Méthodologie de conception des matériaux architecturés pour le stockage latent dans le domaine du bâtiment

Juan Pablo Arzamendia Lopez

▶ **To cite this version:**

Juan Pablo Arzamendia Lopez. Méthodologie de conception des matériaux architecturés pour le stockage latent dans le domaine du bâtiment. Architecture, aménagement de l'espace. INSA de Lyon, 2013. Français. NNT : 2013ISAL0060 . tel-01135297

HAL Id: tel-01135297

https://theses.hal.science/tel-01135297

Submitted on 25 Mar 2015

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.

THÈSE

Méthodologie de conception des matériaux architecturés pour le stockage latent dans le domaine du bâtiment

présentée devant

l'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon

par

Juan Pablo Arzamendia López

Ingénieur diplômé de l'INSA de Lyon

pour obtenir

le **GRADE DE DOCTEUR**

École doctorale :

Mécanique, Énergétique, Génie Civil, Acoustique

Spécialité : **Énergétique**

Thèse préparée au Centre Thermique de Lyon,

soutenue le 28/06/2013 devant la Commission d'examen

Jury

Bernard Yrieix (Ingénieur Chercheur)	EDF R&D	Examinateur
Christian Inard (Professeur)	Université de La Rochelle	Rapporteur
Daniel Quenard (Ingénieur Chercheur)	CSTB	Invité
Dominique Baillis (Professeur)	INSA de Lyon	Directeur de thèse
Frédéric Kuznik (Maître de Conférences)	INSA de Lyon	Directeur de thèse
Gilles Fraisse (Professeur)	Université de Savoie	Examinateur
Rémy Dendievel (Professeur)	Grenoble-INP	Rapporteur

N° d'ordre 2013-ISAL-0060 Année 2013

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0060/these.pdf
© [J.P. Arzamendia Lopez], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0060/these.pdf
© [J.P. Arzamendia Lopez], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

INSA Direction de la Recherche - Ecoles Doctorales – Quinquennal 2011-2015

SIGLE	ECOLE DOCTORALE	NOM ET COORDONNEES DU RESPONSABLE
CHIMIE	**CHIMIE DE LYON** **http://www.edchimie-lyon.fr** Insa : R. GOURDON	M. Jean Marc LANCELIN Université de Lyon – Collège Doctoral Bât ESCPE 43 bd du 11 novembre 1918 69622 VILLEURBANNE Cedex Tél : 04.72.43 13 95 directeur@edchimie-lyon.fr
E.E.A.	**ELECTRONIQUE, ELECTROTECHNIQUE, AUTOMATIQUE** **http://edeea.ec-lyon.fr** Secrétariat : M.C. HAVGOUDOUKIAN eea@ec-lyon.fr	M. Gérard SCORLETTI Ecole Centrale de Lyon 36 avenue Guy de Collongue 69134 ECULLY Tél : 04.72.18 60 97 Fax : 04 78 43 37 17 Gerard.scorletti@ec-lyon.fr
E2M2	**EVOLUTION, ECOSYSTEME, MICROBIOLOGIE, MODELISATION** **http://e2m2.universite-lyon.fr** Insa : H. CHARLES	Mme Gudrun BORNETTE CNRS UMR 5023 LEHNA Université Claude Bernard Lyon 1 Bât Forel 43 bd du 11 novembre 1918 69622 VILLEURBANNE Cédex Tél : 04.72.43.12.94 e2m2@biomserv.univ-lyon1.fr
EDISS	**INTERDISCIPLINAIRE SCIENCES-SANTE** **http://ww2.ibcp.fr/ediss** Sec : Safia AIT CHALAL Insa : M. LAGARDE	M. Didier REVEL Hôpital Louis Pradel Bâtiment Central 28 Avenue Doyen Lépine 69677 BRON Tél : 04.72.68 49 09 Fax :04 72 35 49 16 Didier.revel@creatis.uni-lyon1.fr
INFOMATHS	**INFORMATIQUE ET MATHEMATIQUES** http://infomaths.univ-lyon1.fr	M. Johannes KELLENDONK Université Claude Bernard Lyon 1 INFOMATHS Bâtiment Braconnier 43 bd du 11 novembre 1918 69622 VILLEURBANNE Cedex Tél : 04.72. 44.82.94 Fax 04 72 43 16 87 infomaths@univ-lyon1.fr
Matériaux	**MATERIAUX DE LYON** Secrétariat : M. LABOUNE PM : 71.70 –Fax : 87.12 Bat. Saint Exupéry Ed.materiaux@insa-lyon.fr	M. Jean-Yves BUFFIERE INSA de Lyon MATEIS Bâtiment Saint Exupéry 7 avenue Jean Capelle 69621 VILLEURBANNE Cédex Tél : 04.72.43 83 18 Fax 04 72 43 85 28 Jean-yves.buffiere@insa-lyon.fr
MEGA	**MECANIQUE, ENERGETIQUE, GENIE CIVIL, ACOUSTIQUE** Secrétariat : M. LABOUNE PM : 71.70 –Fax : 87.12 Bat. Saint Exupéry mega@insa-lyon.fr	M. Philippe BOISSE INSA de Lyon Laboratoire LAMCOS Bâtiment Jacquard 25 bis avenue Jean Capelle 69621 VILLEURBANNE Cedex Tél :04.72.43.71.70 Fax : 04 72 43 72 37 Philippe.boisse@insa-lyon.fr
ScSo	**ScSo*** M. OBADIA Lionel Sec : Viviane POLSINELLI Insa : J.Y. TOUSSAINT	M. OBADIA Lionel Université Lyon 2 86 rue Pasteur 69365 LYON Cedex 07 Tél : 04.78.69.72.76 Fax : 04.37.28.04.48 Lionel.Obadia@univ-lyon2.fr

*ScSo : Histoire, Geographie, Aménagement, Urbanisme, Archéologie, Science politique, Sociologie, Anthropologie

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0060/these.pdf
© [J.P. Arzamendia Lopez], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0060/these.pdf
© [J.P. Arzamendia Lopez], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

À mes parents, Jeanne et Paul

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0060/these.pdf
© [J.P. Arzamendia Lopez], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0060/these.pdf
© [J.P. Arzamendia Lopez], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

Remerciements

Ces années de doctorat ont été riches en enseignements tant scientifiques qu'humains. La thèse est une expérience rude que j'ai pu réussir grâce aux personnes qui m'ont accompagnées.

Je remercie en premier lieu Frédéric Kuznik et Dominique Baillis, mes directeurs de thèse, pour leur investissement dans l'encadrement de cette thèse. Je suis très reconnaisant de leur encouragements et conseils tout au long de ces années de doctorat. Les échanges autour de ces travaux ont été toujours enrichissants. Je ne pourrais pas oublier de remercier Bernard Yrieix et Emmannuelle Pons pour leur accompagnement tout au long de ces travaux et leur conseils avisés. Je pense aussi à Yves Brechet pour l'intérêt qu'il a montré envers mes travaux et ses conseils.

Je souhaite remercier Christian Inard et Remy Dendievel, mes rapporteurs, pour l'intérêt qu'ils ont porté à ces travaux et pour la pertinence de leurs commentaires. Je joins également Daniel Quenard et Gilles Fraisse à ces remerciements, pour l'honneur qu'ils m'ont fait d'intégrer mon jury de thèse.

Je remercie tous les membres du CETHIL qui m'ont entouré pendant ces années de doctorat. Je tiens à remercier Corinne Dayeyan, Florence Canale et Christine Di Rienzo pour leur aide efficace dans les tâches administratives. Mon cas administratif n'était pas des plus simples et pourtant vous avez toujours trouvé une solution. Aussi, j'aimerais remercier les personnes du laboratoire qui, de près ou de loin, m'ont aidé à l'aboutissement de cette thèse. Je pense particulièrement à Nicolas et Joel pour leur discussions passionées ainsi que pour leur bonne humeur ; Romain, Cristhophe D., Ali et Aurélien pour leur amitié et les scéances de foot du vendredi ; Johann, pour les discussions dans notre langue maternelle, Wei et Christophe K., pour les discussions diverses et les encouragements autour d'un plat à midi ; Leon et Matthieu Z. pour leur disponibilité et leur aide, leurs discussions passionnées, scientifiques ou non, et leur amitié.

Mes remerciements vont aussi pour Dorian, m'ont fidèle compagnont de route. Tes

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0060/these.pdf
© [J.P. Arzamendia Lopez], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

conseils et encouragements ont été très importants.

Enfin, je tiens à remercier mes parents sans lesquels je n'aurai pas pu commencer cette aventure. Mes remeciements vont aussi à Jeannette et à Paul qui ont eu à supporter mon absence pendant la période de rédaction. Je vous dédie ce mémoire.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0060/these.pdf
© [J.P. Arzamendia Lopez], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0060/these.pdf
© [J.P. Arzamendia Lopez], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0060/these.pdf
© [J.P. Arzamendia Lopez], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

Résumé

L'utilisation de systèmes de stockage par chaleur latente constitue une solution permettant l'effacement du chauffage d'un bâtiment résidentiel pendant les périodes de forte demande. Une telle stratégie peut avoir pour objectif le lissage des pics d'appel en puissance du réseau électrique. Cependant, la faible conductivité des matériaux à changement de phase (MCP) qui constituent ces systèmes et le besoin d'une puissance de décharge importante imposent l'utilisation de matériaux dits architecturés afin d'optimiser la conductivité équivalente des matériaux stockeurs. Nos travaux s'intéressent plus particulièrement à la méthodologie pour la conception de matériaux pour ces systèmes afin de satisfaire aux exigences de stockage d'énergie et de puissance de restitution.

Le premier chapitre permet de présenter les matériaux potentiels. Les MCP utilisés pour assurer la fonction de stockage dans les systèmes intégrés au domaine du bâtiment appartiennent principalement à deux familles : les paraffines et les sels hydratés. Cependant leur faible conductivité constitue un inconvénient majeur. L'utilisation des matériaux architecturés est une nouvelle voie mais la méthodologie et les outils permettant la conception de ces matériaux sur mesure sont à développer.

Nous présentons dans le deuxième chapitre la méthodologie à mettre en œuvre. Différentes échelles sont prises en compte dans la recherche d'une solution optimale (structure, matériau équivalent homogène, matériaux constituants). Les outils permettant de relier ces différentes échelles sont présentés.

Le troisième chapitre est consacré au développement d'un outil numérique modélisant un système de stockage par chaleur latente de type échangeur de chaleur air/MCP. Ce modèle numérique est vérifié avec un cas analytique et validé par comparaison avec des données expérimentales.

Dans le quatrième chapitre, la méthodologie développée est mise en œuvre dans un deuxième cas d'étude pour le même type de système de stockage. L'analyse du système *via* les nombres adimensionnels permet d'obtenir des indicateurs de conception du système.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0060/these.pdf
© [J.P. Arzamendia Lopez], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

A l'issue de cette étape, les propriétés matériaux et fonctionnelles optimales du système sont donc connues.

Dans le dernier chapitre, un matériau architecturé est alors proposé afin de satisfaire les exigences du système de stockage. Nous montrons alors que par l'intermédiaire d'une plaque sandwich contenant des clous et du MCP les propriétés matériaux nécessaires sont obtenues. De plus, afin de satisfaire aux exigences en termes de propriétés fonctionnelles, le design du système est modifié en ajoutant des ailettes sur les surfaces d'échange. Une configuration précise (nombre d'ailettes, géométrie) est alors proposée.

Mots clés : bâtiment, méthodologie, matériaux à changement de phase (MCP), matériaux architecturés, modèle numérique, échangeur de chaleur, lissage des pics de consommation.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0060/these.pdf
© [J.P. Arzamendia Lopez], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

Abstract

The use of energy storage systems that exploit latent heat represents a promising solution to erase the heating demand of residential buildings during periods of peak demand. Equipping a building with such components can contribute to the goal of peak shaving in terms of public electricity grid supply. Significant drawbacks, however, are the low thermal conductivity of Phase Change Materials (PCM) that typically constitute such systems, and the requirement for a high rate of discharge. Consequently, the use of so-called architectured materials has been put forward as a means to optimize the effective conductivity of storage materials. Our work is focused upon the development of a methodology to design optimal materials for such systems that meet the criteria of energy storage and energy output. In the first chapter we review the various candidate materials available for energy storage by latent heat. The PCM fulfilling the function of energy storage in integrated systems developed for building applications can in general be grouped into two main categories: paraffins and salt hydrates. For both, a low thermal conductivity is a major disadvantage in the context of the desired application. Their substitution by architectured materials represents a new approach to overcome this issue, although to date, the methods and tools available for their design subjected to requirements remain to be developed. We present in the second chapter the methodology to be implemented for the current work. Different scales are accounted for during the search for an optimal solution (from structured materials, homogeneous materials, and composite materials). Tools that facilitate a multi-scale approach are presented and evaluated. The third chapter is devoted to the development of a numerical simulation tool for a rack-type energy storage system using latent heat. The numerical model is tested by comparison to an analytic solution and validated using experimental data. In the fourth chapter, the developed methodology is applied to the specific case of an air/PCM exchanger latent-heat energy storage system. The system is analysed through the study of dimensionless numbers, which provide a set of design indicators for the system. As a result of this stage, the optimal material

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0060/these.pdf
© [J.P. Arzamendia Lopez], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

and functional properties are thus identified. Consolidating the findings of the study, in the final chapter, an architectured material that would satisfy the design requirements of the storage system is described. We demonstrate that an arrangement composed of a sandwich of planar layers with nails and PCM can offer the required material properties. Furthermore, in order to meet the desired functional properties, the system design is modified by the addition of fins at the exchange surfaces. Finally, a detailed description of this configuration (number of fins and geometry) is recommended.

Keywords: buildings, methodology, phase change materials (PCM), architectured materials, numerical models, heat exchangers, peaks load shavings.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0060/these.pdf
© [J.P. Arzamendia Lopez], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

Resumen

La utilización de sistemas de almacenamiento de energía utilizando el calor latente de los materiales constituye una solución para desactivar el uso de la calefacción de una residencia durante los periodos de fuerte demanda de consumo. Este tipo de estrategia puede ser utilizada para la reducción de los picos de potencia que se producen durante estos periodos en la red eléctrica. Sin embargo, la reducida conductividad de los materiales a cambio de fase (*PCM*, por sus siglas en inglés) que constituyen estos sistemas y la necesidad de una potencia de descarga importante imponen la utilización de materiales conocidos como arquitecturizados (architectured materials) o materiales híbridos con el fin de optimizar la conductividad equivalente de los materiales de almacenamiento. Nuestro trabajo se interesa particularmente en la metodología para el diseño de materiales para estos sistemas con el fin de satisfacer a las exigencias de almacenamiento de energía y potencia de restitución.

El primer capítulo presenta los candidatos a ser tenidos en cuenta como materiales. Los *PCM* utilizados para asegurar la función de almacenamiento en sistemas integrados en el ámbito de la construcción pertenecen principalmente a dos familias : las parafinas y las sales hidratadas. Sin embargo, el hecho de poseer una baja conductividad constituye un gran inconveniente. La utilización de materiales arquitecturizados es una nueva vía en este ámbito pero la métodología y las herramientas a ser empleadas para el diseño de estos materiales, concebidos a medida, deben ser desarrolladas.

En el segundo capítulo, presentamos la metodología a ser implementada. Diferentes escalas son tomadas en cuenta en la búsqueda de una solución optima (escala de la construcción, del sistema de almacenamiento y por último de los materiales del sistema). Las herramientas que permiten la unión de estas escalas son identificadas y presentadas.

El tercer capítulo es dedicado al desarrollo de una herramienta numérica que modela un sistema de almacenamiento por calor latente. Este modelo es verificado gracias a un caso analítico y validado por comparación con resultados experimentales.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0060/these.pdf
© [J.P. Arzamendia Lopez], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

En el cuarto capítulo, la metodología desarrollada anteriormente es implementada en el caso de un sistema de almacenamiento de tipo intercambiador de calor aire/PCM. El análisis del sistema, a través de números adimensionales presentes en el problema, permite obtener indicadores de diseño. Al final de esta etapa, las propiedades óptimas de los materiales y del sistema son conocidas.

En el último capítulo, una arquitectura es propuesta afin de satisfacer la exigencias del sistema de almacenamiento. Es demostrado que a través de la utilization de placas metálicas paralelas que contienen en el interior clavos metálicos y PCM las propiedades requeridas son factibles. Además, las exigencias del sistema son satisfechas gracias a una modificación del diseño de las superficies de intercambio de calor. El diseño fue modificado introduciendo aletas metálicas. Una configuración precisa (número de aletas, geometría) es propuesta.

Palabras claves : edificios, metodología, materiales con cambio de fase (PCM), materiales arquitecturizados, modelo numérico, intercambiador de calor, reducción de picos de potencia en la red electrica.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0060/these.pdf
© [J.P. Arzamendia Lopez], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

Liste des symboles

Lettres latines

Bi	Nombre de Biot	[−]
C_a	Capacité calorifique d'air sec	$[\mathrm{J\,kg^{-1}\,K^{-1}}]$
C_m	Capacité calorifique massique équivalente du matériau	$[\mathrm{J\,kg^{-1}\,K^{-1}}]$
ΔT	Différence de température	[K]
d	Épaisseur de la lame d'air	[m]
Δt	pas de temps	[s]
Δx	pas d'espace suivant $\overrightarrow{x}$	[m]
Δy	pas d'espace suivant $\overrightarrow{y}$	[m]
e	Épaisseur de la plaque	[m]
h	Enthalpie massique du matériau	$[\mathrm{J\,kg^{-1}}]$
f	Fraction liquide	[−]
Fo	Nombre de Fourier	[−]
h_c	Coefficient de convection	$[\mathrm{W\,m^{-2}\,K^{-1}}]$
H	Chaleur latente	$[\mathrm{J\,kg^{-1}}]$
L	Largeur de la plaque	[m]
l	Longueur de la plaque	[m]
m	Masse	[kg]
$\dot{m}_a$	Débit massique d'air par unité de longueur	$[\mathrm{kg\,s^{-1}\,m^{-1}}]$
P	Puissance	[W]
q	Flux de chaleur massique (mesures)	[W/g]
p	Pression	[bar]
$\dot{Q}_v$	Débit volumique d'air	$[\mathrm{m^3\,s^{-1}}]$

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0060/these.pdf
© [J.P. Arzamendia Lopez], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

R	Résistance thermique	$[\mathrm{K\,W^{-1}}]$
S	Surface d'échange	$[\mathrm{m^2}]$
St	Nombre de Stanton	$[-]$
Ste	Nombre de Stefan	$[-]$
T	Température	[℃]
T_a	Température de l'air	[℃]
T_{in}	Température en entrée en $x = 0$	$[^\circ C]$
T_m	Température du matériau	[℃]
T_{out}	Température en sortie en $x = l$	$[^\circ C]$
$\overrightarrow{v}$	Vitesse de l'air	$[\mathrm{m\,s^{-1}}]$

Lettres Grecques

λ	Conductivité thermique	$[\mathrm{W\,m^{-1}\,K^{-1}}]$
η_0	Efficacité de la surface contenant des ailettes	$[-]$
η_f	Efficacité d'une ailette	$[-]$
φ	Flux de chaleur	[W]
ρ	Masse volumique équivalente du matériau	$[\mathrm{kg\,m^{-3}}]$
ρ_a	Masse volumique de l'air	$[\mathrm{kg\,m^{-3}}]$
τ	Temps d'adimensionnement	[s]

Indices

i	indice d'espace suivant $\overrightarrow{x}$	$[-]$
j	indice d'espace suivant $\overrightarrow{y}$	$[-]$
a	air	$[-]$
ail	ailette	$[-]$
an	analytique	$[-]$
b	base	$[-]$
exp	expérimentale	$[-]$
f	fusion	$[-]$
in	Entrée	$[-]$
m	matériau	$[-]$
ml	milieu liquide	$[-]$
ms	milieu solide	$[-]$
num	numérique	$[-]$
out	Sortie	$[-]$
s	surface	$[-]$

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0060/these.pdf
© [J.P. Arzamendia Lopez], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

$sail$	Surface totale d'échange d'une ailette	$[-]$
0	initial	$[-]$

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0060/these.pdf
© [J.P. Arzamendia Lopez], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0060/these.pdf
© [J.P. Arzamendia Lopez], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

Table des matières

Remerciements vi

Résumé ix

Abstract xiii

Resumen xv

Table des matières xxiii

1 Problématique 3

1.1 Introduction . . . 3

1.1.1 Contexte . . . 3

1.1.2 Problématique et objectifs . . . 5

1.1.3 Cadre de l'étude . . . 7

1.2 Systèmes de stockage de chaleur . . . 7

1.2.1 Les différents modes de stockage . . . 7

1.2.2 Stockage par chaleur latente : principe de fonctionnement . . . 9

1.2.3 Stockage par chaleur latente : Les matériaux à changement de phase 11

1.3 Nécessité d'un matériau architecturé . . . 17

1.3.1 Vers le choix des matériaux architecturés . . . 17

1.3.2 Matériaux architecturés . . . 19

1.4 Conclusions . . . 22

2 Méthodologie pour la conception des matériaux architecturés appliqués au bâtiment et cahier des charges 25

2.1 Introduction . . . 25

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0060/these.pdf
© [J.P. Arzamendia Lopez], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

2.2 *Top-down methodology* . . . 26
2.2.1 Description générale de la méthode . . . 26
2.2.2 Première étape : Bâtiment → propriétés équivalentes homogènes . . . 26
2.2.3 Deuxième étape : Propriétés équivalentes homogènes → Sélection/Conception d'un matériau optimal . . . 28
2.3 Cahier des charges pour la solution étudiée . . . 29
2.3.1 Cadre de l'étude . . . 29
2.3.2 Modélisation du bâtiment type . . . 29
2.3.3 Besoin en chauffage pour la période hivernale . . . 32
2.3.4 Conclusion . . . 34
2.4 Conclusions . . . 34

3 Modélisation numérique du système de stockage de chaleur 37
3.1 Introduction . . . 37
3.2 Intégration du système de stockage au bâtiment . . . 38
3.3 Étude bibliographique . . . 39
3.3.1 Modèles numériques . . . 39
3.3.2 Expériences . . . 40
3.4 Modèle numérique . . . 41
3.4.1 Présentation du problème . . . 41
3.4.2 Hypothèses . . . 41
3.4.3 Formulation mathématique . . . 43
3.4.4 Méthodes numériques . . . 45
3.5 Vérification et validation du modèle . . . 49
3.5.1 Comparaison à une solution analytique sans changement de phase . . . 49
3.5.2 Comparaison à un cas expérimental avec changement de phase . . . 51
3.6 Conclusion . . . 57

4 Sélection des matériaux pour le système de stockage de chaleur 61
4.1 Introduction . . . 61
4.2 Analyse du problème. Nombres adimensionnels . . . 62
4.2.1 Analyse des équations . . . 62
4.2.2 Nombres adimensionnels étudiés . . . 65
4.2.3 Analyse des nombres adimensionnels . . . 66
4.3 Sélection des matériaux . . . 73
4.3.1 Caractérisation des matériaux potentiels . . . 73
4.3.2 Classification des matériaux caractérisés à partir des indices de performance simplifiés. . . . 77

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0060/these.pdf
© [J.P. Arzamendia Lopez], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

4.3.3 Classification des MCP caractérisés à partir des nombres adimensionnels . . . 78
4.3.4 Comparaison entre les deux indices utilisés . . . 79
4.3.5 Optimisation du matériau Henei-Comp . . . 80
4.3.6 Optimisation du système global . . . 81
4.4 Conclusions . . . 81

5 Conception optimale du système de stockage : application à une planche à clous 85
5.1 Introduction . . . 85
5.2 Exemple concret de matériau architecturé : la planche à clous . . . 86
5.3 Caractérisation de la conductivité équivalente de la planche à clous . . . 88
5.3.1 Description du banc expérimental . . . 88
5.3.2 Résultats des mesures fluxmétriques . . . 90
5.3.3 Conclusions . . . 91
5.4 Analyse numérique de la conductivité équivalente . . . 91
5.5 Utilisation des ailettes . . . 97
5.6 Conclusions . . . 101

Conclusions générales et perspectives 104
Conclusion . . . 105

A Indice simplifié 109
A.1 Indice énergie : énergie à stocker $Q_{dim} \geq 4$ kWh . . . 109
A.2 Indice puissance : puissance nécessaire $P_{dim} \geq 2$kW . . . 110

B Données du bâtiment modélisé 119
B.1 Caractéristiques des parois vitrées . . . 119
B.2 Caractéristiques des matériaux des parois opaques . . . 121
B.3 Scénario de charges internes . . . 121

Bibliographie 123

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0060/these.pdf
© [J.P. Arzamendia Lopez], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0060/these.pdf
© [J.P. Arzamendia Lopez], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

Table des figures

1.1 Évolution et structure de la consommation électrique en France (sources [28] et [77]). . . . 4
1.2 Courbes de charge journalière du réseau électrique. Source : site internet du Réseau de Transport d'Electricité (www.rte-france.com/fr/mediatheque). 6
1.3 Quantité d'énergie stockée vs. température [47] 8
1.4 Description du changement de phase 10
1.5 Schéma du flux de chaleur pour un échantillon d'un corps pur lors de sa solidification (descente en température). La forme de la courbe n'est pas une caractéristique du matériau, elle dépend de la vitesse de balayage en température lors de la mesure et de la masse de l'échantillon. . . . 10
1.6 Changement de phase pour un corps réel 11
1.7 Classification des MCP dans l'ensemble des matériaux de stockage thermique [41, 92]. . . . 12
1.8 Familles de MCP dans la cartographie *Enthalphie vs. Température de fusion*. Les paraffines, les acides gras et les hydrates de sel en partie ont les températures de fusion les plus adaptées à nos systèmes de stockage (Source graphique : ZAE Bayern, [63]). . . . 12
1.9 Exemples de matrices conductrices pour améliorer la conductivité thermique des MCP 14
1.10 Exemples de matériaux pour les enveloppes des bâtiment 15
1.11 Principe de fonctionnement d'un système de stockage air/MCP pour le rafraîchissement de l'air intérieur 16
1.12 Exemples d'utilisation de MCP couplés à des sytèmes solaires pour l'eau chaude sanitaire. . . . 17
1.13 Exemple d'une cartographie *Module de Young vs. Densité* [11] 18

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0060/these.pdf
© [J.P. Arzamendia Lopez], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

1.14 Cuticule d'un homard *Homarus americanus* : exemple d'un matériau architecturé biologique. Analyse des différentes architectures présentes dans cette structure hiérarchique (Dunlop et al. [33]). 20
1.15 Exemples de matériaux architecturés dans le domaine de l'ingénierie 21
1.16 Le béton cellulaire : exemple de matériau architecturé dans le domaine du bâtiment. Matériau multifonctionnel : porteur et isolant. 21

2.1 *Top-down Methodology* pour la conception des matériaux architecturés dans le domaine du bâtiment. Les parties *1, 2 et 3* montrent les différentes échelles du problème 27
2.2 Maison type à étudier 30
2.3 Zones climatiques françaises 32
2.4 Puissance nécessaire pour atteindre la température de consigne de 19 ℃. . 33
2.5 Ocurrence du besoin en énergie pendant la période critique comprise entre 18h et 20h. 34

3.1 Principe de fonctionnement d'un système de stockage air/MCP pour l'effacement des pics d'appel en puissance en hiver. 38
3.2 Le système d'étude 39
3.3 Étude de la demi-plaque composite grâce aux symétries 42
3.4 Allure de la courbe de la capacité calorifique équivalente 43
3.5 Discrétisation par volumes finis 46
3.6 Analyse de la dépendance au maillage de la discrétisation spatiale pour le cas test extrait de [78]. 50
3.7 Température d'air adimensionnelle en sortie du système. Le résultat numérique est supperposé à la courbe analytique pour une longueur adimensionnelle égale à 2. 51
3.8 Schéma du banc expérimental développé au *CETHIL* 52
3.9 Description du prototype de stockage latent évalué 53
3.10 Étude de convergence suivant x 54
3.11 Étude de convergence suivant y 55
3.12 Etude du temps de calcul numérique du sytème 55
3.13 Température en sortie en fonction du nombre de nœuds. Les écarts les plus importants apparaissent au début de la phase de décharge. 56
3.14 Zoom sur la plage de changement de phase. Une bonne convergence des résultats est constatée à partir de 150 nœuds au total. 56
3.15 Validation du modèle numérique pour la phase de charge 57
3.16 Validation du modèle numérique pour la phase de décharge 58
3.17 Validation du modèle numérique pour la phase de charge 58

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0060/these.pdf
© [J.P. Arzamendia Lopez], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

3.18 Validation du modèle numérique pour la phase de décharge 59

4.1 Etude de la puissance de décharge pour le nombre adimensionnel $BiFo$ . . 68
4.2 Etude de la puissance en fin de période de décharge - $1/BiFo$ 69
4.3 Etude de la puissance de décharge pour le nombre adimensionnel Bi/St . . 69
4.4 Etude de la puissance en fin de période de décharge - Bi/St 70
4.5 Etude de la puissance de décharge pour le nombre adimensionnel Ste . . . 71
4.6 Etude de la puissance en fin de période de décharge - Ste 71
4.7 Étude de sensibilité des nombres adimensionnel - Impact sur la puissance en fin de décharge. 72
4.8 Caractérisation de la solidification des MCP potentiels 74
4.9 Caractérisation de la chaleur latente. Appareil DSC *Setaram μDSC evo* utilisé lors des mesures. 76
4.10 Caractérisation de la conductivité. Utilisation de la méthode des plaques chaudes gardées [1]. 77
4.11 Classification des matériaux MCP caractérisés au site de EDF R&D Renardières. La zone d'interêt est indiquée en vert. Pour les matériaux qui nous intéressent, un indice numérique est utilisé pour l'identifier à chaque épaisseur. 79
4.12 Optimisation du matériau Heneicosane. Varition de la conductivité équivalente afin d'augmenter la puissance de décharge. 81
4.13 Etude de la puissance en fin de période de décharge pour le Henei-Comp. La puissance en fin de décharge n'est pas satisfaite pour un matériau architecturé composé d'Heneicosane 82
4.14 Optimisation du système pour l'Henei-Comp optimisé ($\lambda = 1\ \mathrm{W\,m^{-1}\,k^{-1}}$) . 82

5.1 Schéma du prototype "planche à clous". Dimensions et espacement entre les clous. 87
5.2 Conception du prototype "planche à clous". 87
5.3 Banc d'expérimentation pour les mesures fluxmétriques sur la planche à clous contenant du MCP 89
5.4 Installation des fluxmètres sur les surfaces d'échange de la planche à clous . 89
5.5 Domaine d'étude pour l'analyse numérique de la conductivité équivalente de la planche à clous 92
5.6 Analyse de la convergence des résultats numériques de flux de chaleur pour un motif de la planche à clous. Convergence atteinte pour une valeur de flux de chaleur de 0.0228 W 93

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0060/these.pdf
© [J.P. Arzamendia Lopez], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

5.7 Distribution de température dans un motif élémentaire d'étude de la planche à clous. Étude en régime permanent, les température sur les surfaces d'échange sont imposées ($T_1 = 30\,℃$ (rouge), $T_2 = 20\,℃$ (bleu)). . . . 93
5.8 Influence de la matrice conductrice (clous) sur le champ de température en vues latérales du motif élémentaire d'étude. 94
5.9 Coupes du motif élementaire d'étude 95
5.10 Système de stockage avec des ailettes sur les surfaces d'échange des plaques architecturées 98
5.11 Analyse des ailettes. Domaine d'étude 98

A.1 Étude de la demi-plaque composite grâce aux symétries 111

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0060/these.pdf
© [J.P. Arzamendia Lopez], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0060/these.pdf
© [J.P. Arzamendia Lopez], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0060/these.pdf
© [J.P. Arzamendia Lopez], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

Liste des tableaux

1.1 Synthèse des avantages et inconvénients des deux familles de MCP : les organiques et les inorganiques. 13

2.1 Descriptif des parois opaques de la maison BBC 31
2.2 Principaux résultats numériques concernant le besoin en chauffage de la maison BBC 33

3.1 Expériences réalisées en laboratoire sur une unité de stockage contenant du MCP (In : Inconnue ; * : évalué). 41
3.2 Propriétés physiques du matériau Feolite 50
3.3 Propriétés physiques du produit Energain 53

4.1 Cahier des charges pour le système étudié 66
4.2 Intervalles d'étude des nombres adimensionnels 72

5.1 Propriétés de la paraffine utilisée comme matériau actif 86
5.2 Résultats obtenus lors de la campagne de mesures. Valeurs moyennées pour tous les capteurs 90
5.3 Conductivité équivalente obtenue avec les flux de chaleur mesurés 90
5.4 Conditions de simulations à l'état solide. Étude en régime permanent et propriétés constantes et homogènes. 92

B.1 Données du vitrage extérieur de la maison BBC 119
B.2 Données du vitrage intérieur de la maison BBC 119
B.3 Données du gaz contenu dans la fenêtre de la maison BBC 120
B.4 Données du cadre de fenêtre de la maison BBC 120
B.5 Géométrie des fenêtres 120
B.6 Caractéristiques des matériaux utilisés 121

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0060/these.pdf
© [J.P. Arzamendia Lopez], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

B.7 Scénario de consommation électrique journalière 121

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0060/these.pdf
© [J.P. Arzamendia Lopez], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0060/these.pdf
© [J.P. Arzamendia Lopez], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0060/these.pdf
© [J.P. Arzamendia Lopez], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

1 Problématique

1.1 Introduction

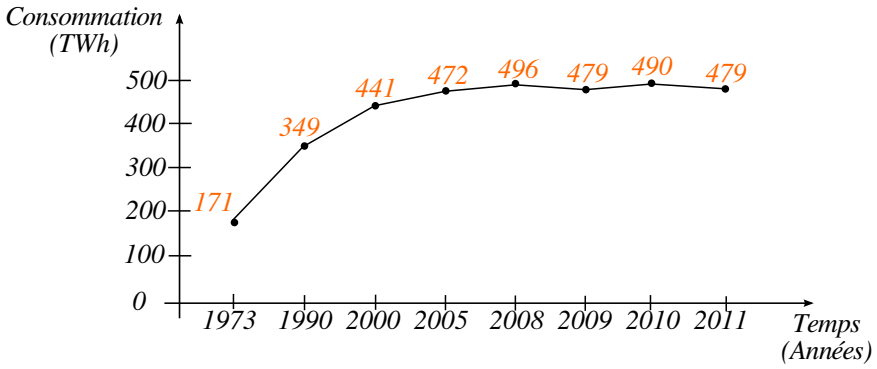
1.1.1 Contexte

Depuis le choc pétrolier survenu à la fin des années 70, les ressources énergétiques et le climat sont au cœur des débats. La limitation des ressources et par conséquent, des prix plus élevés, ont incité la société à se questionner sur la rationalisation des ressources énergétiques (notamment le pétrole) et sur la nécessité de nouvelles technologies pour une transition vers une éventuelle époque post-pétrolière. Aussi, les fortes discussions, compte tenu des enjeux économiques et commerciaux, sur l'impact des gaz à effet de serre (GES) sur le réchauffement climatique ont conduit l'ONU à la création du Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat (GIEC ou IPCC en anglais) en 1988. Ce groupe a pour objectif d'évaluer les risques liés au changement climatique d'origine humaine pour prévoir de manière précise ses conséquences. Fruit de son travail, 4 rapports d'évaluation ont été publiés depuis sa création. Leur principal apport est la mise en évidence de la haute probabilité (90% dans le dernier rapport de 2007) de la responsabilité de l'homme sur le réchauffement climatique. Conséquence de ces travaux, diverses mesures politiques, notamment le protocole de Kyoto adopté en 1994 au Sommet de la terre au Brésil et ratifié en 1997, ont été mises en place, visant à réduire de l'émission de GES et à promouvoir le développement durable.

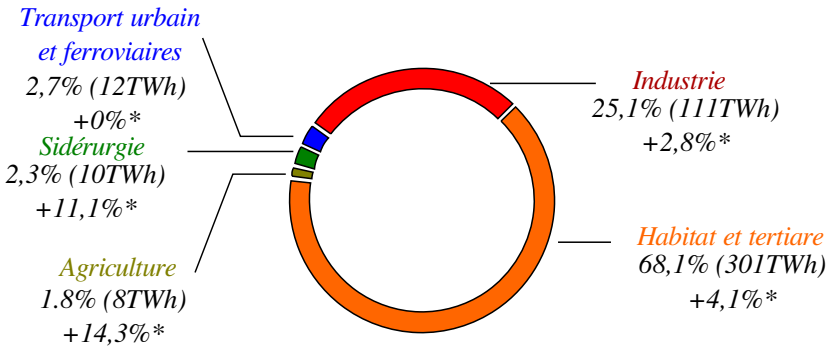
L'Union Européenne (UE) a, depuis quelques années, mis en place diverses mesures dans le cadre du plan *"Climate Action"*. Trois objectifs ont été fixés : réduire de 20 % l'émission des GES par rapport aux années 90, atteindre 20 % de la consommation énergétique finale avec les énergies renouvelables et, en dernier lieu, réduire de 20 % la consommation d'énergie par rapport aux prévisions faites par l'UE en 2005. Au plan national, le Grenelle de l'environnement réaffirme l'engagement européen et vise une division par 4 de l'émission de GES d'ici 2050 (toujours par rapport aux années 90). La Réglementation Thermique

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0060/these.pdf
© [J.P. Arzamendia Lopez], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

2012, appliquée en 2013 au domaine du bâtiment et ayant comme objectif une consommation maximale de 50 $kWh_{EP}/m^2/an$ pour les bâtiments neufs est un exemple concret de l'évolution de la législation française dans le cadre du Grenelle de l'environnement.



(a) Évolution de la consommation de l'électricité en France ces 30 dernières années. Données du Réseau de transport d'électricité (RTE).



(b) Répartition de la consommation d'electricité française par secteur en 2010 (*par rapport à 2009).

FIGURE 1.1 – Évolution et structure de la consommation électrique en France (sources [28] et [77]).

En France, l'électricité représente presque la moitié de la consommation d'énergie finale (43,8 % pour être exact pour l'année 2011 [28]). Ces 30 dernières années, cette consommation de l'électricité n'a pas cessé d'augmenter (figure 1.1a). Elle constitue donc un levier important pour la réduction de la consommation d'énergie finale. Dans ce contexte, l'habitat et le tertiaire sont un problème majeur. Ces secteurs représentent en France environ 68 % de la consommation d'électricité selon le site *encyclopédie EDF* [28, 77](figure 1.1b). L'amélioration de l'enveloppe du bâtiment et l'optimisation des systèmes (ex : pompe à

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0060/these.pdf
© [J.P. Arzamendia Lopez], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

chaleur, chaudières, etc) constituent donc des axes de recherche à privilégier. Des solutions plus performantes dans ce domaine se répercutent de façon importante en termes énergétiques et écologiques. Par exemple, la réduction des pics de consommation permet la réduction du fonctionnement de centrales à charbon pendant ces périodes.

Pour répondre à ces nouvelles dispositions légales, une meilleure conception des bâtiments neufs ainsi qu'une rénovation des bâtiments anciens sont nécessaires. En conséquence, un recours à des matériaux de plus en plus performants pour satisfaire ces exigences est une voie d'investigation de recherche. Les matériaux architecturés multifonctionnels représentent une option adaptée à la réduction de la consommation énergétique. Conçus selon une stratégie *"material by design"*, ces matériaux sont capables de remplir efficacement plusieurs fonctions, non seulement grâce aux divers matériaux qui les constituent, mais aussi aux différentes configurations architecturales possibles. Plus particulièrement, ils permettent d'obtenir différentes spécifications (acoustique, mécanique, thermique, etc.) qui seraient inatteignables dans les cas des mono-matériaux.

Cependant, la conception de matériaux innovants dans le domaine du bâtiment doit être en mesure de prendre en compte la complexité des conditions liées au cahier des charges de l'application. C'est pourquoi, une approche méthodologique simplifiant la prise en compte de l'application (bâtiments dans notre cas) et mettant à disposition des outils d'aide à la sélection d'une solution optimale se révèle pertinente pour résoudre ce problème.

Les matériaux architecturés représentent donc une nouvelle donne pour le secteur du bâtiment. Leurs capacités d'adaptation, à travers les matériaux constitutifs et les architectures à plusieurs échelles, permettent d'imaginer une infinité d'applications dans ce domaine.

1.1.2 Problématique et objectifs

Pendant la période hivernale, les pics de puissance électrique demandée sont fortement liés à la demande de chaleur. La figure 1.2 met en évidence la tranche horaire sur laquelle l'appel en puissance est le plus important durant les journées d'hiver. Cette période critique se situe en fin de journée (à partir de 18 h) et sa durée est estimée entre 2 h et 3 h. La réduction de ce pic de consommation permet, entre autres, une gestion de la production de l'électricité plus efficace face à la demande.

L'objectif global dans lequel s'inscrivent ces travaux de thèse est celui du lissage de la courbe de charge journalière d'appel en puissance pendant la période hivernale. Pour atteindre cet objectif, une meilleure gestion de la demande de chaleur dans le domaine du bâtiment est proposée. L'effacement des pics d'appel en puissance consiste à équilibrer l'offre et la demande sur le réseau électrique. Cependant, les ressources susceptibles d'augmenter l'offre ne sont pas disponibles pendant la période critique (déphasage res-

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0060/these.pdf
© [J.P. Arzamendia Lopez], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

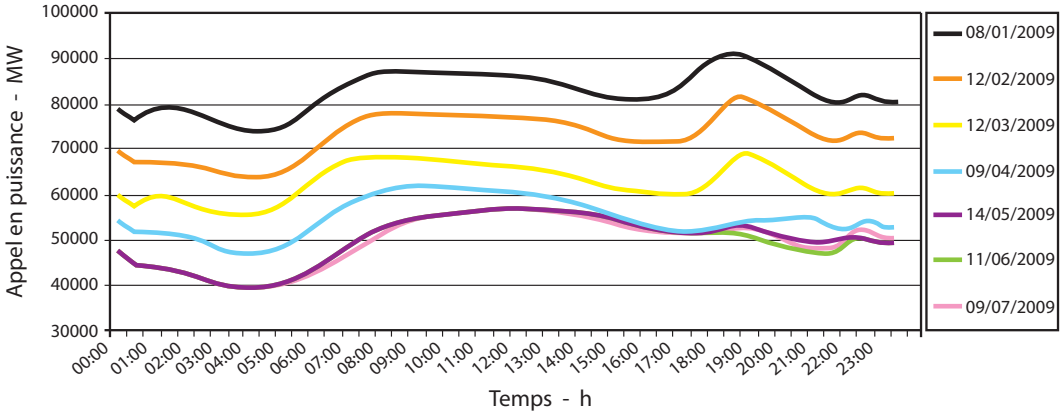


FIGURE 1.2 – Courbes de charge journalière du réseau électrique. Source : site internet du Réseau de Transport d'Electricité (www.rte-france.com/fr/mediatheque).

source/demande). Prenons l'exemple de l'apport solaire, une source renouvelable. Cet apport est disponible pendant la période ensoleillée de la journée qui ne correspond pas à la période critique. Un stockage de l'énergie produite à partir de cette ressource est incontournable pour son utilisation pendant la période critique en hiver. Les systèmes de stockage de chaleur sont alors une solution envisageable pour réaliser le lissage souhaité. De plus, de manière générale, l'utilisation des systèmes de stockage de chaleur permet un gain économique et écologique en limitant la mise en route des centrales thermiques à charbon et à gaz pendant les périodes de forte demande.

Parmi les systèmes de stockage de chaleur existants, le stockage par chaleur latente présente un fort potentiel pour le domaine du bâtiment quant à l'effacement de chaleur souhaité. De nombreux travaux scientifiques ont été entrepris ces dernières années afin de perfectionner cette technologie. Ces systèmes utilisent des matériaux dits "actifs", dénommés dans la littérature Matériaux à Changement de Phase (MCP) pour remplir la fonction de stockage. Malgré ces atouts en terme de capacité de stockage grâce à leur chaleur latente élevée, un des inconvénients de l'utilisation des MCP est leur faible conductivité thermique. Le fait d'être contraint à un effacement à moyen terme (2 h) implique une puissance de restitution importante. Il est indispensable que la solution soit capable de restituer intégralement la chaleur stockée pendant la période critique.

La problématique consiste donc à satisfaire à la fois une capacité de stockage de chaleur importante et une puissance de restitution élevée, deux propriétés intrinsèques généralement antagonistes. Les MCP permettent de satisfaire les besoins de stockage mais l'utilisation des matériaux architecturés s'avère incontournable pour les besoins de puissance. Comment réaliser la conception de ces matériaux ? Quelles méthodologie utiliser ?

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0060/these.pdf
© [J.P. Arzamendia Lopez], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

1.1.3 Cadre de l'étude

Les travaux de cette thèse sont centrés sur le développement d'une méthodologie novatrice pour la conception des matériaux architecturés utilisés dans le cadre de stockage de chaleur dans le domaine du bâtiment. Des outils d'aide à la conception de matériaux sur mesure sont alors proposés. Ces matériaux architecturés sont envisagés pour des systèmes actifs dans le bâtiment :

> Cette solution sera dénommée « *solution système* » par la suite et elle est composée d'une pompe à chaleur couplée à un système de stockage contenant les matériaux proposés. La chaleur stockée sera d'origine électrique, fournie pendant des périodes "hors pics" de demande.

La solution permettra le stockage de la quantité de chaleur nécessaire pour répondre aux exigences de chauffage en hiver d'une maison individuelle pendant la période 18 h - 20 h et ainsi maintenir le confort de l'habitat.

La section 1.2 suivante propose une synthèse bibliographique sur les systèmes de stockage de chaleur, notamment sur les solutions pour le stockage latent et les matériaux qui les constituent (MCP). Quel est leur principe de fonctionnement? Comment sont-il mis à profit dans le domaine du bâtiment ? Quels sont leurs avantages ?

La section 1.3 vise à justifier le choix des matériaux architecturés à appliquer et l'intérêt de ces matériaux pour l'application visée.

1.2 Systèmes de stockage de chaleur

1.2.1 Les différents modes de stockage

Les systèmes de stockage de chaleur sont utilisés afin de compenser le déphasage entre les ressources et la demande. Dans la littérature (Dincer and Rosen [29] par exemple) divers types de stockage de chaleur sont décrits : le stockage sensible, le stockage latent, le stockage chimique, le stockage thermochimique, etc.

Le stockage sensible se base sur le stockage de chaleur grâce au changement de température du matériau stockeur. L'énergie massique stockée est donc définie par :

$$Energie_{massique} = C_m \Delta T \tag{1.1}$$

où C_m correspond à sa capacité thermique. Dans ce mode de stockage, le changement d'état est exclu. Ses principaux avantages sont son faible coût et sa simplicité d'application. Cependant, sa densité énergétique faible implique des volumes non négligeables. Ce type de stockage est utilisé depuis longtemps dans le domaine du bâtiment : l'utilisation des

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0060/these.pdf
© [J.P. Arzamendia Lopez], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

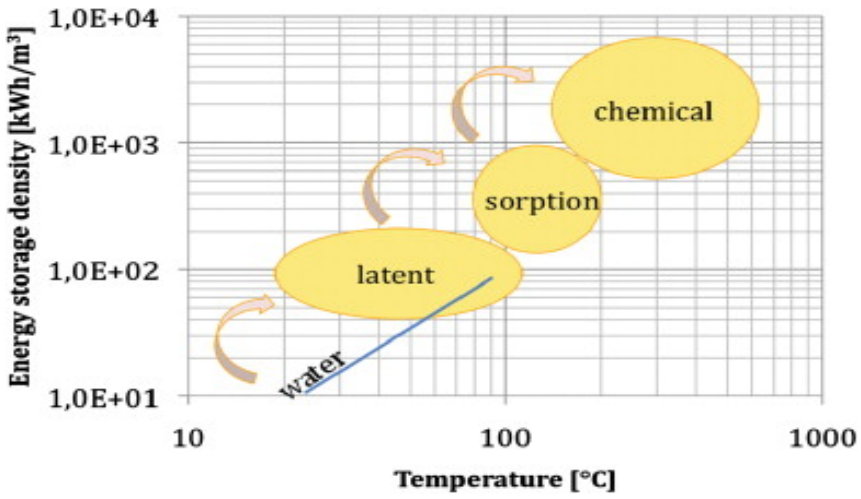


FIGURE 1.3 – Quantité d'énergie stockée vs. température [47]

murs épais en pierre pour améliorer le confort intérieur constitue un bon exemple.

Les systèmes de stockage latent se basent sur les phénomènes énergétiques survenant lors du changement d'état du matériau stockeur. Ces systèmes utilisent des matériaux dénommés dans la littérature matériaux à changement de phase (MCP). Lors de la solidification, les MCP dégagent une quantité importante de chaleur ; inversement, lors de la fusion, la même quantité de chaleur est absorbée. Ce mode de stockage est le plus adapté à notre cas. Outre le fait que ces systèmes soient plus compacts (la densité énergétique est 10 fois plus importante que dans le systèmes de stockage sensible), la température opérationnelle (figure 1.3) est bien adaptée à l'application envisagée, à savoir, la solution d'échangeur air/MCP.

Le stockage thermochimique peut être également réalisé par sorption. La sorption est le processus par lequel une substance est adsorbée ou absorbée sur ou dans une autre substance. Lors de la sorption d'un fluide (liquide ou le plus souvent gazeux) le système produit de la chaleur et, inversement, lors de la désorption le système stocke de la chaleur. Cependant, les sytèmes les plus répandus sont à sorbant solide et ils sont principalement utilisés pour un stockage à long terme (stockage saisonnier). Un exemple de stockage thermochimique est donnée par Hongois et al. [47].

Le stockage chimique utilise quant à lui l'énergie endothermique/exothermique nécessaire à la réaction chimique. La charge est opérationnelle pendant la phase endothermique de la réaction tandis que la décharge se produit pendant la phase exothermique. Certains exemples sont donnés [13, 73]. Dans les travaux réalisés par Bales et al. [13] pour l'Agence Internationale de l'Énergie on trouve, entre autre, une unité de stockage utilisant la réaction chimique du sulfate de magnésium heptahydraté. Cette réaction chimique permet en théorie le stockage de 2.8 GJ/m^3 d'énergie. La réaction chimique en question est de la

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0060/these.pdf
© [J.P. Arzamendia Lopez], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

forme :

$$MgSO_4.7H_2O + heat \leftrightarrow MgSO_4(s) + 7H_2O(g) \tag{1.2}$$

Les principaux avantages de cette méthode sont sa grande densité énergétique de stockage et son efficacité à long terme. Cependant les inconvénients pour une utilisation de ces systèmes dans le domaine du bâtiment sont les températures opérationnelles (pouvant aller jusqu'à 150 ℃) ainsi que les problèmes de réversibilité de la réaction.

La section suivante met l'accent sur le mode de stockage retenu : le stockage latent.

— dans un premier temps le principe de fonctionnement (utilisation du phénomène de changement de phase) sera détaillé.

— puis une revue bibliographique sur les matériaux MCP utilisés dans ce mode de stockage sera présentée.

1.2.2 Stockage par chaleur latente : principe de fonctionnement

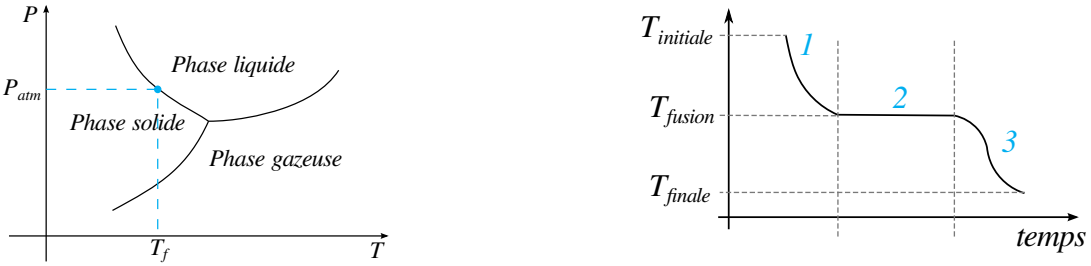
Nous avons vu que le principe d'un système de stockage latent est d'utiliser la chaleur dégagée ou absorbée lors du changement de phase d'un MCP. L'énergie massique stockée correspond à l'enthalpie massique de changement d'état (fusion ou solidification):

$$Energie_{massique} = \Delta h_f \tag{1.3}$$

La chaleur dégagée est dénommée chaleur latente. Les MCP se caractérisent par une forte chaleur latente de fusion. Cette propriété est intéressante car elle permet la libération ou le stockage d'énergie dans un faible intervalle de température. Mais quelle est la définition d'un changement de phase ? Pour répondre à cette question le terme "phase" doit être éclairci. Une "phase" d'un corps pur est définie comme étant une zone dans l'espace thermodynamique (T, p, V) dans laquelle l'énergie libre est une fonction analytique [54]. Pour un volume fixe V, le diagramme de phase est représenté par une cartographie (p, T) (figure 1.4a). Trois phases sont alors présentes : la phase liquide, la phase solide et la phase gazeuse. Le changement de phase consiste donc à passer d'une phase à l'autre dans le diagramme. Par exemple, dans le cas de l'enveloppe d'un bâtiment, les changements se déroulent à pression constante (pression atmosphérique), la variable de pilotage du changement de phase est alors la température du corps. Le point d'intersection de la courbe isobare avec la frontière solide-liquide détermine la température de fusion (T_f). Par ailleurs, les deux transformations principales présentes sont la solidification (liquide $\rightarrow$ solide) et le phénomène inverse dénommé fusion (solide $\rightarrow$ liquide). Si la température du corps est inférieure à T_f, le corps sera à l'état solide. Si la température est supérieure à T_f, le corps sera à l'état liquide.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0060/these.pdf
© [J.P. Arzamendia Lopez], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

La figure 1.4b décrit l'évolution de la température au cours du temps d'un corps pur pendant un phénomène de changement de phase tandis que la figure 1.5 présente l'évolution du flux de chaleur massique. Initialement, le matériau est considéré à l'état liquide. La *Zone 1* correspond au refroidissement du matériau à l'état liquide en partant de la température initiale jusqu'au début de la transformation de phase. La chaleur échangée pendant ce refroidissement l'est de manière sensible et vaut $Q_1 = m.C_m.(T_{initiale} - T_{fusion})$. La *Zone 2* correspond au changement de phase lui même, plus précisément à une solidification. La température est alors constante et la chaleur échangée pendant cette période est de $Q_2 = m.H$. Enfin, la *Zone 3* correspond au refroidissement du matériau à l'état solide et de façon semblable à la *Zone 1*, la chaleur échangée vaut $Q_3 = m.C_m.(T_{fusion} - T_{finale})$. Les quantités de chaleur échangées dans chaque zone correspondent aux aires respectives sous la courbe (flux de chaleur, température).



(a) Diagramme de phase

(b) Schéma du changement de phase

FIGURE 1.4 – Description du changement de phase

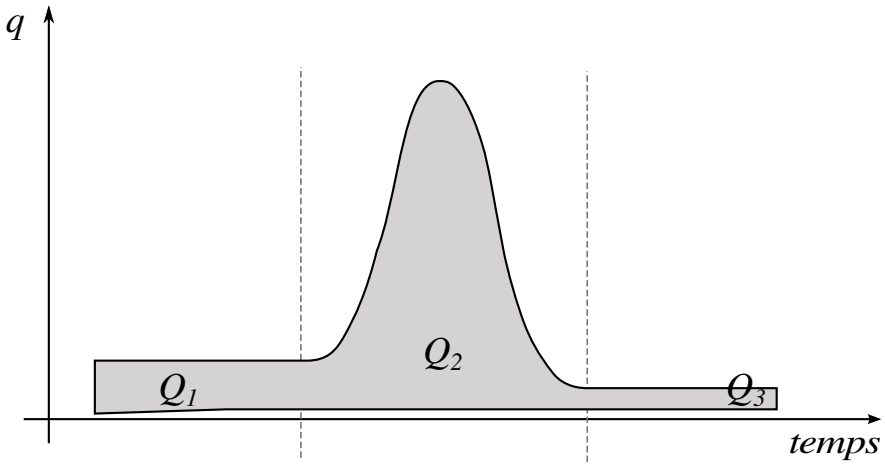
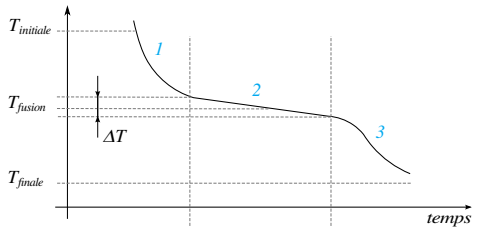
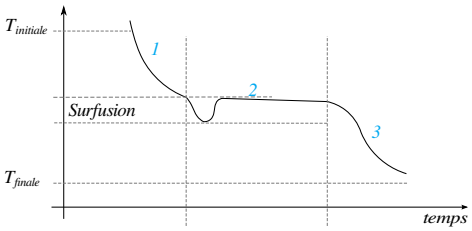


FIGURE 1.5 – Schéma du flux de chaleur pour un échantillon d'un corps pur lors de sa solidification (descente en température). La forme de la courbe n'est pas une caractéristique du matériau, elle dépend de la vitesse de balayage en température lors de la mesure et de la masse de l'échantillon.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0060/these.pdf
© [J.P. Arzamendia Lopez], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés



(a) Présence d'un intervalle de température de changement de phase



(b) Surfusion

FIGURE 1.6 – Changement de phase pour un corps réel

Cependant, cette description théorique ne s'applique pas aux mélanges non eutectiques. Ces mélanges subissent un changement de phase non à température constante, mais dans une plage de température qui est propre à chaque matériau (cf. figure 1.6a). Par ailleurs, lors de la solidification, le phénomène physique de surfusion peut être présent. La surfusion consiste en la présence de la phase liquide en dessous de la température de fusion. Elle est due à l'énergie de tension superficielle à l'interface solide-liquide. Dans le cas d'un liquide sans impureté, les germes ou cristaux qui se solidifient sont instables car ils sont refondus par l'agitation thermique. L'état est alors dit "métastable". L'ajout des impuretés peut entraîner un brusque amorçage du changement d'état pour revenir ensuite à la température de fusion (figure 1.6b). Les matériaux sujets à ce phénomène ont un comportement instable et seront disqualifiés lors de la phase de sélection.

1.2.3 Stockage par chaleur latente : Les matériaux à changement de phase

Classification et propriétés des *MCP*

Les *MCP* utilisés dans les systèmes de stockage de chaleur latente dans le domaine du bâtiment sont principalement ceux qui réalisent un changement de phase solide-liquide et *vice versa* [84] aux températures opérationnelles. Une classification des matériaux de stockage thermique est donnée figure 1.7. Dans cette classification, deux familles de matériaux sont distinguées pour le stockage latent : d'une part les matériaux organiques, principalement les paraffines et les acides gras ; et d'autre part, les matériaux inorganiques, principalement les hydrates de sels (les eutectiques sont aussi considérés comme une famille dans d'autres publications [4, 71, 79]). Les paraffines, les acides gras et les hydrates de sel ont été mis en évidence car leurs températures de fusion correspondent aux températures opérationnelles envisagées, de l'ordre de la dizaine de °C (figure 1.8).

Chaque famille de *MCP* comme candidats potentiels possède ses avantages et inconvénients. Plusieurs publications ont traité ce sujet [63, 79, 90, 92] et une synthèse en est

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0060/these.pdf
© [J.P. Arzamendia Lopez], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

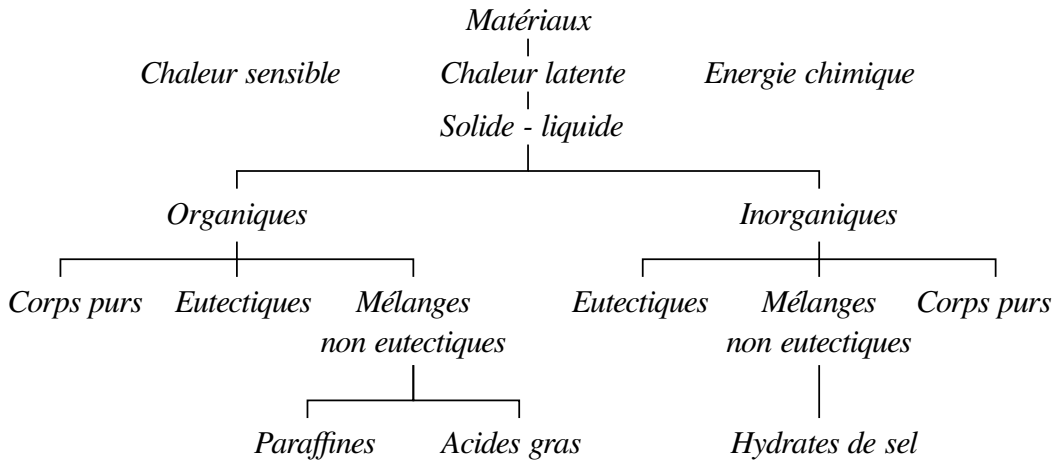


FIGURE 1.7 – Classification des MCP dans l'ensemble des matériaux de stockage thermique [41, 92].

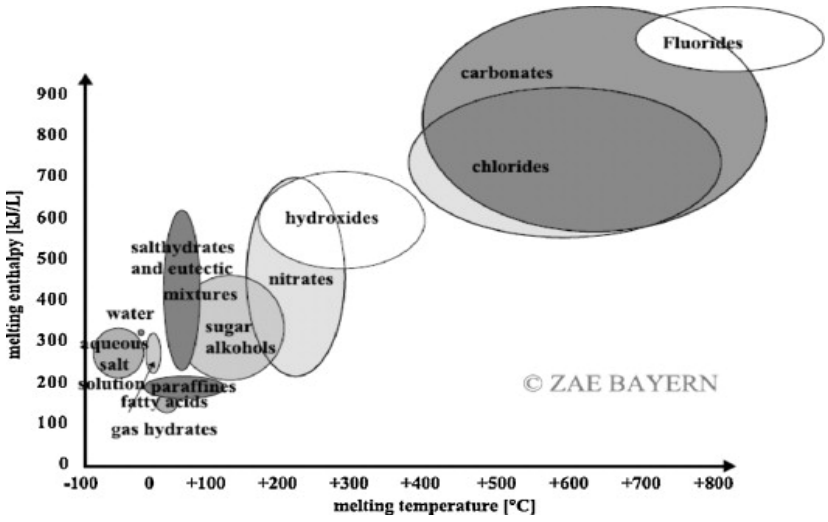


FIGURE 1.8 – Familles de *MCP* dans la cartographie *Enthalphie vs. Température de fusion*. Les paraffines, les acides gras et les hydrates de sel en partie ont les températures de fusion les plus adaptées à nos systèmes de stockage (Source graphique : ZAE Bayern, [63]).

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0060/these.pdf
© [J.P. Arzamendia Lopez], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

	Organiques	Inorganiques
Avantages	Pas corrosif Surfusion limitée Stabilité chimique et thermique	Chaleur latente plus élevée Conductivité plus élevée
Inconvénients	Expansion Faible conductivité Inflammabilité	Corrosif Surfusion Ségregation de phases

TABLEAU 1.1 – Synthèse des avantages et inconvénients des deux familles de MCP : les organiques et les inorganiques.

présentée dans le tableau 1.1. Il est à remarquer dans ce tableau que les hydrates de sel sont plus intéressants que les paraffines en termes de propriétés thermiques absolues de stockage (2 à 3 fois meilleures d'après la figure 1.8) et puissance de décharge (2 fois plus importante selon la littérature) mais certains inconvénients sont dus à leur comportement singulier (surfusion, ségrégation). Par exemple, la température de fusion peut être décalée à cause de la surfusion positionnant le matériau hors température opérationnelle. Certains exemples pour éviter cet inconvénient ont été proposés par Alexiades et Salomon [6] et par Charlsson et al. [26] : agitation mécanique, introduction d'agents de nucléation, modification chimique, excès d'eau. De même, la ségrégation peut entraîner une irréversibilité de l'hydratation/déshydratation du sel. En revanche, les paraffines se présentent comme des matériaux potentiels moins performants mais plus prévisibles.

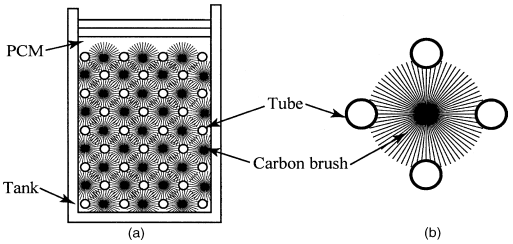
Les paraffines et les hydrates de sel ont donc été étudiés. Diverses publications [36, 63, 87, 79, 92] présentent des résultats de caractérisation pour des matériaux et des produits commerciaux. Le premier constat réalisé est que toutes les caractéristiques thermo-physiques ne sont pas forcément disponibles : les deux propriétés les moins documentées sont la conductivité thermique et la masse volumique. Le deuxième constat est que les conditions de caractérisation ne sont pas fournies (et/ou sont omises), ce qui peut être un inconvénient. Par exemple, lors du changement de phase, certaines propriétés (températures de début et de fin de transformation, etc) dépendent de la vitesse de caractérisation. Pour éviter ces inconvénients, il faut considérer une vitesse de caractérisation comparable à la cinétique de l'application envisagée. Ce point incite à la création d'une base de données fiable pour la comparaison des performances des matériaux potentiels lors de la phase de sélection des matériaux qui sera faite ultérieurement (chapitre 4).

L'inconvénient de la faible conductivité

D'autre part, ce travail de caractérisation met aussi en évidence la faible conductivité des MCP. La conductivité de ces matériaux est de l'ordre de 0.2 W/m K ce qui constitue une limitation lors du transfert de la chaleur stockée dans le volume de MCP [54]. Cette

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0060/these.pdf
© [J.P. Arzamendia Lopez], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

(a) Nid d'abeille métallique comme matrice conductrice. Grande surface de contact matrice/MCP et fonction conteneur. Exemple de [45].



(b) Matrice du type brosse concentrique en carbone. La fonction conteneur est assurée par un cylindre. Exemple de [37].

FIGURE 1.9 – Exemples de matrices conductrices pour améliorer la conductivité thermique des MCP

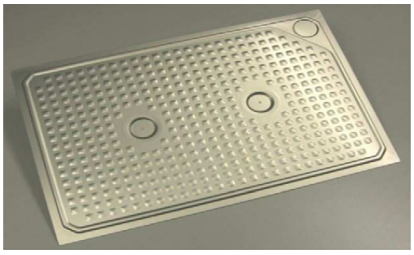
propriété thermique a un impact direct sur la puissance de décharge du système. Bien que nombreuses, les recherches sur l'amélioration de la conductivité des matériaux à base de MCP ont été pour la plupart empiriques. Les matrices conductrices les plus souvent utilisées sont les matrices métalliques, les matrices de carbone et les matrices de silice. Dans les travaux réalisé par Hasse et al. [45], des nids d'abeilles métalliques ont été utilisés comme matrice conductrice d'une paraffine commerciale dénommé *Linpar 1820*. Cette architecture permet de maximiser le surface de contact matrice/MCP. Dans les travaux de Messalhy et al. [64], un exemple de matrice de carbone est donné. Les matrices de carbone ont l'avantage d'être résistantes à la corrosion et aux attaques chimiques, les hydrates de sel sont donc utilisables plus facilement. Dans ce cas, la matrice conductrice se présente sous forme de mousse. Celle-ci est saturée en MCP. Une autre solution proposée par Zang et al. [94] consiste à encapsuler de la paraffine dans des capsules de silice. Il est donc constaté trois architectures différentes pour des matrices conductrices faites de matériaux différents. Non seulement le choix des matériaux est capital pour la recherche de la solution optimale mais l'architecture joue aussi un rôle important. Ces matériaux sont développeés selon une méthodologie dite *"material by design"*. Ils seront donc étudiés plus en détail dans la section suivante 1.3.

Applications des MCP dans le domaine du bâtiment

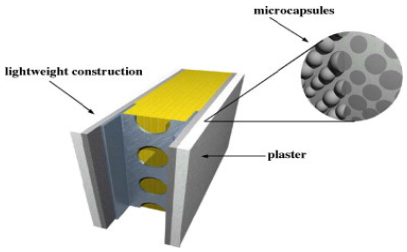
Les MCP sont intégrés aux bâtiments de deux façons : *via* les systèmes passifs, principalement sur l'enveloppe du bâtiment et *via* les systèmes actifs couplés à des systèmes énergétiques (PAC, chaudières, etc).

Dans le cas des systèmes passifs, les MCP sont placés au niveau de l'enveloppe du bâtiment. Ceci implique qu'ils soient en contact direct avec la pièce pour échanger de la chaleur. Les échanges de chaleur se font généralement par convection naturelle et conduction.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0060/these.pdf
© [J.P. Arzamendia Lopez], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés



(a) Plaque composite contenant des MCP intègrée à une enveloppe en brique [25].



(b) Structure légère contenant des microcapsules de MCP [79].

FIGURE 1.10 – Exemples de matériaux pour les enveloppes des bâtiment

Plusieurs publications [54, 71, 87] font une synthèse du positionnement de ces solutions : plafond, plancher, parois légères, parois en béton imprégnées de MCP, etc. Expérimentalement, Castell et al. [25] proposent une étude des plaques contenant un MCP à l'échelle 1 : 1. Une comparaison avec une construction traditionnelle a été faite pour montrer l'intérêt de la solution proposée. Kuznik et al. [57], ont étudié le produit commercial "Energain" (plaque contenant du MCP) afin de déterminer une épaisseur optimale. D'autre part, les travaux de Cabeza et al. [23] proposent un béton contenant des micro-capsules de MCP (d'autres méthodes d'encapsulation de MCP sont données par Borreguero et al. [18] et Taguchi et al. [82]). La solution proposée a été validée mécaniquement selon les normes du bâtiment en vigueur dans le pays d'étude (Espagne). Toutes ces études avaient pour cadre une utilisation des solutions enveloppes en période estivale, ce qui diffère de notre cas. Les solutions enveloppe pour la période hivernale ont été peu étudiées, même pour des périodes de stockage et de décharge plus longues que dans notre cas.

Contrairement aux systèmes passifs, les systèmes actifs ne sont pas en contact direct avec la pièce pour échanger de la chaleur. Les échanges entre la pièce et le système de stockage se font par l'intermédiaire d'un fluide qui transporte la chaleur (généralement l'air ou l'eau).

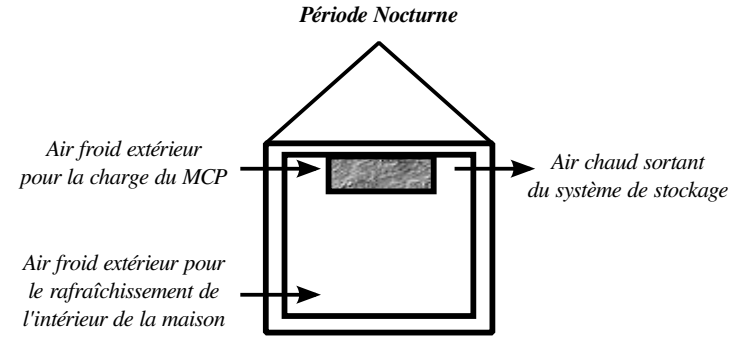
Les systèmes à eau sont utilisés principalement pour les ballons d'eau chaude. Dans la littérature [24, 42, 48, 62], ces types de systèmes sont couplés avec des panneaux solaires. Les MCP permettent de maintenir l'eau en température plus longtemps.

Les échangeurs à air contenant des MCP peuvent être directement intégrés au système de ventilation du bâtiment afin de stocker de l'énergie pour le chauffage ou le refroidissement. Des systèmes de stockage air/MCP pour le rafraîchissement de l'air pendant la période estivale sont décrits en [7, 69, 83, 91]. Le principe de fonctionnement d'une solution pour ces types de systèmes est présenté figure 1.11 :

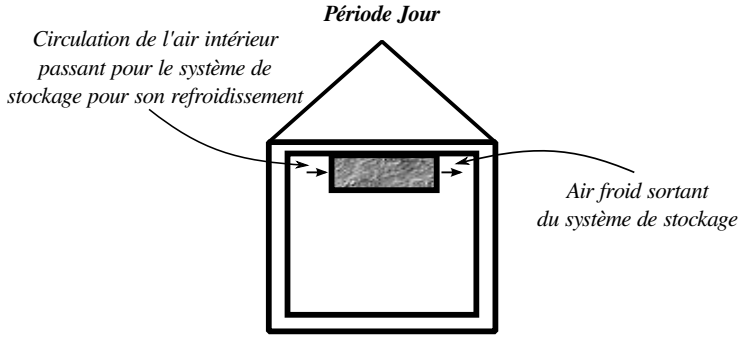
— Phase *(a)* : le processus de décharge de chaleur est effectué pendant la nuit au moment où la température extérieure est inférieure à la température de la pièce. Aussi, la T_{ext} est inférieure à la température de changement de phase.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0060/these.pdf
© [J.P. Arzamendia Lopez], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

— Phase *(b)* : processus de stockage de chaleur est déclenché au moment où la température extérieure est supérieure à la température de confort. Aussi, la température extérieure est supérieure à la température de changement de phase. La température de la pièce assure alors le confort thermique des occupants plus longtemps.



(a) Processus de stockage. Fonctionnement de l'unité de stockage pendant la nuit.



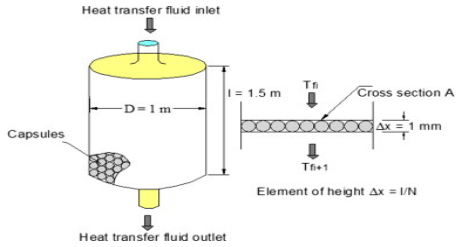
(b) Processus de décharge. Fonctionnement de l'unité de stockage pendant le jour.

FIGURE 1.11 – Principe de fonctionnement d'un système de stockage air/MCP pour le rafraîchissement de l'air intérieur

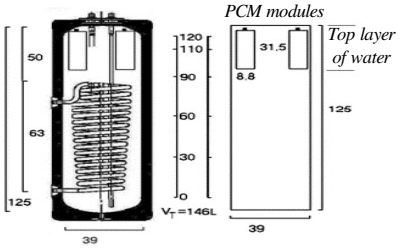
Il est aussi possible de coupler le système de stockage avec la climatisation pour réaliser un effacement dans les moments de forte demande ([70, 80, 81]). D'autre part, en hiver, le système de stockage est couplé avec un système énergétique (PAC, résistances électriques) pour stocker de la chaleur ([30, 87]). Le système de stockage est chargé avec de la chaleur d'origine électrique. L'avantage, comme dans le cas de la climatisation, est un effacement dans les moments de forte demande. Ces cas correspondent plus particulièrement au contexte de cette thèse. Une bibliographie plus exhaustive sera donnée au chapitre 3, lors de la modélisation du système étudié.

L'objectif de ces systèmes est de réduire la consommation d'énergie en utilisant la

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0060/these.pdf
© [J.P. Arzamendia Lopez], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés



(a) Exemple donné par [75]. Un lit de capsules sphériques de MCP est disposé à l'intérieur.



(b) Exemple donné par [48]. Les modules de MCP cylindriques sont placés dans la partie supérieure du ballon d'eau.

FIGURE 1.12 – Exemples d'utilisation de MCP couplés à des sytèmes solaires pour l'eau chaude sanitaire.

température extérieure et/ou de lisser les pics de demande en puissance pour le systèmes de climatisation. Des exemples d'application d'un échangeur air/MCP sont donnés en [8, 17]. Deux cas sont considérés : l'un est un bâtiment de bureaux équipé de ce type de dispositif placé dans le vide sanitaire ; l'autre est une maison basse consommation avec deux unités de stockage intégrées au système mécanique de ventilation de la maison.

Cette revue bibliographique a permis de mettre en évidence le potentiel important des MCP pour le stockage de chaleur. Le fort intérêt de la communauté scientifique (le nombre des publications sur le sujet n'a pas cessé d'augmenter ces dernières années) en est la preuve. Leur grande capacité de stockage, *via* une densité énergétique élevée, permet un gain volumique très important pour le domaine du bâtiment dans le cas d'un effacement à moyen terme. Cependant, certaines conditions nécessaires pour réaliser cet effacement feront l'objet d'études lors de ce travail de thèse. La faible conductivité des MCP limite la puissance de décharge des systèmes de stockage. Diverses solutions sont proposées dans la littérature, mais la plupart du temps, développées de manière empirique. Nous proposons dans ce travail de thèse l'utilisation de matériaux architecturés contenant des MCP afin de satisfaire les besoins, tant en terme de stockage que de puissance. Dans la section suivante, nous présentons donc ce nouveau concept de matériau architecturé.

1.3 Nécessité d'un matériau architecturé

1.3.1 Vers le choix des matériaux architecturés

La recherche de multifonctionnalité implique certaines propriétés qui ne sont pas offertes par les matériaux monolithiques. La sélection de matériaux à partir des indices de performance dans une cartographie des propriétés (exemple dans la figure 1.13 extraite de [11]) permet de mettre en évidence les meilleures solutions. Dans cette figure, la recherche

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0060/these.pdf
© [J.P. Arzamendia Lopez], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

d'une structure résistante mécaniquement et légère à la fois conduit à la zone gauche supérieure où aucun matériau existant n'est situé (zone d'interêt). La base de données matériaux utilisée pour tracer cette cartographie s'est constituée au fil de l'histoire, d'abord par les matériaux monolithiques trouvées dans la nature puis par des évolutions développées par l'homme, comme par exemple les composites et de nouveaux alliages métalliques. Dans le but d'améliorer encore les performances et d'atteindre cette zone d'interêt vide de matériaux, l'optimisation de l'architecture constitue une voie complémentaire.

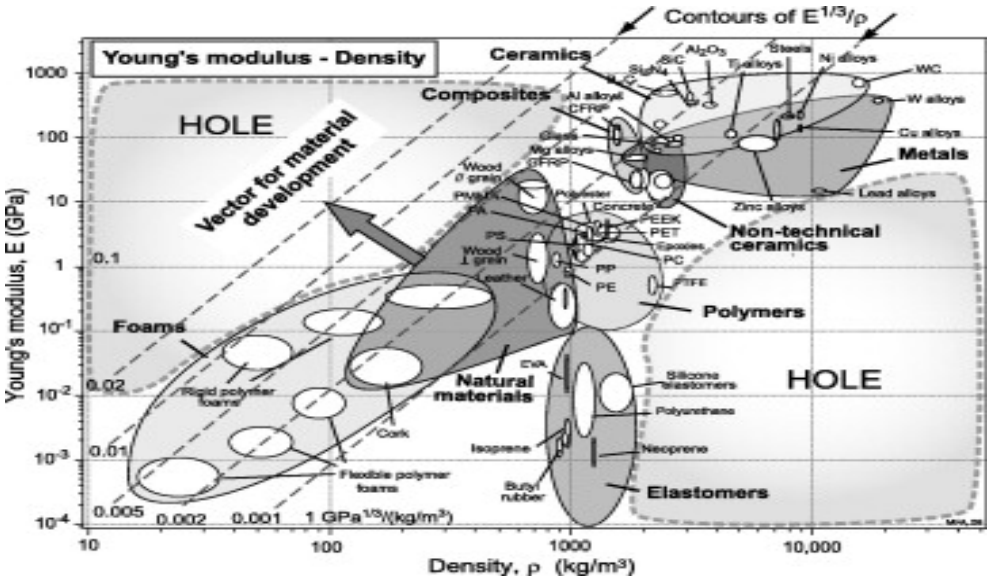


FIGURE 1.13 – Exemple d'une cartographie *Module de Young vs. Densité* [11]

Dans notre cas, nous avons montré (section 1.1.2) que pour répondre simultanément aux besoins d'énergie stockée et de puissance de restitution en vue d'un effacement à moyen terme de la demande de chaleur, il est nécessaire de réunir dans un même matériau des propriétés thermiques incompatibles *a priori*. Il est donc naturel de songer à un "mélange" entre matériaux qui puisse associer les deux propriétés, l'inertie et la puissance de restitution.

On est typiquement dans une situation qui requiert la réalisation de matériaux hybrides architecturés auxquels on va demander, ne serait-ce que sur le plan thermique et fonctionnel, des fonctions de stockage d'énergie, d'éventuel conteneur et d'échangeur thermique. Comme la solution développée devra répondre par ailleurs à des objectifs de minimisation de coût, de masse ou d'encombrement selon les cas, on a affaire à un problème d'optimisation multifonctionnelle et multi-objectifs pour lequel les solutions de matériaux architecturés hybrides sont particulièrement appropriées.

Il est indispensable d'une part que le matériau assurant l'inertie thermique puisse pénétrer toute la structure et donc que les structures assurant la conductivité thermique soient "ouvertes" (ce qui exclut par exemple les matériaux cellulaires à cellules fermées).

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0060/these.pdf
© [J.P. Arzamendia Lopez], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

D'autre part, la continuité de la conduction thermique requiert un réseau interconnecté pour le matériau assurant cette fonction.

À partir du cahier des charges, il s'agira de proposer des matériaux architecturés pour le stockage de chaleur latente, associant le meilleur choix de matériau inertiel (MCP), de matériau conteneur, de matériau conducteur, et d'architecture de la phase conductrice pour répondre au mieux à ce cahier des charges. La démarche consiste à prendre en compte l'application bâtiment dans le cahier des charges pour proposer un matériau sur mesure. Cette démarche *"materials by design"* nous conduira en premier lieu à identifier les solutions les plus prometteuses, puis à les réaliser et à les tester.

1.3.2 Matériaux architecturés

Comment définir précisément un matériau architecturé ? Un matériau architecturé est une combinaison de deux matériaux (voir plus) ou de matériaux et de l'espace vide, configurée de façon à posséder certaines propriétés que ne sont pas en mesure d'être obtenues à partir d'un matériau seul [19, 20]. Le concept de matériau architecturé est alors un concept général qui inclut plusieurs définitions de matériaux : les matériaux hybrides, les matériaux poreux, les matériaux cellulaires, etc. Par exemple, les matériaux hybrides, sont par définition un mélange de matériaux organiques et inorganiques à une échelle atomique [51]. Cette définition peut alors entrer dans la catégorie des matériaux architecturés. En outre, dans le cas de l'utilisation d'espaces vides, le concept de matériau architecturé englobe les matériaux cellulaires et les matériaux poreux. Deux points sont à remarquer dans cette définition. Le premier est la dualité des échelles. Les matériaux architecturés peuvent être conçus et analysés comme une combinaison de matériaux et de motifs, mais aussi comme un matériau équivalent homogène, ce qui permet une comparaison en termes de propriétés avec les matériaux monolithiques. Le deuxième point est la possibilité d'optimisation de la géométrie à différentes échelles pour obtenir des propriétés équivalentes plus performantes.

Dans la nature et plus particulièrement dans le vivant, certains milieux présentent des architectures particulières, à différentes échelles, pour satisfaire un besoin d'adaptation au milieu ambiant. Ces matériaux sont dénommés dans la littérature "structures hiérarchiques. La cuticule d'un arthropode, comme le homard *Homarus americanus* (figure 1.14, image *(i)*), est un bon exemple d'une variété d'architectures à différentes échelles dans un organisme biologique. La cuticule de l'exosquelette du homard est formé par une structure multicouche. Celle-ci est constituée de lamelles pleines et de lamelles alvéolaires empilées pour former une structure torsadée contreplaquée (figure 1.14, image *(g)*). Les lamelles sont, à leur tour, formées de nano-fibres disposées parallèlement et composées de chaînes de alpha-chitine enveloppées de protéines. Ce processus d'évolution orienté par une sélection naturelle s'est déroulé pendant des milliers d'années.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0060/these.pdf
© [J.P. Arzamendia Lopez], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

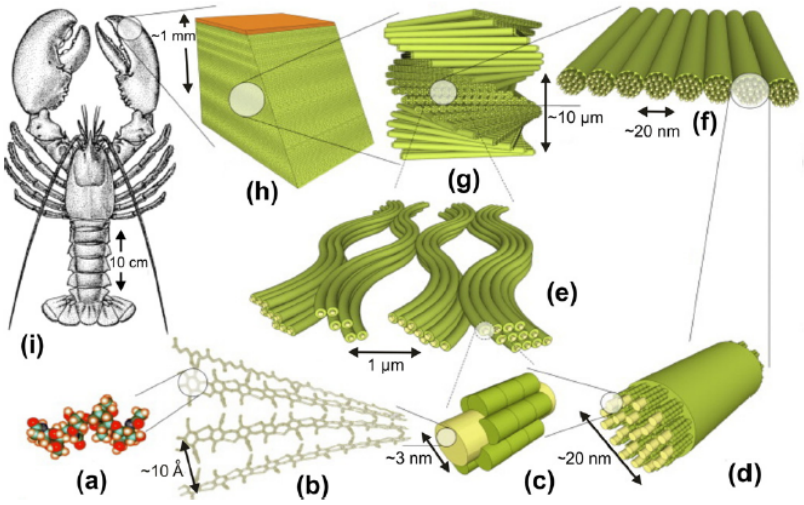
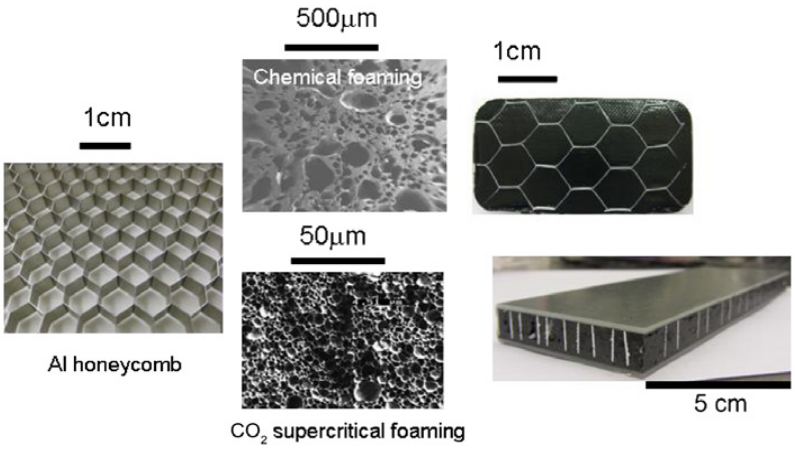


FIGURE 1.14 – Cuticule d'un homard *Homarus americanus* : exemple d'un matériau architecturé biologique. Analyse des différentes architectures présentes dans cette structure hiérarchique (Dunlop et al. [33]).

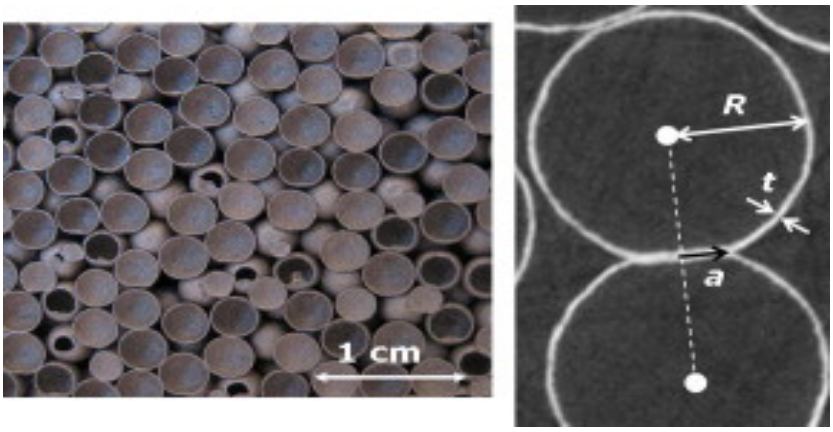
Dans le domaine de l'ingénierie, divers exemples existent. Pour citer deux d'entre eux, les travaux réalisés par Bollen et al. [15] présentent une plaque architecturée avec deux fonctions principales : d'une part, l'absorption électromagnétique *via* une mousse polymère contenant des nanotubes de carbone et des fibres de verre et, d'autre part, des nids d'abeilles métalliques pour assurer la tenue mécanique de l'ensemble. Les mousses sont contenues dans les nids d'abeilles (figure 1.15a). Par ailleurs, en [34] est proposée l'utilisation de sphères creuses afin d'assurer les fonctions d'isolation acoustique et de structure légère. L'architecture a été optimisée pour augmenter la performance du matériau architecturé (figure 1.15b).

Enfin, dans le domaine du bâtiment, qui nous intéresse plus particulièrement, le béton cellulaire (figure 1.16a) est un exemple de matériau architecturé. Conçu en Suède à la fin du XIX^{eme} siècle, il est constitué d'un mélange d'eau, de sable, de ciment et de poudre d'aluminium. Cuit par autoclavage, ce mélange produit des alvéoles dans lesquels l'air est emprisonné, jouant ainsi son rôle d'isolant (figure 1.16b). il en résulte un matériau multifonctionnel : porteur et isolant. Le béton cellulaire est connu dans le domaine comme un matériau à isolation répartie. La stratégie utilisée pour la conception de ce matériau novateur pour l'époque a été empirique.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0060/these.pdf
© [J.P. Arzamendia Lopez], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés



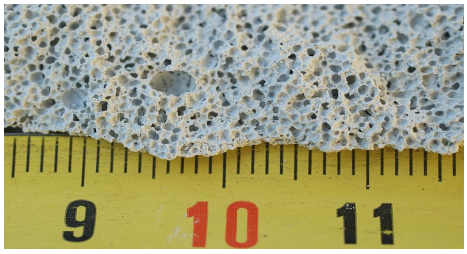
(a) Matériau architecturé avec des fonctions de tenue mécanique et absorption électromagnétique proposé par Bollen et al. [15].



(b) Matériau architecturé avec les fonctions d'isolation acoustique et de structure légère proposé par Fallet et al.[34].

FIGURE 1.15 – Exemples de matériaux architecturés dans le domaine de l'ingénierie

(a) Bloc de béton cellulaire utilisé pour la construction civile



(b) Alvéoles formées pendant la cuisson par autoclavage grâce à la poudre d'aluminium

FIGURE 1.16 – Le béton cellulaire : exemple de matériau architecturé dans le domaine du bâtiment. Matériau multifonctionnel : porteur et isolant.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0060/these.pdf
© [J.P. Arzamendia Lopez], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

1.4 Conclusions

Dans le contexte actuel, le secteur du bâtiment est devenu un des principaux axes pour la réduction de la consommation énergétique. En hiver, les pics d'appel en puissance sont liés à la demande de chaleur. La stratégie choisie pour la réduction des pics d'appel en puissance est donc l'effacement du chauffage pendant les périodes de forte demande. La durée de ces périodes impose une puissance de restitution élevée. La problématique consiste donc à répondre à ce double besoin de stockage et de puissance de restitution, propriétés qui sont contradictoires pour un matériau monolithique.

Les systèmes de stockage à chaleur latente répresentent une des solutions les plus prometteuses. Ils permettent notamment un meilleur équilibre entre la disponibilité et la demande. Ces types de systèmes de stockage utilisent la chaleur absorbée ou dégagée lors du phénomène de changement de phase. Les matériaux utilisés dans ces systèmes sont les MCP. Une revue bibliographique sur ces matériaux a été donc réalisée. Deux familles sont préselectionnées en raison de leur température opérationnelle : les paraffines et les hydrates de sel. Cependant, malgré leur forte capacité de stockage, elles ne répondent pas totalement à notre objectif. En effet, la nécessité de restituer la chaleur stockée pendant un laps de temps de 2 h impose une puissance de décharge élevée. La faible conductivité des MCP est donc un inconvénient majeur.

En vue de contourner cet obstacle, l'utilisation des matrices conductrices a été étudiée dans la littérature. De nombreux travaux proposent des solutions obtenues par des démarches empiriques, mais nous envisageons d'aller plus loin en proposant des matériaux sur mesure. L'étude bibliographique sur les matériaux architecturés a permis de mettre en avant le fort potentiel de ces matériaux conçus par une stratégie de *"materials by design"*. Il seront donc utilisés afin d'atteindre nos objectifs.

Néanmoins, le vaste choix de MCP et l'infinité d'architectures possibles pour la matrice conductrice nous conduisent au fait qu'une méthodologie de conception est nécessaire. Nous allons présenter dans le chapitre suivant (cf. chapitre 2) cette méthodologie qui nous permettra d'obtenir des matériaux architecturés sur mesure contenant des MCP sur mesure pour le domaine du bâtiment.

Un cas d'étude est analysé par la suite. Le chapitre 3 présente le modèle numérique développé et utilisé pour l'analyse du système de stockage de chaleur. Le chapitre 4 applique la méthodologie pour l'obtention d'un matériau optimal .Une solution en termes de caractéristiques thermiques et design est proposée à la fin du chapitre. Enfin, le chapitre 5 présente une conception optimale de la solution proposée.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0060/these.pdf
© [J.P. Arzamendia Lopez], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0060/these.pdf
© [J.P. Arzamendia Lopez], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0060/these.pdf
© [J.P. Arzamendia Lopez], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

2

Méthodologie pour la conception des matériaux architecturés appliqués au bâtiment et cahier des charges

2.1 Introduction

Dans le chapitre précédent, l'état de l'art sur les MCP a permis d'identifier les familles potentiellement susceptibles d'être utilisées dans un système de stockage par chaleur latente pour le bâtiment. Les caractéristiques requises pour les matériaux afin de satisfaire nos objectifs imposent une recherche de multifonctionnalité, plus particulièrement de stockage et de puissance de restitution. La première fonction, le stockage, est remplie par l'intermédiaire des MCP. La deuxième fonction est satisfaite par l'intermédiaire des matériaux dits architecturés.

Mais quel est le meilleur choix parmi les familles proposées ? Comment réaliser le choix de ces matériaux ? Dans la littérature, diverses méthodes de sélection existent, notamment celle développée par Ashby et al. [10]. Cette méthode consiste à traduire le cahier des charges en indices de performance pour évaluer la performance de la solution. Nous proposons d'adapter cet outil de sélection au domaine du bâtiment.

Aussi, l'utilisation des matériaux architecturés dans le domaine du bâtiment appelle d'autres questionnements. Une architecture complexe est-elle nécessaire ? Comment parvenir à l'optimiser ? Une fois le classement des matériaux potentiels réalisé, la méthode doit alors être en mesure d'établir le chemin d'optimisation. Les lois d'homogénéisation de la littérature permettant d'obtenir les propriétés équivalente homogènes, les matériaux architecturés peuvent alors être comparés aux matériaux monolithiques.

Un ensemble d'outils, soit existants, soit à développer, pouvant être utilisés pour la conception d'un matériau sur mesure, a été identifié. La section 2.2 présente une méthodologie les mettant en œuvre et permettant la conception d'un matériau sur mesure dans le domaine du bâtiment. Le cahier des charges établi pour ce travail est abordé dans la

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0060/these.pdf
© [J.P. Arzamendia Lopez], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

section suivante (section 2.3).

2.2 Top-down methodology

2.2.1 Description générale de la méthode

La figure 2.1 montre schématiquement la méthodologie développée lors de ce travail de thèse pour la conception des matériaux sur mesure et dénommée *Top-down Methodology*. Dans cette figure, trois échelles coexistent. La première d'entre elles est l'échelle de l'application à traiter, le bâtiment. Le principal objectif, à cette échelle, est de déterminer le cahier de charges du système de stockage qui satisfait la stratégie d'effacement du système de chauffage. La deuxième échelle est celle du système de stockage latent. Ici, l'objectif principal est d'obtenir des indicateurs de performances permettant l'évaluation du système de stockage. Enfin, la troisième échelle est celle des matériaux constituants le matériau solution. Le but principal, à cette échelle, est de déterminer l'architecture du matériau solution.

Notre travail consiste à établir des liens entre les différentes échelles pour ainsi obtenir un matériau sur mesure répondant efficacement à l'objectif donné. Deux étapes sont donc mises en évidence pour accomplir ce travail. À chaque étape, des outils numériques sont développés (si nécessaire) afin de réaliser le lien. Ces étapes sont l'objet d'une description détaillée dans les lignes qui suivent.

2.2.2 Première étape : Bâtiment → propriétés équivalentes homogènes

La conception d'un matériau optimal passe par l'adaptation du matériau à l'application souhaitée. Dans le cadre de cette thèse, cette application est un bâtiment résidentiel.

Le bâtiment est un environnement complexe. Non seulement par son interaction forte avec l'extérieur mais aussi par le très grand nombre de facteurs intervenant lors de sa conception et de son fonctionnement. Les avancées de l'informatique et le recueil d'un grand nombre d'informations pour la constitution d'une base de données (matériaux, climat, scénarios) ont permis le développement d'une grande variété de logiciels (*TRNSYS*, Energy Plus, Codyba, etc) simulant le bâtiment et son environnement en régime dynamique. Les systèmes dynamiques ne sont pas à l'équilibre : à tout instant, les températures des éléments d'étude peuvent varier en fonction des échanges thermiques (conduction, convection, rayonnement). L'arrivée de la simulation numérique en régime dynamique a permis d'estimer les consommations énergétiques en tenant compte de l'enveloppe du bâtiment, des systèmes énergétiques, de différents scénarios possibles (occupation, activité

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0060/these.pdf
© [J.P. Arzamendia Lopez], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

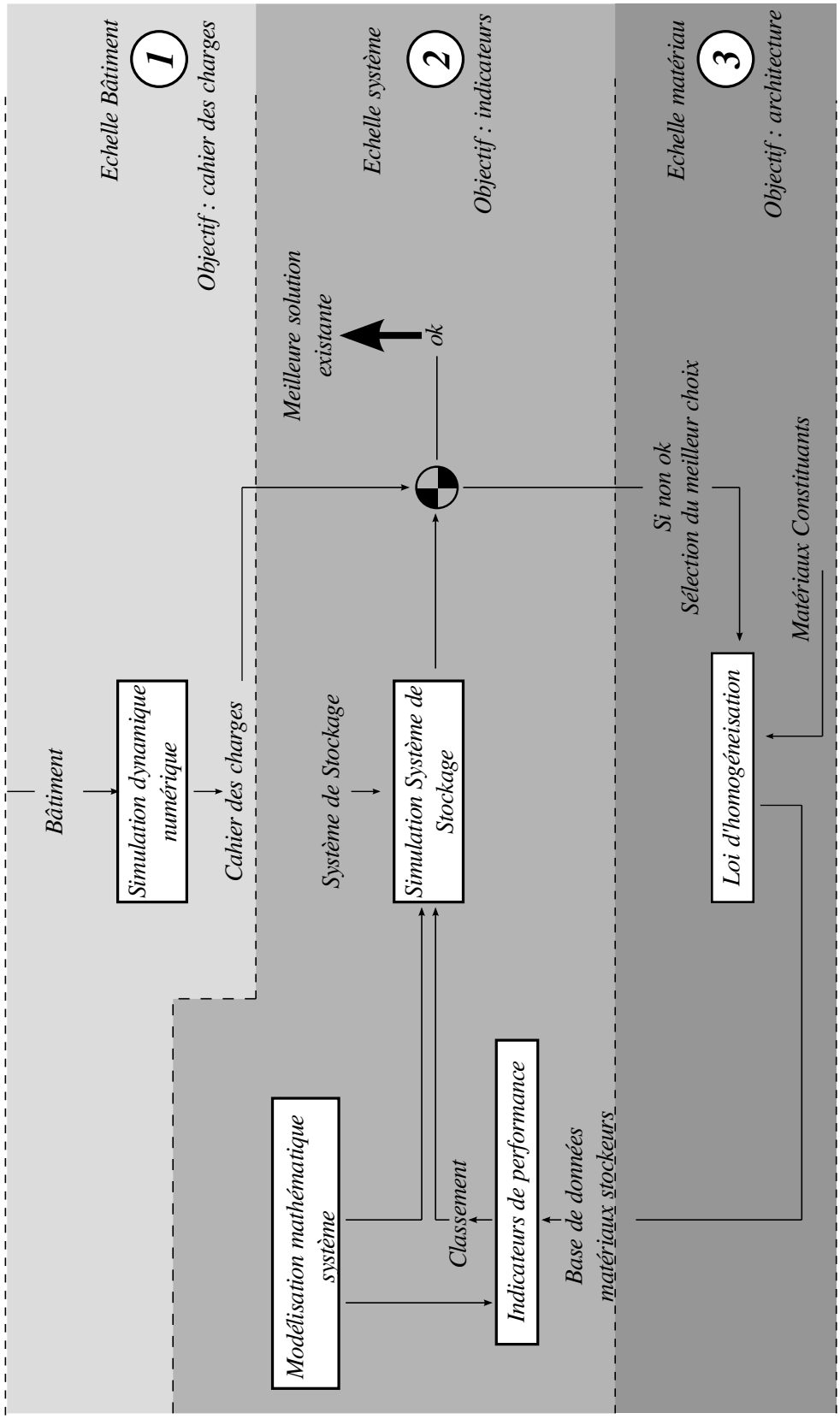


FIGURE 2.1 – *Top-down Methodology* pour la conception des matériaux architecturés dans le domaine du bâtiment. Les parties *1, 2 et 3* montrent les différentes échelles du problème

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0060/these.pdf
© [J.P. Arzamendia Lopez], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

électrique, climat, ...).

La première étape de la méthodologie consiste à établir un lien entre l'objectif à satisfaire et les propriétés du système de stockage. Par rapport à notre objectif défini dans le chapitre précédent (section 1.1.2), la stratégie choisie pour réaliser le lissage des pics d'appel en puissance consiste en un effacement complet du système de chauffage pendant ces périodes de forte demande. Le cahier des charges de la solution proposée est défini à partir des simulations numériques réalisées sur l'application type retenue en utilisant le logiciel de simulation dynamique du bâtiment *TRNSYS*. Le critère choisi pour le cahier des charges est la puissance de décharge nécessaire pour réaliser l'effacement des pics d'appel en puissance.

Un outil numérique modélisant le système de stockage latent a été développé. Cet outil est en mesure de prendre en compte la principale caractéristique de nos matériaux potentiels : le changement de phase. L'analyse du système de stockage permet d'identifier des indicateurs de performance. Une évaluation du comportement du système de stockage peut être réalisée *via* ces indicateurs. Les indicateurs déterminés sont donc capables de fournir les propriétés matériaux et fonctionnelles du système de stockage nécessaires pour atteindre nos objectifs.

Le couplage entre ces deux outils permet donc d'établir une relation (*via* les indicateurs) entre les deux échelles en question, à savoir le bâtiment (échelle structure) et le matériau (échelle meso). Les indicateurs développés sont liés aux fonctions souhaitées de grande capacité de stockage et forte puissance de restitution et permettent la recherche d'un matériau optimal pour répondre au problème posé.

2.2.3 Deuxième étape : Propriétés équivalentes homogènes → Sélection/Conception d'un matériau optimal

La première étape permet l'analyse du système de stockage pour notre cas d'étude et la détermination des indicateurs.

Ces indicateurs sont utilisés pour établir une classification de matériaux existants potentiels. Les matériaux existants sont donc analysés pour savoir s'il en existe un qui réponde à notre objectif. Pour cela, les indicateurs liés à la capacité de stockage et à la puissance de restitution permettent d'établir une cartographie (Indicateur 1 vs. Indicateur 2) pour avoir une distribution des matériaux dans l'espace particulier qui nous intéresse. L'analyse réalisée au préalable fournit le couple d'indicateurs (Indicateur1, Indicateur2) de chaque matériau. Dans le cas de nos travaux, la maximisation des fonctions souhaitées (stockage et puissance) impose une minimisation des indicateurs. Les matériaux existants les plus proches du point (0,0) de l'espace étudié forment un front de Pareto (ensemble des solutions les plus performantes vérifiant le critère choisi, ici, la puissance de décharge).

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0060/these.pdf
© [J.P. Arzamendia Lopez], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

Dans le cas où aucun matériau existant ne répond à notre cahier de charges, la cartographie permet de guider la recherche d'une solution optimale *via* l'optimisation des indicateurs. Les lois d'homogénéisation sont utilisées, pour déterminer l'architecture nécessaire. Deux cas de figure se présentent :

— soit la conductivité thermique requise n'est pas élevée, la matrice conductrice envisagée peut alors être construite avec des géométries simples.

— soit le besoin en conductivité thermique est important et la matrice conductrice doit être en mesure de répondre à cette objectif. L'architecture devient donc un paramètre d'optimisation utile.

Dans le premier cas, la quantité de matière est prépondérante (fraction volumique). Dans le deuxième cas, l'architecture doit être optimisée. Les travaux réalisés par Laszczyk [59] dans le cadre du CPR MAM présentent un outil numérique capable de rechercher la topologie optimale pour des panneaux architecturés. Les propriétés de chaque composant de notre matériau architecturé sont alors connues. Cependant, il se peut, que dans certains cas d'étude, le travail de sélection de matériaux et d'optimisation de l'architecture ne soient pas suffisants pour répondre à l'objectif imposé, même si ces outils fournissent le meilleur choix. Ceci nous oriente vers une optimisation du design de la solution proposée.

Afin d'appliquer cette méthodologie, la première étape est donc d'établir le cahier de charges pour le dimensionnement du système des stockage.

2.3 Cahier des charges pour la solution étudiée

2.3.1 Cadre de l'étude

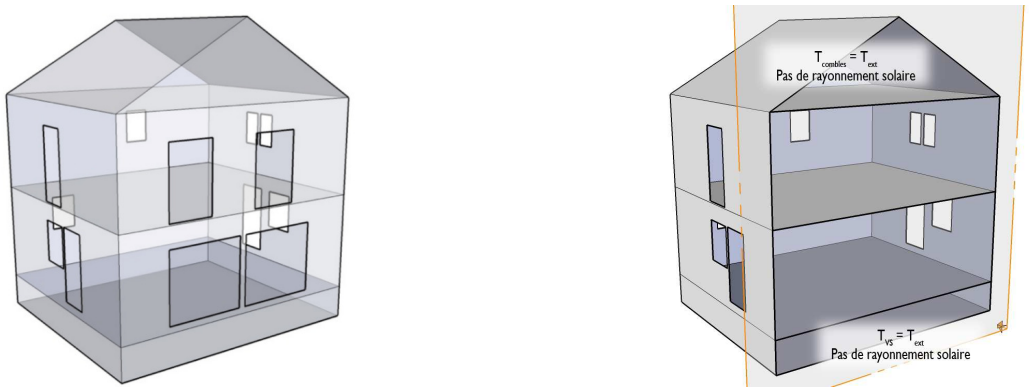
L'objectif de cette section est de définir le cahier de charges pour le dimensionnement du système de stockage en fonction des besoins en chauffage d'un bâtiment type. Les simulations numériques ont été effectuées sous TRNSYS (pour *TRaNsient SYstem Simulation software* [53]).

2.3.2 Modélisation du bâtiment type

Le bâtiment type choisi pour cette étude est une maison individuelle (figure 2.2a). La maison individuelle étudiée est une maison témoin qui fait partie d'un site expérimental à l'échelle 1 : 1 développé par l'Institut National d'Énergie Solaire (INES) (pour plus d'informations, voir [21]). Cette maison individuelle est constituée de deux étages (zones aérauliques) sur vide sanitaire et sous combles de 110 m^2 habitables.

L'utilisation d'un système de stockage latent doit être accompagnée d'un effort sur l'isolation de l'enveloppe de la maison afin de réduire la consommation énergétique. En conséquence, l'étude se focalise sur des bâtiments performants pour la réduction de consom-

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0060/these.pdf
© [J.P. Arzamendia Lopez], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés



(a) Maison étudiée (b) Combles et vide sanitataire non chauffés

FIGURE 2.2 – Maison type à étudier

mation en énergie du type *BBC* (Bâtiment Basse Consommation). Ce label répond à des exigences définies dans un texte réglementé en 2007 (Arrêté du 8 mai 2007). La consommation d'énergie primaire de la maison (incluant les systèmes énergétiques et l'éclairage) doit être inférieure ou égale à 50 $kWh_{EP}/m^2/an$.

Enveloppe

Les parois opaques de l'enveloppe de la maison ont une forte isolation réalisé avec de la laine de verre : 20 cm d'épaisseur sur les murs extérieurs, 25 cm sur le plancher et 40 cm au plafond. La composition des parois opaques est donnée dans le tableau 2.1. Les caractéristiques des matériaux qui composent les parois opaques sont données en annexe B.2. L'émissivité des parois opaques est fixée à 0.3 et le coefficient d'absorption à 0.6. Aussi, les coefficients de convection sont donnés ci dessous.

Plancher bas
- intérieur : 0.5 $W/m^2\,K$
- extérieur : 3.3 $W/m^2\,K$

Parois Verticales
- intérieur : 3.3 $W/m^2\,K$
- extérieur : 14.9 $W/m^2\,K$

Parois Vitrées
- intérieur : 3.3 $W/m^2\,K$
- extérieur : 14.9 $W/m^2\,K$

Plancher haut
- intérieur : 4.6 $W/m^2\,K$
- extérieur : 18.9 $W/m^2\,K$

Plancher intermédiaire
- intérieur : 4.6 $W/m^2\,K$
- extérieur : 1.8 $W/m^2\,K$

Par ailleurs, les parois vitrées sont en double vitrage argon de basse émissivité, très

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0060/these.pdf
© [J.P. Arzamendia Lopez], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

Type de Paroi	Matériau	épaisseur (cm)
Murs ext.	Bloc de béton	15
	Laine de verre semi rigide	20
	Blocs de béton	15
Plancher Bas	Polystyrène extrudé	25
	Hourdis	16
	Béton lourd	4
Combles	Laine de verre semi rigide	40
	Plaque de plâtre	1.3
Plancher intermèdiaire	Béton plein	22

TABLEAU 2.1 – Descriptif des parois opaques de la maison BBC

performantes (pour plus de détails voir annexe B.1).

Ventilation

La ventilation est de type double flux avec un rendement de 75 % pour la régénération de chaleur. Le débit de ventilation est supposé de 0.5 vol/h. Pendant la période estivale, la ventilation est du type simple flux avec une sur-ventilation de 4 vol/h pendant la nuit. D'autre part, le taux d'infiltration de la maison est supposé constant et égal à 0.042 vol/h. En fin, il est noté que le modèle ne comprend pas de refroidissement.

Apport internes

Trois apports internes principaux sont considérés : les occupants, les appareils électriques et l'éclairage.

La puissance totale dissipée par les appareils électriques et l'éclairage pendant la journée est donnée en annexe B.3. Le gain en énergie est donc de 1600 kWh par an. Cette consommation électrique correspond à des appareils du type *Classe A* (basse/ faible consommation).

D'autre part, il est considéré que la maison est occupée par une famille de 4 personnes. Deux personnes sont présentes entre 17 h et 18 h et 4 personnes entre 18 h et 8 h. Le reste du temps la maison est vide. La puissance émise par chaque personne étant de 80 W, l'apport total en énergie par an est de 1690 kWh.

Les apports sont répartis équitablement sur les deux étages.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0060/these.pdf
© [J.P. Arzamendia Lopez], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

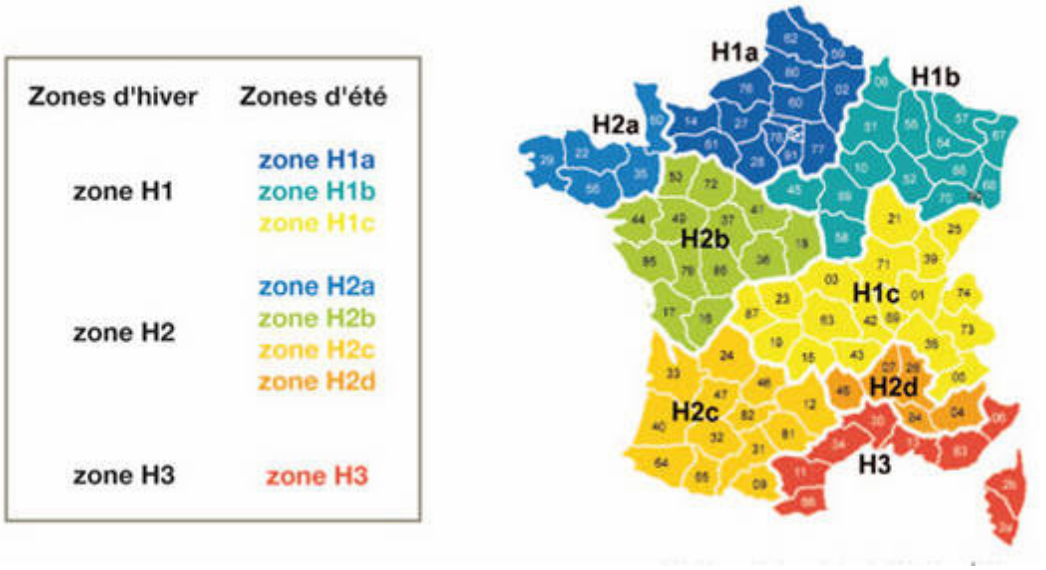


FIGURE 2.3 – Zones climatiques françaises

Température de consigne

La température de consigne est fixée à 19 °C pendant les périodes d'occupation. Cette valeur sera utilisée par la suite.

Conditions météorologiques

La maison est située dans la ville de Chambéry en Savoie. Les conditions météorologiques correspondent donc à la zone climatique H1c (figure 2.3). Le fichier météorologique est issu de Meteonorm et fournit des informations telles que la température extérieure, les flux solaires, etc. Les données sont fournies avec un pas horaire.

D'autre part, la période hivernale est comprise entre le 15 octobre et le 15 avril.

2.3.3 Besoin en chauffage pour la période hivernale

Les simulations numériques réalisées avec les hypothèses évoquées précédemment permettent d'estimer le besoin annuel en chauffage. Le tableau 2.2 est une synthèse des principaux résultats concernant cette analyse. La demande en puissance maximale de chauffage est constatée vers 8h du matin (pour un jour de janvier), moment le plus froid de la journée (figure 2.4).

L'étude se centre sur l'effacement de la demande en puissance de chauffage entre 18 h et 20 h. Le nombre de jours pour lesquels il est constaté que le chauffage est actif entre 18 h et 20 h pendant la période hivernale pour maintenir la température de consigne à 19 °C s'élève à 100. La figure 2.5 quantifie l'énergie nécessaire pour réaliser un effacement complet du système de chauffage. Pour satisfaire au critère de confort pour le créneau

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0060/these.pdf
© [J.P. Arzamendia Lopez], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

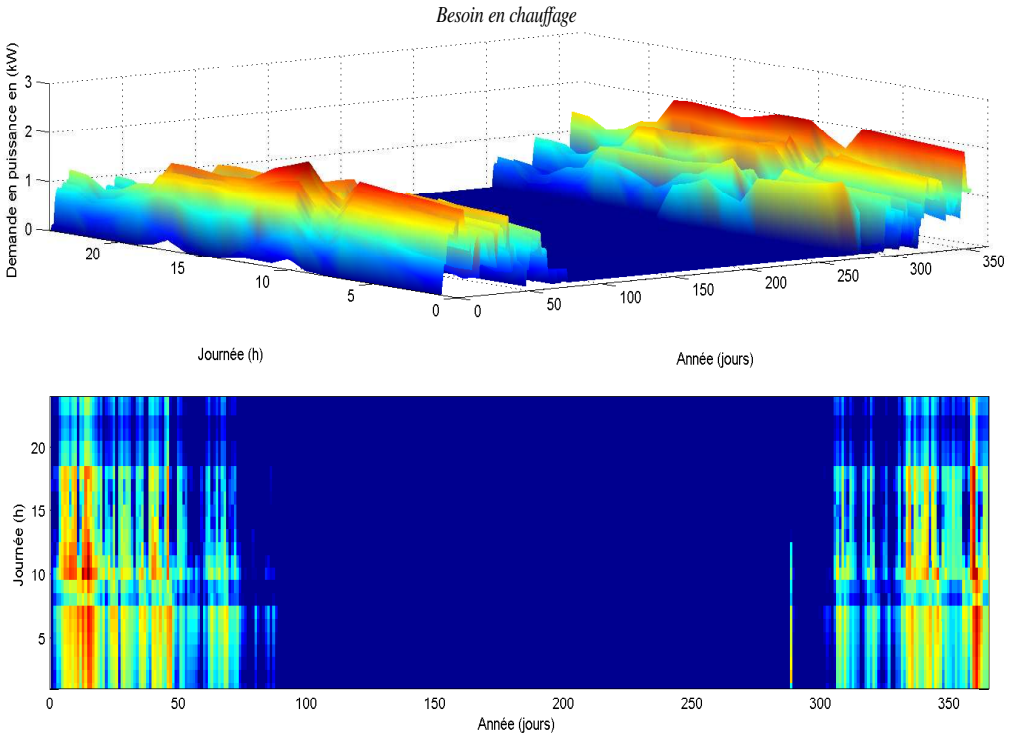


FIGURE 2.4 – Puissance nécessaire pour atteindre la température de consigne de 19 °C.

Consommation annuelle en chauffage	2305	kWh/an
Appel en puissance maximale	2	kW
Appel en puissance moyenne	0.5	kW

TABLEAU 2.2 – Principaux résultats numériques concernant le besoin en chauffage de la maison BBC

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0060/these.pdf
© [J.P. Arzamendia Lopez], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

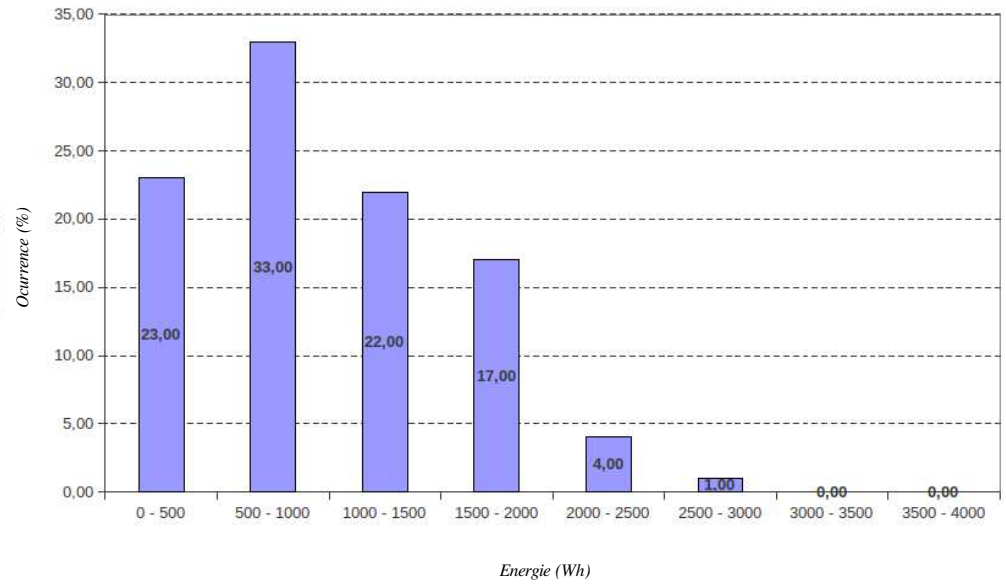


FIGURE 2.5 – Ocurrence du besoin en énergie pendant la période critique comprise entre 18h et 20h.

horaire étudié, la quantité d'énergie nécessaire pendant la période critique est de 3 kWh. Ceci implique une puissance de 1.5 kW. Néanmoins, pour assurer une réponse au critère de confort à n'importe quel moment, la stratégie retenue pour le dimensionnement du système de stockage a été définie en fonction de la puissance maximale constatée (2 kW). La quantité d'énergie stockée est donc de 4 kWh. Avec cette stratégie, le critère de confort est donc satisfait dans le créneau 18 h - 20 h.

2.3.4 Conclusion

Le travail réalisé sur la maison type a permis d'établir deux aspects importants du cahier des charges technique du système : la quantité d'énergie à stocker et la puissance de déstockage nécessaire pour satisfaire au besoin d'effacement du chauffage pendant la période critique de la courbe de charge (18 h - 20 h). La quantité d'énergie à stocker doit être de 4 kWh. En conséquence, la puissance nécessaire doit être supérieure ou égale à 2 kW pour assurer le déstockage de l'énergie emmagasinée.

2.4 Conclusions

Dans ce chapitre, une nouvelle méthodologie systématique dénommée *Top-down methodology* a été présentée. Cette méthodologie permet d'obtenir un matériau sur mesure pour la problématique posée concernant le domaine du bâtiment.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0060/these.pdf
© [J.P. Arzamendia Lopez], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

Les deux étapes principales de la méthodologie ont été présentées. La première étape consiste à relier l'échelle du bâtiment à celle du matériau équivalent homogène. Ce lien est établi en utilisant des indicateurs de performance et des outils numériques développés pour prendre en compte le phénomène de stockage par chaleur latente. L'optimisation de ces indicateurs permet d'obtenir les propriétés équivalentes homogènes optimales. La deuxième étape consiste a relier l'échelle du matériau homogène aux matériaux constituants. Les indicateurs de performance, couplés avec des lois d'homogénéisation, sont alors utilisés. Cette étude fournit le meilleur choix de matériau pour répondre à la problématique posée. L'avantage de cette méthode est le suivant : au cas où la solution proposée n'atteint pas l'objectif défini (en étant le meilleur choix), elle permet une optimisation du design *via* les indicateurs liés aux paramètres fonctionnels. Cette approche méthodologique permet d'établir un lien entre la problématique et la solution malgré les différentes échelles rencontrées lors de la recherche d'une solution optimale. La solution proposée est donc sur mesure.

La section précédente a présenté l'analyse à l'échelle de la structure pour l'obtention du cahier des charges du système de stockage par chaleur latente. Ce cahier des charges a été établi à partir des simulations dynamiques du bâtiment type choisi. Les valeurs obtenues pour un effacement complet du chauffage pendant la période de forte demande de la journée est d'une puissance d'au moins 2 kW afin de stocker 4 kWh d'énergie.

Les chapitres suivants sont consacrés à l'application de la méthodologie présentée.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0060/these.pdf
© [J.P. Arzamendia Lopez], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0060/these.pdf
© [J.P. Arzamendia Lopez], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

3 Modélisation numérique du système de stockage de chaleur

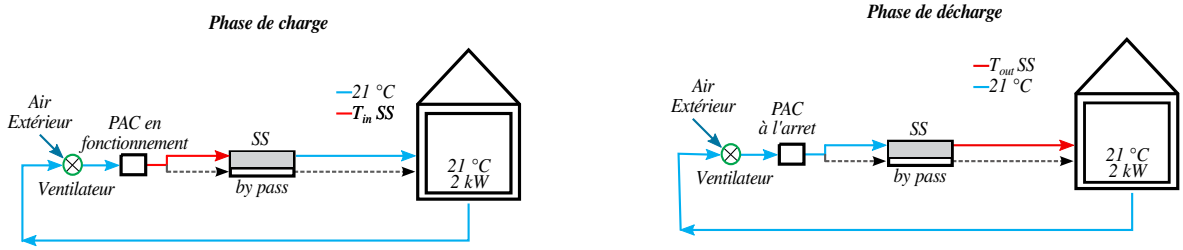
3.1 Introduction

Dans le chapitre précédent, le cahier de charges a été défini. La solution retenue pour répondre à la problématique industrielle est l'utilisation d'un système de stockage de chaleur couplé à une pompe à chaleur (PAC). Cette solution sera appelée par la suite solution système.

Dans la littérature, plusieurs types des solutions dites "systèmes" sont décrits pour le stockage de chaleur dans le domaine du bâtiment. Entre autres, le stockage solaire pour l'eau chaude sanitaire est très répandu [24, 27, 74]. Le MCP décharge la chaleur stockée de manière latente, quand l'eau commence à refroidir en dessous de la température de solidification du matériau. L'eau reste donc à une température plus élevée plus longtemps. Les MCP sont donc utilisés pour améliorer la performance du système. D'autre part, les systèmes solaires de chauffage à air ont été largement étudiés [39, 67, 96]. Ces études ont mis en évidence le point de transformation comme paramètre de sélection. Aussi, la compacité du système est favorisée grâce à l'utilisation des MCP.

Notre cas détude concerne plus précisement les systèmes actifs stockant l'énergie électrique pendant des périodes creuses pour la restituer pendant les pics de demande électrique. Ces systèmes ont été étudiés non seulement pour le chauffage pendant l'hiver [35, 44], mais aussi pour la climatisation pendant la période d'été [9, 85, 86]. Dans le premier cas, pendant les périodes hors pics, l'air chauffé par l'intermédiaire d'un système électrique (exemple: une PAC) traverse l'échangeur contenant des MCP pour stocker de l'énergie. Cette énergie est alors restituée pendant la période de forte demande pour chauffer le bâtiment et ainsi réduire la demande en chauffage (figure 3.1). Dans le deuxième cas, l'air intérieur passe par l'unité de stockage pour son refroidissement. Ceci entraîne un déphasage entre le moment où la température intérieure doit être rafraîchie et le moment de

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0060/these.pdf
© [J.P. Arzamendia Lopez], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés



(a) Processus de charge. Fonctionnement de l'unité de stockage pendant les périodes hors pics.

(b) Processus de décharge. Fonctionnement de l'unité de stockage pendant les pic d'appel en puissance.

FIGURE 3.1 – Principe de fonctionnement d'un système de stockage air/MCP pour l'effacement des pics d'appel en puissance en hiver.

déclenchement de la climatisation. Le pic de demande est alors déphasé. De manière générale, plusieurs MCP ont été testés avec de résultats positifs. Néanmoins, des améliorations ont été envisagées. La conductivité des MCP étant faible, intuitivement, les recherches se sont centrées sur l'amélioration de la conductivité équivalente des matériaux stockeurs [38, 37, 52, 65, 95]. Des composites contenant du MCP, avec des matrices métalliques par exemple, ont été testés comme solution pour l'amélioration de la conductivité équivalente [3, 45].

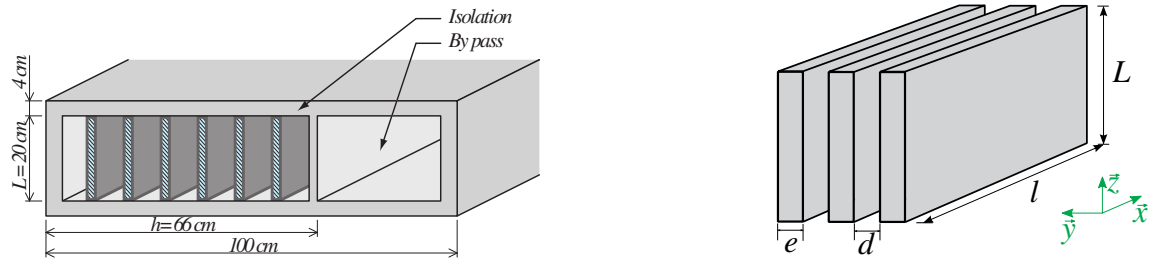
L'objectif de cette thèse n'est pas de refaire les études de la bibliographie mais de fournir des outils méthodologiques facilement utilisables pour la sélection de matériaux pour le système de stockage étudié. Pour ce faire, un modèle numérique prenant en compte le phénomène de changement de phase a été développé. Ce chapitre présente ce modèle numérique qui sera utilisé par la suite pour l'étude du système.

3.2 Intégration du système de stockage au bâtiment

Le système de stockage proposé est positionné en sortie de la conduite de ventilation d'une pompe à chaleur (PAC). Un by-pass (diviseur de flux) est utilisé pour l'activation ou la non activation du système de stockage (figure 3.2a - partie droite du système). Lors de la décharge, le by-pass est fermé et le flux d'air provenant de la pompe à chaleur à l'arrêt passe par le système de stockage. Pendant cette phase, l'air entrant est à une température inférieure à celle de la température de fusion afin de favoriser le phénomène de solidification. La chaleur stockée dans le matériau est alors restituée à l'air passant par la conduite.

Le problème consiste à modéliser la phase de décharge d'un système de stockage de chaleur. Ce système est composé de plaques composites ou hybrides contenant des ma-

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0060/these.pdf
© [J.P. Arzamendia Lopez], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés



(a) Système de stockage d'énergie du type rack (b) Zoom sur les plaques

FIGURE 3.2 – Le système d'étude

tériaux à changement de phase positionnées verticalement et parallèlement les unes aux autres (figure 3.2a - partie gauche du système).

Le système sera dimensionné afin que la décharge se déroule sur une période de 2 h. L'idée étant d'utiliser cette énergie stockée pendant les périodes de pointe, c'est-à-dire, à la fin de la journée, entre 18 h et 20 h

Les principales tâches développées dans ce chapitre concernent :

— un état de l'art sur les modèles numériques et les expériences concernant les systèmes de stockage latent ;
— la modélisation mathématique du transfert de chaleur à l'intérieur de l'unité de stockage ;
— la modélisation numérique du système de stockage latent ;
— la vérification et validation du modèle par comparaison avec un cas de la littérature et des résultats expérimentaux.

3.3 Étude bibliographique

3.3.1 Modèles numériques

Dans la littérature, des modèles simples d'échangeurs thermiques contenant des MCP existent, ils sont analytiques [32], semi-analytiques [89] ou empiriques [60]. Cependant, l'évaluation et le choix d'une solution technique nécessite un modèle numérique détaillé.

Un modèle d'échangeur simplifié négligeant la conduction à l'intérieur des plaques composites est proposé par Hed et Bellander [46]. Dans ce modèle, la discrétisation des équations qui gouvernent le problème est réalisée par différences finies et le schéma de résolution de ces équations différentielles est explicite. D'autre part, dans le modèle présenté par Rostamizadeh et al. [76], la conduction à l'intérieur de la plaque contenant du MCP est considérée unidirectionnelle dans le sens du flux d'air. Ces modèles sont valables dans le cas d'un nombre de *Biot* faible. Le gradient de température à l'intérieur de la plaque

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0060/these.pdf
© [J.P. Arzamendia Lopez], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

composite sera insignifiant et l'hypothèse d'une température uniforme suivant l'épaisseur de la plaque est donc raisonnable. Dans le cas d'un nombre de *Biot* élevé, cas fréquent pour des conductivités thermiques faibles, une prédiction précise est obtenue seulement si la conduction est aussi modélisée suivant l'épaisseur de la plaque composite contenant du MCP.

Des modèles prenant en compte la conduction 2D à l'intérieur de la plaque architecturée existent, comme présenté par Halawa et al.[43] ou Mossaffa et al. [68]. Le premier modèle 2D est résolu avec un schéma implicite. Le changement de phase est pris en compte *via* la méthode enthalpique par différences finies, mais, uniquement les termes de convection et advection sont considérés dans l'équation du bilan énergétique dans le flux d'air. Le deuxième modèle a pris en compte le changement de phase par la méthode de la capacité calorifique équivalente mais la conduction à l'intérieur de la plaque n'est pas modélisée.

Enfin, il est constaté dans la littérature une faible quantité d'information concernant le schéma en temps pour la résolution des équations différentielles. Contrairement à ce qui est affirmé par Waqas et Din [91], le schéma implicite n'est pas inconditionnellement stable à cause des non linéarités présentes [58].

Par la suite, dans la section 3.3.2, un état de l'art sur les expériences concernant les systèmes actifs air/MCP est réalisé.

3.3.2 Expériences

Pour une validation du modèle numérique, des conditions expérimentales en laboratoire sont essentielles. Dans le tableau 3.1, une synthèse des données expérimentales disponibles sur des expériences réalisées en laboratoire est présentée. Pour une meilleure compréhension de ces expériences, les données suivantes ont été collectées :

- les dimensions du système $(L \times l \times h)$;
- l'épaisseur des plaques (e) et des lames d'air (d) ;
- la quantité en masse (m) de MCP ;
- le débit d'air (Q_v) passant par l'unité de stockage ;
- et le nombre de Biot : $Bi = \frac{h(e/2)}{\lambda}$.

La première constatation réalisée est la faible quantité des données disponibles sur les systèmes de stockage contenant des MCP. La seconde constatation est que, pour les études en question, certaines propriétés importantes ne sont pas données et/ou leurs incertitudes sont omises (les incertitudes jouent un rôle important pendant la phase de validation [31]). La troisième et dernière constatation concerne le nombre de *Biot* qui est inférieur ou égal à 1 dans les études expérimentales de la littérature. Des données expérimentales obtenuess à partir d'une unité de stockage avec un nombre de Biot supérieur à 1 sont nécessaires pour deux raisons : la première raison est que ce type de configuration permet la compréhension de l'influence du gradient de température à l'intérieur de la plaque architecturée sur les

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0060/these.pdf
© [J.P. Arzamendia Lopez], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

Référence	Volume	e	d	m	Q_v	Bi
[-]	(m^3)	(mm)	(mm)	(kg)	(m^3/h)	[-]
[30]	In	10	10	135	675-1550	In
[46]	$0.48 \times 0.48 \times In$	8	8	20	223.2	0.25*
[60]	In	In	In	In	In	In
[93]	In	15 ou 25	In	3	100-150	1
[88]	0.0063-0.0076	5	5	4.7-6.05	238-604	0.3 - 0.6*

TABLEAU 3.1 – Expériences réalisées en laboratoire sur une unité de stockage contenant du *MCP* (In : Inconnue ; * : évalué).

processus de charge et décharge ; la deuxième raison est que ces données sont nécessaires pour la validation des modèles numériques.

Dans la section suivante (section 3.4), le modèle numérique développé au cours de cette thèse sera présenté. Dans un premier temps, le problème à étudier et les hypothèses sont rappelées (partie 3.4.1). Ensuite, la formulation mathématique du problème (partie 3.4.3) et la résolution numérique sont présentées (partie 3.4.4).

3.4 Modèle numérique

3.4.1 Présentation du problème

Le système de stockage est conçu de façon à être installé dans un couloir au niveau du plafond. Le débit d'air entrant est fixé par la PAC et aura dans ce cas d'étude une valeur de 600 m^3/h. La puissance de décharge est donnée par :

$$P = \dot{Q}_v \rho_a C_a (T_{out} - T_{in}) \tag{3.1}$$

$\dot{Q}_v$ étant le débit volumique d'air du système. La contrainte du système établie par le cahier de charges est une puissance de 2 kW. Le système de stockage doit donc être en mesure d'assurer une puissance de décharge supérieure ou égale à 2 kW pendant 2 h, c'est-à-dire, pendant toute la durée de décharge.

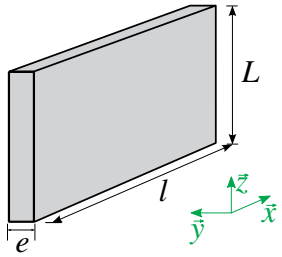
3.4.2 Hypothèses

Les hypothèses prises pour la modélisation du système de stockage sont citées dans les lignes qui suivent.

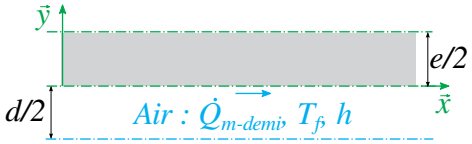
— le transfert de chaleur est réduit uniquement au plan ($\overrightarrow{x}$, $\overrightarrow{y}$). Le problème est considéré comme 2D :

1. Pas de conduction suivant l'axe $\overrightarrow{z}$ dans les plaques.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0060/these.pdf
© [J.P. Arzamendia Lopez], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés



(a) Une plaque du sytème



(b) Volume élémentaire d'étude

FIGURE 3.3 – Étude de la demi-plaque composite grâce aux symétries

2. effets de bords négligés (le système est isolé en $z = 0$ et $z = L$)

— le système global est réduit à l'étude d'une demi plaque composite + un demi canal d'air grâce aux symétries présentes (figure 3.3) ;
— le système étudié est considéré comme isolé, les pertes de chaleur avec l'extérieur sont négligées ;
— le phénomène de conduction est dominant dans la plaque architecturée pendant le transfert de chaleur ;
— le transfert radiatif entre les plaques est négligeable ;
— on considère une plaque architecturée contenant du MCP, équivalente à un milieu homogène ;
— pour le matériau à changement de phase et le conteneur :

1. la masse volumique, la conductivité, et la chaleur spécifique sont supposées constantes et indépendantes de la température ;

2. l'enthalpie est fonction de la température ($h = f(T)$) avec f continue et dérivable.

Le changement de phase est modélisé en utilisant la méthode de la capacité calorifique équivalente [40, 49, 66]. Cette méthode implique que la capacité calorifique doit inclure de manière apparente la chaleur latente. Ainsi, la fonction de la capacité calorifique effective doit augmenter et diminuer fortement avec un pic apparent lorsque le matériau est soumis au changement de phase. La chaleur latente est alors égale à l'intégrale de la capacité calorifique sur cette plage de température.

Pour prendre en compte le pic apparent dû au changement de phase, la courbe de la capacité calorifique est de type gaussienne (figure 3.4). Mathématiquement, cela se traduit par :

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0060/these.pdf
© [J.P. Arzamendia Lopez], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

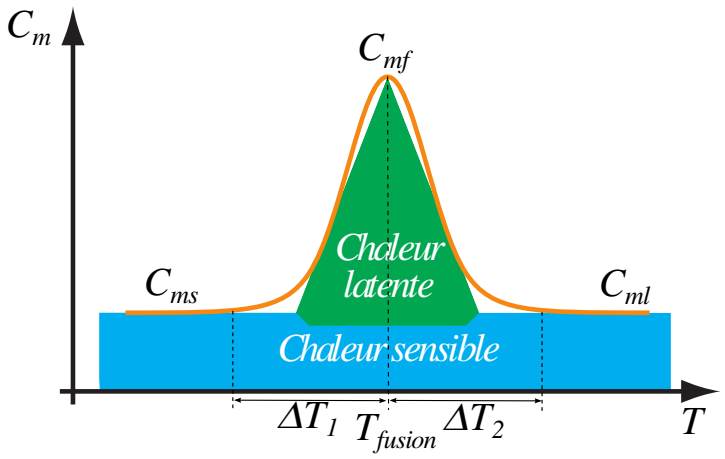


FIGURE 3.4 – Allure de la courbe de la capacité calorifique équivalente

si $T < T_{fusion}$, alors

$$C_m(T) = C_{ms} + (C_{mf} - C_{ms}) \cdot exp\left[-\left(\frac{T_{fusion} - T}{\Delta T_1}\right)^2\right] \tag{3.2}$$

si $T > T_{fusion}$, alors

$$C_m(T) = C_{ml} + (C_{mf} - C_{ml}) \cdot exp\left[-\left(\frac{T_{fusion} - T}{\Delta T_2}\right)^2\right] \tag{3.3}$$

La chaleur latente est alors :

$$H = \frac{\sqrt{\pi}}{2}\left[\Delta T_1 \left(C_{mf} - C_{ms}\right) + \Delta T_2 \left(C_{mf} - C_{ml}\right)\right] \tag{3.4}$$

3.4.3 Formulation mathématique

Conservation de l'énergie dans la plaque contenant du MCP

La conservation de l'énergie dans la plaque architecturée contenant du MCP est donnée par :

$$\frac{\partial(\rho h)}{\partial t} = -div(\overrightarrow{\varphi}) \tag{3.5}$$

où ρh est l'enthalpie volumique [J m^{-3}] et $\overrightarrow{\varphi}$ la densité de flux de chaleur par conduction [W m^{-2}]. La densité de flux de chaleur par conduction est liée à la température de la plaque *via* la loi de Fourier :

$$\overrightarrow{\varphi} = -\lambda.\overrightarrow{grad(T)} \tag{3.6}$$

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0060/these.pdf
© [J.P. Arzamendia Lopez], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

si $\rho h(T)$ est continue et dérivable, ρC peut être définie comme la capacité calorifique volumique effective par :

$$\rho C(T) = \frac{\partial(\rho h)}{\partial T} \tag{3.7}$$

L'équation devient alors :

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} = -div(\overrightarrow{\varphi}) \tag{3.8}$$

Conservation de l'énergie dans le débit d'air

Le traitement de la conservation de l'énergie dans le débit d'air requiert en plus les hypothèses suivantes :

— la chaleur visqueuse, la pression et les forces extérieures sont négligées dans la conservation d'énergie ;
— l'air est considéré sec, incompressible et avec une capacité calorifique constante ;
— l'évolution de l'énergie interne est négligée (par rapport aux termes d'advection et diffusion) ;
— la vitesse est uniforme dans une section normal à l'axe $\overrightarrow{x}$.

La conservation de l'énergie dans la lame d'air est donnée par :

$$div(\rho_a C_a T_a \overrightarrow{v}) + div(\overrightarrow{\varphi_a}) = 0 \tag{3.9}$$

où $\overrightarrow{\varphi_a}$ est le flux de chaleur de conduction dans le flux d'air, lié à la température d'air *via* la loi de *Fourier* :

$$\overrightarrow{\varphi_a} = -\lambda_a \overrightarrow{grad(T_a)} \tag{3.10}$$

Conditions initiales, conditions aux limites et continuité air/MCP

La condition initiale dans la plaque composite est :

$$T(x, y, t = 0) = T_0 \tag{3.11}$$

La condition initiale dans le flux d'air est :

$$T_a(x, y, t = 0) = T_0 \tag{3.12}$$

Les conditions aux limites dans la plaque composite sont :

1. la symétrie de la plaque composite permet d'imposer une condition limite adiaba-

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0060/these.pdf
© [J.P. Arzamendia Lopez], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

tique en $y = e/2$

$$\overrightarrow{\varphi}.\overrightarrow{n} = 0 \tag{3.13}$$

2. les surfaces latérales sont à température uniforme :

$$\forall y \left| \begin{array}{l} T_m(x = l, y) = T_{out} \\ T_m(x = 0, y) = T_{in} \end{array} \right. \tag{3.14}$$

Les conditions limites dans le flux d'air sont :

Surfaces latérales

$$\begin{array}{l} T_m(x = l, y) = T_{out} \\ T_m(x = 0, y) = T_{in} \end{array} \tag{3.15}$$

La continuité du flux de chaleur à l'interface air/MCP donne :

Interface en $y = 0$

$$\overrightarrow{\varphi}.\overrightarrow{n} = h_c(T_s - T_a) \tag{3.16}$$

3.4.4 Méthodes numériques

La méthode de résolution par volumes finis sera utilisée par la suite (pour plus d'informations sur cette méthode, on pourra se reporter par exemple à la référence [72]). Le principal avantage de cette méthode est que la solution obtenue implique que la conservation de la masse, de la quantité de mouvement et de l'énergie sont satisfaites sur n'importe quel élément de volume de contrôle, donc sur le domaine de calcul entier.

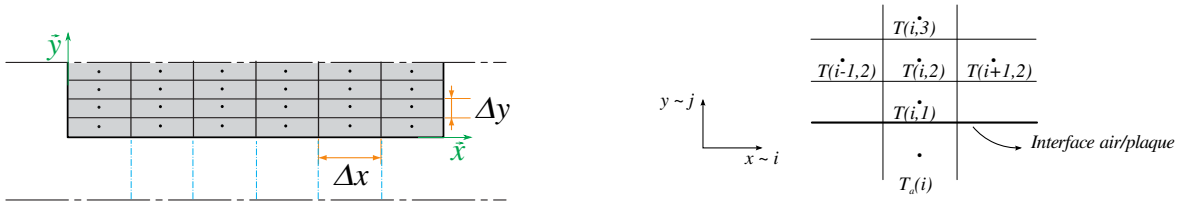
L'espace est divisé en sous-domaines dénommés volumes de contrôle $(\Delta x, \Delta y)$. Les indices (i, j) donnent la position spatiale du centre du volume de contrôle dans la plaque architecturée ou i dans la lame d'air.

Discrétisation de l'équation de conservation de l'énergie dans la plaque architecturée contenant du MCP

L'intégration de l'équation 3.8 sur le volume de contrôle (i, j) conduit à :

$$\iiint_V \rho C \frac{\partial T}{\partial t} \, \mathrm{d}x\mathrm{d}y\mathrm{d}z = - \iiint_V div(\overrightarrow{\varphi}) \, \mathrm{d}x\mathrm{d}y\mathrm{d}z \tag{3.17}$$

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0060/these.pdf
© [J.P. Arzamendia Lopez], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés



(a) Discrétisation spatiale

(b) Zoom sur un volume d'étude

FIGURE 3.5 – Discrétisation par volumes finis

en appliquant le théorème de Green - Ostrogradski, on obtient :

$$\iiint_V div(\overrightarrow{\varphi})\,\mathrm{d}x\mathrm{d}y\mathrm{d}z = \oiint_S \overrightarrow{\varphi}\,\overrightarrow{\mathrm{d}S} \tag{3.18}$$

où,

$$\iiint_V \rho C\frac{\partial T}{\partial t}\,\mathrm{d}x\mathrm{d}y\mathrm{d}z = \Delta x\Delta y\rho C\frac{\partial T(i,j)}{\partial t} \tag{3.19}$$

et aussi :

$$-\oiint_S \overrightarrow{\varphi}\,\overrightarrow{\mathrm{d}S} = \frac{\partial \varphi_x}{\partial x}\Delta y + \frac{\partial \varphi_y}{\partial y}\Delta x \tag{3.20}$$

$$-\oiint_S \overrightarrow{\varphi}\,\overrightarrow{\mathrm{d}S} = (\varphi_{x-1/2} - \varphi_{x+1/2})\Delta y + (\varphi_{y-1/2} - \varphi_{y+1/2})\Delta x \tag{3.21}$$

Les densités de flux de chaleur $\varphi_{x-1/2}$ et $\varphi_{x+1/2}$ sont évaluées aux surfaces verticales situées à $x-1/2$ et $x+1/2$ respectivement. Dans la plaque, ce flux est donné par :

$$\varphi_x(i+1/2,j) = \frac{T(i+1,j)-T(i,j)}{R_{i+1,i}} \tag{3.22}$$

$$\varphi_x(i-1/2,j) = \frac{T(i-1,j)-T(i,j)}{R_{i-1,i}} \tag{3.23}$$

Les résistances thermiques $R_{i-1,i}$ et $R_{i+1,i}$ sont calculées en supposant des résistances

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0060/these.pdf
© [J.P. Arzamendia Lopez], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

en série :

$$R_{i-1,i} = \frac{\Delta x}{2\lambda(T(i-1,j))} + \frac{\Delta x}{2\lambda(T(i,j))} \tag{3.24}$$

$$R_{i+1,i} = \frac{\Delta x}{2\lambda(T(i+1,j))} + \frac{\Delta x}{2\lambda(T(i,j))} \tag{3.25}$$

La forme finale de l'équation de la conservation de l'énergie discretisée pour la plaque composite est donnée par :

$$\frac{\partial T(i,j)}{\partial t} = \frac{1}{\Delta x \Delta y \rho C}\left[\Delta y \frac{T(i-1,j)-T(i,j)}{R_{i-1,i}} + \Delta y \frac{T(i+1,j)-T(i,j)}{R_{i+1,i}} + \right.$$
$$\left. + \Delta x \frac{T(i,j-1)-T(i,j)}{R_{j-1,j}} + \Delta x \frac{T(i,j+1)-T(i,j)}{R_{j+1,j}}\right] \tag{3.26}$$

Discrétisation de l'équation de conservation de l'énergie dans le flux d'air

L'intégration de l'équation 3.9 sur le volume de contrôle i conduit à :

$$\iiint_V div(\rho_a C_a T_a \overrightarrow{v}) + \iiint_V div(\overrightarrow{\varphi_a}) = 0 \tag{3.27}$$

en appliquant le théorème de Green - Ostrogradski, on obtient :

$$\iiint_V div(\rho_a C_a T_a \overrightarrow{v}) + \iiint_V div(\overrightarrow{\varphi_a}) = \oiint_S \rho_a C_a T \overrightarrow{v}\ \overrightarrow{\mathrm{d}S} + \oiint_S \overrightarrow{\varphi_a}\ \overrightarrow{\mathrm{d}S} = 0 \tag{3.28}$$

où

$$\oiint_S \rho_a C_a T \overrightarrow{v}\ \overrightarrow{\mathrm{d}S} = \left(\dot{h}_{x+1/2} - \dot{h}_{x-1/2}\right) d \tag{3.29}$$

Les débits enthalpiques $\dot{h}_{x-1/2}$ et $\dot{h}_{x+1/2}$ sont évalués aux surfaces verticales situées à $x-1/2$ et $x+1/2$ respectivement. Dans le flux d'air, ces flux sont donnés par :

$$d \times \dot{h}_{x-1/2} = \dot{m}_a C_a \frac{T_a(i-1) + T_a(i)}{2} \tag{3.30}$$

$$d \times \dot{h}_{x+1/2} = \dot{m}_a C_a \frac{T_a(i+1) + T_a(i)}{2} \tag{3.31}$$

où $\dot{m}_a$ est le débit massique par unité de longueur. En négligeant la conduction suivant

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0060/these.pdf
© [J.P. Arzamendia Lopez], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

l'axe $\overrightarrow{x}$, le second terme de l'équation 3.28 est donné par :

$$\iint_S \overrightarrow{\varphi_a}\,\mathrm{d}\overrightarrow{S} = \left(\varphi_{y-1/2} + \varphi_{y+1/2}\right)\Delta x \tag{3.32}$$

Les densités de flux de chaleur $\varphi_{y-1/2}$ et $\varphi_{y+1/2}$ sont évaluées aux surfaces horizontales situées à $y-1/2$ et $y+1/2$ respectivement. Le flux en $y-1/2$ est nul (plan de symétrie). Le flux en $y+1/2$ est donné par :

$$\varphi_{y+1/2} = \frac{T_a(i) - T(i,1)}{\frac{\Delta y}{2\lambda(T(i,1))} + \frac{1}{h_c}} \tag{3.33}$$

L'expression finale de l'équation de la conservation de l'énergie dans le flux d'air est donnée par :

$$\dot{m}_a C_a \frac{T_a(i+1) - T_a(i-1)}{2} + \Delta x \frac{T_a(i) - T(i,1)}{\frac{\Delta y}{2\lambda(T(i,1))} + \frac{1}{h_c}} = 0 \tag{3.34}$$

Résolution des équations algébriques différentielles

La discrétisation par volumes de contrôle des équations de conservation d'énergie dans la plaque contenant du MCP et dans le flux d'air, en plus des conditions aux limites, conduisent à un ensemble d'équations algébriques différentielles. Le système peut être écrit sous la forme :

$$\mathrm{M}(t, \overrightarrow{T}) \times \overrightarrow{T'} = \overrightarrow{f}(t, \overrightarrow{T}) \tag{3.35}$$

où M est une matrice dépendante du temps et de l'état et $\overrightarrow{T}$ le vecteur avec les températures inconnues.

Le problème est résolu sous Matlab [61] en utilisant le solveur ODE (Ordinary Differential Equations) du type 15s recommandé pour des problèmes raides. Le solveur ODE utilise les méthodes Runge - Kutta pour la résolution de l'équation différentielle, qui dans ce cas, se résume à une résolution en temps. Cette méthode est basée sur le principe d'itération, c'est-à-dire qu'une première estimation est utilisée pour calculer une deuxième estimation plus précise, et ainsi de suite jusqu'à convergence. Le solveur ODE utilisé est de l'ordre 4 - 5.

— Le vecteur des conditions initiales est fixé à 10 °C pour toutes les températures calculées.
— La tolérance relative est de 10^{-4}

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0060/these.pdf
© [J.P. Arzamendia Lopez], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

3.5 Vérification et validation du modèle

La validation du modèle numérique a été réalisée en deux temps :

1. une **vérification** du modèle numérique par comparaison à un cas de la littérature. Le cas test consiste en un système de stockage de chaleur sensible (donc, sans changement de phase) constitué de plaques de Feolite. Une solution analytique existe pour ce cas d'étude. La configuration étudiée sera décrite dans la section 3.5.1 (pour une description complète du système de stockage cf. [78], chapitre 3, page 37).
2. une **validation** par comparaison numérique/expérimentale d'un système de stockage latent constitué des plaques composites *Energain*. La configuration du système ainsi que le matériau stockeur sont décrits dans la section 3.5.2. Le système de stockage a été instrumenté au sein du laboratoire *CETHIL* [16]. La température d'air en sortie d'échangeur est le principal résultat issu de ces mesures expérimentales.

3.5.1 Comparaison à une solution analytique sans changement de phase

Le modèle numérique développé a été utilisé pour une comparaison avec une solution analytique d'un cas sans changement de phase. La configuration étudiée est composée de plaques de Feolite comme matériau stockeur (pour la solution analytique [78]). Les propriétés de ce dernier sont résumées dans le tableau 3.2. Le système est composé de 11 plaques de $5.8 \times 0.5 \times 0.08$ m^3 (longueur, largeur, épaisseur respectivement). Le nombre de lames d'air est alors de 12 et leur épaisseur est de 0.019 m. Le débit d'air est de 6156 m^3 h^{-1} et le coefficient de convection moyen est de 50.23 W m^{-2} K^{-1}. L'air entrant est à une température de 80 °C et la température initiale de la plaque est de 10 °C. Ces conditions de fonctionnement sont assez éloignées du système de stockage à étudier et permettent d'analyser le comportement du modèle numérique dans d'autres conditions. La dépendence au maillage du modèle numérique sur le résultat de la température en sortie d'échangeur à la fin d'une période de décharge de 3 h est analysée. Le résultat analytique dans ce cas est de $T_{an}(3h) = 68.52$ °C. La différence entre la température analytique et la température numérique est donnée par :

Variation du pas spatial Δx

$$E_x = |T_{an}(3h) - T_{num}(3h)| \quad (3.36)$$

Variation du pas spatial Δy

$$E_y = |T_{an}(3h) - T_{num}(3h)| \quad (3.37)$$

Le résultat de l'étude de dépendance au maillage est montré figure 3.6. La première conclusion est que, dans ce cas d'étude, la convergence est atteinte pour n'importe quelle valeur de Δy : 4 volumes de contrôle dans l'épaisseur de la plaque (suivant $\overrightarrow{y}$) suffisent. La seconde conclusion est que le modèle possède une convergence de l'ordre 2 suivant la

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0060/these.pdf
© [J.P. Arzamendia Lopez], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

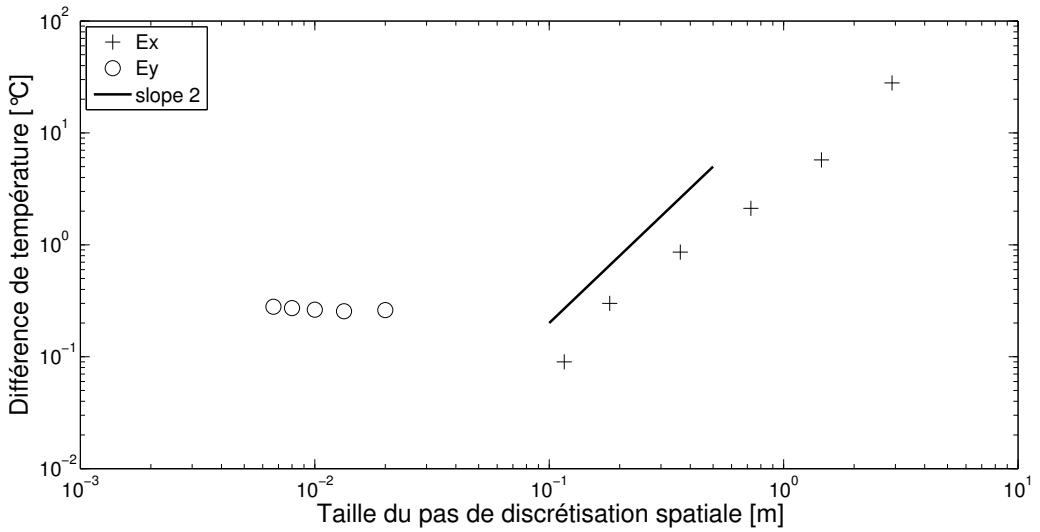


FIGURE 3.6 – Analyse de la dépendance au maillage de la discrétisation spatiale pour le cas test extrait de [78].

Propriété	Valeur	Unité
Masse volumique	3900	$\mathrm{kg\,m^{-3}}$
Conductivité	2.1	$\mathrm{W\,m^{-1}\,K^{-1}}$
Chaleur spécifique solide	0.92	$\mathrm{kJ\,kg^{-1}\,K^{-1}}$

TABLEAU 3.2 – Propriétés physiques du matériau Feolite

longueur de la plaque (suivant $\overrightarrow{x}$). La température d'air à la fin du temps de décharge (3 h) est de 68.48 °C pour le plus petit pas de discrétisation. La différence de température entre le résultat numérique et le résultat analytique (68.52 °C) est de 0.04 °C. L'erreur constatée est de 0.1 %.

Enfin, une analyse de la température adimensionelle a été réalisée. Pour cela, des abaques *Température adimensionelle vs. Temps adimensionnel* fournis dans [78] ont été utilisées. Le cas test a été légèrement modifié pour obtenir une longueur adimensionnelle de 2 et ainsi faciliter la comparaison (le cas test a une longueur adimensionnelle de 1.87). La figure 3.7 permet de constater la bonne concordance de la température adimensionnelle par rapport au cas analytique. L'écart entre le modèle numérique et l'abaque est de 2.1 %.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0060/these.pdf
© [J.P. Arzamendia Lopez], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

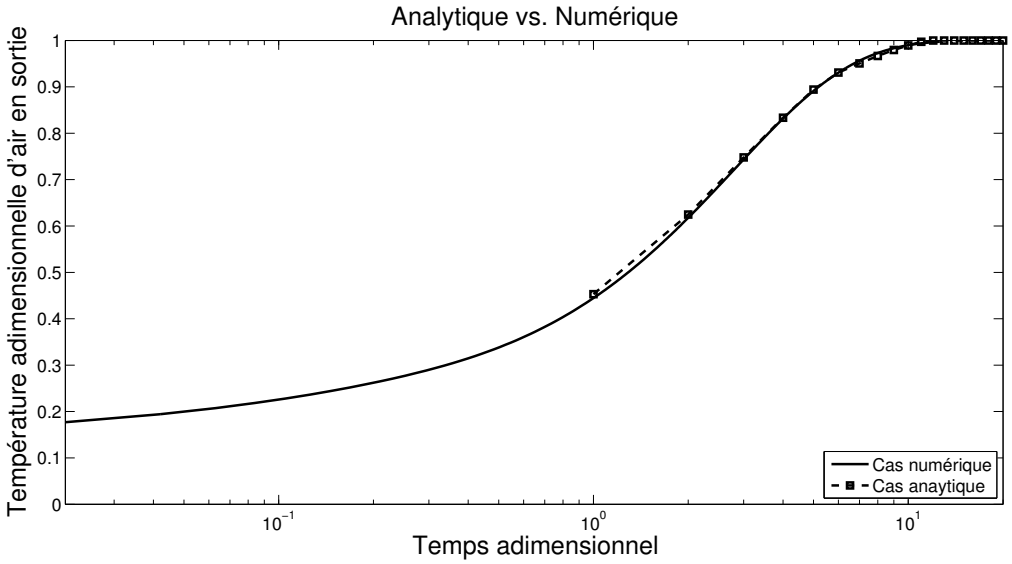


FIGURE 3.7 – Température d'air adimensionnelle en sortie du système. Le résultat numérique est supperposé à la courbe analytique pour une longueur adimensionnelle égale à 2.

3.5.2 Comparaison à un cas expérimental avec changement de phase

Description du banc expérimental

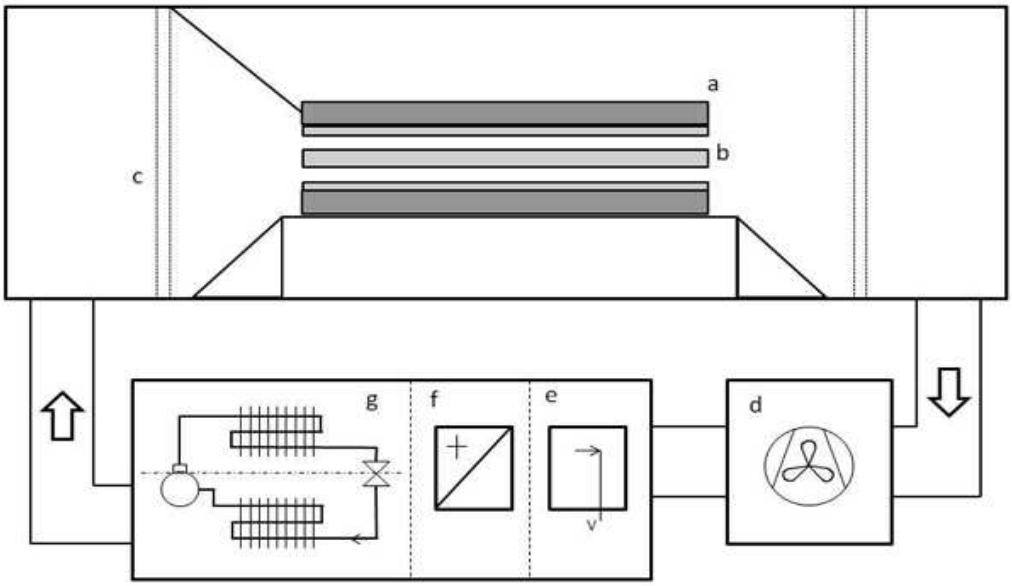
Un banc expérimental a été développé au *CETHIL* [16]. Une comparaison avec les résultats issus des mesures expérimentales est réalisée. Le schéma 3.8 montre le principe du banc. Une unité de traitement d'air est utilisée pour le contrôle dynamique du débit, de la température et de l'humidité d'air (référencés d,e,f et g ; figure 3.8). Les principales caractéristiques de cette unité sont :

— Débit d'air : 150 m^3/h - 2000 m^3/h. Précision : ± 10 m^3/h.
— Température d'air : 0 °C- 40 °C. Précision : ± 1 °C.
— Taux d'humidité d'air : 30 % - 70 %. Précision : ± 5 %.

Le débit d'air de l'unité de traitement passe à travers un convergent et une grille (référencé c, figure 3.8) afin de produire un flux d'air uniforme en entrée de l'échangeur. Le flux d'air contrôlé est utilisé pour évaluer le processus de stockage et de décharge du prototype de stockage latent (références a et b, figure 3.8).

Le prototype de stockage latent évalué est décrit figure 3.9. Le système testé possède les dimensions suivantes : $0.096 \times 1.2 \times 1.2$ m^3 (épaisseur, largeur, longueur respectivement). À l'intérieur, la lame d'air a une épaisseur de 0.018 m et les plaques composites contenant de MCP ont une épaisseur de 0.03m. Ces plaques utilisent comme matériau stockeur le produit commercial *Energain*, produit par *Dupont de Nemours* (pour plus d'informations

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0060/these.pdf
© [J.P. Arzamendia Lopez], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés



a:Isolation, b : MCP, c : convergent, d : ventilateur, e : humidificateur, f : chauffage et g : climatisation

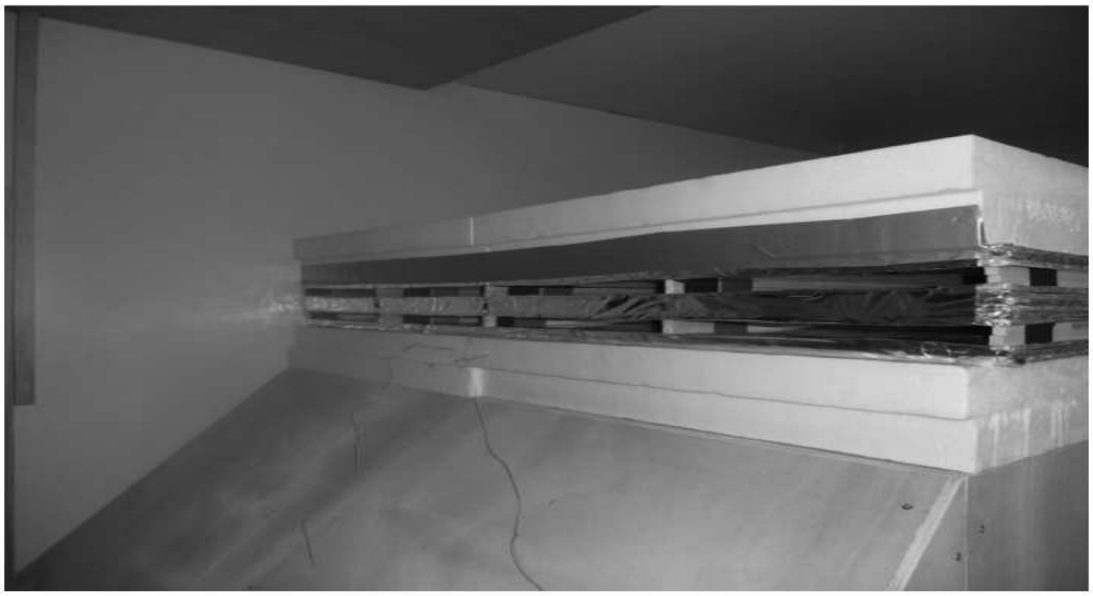
FIGURE 3.8 – Schéma du banc expérimental développé au *CETHIL*

sur ce produit [56]). Les propriétés physiques de ce produit ont été étudiées par le *CSTB* et par le *GREA* (Groupe de recherche à l'Université de Lleida, Espagne) et sont résumées dans le tableau 3.3 [55, 56]. Pour ce produit, une hystérésis importante est présente lors du changement de phase. Pour prendre en compte ce phénomène lors de la validation du modèle numérique, la capacité calorifique équivalente est spécifique à chaque sens de transformation (solidification ou fusion) et en accord avec les résultats expérimentaux trouvés par ces deux instituts. Afin de simuler les plans de symétrie du système de stockage (flux de chaleur nul à travers les plans de symétrie), deux couches d'isolant de 10 cm d'épaisseur aux extrémités supérieure et inférieure du prototype sont installées. Le nombre de *Biot* associé à ce prototype est de 1.3.

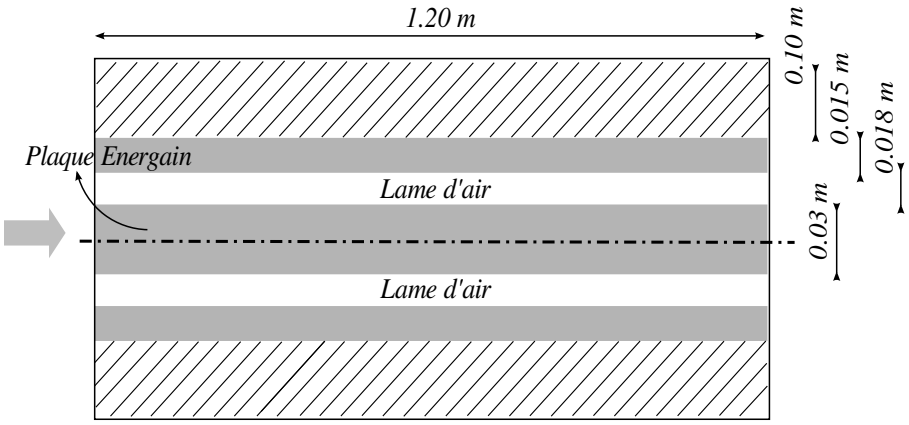
Les températures d'air en entrée et en sortie sont mesurées avec des thermocouples de type k. Ces thermocouples possèdent une précision de $\pm$ 0.4 °C. La fréquence de mesure est de 1/600 Hz. D'autre part, la température d'air en entrée est utilisée comme condition limite pour le modèle numérique. La période de charge ou décharge pour ce cas expérimental est de 10 h. Enfin, le coefficient de convection est calculé en utilisant la corrélation de *Colburn* pour des écoulements internes turbulents [14].

Premièrement, une analyse de la convergence des résultats est réalisée. Le critère de convergence choisi pour l'étude de la dépendance au maillage est la température en sortie

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0060/these.pdf
© [J.P. Arzamendia Lopez], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés



(a) Photo du prototype de stockage latent dans le banc expérimental



(b) Dimensions du prototype évalué

FIGURE 3.9 – Description du prototype de stockage latent évalué

Propriétés	Décharge	Charge	Unité
Masse volumique	920	920	$\mathrm{kg\,m^{-3}}$
Conductivité	0.22	0.22	$\mathrm{W\,m^{-1}\,K^{-1}}$
Chaleur spécifique solide	2.9	2.2	$\mathrm{kJ\,kg^{-1}\,K^{-1}}$
Chaleur spécifique liquide	2	2.1	$\mathrm{kJ\,kg^{-1}\,K^{-1}}$
T fusion	18	26	°C
Chaleur latente	70	100	$\mathrm{kJ\,kg^{-1}}$

TABLEAU 3.3 – Propriétés physiques du produit Energain

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0060/these.pdf
© [J.P. Arzamendia Lopez], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

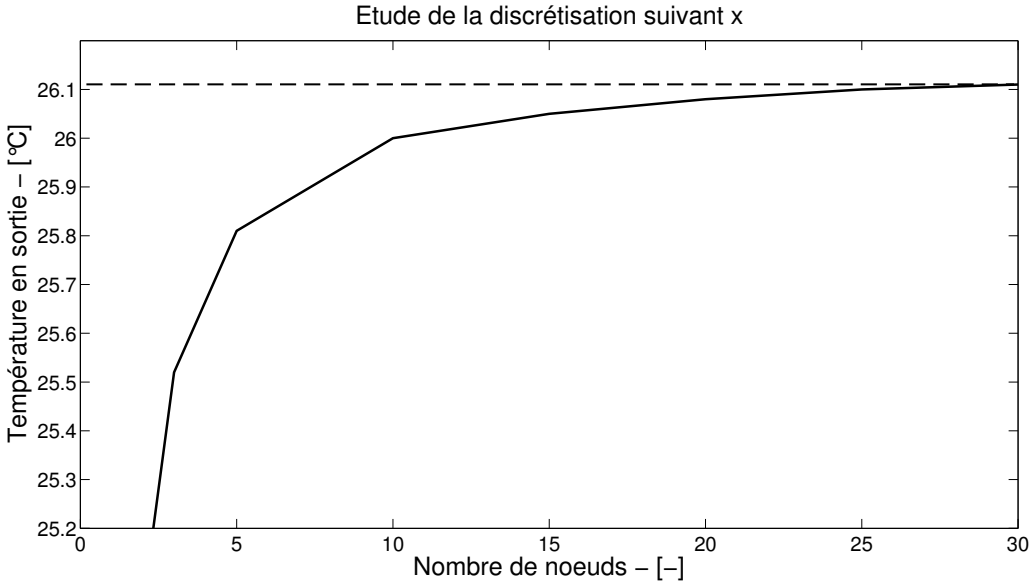


FIGURE 3.10 – Étude de convergence suivant x

d'échangeur à la fin de la phase de décharge (10 h). Les figures 3.10 et 3.11 montrent l'influence du nombre de nœuds sur la convergence du modèle selon $\overrightarrow{x}$ et $\overrightarrow{y}$. Le choix du nombre des nœuds suivant chaque axe est fait en prenant en compte le temps de calcul numérique (figure 3.12) ; un bon compromis précision/temps de calcul est alors trouvé pour un nombre de nœuds de 15 suivant $\overrightarrow{x}$ et un nombre de nœuds de 10 suivant $\overrightarrow{y}$ (pour un total de 150 nœuds) pour le cas d'étude expérimental, ce qui correspond à un pas d'espace de 0.6 mm suivant l'épaisseur et 12 cm suivant la longueur. En outre, les figures 3.13 et 3.14 montrent la convergence du système pour la température en sortie pour toute la phase de charge ou décharge.

Deux séries de données expérimentales ont été utilisées pour la validation.

⇒ 1^{er} cas : le débit d'air dans l'unité de stockage est de 240 m^3/h :

— processus de stockage de chaleur : après 10 h à 5 °C la température d'air en entrée augmente jusqu'à atteindre 35 °C (figure 3.15).

— processus de décharge de chaleur : après 10 h à 35 °C, la température d'air en entrée diminue jusqu'à atteindre 5 °C (figure 3.16).

⇒ 2^{eme} cas : le débit d'air dans l'unité de stockage est de 330 m^3/h :

— processus de stockage de chaleur : après 10 h à 5 °C, la température d'air en entrée augmente jusqu'à atteindre 30 °C (figure 3.17).

— processus de décharge de chaleur : après 10 h à 30 °C, la température d'air en entrée diminue jusqu'à atteindre 5 °C (figure 3.18).

Les figures 3.15 à 3.18 montrent la comparaison entre la température expérimentale d'air en sortie et les résultats du modèle numérique pour les processus de stockage et décharge dans les deux cas de figure. Qualitativement, les résultats numériques sont en

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0060/these.pdf
© [J.P. Arzamendia Lopez], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

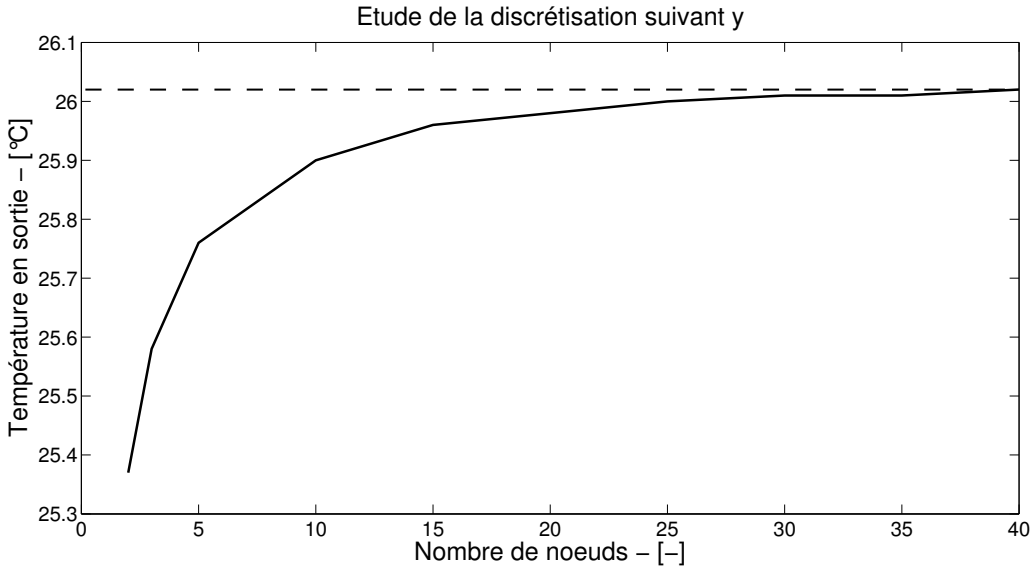


FIGURE 3.11 – Étude de convergence suivant y

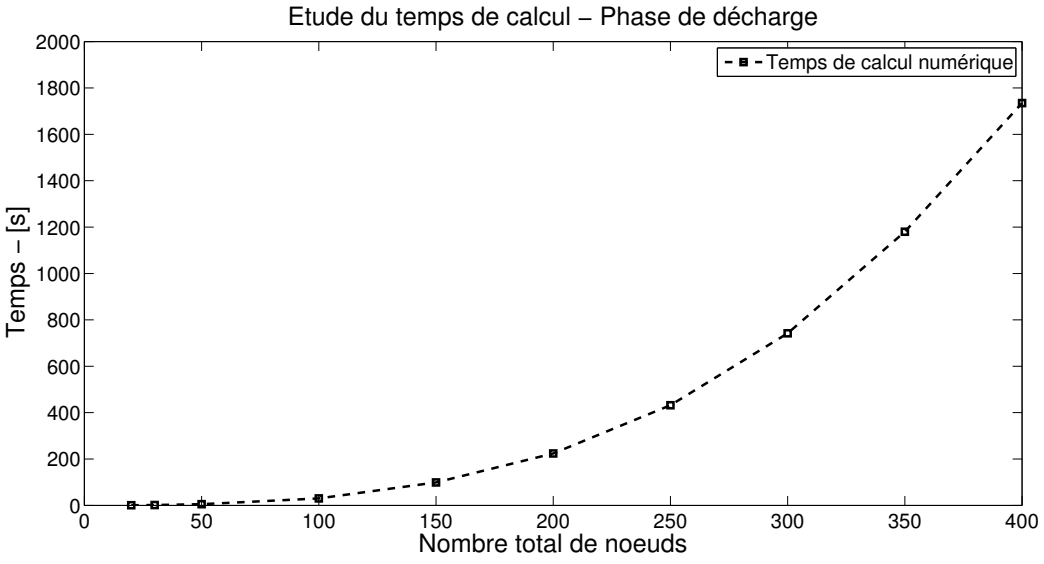


FIGURE 3.12 – Etude du temps de calcul numérique du sytème

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0060/these.pdf
© [J.P. Arzamendia Lopez], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

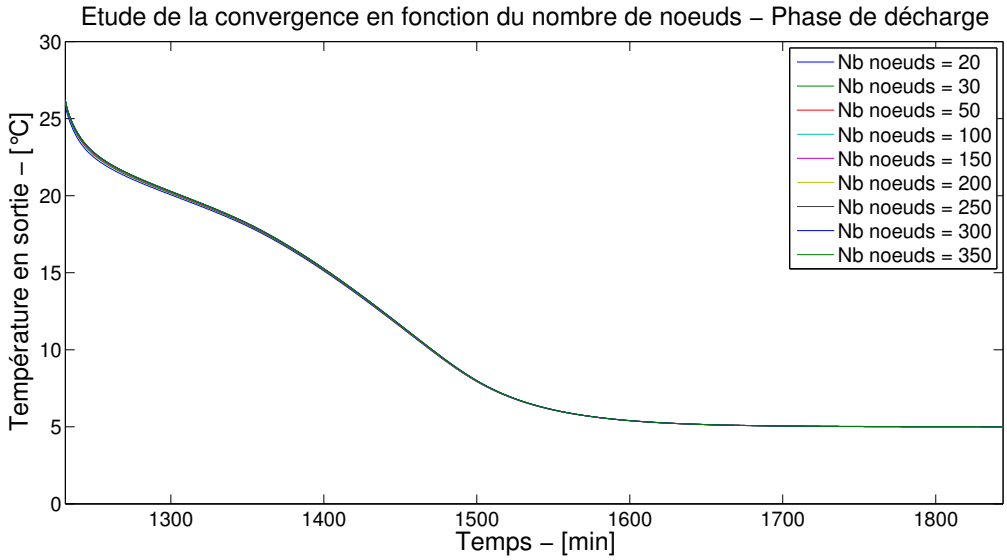


FIGURE 3.13 – Température en sortie en fonction du nombre de nœuds. Les écarts les plus importants apparaissent au début de la phase de décharge.

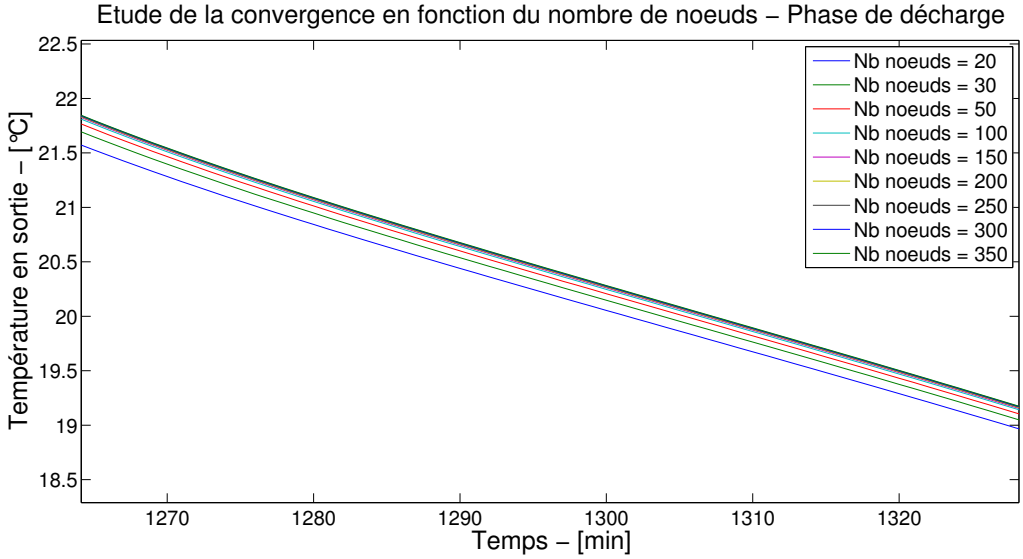


FIGURE 3.14 – Zoom sur la plage de changement de phase. Une bonne convergence des résultats est constatée à partir de 150 nœuds au total.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0060/these.pdf
© [J.P. Arzamendia Lopez], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

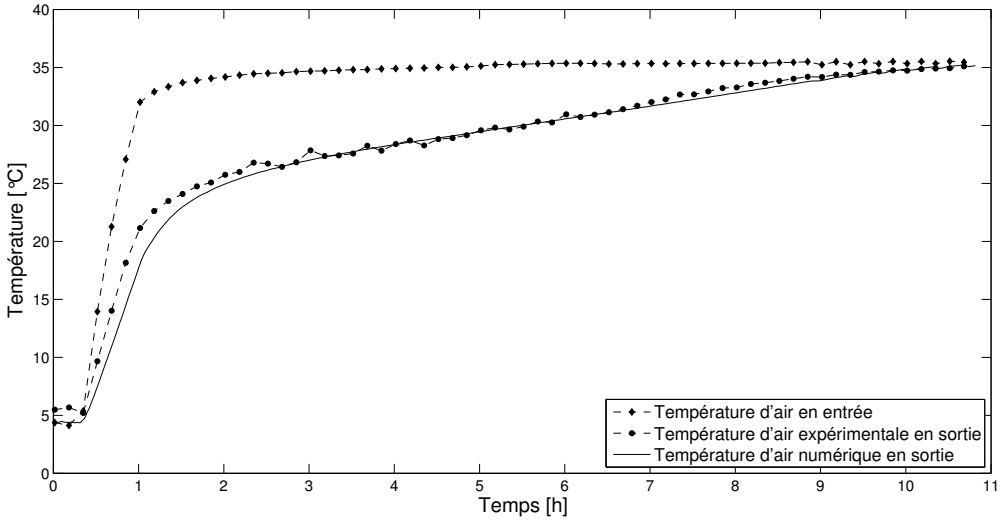


FIGURE 3.15 – Validation du modèle numérique pour la phase de charge

concordance avec les mesures expérimentales même dans le cas d'une température d'air en entrée instable (figure 3.18). Quantitativement, les comparaisons donnent :

1. Pour le processus de stockage de chaleur :
   - 1^{er} cas : $||T_{exp} - T_{num}||_2 = 0.90$ °C équivalent à un écart 3 % pour une différence de température d'air entrée/sortie de 30 °C.
   - 2^{eme} cas : $||T_{exp} - T_{num}||_2 = 0.72$ °C équivalent à un écart 2.9 % pour une différence de température d'air entrée/sortie de 25 °C.
2. Pour le processus de décharge de chaleur :
   - 1^{er} cas : $||T_{exp} - T_{num}||_2 = 0.78$ °C équivalent à un écart 2.6 % pour une différence de température d'air entrée/sortie de 30 °C.
   - 2^{eme} cas : $||T_{exp} - T_{num}||_2 = 0.92$ °C équivalent à un écart 3.7 % pour une différence de température d'air entrée/sortie de 25 °C.

Cette concordance entre expérimentation et simulation permet de valider les hypothèses prises pour le modèle numérique.

3.6 Conclusion

L'objectif de ce chapitre a été de présenter le modèle numérique du sytème de stockage latent développé au cours de cette thèse. Cet outil nous permettra d'évaluer, dans le chapitre suivant, la performance de ce système vis à vis de notre cahier de charges.

Le modèle mathématique du système est basé sur deux équations : un bilan enthalpique sur le volume d'air et l'équation de la chaleur dans le matériau stockeur. Ces deux équations permettent l'analyse du transfert de chaleur du système de stockage latent. Par

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0060/these.pdf
© [J.P. Arzamendia Lopez], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

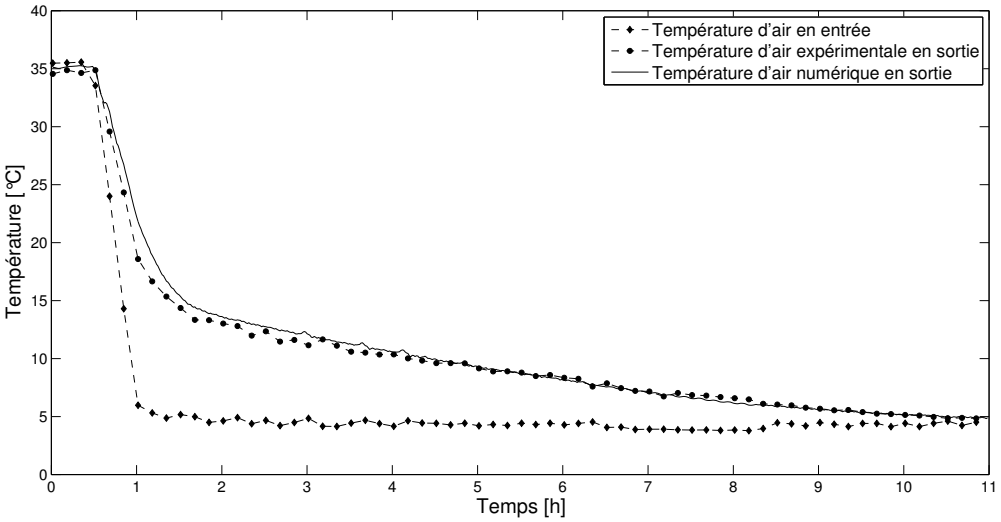


FIGURE 3.16 – Validation du modèle numérique pour la phase de décharge

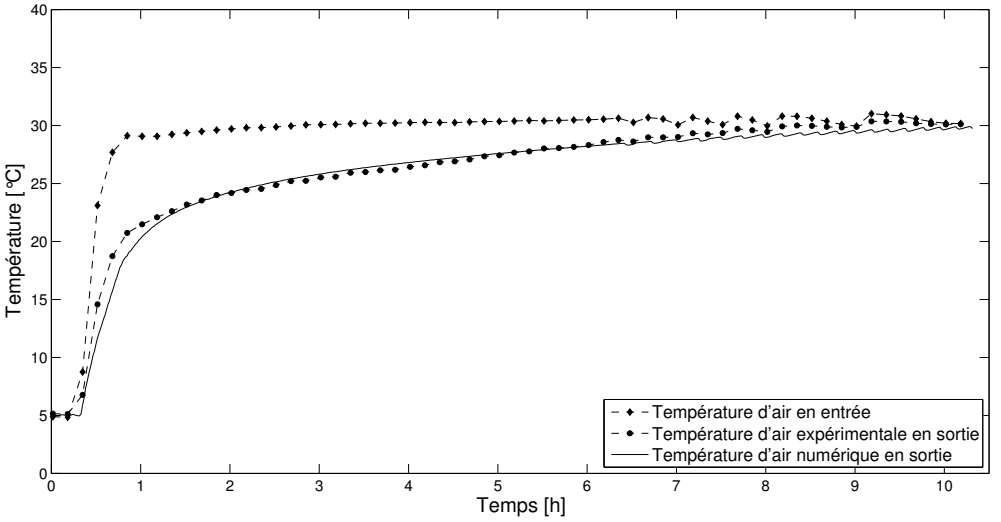


FIGURE 3.17 – Validation du modèle numérique pour la phase de charge

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0060/these.pdf
© [J.P. Arzamendia Lopez], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

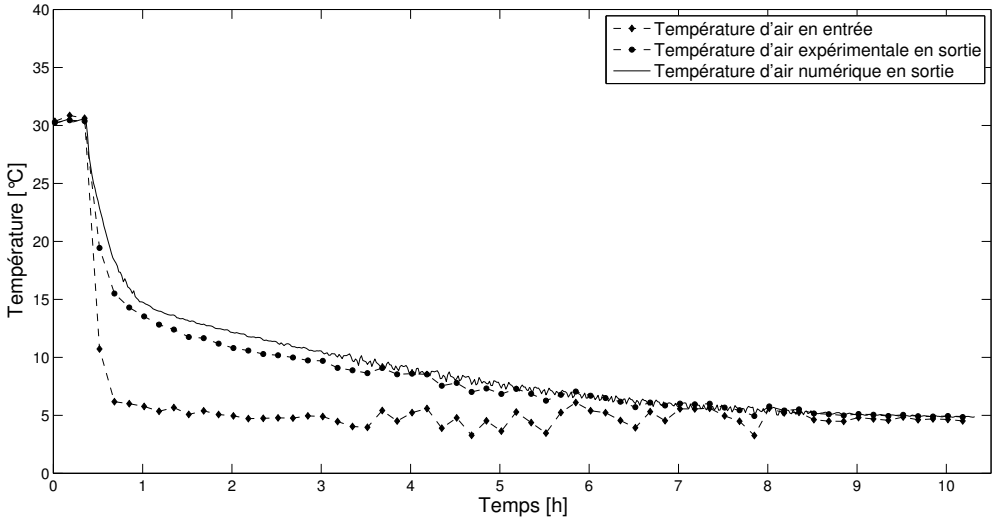


FIGURE 3.18 – Validation du modèle numérique pour la phase de décharge

ailleurs, le changement de phase est modélisé par la méthode des capacités calorifiques équivalentes. En outre, ces équations ont été discrétisées en espace par volumes finis. La résolution numérique est faite grâce au solveur ODE du logiciel MATLAB.

En dernier lieu, la validation du modèle numérique a été effectuée. Premièrement, la vérification réalisée dans la section 3.5.1 montre que la convergence est de deuxième ordre en espace. Deuxièmement, le modèle numérique a été validé dans la section 3.5.2 en utilisant les résultats issus des mesures expérimentales. L'écart expérimentation/numérique est de l'ordre de 3 %.

Le modèle numérique développé peut donc être utilisé pour évaluer la performance d'un système de stockage latent et ensuite mettre un évidence une conception optimale pour ce type de système.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0060/these.pdf
© [J.P. Arzamendia Lopez], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0060/these.pdf
© [J.P. Arzamendia Lopez], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

4 Sélection des matériaux pour le système de stockage de chaleur

4.1 Introduction

Cette quatrième section est consacrée à la sélection des matériaux pour le système de stockage du type rack permettant de satisfaire la condition d'une puissance de décharge de 2 kW pendant 2 h.

Le chapitre précédent a présenté l'outil numérique qui sera utilisé pour cette étape. Cet outil permet l'analyse du comportement du système de stockage pendant sa phase de décharge et facilite le choix du MCP à utiliser comme stockeur.

Dans la section 4.2, la formulation mathématique présentée dans le chapitre précédent (chapitre 3) est analysée afin d'obtenir des indicateurs de performance. Ensuite, ces indicateurs sont évalués pour déterminer leur influence sur la puissance de décharge du système (critère d'étude choisi).

La méthodologie développée au chapitre 2 est mise en œuvre dans la section suivante (section 4.3). Dans un premier temps, les matériaux potentiels sont caractérisés pour établir une classification grâce aux indicateurs adimensionnels. De plus, des indices simplifiés permettent une approche alternative du problème. Une comparaison est realisée entre les deux types d'indicateurs. Dans un deuxième temps, l'analyse *via* des nombres adimensionnels des meilleures solutions en regard du cahier des charges permet de mettre en évidence la nécessité ou non des architectures complexes. À la fin du chapitre, les propriétés matériaux, plus particulièrement les propriétés thermiques en lien avec le stockage et la puissance de décharge, ainsi que les propriétés fonctionnelles répondant à notre cahier des charges seront connues.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0060/these.pdf
© [J.P. Arzamendia Lopez], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

4.2 Analyse du problème. Nombres adimensionnels

4.2.1 Analyse des équations

Analyse de l'équation de conservation de l'énergie dans la plaque contenant du MCP

Dans le chapitre précédent, l'expression de l'équation de la chaleur dans la plaque contenant du MCP a été donnée :

$$\rho C_m(T)\frac{\partial T}{\partial t} = -div(\overrightarrow{\varphi}) \tag{4.1}$$

Cette expression peut être écrite explicitement en fonction de la chaleur sensible et de la chaleur latente:

$$\rho C_m\frac{\partial T}{\partial t} + \rho H\frac{\partial f}{\partial t} = \lambda\nabla^2 T \tag{4.2}$$

Pour l'obtention des indicateurs de performance et l'analyse du système, nous proposons un adimensionnement de cette équation en introduisant les nombres adimensionnels suivants :

$$T^* = \frac{T - T_{in}}{T_{out} - T_{in}} \tag{4.3}$$

$$t^* = \frac{t}{\tau} \tag{4.4}$$

$$x^* = \frac{x}{l} \tag{4.5}$$

$$y^* = \frac{y}{e} \tag{4.6}$$

En dérivant ces paramètres adimensionnels:

$$\frac{\partial T^*}{\partial T} = \frac{1}{T_{out} - T_{in}} \tag{4.7}$$

$$\frac{\partial t}{\partial t^*} = \tau \tag{4.8}$$

$$\frac{\partial x}{\partial x^*} = l \tag{4.9}$$

$$\frac{\partial y}{\partial y^*} = e \tag{4.10}$$

on a alors :

$$\frac{\partial T^*}{\partial t^*} = \frac{\partial T^*}{\partial T}\frac{\partial T}{\partial t}\frac{\partial t}{\partial t^*} = \frac{\tau}{T_{out} - T_{in}}\frac{\partial T}{\partial t} \tag{4.11}$$

$$\frac{\partial^2 T^*}{\partial x^{*2}} = \frac{\partial}{\partial x}\frac{\partial x}{\partial x^*}\left(\frac{\partial T^*}{\partial T}\frac{\partial T}{\partial x}\frac{\partial x}{\partial x^*}\right) = \frac{l^2}{T_{out} - T_{in}}\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \tag{4.12}$$

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0060/these.pdf
© [J.P. Arzamendia Lopez], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

$$\frac{\partial^2 T^*}{\partial y^{*2}} = \frac{\partial}{\partial y}\frac{\partial y}{\partial y^*}\left(\frac{\partial T^*}{\partial T}\frac{\partial T}{\partial y}\frac{\partial y}{\partial y^*}\right) = \frac{e^2}{T_{out} - T_{in}}\frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \tag{4.13}$$

$$\frac{\partial f^*}{\partial t^*} = \frac{\partial f^*}{\partial f}\frac{\partial f}{\partial t}\frac{\partial t}{\partial t^*} = \tau\frac{\partial f}{\partial t} \tag{4.14}$$

L'équation de la chaleur (4.2) s'écrit alors :

$$\rho C_m \frac{T_{out} - T_{in}}{\tau}\frac{\partial T^*}{\partial t^*} = \lambda\left(T_{out} - T_{in}\right)\left(\frac{1}{l^2}\frac{\partial^2 T^*}{\partial x^{*2}} + \frac{1}{e^2}\frac{\partial^2 T^*}{\partial y^{*2}}\right) - \rho H\frac{1}{\tau}\frac{\partial f^*}{\partial t^*} \tag{4.15}$$

L'expression peut être simplifiée en :

$$\frac{\partial T^*}{\partial t^*} = \frac{\lambda}{\rho C_m}\frac{\tau}{e^2}\left(\frac{e^2}{l^2}\frac{\partial^2 T^*}{\partial x^{*2}} + \frac{\partial^2 T^*}{\partial y^{*2}}\right) - \frac{H}{C_m\left(T_{out} - T_{in}\right)}\frac{\partial f^*}{\partial t^*} \tag{4.16}$$

En introduisant les nombres adimensionnels de Fourier et de Stefan :

$$Fo = \frac{\lambda}{\rho C_m}\frac{\tau}{e^2} \tag{4.17}$$

$$Ste = \frac{C_m\left(T_{out} - T_{in}\right)}{H} \tag{4.18}$$

On obtient alors l'expression adimensionnée suivante pour l'équation de la chaleur :

$$\frac{\partial T^*}{\partial t^*} = Fo\left(\frac{e^2}{l^2}\frac{\partial^2 T^*}{\partial x^{*2}} + \frac{\partial^2 T^*}{\partial y^{*2}}\right) - \frac{1}{Ste}\frac{\partial f^*}{\partial t^*} \tag{4.19}$$

L'expression de l'équation de la chaleur peut donc être analysée en fonction de deux nombres adimensionnels : le nombre de *Fourier* et le nombre de *Stefan*. Dans notre cas, l'objectif est de maximiser la variation de température dans le temps pour une meilleure efficacité du système. On remarque que le système est en phase de décharge, ce qui implique une solidification du matériau à changement de phase. La fraction liquide diminue alors au cours du temps.

Dans ces conditions, l'expression nécessite une minimisation du nombre de *Stefan* ainsi qu'une maximisation du nombre de Fourier afin de maximiser la partie gauche de l'expression.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0060/these.pdf
© [J.P. Arzamendia Lopez], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

Analyse de l'équation de conservation de l'énergie dans le flux d'air

La formulation mathématique de l'équation de la conservation de l'énergie dans le flux d'air est ;

$$div(\rho_a C_a T_a \overrightarrow{v}) + div(\overrightarrow{\varphi_a}) = 0 \tag{4.20}$$

Pour mettre en évidence les nombres adimensionnels qui interviennent dans cette expression, on utilise la formulation discretisée car elle fait apparaître les variables matériaux et fonctionnelles (λ, h_c, ...).

$$\dot{m}_a C_a \frac{T_a(i+1) - T_a(i-1)}{2} + \Delta x \frac{T_a(i) - T(i,1)}{\frac{\Delta y}{2\lambda(T(i,1))} + \frac{1}{h_c}} = 0 \tag{4.21}$$

Elle est adimensionnée en introduisant les nombres adimensionnels suivants :

$$T^* = \frac{T - T_{in}}{T_{out} - T_{in}} \quad (4.22) \qquad x^* = \frac{x}{l} \quad (4.23) \qquad y^* = \frac{y}{e} \quad (4.24)$$

On obtient :

$$\frac{\dot{Q}_v \rho_a C_a}{2 h_c L l} \frac{T_a^*(i+1) - T_a^*(i-1)}{\Delta x^*} = -\frac{T_a^*(i) - T^*(i,1)}{h_c \Delta y^* e/2\lambda + 1} \tag{4.25}$$

$$\frac{v \rho_a C_a}{2 h_c} \frac{d}{l} \frac{T_a^*(i+1) - T_a^*(i-1)}{\Delta x^*} = \frac{T^*(i,1) - T_a^*(i)}{h_c \Delta y^* e/2\lambda + 1} \tag{4.26}$$

On introduit deux autres nombres adimensionnels : le nombre de Stanton et le nombre de Biot.

$$Bi = \frac{h_c(e/2)}{\lambda} \quad (4.27) \qquad St = \frac{h_c}{v \rho_a Ca} \quad (4.28)$$

L'expression du bilan enthalpique devient :

$$\frac{1}{2St} \frac{d}{l} \frac{T_a^*(i+1) - T_a^*(i-1)}{\Delta x^*} = \frac{T^*(i,1) - T_a^*(i)}{\Delta y^* Bi + 1} \tag{4.29}$$

Cette expression peut être analysée en fonction de ces deux nombre adimensionnels. L'objectif est de transférer la chaleur de la plaque à l'air, donc d'avoir la plus petite différence de température entre la plaque et l'air. Cela implique une maximisation du nombre de Stanton et une minimisation du nombre de Biot.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0060/these.pdf
© [J.P. Arzamendia Lopez], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

4.2.2 Nombres adimensionnels étudiés

Le système de stockage est analysé par la suite en fonction des nombres adimensionnels introduits dans la section précédente (section 4.2.1) : le nombre de *Biot* (Bi), le nombre de *Fourier* (Fo), le nombre de *Stanton* (St) et le nombre de *Stefan* (Ste). Cependant, ces paramètres adimensionnels ne sont pas indépendants les uns des autres.

Le nombre de *Stefan* caractérise la capacité de stockage du matériau (rapport entre le stockage sensible et le stockage latent). Pendant la phase de changement d'état, la chaleur latente est prépondérante. En conséquence, l'analyse du nombre de *Stefan* est réalisée en fonction de la chaleur latente des matériaux. Le nombre de *Stefan* est donc considéré comme un paramètre matériau.

Pour les nombres adimensionnels restants, la tâche est plus compliquée. Les nombres de *Stanton*, *Biot* et *Fourier* interviennent sur la puissance de décharge et ils interagissent entre eux. Afin de surmonter la difficulté d'interdépendance de ces paramètres, un couplage entre les paramètres intervenants est réalisé. Deux nouveaux paramètres adimensionnels sont définis :

$$BiFo = \frac{h_c \tau}{2\rho_m C_m e} \qquad (4.30) \qquad Bi/St = \frac{v\rho_a C_a e}{2\lambda} \qquad (4.31)$$

La définition du paramètre $BiFo$ (équation 4.30) met en évidence la capacité sensible de stockage ($\rho_m C_m$) du matériau ; cependant, ce facteur n'est pas prépondérant pendant la phase de changement d'état. En outre, le paramètre $BiFo$ est aussi fortement lié à la puissance de décharge en raison de la présence du coefficient de convection. Le coefficient de convection intervient sur l'échange convectif à la surface de la plaque. C'est un paramètre qui dépend essentiellement de la configuration du système: géométrie, surface d'échange, débit, etc. Ce paramètre adimensionnel est donc considéré comme un paramètre système.

Le deuxième paramètre adimensionnel défini est le nombre Bi/St (équation 4.31). Ce paramètre est inversement proportionnel à la conductivité thermique équivalente. La conductivité thermique caractérise le transfert de chaleur à l'intérieur du matériau. Ce paramètre adimensionnel est donc considéré comme un paramètre matériau.

En conclusion, trois paramètres sont nécessaires pour l'analyse du système de stockage de chaleur : le nombre $BiFo$, le nombre Bi/St et le nombre Ste. Parmi ces nombres adimensionnels, seuls les deux derniers sont des paramètres matériaux. Le premier ($BiFo$) est un paramètre système ou fonctionnel. En conséquence, la sélection des matériaux sera faite en deux étapes :

— sélection des matériaux exclusivement à partir des paramètres matériaux Bi/St et Ste

— modification du système de stockage grâce à une optimisation du paramètre $BiFo$, uniquement si les matériaux optimaux de la première étape ne permettent pas de

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0060/these.pdf
© [J.P. Arzamendia Lopez], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

Fonction :	Stockage de chaleur et restitution en $2h$
Objectif :	Maximisation de la puissance pour atteindre au moins 2kW
Contraintes :	Volume du système
	(étude pour une configuration fixe)
Variables libres :	Matériaux stockeurs
	Matériaux conducteurs
	Design du système (coefficient d'échange)
Indices de performance :	Nombres adimensionnels

TABLEAU 4.1 – Cahier des charges pour le système étudié

satisfaire la nécessité de puissance égale ou supérieure à 2 kW.

L'étude sera faite pour une configuration donnée, c'est à dire pour des paramètres fonctionnels (débit) et une géométrie du système (épaisseur, largeur et longueur) fixes. Des solutions optimales existent pour chaque configuration donnée.

4.2.3 Analyse des nombres adimensionnels

Pour mieux comprendre les paramètres adimensionnels intervenant dans les équations physiques, une analyse de leur influence sur la puissance de décharge est réalisée à partir du modèle numérique décrit au chapitre 3. Le critère d'étude choisi est donc la puissance de décharge P. La puissance à atteindre doit être supérieure ou égale à 2 kW en fin de décharge pour ainsi répondre à un effacement de 4 kWh correspondant à une période de 2 h. L'objectif est la maximisation de la puissance de décharge du système de stockage pour une configuration géométrique fixe (cf. tableau cahier de charges 4.1). Il faut néanmoins remarquer que l'épaisseur des plaques peut être variable à l'intérieur du système de stockage. De plus, l'épaisseur des lames d'air est égale à l'épaisseur des plaques. Le nombre de plaques peut donc être déduit pour chaque configuration donnée. La contrainte définie par le cahier de charges est donc le volume du système.

Conditions initiales :

Le système est considéré chargé à la capacité maximale en début de décharge (le MCP est entièrement à l'état liquide) :

— Température de la plaque : $T^0_{x,y} = 45$ °C

— Température d'air initiale : $T^0_{air} = 45$ °C

Conditions de fonctionnement

Le système est étudié pour un débit constant :

— Débit total d'air entrant : 600 m^3/h ($h_c = 13.7$ $W/m^2\,K$, corrélation de Colburn)

— Température d'air entrant : $T^{in}_{air} = 21$ °C

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0060/these.pdf
© [J.P. Arzamendia Lopez], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

— Période : 2 h

Dimensions du système

Le système de stockage a des dimensions géométriques fixes :

- Largeur : 0.2 m
- Longueur : 2 m
- Épaisseur tot. plaques : 0.33 m
- Épaisseur d'une plaque : 0.03 m
- Épaisseur tot. lames d'air : 0.33 m
- Épaisseur d'une lame d'air : 0.03 m

L'étude de l'influence des nombres adimensionnels sur la puissance de décharge est réalisée pour un matériau fictif possèdant des propriétés physiques, géométriques et fonctionnelles situées au centre du domaine d'étude défini pour le système de stockage.

Domaine d'étude

Les domaines d'étude définis pour les paramètres intervenant dans les nombres adimensionnels sont les suivants :

- Mas. volumique ρ : 700 - 2000 [kg/m^3]
- Conductivité λ : 0.1 - 2 [W/m K]
- Chaleur latente H : 100 - 300 [kJ/kg]
- Temp. de fusion T_f : 30 - 45 [°C]
- Longueur de l'échangeur l : 2 [m]
- Épaisseur des plaques e : 5 - 50 [mm]
- Coeff. de convect. h_c : 5 - 50 [W/m^2 K]
- Chaleur spécifique C_m : 2 [kJ/kg K]

Centre du domaine

Les valeurs correspondant au centre du domaine d'étude sont :

- Masse volumique : 1350 [kg/m^3]
- Conductivité : 1.05 [W/m K]
- Chaleur latente : 200 [kJ/kg]
- Température de fusion : 37.5 [°C]
- Longueur de l'échangeur : 2 [m]
- Épaisseur des plaques : 0.03 [m]
- Coeff. de convect. : 30 [W/m^2 K]
- Chaleur spécifique : 2 [kJ/kg K]

La première analyse concerne le nombre adimensionnel $BiFo$ (variation de h_c). La figure 4.1 montre que la puissance est directement proportionnelle à $BiFo$. L'influence du coefficient de convection est importante : faire varier le coefficient de convection d'une extrémité à l'autre de son domaine d'étude a pour effet de multiplier par trois la puissance (différence entre la courbe verte claire et la courbe grise). Les courbes ayant un coefficient de convection faible (5 et 10 W/m^2 K) ne satisfont pas à la contrainte du système, i.e. une puissance de 2 kW en fin de décharge. En conclusion, une maximisation du nombre adimensionnel $BiFo$ ou une minimisation de l'inverse de celui-ci $1/BiFo$ est nécessaire pour atteindre la puissance de 2 kW. Les résultats de l'analyse des courbes de puissance en fonction du temps montrent une décroissance quasi-linéaire de celles-ci à l'exception du début de la période. La contrainte peut donc être vérifiée à la fin de la période de décharge. La figure 4.2 montre l'évolution de la puissance en fin de période de décharge, c'est-à-dire, au moment où la puissance de dimensionnement doit être vérifiée. La puissance de

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0060/these.pdf
© [J.P. Arzamendia Lopez], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

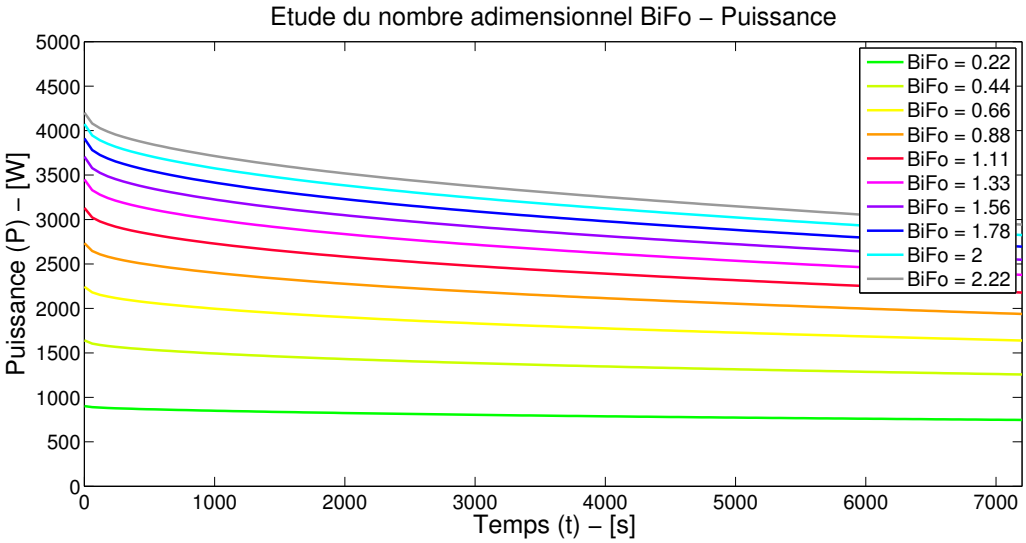


FIGURE 4.1 – Etude de la puissance de décharge pour le nombre adimensionnel $BiFo$

décharge est moins importante pour des nombres $1/BiFo$ élevés (h_c faible). Par ailleurs, l'évolution de la puissance n'est pas une fonction linéaire de $1/BiFo$ en fin de période. Cette évolution en fonction du nombre $1/BiFo$ est décroissante.

Le deuxième paramètre adimensionnel analysé est le nombre Bi/St. Lors de cette étude, le coefficient de convection est choisi au centre de son domaine (30 W/m^2 K). Il n'est donc pas surprenant que, à l'exception d'une seule courbe, la puissance nécessaire de 2 kW soit satisfaite. La puissance de décharge du système est inversement proportionnelle au nombre Bi/St. Le facteur choisi pour agir sur ce nombre adimensionnel est la conductivité thermique. Le paramètre adimensionnel Bi/St est donc lié au transfert de chaleur à l'intérieur de la plaque. L'analyse des résultats de la figure 4.3 indique que la puissance de décharge est plus importante lorsque le transfert de chaleur dans la plaque est plus important, c'est à dire pour des valeurs de Bi/St faibles (conductivité plus importante). Il est donc nécessaire que le nombre de Bi/St soit minimisé pour favoriser ce phénomène. En début de la période de décharge, une forte chute de puissance est constatée (non-linéarité accentuée au début). Pour vérifier la puissance nécessaire, une analyse de la puissance de décharge en fin de période est réalisée. La figure 4.4 montre une évolution en fin de décharge linéaire. La courbe de puissance décroît au fur et à mesure que le nombre Bi/St augmente. Les nombres Bi/St faibles correspondent donc à une meilleure performance du système de stockage étudié. Une conductivité plus importante est donc nécessaire.

En dernier lieu, l'influence du nombre de Stefan a été analysée. Au même titre que pour l'étude du nombre Bi/St, le coefficient de convection est choisi au centre de son domaine. La puissance de décharge apparaît inversement proportionnelle au nombre Ste (figure 4.5). Le facteur choisi pour agir sur le nombre Ste est la chaleur latente de fusion. La puissance de décharge est plus importante lorsque la quantité d'énergie (exprimée

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0060/these.pdf
© [J.P. Arzamendia Lopez], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

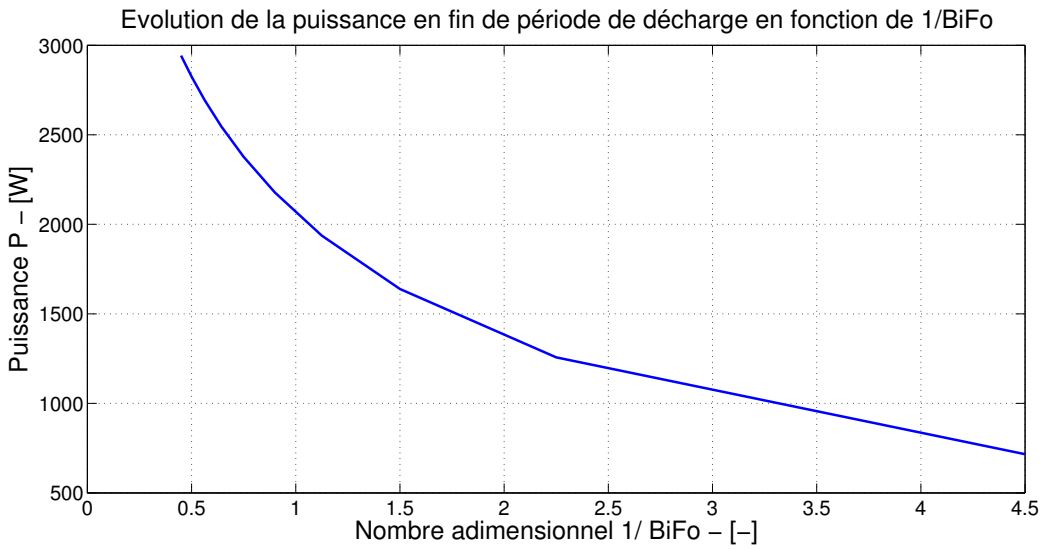


FIGURE 4.2 – Etude de la puissance en fin de période de décharge - $1/BiFo$

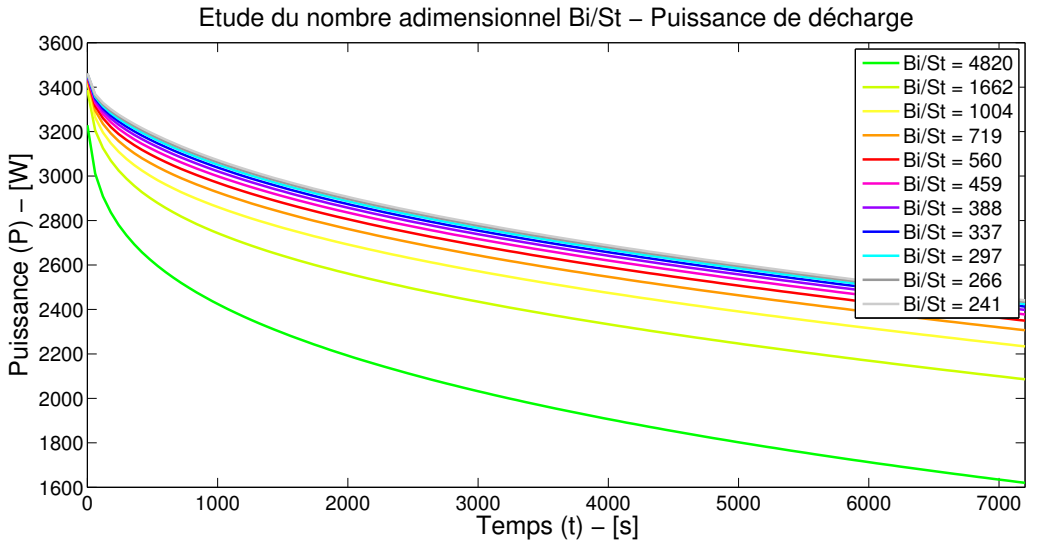


FIGURE 4.3 – Etude de la puissance de décharge pour le nombre adimensionnel Bi/St

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0060/these.pdf
© [J.P. Arzamendia Lopez], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

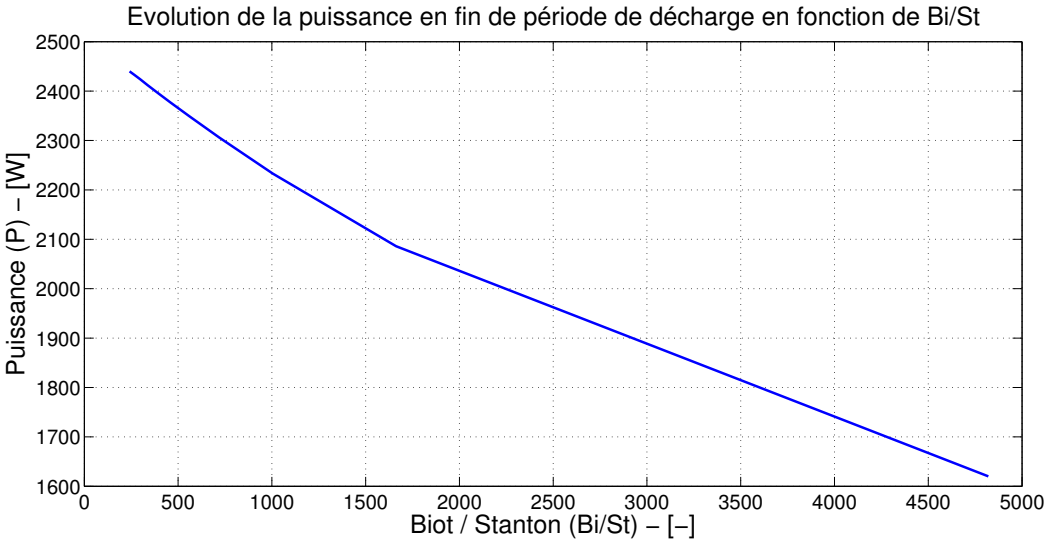


FIGURE 4.4 – Etude de la puissance en fin de période de décharge - Bi/St

principalement à ce moment par le facteur $m.H$) est plus élevée. Il est donc indispensable de minimiser ce nombre adimensionnel (Ste) pour satisfaire à la puissance nécessaire de 2 kW. L'analyse de la puissance en fin de décharge montre son comportement linéaire par rapport au nombre Ste (figure 4.6). De la même façon que pour le nombre Bi/St, les nombres Ste faibles sont plus intéressants pour la performance du système étudié. Une chaleur latente élevée est donc nécessaire.

Cette analyse qualitative a permis de connaître l'influence des nombres adimensionnels mis en jeu. En résumé, les nombres $1/BiFo$ faibles facilitent une réponse satisfaisante à la nécessité de puissance pour le système de stockage. Aussi, des valeurs faibles sont conseillées pour les nombres adimensionnels Bi/St et Ste. Tous les paramètres adimensionnels cités dans ce paragraphe doivent alors êtres minimisés.

Pour compléter cette étude, l'influence respective des nombres adimensionnels sur la puissance de décharge est analysée. Pour cela, une analyse de sensibilité locale est utilisée. Son principal avantage est sa simplicité et sa rapidité. Cette méthode repose sur le calcul d'un indice de sensibilité représentant la variation de la sortie du modèle suite à une variation d'un paramètre d'entrée. À chaque paramètre d'entrée est attribué une valeur nominale de référence. L'analyse est conduite en faisant varier la valeur nominale de référence d'un paramètre d'entrée d'un certain pourcentage (1 %, 5 % ou 10 %) en fixant tous les autres paramètres d'entrée à leur valeur nominale de référence.

L"indice de sensibilité S_i par rapport au paramètre x_i est défini par :

$$S_i = \frac{\partial y}{\partial x_i} \qquad (x_i^0, ..., x_p^0) \tag{4.32}$$

où y est la sortie du modèle numérique, x_i est le paramètre i d'entrée et 0 représente la

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0060/these.pdf
© [J.P. Arzamendia Lopez], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

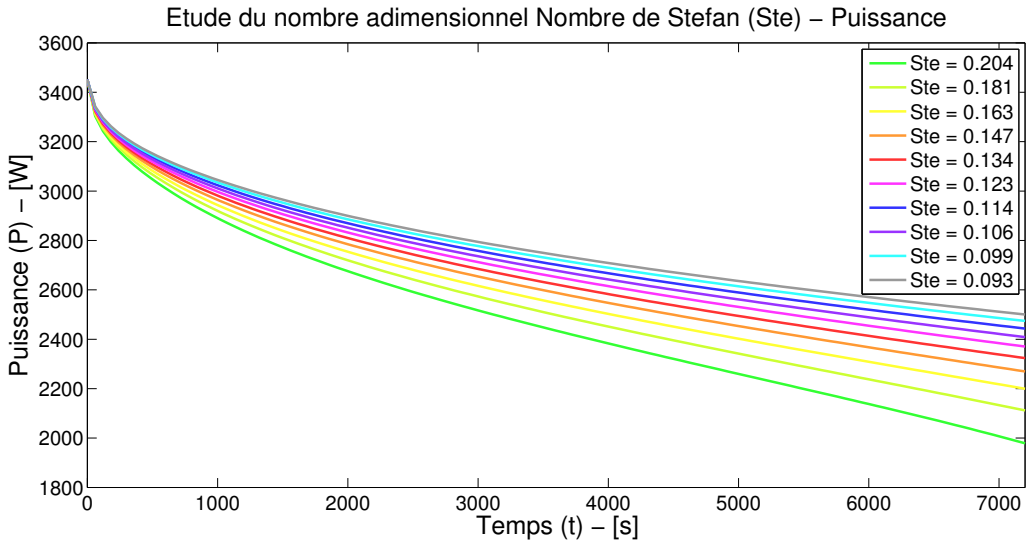


FIGURE 4.5 – Etude de la puissance de décharge pour le nombre adimensionnel *Ste*

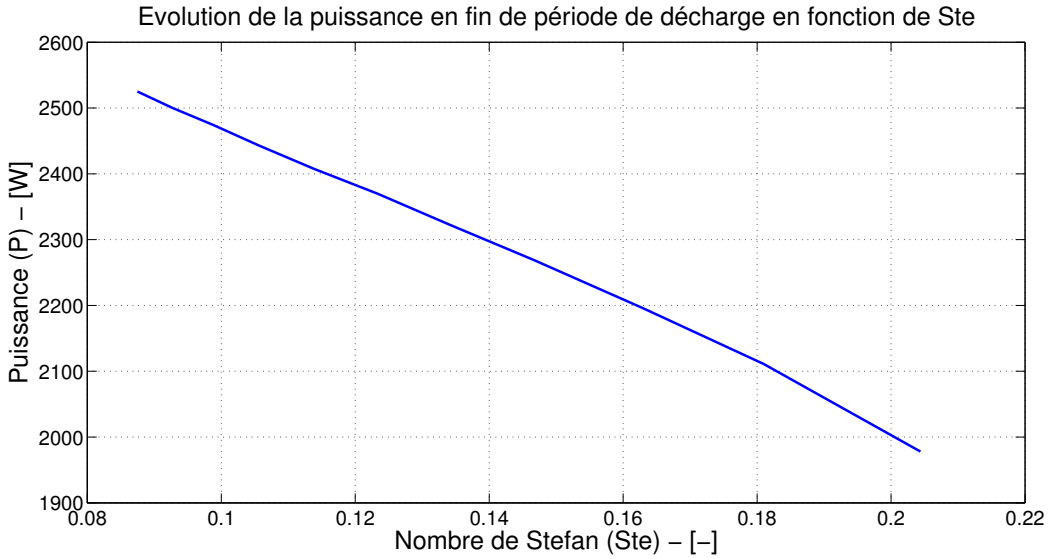


FIGURE 4.6 – Etude de la puissance en fin de période de décharge - *Ste*

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0060/these.pdf
© [J.P. Arzamendia Lopez], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

Propriété	Limite inf	Limite sup
$1/BiFo$	0.45	4.5
Bi/St	240	4820
Ste	0.087	0.204

TABLEAU 4.2 – Intervalles d'étude des nombres adimensionnels

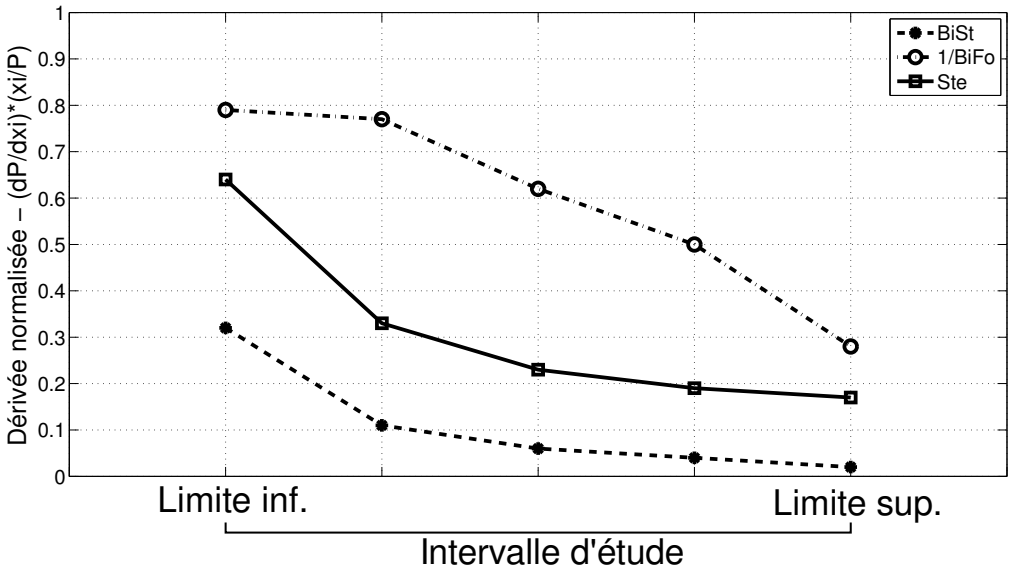


FIGURE 4.7 – Étude de sensibilité des nombres adimensionnel - Impact sur la puissance en fin de décharge.

valeur nominale de référence. Cette analyse permet d'identifier les zones de l'espace du domaine d'étude où la variation de la sortie du modèle est importante.

L'analyse de sensibilité réalisée sur le modèle numérique pour les nombres adimensionnels cités auparavant est basée sur une variation de ± 1% autour de la valeur nominale des paramètres d'entrée du modèle.

Afin de comparer l'influence relative des paramètres adimensionnels, il est nécessaire de s'affranchir de la dimension de la sortie (puissance de décharge) et de l'ordre de grandeur des paramètres concernés. Les coefficients de sensibilité sont donc réduits en les rapportant aux valeurs nominales correspondant au point du domaine d'étude où les dérivées sont calculées. Pour le paramètre adimensionnel x_i, la sensibilité est donnée par :

$$S_i = \frac{x_i}{P_i}\frac{\partial P_i}{\partial x_i} \tag{4.33}$$

où P_i est la valeur nominale de la sortie du modèle au point x_i du paramètre adimensionnel. La variation passe alors d'une valeur unitaire à une valeur relative (pourcentage).

La figure 4.7 met en évidence le fort impact du nombre $BiFo$ et, en conséquence, du

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0060/these.pdf
© [J.P. Arzamendia Lopez], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

coefficient de convection. Son impact sur la puissance est bien plus important à l'intérieur du domaine d'étude. Il reste le facteur prépondérant sur tous les points étudiés appartenant au domaine. Cela signifie que le principal facteur agissant sur la puissance de décharge est indépendant du matériau utilisé. Une fois la sélection des matériaux effectuée, le coefficient de convection est donc un facteur à ne pas négliger dans la conception du système de stockage pour l'optimisation de la puissance de décharge. D'autre part, l'impact des nombres Bi/St et Ste, nombres adimensionnels liés aux paramètres matériaux, est moins important. Cependant, un rapport puissance/stockage est établi grâce à ces deux facteurs, ce qui permet une sélection des matériaux.

En conclusion, deux points sont à retenir pour la sélection des matériaux :

1. La sélection des matériaux pour le système de stockage sera réalisée à partir d'une cartographie basée sur les nombres adimensionnels (Bi/St, Ste). Cette cartographie permettra d'analyser la performance des matériaux monolithiques et composites par rapport aux transferts de chaleur par conduction à l'intérieur du matériau et à sa capacité de stockage. Ensuite, la puissance de décharge est vérifiée par rapport à la valeur minimale de puissance à atteindre : 2 kW. Dans ces conditions, un matériau peut être choisi et optimisé pour répondre à la puissance de décharge de 2 kW. Si le matériau satisfait à cette exigence, l'analyse du nombre $BiFo$ n'est pas nécessaire.
2. Dans le cas où l'étude de la cartographie produit un résultat non-satisfaisant, le coefficient de convection, à travers le facteur $BiFo$, est capital pour maximiser la puissance fournie par le système. Une configuration système, en termes de coefficient de convection, est alors proposée pour satisfaire la puissance nécessaire en fin de décharge.

4.3 Sélection des matériaux

4.3.1 Caractérisation des matériaux potentiels

À l'évidence, les MCP ont été qualifiés comme matériaux potentiels. La caractérisation de plusieurs MCP a été réalisée afin de fiabiliser les données matériaux issues de la littérature. En effet, un grand nombre de publications [4, 12, 22, 87] présentent une synthèse sur les matériaux à changement de phase utilisés pour le stockage de chaleur dans le domaine du bâtiment. Néanmoins, les conditions d'acquisition de ces données ne sont pas décrites et les valeurs fournies ne sont pas uniques. La base de données du *National Institute of Standard and Technology* (NIST) sera considérée par la suite pour les propriétés physiques des MCP à sélectionner. De plus, certains phénomènes physiques tels que la surfusion peuvent apparaître. La caractérisation est le seul moyen fiable de connaître leur présence.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0060/these.pdf
© [J.P. Arzamendia Lopez], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

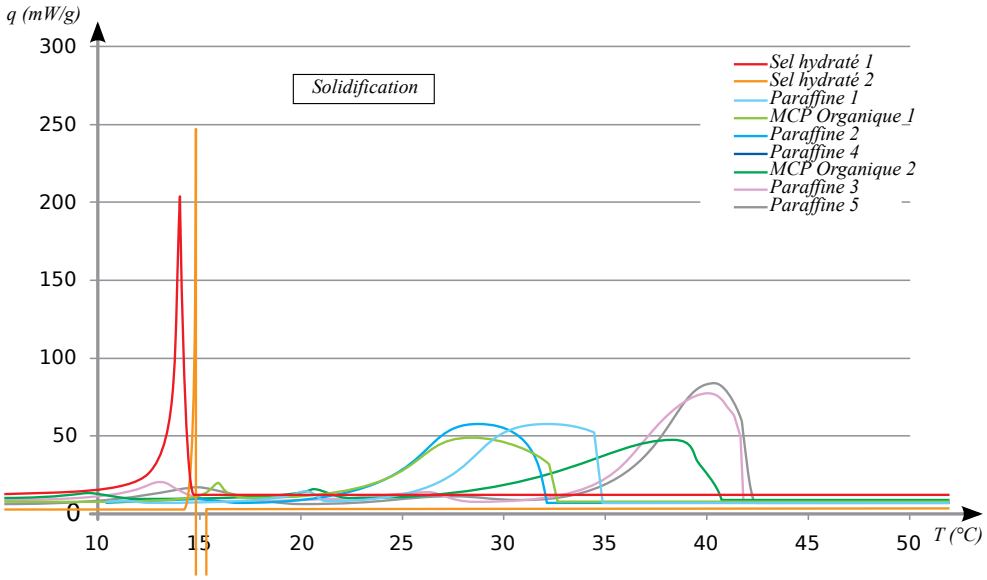


FIGURE 4.8 – Caractérisation de la solidification des MCP potentiels

Les mesures de caractérisation ont été réalisées par le Laboratoire de Matériaux et Mécanique des Composants (MMC), au site de EDF Renardières. Dans un premier temps, les travaux se sont concentrés sur la caractérisation du phénomène de changement de phase : chaleur latente de fusion et de solidification, intervalles de changement de phase, début et fin de transformation, etc. Il est pertinent de remarquer que la solidification (transformation liquide $\rightarrow$ solide) est le changement de phase se produisant lors de la décharge du système de stockage. Les valeurs des propriétés physiques lors cette phase de transformation seront donc utilisées par la suite pour le processus de sélection des matériaux.

La caractérisation du phénomène de changement de phase est faite grâce à un calorimètre à compensation de puissance. Le fonctionnement de cet appareil est basé sur le principe de compensation de puissance dit de "balance nulle". L'énergie absorbée ou dégagée par l'échantillon est compensée en ajoutant ou en retirant une quantité équivalente d'énergie électrique dans les éléments chauffants de l'appareil.

L'énergie échangée et la température sont quantifiées grâce à des fluxmètres et des capteurs de température. Les fluxmètres entourent complètement l'échantillon. La globalité du transfert de chaleur est alors mesurée (la mesure est effectuée en $3D$).

L'appareil utilisé est de la marque *Setaram*, modèle *μDSC3 evo*. Ce dispositif a été choisi car il autorise des échantillons ayant une masse d'une centaine de mg (permettant de ne pas utiliser des échantillons de trop petite taille très sensibles aux perturbations de mesure). Un autre avantage par rapport à d'autres matériels est sa plage de vitesse de caractérisation. Sa vitesse minimale est de 0.001 °C/min.

Les courbes de solidification pour différents MCP sont réprésentées figure 4.8. Les

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0060/these.pdf
© [J.P. Arzamendia Lopez], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

matériaux sélectionnés pour la caractérisation ont une température de fusion théorique comprise dans l'intervalle de décharge du système de stockage (21 ℃- 45 ℃). Il est capital que leur pic de fusion soit à l'intérieur de cet intervalle.

La première constatation est le positionnement de la transformation des sels hydratés 1 et 2. Lors de la solidification de ce type de matériau, une surfusion de l'ordre de 20 ℃ est constatée (pics de transformation situés autour de 15 ℃). En outre, cela signifie que ces matériaux ne changeront jamais de phase dans l'intervalle de fonctionnement (21 ℃ - 45 ℃). Ces matériaux sont disqualifiés non par leur manque de caractéristiques intéressantes en termes de puissance et de stockage, mais tout simplement par leur non fonctionnement pendant la phase de décharge. Voilà un exemple très clair de la dualité théorie/pratique qui met en évidence la nécessité d'une base de données fiable.

Enfin, les paraffines commerciales caractérisées ont un intervalle de transformation plus important que les hydrates de sel. Il est constaté que la *Paraffine 4* est très similaire à l'*Eicosane* tandis que la *Paraffine 5* ressemble à la *Paraffine 3*. La *Paraffine 1* et le *MCP Organique 1* sont aussi très similaires en terme de comportement de transformation. Ces deux paraffines ont été disqualifiées de la sélection en raison d'une solidification à une température plus basse que la limite inférieure de l'intervalle défini.

Par ailleurs, d'autres propriétés à mesurer sont considérées. La conductivité thermique et la masse volumique sont des propriétés importantes souvent données par des intervalles de valeurs. La caractérisation de la masse volumique dans chaque état (liquide ou solide) permet de déduire l'expansion du matériau. D'après la littérature, les paraffines ont une expansion importante, de l'ordre de 15 %. Les premiers résultats concernant la paraffine pure Eicosane donnent une masse volumique à l'état solide de 904 kg/m^3 tandis qu'à l'état liquide, elle est de 779 kg/m^3. L'expansion du matériau est alors de 12 %. La connaissance de cette propriété permet la prévision de la quantité maximale de paraffine à confiner ou des solutions techniques à mettre en œuvre pour éviter les problèmes de destruction et fuites à cause d'une surpression. Quant à la conductivité thermique, elle est mesurée par l'intermédiaire de la méthode de la plaque chaude gardée [1]. Une adaptation a été faite pour éviter les fuites. Le matériau est mis dans une poche médicale très fine. Lors de la mesure, la température des plaques est imposée. Lorsque l'équilibre thermique est atteint, le flux de chaleur est mesuré (cf. figure 4.10b). Le résistance thermique est calculée, ce qui permet d'en déduire la conductivité du matériau. Les résultats montrent une indépendance de la conductivité par rapport à l'épaisseur de l'échantillon à l'état solide. Par contre, à l'état semi-liquide, il existe un risque de convection. Des mesures à différentes épaisseurs sont conseillées. Pour la *Paraffine 3*, la conductivité à l'état solide est de 0.22 W/m K alors qu'elle varie à l'état liquide entre 0.17 et 0.19 W/m K pour des épaisseurs de 0.03 m et 0.044 m. À l'instant présent, les mesures concernant la conductivité et la masse volumique sont en cours d'achèvement à EDF.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0060/these.pdf
© [J.P. Arzamendia Lopez], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

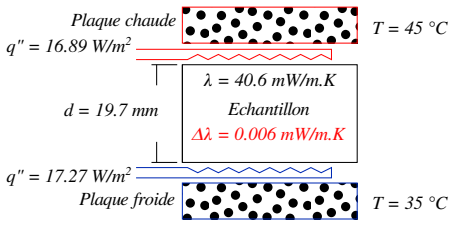
(a) Appareil DSC

(b) Échantillon

FIGURE 4.9 – Caractérisation de la chaleur latente. Appareil DSC *Setaram µDSC evo* utilisé lors des mesures.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0060/these.pdf
© [J.P. Arzamendia Lopez], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

(a) Échantillon et banc de mesure



(b) Principe de mesure

FIGURE 4.10 – Caractérisation de la conductivité. Utilisation de la méthode des plaques chaudes gardées [1].

Ce travail a permis de mettre en évidence certains phénomènes physiques non désirés sur des matériaux potentiels et, par conséquent, de les éliminer du classement. En outre, le travail a permis une vérification des conditions de mesure pour les données de la littérature. Par la suite, les données issues de la littérature (site du *NIST*) seront utilisées pour complèter les données manquantes.

En conclusion, l'utilisation d'une base de données fiable est indispensable pour une sélection de matériaux pertinente. La surfusion présente lors de la phase de solidification pour les sels hydratés *1* et *2* est une bonne illustration d'un phénomène physique se produisant en pratique mais non décrit par les données de la littérature. Ce phénomène a conduit à disqualifier ces deux derniers matériaux, alors que leurs propriétés thermiques en termes de stockage et de puissance étaient intéressantes.

4.3.2 Classification des matériaux caractérisés à partir des indices de performance simplifiés.

L'indice de performance simplifié se base sur les valeurs de dimensionnement obtenues lors de l'établissement du cahier des charges (voir section 2.3).

Le détail de la conception et du développement de cet indice est présenté en annexe (cf. annexe A). En résumé, l'indice simplifié doit être en mesure de répondre aux deux critères de dimensionnement : la quantité d'énergie et la puissance de décharge, pour le plus petit volume possible (compacité). Dans ce cas d'étude, elle répresente la longueur du système.

$$IP^*_{simp} = \frac{2}{L^3}\frac{Q_{dim}}{\rho\Omega}\left[1 + \frac{4Bi^2Fo}{1+1/Ste}\frac{\Delta' T}{\Delta T}\right] \tag{4.34}$$

Cet indice a permis un classement, en ordre croissant de la longueur du système de stockage, des matériaux de notre base des données. Le classement obtenue à partir de cet indice pour les MCP est la suivante :

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0060/these.pdf
© [J.P. Arzamendia Lopez], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

1. Di-sulfate de sodium hydraté
2. Sel hydraté 4
3. Sel hydraté 2
4. Heneicosane
5. Eicosane
6. Paraffine 4

Les hydrates de sel se situent en première place de manière générale, suivis des paraffines. Cependant, comme nous l'avons constaté lors de la phase de caractérisation, ces hydrates de sels seront disqualifiés à cause du phénomène de surfusion lors du changement de phase. Les matériaux potentiels les mieux placés sont donc les paraffines Heneicosane et Eicosane. Cette première étude simplifiée est à confirmer par l'analyse des nombres adimensionnels.

4.3.3 Classification des MCP caractérisés à partir des nombres adimensionnels

La classification des matériaux caractérisés est établie en utilisant une cartographie (Bi/St,Ste). Le nombre $1/BiFo$ sera étudié dans un deuxième temps. La figure 4.11 montre la distribution des matériaux caractérisés à EDF pour deux épaisseurs de plaques (0.03 m et 0.04 m) et une longueur fixe (2 m). Premier constat intéressant, les plaques sont plus performantes pour des épaisseurs faibles. Ceci est facilement compréhensible en considérant que la résistance thermique des plaques est directement proportionnelle à l'épaisseur. Plus les plaques sont fines, moins la résistance au transfert de chaleur est importante.

Pour chaque distribution de matériaux, un front de Pareto existe. Le front de Pareto indique l'ensemble des solutions qui, pour une configuration géométrique donnée, fournissent les meilleurs résultats en termes d'indice de performance. Pour chaque solution du front, il n'en existe pas d'autre plus performante en terme d'indice.

Sur cette cartographie, minimiser les indices permet de maximiser la puissance de décharge. Les valeurs les plus performantes sont situées proches du point (0,0). Maximiser la puissance nécessite donc de rapprocher le plus possible les solutions proposées vers ce point (zone verte sur la figure 4.11). Les matériaux présents dans cette zone sont les plus performants en termes de Ste et Bi/St pour le système de stockage.

Le premier front de Pareto est constitué par le *Sel hydraté 2* et l'Heneicosane. Cette cartographie ne prend pas en compte le pic de transformation, d'où la présence de ce sel hydraté disqualifié dans la section précédente à cause de la surfusion lors de sa solidification. Ensuite, la puissance de décharge est vérifiée. La meilleure solution en terme de

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0060/these.pdf
© [J.P. Arzamendia Lopez], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

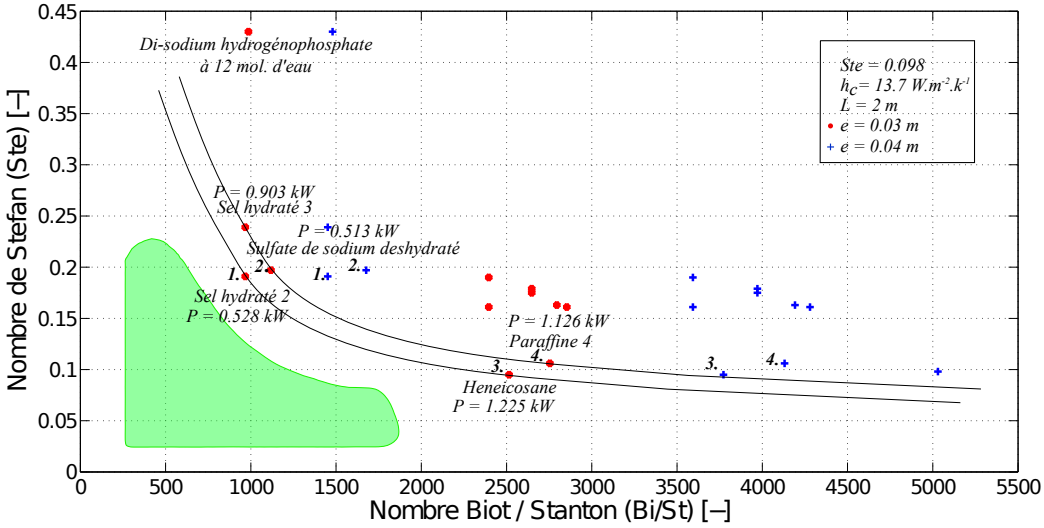


FIGURE 4.11 – Classification des matériaux MCP caractérisés au site de EDF R&D Renardières. La zone d'interêt est indiquée en vert. Pour les matériaux qui nous intéressent, un indice numérique est utilisé pour l'identifier à chaque épaisseur.

puissance est la paraffine pure Heneicosane. Il est aussi constaté la faible puissance de décharge du sel hydraté pour les raisons expliquées précédemment.

La solution optimale est donc l'Heneicosane. Ce matériau est le meilleur choix parmi ceux caractérisés. Cependant, il ne permet pas une puissance de décharge suffisante pour satisfaire à la valeur minimale de 2 kW. Le premier choix possible est d'optimiser le design du système en ajoutant des ailettes sur les surfaces d'échange pour augmenter le coefficient de convection. Il est aussi possible de satisfaire la puissance de décharge en augmentant la vitesse de l'air entrant, i.e, le débit. Cependant, la valeur du débit nécessaire dans ce cas est de 3000 m^3/h pour des surfaces d'échanges lisses. Pour des raisons techniques (bruits, dimensionnement PAC, etc.) ce débit n'est pas atteignable. La solution proposant des ailettes sur les surfaces d'échange est alors choisie. Les premières analyses d'une solution contenant des ailettes montrent la nécessité d'une quantité élevée de celles-ci (40 unités de 2 mm d'épaisseur). Cette quantité élevée augmente considérablement le coût de la solution. En conséquence, pour répondre à l'exigence de puissance, l'utilisation des matériaux architecturés est inévitable. Une solution mixte est alors conseillée. L'Heneicosane a un bon indice Ste, assuré par sa chaleur latente. Pour améliorer la performance, d'après la cartographie, il est nécessaire d'atteindre des nombres de Bi/St plus faibles.

4.3.4 Comparaison entre les deux indices utilisés

Les deux indices utilisés mettent en évidence le fort intérêt des hydrates de sels. Cependant ces matériaux sont disqualifiés par la présence de surfusion lors du changement

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0060/these.pdf
© [J.P. Arzamendia Lopez], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

de phase. Les paraffines sont donc classées de la manière suivante :

Indice simplifié	*Indices nombres adimensionnels*
1. Heneicosane	1. Heneicosane et Eicosane
2. Eicosane	2. Paraffine 4
3. Paraffine 4	3. MCP Organique 2

Les classements sont donc proches. Néanmoins, le principal avantage de l'analyse *via* les nombres adimensionnel, outre le fait que le modèle soit plus précis, est la possibilité d'établir une optimisation de la solution technique envisagée. Ce point est capital, car dans le cas d'une contrainte géométrique (exemple : géométrie fixée par le positionnement du système de stockage ou la compacité exigée par l'industriel), la puissance de décharge peut ne pas être satisfaite, même pour les meilleurs solutions en termes de MCP. L'analyse *via* les nombres adimensionnels présente alors plus de potentiel pour satisfaire notre objectif de puissance de décharge.

4.3.5 Optimisation du matériau Henei-Comp

La section précédente a permis de conclure qu'une conductivité plus importante était nécessaire. Techniquement, ceci se traduit par l'utilisation de matériaux composites ou architecturés contenant le matériau Heneicosane.

Pour élaborer ce nouveau matériau architecturé, la conductivité thermique désirée doit être spécifiée. Cette étape est très importante dans la conception du nouveau matériau, car elle définira, entre autres paramètres, la fraction de volume de matériau nécessaire pour doper la conductivité de l'Heneicosane. Ce nouveau matériau architecturé sera dénommé par la suite *Henei-Comp*.

Dans un premier temps, la cartographie pour différentes valeurs de conductivité est réalisée. La figure 4.12 montre l'évolution du Henei-Comp pour différentes valeurs de la conductivité. Les résultats se situent dans la zone d'intérêt de la figure 4.11. Il est aussi constaté figure 4.12 que le gain en puissance pour les valeurs les plus faibles de Bi/St testées (valeur de conductivité élevée) n'est pas considérable. Pour cette raison, une analyse de la puissance par rapport à ces valeurs est faite. La puissance de décharge évolue peu pour des nombres de Bi/St faibles comme constaté sur la figure 4.13. 85 % du gain en puissance est obtenue pour une conductivité de 1 W/m K. Dépasser cette valeur a peu d'intérêt car le coût de fabrication sera beaucoup plus important pour un gain en puissance minime.

En conclusion, utiliser un matériau architecturé composé d'Heneicosane dopé en conductivité jusqu'à 1 W/m K permet d'atteindre une puissance de 1.4 kW en fin de décharge. Cette valeur est encore insuffisante par rapport à la puissance nécessaire du

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0060/these.pdf
© [J.P. Arzamendia Lopez], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

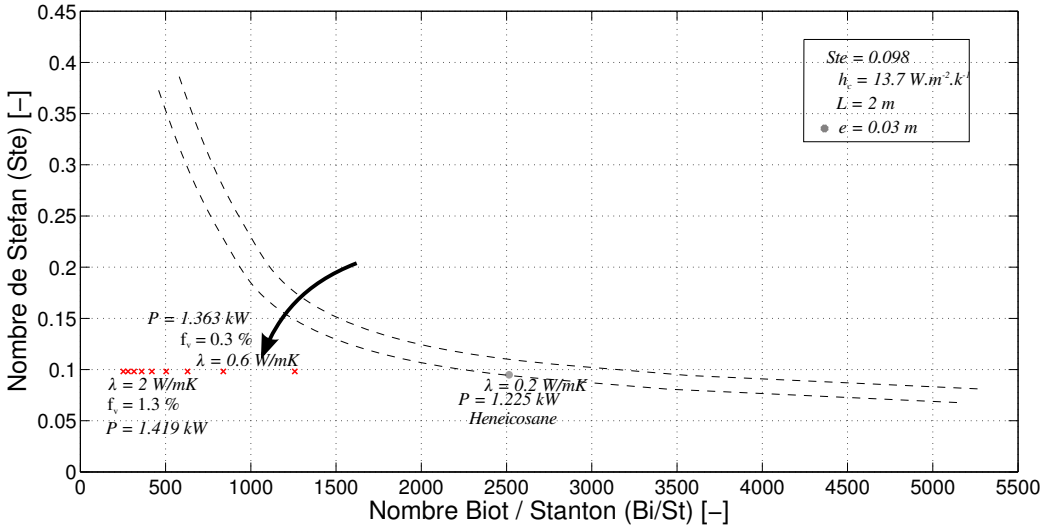


FIGURE 4.12 – Optimisation du matériau Heneicosane. Varition de la conductivité équivalente afin d'augmenter la puissance de décharge.

système. Une modification du système doit alors être envisagée.

4.3.6 Optimisation du système global

Les améliorations réalisées sur le matériau *Henei-Comp* ne suffisent pas à atteindre la puissance souhaitée en fin de décharge. Le système est alors à nouveau modifié pour satisfaire à la puissance nécessaire.

Comme montré dans les sections précédentes, le nombre $BiFo$ peut jouer un rôle important sur la puissance de décharge. Pour maximiser ce paramètre adimensionnel, le coefficient de convection est modifié. Techniquement, cela se traduit par l'utilisation d'ailettes sur les surfaces d'échange des plaques. Mais cette modification est-elle suffisante ? La figure 4.14 permet de déterminer quelle valeur de coefficient de convection est nécessaire pour satisfaire à la puissance exigée. Pour la configuration géométrique étudiée, un coefficient de convection de 28 $\mathrm{W/m^2\,K}$ est la limite inférieure pour répondre au problème, la puissance de 2 kW en fin de décharge étant alors satisfaite.

4.4 Conclusions

Cette étude a permis de choisir un matériau pour l'utilisation dans un système de stockage de chaleur de type rack. Le matériau choisi est l'Heneicosane, un matériau à changement de phase qui possède une capacité de stockage de chaleur intéressante. Cependant ce matériau n'est pas suffisant pour répondre à la contrainte de puissance. L'utilisation d'un matériau architecturé contenant de l'Heneicosane dopé en conductivité jusqu'à une

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0060/these.pdf
© [J.P. Arzamendia Lopez], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

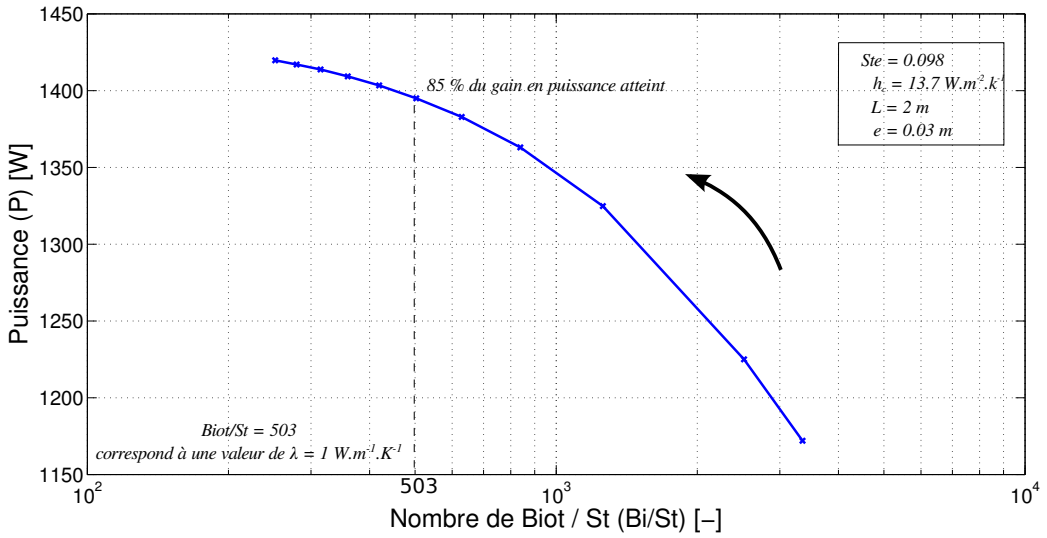


FIGURE 4.13 – Etude de la puissance en fin de période de décharge pour le Henei-Comp. La puissance en fin de décharge n'est pas satisfaite pour un matériau architecturé composé d'Heneicosane

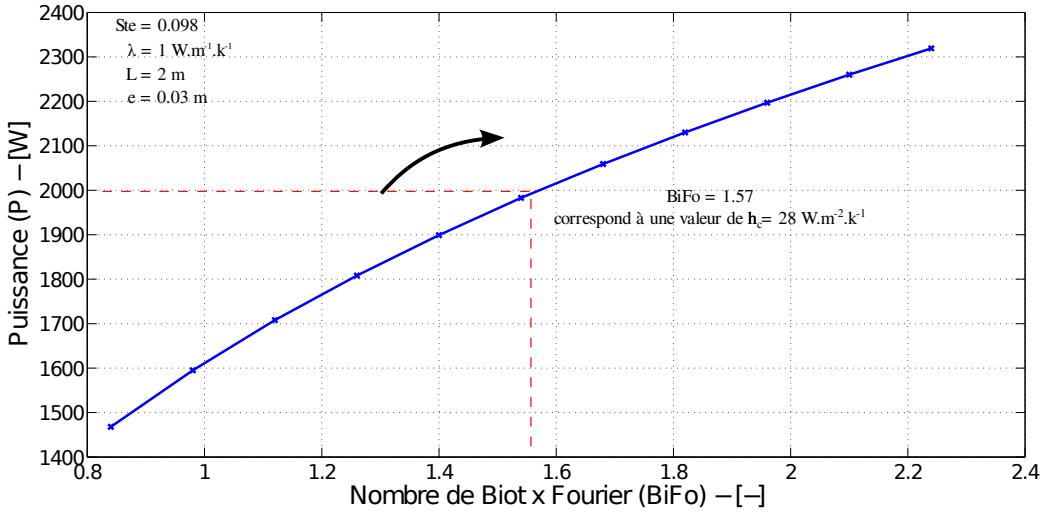


FIGURE 4.14 – Optimisation du système pour l'Henei-Comp optimisé ($\lambda = 1\ \mathrm{W\,m^{-1}\,k^{-1}}$)

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0060/these.pdf
© [J.P. Arzamendia Lopez], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

valeur de 1 W/m K est nécessaire. De plus, une amélioration du coefficient de convection est indispensable et la valeur limite inférieure pour satisfaire la contrainte de puissance est de 28 $W/m^2 K$. Ce résultat est obtenu pour une configuration système donnée de 2 m de longueur et une épaisseur des plaques de 0.03 m.

La méthodologie présentée permet donc de définir un matériau architecturé ainsi qu'une configuration système (utilisation d'ailettes) afin de satisfaire la contrainte de puissance. L'étape suivante dans le prochain chapitre consistera à obtenir les propriétés équivalentes du matériau architecturé à partir des propriétés des matériaux constituants. De plus, une modification du design pour ajout d'ailettes sera faite, pour atteindre le coefficient d'échange nécessaire.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0060/these.pdf
© [J.P. Arzamendia Lopez], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0060/these.pdf
© [J.P. Arzamendia Lopez], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

5 Conception optimale du système de stockage : application à une planche à clous

5.1 Introduction

Le chapitre précédent a permis d'établir les propriétés matériaux et les propriétés fonctionnelles nécessaires pour satisfaire la puissance de décharge de 2 kW. Au fil de ce chapitre nous nous proposons d'expliquer, à travers un exemple concret de matériau architecturé, une planche à clous, comment atteindre cet objectif.

Une des principales conclusions du chapitre précédent est la faible fraction de volume de matrice conductrice nécessaire pour satisfaire le besoin en conductivité équivalente. Ce point permet d'envisager des solutions architecturales de construction simple telles que des plaques sandwichs contenant en leur cœur des mousses, des nids d'abeilles ou des clous imprégnés de MCP. Cette dernière solution architecturale a été sélectionnée pour réaliser une étude expérimentale et numérique de la conductivité équivalente d'un matériau architecturé.

La section 5.2 présente la conception de la solution architecturale "planche à clous".

La section 5.3 présente le banc expérimental utilisé pour la détermination de la conductivité équivalente de la plaque architecturée, déduite de mesures de flux de chaleur traversant la plaque architecturée.

La section 5.4 présente un modèle numérique développé pour calculer la conductivité équivalente de la plaque composite. Ce modèle est basé sur un calcul par éléments finis et validé par les résultats obtenus lors de la caractérisation expérimentale.

L'autre point important retenu du chapitre précédent est la nécessité des ailettes. Dans la section 5.5 une étude de dimensionnement d'ailettes est faite afin d'augmenter le coefficient de convection sur les surfaces d'échange des plaques sandwichs. Le design du système est donc modifié en ce qui concerne les surfaces des plaques sandwichs.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0060/these.pdf
© [J.P. Arzamendia Lopez], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

5.2 Exemple concret de matériau architecturé : la planche à clous

La conductivité à obtenir pour le matériau architecturé étant relativement faible (de l'ordre de 1 W/m K), des architectures simples peuvent être envisagées, comme l'utilisation de clous traversant une plaque du type "sandwich" contenant du MCP à cœur (figures 5.1 et 5.2).

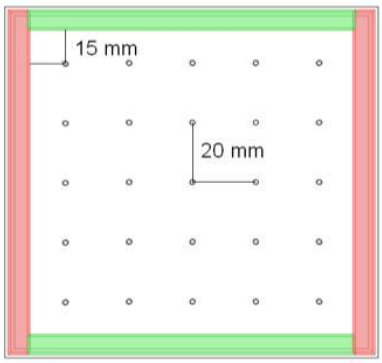
Le prototype est constitué de deux parties avec des fonctions très distinctes : un conteneur (confinement) et un cœur stockeur d'énergie (stockage). D'une part, le conteneur est conçu avec deux plaques métalliques (Dural ou 2017) de 5 mm d'épaisseur constituant les surfaces d'échange thermique (dimensions de surfaces : 280 x 280 mm^2) entre l'air traversant le système de stockage et le cœur stockeur d'énergie de la plaque. Quatre barres latérales en plexiglas (PMMA) de 32 mm d'épaisseur sont nécessaires pour confiner entièrement le cœur. La plaque architecturée a donc une épaisseur totale de 42 mm. Ces pièces sont assemblées par collage, en utilisant de la colle polyuréthane flexible et l'étanchéité du conteneur est faite avec du silicone.

Propriété	Symbole	Valeur	Unité
Temp. fusion	T_f	41	°C
Chaleur spécifique	C_p	1.8	$kJ\,kg^{-1}\,K^{-1}$
Chaleur latente	H	147	$kJ\,kg^{-1}$
Masse volumique	ρ	760	$kg\,m^{-3}$
Conductivité	λ	0.18	$W\,m^{-1}\ K^{-1}$

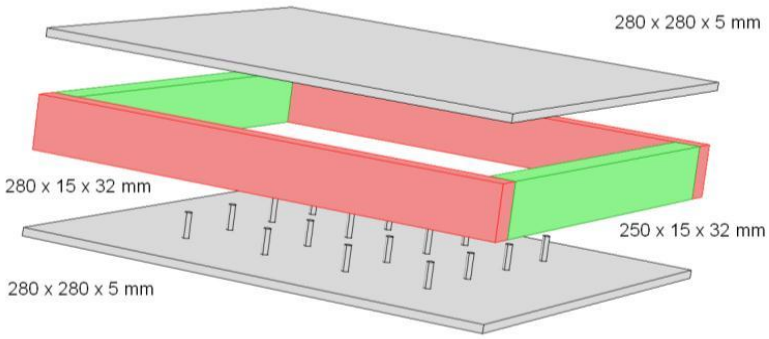
TABLEAU 5.1 – Propriétés de la paraffine utilisée comme matériau actif

D'autre part, le cœur est constitué de deux composants: un composant actif pour le stockage (le MCP) et un composant métallique pour augmenter la conductivité. En ce qui concerne la partie active, le MCP choisi a été la paraffine RT-42. Le volume de paraffine contenu dans le prototype est de 250 x 250 x 32 mm^3 et les propriétés thermiques du matériau actif sont données au tableau 5.1. Pour la matrice conductrice, les clous sont assemblés sur une des deux surfaces d'échange. Des trous sont percés sur la plaque métallique pour venir insérer les clous. L'assemblage clous/plaque est réalisé par collage en utilisant de la colle type "SuperGlue". Les clous sont aussi en Dural ou 2017 ayant les dimensions suivantes : un diamètre de 4 mm et une longueur de 30 mm. La quantité de clous introduits est de 144 distribués selon la figure 5.1a (l'assemblage clous/plaque peut être visualisé sur la figure 5.2a).

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0060/these.pdf
© [J.P. Arzamendia Lopez], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés



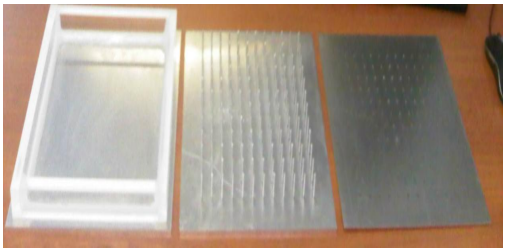
(a) Espacement entre les clous métalliques



(b) Dimensions du prototype planche à clous

FIGURE 5.1 – Schéma du prototype ”planche à clous”. Dimensions et espacement entre les clous.

(a) Détail du cœur de la planche contenant des clous



(b) Élements d’assemblage du prototype ”planche à clous”

FIGURE 5.2 – Conception du prototype ”planche à clous”.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0060/these.pdf
© [J.P. Arzamendia Lopez], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

5.3 Caractérisation de la conductivité équivalente de la planche à clous

La conductivité équivalente de la plaque architecturée est déduite des mesures de flux de chaleur traversant la plaque. Ces mesures fluxmétriques ont été réalisées au Centre Scientifique et Technique du Bâtiment ($CSTB$) à Grenoble, grâce à un banc échangeur (figure 5.3b) qui permet d'étudier non seulement le flux de chaleur traversant la plaque, mais aussi la cinétique de stockage des MCP [5]. Ce banc expérimental est décrit dans la section 5.3.1. La section suivante 5.3.2 présente les résultats obtenus en terme de flux de chaleur et le calcul de la conductivité équivalente de la plaque architecturée.

5.3.1 Description du banc expérimental

Le banc expérimental est constitué de deux échangeurs dans lesquels circule de l'eau régulée en température. La régulation de la température d'eau est réalisée grâce à deux bains thermostatés. Ces échangeurs viennent prendre en sandwich l'échantillon à caractériser, imposant les températures à la surface du composant (figure 5.3a). Pour la mesure de flux traversant l'échantillon, des fluxmètres (Marque : CAPTEC, Type : T integré, Sensibilité : 3 $mV/W.m^2$ pour un capteur de 1 cm^2) sont répartis sur les surfaces d'échange (figures 5.4a et 5.4b). Ces fluxmètres sont équipés de thermocouples afin de connaître aussi les températures à l'endroit des mesures de flux.

Le nombre total de fluxmètres par surface d'échange de l'échantillon est de 3. Pour éviter un écrasement des capteurs par les échangeurs, ils sont protégés par une fine couche de néoprène placée entre l'échangeur et l'échantillon. Aussi, pour éviter des pertes thermiques, les autres faces de l'échantillon sont isolées par au moins 15 cm d'épaisseur de polystyrène extrudé. Une centrale d'acquisition assure la numérisation et l'enregistrement des mesures.

Le principe de mesure consiste à imposer des températures en surface (T_1 face percée et T_2 face pleine) pour créer un gradient de température et mesurer le flux de chaleur traversant la plaque en régime permanent. Certaines propriétés du MCP pouvant évoluer avec la température, les mesures on été réalisées à l'état solide et à l'état liquide.

Les protocoles de mesure établis sont les suivants :

Mesure avec le MCP à l'état solide :

— 1^{er} cas : $T_1 = 10$ °C et $T_2 = 30$ °C

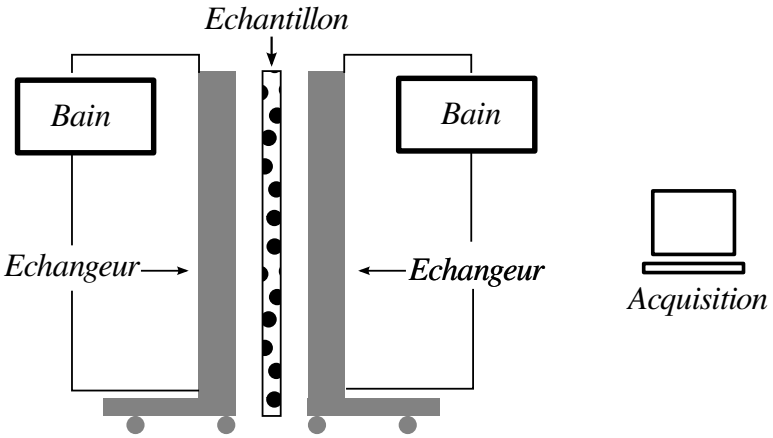
— 2^{me} cas : $T_1 = 20$ °C et $T_2 = 30$ °C

Mesure avec le MCP à l'état liquide :

— 3^{me} cas : $T_1 = 45$ °C et $T_2 = 55$ °C

— 4^{me} cas : $T_1 = 50$ °C et $T_2 = 60$ °C

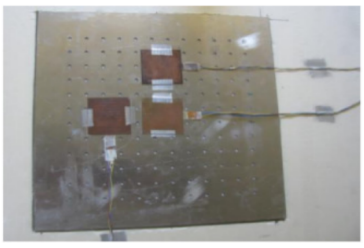
Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0060/these.pdf
© [J.P. Arzamendia Lopez], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés



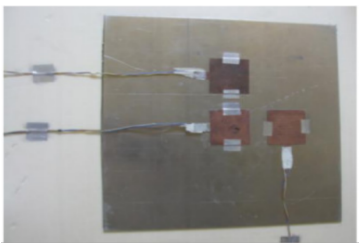
(a) Schéma de l'expérimentation

(b) Le banc expérimental en fonctionnement

FIGURE 5.3 – Banc d'expérimentation pour les mesures fluxmétriques sur la planche à clous contenant du MCP



(a) Fluxmètres sur la face percée



(b) Fluxmètres sur la face pleine

FIGURE 5.4 – Installation des fluxmètres sur les surfaces d'échange de la planche à clous

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0060/these.pdf
© [J.P. Arzamendia Lopez], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

Mesure		1	2	3	4
Flux moyen	(W/m^2)	150.1 ± 2.7	77.1 ± 2.3	165.2 ± 4.1	165.2 ± 5.4
T_1 moyenne	(°C)	28.2 ± 0.1	29.1 ± 0.1	53.1 ± 0.2	58.0 ± 0.2
T_2 moyenne	(°C)	11.8 ± 0.1	20.7 ± 0.1	46.7 ± 0.2	51.7 ± 0.2

TABLEAU 5.2 – Résultats obtenus lors de la campagne de mesures. Valeurs moyennées pour tous les capteurs

Mesure		1	2	3	4
R_{moy}	(m^2 K/W)	0.110 ± 0.004	0.109 ± 0.004	0.039 ± 0.001	0.038 ± 0.002
λ_{moy}	(W/m K)	0.382 ± 0.014	0.387 ± 0.014	1.081 ± 0.013	1.091 ± 0.044

TABLEAU 5.3 – Conductivité équivalente obtenue avec les flux de chaleur mesurés

5.3.2 Résultats des mesures fluxmétriques

Les mesures de flux de chaleur sont résumées dans le tableau 5.2. Les valeurs obtenues sont moyennées sur tous les capteurs installés. De même, les températures mesurées sur les surfaces d'échange sont moyennées.

Les données obtenues permettent de déduire la conductivité équivalente. Dans un premier temps la résistance thermique de l'échantillon est calculée :

$$R_{moy} = \frac{T_{1moy} - T_{2moy}}{\phi_{moy}} \qquad (5.1) \qquad R_{centre} = \frac{T_{1moy} - T_{2moy}}{\phi_{centre}} \qquad (5.2)$$

La moyenne des températures est effectuée sur une période de trente minutes. Les incertitudes sur la résistance thermique sont :

$$\Delta R_{moy} = R_{moy}\frac{\Delta\phi_{moy}}{\phi_{moy}} \qquad (5.3) \qquad \Delta R_{centre} = R_{centre}\frac{\Delta\phi_{centre}}{\phi_{centre}} \qquad (5.4)$$

Enfin, la conductivité équivalente homogène peut être déduite grâce à l'expression suivante :

$$\lambda = \frac{e_{totale}}{R_{moy}} \qquad (5.5) \qquad \Delta\lambda = \lambda\frac{\Delta R_{moy}}{R_{moy}} \qquad (5.6)$$

Les résultats des calculs de conductivité équivalente sont résumés au tableau 5.3. Il peut être distingué clairement une grande disparité entre les mesures réalisées à l'état solide (mesures 1 et 2) et à l'état liquide (mesures 3 et 4). Si on considère une conductivité à l'état solide (λ_s) de 0.39 W/m K et une conductivité à l'état liquide (λ_l) de 1.08 W/m K, la différence entre les deux mesures est de de 0.69 W/m K, ce qui correspond à 64 % de la conductivité liquide λ_l. Dans la littérature, la différence de conductivité entre les

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0060/these.pdf
© [J.P. Arzamendia Lopez], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

deux états est de l'ordre de 0.05 W/mK pour les paraffines. Deux explications sont envisagées pour ces résultats discordants. La première est la présence du phénomène de convection à l'état liquide. En effet, lors des mesures effectuées, l'échantillon est positionné verticalement dans le banc expérimental (position imposée par le banc de mesure). Cette position peut favoriser ce phénomène et augmenter ainsi le transfert de chaleur à l'intérieur de la plaque à cause de la diminution de la résistance thermique équivalente de la plaque. La deuxième explication est un phénomène présent lors de la solidification du MCP pour cette architecture. Une fois le MCP solidifié, il est constaté que de l'air est emprisonné autour des clous. L'air est connu pour ses propriétés isolantes dues à sa très faible conductivité. Il n'est pas donc étonnant que l'air présent autour des clous dans l'échantillon dégrade de manière importante la fonction de la matrice conductrice.

Pour avoir une idée plus claire sur les résultats obtenus lors de la campagne de caractérisation, un calcul numérique basé sur la méthode des éléments finis a été réalisé dans la section suivante 5.4.

5.3.3 Conclusions

Cette section a présenté le banc expérimental utilisé pour la caractérisation de la conductivité équivalente du matériau architecturé dit "planche à clous". Les résultats obtenus montrent une grande disparité de la conductivité en fonction de l'état du cœur de l'échantillon : solide ou liquide. La différence entre les mesures est de 64 % de la conductivité liquide. Deux explications sont proposées pour l'écart de conductivité trouvé : le phénomène de convection lors de la mesure à l'état liquide et la présence d'air autour des clous emprisonné par le MCP à l'état solide. La section suivante (section 5.4) présente une analyse numérique de la conductivité équivalente pour clarifier cet écart de mesure.

5.4 Analyse numérique de la conductivité équivalente

Pour l'analyse numérique de la conductivité équivalente de la planche à clous, le logiciel *Abaqus 6.11* [2] avec le solveur *Standart* (solveur avec un schéma d'intégration implicite) a été utilisé. Le protocole d'expérimentation en régime permanent a été simulé afin de comparer la conductivité équivalente numérique et expérimentale (les mêmes conditions limites sont utilisées : températures imposées sur les surfaces d'échange). De plus, un calcul analytique utilisant des modèles de conductivité équivalente a été ajouté à la comparaison.

La méthode utilisée pour l'analyse numérique est la méthode des éléments finis. Cette méthode permet de résoudre de manière discrète une équation aux dérivées partielles (EDP). La fonction étudiée est définie sur un domaine qui comporte des conditions aux limites garantissant l'existence et l'unicité de la solution.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0060/these.pdf
© [J.P. Arzamendia Lopez], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

Conditions	Symbole	Valeur	Unité
Temp. Face clous	T_1	20	°C
Temp. Face pleine	T_2	30	°C
Matériau stockeur	RT-42	$\lambda = 0.18$	W/m K
Matériau conducteur	Dural	$\lambda = 140$	W/m K

TABLEAU 5.4 – Conditions de simulations à l'état solide. Étude en régime permanent et propriétés constantes et homogènes.

(a) Coupe de la planche à clous. Les points noirs correspondent aux clous installés.

(b) Simplification d'étude : Motif final correspondant à 1/4 d'une zone avec 4 clous.

FIGURE 5.5 – Domaine d'étude pour l'analyse numérique de la conductivité équivalente de la planche à clous

La présence de différentes symétries dans l'échantillon a permis de simplifier l'étude et d'établir un motif caractéristique minimal à analyser. Dans le plan (x,y), ce motif est constitué d'un quart de clou et de MCP (figure 5.5b). Suivant l'épaisseur (axe z), toutes les parties de la plaque ont été prises en compte (conteneur, partie architecturée et MCP résiduel). Une étude de dépendance au maillage de la simulation a été effectuée afin d'obtenir un résultat fiable (figure 5.6). Le critère dont on analyse la convergence est le flux de chaleur.

Le champ de température obtenu est présenté figure 5.7. Le flux de chaleur est transporté principalement par les clous, confirmant sa fonction de matrice conductrice. Le flux de chaleur obtenu est de 0.0228 W. Ceci implique une conductivité équivalente de 0.95 W/m K. Cette valeur obtenue est plus proche de la mesure à l'état liquide, la différence étant de l'ordre de 10 % avec celle-ci. L'hypothèse concernant l'impact isolant de l'air autour des clous se confirme. La mesure à l'état solide présente un écart très important avec le résultat numérique.

L'écart entre la mesure expérimentale à l'état liquide et le résultat numérique peut être expliqué par le phénomène de convection non considéré lors des simulations numériques. Comme nous l'avons déjà précisé, le fait d'avoir positionné l'échantillon de manière verticale favorise la convection. Pour réduire ce phénomène il est conseillé de réaliser les mesures expérimentales en positionnant l'échantillon à l'horizontale.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0060/these.pdf
© [J.P. Arzamendia Lopez], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

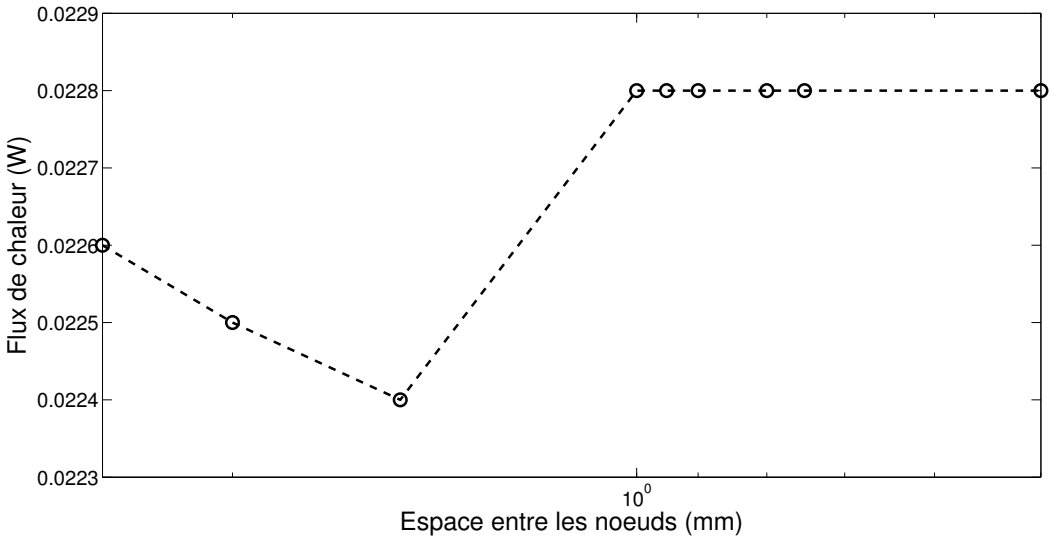


FIGURE 5.6 – Analyse de la convergence des résultats numériques de flux de chaleur pour un motif de la planche à clous. Convergence atteinte pour une valeur de flux de chaleur de 0.0228 W

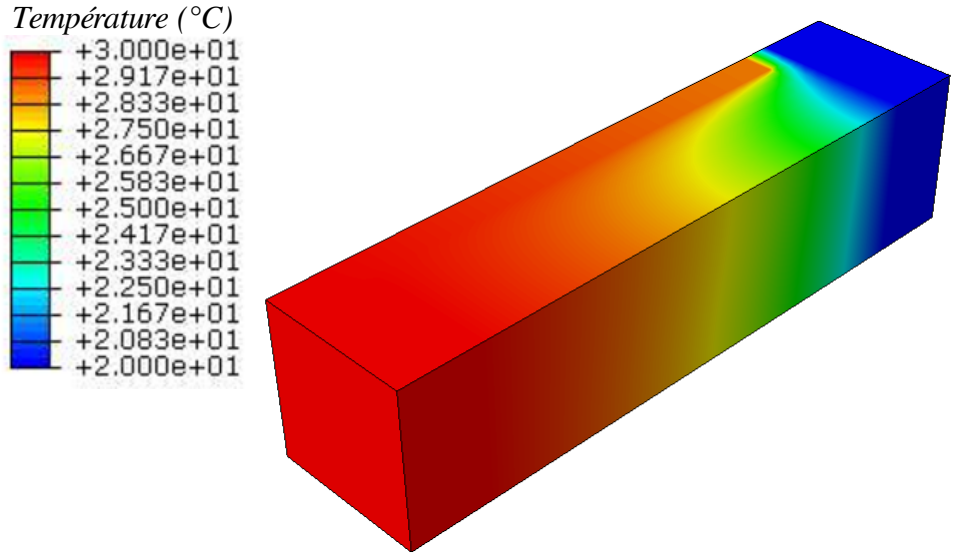
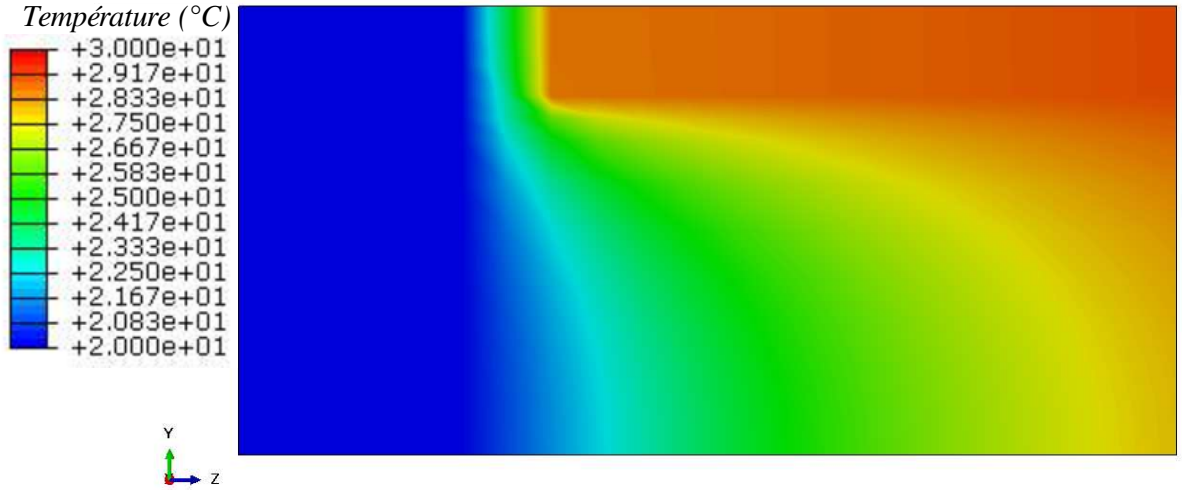


FIGURE 5.7 – Distribution de température dans un motif élémentaire d'étude de la planche à clous. Étude en régime permanent, les température sur les surfaces d'échange sont imposées ($T_1 = 30\,℃$ (rouge), $T_2 = 20\,℃$ (bleu)).

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0060/these.pdf
© [J.P. Arzamendia Lopez], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

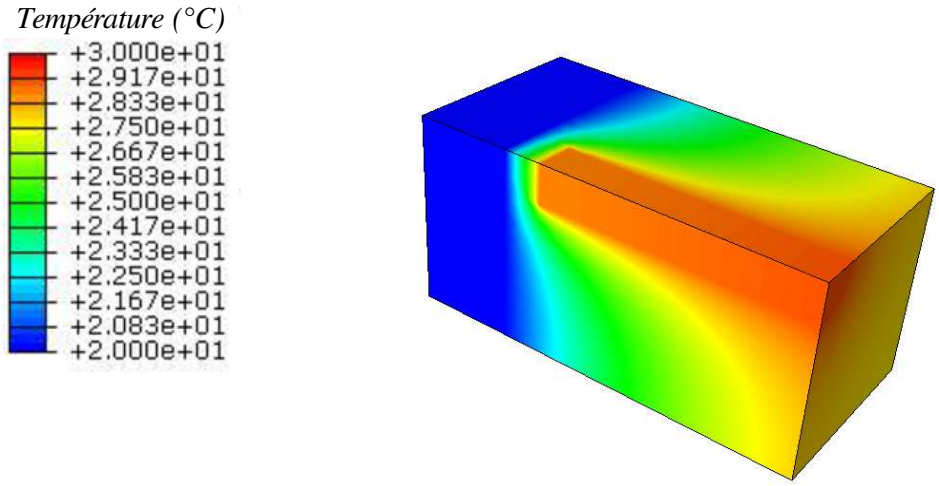


(a) Vue latérale du motif côté clous. La chaleur transportée par le clous favorise le réchauffement de la plaque. Le clou ne traversant pas complètement la plaque, il est constaté que la quantité restante de MCP joue un rôle d'isolant.

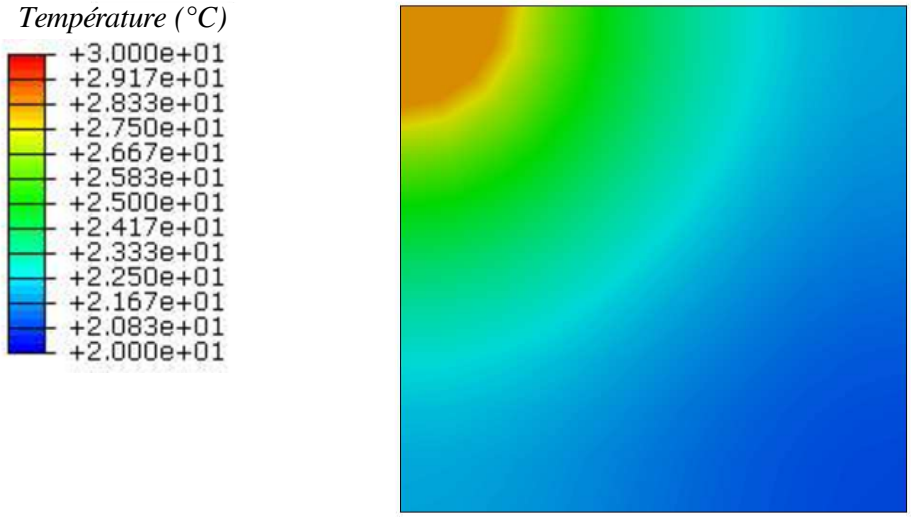
(b) Vue latérale du côté opposé. La distribution de température est plus uniforme.

FIGURE 5.8 – Influence de la matrice conductrice (clous) sur le champ de température en vues latérales du motif élémentaire d'étude.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0060/these.pdf
© [J.P. Arzamendia Lopez], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés



(a) Coupe du motif élémentaire d'étude, vue en 3D. Dans cette image, le clou est mis en évidence. Le transport de chaleur est assuré quasi totalement par la matrice conductrice.



(b) Coupe transversale de motif élémentaire d'étude. La distribution de température est circulaire à partir de la surface latérale du clou.

FIGURE 5.9 – Coupes du motif élementaire d'étude

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0060/these.pdf
© [J.P. Arzamendia Lopez], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

En dernier lieu, une étude analytique des transferts thermiques dans la planche à clous a été faite. Ce calcul est basé sur un modèle à résistance équivalente par analogie électrique.

Le motif étudié a été divisée en 3 parties distinctes : le conteneur (les deux plaques en *Dural*), la partie architecturée (clous $+MCP$) et une partie de MCP résiduel (couche d'approximativement 5 mm). La résistance équivalente du motif est alors égale à la somme des résistances de chaque partie (résistances en série) :

$$R_T = R_1 + R_2 + R_3 + R_4 \tag{5.7}$$

— R_1 et R_4 résistances thermiques du conteneur métallique (négligée).
— R_2 résistance thermique de la partie architecturée (clous + MCP)
— R_3 résistance thermique de la partie MCP seul

Les résistances thermiques du conteneur (R_1 et R_4) et du MCP seul (R_3) sont les suivantes :

$$R_4 = \frac{e_c}{\lambda_{alu}.S} \tag{5.8}$$

$$R_3 = \frac{e_{mcp}}{\lambda_{mcp}.S} \tag{5.9}$$

La section qui correspond à la partie architecturée a été considérée comme une association de résistances en parallèle. Analytiquement on a :

$$\frac{1}{R_2} = \frac{1}{R_{clous}} + \frac{1}{R_{2mcp}} \tag{5.10}$$

$$\frac{\lambda_2.S}{e_2} = \frac{\lambda_c.S_c}{e_c} + \frac{\lambda_{mcp}.S_{mcp}}{e_{mcp}} \tag{5.11}$$

L'épaisseur étant la même pour les MCP et les clous ($e_2 = e_c = e_{mcp}$), l'expression précedente peut être simplifiée :

$$\lambda_2 = \lambda_c.\frac{S_c}{S} + \lambda_{mcp}.\frac{S_{mcp}}{S} \tag{5.12}$$

La conductivité équivalente de la partie architecturée est numériquement :

$$\lambda_2 = 140 \times 144 \times \frac{\pi.2^2}{250 \times 250} + 0.18 \times (1 - 144 \times \frac{\pi.2^2}{250 \times 250}) \tag{5.13}$$

$$\lambda_2 = 4.23 W/m.K \tag{5.14}$$

La conductivité équivalente du motif est alors calculée en sachant que $S_T = S_c = S_{mcp} = S_2$:

$$\frac{e_T}{\lambda_T.S_T} = \frac{e_{mcp}}{\lambda_{mcp}.S_{mcp}} + \frac{e_2}{\lambda_2.S_2} \tag{5.15}$$

$$\lambda_T = 1.03 W/m.K \tag{5.16}$$

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0060/these.pdf
© [J.P. Arzamendia Lopez], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

La conductivité équivalente analytique calculée à partir d'une analogie électrique pour des résistances thermiques est inférieure à la valeur expérimentale obtenue à l'état liquide, mais très proche de celle-ci. La différence entre les deux résultats est de 5 %. Ce résultat analytique n'est pas loin non plus du résultat numérique (5 % de différence). Une bonne concordance entre les différentes méthodes utilisées est alors trouvée. Pour affiner la précision, une prise en compte du phénomène de convection est alors nécessaire (surtout pour le modèle numérique).

En conclusion, ce calcul analytique peut être utilisé pour déterminer la conductivité équivalente d'un matériau architecturé ayant cette configuration (matrice conductrice : clous). Ce calcul a été validé par mesure expérimentale et comparé avec des résultats numériques. Tous les résultats concordent avec un écart de $\pm$ 0.08 W/m K.

Cas de l'Heneicosane

Nous utilisons donc la formulation analytique pour déterminer la conductivité équivalente d'une planche à clous contenant de l'Heneicosane. La conductivité de l'Heneicosane est de 0.2 W/m K, valeur très proche de la conductivité du RT-42. La conductivité équivalente de la planche à clous contenant ce MCP est de :

$$\lambda_{eq} = 1 \mathrm{W/m\,K} \tag{5.17}$$

La planche à clous contenant le meilleur MCP potentiel a une conductivité équivalente de 1 W/m K. Cette valeur permet de satisfaire l'objectif exprimé à la section 4.3.5. Ce matériau architecturé est alors une solution envisageable en termes de conductivité équivalente. Cependant, comme déjà vu auparavant, une conductivité équivalente plus élevée ne suffit pas. Pour répondre à nos objectifs et contraintes, le coefficient de convection du système doit aussi être amélioré. Ce point sera traité dans la section suivante.

5.5 Utilisation des ailettes

Les ailettes sont utilisées afin d'augmenter le transfert de chaleur entre l'air et les surfaces lisses des plaques architecturées. Les ailettes sont considérées comme des extensions des surfaces d'échange et l'analyse de leur efficacité nécessite la détermination du flux de chaleur associé à celles-ci.

Dans le chapitre précedent (chapitre 4, section 4.3.6) a été défini le coefficient de convection nécessaire pour satisfaire nos objectifs pour les surfaces lisses de la plaque composite : $h_c = 30$ W/m^2 K. Les ailettes sont donc dimensionnées afin de satisfaire cette valeur. Les points clés de la conception des ailettes sont donc : la géométrie (épaisseur, largeur, longueur) et le nombre d'ailettes.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0060/these.pdf
© [J.P. Arzamendia Lopez], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

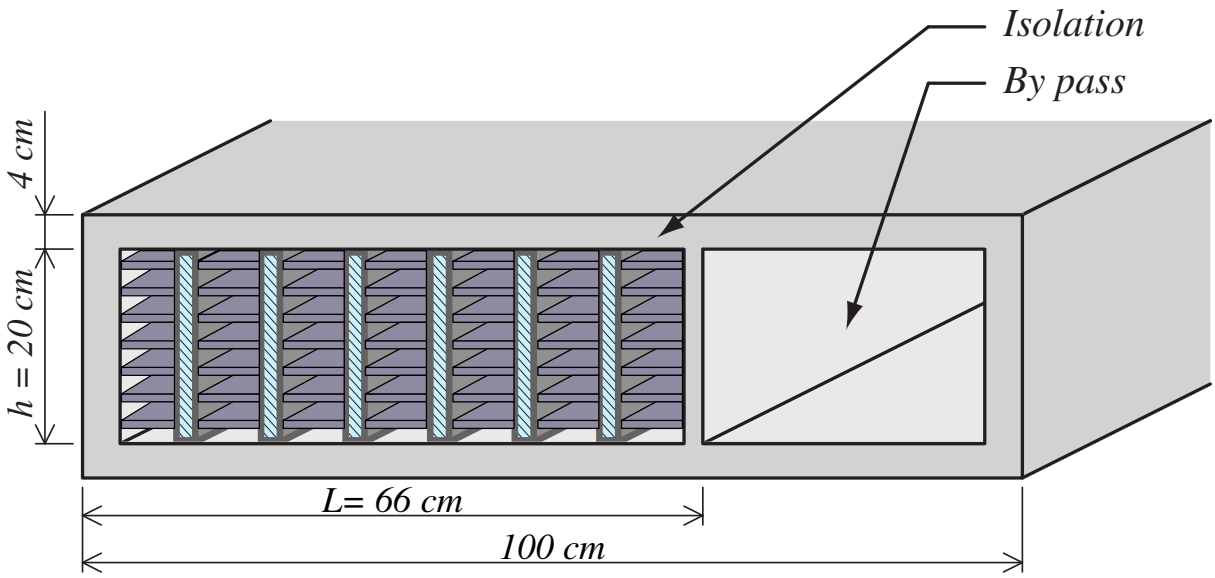


FIGURE 5.10 – Système de stockage avec des ailettes sur les surfaces d'échange des plaques architecturées

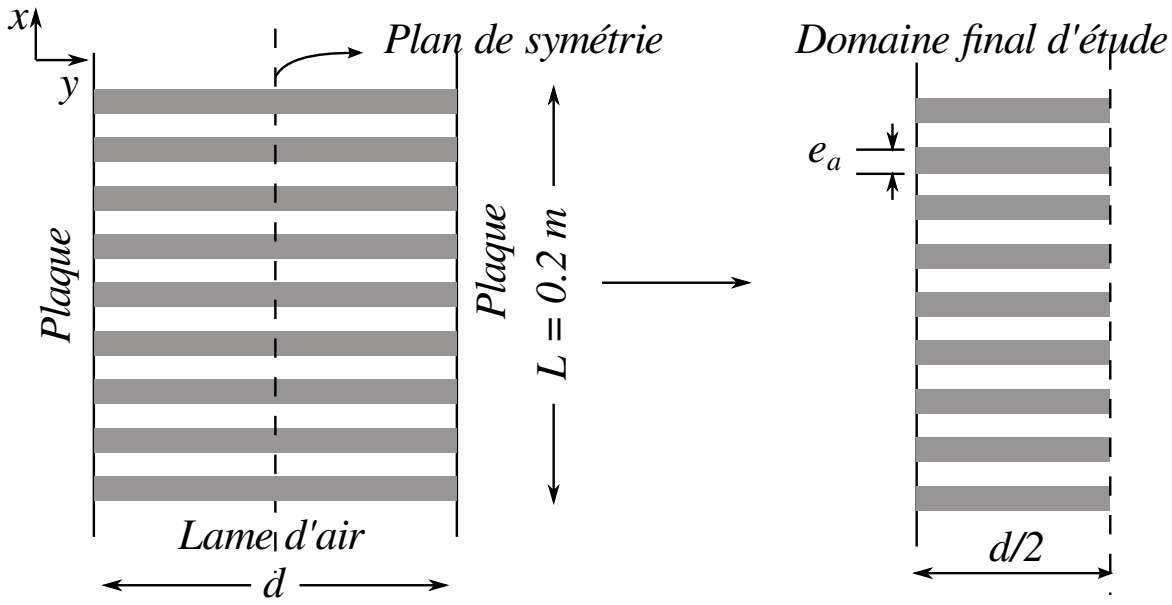


FIGURE 5.11 – Analyse des ailettes. Domaine d'étude

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0060/these.pdf
© [J.P. Arzamendia Lopez], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

Le schéma itératif de recherche d'une configuration avec ailettes dont le transfert de chaleur serait équivalent à celui d'une surface lisse (S_1) avec un coefficient d'échange de 30 W/m^{2}K (h_1) est le suivant :

1. Définition de la géométrie des ailettes :
   - définition de l'épaisseur de l'ailette (les autres paramètres étant fixés par les dimensions du système)
   - définition du nombre (N_{ail}) d'ailettes à intégrer dans les lames d'air du système

2. Calcul du coefficient d'échange pour cette configuration avec ailettes :
   - calcul du débit entre les ailettes, déduction de la vitesse d'air

$$debit_a = \frac{debit_{lamme-air}}{(N_{ailettes}+1)} \quad (5.18) \qquad v = \frac{debit_a}{S_{tranv.-entre-ailettes}} \quad (5.19)$$

   - calcul du nombre de *Reynolds* à partir de la vitesse d'air entre les ailettes. Détermination du type d'écoulement : turbulent ou laminaire.

$$Re_{D_h} = \frac{\rho v D_h}{\mu} \quad (5.20) \qquad D_h = \frac{4A_{transv}}{P_{erim.}} \quad (5.21)$$

   - calcul du nombre de *Nusselt* (dépend du type d'écoulement, utilisation de la corrélation de *Colburn* dans le cas turbulent) et déduction du coefficient de convection

$$Nu_D = 0.023 Re_{D_h}^{4/5} Pr^{1/3} \quad (5.22) \qquad h_{ail} = \frac{\lambda}{D_h} Nu_D \quad (5.23)$$

3. Calcul de l'efficacité d'une ailette
   - Hypothèses : Conduction unidirectionnelle (suivant $\overrightarrow{y}$) ; régime permanent ; conductivité constante et homogène ; transfert radiatif négligé ; pas de génération d'énergie interne ; domaine d'étude : moitié d'une ailette (symétries).
   - En appliquant le théorème de la conservation de l'énergie pour le domaine d'étude d'une demi ailette :

$$\varphi_{cond}(y).S_{Transv} = \varphi_{cond}(y+dy).S_{Transv} + h(T(y)-T_a)pdy \quad (5.24)$$

$$\frac{d\varphi}{dy} = \frac{hp}{S_{transv}}(T_a - T(y)) \quad (5.25)$$

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0060/these.pdf
© [J.P. Arzamendia Lopez], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

$$\frac{-\lambda d^2T}{dy^2} - \frac{hp}{S_{transv}}(T_a - T(y)) = 0 \tag{5.26}$$

Pour simplifier le problème on introduit

$$\theta(y) = T(y) - T_a \tag{5.27}$$

$$z = \sqrt{\frac{hp}{\lambda S_{Transv}}} \tag{5.28}$$

L'expression finale est donc :

$$\frac{d^2\theta}{dy^2} - z^2\theta = 0 \tag{5.29}$$

La résolution de cette équation permet de connaître la distribution de la température le long de l'ailette (voir [50]). La solution de l'équation différentielle est du type :

$$\theta = Ae^{(zy)} - Be^{(-zy)} \tag{5.30}$$

Les conditions limites imposent :

$$\varphi(y = d/2) = 0 \tag{5.31}$$

$$T(y = 0) = T_b \tag{5.32}$$

d'où

$$A = Be^{(-2zd/2)} \tag{5.33}$$

$$B = \frac{T_b - T_a}{1 + e^{-2zd/2}} \tag{5.34}$$

La température est donc connue le long de l'ailette. Le flux de chaleur sortant de l'ailette peut donc être déterminé. On déduit alors l'efficacité de l'ailette :

$$\eta_f = \frac{tanh(zd/2)}{zd/2} \tag{5.35}$$

4. Calcul de la surface totale d'échange incluant les ailettes et la base restante de la surface de la plaque composite.

$$S_T = N_{ail}S_{sail} + S_b \tag{5.36}$$

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0060/these.pdf
© [J.P. Arzamendia Lopez], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

5. Calcul de l'efficacité globale de la surface d'échange

$$\eta_0 = 1 - \frac{N_{ail} S_{sail}}{S_T}(1 - \eta_f) \tag{5.37}$$

6. Comparaison de la nouvelle configuration (h_{ail}, S_T, η_0) par rapport au cahier de charges (h_1, S_1).

Ce calcul itératif permet de définir un couple (Épaisseur ailette, Nombre d'ailettes) permettant le transfert de chaleur nécessaire. Pour le système de stockage étudié ($l = 2$ m, $L = 0.2$ m, $e_T = 0.66$ m) le couple solution proposé est le suivant : 3 mm d'épaisseur et 20 unités/m. L'écoulement reste en régime turbulent avec cette configuration.

5.6 Conclusions

Ce chapitre a été consacré à la conception d'un matériau architecturé contenant du MCP et à une optimisation du design du système de stockage afin de répondre aux besoins exprimés lors du chapitre précedent.

La première partie de ce chapitre correspond à la conception du matériau architecturé choisi. La valeur de conductivité mise en évidence lors du chapitre précedent a permis l'utilisation d'une architecture simple. Des clous traversant le cœur d'une plaque sandwich contenant du MCP ont été utilisés comme matrice conductrice. La caractérisation de cette plaque architecturée a permis de dégager deux résultats principaux :

— une forte disparité entre les résultats obtenus pour la conductivité thermique équivalente à l'état solide (0.39 W/m K) et à l'état liquide (1.08 W/m K) ;
— si les mesures à l'état liquide se confirment, la solution répondra effectivement aux cahier des charges ($\lambda_{souhaite} = 1$ W/m K).

Afin de comprendre les résultats de la caractérisation une étude numérique a été réalisée par la méthode des éléments finis. La conductivité obtenue numériquement est de 0.95 W/m.K. Ces résultats ont permis de confirmer les hypothèses faites lors de l'analyse des résultats de caractérisation : de l'air est encapsulé autour des clous par le MCP lors de la solidification de celui-ci, réduisant la conductivité équivalente du matériau architecturé ; de plus, un phénomène de convection est présent lors des mesures à l'état liquide (phénomène non pris en compte lors des simulations numériques). Enfin, le calcul analytique par analogie électrique a été validé par les mesures expérimentales et les résultats numériques. Ce calcul a été utilisé pour confirmer la conductivité équivalente du matériau architecturé contenant de l'Heneicosane: 1 W/m K. Le matériaux proposé répond effectivement au cahier des charges établi.

La deuxième partie du chapitre a proposé une modification des surfaces d'échange de la plaque architecturée pour augmenter le coefficient de convection du système. Une méthode

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0060/these.pdf
© [J.P. Arzamendia Lopez], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

itérative de calcul proposant un couple (nombre d'ailettes, géometrie d'ailettes) est mis en œuvre. La solution proposée consiste en 20 unités/m d'ailettes de 3 mm d'épaisseur pour le système étudié.

En conclusion, les modifications apportées au système en termes de matériau et design permettent de répondre aux objectifs établis précédemment.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0060/these.pdf
© [J.P. Arzamendia Lopez], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0060/these.pdf
© [J.P. Arzamendia Lopez], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0060/these.pdf
© [J.P. Arzamendia Lopez], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

Conclusions générales et perspectives

Conclusion

Ce travail de recherche a été entrepris dans le cadre de la réduction des pics journaliers d'appel en puissance de la courbe de charge du réseau électrique (objectif global). Ces pics se situent principalement entre 18h et 20h et sont la conséquence d'une augmentation de la consommation électrique. Le stratégie proposée dans ces travaux pour atteindre cet objectif a été l'effacement complet du système de chauffage pendant cette période de forte demande en puissance. Nous nous sommes focalisés sur les systèmes de stockage de chaleur, notamment les systèmes de stockage latent afin de compenser le déphasage entre les ressources disponibles et la forte demande en électricité. Les deux avantages principaux de cette méthode de stockage sont le faible intervalle de température opérationnel et le gain en compacité. Nos recherches se sont centrées sur l'optimisation de ces systèmes de stockage. La contrainte en temps de 2h impose, en plus de la quantité d'énergie nécessaire pour l'effacement, une puissance suffisante pour la décharge. Les solutions techniques choisies devaient donc être en mesure de répondre à cette double exigence en stockage et puissance de restitution liées à des propriétés thermiques intrinsèques des matériaux contradictoires. La revue bibliographique a permis de mettre en évidence les meilleurs choix de matériaux potentiels pour ces systèmes tels que les matériaux architecturés contenant des matériaux à changement de phase (MCP). Leur principal intérêt est la possibilité d'optimiser leurs propriétés équivalentes par l'intermédiaire de la nature des matériaux constituants et de leur architecture. Des matériaux multifonctionnels, capables de répondre aux exigences de notre problématique, peuvent être créés.

Le travail réalisé lors de cette thèse est basé sur le développement d'outils pour la conception des matériaux architecturés constituant un système de stockage de chaleur pour le domaine du bâtiment. Il a été organisé en trois parties :

— le développement d'une méthodologie dénommée *"Top-down methodology"* prenant

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0060/these.pdf
© [J.P. Arzamendia Lopez], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

en compte l'application bâtiment dans son environnement et allant jusqu'à la conception optimale de la solution technique retenue (système de stockage) répondant au cahier des charges établi (stockage et puissance de restitution) ;

— le développement d'un modèle numérique du système de stockage prenant en compte le stockage latent de chaleur et validé par comparaison numérique/expérimentale ;

— l'analyse et l'évaluation des performances du système de stockage *via* des nombres adimensionnels, la conception optimale en termes de sélection des matériaux constituants et de design du système. L'exemple concret d'une planche architecturée répondant à nos objectifs et contraintes a été ensuite présenté.

La méthodologie proposée est mise en œuvre à trois échelles. La première est celle du bâtiment. C'est à cette échelle qu'est réalisé le cahier de charges de l'application en question. La deuxième échelle correspond aux propriétés du système de stockage répondant à nos cahiers des charges. Elles sont obtenues grâce à une évaluation de la solution technique *via* des nombres adimensionnels. À ce stade du travail, les propriétés thermique optimales et la nécessité ou non d'une conception spécifique sont connues. Enfin, la troisième échelle est celle des matériaux constituants et des architectures du matériau solution. Trois étapes de travail ont donc été bien définies, chacune d'entre elles se situant à une échelle différente.

Pour le besoin de notre étude, un modèle numérique d'un système de stockage de chaleur a été développé. L'étude bibliographique faite sur la modélisation numérique a mis en évidence la nécessité d'un modèle détaillé permettant l'évaluation et le choix d'une solution technique. Le système modélisé est un rack de stockage composé de plaques architecturées contenant des matériaux à changement de phase. Le modèle mathématique est basé sur deux équations : le bilan enthalpique de l'air traversant le système et l'équation de la chaleur modélisant le transfert de chaleur à l'intérieur de la plaque architecturée. En outre, le modèle prend en compte le phénomène de changement de phase *via* une modélisation par capacité calorifique équivalente. Les équations ont été discrétisées en espace par la méthode des volumes finis et la résolution numérique temporelle est faite grâce au solveur ODE du logiciel MATLAB selon une méthode Runge-Kutta à l'ordre 4-5. La validation du modèle numérique a été réalisée en deux temps :

1. une comparaison avec un résultat analytique issu de la littérature, sur un cas sans changement de phase ;
2. une validation par comparaison des résultats numériques avec des mesures expérimentales réalisées au sein de notre laboratoire.

Le modèle numérique développé a permis l'évaluation et l'optimisation du système de stockage. L'analyse du système a été effectuée par l'intermédiaire des nombres adimensionnels $1/BiFo$, Bi/St et Ste. Le premier est lié au coefficient de convection du système, faisant de lui un paramètre fonctionnel intervenant dans la puissance de décharge. Les

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0060/these.pdf
© [J.P. Arzamendia Lopez], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

deux autres nombres adimensionnels ont été évalués pour l'analyse de la capacité de stockage (h *via* Ste) et de la puissance de décharge propre du matériau (λ *via* Bi/St). L'évaluation de ces nombres en fonction de la puissance de décharge a permis de conclure qu'une minimisation de ceux-ci est nécessaire pour maximiser la puissance. L'optimisation du système de stockage a donc été menée en deux étapes. La première a consisté en la sélection des MCP pour le système de stockage latent en utilisant une cartographie (Ste vs. Bi/St). L'objectif de cette cartographie a été d'obtenir les indices minimaux. Pour minimiser l'indice Bi/St, la conductivité équivalente a été améliorée en augmentant la fraction volumique de la matrice conductrice. Cependant, la puissance de décharge nécessaire n'a pas été atteinte. La deuxième étape a alors consisté à évaluer le nombre $1/BiFo$ afin d'établir la propriété fonctionnelle nécessaire pour satisfaire la puissance de décharge en partant de la meilleure solution obtenue lors de la première étape. La solution technique retenue pour la conception optimale a été l'utilisation d'ailettes au niveau des surfaces d'échange des plaques architecturées composant le système de stockage. Pour le cas étudié (système de stockage de dimensions $2 \times 0.2 \times 0.66$ m^3), le matériau choisi est l'Heneicosane. Les valeurs optimales en termes de conductivité et de coefficient de convection nécessaires pour satisfaire la puissance de décharge ont été de 1 W/m K et 30 W/m^2 K respectivement.

En dernier lieu, un exemple concret de conception satisfaisant les propriétés exigées a été présenté. Le matériau architecturé solution consiste en une planche à clous contenant du MCP. La caractérisation de ce matériau architecturé a montré qu'il répondait au besoin en conductivité. D'autre part, les surfaces ailettées ont été dimensionnées de façon à répondre ailettes a été fait pour répondre au besoin en terme de coefficient de convection. Pour le cas étudié, la quantité d'ailettes nécessaires a été de 20 unités/m avec une épaisseur de 3mm.

Ce travail de thèse a permis de mettre en place une nouvelle méthodologie pour la conception des matériaux architecturés dans le domaine du bâtiment, denommée *"Top-down methodology"*. L'utilisation de cette méthodologie a permis de répondre à un effacement complet du chauffage pendant 2h en hiver pour réduire les pics d'appel en puissance à la fin de la journée. La solution choisie a été l'utilisation d'un système de stockage par chaleur latente composé de plaques architecturées contenant du MCP.

Ainsi, cette méthodologie constitue un outil trés intéressant dans ce domaine. Parmi les perspectives, on peut notamment citer l'extension vers d'autres problématiques dans le bâtiment et en particulier à d'autres types de stockage latent. Certaines problématiques feront appel à des solutions architecturées plus complexes que celles proposées dans ce manuscrit. Dans ce cas, les outils développés dans le cadre du $CPR\ MAM$ pourront alors être mis en œuvre.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0060/these.pdf
© [J.P. Arzamendia Lopez], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0060/these.pdf
© [J.P. Arzamendia Lopez], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

A

Indice simplifié

A.1 Indice énergie : énergie à stocker $Q_{dim} \geq 4$ kWh

Si on se place dans le cas extrême où $Q_{dim} = 4$ kWh, cette énergie sera stockée de manière sensible et latente dans les différentes plaques composites faisant partie du système de stockage. L'énergie stockable est exprimé par :

$$Q = m \times \int C_m.dT \tag{A.1}$$

Si on considère l'énergie stockée comme étant la somme de la chaleur stockée de manière sensible et de la chaleur stockée de manière latente on obtient :

$$Q = m_{cont}.C_{m_{cont}}.\Delta T + m_{MCP} \times [\Delta H + C_{m_{MPC}}.\Delta T] \tag{A.2}$$

où ΔH est la chaleur latente de changement de phase [J/kg] ; C_p est la chaleur massique [J/kg K] ; ΔT est la différence entre la température de charge et de décharge de l'air [K]. La masse du conteneur est considerée faible par rapport à la masse de MCP, l'expression devient :

$$Q = m_{MCP} \times [\Delta H + C_p.\Delta T] \tag{A.3}$$

En appliquant la condition d'énergie à stocker à la quantité d'énergie stockée dans le matériau,

$$Q = Q_{dim} \tag{A.4}$$

$$\Omega.m = Q_{dim} \tag{A.5}$$

$$\Omega.\rho.N.V_{actif} = Q_{dim} \tag{A.6}$$

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0060/these.pdf
© [J.P. Arzamendia Lopez], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

où $\Omega = [\Delta H + C_p.\Delta T]$; N est le nombre de plaques dans l'échangeur et V_{actif} volume d'une plaque composite contenant du matériau actif, soit :

$$V_{actif} = e_{actif}.S = e_{actif}.l.L \tag{A.7}$$

$$\Omega.\rho.N.L.l.e_{actif} = Q_{dim} \tag{A.8}$$

$$l = \frac{1}{\rho}.\frac{Q_{dim}}{\Omega}\frac{1}{L.N.e_{actif}} \tag{A.9}$$

De plus on sait que le nombre de plaques dépendent de leur épaisseur.

$$N = \frac{L}{2.e_{actif}} \tag{A.10}$$

Dans l'équation de la longueur du système on obtient l'indice de performance lié à le stockage d'énergie :

$$l = \frac{1}{\rho}.\frac{Q^*}{\Omega}\frac{2}{L^2} \tag{A.11}$$

Remarque : cette dernière expression est indépendante de l'épaisseur des plaques.

A.2 Indice puissance : puissance nécessaire $P_{dim} \geq 2$kW

On se place ici encore dans le cas extrême où $P_{dim} = 2$ kW. On calcule la puissance de décharge, qui s'exprime par le flux de chaleur qui traverse les N plaques composites qui forment le système de stockage. Grâce aux symétries du système (figure A.1), le domaine d'étude pour le calcul du flux de chaleur peut être définie par une demi plaque composite.

Dans ce cas d'étude on se place en régime permanent. La température de l'air entrant est suposée constante et homogène. Deux cas d'étude se présentent :

— Début de transformation : la température du matériau composite actif est supposée homogène et égale à la température de changement de phase.

— Fin de transformation : la température du coeur du matériau est supossée égale à la température de changement de phase du matériau composite actif.

On se place ici, dans la phase de fin de transformation, celle-ci étant la plus contraignante.

Hypothèses :

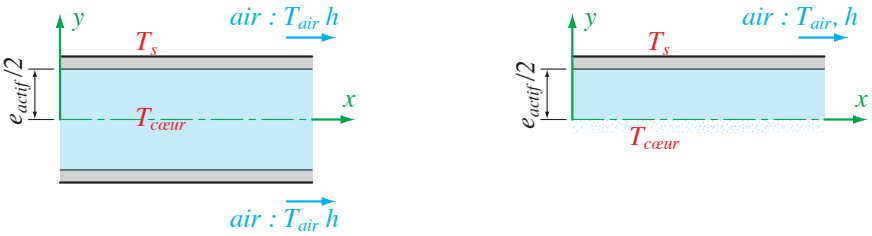
— La conduction est considerée unidirectionnel suivant l'axe y dans le matériau composite.

— Le régime est permanent.

— Les propriétés des matériaux sont considerées constantes.

— La résistance de contact entre le matériau actif et le conteneur est négligéable.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0060/these.pdf
© [J.P. Arzamendia Lopez], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés



(a) Coupe de la plaque composite (b) Symétrie suivant l'axe y

FIGURE A.1 – Étude de la demi-plaque composite grâce aux symétries

En régime permanent, le flux de chaleur φ (en [W]) qui traverse la surface S d'une demi plaque à étudier est égal :

$$\varphi = \varphi_{convection} = \varphi_{conduction} \tag{A.12}$$

En utilisant l'analogie électrique pour les resistances thermiques, on peut écrire de manière générale :

$$\varphi = \frac{\Delta T}{R_{totale}} \tag{A.13}$$

où la resistance thermique totale est :

$$R_{totale} = \frac{1}{h.S} + \frac{e_c}{\lambda_c.S} + \frac{e_{actif}}{2.\lambda_{actif}.S} \tag{A.14}$$

En appliquant la condition au flux, on obtient :

$$\varphi = P_{dim} \tag{A.15}$$

Chaque plaque a deux surfaces de décharge, et la puissance totale doit être déchargée pour l'ensemble des N plaques qui composent l'échangeur. Cela donne :

$$\frac{N.2S.\Delta^{'}T}{\frac{1}{h} + \frac{e_c}{\lambda_c} + \frac{e_{actif}}{2.\lambda_{actif}}} = P_{dim} \tag{A.16}$$

— $\Delta'T$ difference de température entre le coeur du matériau et l'air
— S surface d'échange
— h coefficient de convection
— e_c épaisseur du conteneur
— λ_c conductivité du conteneur

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0060/these.pdf
© [J.P. Arzamendia Lopez], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

— e_{actif} épaisseur du matériau actif
— λ_{actif} conductivité du matériau actif
— N nombre de plaques

En considérant que la résistance thermique du conteneur est petite par rapport aux autres, on a :

$$\frac{N.2S.\Delta'T}{\frac{1}{h}+\frac{e_{actif}}{2.\lambda_{actif}}} = P_{dim} \tag{A.17}$$

$$S = \frac{P_{dim}}{2.N.\Delta'T}.\left[\frac{1}{h}+\frac{e_{actif}}{2.\lambda_{actif}}\right] \tag{A.18}$$

La longueur du système de stockage est alors égale à :

$$l = \frac{P_{dim}}{2.N.L.\Delta'T}.\left[\frac{1}{h}+\frac{e_{actif}}{2.\lambda_{actif}}\right] \tag{A.19}$$

De la même façon qu'auparavant, on introduit l'expression du nombre de plaques (équation A.10) dans l'expression précedante (équation A.19). On obtient :

$$l = \frac{e_{actif}.P_{dim}}{L^2.\Delta'T}.\left[\frac{1}{h}+\frac{e_{actif}}{2.\lambda_{actif}}\right] \tag{A.20}$$

On a donc deux expressions (A.11 et A.20) qui expriment la longueur de notre matériau équivalent homogène pour accomplir nos deux objectifs : capacité de stockage de 4 kWh et puissance de restitution de 2 kW.

En égalant A.11 et A.20, on obtient :

$$\frac{1}{\rho}.\frac{Q^*}{\Omega}\frac{2}{L^2} = \frac{e_{actif}.P_{dim}}{L^2.\Delta'T}.\left[\frac{1}{h}+\frac{e_{actif}}{2.\lambda_{actif}}\right] \tag{A.21}$$

Soit, en simplifiant par N et l,

$$\frac{1}{\rho}.\frac{Q^*}{\Omega}\frac{1}{e_{actif}} = \frac{P_{dim}}{2.\Delta'T}\left[\frac{1}{h}+\frac{e_{actif}}{2.\lambda_{actif}}\right] \tag{A.22}$$

Pour simplifier l'équation A.22, on pose :

$$E = \frac{1}{\rho}.\frac{Q^*}{\Omega} \tag{A.23}$$

$$D = \frac{P_{dim}}{2.\Delta'T} \tag{A.24}$$

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0060/these.pdf
© [J.P. Arzamendia Lopez], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

l'équation A.22 devient alors :

$$E\frac{1}{e_{actif}} = D\left[\frac{1}{h} + \frac{e_{actif}}{2.\lambda_{actif}}\right] \tag{A.25}$$

On chercher alors à isoler e_{actif} dans A.25 :

$$\frac{E}{D} = \frac{1}{h}.e_{actif} + \frac{1}{2.\lambda_{actif}}e_{actif}^2 \tag{A.26}$$

$$\frac{1}{2.\lambda_{actif}}e_{actif}^2 + \frac{1}{h}.e_{actif} - \frac{E}{D} = 0 \tag{A.27}$$

$$e_{actif}^2 + \frac{2.\lambda_{actif}}{h}.e_{actif} - \frac{E}{D}.2.\lambda_{actif} = 0 \tag{A.28}$$

On trouve ici une équation du second degré. La solution de ce type d'équation est de la forme :

$$x = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4.a.c}}{2.a} \tag{A.29}$$

La première solution,

$$e_{actif} = \frac{-\frac{2.\lambda_{actif}}{h} - \sqrt{(\frac{2.\lambda_{actif}}{h})^2 + 4.1.\frac{E}{D}.2.\lambda_{actif}}}{2} \tag{A.30}$$

donne une valeur négative, ce qui est physiquement impossible. On s'intérese donc à la deuxième solution de l'équation :

$$e_{actif} = \frac{-\frac{2.\lambda_{actif}}{h} + \sqrt{(\frac{2.\lambda_{actif}}{h})^2 + 4.1.\frac{E}{D}.2.\lambda_{actif}}}{2} \tag{A.31}$$

soit, en simplifiant :

$$e_{actif} = -\frac{\lambda_{actif}}{h} + \sqrt{(\frac{\lambda_{actif}}{h})^2 + 2.\frac{E}{D}.\lambda_{actif}} \tag{A.32}$$

$$e_{actif} = -\frac{\lambda_{actif}}{h} + \frac{\lambda_{actif}}{h}\sqrt{1 + 2.\frac{E}{D}.\lambda_{actif}.\left(\frac{h}{\lambda_{actif}}\right)^2} \tag{A.33}$$

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0060/these.pdf
© [J.P. Arzamendia Lopez], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

$$e_{actif} = -\frac{\lambda_{actif}}{h} + \frac{\lambda_{actif}}{h}\sqrt{1 + 2.\frac{E}{D}.\frac{h^2}{\lambda_{actif}}} \tag{A.34}$$

Pour simplifier cette expression, un developpement limité peut être appliqué. Pour cela la valeur de $2.\frac{E}{D}.\frac{h^2}{\lambda_{actif}}$ doit être proche de zéro.

$$x = 2.\frac{E}{D}.\frac{h^2}{\lambda_{actif}} \tag{A.35}$$

Nous prenons les hypothèses suivantes pour l'application numérique :

- $\rho = 1000$ [kg/m^3]
- $Q^* = 4$ [kWh]
- Δ H $= 200$ [kJ/kg]
- $C_p = 2$ [kJ/kg K]
- $\lambda_{actif} = 2$ [W/m K]
- Δ T $= 10$ [°C]
- $P_{dim} = 2$ [kW]
- Δ 'T $= 5$ [K]
- $h_c = 10$ [W/m^2]

La valeur de x est alors de :

$$x = 0.0335 \tag{A.36}$$

valeur proche de zéro. Le developpement limité est donc valable.

En faisant le developpement limité on a de manière générale :

$$(1+x)^a = 1 + a.x + \frac{a(a-1)}{2!}x^2 + ... + \frac{a(a-1)(a-2)...(a-n+1)}{n!}x^n + 0(x^n) \tag{A.37}$$

En faisant le développement à l'ordre 1 de la racine carrée, on obtient :

$$\sqrt{1+x} = 1 + \frac{1}{2}x \tag{A.38}$$

Dans notre cas, on obtient :

$$\sqrt{1 + 2.\frac{E}{D}\frac{h^2}{\lambda_{actif}}} = 1 + \frac{1}{2}.\left(2.\frac{E}{D}\frac{h^2}{\lambda_{actif}}\right) \tag{A.39}$$

Soit, dans l'expression de l'épaisseur du matériau actif :

$$e_{actif} = -\frac{\lambda_{actif}}{h} + \frac{\lambda_{actif}}{h}.\left[1 + \frac{1}{2}.\left(2.\frac{E}{D}\frac{h^2}{\lambda_{actif}}\right)\right] \tag{A.40}$$

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0060/these.pdf
© [J.P. Arzamendia Lopez], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

$$e_{actif} = -\frac{\lambda_{actif}}{h} + \frac{\lambda_{actif}}{h} + \frac{\lambda_{actif}}{h}.\frac{1}{2}.\left(2.\frac{E}{D}\frac{h^2}{\lambda_{actif}}\right) \tag{A.41}$$

$$e_{actif} = h.\frac{E}{D} \tag{A.42}$$

La première expression (A.11) concernant la longueur du système est indépendant de l'épaisseur.

$$l = 2.\frac{1}{\rho.\Omega}.\frac{1}{L^2}.Q^* \tag{A.43}$$

cette expression depend de deux types de paramètres :

— Les paramètres géometriques : l
— Les paramètres matériaux : ρ, Ω

En introduisant l'expression de l'épaisseur du matériau actif dans la deuxième expression de l (équation A.20), on ontient :

$$l = \frac{e_{actif}.P_{dim}}{L^2.\Delta' T}.\left[\frac{1}{h} + \frac{e_{actif}}{2.\lambda_{actif}}\right] \tag{A.44}$$

$$l = \frac{h.P_{dim}}{L^2.\Delta' T}.\frac{E}{D}\left[\frac{1}{h} + \frac{h}{2.\lambda_{actif}}.\frac{E}{D}\right] \tag{A.45}$$

$$l = \frac{h.2.D}{L^2}.\frac{E}{D}\left[\frac{1}{h} + \frac{h}{2.\lambda_{actif}}.\frac{E}{D}\right] \tag{A.46}$$

$$l = \frac{2.h.E}{L^2}.\left[\frac{1}{h} + \frac{h}{2.\lambda_{actif}}.\frac{E}{D}\right] \tag{A.47}$$

$$l = \frac{2.E}{L^2} + \frac{1}{L^2}\frac{(h.E)^2}{D.\lambda_{actif}} \tag{A.48}$$

En substituant par les expressions de E et D, on ontient l'indice de performance

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0060/these.pdf
© [J.P. Arzamendia Lopez], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

simplifié:

$$IP_{simp} = 2.\frac{1}{L^2}.\frac{1}{\rho.\Omega}.Q^* + 2\frac{1}{L^2}\frac{1}{\lambda_{actif}.\left(\rho.\Omega\right)^2}.\frac{\Delta'T.\left(h.Q^*\right)^2}{P_{dim}} \tag{A.49}$$

Cette expression nous permet de distinguer trois types de paramètres :

— Paramètres géométriques : L

— Paramètres fonctionnels : h, $\Delta'T$

— Paramètres matériaux : ρ, λ_{actif}, Ω (C_p et ΔH)

Cet indice est adimensionné par :

$$l_{adim} = \frac{l}{L} \tag{A.50}$$

L'expression adimensionné est alors :

$$IP^*_{simp} = 2.\frac{1}{L^3}.\frac{1}{\rho.\Omega}.Q_{dim} + 2\frac{1}{L^3}\frac{1}{\lambda.\left(\rho.\Omega\right)^2}.\frac{\Delta'T.\left(h.Q_{dim}\right)^2}{P_{dim}} \tag{A.51}$$

et en simplifiant, on obtient :

$$IP^*_{simp} = \frac{2}{L^3}\frac{Q_{dim}}{\rho\Omega}\left[1 + \frac{4Bi^2Fo}{1+1/Ste}\frac{\Delta'T}{\Delta T}\right] \tag{A.52}$$

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0060/these.pdf
© [J.P. Arzamendia Lopez], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0060/these.pdf
© [J.P. Arzamendia Lopez], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0060/these.pdf
© [J.P. Arzamendia Lopez], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

B

Données du bâtiment modélisé

B.1 Caractéristiques des parois vitrées

Les menuiseries sont composées selon les tableaux B.1, B.2, B.3 et B.4.

Emissitivité ext.	0.837	-
Transmission Solaire	0.784	-
Réflectance extérieure	0.071	-
Epaisseur	0.006	m
Réflectance intérieure	0.071	-
Conductivité	1	W/mK
Emissivité intérieure	0.837	-

TABLEAU B.1 – Données du vitrage extérieur de la maison BBC

Emissitivité int.	0.103	-
Transmission Solaire	0.571	-
Réflectance extérieure	0.229	-
Epaisseur	0.006	m
Réflectance intérieure	0.156	-
Conductivité	1	W/mK
Emissivité intérieure	0.837	-

TABLEAU B.2 – Données du vitrage intérieur de la maison BBC

Par ailleurs, nous trouvons dans le tableau B.5 le nombre d'ouvertures présentes dans la structure.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0060/these.pdf
© [J.P. Arzamendia Lopez], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

Epaisseur	0.016	m
Conductivité	0.163	$W/m\,K$
C_p	521.9	$J/kg\,K$
Densité	1.7818	kg/m^3

TABLEAU B.3 – Données du gaz contenu dans la fenêtre de la maison BBC

U	1.3	W/m^2K
Fraction de cadre	15	%
Absorptivité	90	%

TABLEAU B.4 – Données du cadre de fenêtre de la maison BBC

Orientation	Menuiserie	Hauteur (m)	Largeur (m)	Surface (m^2)
Sud	Porte fenêtre séjour (x2)	2.15	2.4	5.16
	Porte fenêtre chambres 1er étage (x2)	2.15	1.4	3.01
Ouest	Fenêtre cuisine	1.25	1	1.25
	Porte fenêtre repas	2.25	1	2.25
	Porte fenêtre chambre	2.25	1	2.25
Est	Fenêtre séjour	1.25	0.8	1
	Fenêtres sanitaires (x2)	1.1	0.6	1.32
Nord	Fenêtre cellier (x2)	1.1	0.8	0.88

TABLEAU B.5 – Géométrie des fenêtres

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0060/these.pdf
© [J.P. Arzamendia Lopez], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

B.2 Caractéristiques des matériaux des parois opaques

Les caractéristiques des matériaux constituants les parois opaques sont les suivantes :

Matériau	Conductivité (W/m°C)	Capacité Calorifique (kJ/kg°C)	Masse volumique (kg/m^3)
Blocs de béton	0.74	0.648	800
Laine de verre	0.035	0.840	12
Polystyrène extrudé	0.029	0.880	15
Hourdis	1.23	0.648	1300
Béton lourd	1.75	0.880	2400
Plaque de plâtre	0.32	0.799	850
Béton Plein	1.75	0.880	2400

TABLEAU B.6 – Caractéristiques des matériaux utilisés

B.3 Scénario de charges internes

La puissance dissipée par les appareils électriques est de 1600 kWh par an. Cette consommation correspond à des appareils du type classe A (basse/faible consommation) et est d'origine convective uniquement.

Le scénario de consommation électrique journalière est décrit selon le tableau :

Heure	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
P(W)	20	20	20	20	20	20	510	410	20	20	20	20
Heure	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
P(W)	20	20	20	20	20	410	410	630	710	510	490	20

TABLEAU B.7 – Scénario de consommation électrique journalière

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0060/these.pdf
© [J.P. Arzamendia Lopez], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0060/these.pdf
© [J.P. Arzamendia Lopez], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

Bibliographie

[1] ASTM – E1530 – Standard Test Method for Evaluating the Resistance to Thermal Transmission of Materials by the Guarded Heat Flow Meter Technique.

[2] ABAQUS : *Version 6.11 Documentation*. Dassault Systèmes Simulia Corp., Providence, RI, USA, 2011.

[3] F. Agyenim et N. Hewitt : The development of a finned phase change material (pcm) storage system to take avantage of off-peak electricity tariff for improvement in cost of heat pump operation. *Energy and Buildings*, 42:1552–1560, 2010.

[4] F. Agyenim, N. Hewitt, P. Eames et M. Smyth : A review of materials, heat transfert and phase change problem formulation for latent heat thermal energy storage systems (lhtess). *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14:615–628, 2010.

[5] M. Ahmad : *Nouveaux composants actifs pour la gestion énergetique de l'enveloppe légère des bâtiments*. Thèse de doctorat, Université Joseph Fourier, 2004.

[6] V. Alexiades et A.D. Solomon : *Mathematical Modeling of Melting and Freezing Processes*. Hemisphere Publ., 1993.

[7] C. Arkar et S. Medved : Free cooling of a building using pcm heat storage integrated into the ventilation system. *Solar Energy*, 81:1078–1087, 2007.

[8] C. Arkar, B. Vidrih et S. Medved : Efficiency of free cooling using latent heat storage integrated into the ventilation system of a low energy building. *International Journal of Refrigeration*, 30:134–143, 2007.

[9] A. Arteconi, N.J. Hewitt et F. Polonara : State of the art of thermal storage for demand-side management. *Applied Energy*, 93:371–389, 2012.

[10] M. Ashby : *Material selection in mechanical design*. Elvesier, 2011.

[11] M. Ashby : Designing architectured materials. *Scripta Materialia*, 68:4–7, 2013.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0060/these.pdf
© [J.P. Arzamendia Lopez], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

[12] R. Baetens, B.P. Jelle et A. Gustavsen : Phase change materials for building applications : A state-of-the-art review. *Energy and Buildings*, 42:1361–1368, 2010.

[13] C. Bales, P. Gantenbein, D. Jaenig et R. Weber : Laboratory prototypes of thermo-chemical and sorption storage units - report b3 – iea shc task 32. Rapport technique, International Energy Association, 2005.

[14] A. Bejan : *Convection Heat Transfer*. John Wiley and Sons, 2004.

[15] P. Bollen, N. Quievy, I. Huynen, C. Bailly, C. Detrembleur, J.M. Thomassin et T. Pardoen : Multifonctionnal architectured materials for electromagnetic absorption. *Scripta Materialia*, 68:50–54, 2013.

[16] J. Borderon : *Intégration des matériaux à changement de phase comme système de régulation dynamique en rénovation thermique*. Thèse de doctorat, École Nationale des Travaux Publics de l'État, 2012.

[17] J. Borderon, J. Virgone, R. Cantin et F. Kuznik : Full-scale study of a building equipped with a multi-layer rack latent heat thermal energy storage system. *HVAC&R Research*, 17(4):566–576, 2011.

[18] A. M. Borreguero, M. Carmona, M. L. Sanchez et J. L. Rodriguez : Improvement of the thermal beahaviour of gypsum blocks by the incorporation of microcapsules containing pcms obtained by suspension polimeryzation with an optimal core/coating mass ratio. *Applied Thermal Engineering*, 30:1164 – 1169, 2010.

[19] O. Bouaziz, Y. Bréchet et J.D. Embury : Heterogeneous and architectured materials: A possible strategy for design of structural materials. *Advanced Engineering Materials*, 10:1–2, 2008.

[20] Y. Brechet et J.D. Embury : Architectured materials: Expanding materials space. *Scripta Materialia*, 68:1–3, 2013.

[21] A. Brun, C. Spitz, E Wurts et L. Mora : Behavioural comparison of some predictive tools used in a low energy buildings. *In Eleventh International IBPSA Conference*, 2009.

[22] L.F. Cabeza, A. Castell, C. Barreneche, A. de Gracia et A.I. Fernandez : Materials used as pcm in thermal energy storage in buildings : A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15:1675–1695, 2011.

[23] L.F. Cabeza, C. Castellon, M. Nogues, M. Medrano, R. Leppers et O. Zubillaga : Use of microencapsulated pcm in concrete walls for energy savings. *Energy and Buildings*, 39:113–119, 2007.

[24] L.F. Cabeza, M. Ibanez, C. Solé, J. Roca et M. Nogués : Experimentation with a water thank incluiding pcm module. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 90:1273–1282, 2006.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0060/these.pdf
© [J.P. Arzamendia Lopez], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

[25] A. Castell, I. Martorell, M. Medrano, G. Pérez et L.F. Cabeza : Experimental study of using pcm in brick constructive solutions for passive cooling. *Energy and Buildings*, 42:534–540, 2009.

[26] B. Charlsson, H. Stymme et G. Wattermark : A incongruent heat of fusion system cacl2 6h2o made congruent trough modification of chemical composition of the system. *Solar Energy*, 23:333–350, 1979.

[27] P.B.L. Chaurasia : Phase change material in solar water heater storage system. *In Proccedings of the 8th international conference on thermal energy storage*, 2000.

[28] Service de l'Observation et des statistiques : Bilan énergétique de la france pour 2011. Rapport technique, Commissariat Général au Développement Durable, Juillet 2012.

[29] I. Dincer et M.A. Rosen : *Thermal Energy Storage: Systems and Applications*. Wiley, 2011.

[30] P. Dolado, A. Lazaro, J.M. Marin et B. Zalba : Characterization of melting and solidification in a real scale pcm-air heat exchanger : Numerical model and experimental validation. *Energy Conversion and Management*, 52:1890–1907, 2011.

[31] P. Dolado, J. Mazo, A. Lazaro, J.M. et B. Zalba : Experimental validation of a theoretical model: Uncertainty propagation analysis to a pcm-air thermal energy storage unit. *Energy and Buildings*, 45(0):124 – 131, 2012.

[32] V. Dubovsky, G. Ziskind et R. Letan : Analytical model of a pcm-air heat exchanger. *Applied Thermal Engineering*, 31(16):3453 – 3462, 2011.

[33] J.W.C. Dunlop et P. Fratzl : Multilevel architectures in natural materials. *Scripta Materialia*, 68:8–12, 2013.

[34] A. Fallet, P. Lhuissier, L. Salvo, C.L. Martin, A. Wiegmann et M. Kabel : Multifonctionnal optimization of random hollow spheres stackings. *Scripta Materialia*, 68:35–38, 2013.

[35] M.M. Farid et R.F. Husain : An electrical storage heater using the phase change method of heat storage. *Energy Conversion and Management*, 30:219–230, 1990.

[36] M.M Farid, A.M Khudhair, S.A.K Razack et S. Al-Hallaj : A review on phase change energy storage: materials and applications. *Energy Conversion and Management*, 45:1597–1615, 2004.

[37] J. Fukai, Y. Hamada, Y. Morozumi et O. Miyatake : Effect of carbon-fiber brushes on conductive heat transfert in phase change materials. *International Journal of Heat and Mass Transfert*, 45:4781–4792, 2002.

[38] J. Fukai, M. Kanou, Y. Kodama et O. Miyatake : Thermal conductivity enhancement of energy storage media using carbon fibers. *Energy Conversion and Management*, 41:1543–1556, 2000.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0060/these.pdf
© [J.P. Arzamendia Lopez], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

[39] A.A. Ghoneim et S.A. Klein : The effect of phase change material properties on the performance of solar air-based heating systems. *Solar Energy*, 42:441–447, 1989.

[40] L.E. Goodrich : Efficient numerical technique for one-dimensional thermal problems with phase change. *International Journal of Heat and Mass Transfert*, 21:615–621, 1978.

[41] J-C. Hadorn : *Thermal energy storage for solar and low energy buildings, state of art*. IEA Solar heating and cooling programme, 2005.

[42] D. Haillot, E. Franquet, S. Gibout et J-P. Bédécarrats : Optimation of solar dhw system incuding pcm media. *Applied Energy*, –:–, 2012.

[43] E. Halawa, F. Bruno et W. Saman : Numerical analysis of a pcm thermal storage system with varying wall temperature. *Energy Conversion and Management*, 46(15–16):2592 – 2604, 2005.

[44] E. Halawa et W. Saman : Thermal performance analysis of a phase change thermal storage unit for space heating. *Renewable Energy*, 36(1):259 – 264, 2011.

[45] C. Hasse, M. Grenet, A. Bontemps, R. Dendievel et H. Sallée : Realisation, test and modelling of honeycomb wallboards containing a phase change material. *Energy and Buildings*, 43:232–238, 2011.

[46] G. Hed et R. Bellander : Mathematical modelling of pcm air heat exchanger. *Energy and Buildings*, 38(2):82 – 89, 2006.

[47] S. Hongois, F. Kuznik, P. Stevens et J-J. Roux : Development and characterization of a new mgso4-zeolite composite for a long-term thermal energy storage. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 95:1831–1937, 2011.

[48] M. Ibanez, L.F. Cabeza, C. Solé, J. Roca et M. Nogués : Modelisation of a water tank including a pcm module. *Applied Thermal Engineering*, 26:1328–1333, 2006.

[49] S.R. Idelsohn, M.A. Storti et L.A. Crivelli : Numerical methods in phase-change problems. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 1:49–74, 1994.

[50] F.P. Incropera et D.P. Dewitt : *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. Wiley-Interscience, 1980.

[51] P. Judeistein et C. Sanchez : Hybrid organic-inorganic materials: a land of multidisciplinarity. *Journal of Materials Chemistry*, 6:511–525, 1996.

[52] S. Kim et L.T. Drzal : High latent heat storage and high thermal conductive phase change materials using exfoliated graphite nanoplatelets. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 93:136–142, 2009.

[53] S.A. Klein et al. : *TRNSYS 16 a TRansient SYstem Simulation Program, User Manual*. Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin-Madison, Madison, 2004.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0060/these.pdf
© [J.P. Arzamendia Lopez], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

[54] F. Kuznik, D. David, K. Johannes et J-J. Roux : A review on phase change materials integrated in building walls. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15:379–391, 2011.

[55] F. Kuznik et J. Virgone : Experimental assessment of a phase change material for wall building use. *Applied Energy*, 86(10):2038 – 2046, 2009.

[56] F. Kuznik et J. Virgone : Experimental investigation of wallboard containing phase change material : Data for validation of numerical modeling. *Energy and Buildings*, 41:561–570, 2009.

[57] F. Kuznik, J. Virgone et J. Noel : Optimization of a phase change material wallboard for building use. *Applied Thermal Engineering*, 28:1291–1298, 2008.

[58] F. Kuznik, J. Virgone et J-J. Roux : Energetic efficiency of room wall containing pcm wallboard : A full-scale experimental investigation. *Energy and Buildings*, 40: 148–156, 2008.

[59] L. Laszczyk : *Homogéneisation et optimisation topologiques de panneaux architecturés*. Thèse de doctorat, Université de Grenoble, 2011.

[60] A. Lazaro, P. Dolado, J.M. Marin et B. Zalba : Pcm-air heat exchangers for free-cooling applications in buildings: Empirical model and application to design. *Energy Conversion and Management*, 50(3):444 – 449, 2009.

[61] MATLAB : *version 7.10.0 (R2010a)*. The MathWorks Inc., Natick, Massachusetts, 2010.

[62] M. Mazman, L.F. Cabeza, H. Mehling, M. Nogués, H. Evliya et H. Paksoy : Utilisation of phase change materials in solar domestic hot water systems. *Renewable Energy*, 34:1639–1643, 2009.

[63] H. Mehling et L.F. Cabeza : *Heat and Cold Storage with PCM: An Up to Date Introduction Into Basics and Applications*. Heat and mass transfer. Springer London, Limited, 2008.

[64] O. Mesalhy, K. Lafdi et A. Elgafy : Carbon foam matrices saturated with pcm for thermal protection purposes. *CARBON*, 44:2080–2088, 2006.

[65] E-B.S. Mettawee et G.M.R. Assassa : Thermal conductivity enhancement in a latent heat storage system. *Solar Energy*, 81:839–845, 2007.

[66] Y. Minwu et A. Chait : An alternative formulation of the apparent heat capacity method for phase-change problems. *Journal of Numerical Heat Transfer, Part B: Fundamentals : And International Journal of Computation and Methodology*, 24:273–300, 1993.

[67] D.J. Morrison et A. Khalik : Effects. *Effects of phase change energy storage on the performance of air-based and liquid-based solar systems*, 20:57–67, 1978.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0060/these.pdf
© [J.P. Arzamendia Lopez], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

[68] A.H. Mosaffa, C.A. Infante Ferreira, F. Talati et M.A. Rosen : Thermal performance of a multiple pcm thermal storage unit for free cooling. *Energy Conversion and Management*, 67(0):1 – 7, 2013.

[69] E. Osterman, V.V. Tyagi, V. Butala, N.A. Rahim et U. Stritih : Review of pcm based cooling technologies for buildings. *Energy and Buildings*, 49(0):37 – 49, 2012.

[70] R. Paramesgawarn, S. Harikrishnan et S. Kalaiselvam : Energy efficient pcm-based variable air volume air conditioning sistem for modern buildings. *Energy and Buildings*, 42:1353–1360, 2010.

[71] A. Pasupathy, R. Velraj et R.V. Seeniraj : Phase change materials-based building architecture for thermal management in residential and commercial establishments. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 12:39–64, 2008.

[72] S.V. Patankar : *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*. Hemisphere Publishing Corporation, 1980.

[73] P. Pinel, C.A. Cruickshank, I. Beausoleil-Morrison et A. Wills : A review of avaliable methods for seasonal of solar thermal energy in residential applications. *Renewable and Sustainable energy Reviews*, 15:3341–3359, 2011.

[74] J. Prakash, H.P. Garg et G. Datta : A solar water heater with a built-in latent heat storage. *Energy Conversion and Management*, 5:51–60, 1985.

[75] A.F. Regin, S.C. Solanki et J.S. Saini : An analysis of a packed bed latent heat thermal energy storage system using pcm capsules : Numerical investigation. *Renewable Energy*, 34:1765–1773, 2009.

[76] M. Rostamizadeh, M. Khanlarkhani et S.M. Sadrameli : Simulation of energy storage system with phase change material (pcm). *Energy and Buildings*, 49(0):419 – 422, 2012.

[77] RTE : Mémo rte 2012 - chiffres de production 2011. Rapport technique, RTE, 2012.

[78] F.W. Schmidt et A.J. Willmot : *Thermal Energy Storage and Regeneration*. Hemisphere Publishing Corporation, 1981.

[79] A. Sharma, V.V. Tyagi, C.R. Chen et D. Buddhi : Review on thermal energy storage with phase change materials and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13:318–345, 2009.

[80] U. Stritih et V. Butala : Experimental investigation of energy savings in buildings with pcm cold storage. *International Journal of Refrigeration*, 33:1676–1683, 2010.

[81] G. Susman, Z. Dehouche, T. Cheechern et S. Craig : Test of prototype pcm 'sails' for office cooling. *Applied Thermal Engineering*, 31:717–726, 2010.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0060/these.pdf
© [J.P. Arzamendia Lopez], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

[82] Y. Taguchi, H. Yokoyama, H. Kado et M. Tanaka : Preparation of pcm microcapsules by using oil absorbable polymer particles. *Colloids and Surfaces*, 301:41–47, 2007.

[83] S. Takeda, K. Nagano, T. Mochida et K. Shimakura : Development of a ventilation system utilising thermal energy storage for granulates containing phase change materials. *Solar Energy*, 74:329–338, 2004.

[84] P. Tatsidjodoung, N. Le Pierrès et L. Luo : A review of potential materials for thermal energy storage in buildings applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 18:327–349, 2013.

[85] J. R. Turnpenny, D. W. Etheridge et D.A. Reay : Novel ventilation cooling system for reducing air conditioning in buildings : Part i : test and theorical modelling. *Applied Thermal Engineering*, 20:1019–1037, 2000.

[86] J. R. Turnpenny, D. W. Etheridge et D.A. Reay : Novel ventilation system for reducing air conditioning in buildings : Part ii : testing of prototype. *Applied Thermal Engineering*, 21:1203–1217, 2001.

[87] V. V. Tyagi et D. Buddhi : Pcm thermal storage in buildings : A state of art. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 11:1146–1166, 2007.

[88] S.M. Vakilaltojjar : *Phase change thermal storage system for space heating and cooling*. Thèse de doctorat, Adelaide: University of South Australia, 2000.

[89] S.M. Vakilaltojjar et W. Saman : Analysis and modelling of a phase change storage system for air conditioning applications. *Applied Thermal Engineering*, 21(3): 249 – 263, 2001.

[90] X. Wang, Y. Zhang, W. Xiao, R. Zeng, Q. Zhang et H. Di : Review on thermal performance of phase change energy storage building envelope. *Chinese Science Bulletin*, 54:920–928, 2009.

[91] A. Waqas et Z.U. Din : Phase change material (pcm) storage for free cooling of buildings: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 18(0):607 – 625, 2013.

[92] B. Zalba, J.M. Marin, L.F. Cabeza et H. Mehling : Review on thermal energy storage with phase change : materials, heat transfert analysis and applications. *Applied Thermal Engineering*, 23:251–283, 2003.

[93] B. Zalba, J.M. Marin, L.F. Cabeza et H. Mehling : Free-cooling of buildings with phase change materials. *International Journal of Refrigeration*, 27(8):839 – 849, 2004.

[94] H. Zhang, X. Wang et D. Wu : Silica encapsulation of n-octadecane via sol-gel process : A novel microencapsulated phase change material with enhanced thermal

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0060/these.pdf
© [J.P. Arzamendia Lopez], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

conductivity and performance. *Journal of Colloid and Interface Science*, 343:246–255, 2010.

[95] Y. Zhong, S. Li, X. Wei, Z. Liu, Q. Guo, J. Shi et L. Liu : Heat transfert enhancement or paraffin wax using compressed expanded natural graphite for thermal energy storage. *CARBON*, 48:300–304, 2010.

[96] G. Zhou, Y. Zhang, Q. Zhang, k. Lin et H. Di : Performance of a hybrid heating system with thermal storage using shape-stabilized phase change material plates. *Applied Energy*, 84:1068–1077, 2007.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0060/these.pdf
© [J.P. Arzamendia Lopez], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0060/these.pdf
© [J.P. Arzamendia Lopez], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

FOLIO ADMINISTRATIF

THÈSE SOUTENUE DEVANT L'INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES APPLIQUÉES DE LYON

NOM : ARZAMENDIA LOPEZ DATE de SOUTENANCE : 28 juin 2013
(avec précision du nom de jeune fille, le cas échéant)

Prénoms : Juan Pablo

TITRE : MÉTHODOLOGIE DE CONCEPTION DES MATÉRIAUX ARCHITECTURÉS POUR LE STOCKAGE LATENT DANS LE DOMAINE DU BÂTIMENT
NATURE : Doctorat Numéro d'ordre : AAAISALXXXX

École doctorale : Mécanique, Énergétique, Génie Civil, Acoustique (MEGA)
Spécialité : Énergétique

RÉSUMÉ : L'utilisation de systèmes de stockage par chaleur latente constitue une solution permettant l'effacement du chauffage d'un bâtiment résidentiel pendant les périodes de forte demande. Une telle stratégie peut avoir pour objectif le lissage des pics d'appel en puissance du réseau électrique. Cependant, la faible conductivité des matériaux à changement de phase (MCP) qui constituent ces systèmes et le besoin d'une puissance de décharge importante imposent l'utilisation de matériaux dits "architecturés" afin d'optimiser la conductivité équivalente des matériaux stockeurs. Nos travaux s'intéressent plus particulièrement à la méthodologie pour la conception de matériaux pour ces systèmes afin de satisfaire aux exigences de stockage d'énergie et de puissance de restitution.
La méthodologie proposée dans ces travaux de thèse est dénommé « Top-down methodology ». Cette méthodologie comporte trois échelles : l'échelle bâtiment (top), l'échelle système et l'échelle matériau (down). L'échelle bâtiment a comme objectif de spécifier le cahier des charges. À l'échelle système, des indicateurs de performance sont définis. Enfin, à l'échelle matériau, l'architecture du matériau solution est proposée.
Un outil numérique modélisant le système de stockage par chaleur latente de type échangeur de chaleur air/MCP à été développé pour évaluer les indicateurs de performance. Ce modèle numérique est vérifié avec un cas analytique et validé par comparaison avec des données expérimentales.
La méthodologie développée est mise en œuvre dans un deuxième cas d'étude pour le même type de système de stockage. L'analyse du système via les nombres adimensionnels permet d'obtenir des indicateurs de performance du système. A l'issue de cette étape, les propriétés matériaux et fonctionnelles optimales du système sont donc connues.
Enfin, un matériau architecturé est alors proposé afin de satisfaire les exigences du système de stockage. Nous montrons alors que par l'intermédiaire d'une plaque sandwich contenant des clous et du MCP les propriétés matériaux nécessaires sont obtenues. De plus, afin de satisfaire aux exigences en termes de propriétés fonctionnelles, le design du système est modifié en ajoutant des ailettes sur les surfaces d'échange. Nous montrons que avec 20 ailettes de 3mm d'épaisseur sur la surface d'échange de la planche à clous, le chauffage est effacé pendant 2h lors de la période de forte demande journalière pendant l'hiver.

MOTS-CLÉ : bâtiment, méthodologie, matériaux à changement de phase (MCP), matériaux architecturés, modèle numérique, échangeur de chaleur, lissage des pics de consommation

Laboratoire(s) de recherches : Centre de Thermique de Lyon (CETHIL UMR5008)

Directeurs de thèse : Dominique BAILLIS, Frédéric KUZNIK

Président de jury :

Composition du jury : Bernard YRIEIX, Christian INARD, Daniel QUENARD, Dominique BAILLIS, Frédéric KUZNIK, Gilles FRAISSE, Rémy DENDIEVEL

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0060/these.pdf
© [J.P. Arzamendia Lopez], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés