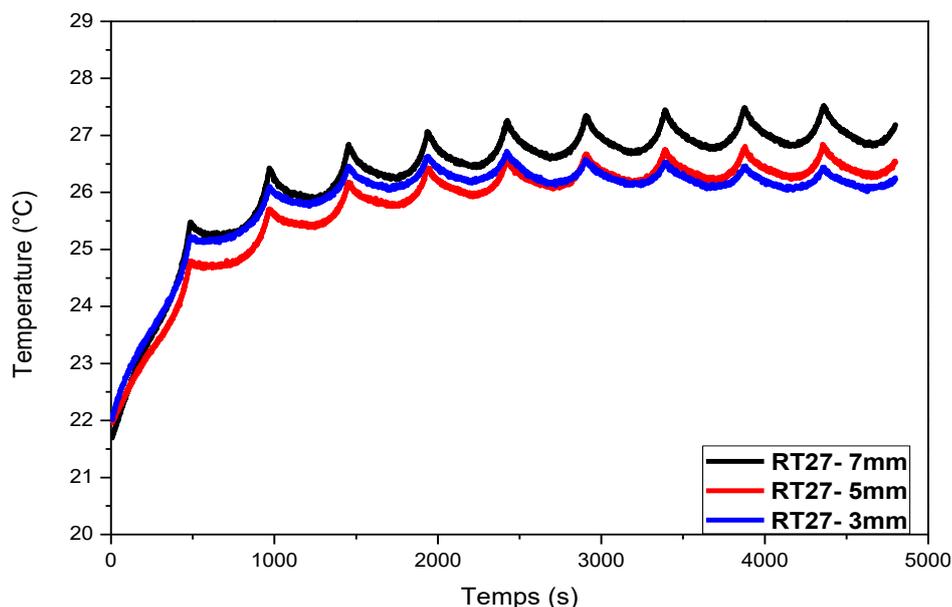


Figure 92: Influence de la masse du MCP utilisé avec convection forcée

4.1.5. Impact de l'ajout d'une mousse métallique et de la convection forcée

L'impact de la mousse métallique sur l'état thermique de la cellule est évalué pour le moule $e=3\text{mm}$, sans et avec convection forcée. Les mesures de la température T_1 sont présentées sur la Figure 93, sans convection forcée. Dans cette figure, on peut voir que l'ajout de la mousse métallique réduit la température de la cellule durant le processus de la fusion. En effet, l'ajout d'une mousse conductrice intensifie le transfert de chaleur. Ce qui donne -à priori- un impact plus important dans le cas de la présence d'une convection forcée. Pour confirmer ou infirmer cela, la température de la cellule avec de la paraffine RT27 pure a été comparée à celle avec un composite MA- RT27 (Figure 94, avec convection forcée). La comparaison montre un écart moyen de température en régime permanent d'environ un 1.2°C entre la température de la cellule avec de la RT27 pure et avec le composite MA (0.93, 40PPI)- RT27.

Étude expérimentale du comportement thermique des cellules Li-Ion, dimensionnement et optimisation d'un système de gestion thermique passif 115

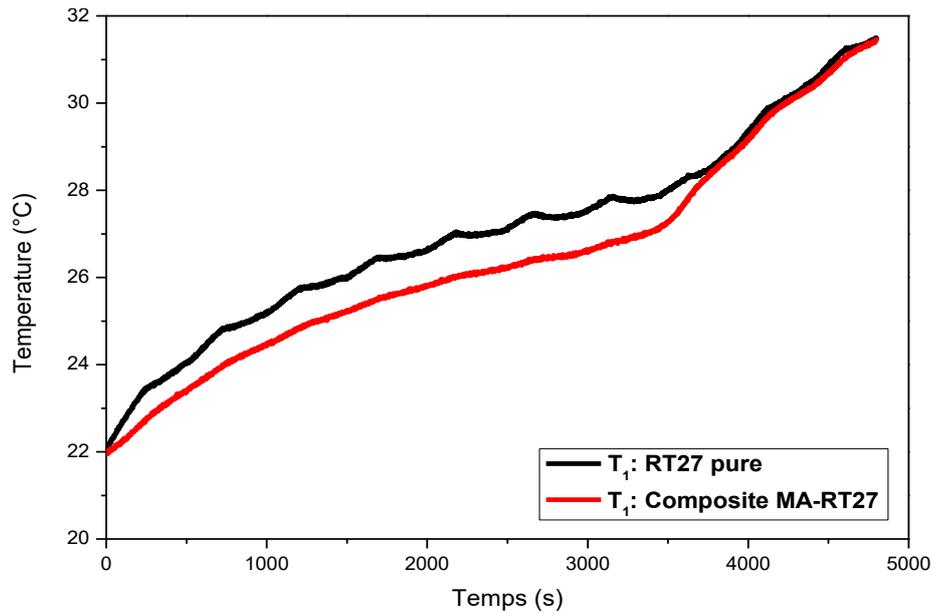


Figure 93: Impact de l'ajout d'une mousse métallique sur la température de la cellule sans convection forcée

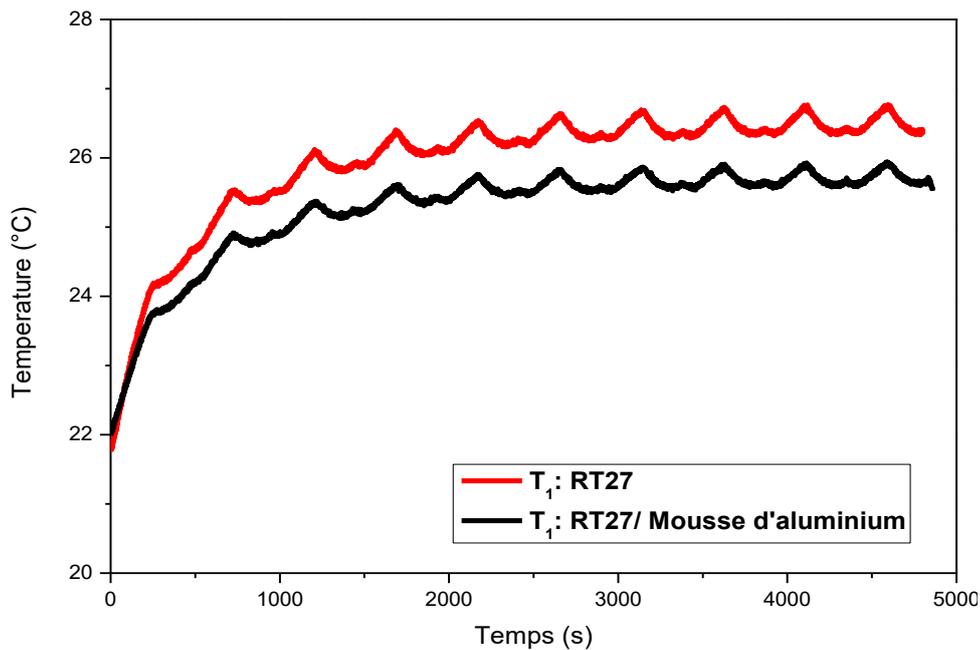


Figure 94: Impact de l'ajout d'une mousse métallique sur la température de la cellule avec convection forcée.

La Figure 95 présente l'évolution temporelle de la température de la cellule sans et avec convection forcée dans le cas d'un composite MA- RT27, $e=7\text{mm}$. On observe qu'avec la convection forcée le régime permanent est atteint après environ 5 cycles, alors qu'en convection naturelle la température de la cellule continue à augmenter. En comparant les températures en fin des tests, nous observons que la température de la cellule avec isolation atteint 28.5°C tandis que celle avec convection atteint 26.3°C . On observe une différence en température d'environ 2.2°C .

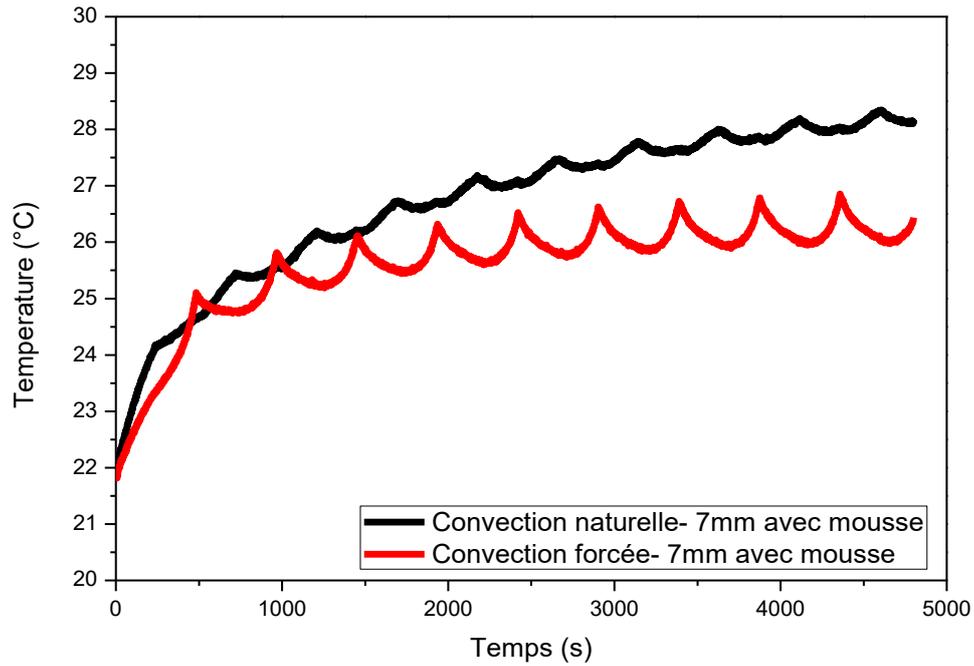


Figure 95: Influence de la convection forcée sur l'état thermique de la cellule

4.1.6. Comparaison entre la température de la cellule prédite et mesurée

Afin de valider la démarche numérique utilisée dans la section 4.4. La Figure 96 présente une comparaison entre la température de la cellule mesurée par le thermocouple T_1 et celle résultante de la simulation pour une épaisseur de 3mm de la paraffine pure. On observe que l'écart maximal entre la température mesurée et simulée est de l'ordre de 0.87°C .

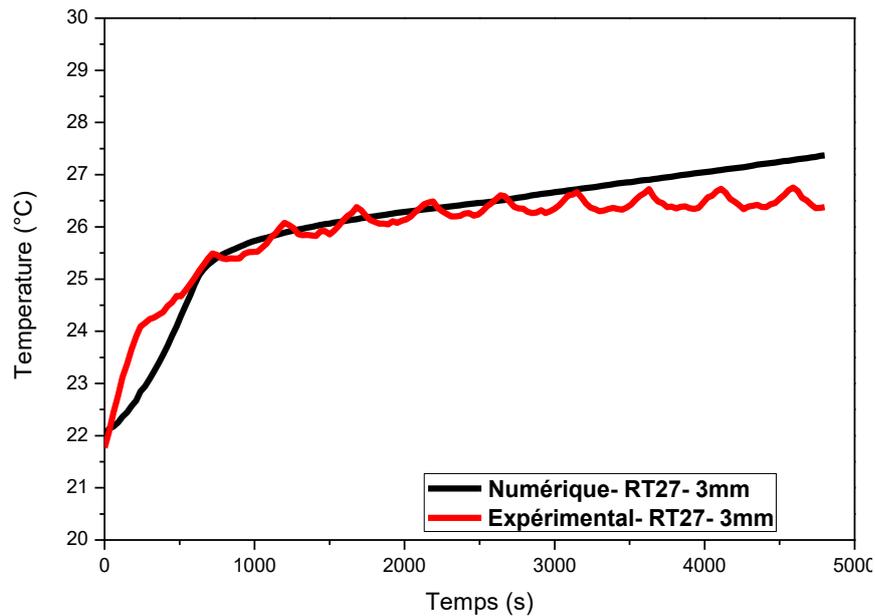


Figure 96 : Comparaison entre les résultats numériques 2D et expérimentaux, RT27 pure

Étude expérimentale du comportement thermique des cellules Li-Ion, dimensionnement et optimisation d'un système de gestion thermique passif 117

La Figure 97 présente l'évolution temporelle de la température de la cellule mesurée par le thermocouple T₁ et celle résultante de la simulation pour une épaisseur de 3mm du composite MA- RT27. L'écart maximal entre la température mesurée et simulée est de 0.71°C. On observe également la disparition des fluctuations de température observée dans la température mesurée. En effet, dans le modèle numérique le contact entre la cellule et la paraffine est supposé parfait. En outre, le fluxmètre mesure la densité de flux moyenne d'où les faibles fluctuations dans la densité de flux mesurée par comparaison avec la température. La convection naturelle est négligée. La comparaison montre un bon accord entre l'expérimental et le numérique.

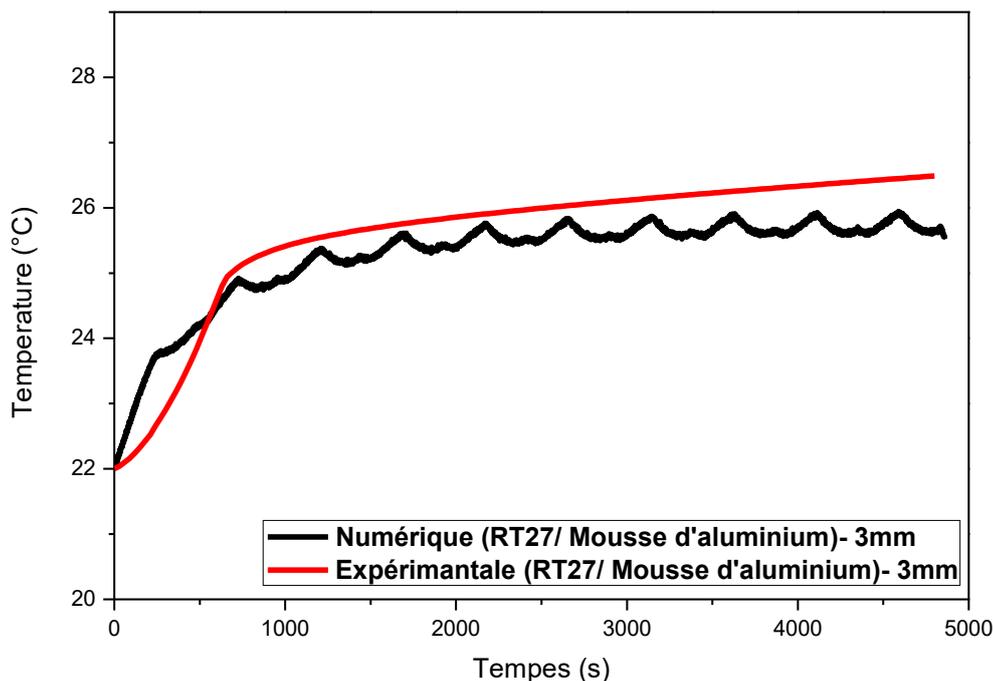


Figure 97: Comparaison entre la température de la cellule simulée et mesurée, MA- RT27

L'écart observé entre les résultats numériques et expérimentaux aussi bien dans le cas de la paraffine RT27 pure que du composite RT27/ Mousse d'aluminium est expliqué par les simplifications faites au niveau du modèle 2D à savoir :

- La convection naturelle est négligée
- Le flux thermique axial dissipé par la cellule est négligé
- Le rayonnement est négligé
- Le contact entre le moule en aluminium et la cellule et entre le composite et le moule est supposé parfait
- Le fluxmètre mesure le flux différentiel moyen (en surface de la cellule)

Dans le but d'améliorer le modèle numérique et de se rapprocher des conditions de l'expérimental, une correction est portée au modèle numérique. Pour pouvoir prendre en considération les conditions aux limites nous passerons au 3D avec la prise en compte du flux thermique axial et de la convection naturelle.

Étude expérimentale du comportement thermique des cellules Li-Ion, dimensionnement et optimisation d'un système de gestion thermique passif 118

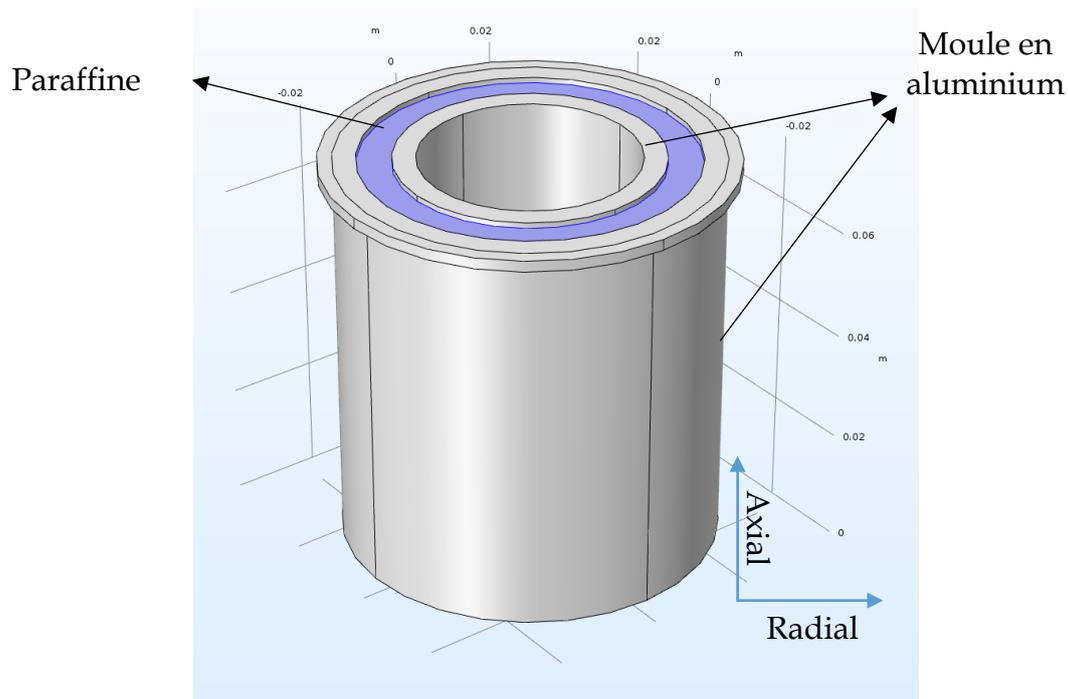


Figure 98: Représentation 3D du moule avec MCP

La densité du flux thermique axial est mesurée grâce à un fluxmètre qui a la forme d'un disque avec un diamètre de 18.5mm (Figure 99). Le disque est collé à la face inférieure de la cellule (Figure 100). La Figure 101 présente une comparaison entre la densité de flux axiale et radiale. Les résultats montrent que la densité de flux thermique axiale est plus importante. Nous pouvons supposer dès à présent que les cellules Li-ion ont une conductivité thermique axiale plus importante par comparaison à la radiale. Pour confirmer cette hypothèse une caractérisation de la conductivité thermique des cellules a été réalisée. Les résultats ont été présentés dans 4.5. Il a été trouvé que la conductivité axiale est de $31,2W/(m.K)$ et la conductivité radiale est de $0.2 W/(m.K)$.

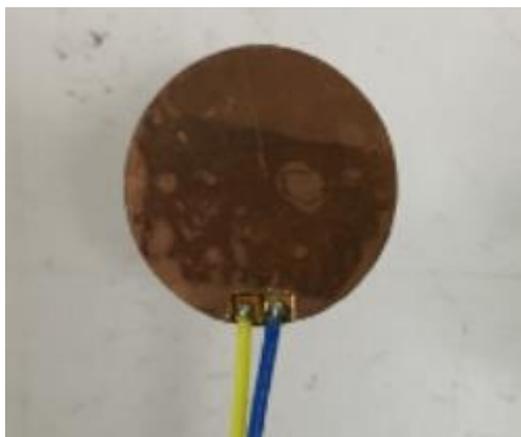


Figure 99 : Fluxmètre « disque »

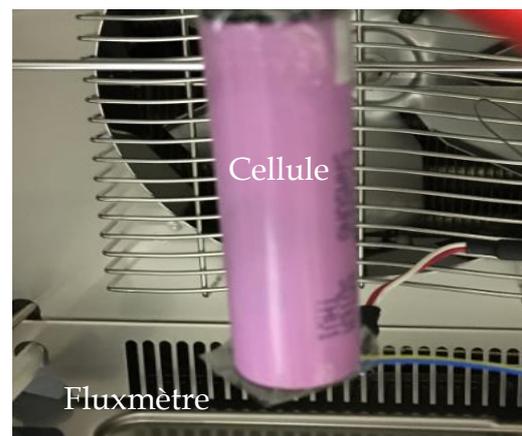


Figure 100 : Cellule de batterie instrumentée par un fluxmètre « disque »

Étude expérimentale du comportement thermique des cellules Li-Ion, dimensionnement et optimisation d'un système de gestion thermique passif 119

La Figure 102 présente l'évolution temporelle du flux radial versus axial. On remarque que le flux axial est faible par rapport au flux radial. En effet, le flux axial représente environ 0.9%, et le radial 99.1%.

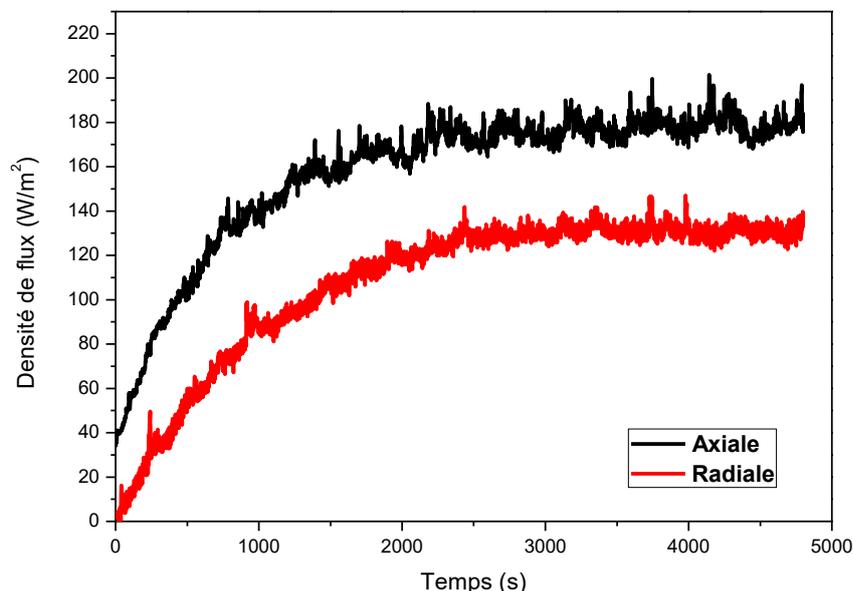


Figure 101: Densité de flux radiale et axiale

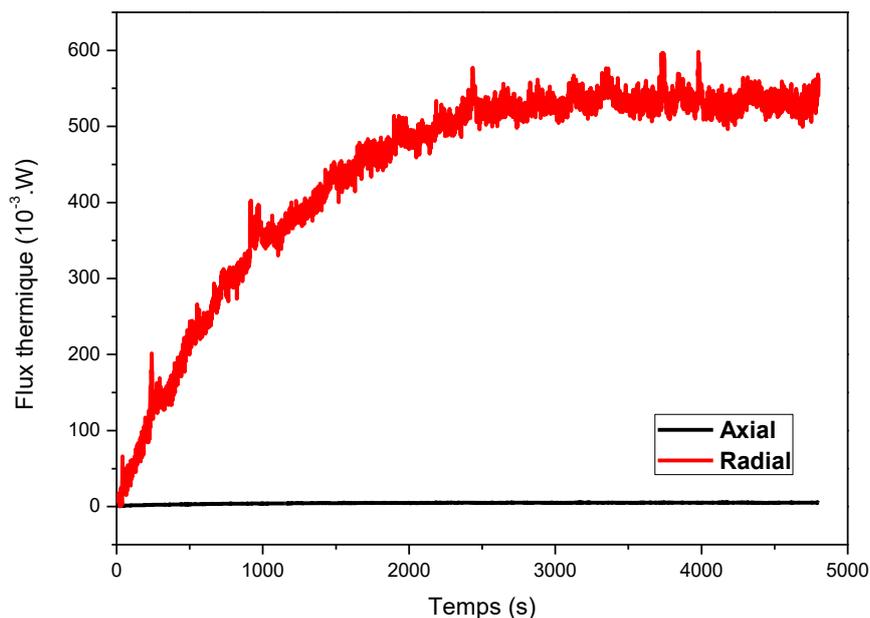


Figure 102: Flux radial et flux axial

La cellule de batterie étant soumise à la convection naturelle. Un coefficient d'échange convectif peut-être calculé en régime permanent en se basant sur la densité de flux mesurée. Le coefficient d'échange est calculé par l'équation suivante :

$$h_{conv} = \frac{q}{T_{perm} - T_{amb}} \quad (59)$$

Avec T_{amb} est la température ambiante et T_{perm} est la température de la cellule en régime permanent.

Étude expérimentale du comportement thermique des cellules Li-Ion, dimensionnement et optimisation d'un système de gestion thermique passif 120

La Figure 103 présente une comparaison entre la température de la cellule mesurée par le thermocouple T_1 et celle résultante de la simulation (2D et 3D) dans le cas de la paraffine RT27 pure, $e=3\text{mm}$. On observe que le modèle 3D donne un meilleur accord avec les résultats expérimentaux. Les mêmes résultats sont obtenus pour la gestion thermique en utilisant une mousse métallique-RT27, la Figure 104.

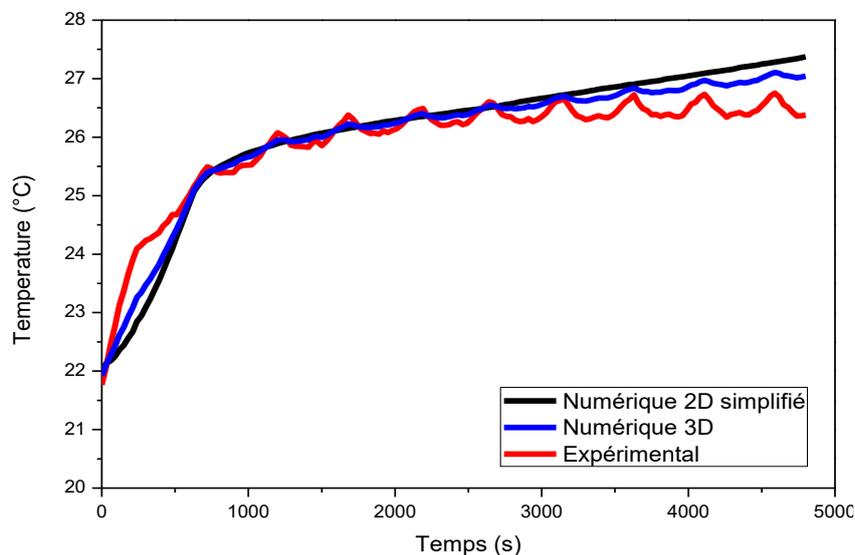


Figure 103: Comparaison entre les résultats numériques et expérimentaux

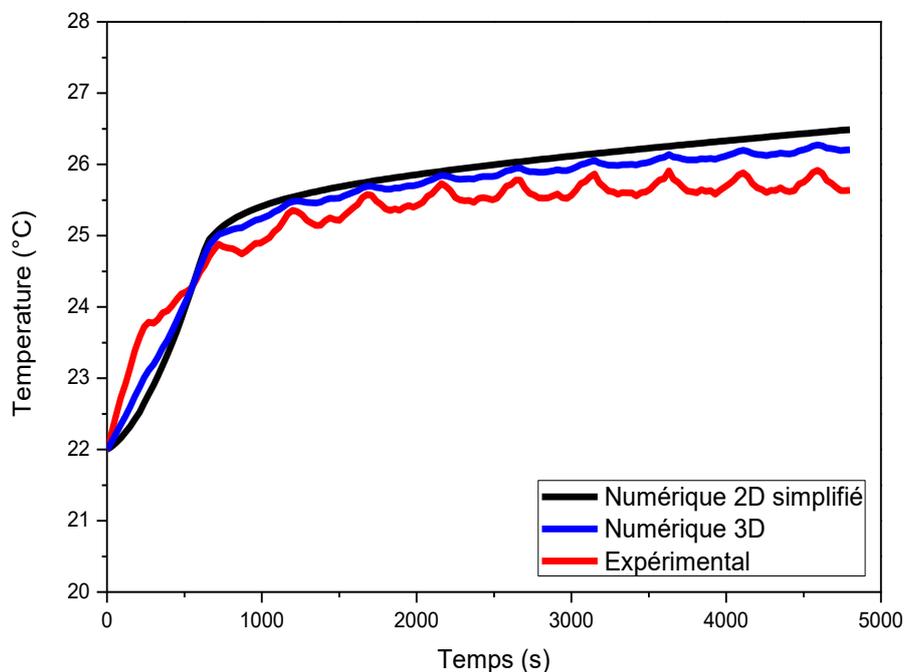


Figure 104: Comparaison entre les résultats numériques et expérimentaux

4.2. Modélisation thermoélectrique

La modélisation des batteries électrochimiques permet de reproduire leur fonctionnement en simulation. Dans la présente étude, nous allons coupler les modèles électrique et thermique pour construire un modèle électrothermique de la batterie. La *Figure 105* présente une schématisation du modèle thermoélectrique. Le modèle électrothermique permet de suivre l'évolution temporelle de la tension et de la température tout au long de son utilisation. Le modèle électrique permet de représenter via le courant de sollicitation de la batterie l'évolution de sa tension. Le modèle thermique prend en compte la température ambiante et les pertes de puissance internes pouvant être déduites du modèle électrique pour permettre l'accès à la température de la batterie.

4.3. Modélisation électrique d'une batterie Li-ion

La modélisation électrique des batteries Li-ion est nécessaire pour prédire son comportement électrique et thermique. Le modèle électrique doit reproduire le plus précisément possible la réponse en tension de l'accumulateur, estimer l'état de charge mais aussi estimer les pertes ohmiques qui constituent la première source de chaleur dans un accumulateur Li-ion. Pour ce faire, une bonne connaissance des phénomènes électrochimiques est nécessaire, mais également une bonne identification de certains paramètres.

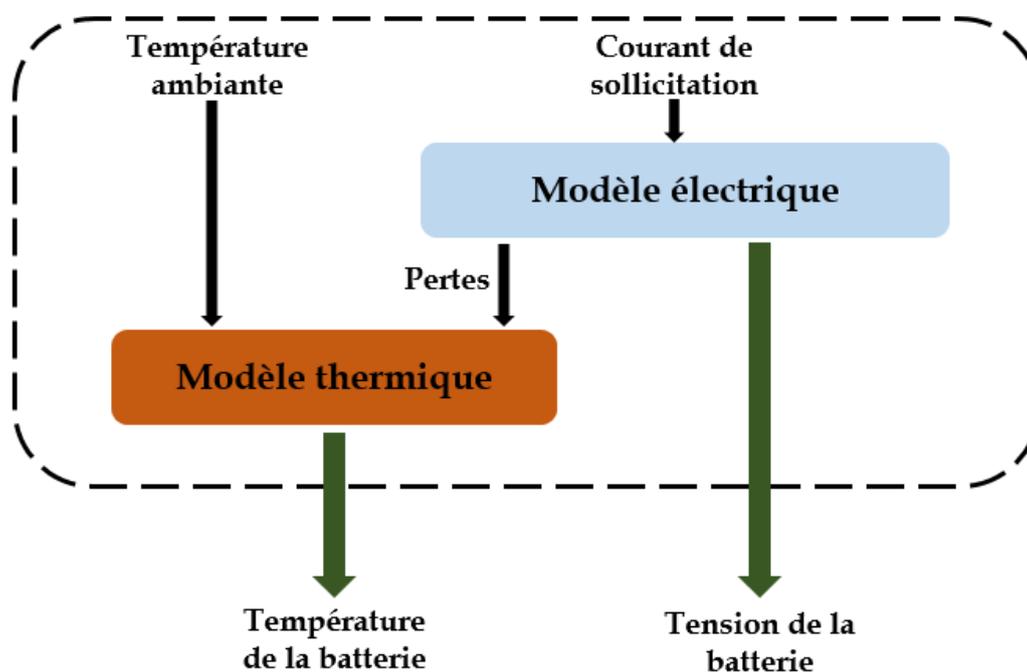


Figure 105: Modèle électrothermique de la batterie

Dans la littérature, on trouve différentes approches pour modéliser le comportement électrique des batteries électrochimiques [70,71,160,169-171]. Dans

cette section, on présentera une revue des différentes approches souvent utilisées avec un choix justifié du modèle circuit équivalent 2RC dans le cadre de notre travail.

Il existe trois principaux types de modèles pour représenter le comportement temporel des batteries : les modèles électrochimiques, les modèles de type circuit équivalent et les modèles de type boîte noire (par exemple, modèle utilisant un réseau de neurones ou une logique floue).

4.3.1. Modèle électrochimique

La modélisation électrochimique décrit les phénomènes de transfert de masse, d'énergie et la dynamique de chaque substance en fonction des phases et chaque composition de batterie. Elle prend donc en compte : les réactions électrochimiques au niveau des électrodes ; les bilans de masse ; les bilans de charge électrique et les bilans énergétiques. La complexité de ces modèles demande de très bonnes connaissances en électrochimie et nécessite d'avoir accès à beaucoup d'information physique comme les coefficients de diffusion, les porosités, les conductivités ioniques, etc [70]. L'inconvénient de ce type de modélisation est le grand nombre de paramètres à renseigner et le temps de calcul. Ces modèles conduisent généralement à résoudre des équations différentielles couplées pour chaque dimension de l'espace. Ils sont extrêmement importants pour comprendre et améliorer les propriétés chimiques des cellules ; en revanche, ils sont rarement utilisés pour reproduire le comportement électrique des cellules électrochimiques [172].

4.3.2. Modèles heuristiques (boîtes noires)

Le modèle de boîte noire provient de l'utilisation du modèle par apprentissage en utilisant des réseaux de neurones ou une logique floue pour estimer les performances de la batterie. La différence entre les modèles précédents est qu'il n'est pas nécessaire de comprendre les phénomènes électrochimiques, mais il doit avoir une phase d'apprentissage des données réelles (tension, courant, température ...). L'avantage de ces modèles est qu'ils permettent d'estimer les performances de la batterie en fonction de l'expérience acquise lors de la phase d'apprentissage. Cependant, leur précision est affectée par les données et les méthodes utilisées [173].

4.3.3. Modèles empiriques

Ces modèles sont basés sur des modèles classiques testés expérimentalement, qui enregistrent et répertorient les performances de la batterie. La faiblesse de ces modèles est qu'ils ne prennent pas en compte tous les paramètres et doivent également tester tous les types d'accumulateurs.

4.3.4. Modèles par circuit électrique équivalent

Les modèles par circuit équivalent permettent de faire des analogies avec l'électrochimie en utilisant un circuit électrique équivalent (CEE). Chaque comportement physico-chimique peut se rapporter à un dipôle d'un circuit électrique, comme une résistance, une impédance ou une capacité [70,174-176]. Ces modèles ont une approche globale des comportements de la batterie, et peuvent être statique ou

dynamique selon le niveau de précision souhaité (prise ou pas en compte d'un régime transitoire). Ils nécessitent cependant une bonne identification des paramètres électriques afin de pouvoir prédire correctement les réponses en tension et en état de charge de la cellule. Pour des applications qui n'exigent pas de détail sur les phénomènes électrochimiques, ce modèle est très pratique [177-180].

4.3.5. Modèle de Randles

La réaction d'oxydo-réduction peut être représentée par un circuit électrique équivalent de Randles. Le modèle de Randles "classique" est composé de [70,181,182]:

- Une source de tension U_{oc} qui représente la tension d'équilibre à vide (OCV : open circuit voltage)
- Une résistance R_0 qui représente les contributions résistives de l'électrolyte et des collecteurs de courant.
- Une résistance R_1 et une capacité C qui représentent respectivement les phénomènes de transfert de charge et de double couche qui ont lieu à l'interface entre l'électrolyte et les matériaux actifs.
- Une impédance de diffusion équivalente Z qui reproduit le comportement électrique apparent du phénomène de diffusion des charges au sein des matériaux actifs.

La figure (Figure 106) ci-dessous présente une schématisation de modèle de Randles.

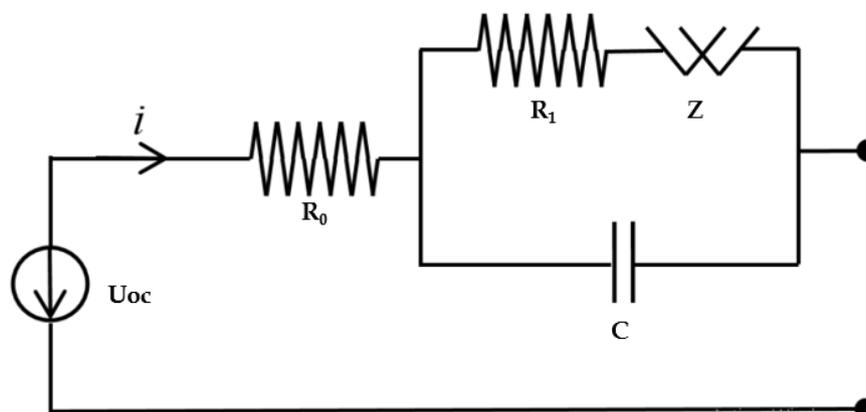


Figure 106: Modèle de Randles

4.3.6. Choix du modèle

Dans notre étude, nous optons pour un modèle de Randles temporel modifié et simplifié à un modèle que nous dénommons Modèle de Randles Modifié (MRM) présenté à la Figure 107. L'inductance est négligée, car elle reste très faible comparée aux autres phénomènes résistifs et capacitifs de l'impédance, dans le domaine temporel [70]. Ce modèle électrique de la batterie s'adapte bien à notre application puisqu'il ne nécessite pas la connaissance des phénomènes électrochimiques. De plus,

en termes de simplicité d'identification et d'implémentation, ce modèle est disponible dans la bibliothèque MATLAB/SIMULINK.

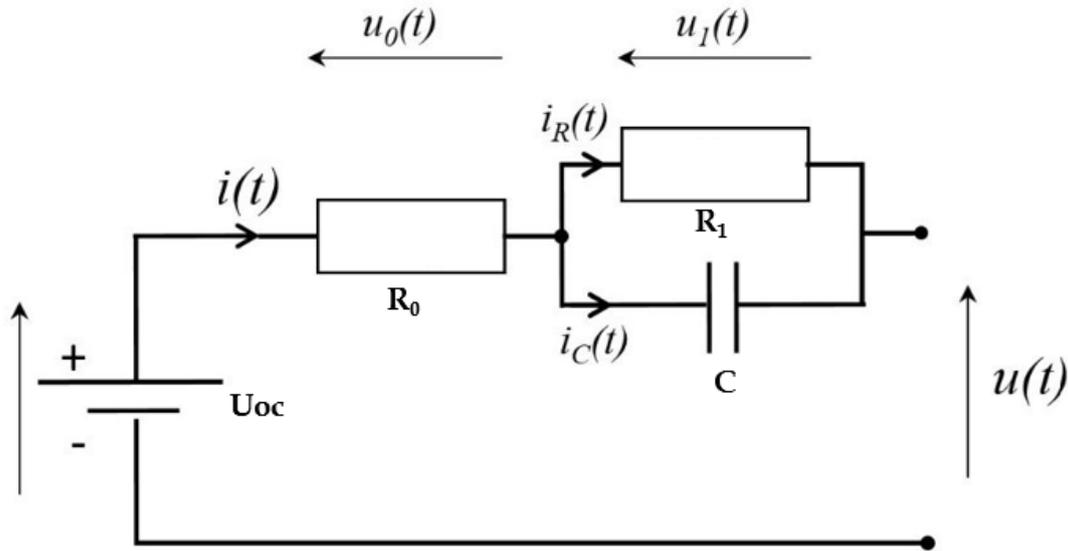


Figure 107: Modèle de Randles Modifié (MRM)

Le modèle présenté ci-dessus permet de modéliser une dynamique globale du comportement de la batterie. Le comportement dynamique dans ce type d'approche simplifiée est considéré connu. La résistance R_0 représente la somme de la résistance de l'électrolyte et du transfert de charge, la résistance R_1 représente la résistance de diffusion, et la capacité C est représentative des phénomènes diffusifs à l'intérieur de la batterie. Remarquons que cette simplification ne permet pas de dissocier les phénomènes de transfert de charge et de la capacité de double couche ayant des dynamiques beaucoup plus rapides et par conséquent des constantes de temps très courtes comparées à la diffusion. Il est difficilement envisageable de vouloir dissocier ces phénomènes très rapides par analyse temporelle à cause des fréquences d'acquisition et des niveaux de précision de l'appareillage d'expérience. La solution analytique du modèle électrique est donnée par relation suivante :

$$u(t) = U_{oc} - R_0 \cdot i(t) - R_1 \cdot i(t) \left[1 - e^{-t/R_1 C} \right] \quad (60)$$

4.4. Modélisation thermique de la batterie

4.4.1. Les sources de chaleur

4.4.1.1. La chaleur irréversible

La chaleur irréversible, est décrite par la chaleur de polarisation. Elle représente la perte irréversible d'énergie système.

$$Q_{pol} = I(U - U_{ocv}) \approx RI^2 \quad (61)$$

Avec R la résistance ohmique.

4.4.1.2. La chaleur réversible

La seconde source de chaleur, il s'agit de la chaleur de la réaction chimique. Cette chaleur provient de la variation d'enthalpie (ΔH) qui induit une variation d'entropie (ΔS).

$$\Delta H = \Delta G + T\Delta S \quad (62)$$

Où ΔG est la variation de l'énergie libre de Gibbs et correspond au travail électrique. En prenant cette équation comme point de départ, Allart dans [70] a montré que la chaleur réversible dans une batterie Li-ion peut être calculée par l'équation suivante :

$$Q_{rev} = IT \frac{\partial U_{ocv}}{\partial T} \quad (63)$$

Cette quantité de chaleur Q_{rev} , de nature thermodynamique est réversible. C'est-à-dire selon la signature du courant et de l'entropie, cette quantité d'énergie peut être positive ou négative. Actuellement, la majorité des modèles de la littérature ne calculent pas cette quantité mais utilisent des interpolations [68,70,71,74].

4.4.2. Modélisation thermique

Dans la littérature, on trouve principalement deux méthodes de modélisation thermique pour les batteries électrochimiques (Li-ion). Les modèles couplant l'électrochimie à la thermique [71,182,183] et les modèles basés sur un pur bilan thermique dans lequel seules les générations de chaleurs principales (Pertes par effet Joule et chaleur thermodynamique) sont prises en compte [68,70,74,184].

Les modèles de couplage de l'électrochimie et la thermique donnent –en général– une bonne précision et une robustesse à l'échelle locale et la possibilité de simuler en deux ou trois dimensions. Cependant, le couplage de l'électrochimie et la thermique nécessitent une connaissance très fine de la batterie (porosité des électrodes, concentration, chimie de l'électrolyte, dimensions des particules, etc) et il est parfois très difficile de pouvoir caractériser finement les aspects électrochimiques et thermiques. Ils sont lourds numériquement, les temps de calcul pour ces types de modèles sont très souvent longs et nécessitent une puissance de calcul importante.

Dans la présente étude, la thermique de la batterie est modélisée en suivant une approche basée sur les deux sources de la chaleur générée par la batterie et en négligeant la source thermodynamique.

$$m.C_p \frac{dT}{dt} = -h.S.(T_{batt} - T_a) + Q_{gen} \quad (64)$$

La résolution de cette équation nécessite la détermination des propriétés thermophysiques de la cellule qui sera l'objet de la section suivante.

4.5. Caractérisation thermophysique des cellules

Afin d'obtenir un modèle thermique fiable, il est nécessaire de connaître un certain nombre d'informations concernant l'accumulateur et les conditions expérimentales des essais. Il s'agit des données d'entrée du modèle. Les données géométriques et la masse sont fournies par le fabricant. Dans cette section, nous nous intéressons à la caractérisation thermophysique des cellules, basée notamment sur la détermination de :

- La capacité calorifique
- La masse volumique

Les propriétés thermiques de la batterie ont été déterminées en utilisant la méthode Hot-Disk transitoire [185]. L'analyseur Hot Disk a été présenté dans le chapitre 4. L'utilisation de Hot-Disk pour la caractérisation thermique des batteries Li-ion est décrite dans [186]. La Figure 108 présente le montage utilisé pour caractériser les propriétés thermiques des cellules. Le **Tableau 21** résume les propriétés thermophysiques des batteries utilisées dans le cadre de cette étude.

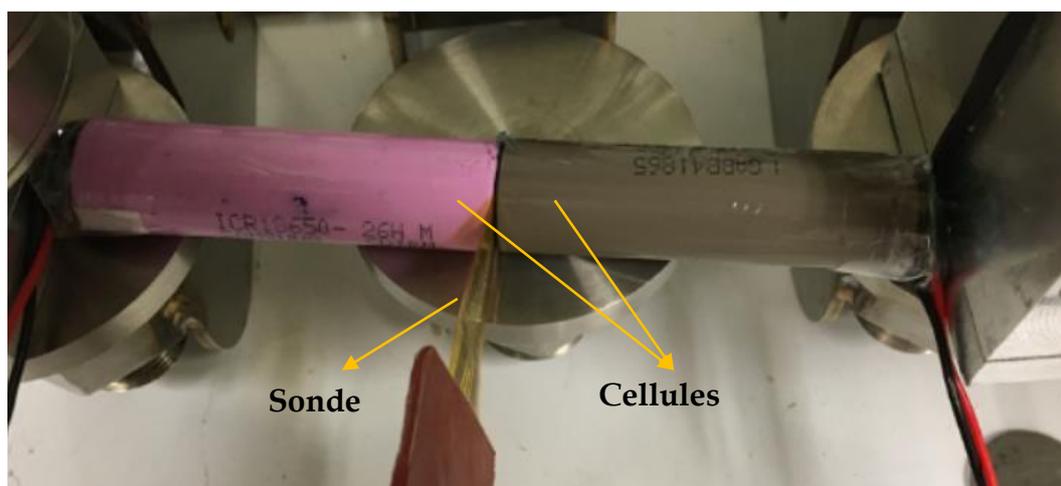


Figure 108 : Caractérisation thermique des cellules par Hot-Disk

	Conductivité thermique axiale	Conductivité thermique radiale	Capacité calorifique	Masse volumique
	$W.m^{-1}.K^{-1}$	$W.m^{-1}.K^{-1}$	$J.kg^{-1}.^{\circ}C^{-1}$	$Kg.m^{-3}$
Cellule 18650	31.15	0.2	1726	2700

Tableau 21: Propriétés thermophysiques de la batterie

4.6. Modélisation sur MATLAB Simulink

Dans cette section, nous présentons la démarche utilisée pour implanter le modèle MRM dans MATLAB Simulink.

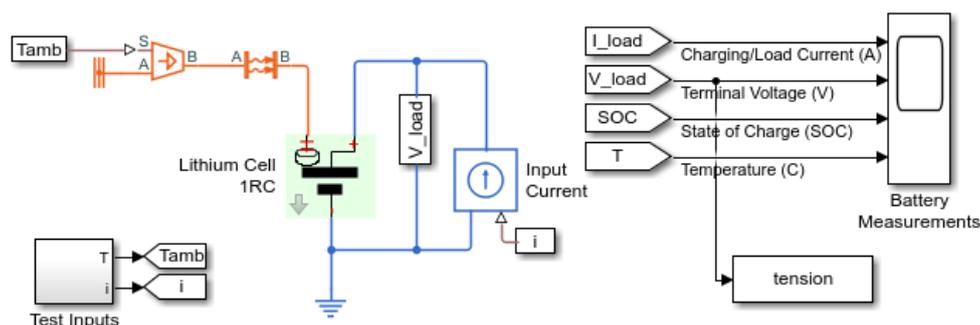
Étude expérimentale du comportement thermique des cellules Li-Ion, dimensionnement et optimisation d'un système de gestion thermique passif 127

Nous avons considéré que les composants de ce modèle ne dépendent que de l'état de charge, en négligeant l'effet de la température et du cycle de charge et décharge pour faire la modélisation électrique.

En vue de modéliser la variation des composants de batterie (R_0 , R_1 , C_1 , OCV) en fonction du SOC, nous avons utilisé, sous Matlab, des Look-up table qui font correspondre à chaque valeur de SOC des valeurs données de (R_0 , R_1 , C_1 , OCV). On a considéré un pas de 0.1(10%) pour la variation du SOC.

En raison de la dépendance des paramètres de l'état de charge, l'utilisation des résistances et des capacités de la bibliothèque Simscape pour le modèle n'est pas optimale, il faut créer de nouveaux composants qui modélisent cette dépendance, ce qui est possible à l'aide du langage Simscape qui nous permet de créer n'importe quel composant (électrique, mécanique, hydraulique...), qui peut varier d'une façon non linéaire.

À l'aide du langage Simscape et des bibliothèques du MATLAB on a utilisé la bibliothèque « Lithium Battery cell- One RC Branch équivalent circuit » et qu'il faut modifier selon les caractéristiques de la batterie.



Lithium Battery Cell - One RC-Branch Equivalent Circuit

1. [Plot current and SOC for battery \(see code\)](#)
2. [Explore simulation results using sscexplore](#)
3. [Open custom library](#) used by Battery Cell block
4. [Learn more](#) about this example

Figure 109: Interface du modèle Simscape

Pour créer un nouveau composant personnalisé, on définit une classe de modèle de composant en écrivant un fichier de composant qui doit commencer par le mot-clé du composant, suivi du nom du composant et qui doit se terminer par le mot-clé de fin.

Les fichiers de composants peuvent contenir les sections suivantes, apparaissant dans n'importe quel ordre :

- Déclaration : contient toutes les déclarations de classe membre pour le composant, telles que les paramètres, les variables, les nœuds, les entrées et les sorties. Chaque déclaration de classe membre est un bloc de déclaration

Étude expérimentale du comportement thermique des cellules Li-Ion, dimensionnement et optimisation d'un système de gestion thermique passif 128

distinct, qui commence par le mot-clé approprié (correspondant à la classe membre) et se termine par le mot-clé « end ».

- Branches : établit la relation entre les variables de composant et les nœuds. Cette relation connecte les variables Through et Across déclarées à l'intérieur du composant aux variables Through et Across du domaine.
- Setup : prépare le composant pour la simulation. Le corps de la fonction de configuration peut contenir des instructions d'affectation, des instructions error, etc. La fonction de configuration est exécutée une fois pour chaque instance de composant lors de la compilation du modèle. Il ne prend aucun argument et ne renvoie aucun argument.
- Structure : déclare les connexions de composants pour les modèles composites
- Équation : déclare les équations des composants pour les modèles comportementaux. Ces équations peuvent être conditionnelles et sont appliquées tout au long de la simulation
- Events : gère les mises à jour des événements. La modélisation d'événements vous permet d'effectuer des modifications discrètes sur des variables continues.

Pour notre cas on utilise quatre composants (OCV, C1, R1, et R0) pour le modèle de Randles simplifié illustré à la Figure 107.

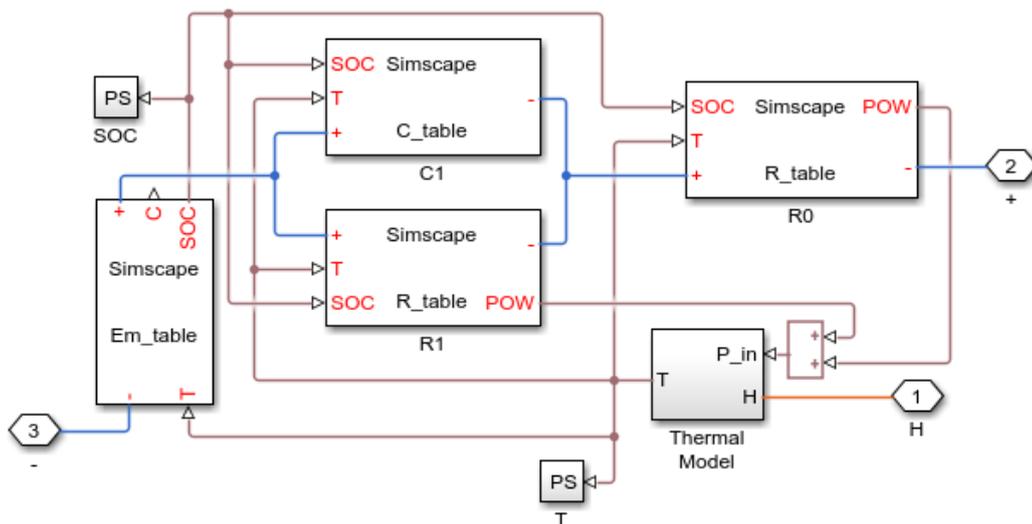


Figure 110: Modèle électrique sous Simscape

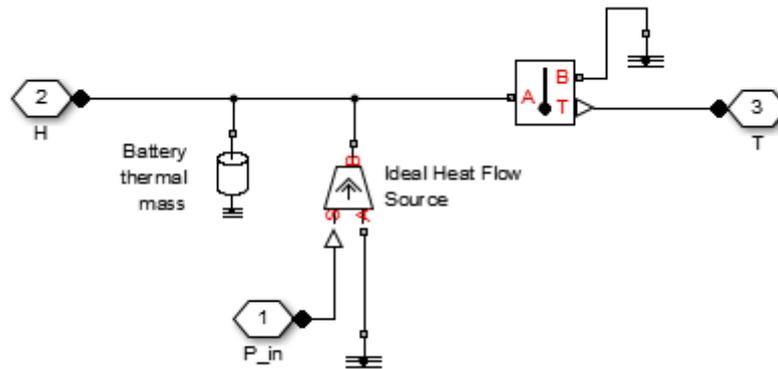


Figure 111: Modèle thermique sous Simscape

4.6.1. Identification des paramètres : Analyse temporelle du modèle dynamique

Les méthodes d'identification des paramètres électriques d'un modèle électrique ou thermoélectrique, sont classées principalement en deux catégories : les méthodes qualitatives basées sur la connaissance du système à identifier et fixant une structure ayant des paramètres inconnus (système de type boîte noire), et les méthodes quantitatives basées sur la détermination des paramètres inconnus d'un modèle selon un critère d'optimisation entre des données mesurées (réelles) et simulées (numériques). On distingue aussi deux types d'approches possibles, l'une fréquentielle et l'autre temporelle. Dans le présent travail, nous utiliserons une approche temporelle par méthode itérative.

Les méthodes quantitatives sont des méthodes d'optimisations. Il s'agit de comparer le profil de tension mesuré en fonction du temps avec le profil de tension simulé par un modèle électrique selon un critère ε d'optimisation. La **Figure 112** montre la procédure d'identification appliquée pour identifier les paramètres électriques du modèle 2RC choisi dans le cadre de cette étude (**Figure 107**). Les mesures utilisées et le déroulement de l'essai sont présentés dans la partie 4.3 (Étude expérimentale).

L'optimisation est réalisée par critère des moindres carrés qui minimise le carré des écarts entre le signal mesuré $u_{exp}(t)$ et le signal simulé $u_{num}(t)$ défini par :

$$\varepsilon = \sum_{k=1}^N (u_{exp}(t) - u_{num}(t))^2 \quad (65)$$

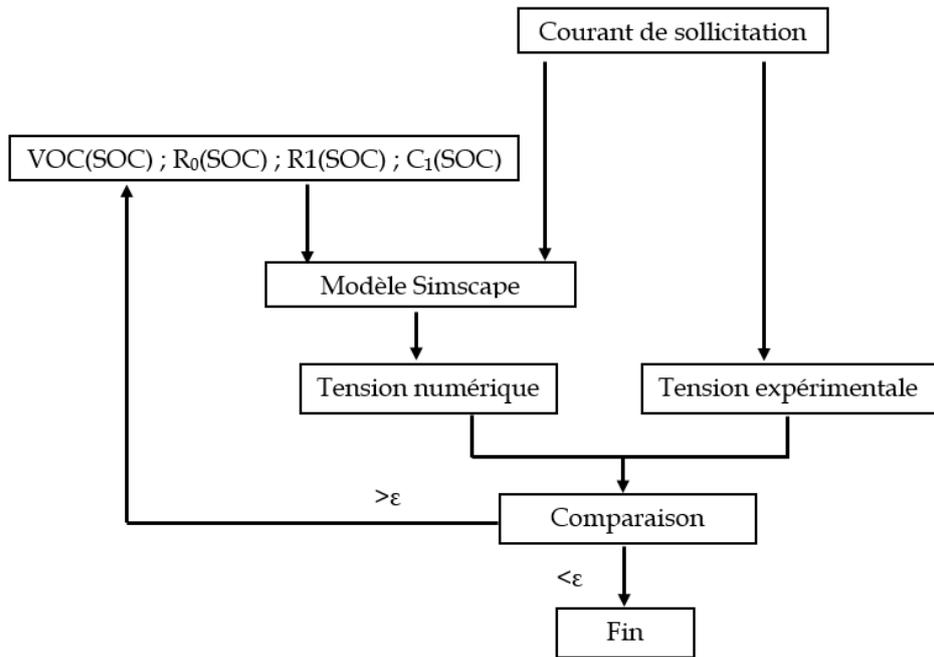


Figure 112: Schématisation de la méthode d'identification

Les outils d'optimisation de MATLAB utilisés s'appuient sur la méthode d'une résolution itérative du système non linéaire par les méthodes de Coleman-Li. [187-189].

Les résultats obtenus sont similaires à ceux présentés dans [190].

4.6.2. Principe de la méthode des moindres carrés

La méthode des moindres carrés est une notion mathématique permettant de comparer des données expérimentales susceptibles de comporter des erreurs à un modèle mathématique en l'ajustant afin d'obtenir des données proches [70]. L'algorithme de moindre carré, a été choisi parmi les autres algorithmes pour l'identification des paramètres du fait de ses hautes performances, et de sa simplicité d'implémentation.

4.6.3. Identification des trois paramètres

4.6.4. Validation

La *Figure 113* présente la comparaison entre la tension numérique et les mesures expérimentales pour une durée de 950 secondes. Les résultats montrent un bon accord entre les résultats expérimentaux et numériques, ce qui nous permet de valider notre modèle. Les figures 114, 115 et 116 présentent -respectivement- l'évolution des paramètres R_0 , R_1 et C en fonction de l'état de charge (SOC) identifié par la méthode des moindres carrés implantée sous MATLAB.

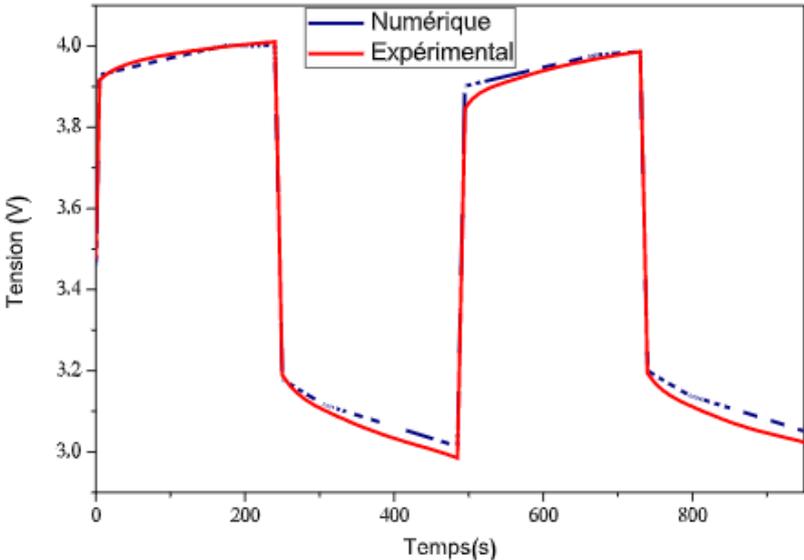


Figure 113: Comparaison des profils de la tension obtenus numériquement et expérimentalement

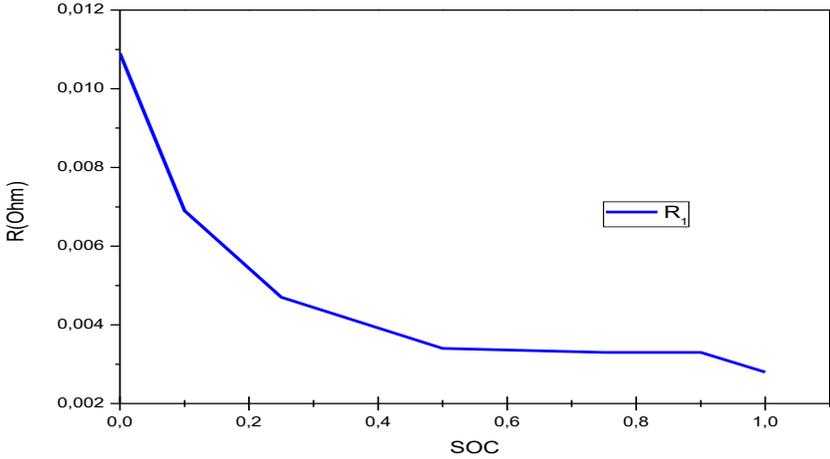


Figure 114: Résistance R_1 en fonction du SOC

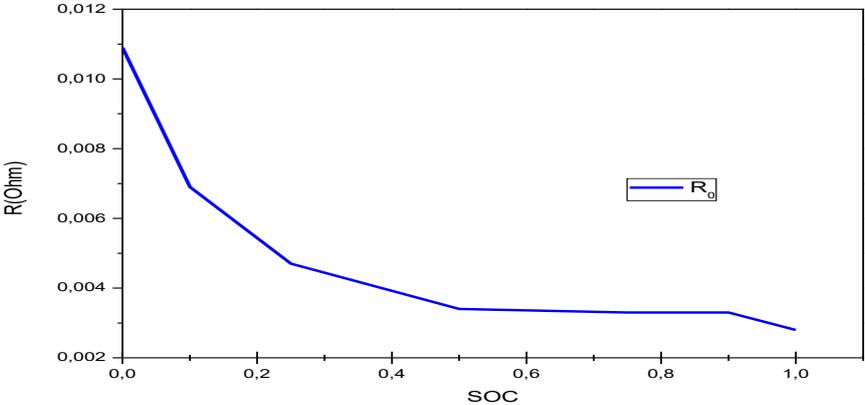


Figure 115: Résistance R_0 en fonction du SOC

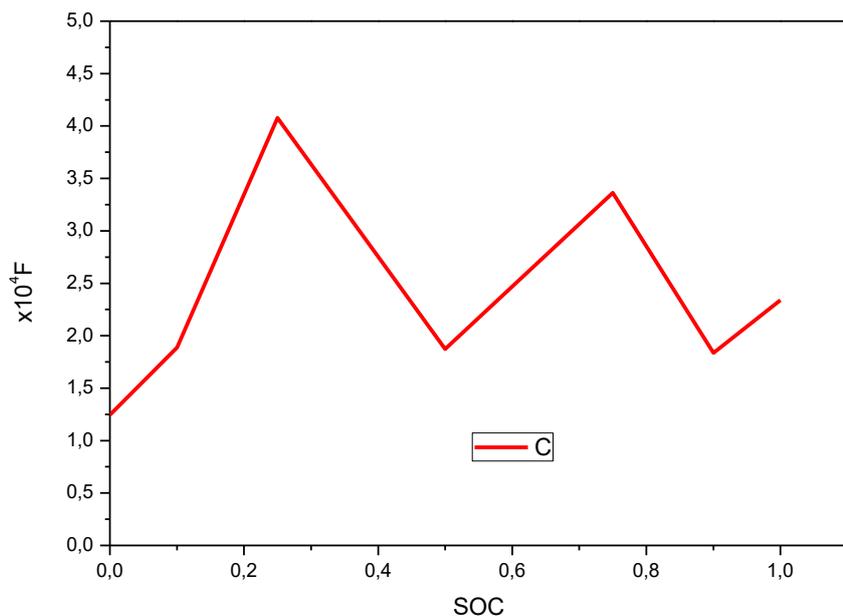


Figure 116: Capacité C en fonction du SOC

La *Figure 118* présente une comparaison entre l'évolution temporelle de la température de la cellule expérimentale et le modèle numérique. Le coefficient d'échange par convection est estimé à $8W.m^{-2}.K^{-1}$. Les résultats montrent un bon accord entre les résultats numériques et expérimentaux. La *Figure 118* présente l'évolution de l'erreur relative. L'erreur relative au cours du profil est calculée par la relation :

$$erreur\ relative = \frac{|T_{num} - T_{exp}|}{T_{exp}} \quad (66)$$

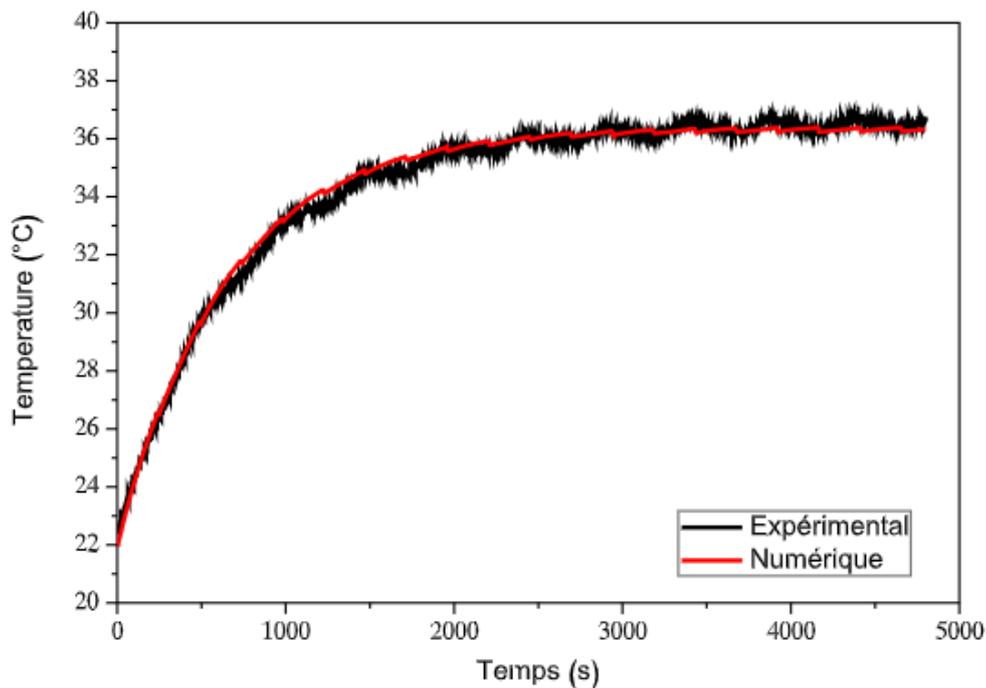


Figure 117: Comparaison de la température numérique et expérimentale

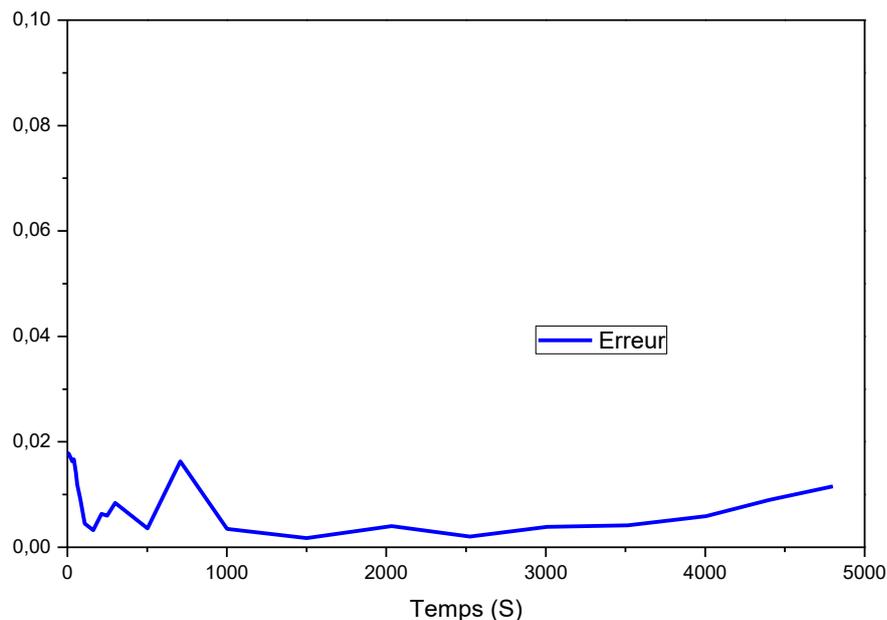


Figure 118: Erreur relative

Les comparaisons entre les résultats expérimentaux et numériques montrent un bon accord entre la tension du modèle électrique et la tension mesurée de même qu'entre la température du modèle thermique et la température mesurée. Cela nous permet de valider notre modèle électrothermique.

4.7. Conclusion

Le présent chapitre que nous concluons ici a porté sur l'étude et la caractérisation des phénomènes thermiques dans une cellule Li-ion. Les cellules cylindriques 18650 ont été utilisées dans cette étude. Ce type de cellules est le plus utilisé dans les véhicules électriques.

Un nouveau banc expérimental a été développé au laboratoire au cours de ces travaux de thèse pour étudier le comportement thermique d'une batterie de type Li-ion à l'échelle d'une cellule. L'objectif est d'étudier les phénomènes thermiques afin d'estimer la chaleur générée et ensuite dimensionner un système de gestion thermique par de la paraffine RT27.

Une étude numérique préliminaire 2D d'optimisation a été faite. Cette étude nous a permis d'exclure l'étude expérimentale d'une épaisseur inférieure à l'épaisseur calculée théoriquement. L'étude numérique préliminaire 2D a été suivie par une étude expérimentale dont l'objet était de tester les performances thermiques de la paraffine RT27 et le composite RT27/ Mousse d'aluminium pour une gestion thermique passive des cellules Li-ion 18650. Les résultats ont montré que le MCP permet d'absorber la chaleur générée par la cellule sous forme latente en changement de phase solide-liquide. Cependant, sa faible conductivité thermique limite ses performances. L'ajout d'une mousse d'aluminium permet une gestion thermique plus efficace de la cellule. Les résultats des mesures de températures ont révélé qu'une différence d'environ 11°C

Étude expérimentale du comportement thermique des cellules Li-Ion, dimensionnement et optimisation d'un système de gestion thermique passif 134

avait été enregistrée sur la surface externe de la cellule sans composite RT27/ Mousse d'aluminium.

Ensuite, nos efforts se sont focalisés sur le développement d'un modèle électrothermique simplifié qui permet de reproduire le fonctionnement électrique et thermique (température) avec une grande précision avec le langage Simscape MATLAB. Le modèle électrothermique développé a été validé par comparaison avec des résultats expérimentaux. Ce modèle nous permettra d'étudier d'autres scénarios dans le but de développer un système de gestion thermique efficace pour une large gamme d'application : Véhicule électrique, Smart phone...etc.

Conclusion générale et perspectives

Dans cette thèse, nous avons étudié le comportement thermique des composites Mousse Métalliques (MM)- MCP (matériaux à changement de phase) en vue de leur utilisation pour la gestion thermique des batteries Li-ion. Grâce à leur grande chaleur latente, les MCP représentent une alternative intéressante pour la gestion thermique passive des batteries Li-ion. Lors des changements de phase, les MCP stockent ou restituent d'importantes quantités d'énergie thermique, ce qui permet d'absorber la chaleur générée par une cellule et garder sa température dans un intervalle bien déterminé. Cependant, leur utilisation est limitée par leurs faibles conductivités thermiques qui diminuent la cinétique de changement de phase solide- liquide. Les mousses métalliques à grande porosité (entre 0.8 et 0.98), possèdent des propriétés spécifiques telles qu'une grande conductivité thermique et une large surface de contact par unité de volume. Ce qui les qualifie à être une bonne solution pour améliorer les échanges thermiques des composites MCP-mousses métalliques. En revanche, leurs performances thermiques sont affectées à la fois par les caractéristiques géométriques de la mousse et par le processus de changement de phase solide- liquide. Ainsi, il est nécessaire d'étudier l'impact de la morphologie de la mousse sur la cinétique du changement en question.

Dans le premier chapitre, une étude bibliographique sur les différents types de stockage d'énergie thermique, des caractéristiques thermophysiques des MCP et leur principe de fonctionnement est présentée. Ce chapitre a présenté également les différentes techniques d'amélioration de la conductivité thermique des MCP notamment l'intensification par l'ajout de mousses métalliques. Par la suite, nous avons mis en évidence le rôle de la température sur les performances des batteries Li-ion et la nécessité d'un système de gestion thermique pour ce type de batteries. L'exploration de la littérature scientifique sur les systèmes de gestion thermique des batteries Li-Ion a confirmé l'intérêt de l'utilisation d'un MCP pur ou un composite MCP pour la gestion thermique passive des batteries Li-ion.

Le deuxième chapitre a été consacré aux méthodes et techniques utilisées pour élaborer et déterminer les propriétés thermophysiques des composites mousses métalliques- MCP. Il apparaît que la densité des pores a une faible influence sur la conductivité effective d'un composite mousse de nickel- paraffine. La conductivité thermique effective à l'état liquide est légèrement diminuée par comparaison à l'état solide. Un modèle de prédiction de la conductivité thermique effective des composites mousses métalliques à grande porosité a été proposé. Le modèle est basé sur celui de Boomsma et al.

Le troisième chapitre a été dédié à la modélisation de changement de phase solide-liquide d'un MCP dans une mousse métallique à grande porosité et à cellules ouvertes ainsi qu'à l'étude numérique de l'effet du matériau, de la morphologie de la mousse métallique et des conditions de chauffage/ refroidissement sur la cinétique de changement de phase. Le modèle numérique a été validé par comparaison avec des résultats expérimentaux. Un dispositif expérimental a été développé afin de valider les résultats numériques du modèle développé. La résolution des équations EDP est faite

Conclusion générale et perspectives

par éléments finis. La fusion et la solidification du MCP sont très sensibles à la conductivité thermique des mousses. La fusion et la solidification sont plus rapides pour une densité des pores plus élevée. L'influence des conditions de chauffage et de refroidissement sur la cinétique de changement de phase durant la fusion et la solidification a été étudiée. Les résultats ont démontré que la fusion et la solidification totale du MCP incorporé dans une mousse métallique sont plus rapides avec un chauffage/ refroidissement sinusoïdal. Les pertes thermiques par convection ont un impact plus important dans le cas sinusoïdal que dans le cas constant.

Le quatrième et dernier chapitre a été consacré à l'étude expérimentale des phénomènes thermiques dans des batteries Li-ion, au dimensionnement d'un système de gestion thermique optimale par un composite MM- MCP à l'échelle d'une cellule et au développement d'un modèle électrothermique simplifié qui permet de reproduire le comportement thermique et électrique d'une cellule Li-ion. La première partie du chapitre avait pour objectif de présenter la démarche pour mettre en place un banc d'essai expérimental. Elle a présenté aussi l'étude expérimentale des phénomènes thermiques dans une cellule Li-ion type 18650. La deuxième partie a présenté les travaux de dimensionnement et d'optimisation numérique sous COMSOL Multiphysique d'un système de gestion thermique passif par un MM- MCP. La troisième et dernière partie décrit un modèle numérique électrothermique et présente la démarche suivie pour l'implanter en MATLAB Simulink/ Simscape et le valider.

Les travaux réalisés dans le cadre de cette thèse ouvrent plusieurs perspectives, dont certaines sont listées ci-dessous :

Ces travaux se sont focalisés sur les phénomènes thermiques et la gestion thermique à l'échelle d'une cellule. Il serait utile de passer de l'échelle d'une cellule à l'échelle d'un module voire un pack de batterie.

La présente étude a montré que les mousses métalliques sont une solution efficace pour améliorer le transfert de chaleur dans les MCP. Il a été prouvé que les composites MM- MCP sont une alternative intéressante pour gérer la température des cellules Li-ion. Une étude de durabilité sera complémentaire et utile pour les travaux -déjà-réalisés dans cette thèse.

Les résultats des études numériques et les essais expérimentaux menés dans le cadre de cette thèse peuvent constituer une base de données pour développer une nouvelle stratégie de contrôle/ commande au niveau de modules et de packs de batterie.

Annexe I: Définitions élémentaires

1. La tension nominale

La tension nominale est la tension de référence de la batterie. La définition de la tension nominale n'est pas unique, on peut interpréter la tension nominale comme la relation entre la tension moyenne de la batterie et le SOC observée sur la plupart de ses courbes OCV après une décharge complète. La tension nominale dépend de la technologie de la batterie, elle varie de 3,3 V à 3,9 V pour les batteries au lithium-ion.

2. Tension à circuit ouvert « OCV »

Tension à circuit ouvert « OCV » : est la tension mesurée de la cellule (ou batterie) sous aucune charge, cette tension est directement liée à l'état de charge de la cellule (SOC), ce dernier est généralement utilisé pour la déterminer. Les deux paramètres (OCV, SOC) sont liés par une relation qui peut être linéaire ou non selon le type de batterie considéré. Pour le cas linéaire l'équation qui relie les deux grandeurs est la suivante :

$$VOC = \beta.SOC + V_{cut_off} \quad (67)$$

Avec β est un paramètre caractéristique de chaque technologie, et V_{cut_off} est la tension de fin de décharge, «VCut-Off» (Cut-off voltage) quand la cellule (ou batterie) atteint cette tension elle a donc délivrée la majorité de sa capacité, elle est considérée comme décharge. Le fabricant estime qu'opérer en dessous de cette tension dégrade la batterie car on est en phase de sous-décharge qui implique des réactions irréversibles. La tension de fin de décharge pour une cellule « Li-ion » est de 2.5V.

3. Tension de fin de décharge

Lorsque la cellule (ou batterie) atteint cette tension, elle récupère toute la matière active disponible et elle est considérée comme chargée. Des cellules « Li-ion » sont pleinement chargées à 4.2V.

4. Capacité d'une batterie

La capacité de la batterie est la quantité maximale d'électricité qu'elle peut débiter, elle correspond aussi au nombre des d'ampères-heures (Ah) disponible lorsque la batterie est déchargée à un certain niveau à partir de 100% d'état de charge (SOC) jusqu'à atteindre la tension d'arrêt. Elle dépend aussi de la température ainsi que du régime de décharge/charge. Elle est à sa valeur maximale quand la batterie est neuve mais elle commence à se dégrader avec le nombre de cycle d'utilisation. Généralement, la capacité est calculée en multipliant le courant débité par unité du temps selon la relation :

$$Q = \int_{t_0}^{t_f} Idt \quad (68)$$

5. La résistance interne

La résistance interne d'une batterie est en relation directe avec les matériaux qui la constituent la batterie ainsi que les réactions chimiques qui se déroulent au sein de celle-ci. Sa valeur n'est pas constante mais elle dépend de plusieurs facteurs comme la température, l'état de charge (SOC), l'état de santé (SOH) et le régime de cyclage (charge et décharge) [70,71,160].

- La résistance interne d'une batterie est la somme de plusieurs résistances élémentaires représentant des phénomènes divers observés lors des études électrochimiques elle comprend alors :
- La résistance de l'électrolyte.
- La résistance des matériaux actifs de chaque électrode.
- La résistance de contact entre les électrodes et les cellules.

6. Phénomène de polarisation

Lorsque le courant traverse la batterie, la tension passera de l'état d'équilibre du circuit ouvert "VOC" à une valeur inférieure ou supérieure en fonction de la phase (charge ou décharge). Ce phénomène est appelé polarisation (η).

Ce phénomène évoluant avec le développement du courant, il le rend de plus en plus défavorable à la production, car il entraîne des pertes d'énergie (et de capacité).

Trois types de polarisation identifiés :

- Polarisation d'activation, η_a : reprend l'énergie nécessaire pour surmonter la barrière d'énergie d'activation afin qu'une réaction puisse se dérouler.
- Polarisation de concentration, η_c : représente la variation du potentiel d'électrode apportée par des changements locaux de concentration, la diminution de la concentration des réactifs et l'augmentation des produits de la réaction.
- Polarisation résistive, η_R : représente la chute de potentiel due aux pertes résistives dans la cellule [173].

7. Autodécharge

En raison des réactions secondaires intervenant aux deux électrodes, la batterie se décharge toute seule lentement même quand elle n'est pas utilisée. Ce phénomène de perte d'énergie avec le temps est appelé autodécharge. L'autodécharge s'exprime souvent en pourcentage de la perte de charge par mois par rapport à la capacité de la batterie. Elle dépend de plusieurs facteurs comme la tension, la température et le vieillissement de la batterie. Elle varie aussi en fonction de la technologie de la batterie. Elle est de l'ordre de 5% par mois pour les batteries Li-ion.

8. L'état de charge (SOC)

L'état de charge (ou SOC « State of Charge ») est le rapport de la charge disponible en Ah sur la capacité de la batterie. Quand la batterie est pleinement chargée, l'état de charge (SoC) vaut 100% et quand la batterie est complètement déchargée, le SoC vaut 0%. La définition du SoC n'est pas unique, parce que la capacité réelle ou la capacité nominale peuvent être utilisées au dénominateur dans la formule du SoC.

L'unité de SOC est 100% ou 1 pour une batterie pleinement chargée et 0% ou 0 pour une batterie dite vide.

$$SOC = \frac{\text{Capacité actuelle en Ah}}{\text{Capacité de la batterie en Ah}} \times 100 \quad (69)$$

L'évolution du SOC peut être traquée selon l'équation :

$$SOC(t) = SOC(t_0) - \frac{\int_{t_0}^t I_b(t) dt}{Q} \quad (70)$$

Annexe II : Généralité sur les milieux poreux et les matériaux cellulaires

9. Milieu poreux :

On appelle un milieu poreux toutes matrices solides comportant des vides ou cavités aux travers lesquelles un fluide peut s'écouler [119]. Les vides sont appelés pores, ils peuvent être connectés (milieu poreux consolidé) ou non (milieu poreux non-consolidé). On rencontre plusieurs matériaux poreux dans la nature ou dans l'industrie. Hormis, les métaux, les cristaux et les polymères, presque tous les matériaux par essence sont poreux : les sols (calcaires, sables, argiles...), les matériaux de constructions (béton, plâtre, laine de verre, roche...), les matériaux d'origine végétale ou animale (les bois, papiers, cuirs, etc...), les poudres et les empilements granulaires (lits de céréales, de billes, de fibres...). Les milieux poreux constituent des systèmes complexes non seulement en raison de leur composition en deux ou trois phases : Solide-liquide, Solide-Gaz, Solide-Liquide-Gaz, mais également à cause de la forme et la morphologie de la matrice solide qui limite l'espace dans lequel les phases fluides (liquides, gaz ou mélanges liquide-gaz) se déplacent [191].

10. Les matériaux cellulaires

Les matériaux cellulaires sont des matériaux qui forment un réseau interconnecté de poutres (ligaments) et de plaques solides qui représentent les faces et les arêtes des cellules [192]. Ils peuvent être classés en deux groupes : nid d'abeilles qui sont des matériaux cellulaires à microstructure bidimensionnelle, la deuxième est les mousses qui ont une microstructure tridimensionnelle [193]. Il existe deux types des mousses commercialisés : Mousses à forte porosité (à brins), et les mousses à faible porosité (à coques), Figure 119.

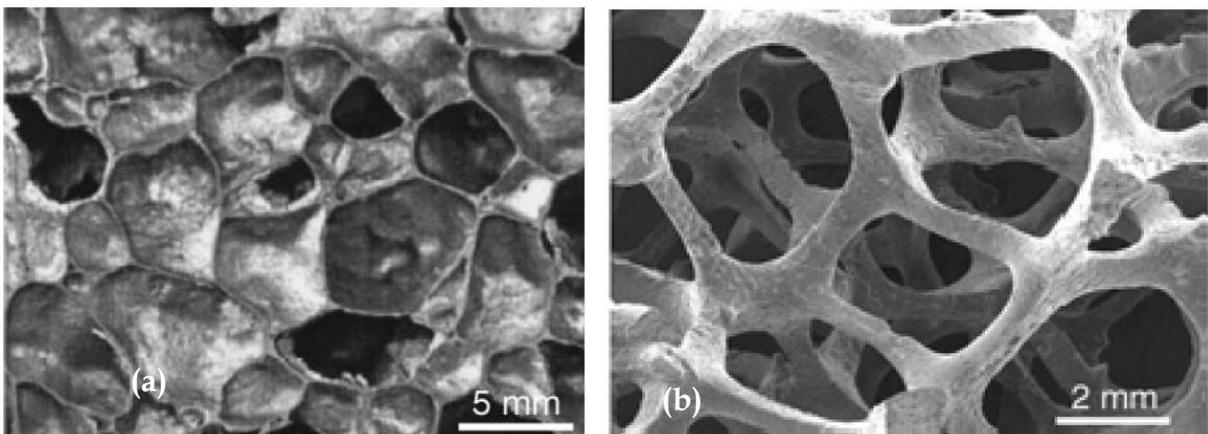


Figure 119: Exemple des mousses métalliques (a), à cellules fermées et (b) à cellules ouvertes [194]

11. Mousses métalliques à grande porosité

Les mousses métalliques à grande porosité à cellules ouvertes sont des milieux poreux à matrice consolidée. Ces mousses sont formées par des ligaments interconnectés entre eux au niveau des nœuds articulaires. Les ligaments forment les pores qui forment les cellules. La Figure 120 présente une image SEM d'une mousse de Nickel [195]. Les mousses métalliques à cellules ouvertes ont été inventées (fabriquées) pour la première fois en 1967 par la ERG Materials and Aerospace Corp. et depuis cette date n'ont pas cessé de se développer. L'invention a été brevetée par Walz [196]. ERG a réalisé des mousses métalliques en suivant un processus de réplique. L'utilisation de ce type de matériaux cellulaires a resté longtemps limitée dans des applications militaires et aérospatiales bien déterminées. Les mousses métalliques ne sont pas rentrées dans l'industrie civile qu'à partir les années 90 (1990) [196]. Depuis cette date, d'autres fabricants se sont joints à la concurrence mondiale dans le secteur de fabrication des mousses métalliques. On cite –en Europe- : M-Pore GmbH en Allemagne, la société française Alveotec [197] et Constellium aux Pays-Bas fabriquent actuellement à grande échelle des mousses métalliques à cellules ouvertes pour une large gamme d'applications.

Les mousses métalliques à grande porosité possèdent des caractéristiques spécifiques telles qu'une grande porosité, entre 0.80 et 0.98, une faible masse volumique, grande conductivité thermique, une rigidité et une résistance élevées, ainsi qu'une grande surface de contact par unité de volume de l'ordre de 1000 à 3000 m²/m³ [198]. La nature des cellules ouvertes qui diminuent la dissipation, par frottement de l'énergie mécanique du fluide en mouvement, ce qui permet de réduire considérablement la perte de charge. Ce qui les qualifie à être une bonne solution pour améliorer la conductivité thermique effective des composites mousse-MCP et pour intensifier le transfert thermique lors de la fusion et de la solidification du MCP.

La structure géométrique d'une mousse métallique est complexe. Elle est constituée d'une suite des cellules de forme proche d'un polyèdre[199,200] [201]. Chaque cellule est délimitée par plus d'une dizaine des ligaments. La section des ligaments peut-être de forme géométrique différentes : triangulaires, ou circulaire ; ceci dépend du procédé de fabrication et de la porosité du matériau. En générale, les intersections de ces ligaments (fibres) sont constituées d'un morceau de métal ou d'une simple jonction ponctuelle.

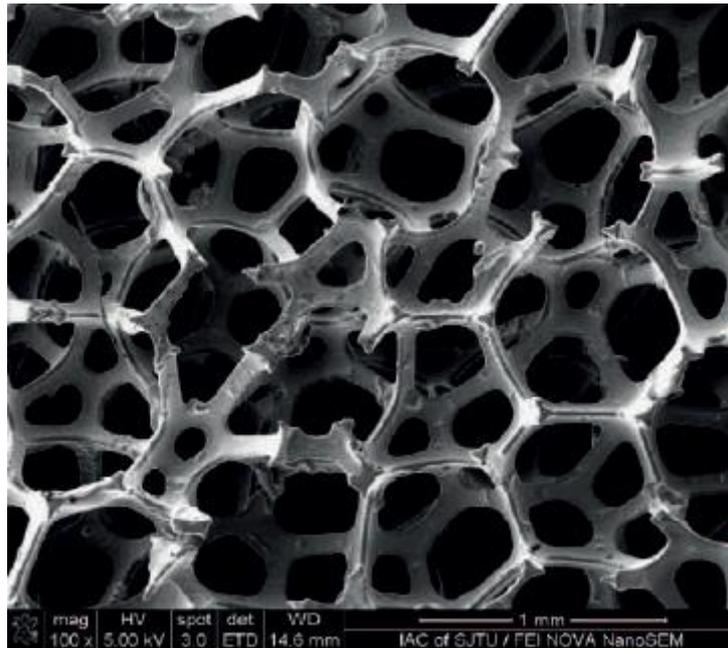


Figure 120: Mousse métallique à cellule ouverte (SEM image)

12. Les procédés de fabrication des mousses métalliques

La réalisation d'un matériau cellulaire de types mousses métalliques peut-être faites par plusieurs procédés d'élaboration. La Figure 121 donne un aperçu sur les familles d'élaborations des mousses métalliques les plus utilisées. En effet, les procédés d'élaboration par coulée de métal ou par usinage sont largement utilisés. Actuellement, des nouveaux procédés telle que la fabrication additive se développe à grand pas et permettent de fabriquer des mousses ouvertes périodiques avec des géométries plus complexes et avec une haute précision.

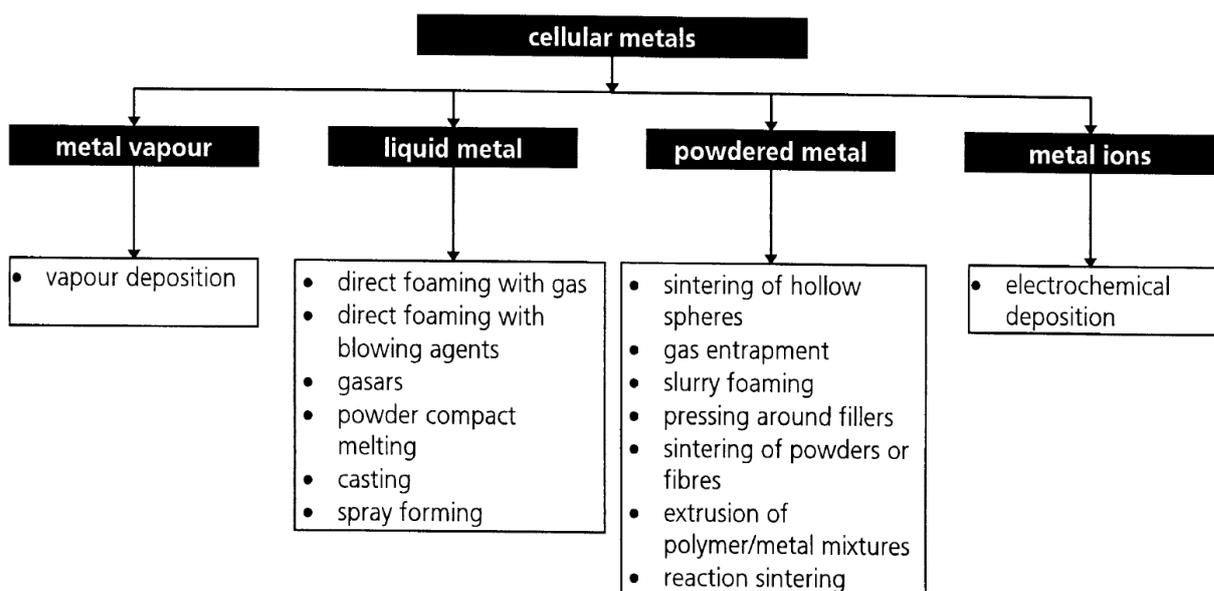


Figure 121: Aperçu des différentes "familles" de méthodes de production des matériaux métalliques cellulaires [202]

13. Propriétés structurelles et dynamiques d'une mousse métallique à grande porosité

- **Porosité**

La porosité peut être définie comme étant le volume des vides en pourcentage du volume total [119].

$$\varepsilon = \frac{V_{vide}}{V_{total}} \quad (71)$$

- **Densité des pores**

La densité des pores en PPI (Pores Per Inch), représente le nombre de pores parcourus par un segment de longueur 1 pouce (= 2,54 cm) [115]. Les mousses métalliques à cellules ouvertes ont une densité de pore entre 5PPI et 45PPI [196]. Ce paramètre est généralement fourni par le fabricant.

Le diamètre de pores et la densité des pores peuvent être mesuré directement à partir de reconstructions 3D.

- **Diamètre de pores**

Il existe de nombreuses manières pour déterminer le diamètre de pore moyen d'une mousse métallique. Il peut être issu de la mesure des propriétés thermophysiques telles que la perméabilité ou le coefficient inertiel, le produit de ces deux derniers étant un bon estimateur du diamètre des pores. Le diamètre moyen des pores peut être calculer par la formule suivante [111]:

$$d_p = \frac{0.0254}{PPI} \quad (72)$$

- **Tortuosité**

La tortuosité χ est définie comme une quantité adimensionnelle qui rend compte du cheminement tortueux des capillaires, dans un milieu poreux solide. Elle a été définie pour la première fois par Carman en 1937 [203]. La tortuosité, est utilisée pour décrire la diffusion de molécules dans ce type de milieu. Elle rend compte de la réduction qui affecte le flux diffusé, par rapport à la valeur qu'il aurait dans un cheminement rectiligne. Sa définition est empirique et est, le plus souvent, déduite indirectement d'expériences de diffusion plutôt que déterminée expérimentalement. Mathématiquement, la définition la plus simple est donnée par le rapport entre le cheminement moyen du capillaire parcouru par les molécules, L' , et la distance rectiligne qui les sépare, L , soit l'épaisseur du milieu poreux, Figure 122. Une seconde définition prend, pour base, le rapport $(L'/L)^2$, correspondant au rapport des

Annexes

interfaces solide – milieu de diffusion [196]. Dans la littérature on trouve plusieurs formules empiriques et semi-empiriques qui permettent de déterminer la tortuosité d'une mousse métallique :

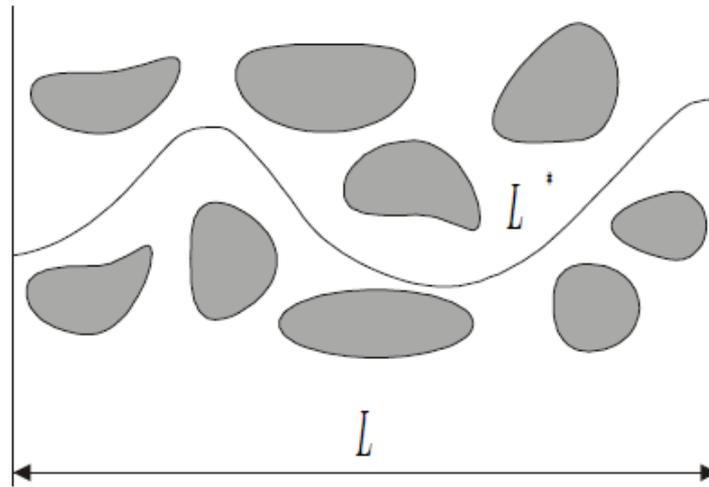


Figure 122: Schématisation de la tortuosité

Du Plessis et al [117] :

$$\frac{1}{\chi} = \frac{3}{4\varepsilon} + \frac{\sqrt{9-8\varepsilon}}{2\varepsilon} \cos \left\{ \frac{4\pi}{3} + \frac{1}{3} \cos^{-1} \left[\frac{8\varepsilon^2 - 36\varepsilon + 27}{(9-8\varepsilon)^{3/2}} \right] \right\} \quad (73)$$

Les travaux expérimentaux de Bhattacharya et al [113] ont conduit au modèle suivant :

$$\frac{1}{\chi} = \frac{\pi}{4\varepsilon} \left\{ 1 - \left(1.18 \sqrt{\frac{(1-\varepsilon)}{3\pi} \frac{1}{G}} \right)^2 \right\} \quad (74)$$

Yang et al [126] :

$$\chi = \frac{\beta\varepsilon}{1-(1-\varepsilon)^{1/3}} \quad (75)$$

β est définie comme le ratio entre le périmètre représentative d'une pore et le périmètre d'un cercle typique de référence.

- **Diamètre de ligaments**

Le diamètre équivalent des ligaments a été calculé par Calmidi [118], en fonction de porosité et diamètre des pores et par Fourie et al [145] en fonction de diamètre des pores et tortuosité :

Annexes

Calmidi [118] :

$$\frac{d_f}{d_p} = 2\sqrt{\frac{(1-\varepsilon)}{3\pi}} \frac{1}{(1-e^{-(1-\varepsilon)/0.04})} \quad (76)$$

Fourie and Du Plessis [145]:

$$d_p = (d_p + d_f) \frac{3-\chi}{2} \quad (77)$$

Annexe III : Présentation COMSOL Multiphysics

COMSOL Multiphysics est un logiciel de simulation numérique multi-physiques puissant basé sur les méthodes des éléments finis (FEM). Il permet la modélisation et la simulation des phénomènes physiques et de les couplées. Il a été créé par des étudiants de Germund Dahlquist à l'Institut royal de technologie (KTH Royal Institute of Technology) à Stockholm en Suède. La première version de COMSOL Multiphysics a été publiée en 1998, les versions avant 2005 s'appelaient FEMLAB. Ce logiciel permet de simuler de nombreuses physiques et applications en ingénierie, ainsi il permet de coupler des physiques simples, par exemple coupler l'électrique avec thermique, avec le mécanique..., et de transformer une grandeur d'une dimension spatiale à une autre. COMSOL est multiplateforme (Windows, Mac, Linux). L'utilisateur sélectionne les phénomènes physiques étudiées et définit ses couplages. La Figure 123 présente l'interface COMSOL. Les différentes étapes du processus de modélisation sont intégrées dans une seule interface, toutes les étapes ne sont pas obligatoirement en ordre :

- Choisir une physique : écoulement, transfert de chaleur dans les fluides et les solides, étude temporel ou stationnaire... .
- Définir la géométrie : le logiciel COMSOL propose des outils de modélisation géométrique en 1D, 2D et 3D. Ainsi, il permet de créer la géométrie du modèle et de lui affecter des formes plus complexes à l'aide des opérations booléennes (union, différence ou intersection par exemple).
- Choix ou ajout d'un ou plusieurs matériaux et définitions de se(s) propriété(s). COMSOL possède une bibliothèque des matériaux très riches.
- Construction/ choix du maillage : COMSOL propose des outils de maillage automatique et semi-automatique, dont le maillage tétraédrique libre et le maillage extrudé. L'algorithme par défaut génère automatiquement un maillage selon les physiques et les couplages mise en jeu.
- Résolutions du problème : Le logiciel exécute le calcul sur la base d'un contrôle des erreurs et le cas échéant avec un maillage adaptatif, à l'aide de différents solveurs numériques : solveurs directs et itératifs. Les solveurs proposés automatiquement par COMSOL ne sont pas toujours les meilleurs.

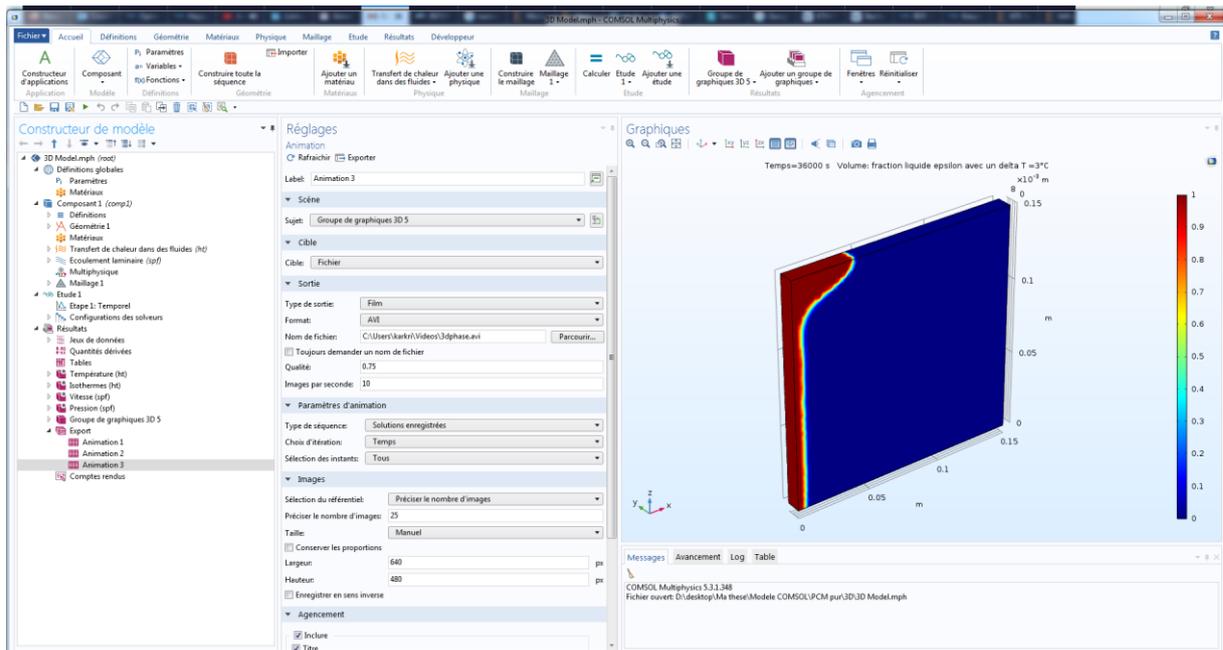


Figure 123: Présentation de l'interface COMSOL

- **Les solveurs COMSOL:**

Les solveurs utilisés par COMSOL, pour résoudre un problème étudié, sont les solveurs temporels : BDF, Runge-Kutta et Generalized Alpha deux de la famille implicite qui sont BDF et Generalized Alpha et un explicite Runge-Kutta, les solveurs directs : MUMPS, PARDISO et SPOOLES et les solveurs itératifs : CG, GMRES et BiCGStab [204].

Les solveurs temporels :

- **BDF :** BDF en anglais, The **backward differentiation formula** est un solveur temporel qui est une famille de méthodes implicites pour l'intégration numérique des équations différentielles ordinaires [205] [206]. Il s'agit des méthodes linéaires en plusieurs étapes pour une fonction donnée. Le solveur BDF est une formule qui donne une approximation de la dérivé d'une variable à un instant t en fonction des premiers temps (d'où le nom Backward) [207].

- **Les solveurs directs**

Les solveurs directs de COMSOL Multiphysiques sont : les solveurs MUMPS, PARADISO et SPOOLES. Ces trois solveurs sont basés sur la décomposition LU. On rappelle que la décomposition LU est une méthode de décomposition d'une matrice comme produit d'une matrice triangulaire inférieure L par une matrice triangulaire supérieure [208]. Tous ces solveurs permettent de résoudre des problèmes des éléments finis bien conditionnés et ils peuvent même résoudre certains problèmes qui sont mal conditionnés.

Annexes

Il est difficile de faire le choix entre ces solveurs directs du fait qu'ils aboutissent à la même solution. Ils se distinguent principalement par leur vitesse relative. Le solveur PARDISO et MUMPS tendent à être les plus rapides et SPOOLES le plus lent. Les trois solveurs utilisent beaucoup de mémoire RAM. Le solveur SPOOLES tend à utiliser moins de mémoire par rapport à l'ensemble des solveurs directs. COMSOL donne la possibilité de stocker la solution out-of-core, c'est à dire qu'ils peuvent stocker une partie du problème sur le disque dur. Nous utiliserons les solveurs PARDISO et MUMPS.

- **Les solveurs itératifs**

Les solveurs itératifs dans COMSOL englobent une variété d'approches étant essentiellement similaire à une méthode de gradient conjugué CG. D'autres variantes incluent la méthode résiduelle minimale généralisée GMRES et la méthode du gradient stabilisé de biconjugué BiCGStab [204]. Contrairement aux solveurs directs, les méthodes itératives rapprochent progressivement la solution plutôt que dans un grand pas de calcul [209]. Par conséquent, lorsque la résolution d'un problème est faite par un procédé itératif, on peut observer la diminution de l'erreur en fonction du nombre d'itérations.

L'avantage majeur des solveurs itératifs est leur utilisation de la mémoire qui est nettement inférieur à celle d'un solveur direct pour un même problème et permettent de réduire la durée de calcul. Néanmoins, leur convergence est très lente si des problèmes mal conditionnés sont détectés.

- **Maillage COMSOL :**

Le maillage est une partition de l'espace ou d'un domaine en cellules appelées éléments [210]. Le maillage et la génération du maillage construit une étape très important dans la résolution numérique des problèmes par élément finis [211-214], qui un impact direct sur la convergence de calcul, la fiabilité des résultats et la précision des résultats. Selon la physique étudié et les couplages, COMSOL propose un maillage et donne à l'utilisateur le contrôle sur la taille du maillage. En fonction de la complexité géométrique d'un intervalle, le maillage peut être structuré [215,216], structuré en blocs, ou non structuré [215,217]. Les maillages COMSOL 2D sont : Triangle libre, Quadrangle libre et Quadrangle structuré. Le choix de COMSOL n'est pas toujours le meilleur mais cette option on peut- être désactivé et on fait le choix du maillage manuellement.

Références

- [1] Y. Dutil, D.R. Rousse, N.B. Salah, S. Lassue, L. Zalewski, A review on phase-change materials: Mathematical modeling and simulations, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 15 (2011) 112–130. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.06.011>.
- [2] D. DELAUNAY, La thermique des matériaux. Transferts de chaleur et caractérisation en cours de transformation, *Rev. Gén. Therm.* 30 (1991) 517–530.
- [3] S.D. Sharma, D. Buddhi, R.L. Sawhney, Accelerated thermal cycle test of latent heat-storage materials, *Solar Energy*. 66 (1999) 483–490. [https://doi.org/10.1016/S0038-092X\(99\)00045-6](https://doi.org/10.1016/S0038-092X(99)00045-6).
- [4] A. Abhat, Low temperature latent heat thermal energy storage: Heat storage materials, *Solar Energy*. 30 (1983) 313–332. [https://doi.org/10.1016/0038-092X\(83\)90186-X](https://doi.org/10.1016/0038-092X(83)90186-X).
- [5] A. Sharma, V.V. Tyagi, C.R. Chen, D. Buddhi, Review on thermal energy storage with phase change materials and applications, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 13 (2009) 318–345. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2007.10.005>.
- [6] I. Sarbu, A. Dorca, Review on heat transfer analysis in thermal energy storage using latent heat storage systems and phase change materials, *International Journal of Energy Research*. 43 (2019) 29–64. <https://doi.org/10.1002/er.4196>.
- [7] N. Kumar, J. Hirsche, T.J. LaClair, K.R. Gluesenkamp, S. Graham, Review of stability and thermal conductivity enhancements for salt hydrates, *Journal of Energy Storage*. 24 (2019) 100794. <https://doi.org/10.1016/j.est.2019.100794>.
- [8] H. Schmit, C. Rathgeber, P. Hooek, S. Hiebler, Critical review on measured phase transition enthalpies of salt hydrates in the context of solid-liquid phase change materials, *Thermochimica Acta*. 683 (2020) 178477. <https://doi.org/10.1016/j.tca.2019.178477>.
- [9] L.-S. Wong-Pinto, Y. Milian, S. Ushak, Progress on use of nanoparticles in salt hydrates as phase change materials, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 122 (2020) 109727. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.109727>.
- [10] R. Naumann, H.-H. Emons, Results of thermal analysis for investigation of salt hydrates as latent heat-storage materials, *Journal of Thermal Analysis*. 35 (1989) 1009–1031. <https://doi.org/10.1007/BF02057256>.
- [11] A.M. Khudhair, M.M. Farid, A review on energy conservation in building applications with thermal storage by latent heat using phase change materials, *Energy Conversion and Management*. 45 (2004) 263–275. [https://doi.org/10.1016/S0196-8904\(03\)00131-6](https://doi.org/10.1016/S0196-8904(03)00131-6).
- [12] J. PARIS, M. FALARDEAU, C. VILLENEUVE, Thermal Storage by Latent Heat: A Viable Option for Energy Conservation in Buildings, *Energy Sources*. 15 (1993) 85–93. <https://doi.org/10.1080/00908319308909014>.
- [13] V.V. Tyagi, D. Buddhi, Thermal cycle testing of calcium chloride hexahydrate as a possible PCM for latent heat storage, *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 92 (2008) 891–899. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2008.02.021>.
- [14] I. Dincer, On thermal energy storage systems and applications in buildings, *Energy and Buildings*. 34 (2002) 377–388. [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(01\)00126-8](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(01)00126-8).
- [15] S.Y. Kee, Y. Munusamy, K.S. Ong, Review of solar water heaters incorporating solid-liquid organic phase change materials as thermal storage, *Applied Thermal Engineering*. 131 (2018) 455–471. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.12.032>.
- [16] S.S. Magendran, F.S.A. Khan, N.M. Mubarak, M. Vaka, R. Walvekar, M. Khalid, E.C. Abdullah, S. Nizamuddin, R.R. Karri, Synthesis of organic phase change materials (PCM) for energy storage applications: A review, *Nano-Structures & Nano-Objects*. 20 (2019) 100399. <https://doi.org/10.1016/j.nanoso.2019.100399>.

Références

- [17] F. Wang, W. Lin, Z. Ling, X. Fang, A comprehensive review on phase change material emulsions: Fabrication, characteristics, and heat transfer performance, *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 191 (2019) 218–234. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2018.11.016>.
- [18] S. Drissi, T.-C. Ling, K.H. Mo, Thermal efficiency and durability performances of paraffinic phase change materials with enhanced thermal conductivity – A review, *Thermochimica Acta*. 673 (2019) 198–210. <https://doi.org/10.1016/j.tca.2019.01.020>.
- [19] R. Gulfam, P. Zhang, Z. Meng, Advanced thermal systems driven by paraffin-based phase change materials – A review, *Applied Energy*. 238 (2019) 582–611. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.01.114>.
- [20] K. Kalinowska, P. Lenartowicz, J. Namieśnik, M. Marć, Analytical procedures for short chain chlorinated paraffins determination - How to make them greener?, *Science of The Total Environment*. 671 (2019) 309–323. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.03.312>.
- [21] X. Wang, J. Zhu, Z. Xue, X. Jin, Y. Jin, Z. Fu, The environmental distribution and toxicity of short-chain chlorinated paraffins and underlying mechanisms: Implications for further toxicological investigation, *Science of The Total Environment*. 695 (2019) 133834. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.133834>.
- [22] S. HIMRAN, A. SUWONO, G.A. MANSOORI, Characterization of Alkanes and Paraffin Waxes for Application as Phase Change Energy Storage Medium, *Energy Sources*. 16 (1994) 117–128. <https://doi.org/10.1080/00908319408909065>.
- [23] N. Sarier, E. Onder, Organic phase change materials and their textile applications: An overview, *Thermochimica Acta*. 540 (2012) 7–60. <https://doi.org/10.1016/j.tca.2012.04.013>.
- [24] H. Mehling, L.F. Cabeza, Determination of physical and technical properties, in: H. Mehling, L.F. Cabeza (Eds.), *Heat and Cold Storage with PCM: An up to Date Introduction into Basics and Applications*, Springer, Berlin, Heidelberg, 2008: pp. 57–104. https://doi.org/10.1007/978-3-540-68557-9_3.
- [25] L.F. Cabeza, A. Castell, C. Barreneche, A. de Gracia, A.I. Fernández, Materials used as PCM in thermal energy storage in buildings: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 15 (2011) 1675–1695. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.11.018>.
- [26] K. Pielichowska, K. Pielichowski, Phase change materials for thermal energy storage, *Progress in Materials Science*. 65 (2014) 67–123. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2014.03.005>.
- [27] A. Sari, A. Karaipekli, Thermal conductivity and latent heat thermal energy storage characteristics of paraffin/expanded graphite composite as phase change material, *Applied Thermal Engineering*. 27 (2007) 1271–1277. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2006.11.004>.
- [28] Z. Ling, J. Chen, T. Xu, X. Fang, X. Gao, Z. Zhang, Thermal conductivity of an organic phase change material/expanded graphite composite across the phase change temperature range and a novel thermal conductivity model, *Energy Conversion and Management*. 102 (2015) 202–208. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.11.040>.
- [29] F. Tang, D. Su, Y. Tang, G. Fang, Synthesis and thermal properties of fatty acid eutectics and diatomite composites as shape-stabilized phase change materials with enhanced thermal conductivity, *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 141 (2015) 218–224. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2015.05.045>.
- [30] M. Lachheb, M. Karkri, F. Albouchi, F. Mzali, S.B. Nasrallah, Thermophysical properties estimation of paraffin/graphite composite phase change material using an inverse method, *Energy Conversion and Management*. 82 (2014) 229–237. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.03.021>.

Références

- [31] M. Lachheb, K. Mustapha, A. Fethi, B.N. Sassi, F. Magali, S. Patrik, Thermal properties measurement and heat storage analysis of paraffin/graphite composite phase change material, *Composites Part B: Engineering*. 66 (2014) 518–525. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2014.05.011>.
- [32] M.A. AlMaadeed, S. Labidi, I. Krupa, M. Karkri, Effect of expanded graphite on the phase change materials of high density polyethylene/wax blends, *Thermochimica Acta*. 600 (2015) 35–44. <https://doi.org/10.1016/j.tca.2014.11.023>.
- [33] A. Fethi, L. Mohamed, K. Mustapha, B. ameurTarek, B.N. Sassi, Investigation of a graphite/paraffin phase change composite, *International Journal of Thermal Sciences*. 88 (2015) 128–135. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2014.09.008>.
- [34] A. Mills, M. Farid, J.R. Selman, S. Al-Hallaj, Thermal conductivity enhancement of phase change materials using a graphite matrix, *Applied Thermal Engineering*. 26 (2006) 1652–1661. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2005.11.022>.
- [35] H. Li, X. Liu, G.-Y. Fang, Synthesis and characteristics of form-stable n-octadecane/expanded graphite composite phase change materials, *Appl. Phys. A*. 100 (2010) 1143–1148. <https://doi.org/10.1007/s00339-010-5724-y>.
- [36] W. Wang, X. Yang, Y. Fang, J. Ding, J. Yan, Preparation and thermal properties of polyethylene glycol/expanded graphite blends for energy storage, *Applied Energy*. 86 (2009) 1479–1483. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2008.12.004>.
- [37] H. Yin, X. Gao, J. Ding, Z. Zhang, Experimental research on heat transfer mechanism of heat sink with composite phase change materials, *Energy Conversion and Management*. 49 (2008) 1740–1746. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2007.10.022>.
- [38] Tauseef-ur-Rehman, H.M. Ali, M.M. Janjua, U. Sajjad, W.-M. Yan, A critical review on heat transfer augmentation of phase change materials embedded with porous materials/foams, *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 135 (2019) 649–673. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.02.001>.
- [39] X. Xiao, P. Zhang, M. Li, Preparation and thermal characterization of paraffin/metal foam composite phase change material, *Applied Energy*. 112 (2013) 1357–1366. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.04.050>.
- [40] X. Xiao, P. Zhang, M. Li, Effective thermal conductivity of open-cell metal foams impregnated with pure paraffin for latent heat storage, *International Journal of Thermal Sciences*. 81 (2014) 94–105. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2014.03.006>.
- [41] M.M. El idi, M. Karkri, M. Kraiem, Preparation and effective thermal conductivity of a Paraffin/ Metal Foam composite, *Journal of Energy Storage*. (2020) 102077. <https://doi.org/10.1016/j.est.2020.102077>.
- [42] Y. Tian, C.Y. Zhao, A numerical investigation of heat transfer in phase change materials (PCMs) embedded in porous metals, *Energy*. 36 (2011) 5539–5546. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2011.07.019>.
- [43] C.Y. Zhao, D. Zhou, Z.G. Wu, Heat Transfer Enhancement of Phase Change Materials (PCMs) in Low and High Temperature Thermal Storage by Using Porous Materials, in: *American Society of Mechanical Engineers Digital Collection*, 2011: pp. 435–441. <https://doi.org/10.1115/IHTC14-22463>.
- [44] C.Y. Zhao, W. Lu, Y. Tian, Heat transfer enhancement for thermal energy storage using metal foams embedded within phase change materials (PCMs), *Solar Energy*. 84 (2010) 1402–1412. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2010.04.022>.
- [45] P. Zhang, Z.N. Meng, H. Zhu, Y.L. Wang, S.P. Peng, Melting heat transfer characteristics of a composite phase change material fabricated by paraffin and metal foam, *Applied Energy*. 185 (2017) 1971–1983. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.10.075>.

Références

- [46] S. Mancin, A. Diani, L. Doretto, K. Hooman, L. Rossetto, Experimental analysis of phase change phenomenon of paraffin waxes embedded in copper foams, *International Journal of Thermal Sciences*. 90 (2015) 79–89. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2014.11.023>.
- [47] C.Y. Zhao, Z.G. Wu, Heat transfer enhancement of high temperature thermal energy storage using metal foams and expanded graphite, *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 95 (2011) 636–643. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2010.09.032>.
- [48] R. Baby, C. Balaji, Experimental investigations on thermal performance enhancement and effect of orientation on porous matrix filled PCM based heat sink, *International Communications in Heat and Mass Transfer*. 46 (2013) 27–30. <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2013.05.018>.
- [49] P. Zhang, Z. Meng, H. Zhu, Y. Wang, S. Peng, Experimental and Numerical Study of Heat Transfer Characteristics of a Paraffin/Metal Foam Composite PCM, *Energy Procedia*. 75 (2015) 3091–3097. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.07.637>.
- [50] X. Huang, Y. Lin, G. Alva, G. Fang, Thermal properties and thermal conductivity enhancement of composite phase change materials using myristyl alcohol/metal foam for solar thermal storage, *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 170 (2017) 68–76. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2017.05.059>.
- [51] T.X. Li, D.L. Wu, F. He, R.Z. Wang, Experimental investigation on copper foam/hydrated salt composite phase change material for thermal energy storage, *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 115 (2017) 148–157. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.07.056>.
- [52] Z.G. Qu, W.Q. Li, J.L. Wang, W.Q. Tao, Passive thermal management using metal foam saturated with phase change material in a heat sink, *International Communications in Heat and Mass Transfer*. 39 (2012) 1546–1549. <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2012.09.001>.
- [53] P. Chen, X. Gao, Y. Wang, T. Xu, Y. Fang, Z. Zhang, Metal foam embedded in SEBS/paraffin/HDPE form-stable PCMs for thermal energy storage, *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 149 (2016) 60–65. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2015.12.041>.
- [54] W.Q. Li, Z.G. Qu, Y.L. He, Y.B. Tao, Experimental study of a passive thermal management system for high-powered lithium ion batteries using porous metal foam saturated with phase change materials, *Journal of Power Sources*. 255 (2014) 9–15. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2014.01.006>.
- [55] U. Nithiyantham, Y. Grosu, A. Anagnostopoulos, E. Carbó-Argibay, O. Bondarchuk, L. González-Fernández, A. Zaki, J.M. Igartua, M.E. Navarro, Y. Ding, A. Faik, Nanoparticles as a high-temperature anticorrosion additive to molten nitrate salts for concentrated solar power, *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 203 (2019) 110171. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2019.110171>.
- [56] W. Ding, H. Shi, A. Jianu, Y. Xiu, A. Bonk, A. Weisenburger, T. Bauer, Molten chloride salts for next generation concentrated solar power plants: Mitigation strategies against corrosion of structural materials, *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 193 (2019) 298–313. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2018.12.020>.
- [57] C. Villada, F. Jaramillo, J.G. Castaño, F. Echeverría, F. Bolívar, Design and development of nitrate-nitrite based molten salts for concentrating solar power applications, *Solar Energy*. 188 (2019) 291–299. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.06.010>.
- [58] G. Peiró, C. Prieto, J. Gasia, A. Jové, L. Miró, L.F. Cabeza, Two-tank molten salts thermal energy storage system for solar power plants at pilot plant scale: Lessons learnt and recommendations for its design, start-up and operation, *Renewable Energy*. 121 (2018) 236–248. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.01.026>.

Références

- [59] Y. Jin, J. Cheng, X. An, T. Su, P. Zhang, Z. Li, Accurate viscosity measurement of nitrates/nitrites salts for concentrated solar power, *Solar Energy*. 137 (2016) 385–392. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2016.08.037>.
- [60] S.S. Sundarram, W. Li, The effect of pore size and porosity on thermal management performance of phase change material infiltrated microcellular metal foams, *Applied Thermal Engineering*. 64 (2014) 147–154. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2013.11.072>.
- [61] E.I. Mohamed Moussa, M. Karkri, A numerical investigation of the effects of metal foam characteristics and heating/cooling conditions on the phase change kinetic of phase change materials embedded in metal foam, *Journal of Energy Storage*. 26 (2019) 100985. <https://doi.org/10.1016/j.est.2019.100985>.
- [62] T. Oya, T. Nomura, N. Okinaka, T. Akiyama, Phase change composite based on porous nickel and erythritol, *Applied Thermal Engineering*. 40 (2012) 373–377. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2012.02.033>.
- [63] M. Kraiem, M. KARKRI, B.N. Sassi, A. Jemni, Préparation et caractérisation thermophysique des composites mousses métalliques / paraffine destinés au stockage de l'énergie thermique, in: *Annales Du Congrès Annuel de La Société Française de Thermique 2019*, Nantes, France, 2019.
- [64] W. Liang, G. Zhang, H. Sun, P. Chen, Z. Zhu, A. Li, Graphene–nickel/n-carboxylic acids composites as form-stable phase change materials for thermal energy storage, *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 132 (2015) 425–430. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2014.09.032>.
- [65] A. Hussain, I.H. Abidi, C.Y. Tso, K.C. Chan, Z. Luo, C.Y.H. Chao, Thermal management of lithium ion batteries using graphene coated nickel foam saturated with phase change materials, *International Journal of Thermal Sciences*. 124 (2018) 23–35. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2017.09.019>.
- [66] A. Hussain, C.Y. Tso, C.Y.H. Chao, Experimental investigation of a passive thermal management system for high-powered lithium ion batteries using nickel foam-paraffin composite, *Energy*. 115 (2016) 209–218. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.09.008>.
- [67] S. Abada, Compréhension et modélisation de l'emballage thermique de batteries Li-ion neuves et vieilles, thesis, Paris 6, 2016. <http://www.theses.fr/2016PA066684> (accessed March 2, 2020).
- [68] L. Ianniciello, P.H. Biwolé, P. Achard, Electric vehicles batteries thermal management systems employing phase change materials, *Journal of Power Sources*. 378 (2018) 383–403. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2017.12.071>.
- [69] Basic to Advanced Battery Information from Battery University, (n.d.). <https://batteryuniversity.com/> (accessed April 7, 2020).
- [70] D. Allart, Gestion et modélisation électrothermique des batteries lithium-ion, (n.d.) 227.
- [71] C.-V. Hémerly, Etudes des phénomènes thermiques dans les batteries Li-ion., phdthesis, Université de Grenoble, 2013. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00968666> (accessed March 2, 2020).
- [72] J. Newman, K.E. Thomas-Alyea, *Electrochemical Systems*, John Wiley & Sons, 2012.
- [73] N. Sato, Thermal behavior analysis of lithium-ion batteries for electric and hybrid vehicles, *Journal of Power Sources*. 99 (2001) 70–77. [https://doi.org/10.1016/S0378-7753\(01\)00478-5](https://doi.org/10.1016/S0378-7753(01)00478-5).
- [74] L. Ianniciello, Etude du comportement thermique d'une batterie électrochimique thermorégulée par matériaux à changement de phase pour le véhicule électrique, thesis, Paris Sciences et Lettres, 2018. <http://www.theses.fr/2018PSLEM020> (accessed April 1, 2020).

Références

- [75] K. Kitoh, H. Nemoto, 100 Wh Large size Li-ion batteries and safety tests, *Journal of Power Sources*. 81–82 (1999) 887–890. [https://doi.org/10.1016/S0378-7753\(99\)00125-1](https://doi.org/10.1016/S0378-7753(99)00125-1).
- [76] R. Zhao, S. Zhang, J. Liu, J. Gu, A review of thermal performance improving methods of lithium ion battery: Electrode modification and thermal management system, *Journal of Power Sources*. 299 (2015) 557–577. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2015.09.001>.
- [77] Z. Rao, S. Wang, A review of power battery thermal energy management, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 15 (2011) 4554–4571. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.07.096>.
- [78] S.K. Mohammadian, Y.-L. He, Y. Zhang, Internal cooling of a lithium-ion battery using electrolyte as coolant through microchannels embedded inside the electrodes, *Journal of Power Sources*. 293 (2015) 458–466. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2015.05.055>.
- [79] A.A. Pesaran, Battery thermal models for hybrid vehicle simulations, *Journal of Power Sources*. 110 (2002) 377–382. [https://doi.org/10.1016/S0378-7753\(02\)00200-8](https://doi.org/10.1016/S0378-7753(02)00200-8).
- [80] J. Zhao, Z. Rao, Y. Li, Thermal performance of mini-channel liquid cooled cylinder based battery thermal management for cylindrical lithium-ion power battery, *Energy Conversion and Management*. 103 (2015) 157–165. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.06.056>.
- [81] R. Zhao, S. Zhang, J. Gu, J. Liu, S. Carkner, E. Lanoue, An experimental study of lithium ion battery thermal management using flexible hydrogel films, *Journal of Power Sources*. 255 (2014) 29–36. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2013.12.138>.
- [82] H. Hirano, T. Tajima, T. Hasegawa, T. Sekiguchi, M. Uchino, Boiling Liquid Battery Cooling for Electric Vehicle, 2014 IEEE Conference and Expo Transportation Electrification Asia-Pacific (ITEC Asia-Pacific). (2014) 1–4. <https://doi.org/10.1109/ITEC-AP.2014.6940931>.
- [83] S. Zhang, R. Zhao, J. Liu, J. Gu, Investigation on a hydrogel based passive thermal management system for lithium ion batteries, *Energy*. 68 (2014) 854–861. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2014.03.012>.
- [84] R. Rizk, H. Louahlia, H. Gualous, P. Schaezel, Passive Cooling of High Capacity Lithium-Ion batteries, 2018 IEEE International Telecommunications Energy Conference (INT'EL'EC). (2018) 1–4. <https://doi.org/10.1109/INTLEC.2018.8612368>.
- [85] R. Rizk, Refroidissement passif de batteries lithium pour le stockage d'énergie, thesis, Normandie, 2018. <http://www.theses.fr/2018NORMC228> (accessed April 6, 2020).
- [86] N. Putra, B. Ariantara, R.A. Pamungkas, Experimental investigation on performance of lithium-ion battery thermal management system using flat plate loop heat pipe for electric vehicle application, *Applied Thermal Engineering*. 99 (2016) 784–789. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.01.123>.
- [87] Q. Wang, B. Jiang, Q.F. Xue, H.L. Sun, B. Li, H.M. Zou, Y.Y. Yan, Experimental investigation on EV battery cooling and heating by heat pipes, *Applied Thermal Engineering*. 88 (2015) 54–60. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2014.09.083>.
- [88] J. Rhi, Battery Thermal Management System of Future Electric Vehicles with Loop Thermosyphon, in: n.d. https://scholar.google.com/scholar_lookup?title=Battery%20thermal%20management%20system%20of%20future%20electric%20vehicles%20with%20loop%20thermosyphon&author=Rhi%20Jang&publication_year=2010 (accessed April 6, 2020).
- [89] G. Swanepoel, Thermal management of hybrid electrical vehicles using heat pipes, Thesis, Stellenbosch : Stellenbosch University, 2001. <https://scholar.sun.ac.za:443/handle/10019.1/52564> (accessed April 6, 2020).

Références

- [90] S.A. Hallaj, J.R. Selman, A Novel Thermal Management System for Electric Vehicle Batteries Using Phase-Change Material, *J. Electrochem. Soc.* 147 (2000) 3231. <https://doi.org/10.1149/1.1393888>.
- [91] S.A. Khateeb, M.M. Farid, J.R. Selman, S. Al-Hallaj, Design and simulation of a lithium-ion battery with a phase change material thermal management system for an electric scooter, *Journal of Power Sources.* 128 (2004) 292–307. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2003.09.070>.
- [92] S.A. Khateeb, S. Amiruddin, M. Farid, J.R. Selman, S. Al-Hallaj, Thermal management of Li-ion battery with phase change material for electric scooters: experimental validation, *Journal of Power Sources.* 142 (2005) 345–353. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2004.09.033>.
- [93] A. Mills, S. Al-Hallaj, Simulation of passive thermal management system for lithium-ion battery packs, *Journal of Power Sources.* 141 (2005) 307–315. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2004.09.025>.
- [94] R. Sabbah, R. Kizilel, J.R. Selman, S. Al-Hallaj, Active (air-cooled) vs. passive (phase change material) thermal management of high power lithium-ion packs: Limitation of temperature rise and uniformity of temperature distribution, *Journal of Power Sources.* 182 (2008) 630–638. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2008.03.082>.
- [95] X. Duan, G.F. Naterer, Heat transfer in phase change materials for thermal management of electric vehicle battery modules, *International Journal of Heat and Mass Transfer.* 53 (2010) 5176–5182. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2010.07.044>.
- [96] M.M. El Idi, M. Karkri, M. Abdou Tankari, A passive thermal management system of Li-ion batteries using PCM composites: Experimental and numerical investigations, *International Journal of Heat and Mass Transfer.* 169 (2021) 120894. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.120894>.
- [97] Z. Ling, J. Chen, X. Fang, Z. Zhang, T. Xu, X. Gao, S. Wang, Experimental and numerical investigation of the application of phase change materials in a simulative power batteries thermal management system, *Applied Energy.* 121 (2014) 104–113. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.01.075>.
- [98] C.-V. Hémary, F. Pra, J.-F. Robin, P. Marty, Experimental performances of a battery thermal management system using a phase change material, *Journal of Power Sources.* 270 (2014) 349–358. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2014.07.147>.
- [99] AllCell Technologies, (n.d.). <https://www.allcelltech.com/> (accessed April 15, 2020).
- [100] L. Zhang, K. Zhou, Q. Wei, L. Ma, W. Ye, H. Li, B. Zhou, Z. Yu, C.-T. Lin, J. Luo, X. Gan, Thermal conductivity enhancement of phase change materials with 3D porous diamond foam for thermal energy storage, *Applied Energy.* 233–234 (2019) 208–219. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.10.036>.
- [101] P. Lv, M. Ding, C. Liu, Z. Rao, Experimental investigation on thermal properties and thermal performance enhancement of octadecanol/expanded perlite form stable phase change materials for efficient thermal energy storage, *Renewable Energy.* 131 (2019) 911–922. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.07.102>.
- [102] Q. Xiao, M. Zhang, J. Fan, L. Li, T. Xu, W. Yuan, Thermal conductivity enhancement of hydrated salt phase change materials employing copper foam as the supporting material, *Solar Energy Materials and Solar Cells.* 199 (2019) 91–98. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2019.04.020>.
- [103] S.E. Gustafsson, Transient plane source techniques for thermal conductivity and thermal diffusivity measurements of solid materials, *Review of Scientific Instruments.* 62 (1991) 797–804. <https://doi.org/10.1063/1.1142087>.
- [104] A. Trigui, M. Karkri, I. Krupa, Thermal conductivity and latent heat thermal energy storage properties of LDPE/wax as a shape-stabilized composite phase change material,

Références

- Energy Conversion and Management. 77 (2014) 586–596. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2013.09.034>.
- [105] A. Trigui, M. Karkri, L. Peña, C. Boudaya, Y. Candau, S. Bouffi, F. Vilaseca, Thermal and mechanical properties of maize fibres–high density polyethylene biocomposites, *Journal of Composite Materials*. 47 (2013) 1387–1397. <https://doi.org/10.1177/0021998312447648>.
- [106] A. Trigui, M. Karkri, C. Boudaya, Y. Candau, L. Ibos, M. Fois, Experimental investigation of a composite phase change material: Thermal-energy storage and release, *Journal of Composite Materials*. 48 (2014) 49–62. <https://doi.org/10.1177/0021998312468185>.
- [107] M. Kraiem, M. Karkri, S.B. Nasrallah, P. Sobolciak, M. Fois, N.A. Alnuaimi, Thermophysical Characterization and Numerical Investigation of Three Paraffin Waxes as Latent Heat Storage Materials, (2019). <https://doi.org/10.20944/preprints201903.0034.v1>.
- [108] X. Huang, Y. Lin, G. Alva, G. Fang, Thermal properties and thermal conductivity enhancement of composite phase change materials using myristyl alcohol/metal foam for solar thermal storage, *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 170 (2017) 68–76. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2017.05.059>.
- [109] Z. Tao, H. Wang, J. Liu, W. Zhao, Z. Liu, Q. Guo, Dual-level packaged phase change materials – thermal conductivity and mechanical properties, *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 169 (2017) 222–225. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2017.05.030>.
- [110] C. Wang, T. Lin, N. Li, H. Zheng, Heat transfer enhancement of phase change composite material: Copper foam/paraffin, *Renewable Energy*. 96 (2016) 960–965. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.04.039>.
- [111] V.V. Calmidi, R.L. Mahajan, Forced Convection in High Porosity Metal Foams, *J. Heat Transfer*. 122 (2000) 557–565. <https://doi.org/10.1115/1.1287793>.
- [112] V.V. Calmidi, R.L. Mahajan, Mixed convection over a heated horizontal surface in a partial enclosure, *International Journal of Heat and Fluid Flow*. 19 (1998) 358–367. [https://doi.org/10.1016/S0142-727X\(98\)00002-2](https://doi.org/10.1016/S0142-727X(98)00002-2).
- [113] A. Bhattacharya, V.V. Calmidi, R.L. Mahajan, Thermophysical properties of high porosity metal foams, *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 45 (2002) 1017–1031. [https://doi.org/10.1016/S0017-9310\(01\)00220-4](https://doi.org/10.1016/S0017-9310(01)00220-4).
- [114] K. Boomsma, D. Poulikakos, On the effective thermal conductivity of a three-dimensionally structured fluid-saturated metal foam, *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 44 (2001) 827–836. [https://doi.org/10.1016/S0017-9310\(00\)00123-X](https://doi.org/10.1016/S0017-9310(00)00123-X).
- [115] T. Yuan, Heat Transfer Enhancement in Phase Change Materials (PCMs) by Metal Foams and Cascaded Thermal Energy Storage, Department of Engineering University of Warwick. (2012) 178.
- [116] J. Hugo, Transferts dans les milieux cellulaires à forte porosité : applications à l’optimisation structurale des échangeurs à ailettes, thesis, Aix-Marseille, 2012. <http://www.theses.fr/2012AIXM4767> (accessed February 17, 2020).
- [117] P. Du Plessis, A. Montillet, J. Comiti, J. Legrand, Pressure drop prediction for flow through high porosity metallic foams, *Chemical Engineering Science*. 49 (1994) 3545–3553. [https://doi.org/10.1016/0009-2509\(94\)00170-7](https://doi.org/10.1016/0009-2509(94)00170-7).
- [118] C. V, Transport phenomena in high porosity fibrous metal foams, University of Colorado, 1998. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=5506142> (accessed February 16, 2020).
- [119] K. Vafai, *Handbook of Porous Media*, CRC Press, 2015. <https://doi.org/10.1201/b18614>.
- [120] P. FORCHHEIMER, Wasserbewegung durch Boden, *Z. Ver. Deutsch, Ing.* 45 (1901) 1782–1788.

Références

- [121] S. Whitaker, The Forchheimer equation: A theoretical development, *Transp Porous Med.* 25 (1996) 27–61. <https://doi.org/10.1007/BF00141261>.
- [122] S. Mahjoob, K. Vafai, A synthesis of fluid and thermal transport models for metal foam heat exchangers, *International Journal of Heat and Mass Transfer.* 51 (2008) 3701–3711. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2007.12.012>.
- [123] J.M. Hugo, F. Topin, Dispersion in Metal Foam: A Pore Scale Numerical Study, *Defect and Diffusion Forum.* (2012). <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/DDF.326-328.410>.
- [124] L. Tadrist, M. Miscevic, O. Rahli, F. Topin, About the use of fibrous materials in compact heat exchangers, *Experimental Thermal and Fluid Science.* 28 (2004) 193–199. [https://doi.org/10.1016/S0894-1777\(03\)00039-6](https://doi.org/10.1016/S0894-1777(03)00039-6).
- [125] N. Dukhan, Correlations for the pressure drop for flow through metal foam, *Exp Fluids.* 41 (2006) 665–672. <https://doi.org/10.1007/s00348-006-0194-x>.
- [126] Y. X, B.J. J, L. T, A simplistic analytical model of permeability for open-cell metallic foams, *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics.* 46 (2014) 682–686.
- [127] Principles of Heat Transfer in Porous Media - Maasoud Kaviany - Google Livres, (n.d.). https://books.google.fr/books?hl=fr&lr=&id=MI3bBwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PR7&dq=Kaviany+1992+&ots=GSudt1sBuS&sig=MgzpgXCc4BmYuJ6zCGQfI6_2A4U&redir_esc=y#v=onepage&q=Kaviany%201992&f=false (accessed February 17, 2020).
- [128] M. Quintard, S. Whitaker, Local thermal equilibrium for transient heat conduction: theory and comparison with numerical experiments, *International Journal of Heat and Mass Transfer.* 38 (1995) 2779–2796. [https://doi.org/10.1016/0017-9310\(95\)00028-8](https://doi.org/10.1016/0017-9310(95)00028-8).
- [129] M. Quintard, M. Kaviany, S. Whitaker, Two-medium treatment of heat transfer in porous media: numerical results for effective properties, *Advances in Water Resources.* 20 (1997) 77–94. [https://doi.org/10.1016/S0309-1708\(96\)00024-3](https://doi.org/10.1016/S0309-1708(96)00024-3).
- [130] S. Whitaker, *The Method of Volume Averaging*, Springer Science & Business Media, 2013.
- [131] R. Younsi, SIMULATION NUMERIQUE DU TRANSFERT DE CHALEUR ET DE MASSE EN MILIEUX FLUIDES ET POREUX, phdthesis, Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene, 2002. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00148969> (accessed February 20, 2020).
- [132] H.P.G. DARCY, *Les Fontaines publiques de la ville de Dijon. Exposition et application des principes à suivre et des formules à employer dans les questions de distribution d'eau*, etc, V. Dalamont, 1856.
- [133] H.C. Brinkman, A calculation of the viscous force exerted by a flowing fluid on a dense swarm of particles, *Appl. Sci. Res.* 1 (1949) 27. <https://doi.org/10.1007/BF02120313>.
- [134] J.C. Ward, Turbulent Flow in Porous Media, *Journal of the Hydraulics Division.* 90 (1964) 1–12.
- [135] M. Kumar, D.J. Krishna, Influence of Mushy Zone Constant on Thermohydraulics of a PCM, *Energy Procedia.* 109 (2017) 314–321. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.074>.
- [136] V.R. Voller, C. Prakash, A fixed grid numerical modelling methodology for convection-diffusion mushy region phase-change problems, *International Journal of Heat and Mass Transfer.* 30 (1987) 1709–1719. [https://doi.org/10.1016/0017-9310\(87\)90317-6](https://doi.org/10.1016/0017-9310(87)90317-6).
- [137] A.D. Brent, V.R. Voller, K.J. Reid, Enthalpy-Porosity Technique for Modeling Convection-Diffusion Phase Change: Application to the Melting of a Pure Metal, *Numerical Heat Transfer.* 13 (1988) 297–318. <https://doi.org/10.1080/10407788808913615>.

Références

- [138] V.R. Voller, C.R. Swaminathan, B.G. Thomas, Fixed grid techniques for phase change problems: A review, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*. 30 (1990) 875–898. <https://doi.org/10.1002/nme.1620300419>.
- [139] P. Nithiarasu, T. Sundararajan, K.N. Seetharamu, Double-diffusive natural convection in a fluid saturated porous cavity with a freely convecting wall, *International Communications in Heat and Mass Transfer*. 24 (1997) 1121–1130. [https://doi.org/10.1016/S0735-1933\(97\)00106-1](https://doi.org/10.1016/S0735-1933(97)00106-1).
- [140] M. Mamou, P. Vasseur, E. Bilgen, Multiple solutions for double-diffusive convection in a vertical porous enclosure, *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 38 (1995) 1787–1798. [https://doi.org/10.1016/0017-9310\(94\)00301-B](https://doi.org/10.1016/0017-9310(94)00301-B).
- [141] B. Goyeau, J.-P. Songbe, D. Gobin, Numerical study of double-diffusive natural convection in a porous cavity using the Darcy-Brinkman formulation, *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 39 (1996) 1363–1378. [https://doi.org/10.1016/0017-9310\(95\)00225-1](https://doi.org/10.1016/0017-9310(95)00225-1).
- [142] R. Bennacer, A. Tobbal, H. Beji, P. Vasseur, Double diffusive convection in a vertical enclosure filled with anisotropic porous media, *International Journal of Thermal Sciences*. 40 (2001) 30–41. [https://doi.org/10.1016/S1290-0729\(00\)01185-6](https://doi.org/10.1016/S1290-0729(00)01185-6).
- [143] P.H. Biwole, D. Groulx, F. Souayfane, T. Chiu, Influence of fin size and distribution on solid-liquid phase change in a rectangular enclosure, *International Journal of Thermal Sciences*. 124 (2018) 433–446. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2017.10.038>.
- [144] D. Groulx, P.H. Biwole, M. Bhourri, Phase change heat transfer in a rectangular enclosure as a function of inclination and fin placement, *International Journal of Thermal Sciences*. 151 (2020) 106260. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2020.106260>.
- [145] J. G. Fourie, J. P. Du Plessis, Pressure drop modelling in cellular metallic foams, *Chemical Engineering Science*. 57 (2002) 2781–2789. [https://doi.org/10.1016/S0009-2509\(02\)00166-5](https://doi.org/10.1016/S0009-2509(02)00166-5).
- [146] Z. A, Heat transfer from tubes in crossflow, 18 (1987) 87–139.
- [147] W.H. Shih, W.C. Chiu, W.H. Hsieh, Height Effect on Heat-Transfer Characteristics of Aluminum-Foam Heat Sinks, *J. Heat Transfer*. 128 (2006) 530–537. <https://doi.org/10.1115/1.2188461>.
- [148] O. Schenk, K. Gärtner, Two-level dynamic scheduling in PARDISO: Improved scalability on shared memory multiprocessing systems, *Parallel Computing*. 28 (2002) 187–197. [https://doi.org/10.1016/S0167-8191\(01\)00135-1](https://doi.org/10.1016/S0167-8191(01)00135-1).
- [149] Y. Zhao, C.Y. Zhao, Z.G. Xu, H.J. Xu, Modeling metal foam enhanced phase change heat transfer in thermal energy storage by using phase field method, *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 99 (2016) 170–181. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.03.076>.
- [150] F. Zhu, C. Zhang, X. Gong, Numerical analysis and comparison of the thermal performance enhancement methods for metal foam/phase change material composite, *Applied Thermal Engineering*. 109 (2016) 373–383. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.08.088>.
- [151] H. Shokouhmand, B. Kamkari, Experimental investigation on melting heat transfer characteristics of lauric acid in a rectangular thermal storage unit, *Experimental Thermal and Fluid Science*. 50 (2013) 201–212. <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2013.06.010>.
- [152] B. Kamkari, H. Shokouhmand, F. Bruno, Experimental investigation of the effect of inclination angle on convection-driven melting of phase change material in a rectangular enclosure, *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 72 (2014) 186–200. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2014.01.014>.

Références

- [153] N.S. Dhaidan, J.M. Khodadadi, T.A. Al-Hattab, S.M. Al-Mashat, Experimental and numerical investigation of melting of phase change material/nanoparticle suspensions in a square container subjected to a constant heat flux, *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 66 (2013) 672–683. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2013.06.057>.
- [154] M. Fadl, P. Eames, A Numerical Investigation into the Heat Transfer and Melting Process of Lauric Acid in a Rectangular Enclosure with Three Values of Wall Heat Flux, *Energy Procedia*. 158 (2019) 4502–4509. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2019.01.761>.
- [155] M. Caliano, N. Bianco, G. Graditi, L. Mongibello, Analysis of a phase change material-based unit and of an aluminum foam/phase change material composite-based unit for cold thermal energy storage by numerical simulation, *Applied Energy*. 256 (2019) 113921. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.113921>.
- [156] A. Diani, M. Campanale, Transient melting of paraffin waxes embedded in aluminum foams: Experimental results and modeling, *International Journal of Thermal Sciences*. 144 (2019) 119–128. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2019.06.004>.
- [157] W.Q. Li, H. Wan, T.T. Jing, Y.B. Li, P.J. Liu, G.Q. He, F. Qin, Microencapsulated phase change material (MEPCM) saturated in metal foam as an efficient hybrid PCM for passive thermal management: A numerical and experimental study, *Applied Thermal Engineering*. 146 (2019) 413–421. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.10.006>.
- [158] T.-Rehman, H.M. Ali, Experimental study on the thermal behavior of RT-35HC paraffin within copper and Iron-Nickel open cell foams: Energy storage for thermal management of electronics, *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 146 (2020) 118852. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.118852>.
- [159] R. Rizk, H. Louahlia, H. Gualous, P. Schaezel, G. Alcicek, Experimental analysis on Li-ion battery local heat distribution, *J Therm Anal Calorim*. 138 (2019) 1557–1571. <https://doi.org/10.1007/s10973-019-08283-9>.
- [160] R. Rizk, H. Louahlia, H. Gualous, P. Schaezel, Experimental analysis and transient thermal modelling of a high capacity prismatic lithium-ion battery, *International Communications in Heat and Mass Transfer*. 94 (2018) 115–125. <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2018.03.018>.
- [161] T. Waldmann, M. Wilka, M. Kasper, M. Fleischhammer, M. Wohlfahrt-Mehrens, Temperature dependent ageing mechanisms in Lithium-ion batteries – A Post-Mortem study, *Journal of Power Sources*. 262 (2014) 129–135. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2014.03.112>.
- [162] E.I. Mohamed Moussa, M. Karkri, A numerical investigation of the effects of metal foam characteristics and heating/cooling conditions on the phase change kinetic of phase change materials embedded in metal foam, *Journal of Energy Storage*. 26 (2019) 100985. <https://doi.org/10.1016/j.est.2019.100985>.
- [163] M. Moussa EL IDI, M. Karkri, Heating and cooling conditions effects on the kinetic of phase change of PCM embedded in metal foam, *Case Studies in Thermal Engineering*. (2020) 100716. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2020.100716>.
- [164] M.M. EL IDI, M. Karkri, Etude numérique de stockage d'énergie thermique dans un composite : mousses métalliques/matériaux à changement de phase, in: *Congrès Français de Thermique SFT 2019, Nantes, France, 2019*. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02399163> (accessed February 20, 2020).
- [165] M.M. EL IDI, M. Karkri, Méthode inverse pour la détermination expérimentale des propriétés thermophysiques des matériaux à changement de phase, in: *Congrès Français de Thermique, SFT 2018, PAU, France, 2018*. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02402478> (accessed July 14, 2020).

Références

- [166] M.M. EL IDI, M. KARKRI, M.A. TANKARI, C. LAROUCI, T. AZIB, G. LEVEBRE, Thermal management of Li-ion batteries using PCM-Metal foam composite: Experimental and numerical investigations, in: *Annales du Congrès Annuel de la Société Française de Thermique 2020*, Belfort, France, n.d.: p. 8. <https://doi.org/10.25855/SFT2020-148>.
- [167] M.M. EL IDI, M. Karkri, M.A. Tankari, C. Larouci, T. Azib, G. Levebre, Thermal management of Li-ion batteries using PCM-Metal foam composite: Experimental and numerical investigations, in: *Congrès Annuel de La Société Française de Thermique 2020*, Belfort, France, 2020. <https://doi.org/10.25855/SFT2020-148>.
- [168] M.M. EL IDI, M. KARKRI, Melting and solidification behavior of paraffin embedded in metal foam, *JSUR*. 2 (2019) 1–10.
- [169] V. Ramadesigan, P.W.C. Northrop, S. De, S. Santhanagopalan, R.D. Braatz, V.R. Subramanian, Modeling and Simulation of Lithium-Ion Batteries from a Systems Engineering Perspective, *J. Electrochem. Soc.* 159 (2012) R31. <https://doi.org/10.1149/2.018203jes>.
- [170] Z.N. Bako, M.A. Tankari, G. Lefebvre, A.S. Maiga, Lead-acid battery behavior study and modelling based on the Kinetic Battery Model approach, in: *2016 IEEE International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA)*, 2016: pp. 673–677. <https://doi.org/10.1109/ICRERA.2016.7884419>.
- [171] Z.N. Bako, M.A. Tankari, G. Lefebvre, A.S. Maiga, Experiment-Based Methodology of Kinetic Battery Modeling for Energy Storage, *IEEE Transactions on Industry Applications*. 55 (2019) 593–599. <https://doi.org/10.1109/TIA.2018.2866148>.
- [172] S. Raël, M. Urbain, H. Renaudineau, Modèle multiphysique de batterie lithium-ion implanté dans un logiciel de simulation des systèmes électriques, in: *SGE 2014, Symposium de Génie Electrique*, Cachan, France, 2014. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01065163> (accessed August 3, 2020).
- [173] D.V. Do, Diagnostic de batteries lithium ion dans les applications embarquées, These de doctorat, Compiègne, 2010. <http://www.theses.fr/2010COMP1884> (accessed August 3, 2020).
- [174] H. He, R. Xiong, J. Fan, Evaluation of Lithium-Ion Battery Equivalent Circuit Models for State of Charge Estimation by an Experimental Approach, *Energies*. 4 (2011) 582–598. <https://doi.org/10.3390/en4040582>.
- [175] X. Lai, S. Wang, S. Ma, J. Xie, Y. Zheng, Parameter sensitivity analysis and simplification of equivalent circuit model for the state of charge of lithium-ion batteries, *Electrochimica Acta*. 330 (2020) 135239. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2019.135239>.
- [176] S.S. Madani, E. Schaltz, S. Knudsen Kær, An Electrical Equivalent Circuit Model of a Lithium Titanate Oxide Battery, *Batteries*. 5 (2019) 31. <https://doi.org/10.3390/batteries5010031>.
- [177] J. Su, M. Lin, S. Wang, J. Li, J. Coffie-Ken, F. Xie, An equivalent circuit model analysis for the lithium-ion battery pack in pure electric vehicles, *Measurement and Control*. 52 (2019) 193–201. <https://doi.org/10.1177/0020294019827338>.
- [178] L.W. Yao, J.A. Aziz, P.Y. Kong, N.R.N. Idris, Modeling of lithium-ion battery using MATLAB/simulink, in: *IECON 2013 - 39th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, 2013: pp. 1729–1734. <https://doi.org/10.1109/IECON.2013.6699393>.
- [179] C. Liao, H. Li, L. Wang, A dynamic equivalent circuit model of LiFePO₄ cathode material for lithium ion batteries on hybrid electric vehicles, in: *2009 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*, 2009: pp. 1662–1665. <https://doi.org/10.1109/VPPC.2009.5289681>.

Références

- [180] A. Lahyani, A. Sari, I. Lahbib, P. Venet, Optimal hybridization and amortized cost study of battery/supercapacitors system under pulsed loads, *Journal of Energy Storage*. 6 (2016) 222–231. <https://doi.org/10.1016/j.est.2016.01.007>.
- [181] E. Kuhn, C. Forgez, G. Friedrich, Modeling diffusive phenomena using non integer derivatives, *Eur. Phys. J. Appl. Phys.* 25 (2004) 183–190. <https://doi.org/10.1051/epjap:2004009>.
- [182] N. Damay, C. Forgez, G. Friedrich, Modélisation des non-linéarités en courant et en température d'un circuit électrique équivalent de batterie en vue de sa caractérisation rapide, (n.d.) 7.
- [183] H. Liu, Z. Wei, W. He, J. Zhao, Thermal issues about Li-ion batteries and recent progress in battery thermal management systems: A review, *Energy Conversion and Management*. 150 (2017) 304–330. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.08.016>.
- [184] R. Liu, J. Chen, J. Xun, K. Jiao, Q. Du, Numerical investigation of thermal behaviors in lithium-ion battery stack discharge, *Applied Energy*. 132 (2014) 288–297. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.07.024>.
- [185] M.M. El idi, M. Karkri, M. Abdou tankari, S. Vincent, Hybrid cooling based battery thermal management using composite phase change materials and forced convection, *Journal of Energy Storage*. 41 (2021) 102946. <https://doi.org/10.1016/j.est.2021.102946>.
- [186] Hot Disk | Anisotropy Thermal Conductivity Tests of Batteries, Hot Disk. (n.d.). <https://www.hotdiskinstruments.com/applications/anisotropy-thermal-conductivity-tests-of-batteries/> (accessed August 7, 2020).
- [187] Optimization Toolbox Documentation, (n.d.). <https://www.mathworks.com/help/optim/index.html> (accessed July 30, 2020).
- [188] T.F. Coleman, Y. Li, An Interior Trust Region Approach for Nonlinear Minimization Subject to Bounds, *SIAM J. Optim.* 6 (1996) 418–445. <https://doi.org/10.1137/0806023>.
- [189] T.F. Coleman, Y. Li, On the convergence of interior-reflective Newton methods for nonlinear minimization subject to bounds, *Mathematical Programming*. 67 (1994) 189–224. <https://doi.org/10.1007/BF01582221>.
- [190] T. Huria, M. Ceraolo, J. Gazzarri, R. Jackey, High fidelity electrical model with thermal dependence for characterization and simulation of high power lithium battery cells, in: 2012 IEEE International Electric Vehicle Conference, 2012: pp. 1–8. <https://doi.org/10.1109/IEVC.2012.6183271>.
- [191] F.A.L. Dullien, *Porous Media: Fluid Transport and Pore Structure*, Academic Press, 2012.
- [192] L.J. Gibson, M.F. Ashby, *Cellular Solids: Structure and Properties*, Cambridge University Press, 1999.
- [193] A.G. Evans, J.W. Hutchinson, M.F. Ashby, Multifunctionality of cellular metal systems, *Progress in Materials Science*. 43 (1998) 171–221. [https://doi.org/10.1016/S0079-6425\(98\)00004-8](https://doi.org/10.1016/S0079-6425(98)00004-8).
- [194] *Advanced Structural Materials: Properties, Design Optimization, and Applications*, CRC Press. (n.d.). <https://www.crcpress.com/Advanced-Structural-Materials-Properties-Design-Optimization-and-Applications/Soboyejo-Srivatsan/p/book/9780367389604> (accessed February 20, 2020).
- [195] Z. Liu, Y. Yao, H. Wu, Numerical modeling for solid–liquid phase change phenomena in porous media: Shell-and-tube type latent heat thermal energy storage, *Applied Energy*. 112 (2013) 1222–1232. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.02.022>.
- [196] A.N.M. Alhusseny, A.G. Nasser, N.M.J. Al-zurf, High-Porosity Metal Foams: Potentials, Applications, and Formulations, in: T.H. Ghrib (Ed.), *Porosity - Process, Technologies and Applications*, InTech, 2018. <https://doi.org/10.5772/intechopen.70451>.

Références

- [197] ALVEOTEC, innovation fonderie, (n.d.). <http://www.alveotec.fr/fr/> (accessed February 20, 2020).
- [198] C.Y. Zhao, Review on thermal transport in high porosity cellular metal foams with open cells, *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 55 (2012) 3618–3632. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2012.03.017>.
- [199] C. Xu, Y. Mao, Z. Hu, Numerical study of pore-scale flow and noise of an open cell metal foam, *Aerospace Science and Technology*. 82–83 (2018) 185–198. <https://doi.org/10.1016/j.ast.2018.09.002>.
- [200] Ashby, Evans, Fleck, Gibson, Hutchinson, Wadley, Delale, *Metal Foams: A Design Guide*, *Appl. Mech. Rev.* 54 (2001) B105–B106. <https://doi.org/10.1115/1.1421119>.
- [201] Y. Yao, H. Wu, Z. Liu, A new prediction model for the effective thermal conductivity of high porosity open-cell metal foams, *International Journal of Thermal Sciences*. 97 (2015) 56–67. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2015.06.008>.
- [202] J. Banhart, Manufacture, characterisation and application of cellular metals and metal foams, *Progress in Materials Science*. 46 (2001) 559–632. [https://doi.org/10.1016/S0079-6425\(00\)00002-5](https://doi.org/10.1016/S0079-6425(00)00002-5).
- [203] P.C. Carman, Fluid flow through granular beds, *Chemical Engineering Research and Design*. 75 (1997) S32–S48. [https://doi.org/10.1016/S0263-8762\(97\)80003-2](https://doi.org/10.1016/S0263-8762(97)80003-2).
- [204] B. Stute, V. Krupp, E. von Lieres, Performance of iterative equation solvers for mass transfer problems in three-dimensional sphere packings in COMSOL, *Simulation Modelling Practice and Theory*. 33 (2013) 115–131. <https://doi.org/10.1016/j.simpat.2012.10.004>.
- [205] Christoph. Fredebeul, A-BDF: A Generalization of the Backward Differentiation Formulae, *SIAM J. Numer. Anal.* 35 (1998) 1917–1938. <https://doi.org/10.1137/S0036142996306217>.
- [206] R.K. Brayton, F.G. Gustavson, G.D. Hachtel, A new efficient algorithm for solving differential-algebraic systems using implicit backward differentiation formulas, *Proceedings of the IEEE*. 60 (1972) 98–108. <https://doi.org/10.1109/PROC.1972.8562>.
- [207] B. Gear, Backward differentiation formulas, *Scholarpedia*. 2 (2007) 3162. <https://doi.org/10.4249/scholarpedia.3162>.
- [208] A. Jameson, E. Turkel, Implicit schemes and *LU* decompositions, *Math. Comp.* 37 (1981) 385–397. <https://doi.org/10.1090/S0025-5718-1981-0628702-9>.
- [209] V. Daftardar-Gejji, H. Jafari, An iterative method for solving nonlinear functional equations, *Journal of Mathematical Analysis and Applications*. 316 (2006) 753–763. <https://doi.org/10.1016/j.jmaa.2005.05.009>.
- [210] S.S. Rao, *The Finite Element Method in Engineering*, Butterworth-Heinemann, 2017.
- [211] J.C. Caendish, D.A. Field, W.H. Frey, An approach to automatic three-dimensional finite element mesh generation, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*. 21 (1985) 329–347. <https://doi.org/10.1002/nme.1620210210>.
- [212] R. Schneiders, R. Bünten, Automatic generation of hexahedral finite element meshes, *Computer Aided Geometric Design*. 12 (1995) 693–707. [https://doi.org/10.1016/0167-8396\(95\)00013-V](https://doi.org/10.1016/0167-8396(95)00013-V).
- [213] G. Yagawa, T. Yamada, Free mesh method: A new meshless finite element method, *Computational Mechanics*. 18 (1996) 383–386. <https://doi.org/10.1007/BF00376134>.
- [214] Recent Advances of Research on Finite Element Mesh Generation Methods-- 《Journal of Computer Aided Design & Computer Graphics》2003年01期, (n.d.). http://en.cnki.com.cn/Article_en/CJFDTotol-JSJF200301000.htm (accessed February 19, 2020).
- [215] T. Jf, W. Np, Structured and unstructured grid generation., *Crit Rev Biomed Eng*. 20 (1992) 73–120.

Références

- [216] M. Farrashkhalvat, J.P. Miles, *Basic Structured Grid Generation: With an introduction to unstructured grid generation*, Elsevier, 2003.
- [217] D.J. Mavriplis, *Unstructured Grid Techniques*, *Annual Review of Fluid Mechanics*. 29 (1997) 473–514. <https://doi.org/10.1146/annurev.fluid.29.1.473>.