



HAL
open science

Etude expérimentale et modélisation d’emballages de produits de santé utilisant des matériaux à changement de phase

Thibault Pech

► **To cite this version:**

Thibault Pech. Etude expérimentale et modélisation d’emballages de produits de santé utilisant des matériaux à changement de phase. Matériaux. Université de Lyon, 2016. Français. NNT : 2016LYSEI039 . tel-01512425

HAL Id: tel-01512425

<https://theses.hal.science/tel-01512425>

Submitted on 23 Apr 2017

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.



INSA

N°d'ordre NNT : 2016LYSEI039

THESE de DOCTORAT DE L'UNIVERSITE DE LYON
préparée au sein de
I'INSA LYON

Ecole Doctorale N° 162
(Mécanique – Énergétique – Génie Civil - Acoustique)

Spécialité de doctorat : Énergétique

Soutenue publiquement le 22 avril 2016, par :
Thibault PECH

**Etude expérimentale et modélisation
d'emballages de produits de santé
utilisant des matériaux à changement
de phase**

Devant le jury composé de :

FEIDT Michel Professeur émérite des Universités Université de Lorraine

DE PAEPE Michel Professeur des Universités Université de Gand Rapporteur

BEDECARRATS Jean Pierre Professeur des Universités
Université de Pau et des Pays de L'Adour Rapporteur

HABERSCHILL Philippe Maître de Conférences HDR INSA de Lyon Directeur de thèse

KUZNIK Frédéric Professeur des Universités INSA de LYON Co-directeur de thèse

LABRANQUE Gilles Président Directeur Général SOFRIGAM Invité

Département FEDORA – INSA Lyon - Ecoles Doctorales – Quinquennal 2016-2020

SIGLE	ECOLE DOCTORALE	NOM ET COORDONNEES DU RESPONSABLE
CHIMIE	CHIMIE DE LYON http://www.edchimie-lyon.fr Sec : Renée EL MELHEM Bat Blaise Pascal 3 ^e étage secretariat@edchimie-lyon.fr Insa : R. GOURDON	M. Stéphane DANIELE Institut de Recherches sur la Catalyse et l'Environnement de Lyon IRCELYON-UMR 5256 Équipe CDFA 2 avenue Albert Einstein 69626 Villeurbanne cedex directeur@edchimie-lyon.fr
E.E.A.	ELECTRONIQUE, ELECTROTECHNIQUE, AUTOMATIQUE http://edeea.ec-lyon.fr Sec : M.C. HAVGOUDOUKIAN Ecole-Doctorale.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 Sec : Safia AIT CHALAL Bat Darwin - UCB Lyon 1 04.72.43.28.91 Insa : H. CHARLES Safia.ait-chalal@univ-lyon1.fr	Mme Gudrun BORNETTE CNRS UMR 5023 LEHNA Université Claude Bernard Lyon 1 Bât Forel 43 bd du 11 novembre 1918 69622 VILLEURBANNE Cédex Tél : 06.07.53.89.13 e2m2@univ-lyon1.fr
EDISS	INTERDISCIPLINAIRE SCIENCES-SANTE http://www.ediss-lyon.fr Sec : Safia AIT CHALAL Hôpital Louis Pradel - Bron 04 72 68 49 09 Insa : M. LAGARDE Safia.ait-chalal@univ-lyon1.fr	Mme Emmanuelle CANET-SOULAS INSERM U1060, CarMeN lab, Univ. Lyon 1 Bâtiment IMBL 11 avenue Jean Capelle INSA de Lyon 696621 Villeurbanne Tél : 04.72.68.49.09 Fax :04 72 68 49 16 Emmanuelle.canet@univ-lyon1.fr
INFOMATHS	INFORMATIQUE ET MATHEMATIQUES http://infomaths.univ-lyon1.fr Sec : Renée EL MELHEM Bat Blaise Pascal 3 ^e étage infomaths@univ-lyon1.fr	Mme Sylvie CALABRETTO LIRIS – INSA de Lyon Bat Blaise Pascal 7 avenue Jean Capelle 69622 VILLEURBANNE Cedex Tél : 04.72. 43. 80. 46 Fax 04 72 43 16 87 Sylvie.calabretto@insa-lyon.fr
Matériaux	MATERIAUX DE LYON http://ed34.universite-lyon.fr Sec : 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 Cedex Tél : 04.72.43 71.70 Fax 04 72 43 85 28 Ed.materiaux@insa-lyon.fr
MEGA	MECANIQUE, ENERGETIQUE, GENIE CIVIL, ACOUSTIQUE http://mega.universite-lyon.fr Sec : 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* http://recherche.univ-lyon2.fr/scso/ Sec : Viviane POLSINELLI Brigitte DUBOIS Insa : J.Y. TOUSSAINT viviane.polsinelli@univ-lyon2.fr	Mme Isabelle VON BUELTZINGLOEWEN Université Lyon 2 86 rue Pasteur 69365 LYON Cedex 07 Tél : 04.78.77.23.86 Fax : 04.37.28.04.48

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

Résumé

Mots-clefs : emballages thermiques, chaîne du froid, matériaux à changement de phase, stockage de chaleur, modèle nodal.

Les emballages thermiques, fabriqués à partir de matériaux isolants et associés à des matériaux à changement de phase, constituent une solution à la problématique de la conservation de produits thermosensibles tout au long de la chaîne de distribution. Cependant, l'optimisation des configurations représente un défi, compte tenu du nombre de paramètres en jeu, et la voie expérimentale demeure coûteuse en temps et en ressources. C'est pourquoi un modèle numérique simplifié a été développé dans le cadre de cette thèse.

La thèse comporte un volet expérimental sur la détermination de la perméabilité des emballages ainsi que l'observation de la répartition des températures au sein d'un modèle d'emballage, et un volet numérique.

Le volet expérimental a permis de déterminer les coefficients de perméabilité de deux types d'emballages pour différentes configurations, montrant des différences notables selon le modèle de caisse considéré. Les fuites d'air sont principalement dues à l'ouverture de la porte, d'où l'importance du type de joint utilisé et du système de fermeture. Le corps de la caisse, de par sa méthode de manufacture, présente lui aussi des fuites, rendant impossible l'éventualité d'une caisse totalement imperméable.

L'observation des températures au sein d'un emballage met en évidence une certaine stratification des températures intérieures, pouvant être diminuée par la présence d'un volume d'air suffisamment important pour permettre des mouvements de convection. Un test avec simulation d'ensoleillement a permis d'observer l'impact important du flux solaire sur le comportement thermique de la caisse, tout en mettant en évidence l'efficacité des matériaux à changement de phase pour l'absorption des variations de température.

Le modèle développé est basé sur une méthode nodale, associant à chaque épaisseur de paroi un nœud, pour lequel sont résolues les équations de bilans thermiques associées. Le traitement du changement de phase se fait par une méthode dite de « capacité calorifique équivalente ». Le programme a été construit de manière à pouvoir simuler un grand nombre de configuration en faisant varier l'agencement des éléments et leur nature. La simulation d'un certain nombre de ces configurations a permis de déterminer la sensibilité du système à divers paramètres.

Ainsi il a été montré que la nature du chargement (caractérisée par les valeurs de conductivité, densité et capacité thermique) constitue un paramètre influent sur le système, et donc la connaissance des produits transportés s'avère indispensable à la définition d'une configuration optimale. De la même manière, la nature des matériaux à changement de phase, et en particulier la température de fusion, a une importance notable sur le comportement du système.

En revanche, la température d'introduction des MCP a peu d'influence, du moment que le matériau est introduit dans la bonne phase correspondant à son application. La perméabilité de l'emballage quant à elle montre peu d'incidence sur les résultats à long terme, mais des effets de sursaut de température ponctuels dus à des variations brusques de pression extérieure peuvent être observés localement.

Abstract

Keywords : thermal packaging, cold chain, phase change materials, heat storage, nodal model.

Thermal packaging made from insulating materials and associated with phase change materials are a solution to the problem of preservation of temperature sensitive products throughout the distribution chain. However, optimizing configurations represents a challenge, given the number of parameters involved, and experimentation remains costly in time and resources. This is why a simplified numerical model was developed as part of this thesis.

The thesis includes an experimental part on the determination of the permeability of packagings as well as observation of the temperature distribution within a packaging, and a numerical component.

The experimental component allowed us to determine the permeability coefficients of two types of packaging for different configurations, showing significant differences according to the packaging considered. Air leaks are primarily due to the opening of the door, hence the importance of the type of seal used and the closure system. The body of the box, due to its manufacturing method, presents leaks too, making impossible the possibility of a completely impermeable box.

The observation of the temperatures within a package highlights some stratification of internal temperatures, which can be reduced by the presence of a sufficiently large volume of air to allow natural convection movements. A test with sunlight simulation allowed to observe the impact of the solar flux on the thermal behavior of the box, while highlighting the effectiveness of phase change materials to absorb temperature changes.

The simplified model developed is based on a nodal method, associating with each wall thickness a node, to which are resolved associated heat balance equations. Treatment of the phase change is done by a method said of « equivalent heat capacity ». The program was constructed to be able to simulate a large number of configuration by varying the arrangement of the elements and their nature. Simulating a number of these configurations made it possible to determine the sensitivity of the system to various parameters.

Thus it has been shown that the nature of the load (characterized by the values of conductivity, density and thermal capacity) is a parameter of some influence on the system, and therefore knowledge of the transported products is essential to the definition of an optimal configuration. Similarly, the nature of phase change materials, and in particular the melting temperature, has a significant importance on the system behavior.

On the other hand, the introduction temperature of the PCM has little influence as long as the material is inserted in the proper phase corresponding to its application. The permeability of the packaging shows little impact on long-term results, but occasional burst of temperature effects due to the rapid changes in external pressure can be observed locally.

TABLE DES MATIÈRES

Résumé	iii
Table des matières	v
Nomenclature	vii
Introduction	1
1 Chaîne du froid des produits de santé	3
1.1 Cas des produits pharmaceutiques thermosensibles	3
1.2 Étapes de la chaîne du froid des produits de santé	6
1.3 Moyens logistiques pour le transport et le stockage des produits thermosensibles	7
1.3.1 Dispositifs d'apport de froid	7
1.3.1.1 Accumulateurs de froid	7
1.3.1.2 Groupes frigorifiques	9
1.3.1.3 Dispositifs cryogéniques	10
1.3.2 Moyens de transport : différents types de conteneurs	10
1.3.2.1 Conteneurs terrestres	10
1.3.2.2 Conteneurs maritimes	11
1.3.2.3 Conteneurs aériens	11
1.4 Emballages thermiques : solutions passives équipées de matériaux à changement de phase	12
1.4.1 Matériaux isolants	13
1.4.1.1 Polystyrène expansé	13
1.4.1.2 Polyéthylène	13
1.4.1.3 Polyuréthane	14
1.4.2 Accumulateurs de froid	15
1.4.2.1 Théorie du changement de phase	15
1.4.2.2 Nature des matériaux à changement de phase	20
1.4.3 Emballages thermiques	24
1.4.3.1 Mise en évidence de l'efficacité des emballages thermiques . . .	24
1.4.3.2 Modélisation des emballages	26
1.4.3.3 Optimisation des emballages	28
1.5 Conclusion	30
Bibliographie	31

2	Étude expérimentale	35
2.1	Perméabilité à l'air des emballages	35
2.1.1	Cas des bâtiments	36
2.1.1.1	Pression du vent	36
2.1.1.2	Tirage thermique	37
2.1.1.3	Plusieurs méthodes de caractérisation des fuites	37
2.1.2	Mesure de la perméabilité des emballages	39
2.1.2.1	Dispositif expérimental	39
2.1.2.2	Protocole expérimental	40
2.1.2.3	Traitement des résultats	40
2.1.3	Évaluation du coefficient de perméabilité pour différentes configurations	41
2.2	Mesures thermiques sur une caisse SB24	47
2.2.1	Dispositif expérimental	48
2.2.1.1	Configuration	48
2.2.1.2	Thermocouples	48
2.2.1.3	Protocole expérimental	50
2.2.2	Résultats	50
2.2.2.1	Essai pour un profil de température extérieure sans ensoleillement	50
2.2.2.2	Profil ISTA7E avec ensoleillement	57
2.3	Conclusion	60
	Bibliographie	60
3	Modélisation	63
3.1	Élaboration d'un modèle simplifié pour la simulation des transferts de chaleur dans un emballage	63
3.1.1	Transferts dans les parois	64
3.1.1.1	Bilans surfaciques	64
3.1.1.2	Bilan conductif	67
3.1.2	Transferts dans les matériaux à changement de phase	68
3.1.2.1	Modèle enthalpique	68
3.1.2.2	Modèle capacitif	71
3.1.2.3	Modèle à capacité calorifique effective	71
3.1.3	Transferts dans le volume d'air	73
3.1.4	Transferts dans le chargement	75
3.1.5	Architecture du code	76
3.1.5.1	Cahier des charges	76
3.1.5.2	Méthodologie et fonctionnement	77
3.2	Modélisation de la convection à l'intérieur de l'emballage en utilisant un code CFD	78
3.2.1	Mise en équation et méthodes de résolutions	78
3.2.1.1	Equations régissant le mouvement d'un fluide	78
3.2.1.2	Résolution numérique des équations	79
3.2.1.3	Méthode des volumes finis	79
3.2.1.4	Schémas d'interpolation	80
3.2.1.5	Contrôle de la convergence	81
3.2.2	Application au cas du volume d'air intérieur d'un emballage thermique .	82
3.2.2.1	Configuration des emballages	82
3.2.2.2	Maillage de la configuration	82
3.2.2.3	Procédure et paramètres du calcul	82
3.2.3	Résultats	83
3.2.3.1	Mouvement du fluide dans le volume d'air à l'intérieur de la caisse XXL	83

3.2.3.2	Mouvement du fluide dans le volume d'air à l'intérieur de la caisse SB24	84
3.3	Conclusion	87
	Bibliographie	87
4	Validation et exploitation du modèle	89
4.1	Validation du modèle	89
4.1.1	Caractéristiques thermiques des matériaux	90
4.1.1.1	Panneaux de polyuréthane	90
4.1.1.2	Panneaux de séparation	90
4.1.1.3	Accumulateurs de froid	90
4.1.1.4	Produits pharmaceutiques	91
4.1.2	Modèle SB1, profil froid	92
4.1.3	Modèle SB24, profil chaud	93
4.2	Exploitation du modèle	94
4.2.1	Perméabilité de l'emballage	95
4.2.2	Densité du chargement	99
4.2.3	Conductivité des séparations	101
4.2.4	Epaisseur des séparations	104
4.2.5	Température de conditionnement de l'emballage	104
4.2.6	Température d'introduction des accumulateurs froids	106
4.2.7	Nature des matériaux à changement de phase	107
4.3	Conclusion	111
	Bibliographie	112
	Conclusion générale et perspectives	113
	Folio administratif	116

NOMENCLATURE

c_{eff}	chaleur spécifique effective	$\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$
c_p	chaleur spécifique massique	$\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$
E	éclairage	W m^{-2}
F	facteur de forme	
f_l	fraction liquide	
g	accélération de la pesanteur $\simeq 9.81$	m s^{-2}
H	enthalpie	J
h	hauteur	m
h	coefficient d'échanges thermiques	$\text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}$
h_s	enthalpie sensible	J
k	coefficient de perméabilité	$\text{m}^3 \text{Pa}^{-2/3} \text{h}^{-1}$
k_L	coefficient de perméabilité corrigé	$\text{m}^3 \text{Pa}^{-2/3} \text{h}^{-1}$
L_h	chaleur latente	J kg^{-1}
M	émittance	W m^{-2}
m	masse	kg
P	pression	Pa
p_{atm}	pression atmosphérique	Pa
Q	chaleur	J
\dot{q}_v	débit volumique	$\text{m}^3 \text{h}^{-1}$
\dot{q}_m	débit massique	kg h^{-1}
S	surface	m^2
T	température	K ou $^{\circ} \text{C}$
t	temps	s
U	énergie interne	J
u	énergie interne massique	J kg^{-1}
V	volume	m^3
W	travail	J
x, y, z	coordonées cartésiennes	

Lettres grecques

α coefficient d'absorption

α	diffusivité thermique	$\text{m}^2 \text{s}^{-1}$
β	coefficient de dilatation thermique	K^{-1}
Δ	variation ou discrétisation	
ϵ	coefficient d'émissivité	
θ, ψ, Ω	angles	°
λ	conductivité thermique	$\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$
ν	viscosité cinématique	$\text{m}^2 \text{s}^{-1}$
ρ	masse volumique	kg m^{-3}
ρ	coefficient de reflexivité	
σ_0	constante de Stefan-Boltzmann $\simeq 5.67 \cdot 10^{-8}$	$\text{W m}^{-2} \text{K}^{-4}$
Φ	flux thermique	W
ϕ	densité de flux thermique	W m^{-2}

Exposants

G	phase gazeuse
L	phase liquide
S	phase solide

Indices

Ch	chargement
CLO	courtes longueurs d'ondes
cond	conduction
conv	convection
Ext	air extérieur
f	fusion
GLO	grandes longueurs d'ondes
i, j, k	numérotation des nœuds
Int	air intérieur
l	phase liquide
ref	référence
S	surface
s	phase solide
SCh	surface chargement
SE	surface extérieure
SI	surface intérieure
ray	rayonnement
0	temps initial

Acronymes

MCP	matériaux à changement de phase
PSF	Pallet Shipper Frizbox

INTRODUCTION

Dans le cadre de la mondialisation actuelle des échanges, le transport de denrées périssables, devant répondre à des impératifs de conditionnement pour la bonne conservation des produits lors de leur distribution, constitue une problématique importante. Le cas des produits pharmaceutiques est particulier. En effet, le nombre de médicaments thermosensibles développés est de plus en plus important, sans oublier les substances issues des biotechnologies, les tissus cellulaires et les solutions sanguines qui présentent aussi des problèmes de sensibilité thermique.

L'ensemble de ces produits doit être conservé dans des conditions strictes de températures, et ce malgré des circuits de distribution complexes faisant intervenir de nombreux acteurs et dans des conditions environnementales très variables. Cet ensemble de circuits de distributions et d'acteurs constitue la chaîne du froid des produits de santé, dans cette chaîne il n'est pas rare de voir des produits transiter par camion puis par avion pour passer d'un hémisphère à l'autre avec les variations climatiques que cela suppose. Maintenir la température des produits dans ces conditions constitue un défi qu'il faut relever.

Pour relever ce défi, divers moyens ont été développés pour assurer le maintien de bonnes conditions de conservation. Ainsi à chaque type de transport (routier, aérien ou maritime) correspond un modèle de conditionnement auquel peut être associé un dispositif d'apport de froid permettant de maintenir les produits dans la gamme de température souhaitée. Ces dispositifs se présentent sous plusieurs formes, et on distingue les procédés passifs (absorbant la chaleur extérieure par une masse de froid finie apportée au système sous forme de matériaux à changement de phase) des procédés actifs (faisant intervenir des groupes frigorifiques permettant la régulation de la température via la consommation d'énergie).

Si les conditions sont généralement bien maîtrisées lors du transport, les transitions d'un moyen de transport à un autre peuvent s'avérer dangereuses, les produits n'étant alors plus protégés par les dispositifs des transporteurs. De plus, l'heure étant à l'économie d'énergie, la consommation et le poids important des groupes frigorifiques constitue un frein à leur utilisation sur la totalité des transports. La solution adoptée consiste à protéger les produits d'un emballage à la sortie du site de production et pour la durée totale du transport, cet emballage ne sera ensuite ouvert qu'à la fin du transport après vérification que les produits soient bien restés dans les limites de conservations durant le trajet.

Ces emballages sont des systèmes associant l'utilisation de matériaux isolants et de matériaux à changement de phase. L'enveloppe isolante des emballages a pour fonction de minimiser le flux thermique au travers des parois, de manière à limiter l'influence de la température extérieure. Les matériaux à changement de phase ont une fonction de stockage d'énergie, permettant la réduction des fluctuations de température à l'intérieur de l'emballage et un décalage des extrêmes de température.

Les conditions de transport imposent des dimensionnements extérieurs spécifiques et parfois des limites de poids. L'agencement des différents éléments constituant les emballages et leur configuration doit faire l'objet d'une étude préalable à leur utilisation de manière à optimiser d'une part leur capacité à transporter le maximum de produits (et donc l'optimisation du volume utile), et d'autre part leur capacité à conserver les produits dans les limites de conservation pré-établies. L'optimisation des emballages constitue un défi compte tenu du nombre de variables pouvant entrer en jeu lors de la définition d'une configuration.

Chaque configuration doit aujourd'hui faire l'objet de tests en conditions réelles pour valider ou infirmer les modifications apportées à un emballage pour répondre à de nouvelles spécifications. Ce processus d'optimisation s'avère coûteux en temps et en ressources et trouve ses limites dans le besoin de trouver des solutions rapidement aux problèmes définis. Le développement des moyens de modélisation permet aujourd'hui de substituer dans certains cas la simulation aux expérimentations. Toutefois tous les modèles ne sont pas forcément adaptés aux besoins, en particulier les modèles CFD sont coûteux en temps et ressource de calcul et ne permettent pas alors leur utilisation extensive pour le test rapide de plusieurs configurations différentes.

L'objet de ce travail est le développement d'un modèle simplifié, permettant la simulation des températures dans les produits à l'intérieur d'un emballage en réponse à une sollicitation extérieure sous la forme d'un profil de température. Ce modèle doit offrir la possibilité de faire varier l'agencement des éléments et leur nature, de manière à pouvoir tester le maximum de configurations possibles et accélérer ainsi le processus d'optimisation d'un emballage en diminuant la quantité de tests en conditions réelles.

Ce mémoire est articulé en quatre chapitres. Dans le premier chapitre est décrite la chaîne du froid des produits de santé. La problématique de la conservation des solutions pharmaceutiques est explicitée ainsi que les différents acteurs intervenant lors de la chaîne du froid. Les solutions de transport développées sont présentées, avec un accent mis en particulier sur le cas des emballages thermiques.

Dans le deuxième chapitre sont présentés les résultats de deux campagnes expérimentales. La première a eu pour objet la détermination des coefficients de perméabilité des emballages, afin d'estimer l'influence des infiltrations d'air. La deuxième campagne a pour objet la mesure des températures au sein de l'emballage de manière à déterminer la manière dont la chaleur se répartit et se transmet de l'extérieur vers les produits.

Le troisième chapitre est consacré à la description du modèle numérique simplifié développé pour la simulation des emballages. Une simulation CFD du volume d'air intérieur d'un emballage a été réalisé de manière à identifier les mouvements convectifs internes.

Enfin le quatrième chapitre est consacré à la validation du modèle et son exploitation. Le modèle simplifié est utilisé afin de déterminer l'influence de la variation de divers paramètres sur les températures des produits au sein des emballages.

CHAPITRE 1

CHAÎNE DU FROID DES PRODUITS DE SANTÉ

Sommaire

1.1	Cas des produits pharmaceutiques thermosensibles	3
1.2	Étapes de la chaîne du froid des produits de santé	6
1.3	Moyens logistiques pour le transport et le stockage des produits thermosensibles	7
1.3.1	Dispositifs d'apport de froid	7
1.3.2	Moyens de transport : différents types de conteneurs	10
1.4	Emballages thermiques : solutions passives équipées de matériaux à changement de phase	12
1.4.1	Matériaux isolants	13
1.4.2	Accumulateurs de froid	15
1.4.3	Emballages thermiques	24
1.5	Conclusion	30
	Bibliographie	31

Dans ce chapitre, on décrira dans un premier temps les enjeux liés au transport de produits thermosensibles, et en particulier les produits pharmaceutiques. On présentera les différents acteurs intervenant lors de la chaîne du froid, puis on décrira les différents moyens de transports et les dispositifs mis en œuvre afin de garantir la bonne conservation des produits lors du transport. Enfin l'accent sera mis sur la solution des emballages thermiques qui constituent le sujet de ce travail.

1.1 Cas des produits pharmaceutiques thermosensibles

La qualité des produits pharmaceutiques est une problématique extrêmement importante, puisqu'elle concerne directement la santé des populations. Les états de tous les pays ne s'y trompent d'ailleurs pas, affectant aux médicaments une part importante du budget de la santé. C'est dans les pays en développement que cette proportion tend à être la plus élevée, pouvant même dépasser les 40 %.

L'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) se préoccupe depuis sa création de ce sujet, et lors la Conférence internationale sur les Soins de Santé primaires, qui s'est tenue à Alma-Ata en 1978 [1], il a été considéré que la fourniture de médicaments essentiels de bonne qualité

était l'un des préalable à la dispensation des soins de santé. Depuis, l'Assemblée Mondiale de la Santé a adopté de nombreuses résolutions où il a été demandé à l'Organisation de mettre au point des normes, des recommandations et des instruments internationaux qui garantissent la qualité des médicaments, que ces derniers soient produits et commercialisés au niveau national ou international. L'ensemble de ces travaux ont été rassemblés dans un recueil publié en 1998 [2] afin de diffuser le plus largement possible les bonnes pratiques nécessaires à l'établissement d'un bon système de santé.

On constate aujourd'hui une recrudescence des médicaments transportés et conservés sous température dirigée. En effet, l'évolution des technologies dans l'industrie pharmaceutique a eu pour conséquence l'apparition sur le marché de nouveaux médicaments souvent sensibles aux variations de températures. Ceci concerne essentiellement les vaccins, les médicaments anticancéreux, antidiabétiques, dérivés du sang et ceux issus des biotechnologies. Par ailleurs leurs circuits de distribution se diversifient, se complexifient et s'allongent en raison notamment de la sortie de la réserve hospitalière de ces produits et de la mondialisation des sites de production.

De manière générale, la qualité d'un médicament sera déterminé notamment par sa stabilité. La Pharmacopée européenne [3] définit la stabilité de la manière suivante : « un médicament est considéré comme stable lorsque, dans un laps de temps déterminé, ses propriétés essentielles ne changent pas ou changent au plus dans des proportions tolérables ». Un médicament est alors déclaré périmé lorsque le titre initial en principe actif a diminué de plus de 10 %, valeur qui peut être abaissée à 5 % voire moins lorsque la marge thérapeutique est étroite ou lorsque les produits de dégradation sont toxiques.

Les principaux processus de dégradation identifiés sont l'hydrolyse (décomposition ionique par l'eau), l'oxydation (combinaison avec l'oxygène) et la photodégradation (dégradation par l'absorption de photons). Par conséquent, les principaux responsables de ces phénomènes sont l'eau (et donc l'humidité), l'oxygène, la lumière et la température.

La température en particulier peut avoir des conséquences de nature et de gravité différentes à la fois lors d'exposition à des températures hautes ou à des températures basses :

- la chaleur a des effets délétères cumulatifs lorsque le seuil minimal d'activation des réactions de dégradation est atteint. Une augmentation de la température entraîne en particulier une augmentation de la vitesse d'hydrolyse (d'après Newton [4]) et une accélération des phénomènes d'oxydation (d'après Dawson [5]).

La méconnaissance, par absence de traçabilité ou défaut de consultation, d'éventuels dépassements survenus dans la chaîne du médicament antérieurement à la réception d'un produit sensible thermiquement peut fausser le jugement sur la conformité du produit en raison du caractère cumulatif des effets de la chaleur.

- Le froid engendre lui aussi des effets néfastes aux produits médicamenteux. Ces effets sont principalement liés au risque de congélation avec, entre autres, altération de la forme galénique (l'aspect physique final du médicament), destabilisation des mélanges ou encore dégradation irréversible des produits de nature protéique.

Une exposition unique à une température négative est suffisante pour rendre inefficaces certains vaccins, les érythropoïétines, les insulines et/ou faire précipiter des solutions ou éclater des ampoules.

À titre d'exemple, on peut citer une étude réalisée par le SAMU de Lille, traitant de l'effet des températures mesurées dans les ambulances sur les médicaments utilisés [6]. Les observations sur quelques médicaments sont regroupés dans le tableau 1.1.

Les établissements pharmaceutiques sont tenus de repertorier et de mettre à jour les informations spécifiques aux médicaments afin de garantir leurs bonnes utilisation et distribution. Afin d'obtenir l'autorisation de mise sur le marché (AMM) des produits médicamenteux, les laboratoires doivent donc déterminer leurs température et durée de conservation. Ils ont alors recours à des études physico-chimiques des principes actifs et des excipients présents dans la

T ° C	Médicament	Effet néfaste observé
0 ° C	Soludécadron® dexaméthasone solution injectable.	Précipitation.
> 25 ° C	Solumédrol® méthylprednisone solution injectable.	Baisse de la concentration en principe actif.
> 30 ° C	Aspégic® acide acétylsalicylique en poudre.	Injection iv ou im douloureuse de part la dégradation de l'acétylsalicylate de lysine et acide acétylsalicylique.
40 ° C	Bicarbonate de sodium.	Dégazage du CO_2 avec altération du produit.

TABLE 1.1 – Observation de l'effet de la température sur quelques médicament par le SAMU de Lille [6].

formulation d'une part, et d'autre part à des études de stabilité réalisées dans des conditions standardisées et internationalement reconnues.

C'est alors une initiative commune impliquant les autorités européennes, japonaise et étasuniennes et associant les industries de la santé qui a été mise en place, sous la dénomination d'International Conference on Harmonisation (ICH [7]). Parmi ses directives, l'ICH s'attache notamment à mettre en place les méthodes d'essais à exiger pour évaluer et garantir la sûreté, la qualité et l'efficacité des médicaments. Et en particulier, la directive ICH Q1 traite des test de stabilité.

Les lignes directrices décrites pour les études de stabilité permettent d'évaluer les variations de la qualité du principe actif ou du médicament sous l'influence de facteurs d'environnement tels que la température, l'humidité ou la lumière, afin de recommander en particulier les conditions de stockage. La nature de ces essais dépend du produit et du type de molécule à étudier, et les principaux objectifs des études de stabilité peuvent être résumés comme présenté sur le tableau 1.2.

Lors du contrôle de la stabilité des médicaments, le programme d'étude est conditionné par la prise en compte du marché visé, en particulier des conditions climatiques de la (ou des) région(s) où le produit sera utilisé. Pour les besoins de ces études de stabilité, le monde est alors divisé en quatre zones climatiques tels que présenté sur le tableau 1.3 (d'après Grimm [8]).

Objectif	Type d'étude	Phase
Choisir une formulation et un système récipient-fermeture satisfaisant (du point de vue de la stabilité).	Accélérée.	Mise au point du produit.
Déterminer la durée de validité et les conditions de stockage.	Accélérée et en temps réel.	Mise au point du produit et constitution du dossier d'homologation.
Confirmer la durée de validité annoncée.	En temps réel.	Dossier d'homologation.
Vérifier qu'aucun changement susceptible d'avoir un effet défavorable sur la stabilité du produit n'a été apporté à la formulation ou au procédé de fabrication.	Accélérée et en temps réel.	Assurance de la qualité au sens large, y compris le contrôle de la qualité.

TABLE 1.2 – Principaux objectifs des études de stabilité, d'après l'OMS [2].

Zone climatique	Valeurs mesurées à l'air libre.		Valeurs mesurées en entrepôt.	
	°C	%HR	°C	%HR
I. Climat tempéré.	10.9	75	18.7	45
II. Climat subtropical avec possibilité de forte humidité.	17.0	70	21.1	52
III. Climat chaud et sec.	24.4	39	26.0	54
IV. Climat chaud et humide.	26.5	77	28.4	70

TABLE 1.3 – Conditions climatiques moyennes, d'après Grimm [8].

1.2 Étapes de la chaîne du froid des produits de santé

On parle de la chaîne du froid des produits de santé pour définir l'ensemble des dispositions prises afin de garantir qu'un produit reste à bonne température lors des étapes de transport, de stockage et de distribution, conduisant les produits pharmaceutiques depuis leurs matières premières initiales jusqu'à sa consommation finale. L'emphase est portée sur le mot « chaîne » afin de souligner l'importance de la continuité de ces étapes où aucun maillon ne doit céder engendrant une rupture de la chaîne du froid. Chaque étape possède donc ses acteurs, soumis à des normes et des protocoles permettant de vérifier le maintien des produits pharmaceutiques dans les conditions de stockage préalablement définies par les études de stabilité. Lorsqu'une faille est observée dans le circuit logistique, alors les produits ne peuvent recevoir d'autorisation de distribution et peuvent même être amenés à être détruits, ce qui a des conséquences financières d'une part, mais aussi de santé publique d'autre part puisqu'alors les médicaments n'ont pu être distribués.

Dans le cadre d'un transport international, les étapes de transport peuvent se dérouler comme présenté sur la figure 1.1 :

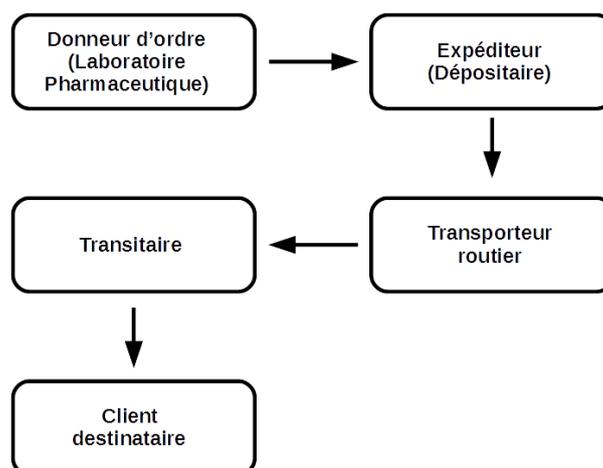


FIGURE 1.1 – Étapes de la chaîne du froid pour un transport international.

Chaque intervenant possède alors son lot de responsabilité afin d'assurer la continuité de la chaîne du froid :

- le donneur d'ordre est celui qui choisit le flux de transport adapté, il est alors de fait

responsable de la vérification de la qualité des infrastructures et de la mise en place de l'organisation des acteurs de la chaîne ;

- l'expéditeur prépare et emballe les produits, il est alors responsable de la conformité de la préparation par rapport aux exigences précisées par le donneur d'ordre ;
- les transporteurs (routier, aérien ou maritime) doivent être capable d'offrir un service en adéquation avec la demande en terme de ponctualité et de température de transport, ils doivent d'ailleurs être capable de fournir une traçabilité des températures ;
- le transitaire organise la liaison entre les différents transporteurs, il doit s'assurer de l'intégrité de l'expédition et doit pouvoir communiquer avec les différents acteurs.

La plupart des circuits font intervenir ces différents acteurs, le nombre d'étapes et de transitaires dépend ensuite des pays de destination. On distingue généralement deux types de circuits : le circuit hospitalier d'une part (représentant en France 14 % des volumes) et le circuit officinal d'autre part (pour 86 % des volumes).

Afin de garantir le maintien des produits dans des conditions idéales de conservation tout au long du circuit de distribution, on met alors en œuvre différents moyens logistiques de transport et de stockage.

1.3 Moyens logistiques pour le transport et le stockage des produits thermosensibles

1.3.1 Dispositifs d'apport de froid

L'enjeu principal est de maintenir les produits transportés ou stockés dans les intervalles de températures idéales définis par les études de stabilité. Pour ce faire on a recours à des dispositifs d'apport ou de production de froid, chacun ayant leurs avantages et inconvénients. On distingue principalement :

- les accumulateurs de froid ;
- les groupes frigorifiques ;
- les dispositifs cryogéniques.

Ainsi pour conserver les produits à des températures positives ou modérément négatives, on a recours à l'utilisation d'accumulateurs dont la température de changement de phase est proche de la température de conservation souhaitée ou à des groupes frigorifiques réglés à la température adéquate.

Pour conserver les produits à des températures très basse ($<30^{\circ}\text{C}$), il est plutôt conseillé d'utiliser de la glace carbonique.

1.3.1.1 Accumulateurs de froid

Le rôle des accumulateurs de froid est d'absorber l'énergie thermique échangée entre l'intérieur et l'extérieur pendant la durée du circuit logistique. Il s'agit d'une solution passive ne nécessitant pas d'apport électrique et donc ayant le potentiel de pallier à d'éventuels accidents de parcours et étant particulièrement adaptée aux différentes étapes transitaires.

Ces accumulateurs peuvent se présenter sous différentes formes et natures, adaptées à diverses utilisations. On distingue notamment les accumulateurs rigides (habituellement sous forme de briquette, fig. 1.2, a) et les accumulateurs souples (sous forme de pochette, fig. 1.2, b).

Les accumulateurs rigides présentent l'avantage de conserver leur forme lors de la congélation, ils sont étanches et résistants au choc, et ils ont une longue durée de vie. A contrario, les accumulateurs souples conservent difficilement leur forme lors de la congélation (selon les conditions de stockages), ils sont relativement fragiles, résistent moyennement aux chocs et des fissures peuvent apparaître sur l'enveloppe, provoquant des fuites. Ils présentent toutefois

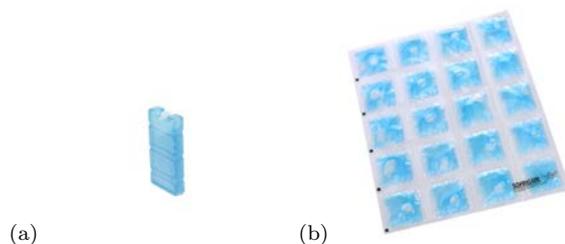


FIGURE 1.2 – (a) Exemple d'accumulateur de froid rigide, (b) exemple d'accumulateur souple.

l'avantage de pouvoir parfois mieux s'adapter aux produits à transporter, en particulier lors du transport de très petits volumes.

La nature des accumulateurs présents sur le marché reste encore assez peu diversifiée, les principaux types d'accumulateurs sont réunis dans le tableau 1.4.

1.3.1.2 Groupes frigorifiques

Les groupes frigorifiques sont des dispositifs mécaniques de production de froid, nécessitant une source d'énergie extérieure, ils sont généralement utilisés pour maintenir une température définie dans des chambres froides, des entrepôts, des véhicules...

Un groupe frigorifique est dimensionné en fonction de la température désirée, des conditions extérieures et de la qualité de l'isolation de l'enceinte. Suivant sa conception, il peut refroidir ou réchauffer l'enceinte et l'homogénéité de la température dépend du mode de distribution de l'air dans l'enceinte (soufflage).

Les groupes frigorifiques les plus couramment utilisés sont les groupes à compression de vapeur. Ces groupes sont composés de quatre éléments dans lesquels prennent place les quatre transformations suivantes :

- une compression polytropicque ;
- une condensation isobare ;
- une détente isenthalpique ;
- une vaporisation isobare.

Le cycle peut se décrire comme suit : le compresseur comprime le gaz, provoquant ainsi un échauffement de celui-ci. Le gaz réchauffé est ensuite conduit vers le condenseur, où il est refroidi et se condense, on observe donc un changement d'état. Ensuite, le détendeur alimenté en frigorigène à l'état liquide, assure l'alimentation correcte de l'évaporateur et la détente du frigorigène qui subira de nouveau un changement de phase dans l'évaporateur pour revenir à l'état gazeux et retourner dans le compresseur. Il s'agit en fait d'un transfert de chaleur d'une zone à une autre, la chaleur absorbée par l'évaporateur étant ensuite évacuée par le condenseur (fig. 1.3).

Il existe d'autres procédés pour la production de froid par un groupe frigorifique, on peut par exemple penser à :

- matériels à effet Peltier, effet thermo-électrique découvert en 1834 par le physicien J.C. Peltier. Ce procédé permet de produire, par apport d'énergie électrique, à la fois du froid sur une face d'un assemblage d'éléments semi-conducteurs et, bien sûr, de la chaleur sur l'autre face. Ce procédé a été occasionnellement utilisé pour le transport frigorifique dans des cas limités. Il se développe actuellement pour le refroidissement des ordinateurs ;
- matériels à absorption, adsorption ou réaction chimique : intéressant pour récupérer de la chaleur, ils sont utilisés couramment dans les réfrigérateurs ménagers de zones dénuées d'électricité, à partir de pétrole ou de gaz ou pour utiliser l'énergie solaire. Certains matériels ont été construits pour des chariots d'approvisionnement de supérettes.

Nature	Température de changement de phase	Plage d'emploi	Avantages	Inconvénients
Eau brute ou eau + colorant.	0°C	de 0°C à $+20^{\circ}\text{C}$	Chaleur latente importante et faible coût.	Restitution hétérogène et moins longue. Nécessite un équipement de mise en température.
Gels eutectiques : eau + additifs viscosants + colorant.	0°C	de 0°C à $+20^{\circ}\text{C}$	Chaleur latente importante et durée de restitution supérieure à celle de l'eau. Restitution contrôlée et longue en relation avec la viscosité. Reproductibilité des performances.	Coût plus élevé. Nécessite un équipement de mise en température.
Eau + sels ou eau + sels + colorant	$<0^{\circ}\text{C}$	de 20°C à 0°C	Chaleur latente importante et faible coût.	Restitution hétérogène et moins longue. Nécessite un équipement de mise en température.
Gels eutectiques : eau + sels + additifs viscosants + colorant.	$<0^{\circ}\text{C}$	de 20°C à 0°C	Chaleur latente importante et durée de restitution supérieure à celle de l'eau. Restitution contrôlée et longue en relation avec la viscosité. Reproductibilité des performances.	Coût plus élevé. Nécessite un équipement de mise en température.
Paraffines.	$>0^{\circ}\text{C}$	de $+2^{\circ}\text{C}$ à $+20^{\circ}\text{C}$	Température de changement de phase positive : Pas de risque de choc froid.	Restitution courte et hétérogène. Inflammable et/ou toxique. Nécessite des enveloppes spécifiques car risque de fuite élevé. Coût plus élevé. Nécessite un équipement de mise en température.

TABLE 1.4 – Principaux types d'accumulateurs disponibles sur le marché.

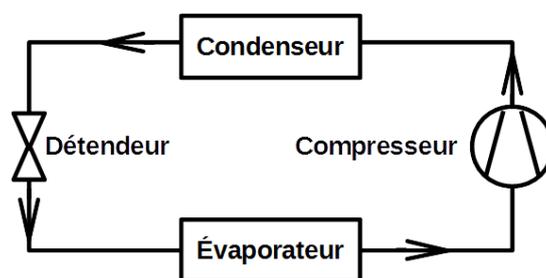


FIGURE 1.3 – Schéma de principe du fonctionnement de la machine frigorifique à compression simple.

Ces procédés restent cependant très marginaux dans le cadre du transport et du stockage de produits pharmaceutiques.

1.3.1.3 Dispositifs cryogéniques

On distingue deux catégories de cryogénie : la cryogénie dite solide, faisant intervenir du CO_2 solide, ou la cryogénie dite liquide, faisant intervenir du CO_2 ou de l'azote liquides.

Le CO_2 solide est obtenu par détente de CO_2 liquide à pression atmosphérique, le froid est alors produit lors de la sublimation du CO_2 solide, laquelle intervient à $-78.5^\circ C$.

Le CO_2 solide se présente sous plusieurs formes : neige carbonique en vrac ou en sachets, glace carbonique en blocs, en plaquettes suremballées ou en petits bâtonnets.

La difficulté de cette solution tient à la conservation de la glace carbonique, car elle nécessite des congélateurs à des températures inférieures à $-80^\circ C$ avec un système permettant d'évacuer, en cas de sublimation, le gaz carbonique pour éviter les intoxications. L'avantage en revanche est le fort pouvoir frigorifique lié à la sublimation du CO_2 solide.

Dans le cas de la cryogénie liquide, le froid est produit lors de la vaporisation des fluides cryogéniques à des températures très basses, pouvant aller jusqu'à $-196^\circ C$ dans le cas de l'azote liquide.

Les fluides cryogéniques sont stockés dans des réservoirs cryogéniques sous pression.

Différentes applications sont possibles avec ce type de dispositifs : installation d'équipements cryogéniques pour la production de froid dans les camions, emballages cryogéniques pour le transports de petites unités...

1.3.2 Moyens de transport : différents types de conteneurs

Les conteneurs sont des dispositifs dont l'objectif premier est le transport de produits. Ils sont de conception robuste et réalisés pour pouvoir être réutilisés durant de nombreuses années. Pour pouvoir transporter des produits dans des conditions de température données, ils peuvent être équipé de l'un ou l'autre des dispositifs d'apport de froid précédemment cités.

On distingue les conteneurs terrestres, les conteneurs maritimes et les conteneurs aériens.

1.3.2.1 Conteneurs terrestres

Les conteneurs terrestres sont utilisés pour le transport de produits par voie terrestre et se déclinent en deux catégories suivant leur taille et leur mode de locomotion.

Les conteneurs de petite taille ou de taille moyenne, tels que les glacières ou les « rolls » conteneurs, sont fait pour être déplacés à la main. Leurs volumes utiles vont de 1 litre à 2000 litres environ et ils peuvent être équipés de dispositifs d'apport de froid. Les dispositifs les plus fréquemment utilisés sont des accumulateurs de froid, de ce fait ils ne disposent en général pas de système de chauffage ni de système de modulation de la température. Certains conteneurs de petites tailles sont en revanche parfois équipé d'un système à azote liquide ou d'un groupe frigorifique permettant la régulation de la température des produits transportés.

Les caisses mobiles ont été développés notamment pour le transport par voie ferrée, la caisse est dimensionnée au gabarit routier, de façon à pouvoir être transportée sur un châssis semi-remorque. Ce dimensionnement s'avère parfois compliqué en raison des différentes normes des différents pays, mais le conseil de l'Europe notamment a adopté une résolution visant entre autre à harmoniser ces normes [9]. Elles présentent des caractéristiques permettant sa mise en place sur un wagon pour les trajets ferroviaires ainsi que des points de renfort pour la manipulation à l'aide d'une grue. Ces conteneurs sont équipés d'un groupe frigorifique autonome, lequel est généralement muni de deux dispositifs d'entraînement du compresseur (thermique et électrique) de manière à leur conférer une plus grande autonomie.

1.3.2.2 Conteneurs maritimes

Les conteneurs maritimes sont des conteneurs qui ont été fabriqués de manière à pouvoir être empilés pour faciliter le transport par voie maritime. Les conteneurs réfrigérés (ou à température contrôlée) sont différenciés en deux types selon le système de refroidissement.

Les conteneurs de type Conair sont des conteneurs dont le système de refroidissement est externalisé, autrement dit la production frigorifique est assurée par un dispositif installé sur le navire, l'air réfrigéré est alors envoyé dans le conteneur via un réseau de gaines. La caisse est munie de deux ouvertures circulaires sur sa face avant, l'une en partie inférieure pour l'introduction de l'air réfrigéré, et l'autre en partie supérieure pour la reprise d'air. À terre, la réfrigération doit alors être assurée par un autre dispositif remplaçant la machinerie du navire. Ce type de conteneur est de moins en moins utilisé à cause de son manque d'autonomie une fois à terre.

A contrario les conteneurs de type Reefer sont des conteneurs munis de leur propre système frigorifique. Ceux-ci doivent tout de même être raccordés à un groupe générateur d'énergie (les groupes électrogènes des navires ou les alimentations électriques fixes dans les ports). La circulation de l'air s'effectue de bas en haut : l'air est soufflé par la base, au travers du plancher via des rainures sur toute la longueur du conteneur, et est repris en partie supérieure au dessus du chargement. La régulation de la température se fait selon plusieurs modes, en fonction de la gamme de températures souhaitée : pour des températures supérieures à -7°C la régulation se fait sur le soufflage de l'air (c'est à dire que la régulation sera faite de manière à ce que la température de l'air soufflé soit égale à la consigne) et on parle de mode de conservation. Pour des températures inférieures, la régulation se fait sur la reprise et on parle de mode de congélation.

Les conteneurs de type Reefer se différencient donc des conteneurs de type Conair par l'intégration de leur propre système frigorifique, ce qui simplifie alors la logistique puisque les navires et les ports n'ont plus besoin d'avoir eux même un système frigorifique de grande capacité, mais plus simplement une source d'énergie électrique. Toutefois, dans les deux cas, des arrêts de la réfrigération des conteneurs sont inévitables lors des opérations de chargement/déchargement, ces transferts occasionnent des ruptures dont la durée peut être très variable et qui doivent être surveillées.

1.3.2.3 Conteneurs aériens

Les conteneurs utilisés dans le cadre du fret aérien doivent répondre à certains critères particuliers, notamment en terme de poids et de forme.

En effet, lors d'un transport aérien, le poids embarqué est fortement surveillé car il influe grandement sur l'énergie consommée lors du trajet, et la forme arrondie des coques d'avion nécessite d'avoir recours à des formes de conteneurs particulières de manière à maximiser l'utilisation du volume utile.

Plusieurs types de conteneurs ont été développés pour pouvoir adapter le chargement aux différents types d'avions, dont les standards et les normes ont été définies par l'Association internationale du transport aérien (IATA). On distingue deux familles de formes de caisses : l'une présentant une forme adaptée à l'arrondi des soutes d'avions, et l'autre rectangulaire pouvant être chargée sur les ponts supérieurs (lorsqu'ils existent) pour maximiser l'utilisation de l'espace disponible. Lorsque ces conteneurs sont équipés d'un dispositif d'apport de froid, ils sont alors référencés pour les premiers en tant que modèle *RKN* et pour les seconds en tant que modèle *RAP*.

À cause des contraintes de poids et d'économie d'énergie, la plupart des conteneurs aériens utilisés ont recours à un dispositif cryogénique solide. Les conteneurs sont alors divisés en deux compartiments, l'un dans lequel est stockés la glace carbonique et l'autre destiné à recevoir les

marchandises. La circulation de l'air refroidi au contact de la réserve de glace carbonique est assurée par des ventilateurs fonctionnant au moyen de piles dont la mise en route et l'arrêt sont assurés par un thermostat d'ambiance. Pour autant on ne peut pas parler de régulation de température.

Compte tenu du fait que lors du vol la surveillance du fonctionnement du matériel et la recharge de glace carbonique ne sont pas possible, il convient de déterminer au préalable la charge optimale en réfrigérant ainsi que d'identifier sur la chaîne logistique les points de recharge possibles.

Les conteneurs ayant recours à un dispositif d'apport de froid mécaniques sont très peu développés. Ils sont généralement utilisés dans le cadre d'interventions militaires ou pour l'usage d'ONG dans le cadre d'opérations d'assistance humanitaire. En plus du système frigorifique mécanique, ces conteneurs disposent également d'un groupe électrogène de manière à les rendre totalement autonomes, ces groupes électrogènes peuvent par ailleurs également servir en supplément à d'autres usages.

Les différents types de conteneurs existant permettent donc de transporter les produits thermosensibles entre les différents acteurs de la chaîne du froid, aussi bien par voie terrestre, que maritime ou aérienne. Ces conteneurs font intervenir l'un ou l'autre des dispositifs de production de froid pour assurer le maintien des produits dans la gamme de températures souhaitée. Ainsi les laboratoires pharmaceutiques ne sont pas limités dans leur capacité de distribution et peuvent transporter leurs produits sur l'ensemble du globe. Toutefois des risques demeurent, notamment lors du transfert d'un transporteur à un autre ou lors de chargements et de déchargements, car alors les produits peuvent être amenés à subir directement les températures extérieures pendant des durées variables. Ces opérations sont particulièrement critiques par exemple sur les tarmacs des aéroports où les produits peuvent de plus être exposés à l'ensoleillement, faisant monter drastiquement les températures. Pour remédier à ces problèmes, la solution adoptée est généralement le recours à des emballages thermiques.

1.4 Emballages thermiques : solutions passives équipées de matériaux à changement de phase

Les emballages thermiques sont des conteneurs de tailles variables constitués d'un matériaux isolant (tel que le polyuréthane par exemple) et pouvant être associé à des accumulateurs de froid, dont le but est de maintenir les produits dans la gamme de température souhaitée sur la totalité du trajet.

Dans le cadre de la chaîne du froid des produits de santé, ces emballages ont des volumes utiles de l'ordre de 1 litre à plus de 1000 litres et sont présentés sous forme de caisses rigides. Ces caisses sont chargées au départ de la chaîne du froid et ne sont pas ouvertes avant d'avoir atteint la destination finale, la source de froid présente au sein de l'emballage permet alors d'absorber les variations de la température extérieure lorsque la caisse ne se trouve pas dans un environnement à température contrôlée. Les configurations de ces emballages doivent être donc définies en fonction d'un cahier des charges prenant en compte les volumes à transporter et les conditions extérieures. En effet chaque variable (nature et épaisseur des parois, quantité d'accumulateurs, température(s) initiale(s) des accumulateurs...) a une influence importante sur la répartition des températures à l'intérieur de l'emballage au cours du temps. La quantité de froid notamment doit être efficacement étudiée car une quantité insuffisante provoquerait des montées en températures non souhaitées sur la fin du trajet, tandis qu'une quantité de froid trop importante provoquerait des descentes en température trop importantes au départ.

D'autres types d'emballages existent pour une utilisation par les particuliers pour des volumes moindres. On peut trouver des modèles de trousse ou de pochettes pour le transport

des produits entre la pharmacie et le réfrigérateur des particuliers ou lors de voyages.

1.4.1 Matériaux isolants

La première protection des produits face aux températures extérieures correspond aux parois des emballages thermiques, ces parois sont constituées de matériaux possédant des caractéristiques thermiques permettant de diminuer les transferts de chaleur entre l'intérieur et l'extérieur du conteneur. Les matériaux les plus couramment utilisés sont le polystyrène expansé (PSE), le polyéthylène extrudé (PPE) et le polyuréthane (PU).

1.4.1.1 Polystyrène expansé

Le polystyrène est un matériau obtenu par polymérisation du styrène et du pentane. Les billes de matériau initial sont placées dans une cuve où de la vapeur d'eau est injectée pour provoquer la « pré-expansion » (où la bille grossit jusqu'à 30 fois son volume initial). Après un temps de repos appelé « maturation », les billes sont introduites dans le moule correspondant à la forme finale désirée avec de nouveau injection de vapeur d'eau : elles se soudent alors entre elles et prennent la forme du moule. On obtient de cette manière un matériau alvéolaire.

L'avantage principal du polystyrène tient à son mode de fabrication, par moulage, qui permet de lui faire adopter des formes et des géométries complexes.

Le procédé de fabrication engendre, selon la quantité de gaz injecté, des polystyrènes de différentes densités volumiques. De même la conductivité thermique de ces polystyrènes sera variable comme on peut le voir dans le tableau 1.5 dont les valeurs sont issues d'un ouvrage compilant les études faites sur les propriétés physiques des polymères [10].

Densité	Conductivité thermique
16 kg m ⁻³	0.040 W m ⁻¹ K ⁻¹
32 kg m ⁻³	0.036 W m ⁻¹ K ⁻¹
64 kg m ⁻³	0.033 W m ⁻¹ K ⁻¹
96 kg m ⁻³	0.036 W m ⁻¹ K ⁻¹
160 kg m ⁻³	0.039 W m ⁻¹ K ⁻¹

TABLE 1.5 – Conductivité thermique de la mousse de polystyrène en fonction de sa densité, d'après Mark [10].

1.4.1.2 Polyéthylène

Le polyéthylène est le polymère le plus utilisé au monde, notamment à cause de sa simplicité ainsi qu'à la très large gamme d'utilisations possibles. En fonction de son point de fusion, on divise le polyéthylène en plusieurs catégories : basse, moyenne et haute densité. Chaque classe ayant ses applications industrielles spécifiques. De manière générale on peut dire que le polyéthylène basse densité est utilisé pour la fabrication de produits souples (sacs, films, sachets...) tandis que le polyéthylène à haute densité est utilisé pour la fabrication de produits rigides (flacons, bouteilles, boîtes...).

Le polyéthylène est le produit de la polymérisation de l'éthylène. Traditionnellement, la polymérisation était menée à très hautes pressions et températures (plusieurs centaines de bars et de degrés Celsius), mais au cours des années, l'apport d'énergie a été diminué en utilisant des systèmes catalytiques. Le polyéthylène est actuellement fabriqué principalement via des procédés en suspension.

La poudre issue du procédé de polymérisation est ensuite utilisée selon différentes techniques de moulages afin de pouvoir produire les objets finaux. On peut citer le moulage par injection,

où le polymère fondu est forcé sous pression à l'intérieur d'un moule froid et fermé, le moulage par compression, où le polymère ramolli est placé dans un moule chaud et une pression lui est appliquée pour lui faire prendre la forme du moule...

La conductivité thermique du polyéthylène selon sa densité est consultable dans le tableau 1.6.

Densité	Conductivité thermique
35 kg m ⁻³	0.053 W m ⁻¹ K ⁻¹
64 kg m ⁻³	0.058 W m ⁻¹ K ⁻¹
96 kg m ⁻³	0.058 W m ⁻¹ K ⁻¹
144 kg m ⁻³	0.058 W m ⁻¹ K ⁻¹

TABLE 1.6 – Conductivité thermique du polyéthylène extrudé en fonction de sa densité, d'après Mark [10].

1.4.1.3 Polyuréthane

Le polyuréthane est le résultat de la polymérisation d'un isocyanate et d'un alcool. Cette polymérisation est ensuite couplée à un dégagement gazeux afin de créer au sein du polymère des alvéoles de gaz en surpression. Les propriétés finales de la mousse de polyuréthane dépendent des composants chimiques de l'agent gonflant, des conditions du procédé et de la nature des parements du moule.

Bien que les principaux gaz à effet de serre aient été bannis des procédés de fabrication des mousses, l'agent d'expansion du polyuréthane reste le dioxyde de carbone. Il existe deux types principaux de procédés utilisés pour le moussage des polymères : le moussage par utilisation d'un fluide supercritique ou le moussage chimique par libération d'un gaz. Dans le premier cas un gaz pressurisé ou volatil est dissout dans le mélange de réactifs au sein d'un moule fermé, c'est la dépression brutale du mélange au sein du système d'extrusion qui provoque alors le moussage. Dans le deuxième cas on a recours à un agent de moussage réagissant avec les constituants du mélange pour fabriquer un gaz formateur de cellules, pour le polyuréthane cet agent formateur est l'eau qui réagit avec l'isocyanate pour dégager du dioxyde de carbone.

La technique du moussage chimique est généralement préférée à celle du fluide critique, cette dernière étant mieux adaptée au moussage des thermoplastiques. Le moussage thermique peut être mis en œuvre de deux manières : par injection ou par coulée souple.

Le moulage par injection consiste à déposer une quantité minutieusement déterminée dans le fond d'un moule du mélange dont l'expansion rapide permet de remplir le moule et donner à la pièce la forme voulue. Cette méthode est utilisée pour la réalisation de pièces de géométries bien spécifiques ou complexes, toutefois elle souffre de quelques défauts. En effet l'homogénéité de la microstructure cellulaire n'est pas garantie, de plus des défauts de surface sont fréquents ayant pour cause de fortes surpressions locales à l'intérieur du moule, lorsque la viscosité du polymère ne lui permet plus de résister il y a alors déchirure locale des parois intercellulaires du polyuréthane.

Le moulage par coulée est utilisé pour créer de grands blocs de mousses sous forme de panneaux. Le mélange liquide est déposé en continu par une tête de coulée sur une bande de papier kraft et/ou de film polyéthylène à bords relevés, entraîné par une bande transporteuse mue sur des rouleaux. Le mélange subit alors une expansion rapide et est également contenu en partie supérieure par des bandes de papier kraft et des rouleaux. La bande de mousse assez facilement atteint plusieurs mètres de largeur et de hauteur tout en conservant une assez bonne homogénéité de densité et de taille de cellules.

Les valeurs de conductivité de la mousse de polyuréthane pour plusieurs type de mousse sont regroupées dans le tableau 1.7.

Nature de la mousse	Conductivité thermique
Air soufflé à 0 ° C	0.033 W m ⁻¹ K ⁻¹
Air soufflé à 20 ° C	0.036 W m ⁻¹ K ⁻¹
Air soufflé à 70 ° C	0.040 W m ⁻¹ K ⁻¹
CO ₂ soufflé à 20 ° C, $\rho = 64 \text{ kg m}^{-3}$	0.016 W m ⁻¹ K ⁻¹
20 % de cellules closes à 20 ° C	0.033 W m ⁻¹ K ⁻¹
90 % de cellules closes à 20 ° C	0.016 W m ⁻¹ K ⁻¹

TABLE 1.7 – Conductivité thermique de la mousse de polyuréthane pour plusieurs types de mousse, d’après Mark [10].

1.4.2 Accumulateurs de froid

Le principe de fonctionnement des accumulateurs de froid est basée sur la théorie du changement de phase, et en particulier sur la notion de chaleur latente de stockage du matériaux composant les accumulateurs. En effet le stockage latent de la chaleur permet de remédier au décalage entre disponibilité et demande d’énergie en absorbant ou en restituant la chaleur lors du changement de phase.

1.4.2.1 Théorie du changement de phase

Le changement de phase est un phénomène depuis longtemps connu et étudié et fait l’objet de nombreux cours de thermodynamique [11][12]. La science des état de la matière selon laquelle un corps peut exister sous différents états est née au XIX^{ième} siècle, elle s’est ensuite développée et a connu au XX^{ième} siècle deux révolutions majeures grâce au développement de la mécanique quantique d’une part et des lois d’échelle d’autre part.

On parle de phase pour décrire toute partie homogène, physiquement distincte et séparée des autres parties du système par une surface définie. On dit qu’il y a changement de phase si, en modifiant continument la valeur de certains paramètres intensifs d’un système, ce dernier peut passer d’une phase à une autre (de façon continue ou non).

De manière générale, on observe qu’il est possible de rencontrer, pour une même substance, plusieurs arrangements distincts des atomes et des molécules, constituant ainsi des phases.

Trois grandes familles de phases ont été définies, dans lesquelles la matière peut se trouver : solide, liquide et gaz.

Les phases solides sont caractérisées par un ordre à grande distance et l’absence de liberté entre les molécules ou les ions. La matière à l’état solide présente alors à l’échelle macroscopique une forme et un volume propres. Il existe généralement plusieurs phases solides différentes pour un même matériau en fonction de l’arrangement spécifique des molécules.

On parle de fusion pour le passage d’une phase solide à une phase liquide et de solidification pour la transition d’une phase liquide à une phase solide.

Les phases liquides sont caractérisées par un ordre à courte distance pour lequel les molécules sont désordonnées à grande distance. Les molécules d’un corps à l’état liquide demeurent liées entre elles, mais cette liaison est considérablement affaiblie par rapport à l’état solide. La matière est alors facilement déformable mais difficilement compressible. Il n’existe généralement qu’une seule phase liquide pour un même matériau (l’Helium constitue par exemple une exception, possédant plusieurs phases liquides voire superfluides).

La transition d'un état liquide à un état gazeux est dénommé vaporisation (soit sous forme d'ébullition, soit sous forme d'évaporation), tandis que la transition d'un état gazeux à un état liquide est dénommé liquéfaction (ou encore condensation liquide).

Les phases gazeuses sont caractérisées par un désordre à toute distance. Les molécules constituant la matière sont alors quasiment indépendantes les unes des autres et la matière n'a ni forme ni volume propres (un gaz tend à occuper tout le volume disponible). Il n'existe qu'une seule phase gazeuse par matériaux.

On parle de condensation solide, de déposition ou encore de sublimation inverse pour décrire la transition d'un état gazeux à un état solide et de sublimation pour la transition d'un état solide à un état gazeux.

Changement de phase d'un corps pur idéal : on parle d'un corps pur idéal (ou simple) pour décrire un corps composé d'une unique espèce chimique. Pour un corps pur donné et un volume fixé, chacune des phases a alors un domaine de stabilité dépendant de la pression et de la température. Ces domaines sont représentables sur un graphique que l'on appelle diagramme des phases (fig.1.4).

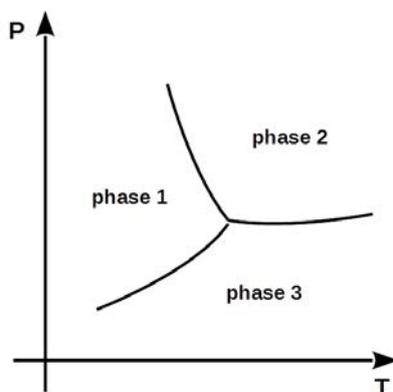


FIGURE 1.4 – Diagramme des phases.

En effet, pour un corps pur, seules la température et la pression sont pertinentes pour exprimer le potentiel chimique μ , la composition étant imposée par sa nature de corps pur.

Si on impose à la fois la température et la pression, le potentiel chimique $\mu^L(T, P)$ de la phase liquide, celui de la phase gazeuse $\mu^G(T, P)$ et celui de la phase solide $\mu^S(T, P)$ sont alors déterminés et n'ont a priori aucune raison d'être égaux. Le système cherchera alors à minimiser son enthalpie libre et le corps pur se retrouvera dans l'état qui correspond au plus petit des potentiels chimiques.

La coexistence de deux phases n'est possible qu'à la condition de l'égalité des potentiels chimiques, par exemple pour le cas liquide-gaz on écrit :

$$\mu^L(T, P) = \mu^G(T, P) \quad (1.1)$$

on obtient donc une relation entre la température et la pression qui se représente comme une courbe sur le diagramme des phases. Ainsi, une transformation correspondant à une pression constante $p = p_{\text{atm}}$ peut se représenter sous la forme d'une ligne sur le diagramme des phases (fig.1.5) coupant la frontière entre deux phases, ici celle entre la phase solide et la phase liquide. La température en ce point correspond alors à la température de fusion T_f du corps pur. Si $T < T_f$, le corps pur à l'équilibre thermodynamique sera sous sa phase solide. Si $T > T_f$, le corps pur à l'équilibre thermodynamique sera sous sa phase liquide.

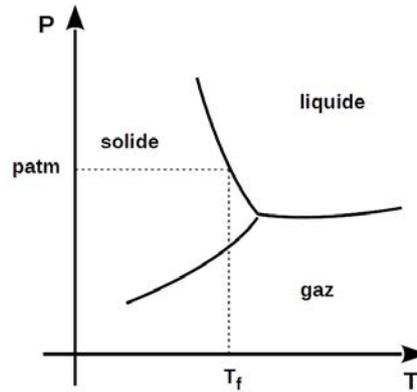


FIGURE 1.5 – Représentation d'une transformation dans le diagramme des phases.

Dans le cas des emballages thermiques que l'on considère, les conditions d'utilisations imposent de limiter les variations de volume et de pression lors du changement de phase. De fait cela interdit de recourir au changement de phase liquide-vapeur, malgré une énergie mise en jeu bien plus importante, et donc une capacité de stockage plus élevée. On ne s'intéresse qu'au changement de phase solide-liquide, car dans ce cas en effet, la courbe de coexistence solide-liquide est quasiment verticale dans le diagramme température-pression, ce qui signifie que la transformation intervient avec une variation de pression infime et négligeable, et l'on peut définir pour les corps purs une unique température de fusion sans avoir à préciser la pression correspondante.

Si maintenant on considère le changement de phase d'un point de vue dynamique. On soumet le corps pur à une perturbation en température à un temps t , il n'atteindra alors son équilibre thermodynamique qu'à un instant $t + \Delta t$. Le changement d'équilibre thermodynamique implique des échanges de chaleur avec le milieu extérieur et le temps nécessaire au retour à l'équilibre est le temps que prennent ces échanges.

L'évolution temporelle de la température T et du flux de chaleur massique q sortant d'un corps pur idéal, de masse m et soumis à un échelon de température ΔT est représenté sur la figure 1.6 dans le cas d'un changement de phase de liquide à solide. Cet échelon de température provoque la solidification du matériau. On peut décrire l'évolution de ce refroidissement en trois étapes :

1. Le refroidissement de la phase liquide : le corps pur sous forme liquide libère de la chaleur sensible de manière à abaisser sa température jusqu'à atteindre la température de fusion du matériau (fig.1.6,a). La valeur totale de la chaleur libérée lors de cette étape vaut alors $H_l = mc_{pl}(T_a - T_f)$, avec c_{pl} la chaleur massique du liquide. Cette énergie correspond à l'aire sous la courbe de flux (fig.1.6,b).
2. Le changement de phase : durant la durée du changement de phase, le corps pur reste à température constante égale à la température de fusion T_f , c'est alors la chaleur latente de fusion mL_h qui est libérée.
3. Le refroidissement du solide : le corps pur sous sa forme solide libère de la chaleur sensible pour diminuer en température jusqu'à atteindre la température finale T_z . La chaleur libérée a alors pour valeur $H_s = mc_{ps}(T_f - T_z)$, avec c_{ps} la chaleur massique du solide.

Changement de phase d'un corps pur réel : un corps pur réel, *a contrario* d'un corps pur idéal, est constitué à partir d'atomes de natures différentes. Il peut alors se présenter sous

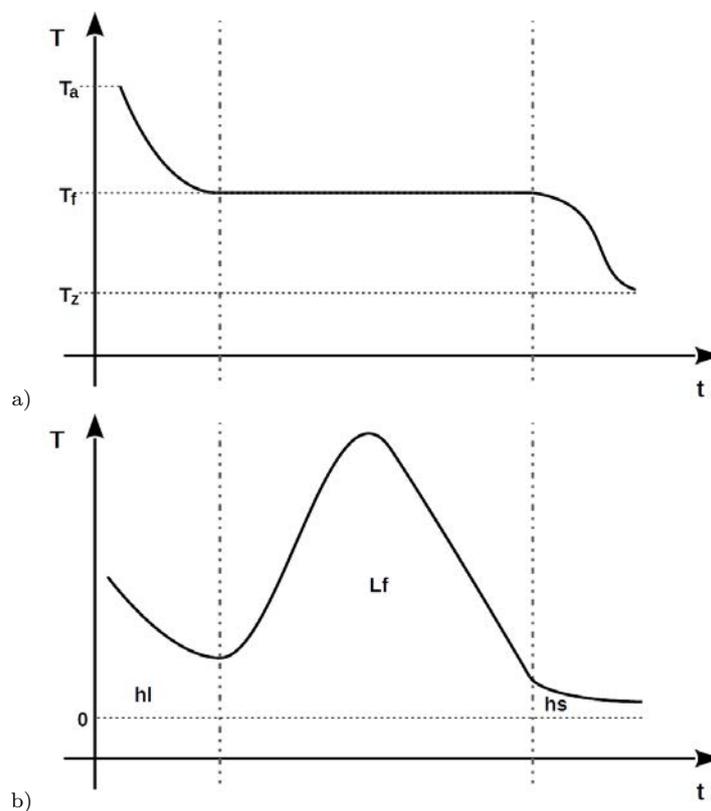


FIGURE 1.6 – Représentation d'un changement de phase de solide à liquide d'un corps pur idéal, a) évolution de la température, b) évolution du flux massique de chaleur.

la forme d'un complexe par exemple tel que la molécule d'eau : H_2O .

Bien qu'il soit souvent pratique de supposer que le changement de phase s'effectue à température constante, cette hypothèse n'est pas vraie pour les corps pur réels et encore moins vraie pour les mélanges.

Le changement de phase des corps purs réels et des mélanges s'effectue sur une plage de température plus ou moins étroite selon le matériau comprise entre le *liquidus* (température de démarrage de la solidification) et le *solidus* (température de fin de solidification). Un exemple de l'évolution de la température d'un corps pur réel est montré sur la figure 1.7.

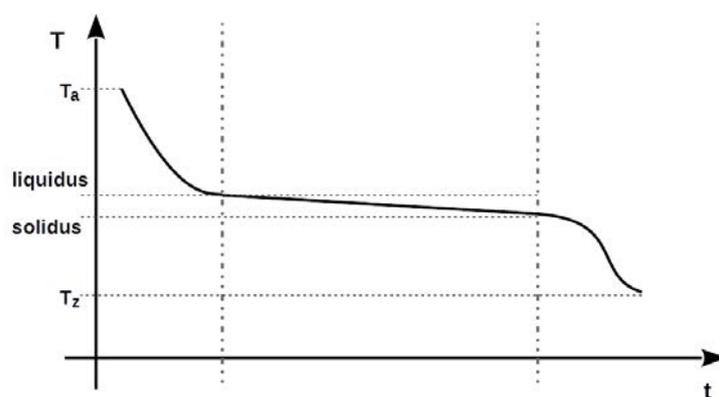


FIGURE 1.7 – Évolution de la température lors de la solidification d'un corps pur réel.

Phénomène de surfusion : la solidification d'un matériau à changement de phase s'effectue en général par précipitation ou cristallisation, à partir de la formation de micro-structures de phase solide au sein du liquide qui croissent ensuite jusqu'à solidification complète du matériau (on parle de germination ou encore de nucléation). Le taux de nucléation d'un matériau correspond à sa capacité à former des nucléis (les micro-structures cristallines) lorsque sa température descend en dessous de la température de fusion.

Les nucléis, formés au sein du liquide, subissent les effets de tension superficielle due à l'interface entre deux milieux denses existant dans des états différents. Lorsque l'énergie nécessaire à la création de l'interface solide-liquide n'est pas suffisante pour compenser l'énergie libérée par la solidification (la chaleur latente de fusion) les nucléis ne peuvent se stabiliser et sont dissous par l'agitation thermique. Dans ce cas le liquide continue de se refroidir sans pour autant se solidifier. Lorsqu'enfin les nucléis arrivent à se stabiliser, alors la transformation intervient subitement et la température interne du matériau remonte soudainement jusqu'à sa température de changement de phase comme on peut le voir sur la figure 1.8.

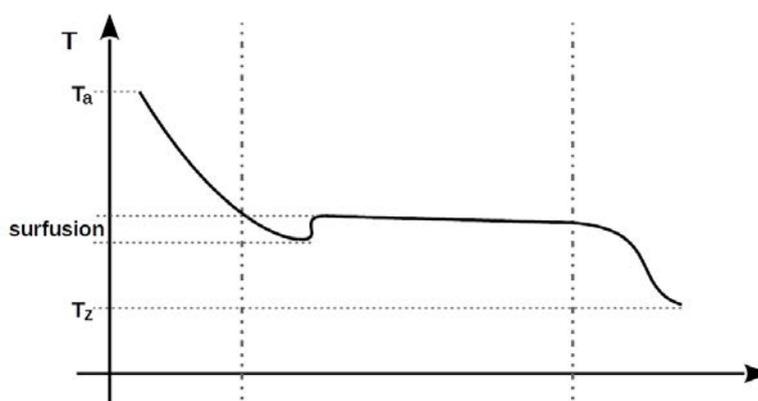


FIGURE 1.8 – Représentation du phénomène de surfusion.

L'introduction dans le matériau à changement de phase d'impuretés (floculants, agents de nucléations...) ou bien la création de défauts dans la paroi du récipient (rayures ou aspérités) permettent de diminuer la quantité d'énergie de surface nécessaire à la stabilisation des formations cristallines et donc de favoriser la solidification en évitant le phénomène de surfusion. En effet, pour des applications de stockage et destockage thermiques à court terme, cet effet de variation de température, parfois imprévisible, est à éviter. Toutefois certaines applications existent tirant profit de ce phénomène, permettant la production de chaleur par l'activation de la cristallisation sous l'effet d'une perturbation mécanique (fig. 1.9).



FIGURE 1.9 – Solidification forcée d'une poche de MCP en surfusion.

1.4.2.2 Nature des matériaux à changement de phase

Un grand nombre de substances, organiques ou non-organiques, existent qui possèdent une forte chaleur latente de fusion et pour une importante gamme de température de changement de phase. Toutefois, afin de pouvoir être utilisé dans des systèmes de stockage d'énergie, ces substances doivent posséder un certain nombre de propriétés dont une liste a été dressée par Abhat dans un article de 1983 [13] :

- le matériau doit posséder une température de fusion dans la gamme de températures souhaitée,
- la chaleur latente du matériau doit être suffisamment élevée afin de pouvoir stocker le maximum d'énergie avec le minimum de matière,
- la densité du matériau doit être suffisamment élevée de manière à diminuer le volume nécessaire à son utilisation,
- une conductivité thermique relativement élevée, de manière à ce que les gradients de températures requis pour la charge et la consommation des accumulateurs soit les plus faibles possibles,
- le changement de phase du matériau doit être le plus harmonieux possible, de sorte que la phase liquide et la phase solide soient identiques en composition,
- un changement de volume limité lors de la transition de phase du matériaux, de manière à pouvoir utiliser des contenants de géométrie simple,
- le changement de phase du matériau doit intervenir avec peu ou pas d'effet de surfusion,
- le matériau doit afficher une bonne stabilité chimique,
- le matériau doit être non corrosif, non toxique et non explosif,
- le matériau doit être disponible en grande quantité à des prix attractifs.

Malheureusement, aucun matériau n'existe qui soit capable de répondre à la totalité des critères dressés, c'est pourquoi il est nécessaire de réaliser des compromis. Les différents matériaux à changement de phase considérés peuvent être regroupés en plusieurs familles, comme on peut le voir sur la figure 1.10.

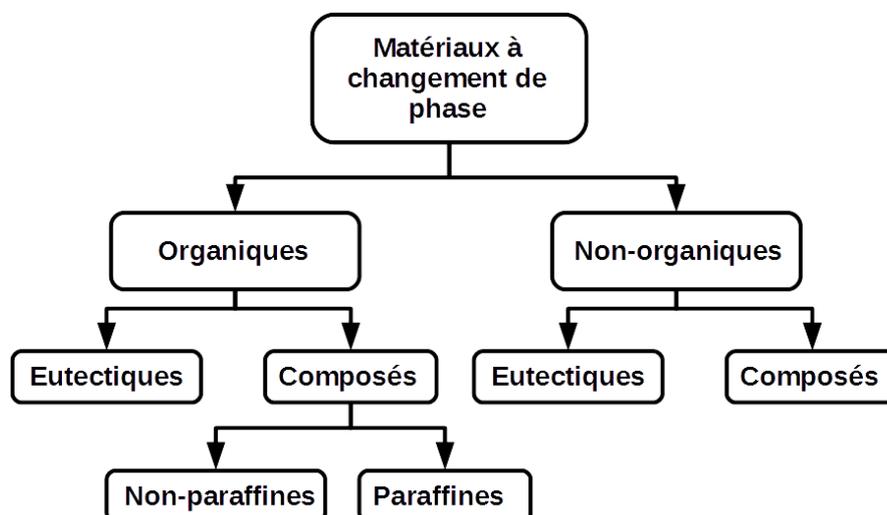


FIGURE 1.10 – Familles de matériaux à changement de phase, d'après Abhat [13].

Eutectiques : un eutectique est un mélange de plusieurs corps, qui a la particularité d'agir comme un corps pur du point de vue de la fusion, en ce sens que le changement de phase liquide-solide s'effectue à température constante. Cette propriété, ainsi que le fait qu'un eutec-

tique change de phase sans créer de ségrégation de ses composants (ce qui permet d'assurer la réversibilité de la transformation), le qualifie comme un bon candidat pour un matériau à changement de phase en vue d'utilisation pour le stockage d'énergie.

Selon la composition et la concentration des différents composants d'un eutectique, on peut faire varier la température de changement de phase de manière à s'approcher au mieux du domaine d'utilisation souhaité.

Zuo *et al.* [14] ont cherché à déterminer la stabilité thermique d'un eutectique d'acide caprique/1-dodecanol. La température de fusion du matériau a montré un bon niveau de stabilité pour une température de fusion de 6.52 °C.

Dimaano et Escoto [15] ont développé un mélange d'acide caprique et d'acide laurique (CA à 65 % et CL à 35 %) comme possible matériau à changement de phase. Elles ont ensuite réalisé une série de tests afin de vérifier leurs propriétés thermique. La température de fusion a été évaluée à 16 °C, et il n'a été observé ni de surfusion, ni de précipitation et un très faible changement de volume lors de la transformation.

Feldman *et al.* [16] ont ainsi travaillé avec un matériau à changement de phase eutectique organique composé à 49 % de butyl stearate et 48 % de butyl palmitate. Ils ont pu vérifier que son incorporation à de la pâte de plâtre (en vu de réaliser des panneaux de plâtre où le MCP est déjà intégré, de manière à proposer des matériaux de construction à stockage d'énergie) faisait peut varier ses caractéristiques. Ainsi le butyl stearate affichait une température de fusion de 17 °C, l'absorption et la libération de la chaleur lors de la transformation n'étaient pas affectées par sa présence dans le plâtre.

Karaipekli et Sari [17] ont préparé un mélange d'acide caprique à 73.5 % et d'acide myristique à 26.5 %, confinée dans de la perlite expansée. Après une série de test, ils ont estimé que la solution était suffisamment stable pour pouvoir être considéré comme un bon candidat de matériau à changement de phase pour le stockage d'énergie dans le bâtiment. La température de fusion du MCP à été évaluée à 21.4 °C.

Kimura et Kai [18] ont étudié des eutectiques non-organiques, sous la forme de mélange de $CaCl_2 \cdot 6H_2O$ avec différents sels hydratés ou des nitrates anhydres. Ils ont pu montrer que ces matériaux affichaient des propriétés satisfaisantes de MCP.

Dans le tableau 1.8 sont regroupés les caractéristiques des eutectiques précédemment décrits.

MCP	Point de fusion (°C)	Chaleur Latente (kJ kg ⁻¹)	Référence
Acide caprique (70 %) + 1-dodecanol (30 %)	6.52	171.06	Zuo <i>et al.</i> [14]
Acide caprique (65 %) + acide laurique (35 %)	16	116.76	Dimaano et Escoto [15]
Butyl stearate (49 %) + butyl palmitate (48 %)	17	138	Feldman <i>et al.</i> [16]
$CaCl_2 \cdot 6H_2O$ (96 %) + NH_4NO_3 (2 %) + NH_4Br (2%)	20	141	Kimura et Kai [18]
$CaCl_2 \cdot 6H_2O$ (80 %) + $CaBr_2 \cdot 6H_2O$ (20 %)	20	117	Kimura et Kai [18]
Acide caprique (73.5 %) + acide myristique (26.5 %)	21.4	152	Karaipekli et Sari [17]
$CaCl_2 \cdot 6H_2O$ (96 %) + KNO_3 (2 %) + KBr (2%)	23	138	Kimura et Kai [18]
$CaCl_2 \cdot 6H_2O$ (93 %) + $Ca(NO_3)_2 \cdot 4H_2O$ (5 %) + $Mg(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$ (2%)	24	125	Kimura et Kai [18]

TABLE 1.8 – Points de fusions et chaleurs latentes de plusieurs eutectiques organiques et non-organiques.

Matériaux à changement de phase organiques : ils présentent l'avantage d'être très stable chimiquement, la transition de phase n'engendre donc pas de dégradation du matériau et la transformation est réversible. Le changement de phase intervient généralement sans phénomène de surfusion, et la plupart des matériaux existant sont non-corrosifs. En revanche, ils sont souvent inflammables et possèdent des valeurs de conductivité thermique et de chaleur latente relativement faibles. On scinde habituellement la famille des matériaux à changement de phase organiques en deux groupes : les paraffines et les non-paraffines.

Les paraffines sont des matériaux à l'apparence de cire issus principalement du raffinage du pétrole. Chimiquement ils se présentent comme une chaîne droite d'hydrocarbures avec très peu de branchements. Les principaux composants de la paraffine sont les alcanes, que l'on écrit comme : C_nH_{2n+2} . Les paraffines pures contiennent uniquement des alcanes telle que l'octadécane : $C_{18}H_{38}$. La température de fusion des alcanes augmente avec le nombre d'atomes de carbone, ainsi les alcanes contenant entre 14 et 40 atomes de carbone ont une température de fusion comprise entre 6 et 80 ° C. Toutefois, du au cout de production, les alcanes pures sont rarement utilisées, et les paraffines servant de matériaux à stockage d'énergie sont généralement des mélanges non totalement raffinés.

Lorsch *et al.* [19] ont étudiés plusieurs matériaux à changement de phase et leur intégration à des systèmes de stockage d'énergie solaire ou de régulation de température d'air conditionné. Ils font mention de plusieurs paraffines dont les températures de fusion varient entre 4 et 18 ° C.

Les paraffines présentent toutefois un risque de fuite élevé, aussi depuis quelques années, l'accent a été mis sur le développement de solutions permettant de réduire ces risques, voir d'éliminer le recours à un contenant. Ainsi, Inaba et Tu [20] ont étudié le cas d'une paraffine à forme stabilisée (dont la forme reste stable au fur et à mesure du changement de phase). Le procédé consiste à faire fusionner de la paraffine avec du polyéthylène à haute densité puis à faire adopter au mélange la forme souhaité lorsqu'il refroidit en dessous de la température de solidification du polyéthylène. Le matériau ainsi obtenu présente un aspect solide mais conserve les propriétés de changement de phase de la paraffine emprisonnée dans le polyéthylène. Royon et Guiffant [21] ont utilisé un procédé similaire en mélangeant la paraffine à un composé polymère de styrène-butadiène-styrène à raison de 25 % de polymère et 75 % de paraffine. Le matériau ainsi obtenu a été ensuite réduit en particules d'un peu plus de 3 mm de diamètre pour être utilisé dans un fluide pour le transfert de chaleur. Il n'a pas été observé de fuite de paraffine et les propriétés du matériau à changement de phase demeurent.

Quelques exemples de paraffines sont regroupés dans le tableau 1.9.

MCP	Point de fusion (° C)	Chaleur Latente (kJ kg ⁻¹)	Référence
$C_{14}H_{30}$	4.5	165	Lorsch <i>et al.</i> [19]
paraffine (75 %) + styrène-butadiène-styrène (75 %)	7.7	115	Royon et Guiffant [21]
$C_{15}H_{32}$	8	153	Lorsch <i>et al.</i> [19]
paraffine (76 %)+polyéthylène (24 %)	54.15	121.4	Inaba et Tu [20]

TABLE 1.9 – Points de fusion et chaleurs latentes de plusieurs paraffines.

Les non-paraffines constituent les matériaux à changement de phase les plus abondants et avec les caractéristiques thermiques les plus variées. Ils comprennent les esters, les alcools, les glycols... Toutefois les matériaux les plus prometteurs parmi les non-paraffines sont les acides gras car ils sont facilement disponibles dans de nombreuses gammes de températures de fusion. Ils sont extraits de végétaux ou d'huiles d'origine animale ce qui permet de garantir

une production continue contrairement aux produits issus de ressources pétrolières. Comme les paraffines, ils ne présentent pas de phénomène de surfusion et sont stables chimiquement, mais ils sont aussi inflammables. Leurs principal défaut comparativement aux paraffines vient de leurs prix, généralement plus élevés. Les acides gras les plus fréquemment utilisés en tant que matériau à stockage d'énergie sont les acides stearique, palmitique, laurique et myristique.

Nikolic *et al.* [22] ont ainsi étudié le comportement thermique d'acides gras esters tels que le methyl palmitate ou le methyl stearate. Les tests de stabilité conduits sur 18 mois ont permis d'observer que les propriétés thermiques ne subissaient pas de changement notable.

Aydin et Aydin [23] ont porté leur attention sur des acides gras à grand nombre de liaisons. Les six acides gras étudiés ont affichés des températures de fusion variant de 29 à 60 °C, ils ont montré une bonne stabilité et une chaleur latente au dessus de 185 kJ kg⁻¹.

Les propriétés thermiques de quelques acides gras sont regroupés dans le tableau 1.11.

MCP	Point de fusion (°C)	Chaleur Latente (kJ kg ⁻¹)	Référence
Acide formique	7.8	247	Sharma <i>et al.</i> [24]
Glycerin	17.9	198.7	Sharma <i>et al.</i> [24]
Erythritol tetrapalmitate	21.93	201.1	Sari <i>et al.</i> [25]
Methyl palmitate	29	215	Nikolic <i>et al.</i> [22]
Hexadecyl decanoate (cetyl caprate)	29.38	186.36	Aydin et Aydin [23]
Methyl stearate	37.8	270	Nikolic <i>et al.</i> [22]
Hexadecyl dodecanoate (cetyl laurate)	38.24	195.53	Aydin et Aydin [23]

TABLE 1.10 – Points de fusions et chaleurs latentes de plusieurs non-paraffines.

Matériaux à changement de phase composés non-organiques : on trouve dans cette famille deux principaux sous-ensemble, les sels hydratés et les métaux. L'eau (H_2O) dont les propriétés sont aujourd'hui bien connues fait aussi partie de cette catégorie de matériaux.

Les métaux sont encore peu utilisés en tant que matériaux à changement de phase, principalement du fait de leur poids, mais aussi des gammes de températures de fusion élevées qui limite leurs applications. A titre d'exemple on peut citer une étude de Sun *et al.* [26] portant sur un alliage Al-34%Mg-6%Zn, présentant une température de fusion de 454 °C.

Les sels hydratés sont des matériaux intéressants dans le domaine du stockage d'énergie car ils ont une température de changement de phase précise et une chaleur latente généralement plus élevée que les autres matériaux, de plus ils sont peu coûteux et facilement disponibles. Toutefois ils ont les désavantages de présenter une séparation des phases lors de la transition, les rendants moins stable thermiquement, et des phénomènes de surfusion sont fréquemment observés. Le problème de séparation des phases peut être en partie résolu par la gélification des substances, cependant cette solution a pour conséquence de diminuer la capacité calorifique des matériaux et ceux-ci se dégradent avec le temps. Les sels hydratés peuvent être considérés comme des alliages de sels non-organiques et d'eau formant une structure cristalline de formule générale $AB.nH_2O$. La séparation des phases lors de la transition vient du fait que lors du changement de phase les sels hydratés peuvent se dégrader en un autre sels hydraté avec moins de molécules d'eau soit :



ou bien en sa forme anhydre :



Wada *et al.* [27] ont étudié la diminution de la capacité calorifique de trihydrate d'acetate sodium gélifié. Les tests ont démontré que la version gélifié présentée peu de détérioration thermique après plus de 500 cycles thermiques. Toutefois ces résultats ont ensuite été infirmés par Kimura et Kai [28] qui ont observé que le matériau ne supportait pas les changements de phase répétés. Les résultats de Wada ont pu être faussé par un nombre trop restreint d'échantillons.

Tyagi *et al.* [29] ont porté leur étude sur de l'hexahydrate de chlorure de calcium, et ont observé une bonne stabilité de la capacité calorifique du matériau après des tests de 1000 cycles thermiques.

Quelques exemples de sels hydratés sont présentés dans le tableau REF.

MCP	Point de fusion (° C)	Chaleur Latente (kJ kg ⁻¹)	Référence
<i>LiClO₃.3H₂O</i>	8.1	392.9	Naumann et Emons [30]
<i>CCl₃F.17H₂O</i>	8.5	210	Kimura et Kai [28]
<i>NaOH.3.5H₂O</i>	15.4	284.4	Naumann et Emons [30]
<i>KF.4H₂O</i>	18.5	480.2	Naumann et Emons [30]
<i>CaCl₂.6H₂O</i>	23.26	125.4	Tyagi <i>et al.</i> [29]
<i>NaCH₃COO.3H₂O</i>	58	230	Wada <i>et al.</i> [27]

TABLE 1.11 – Points de fusions et chaleurs latentes de plusieurs sels hydratés.

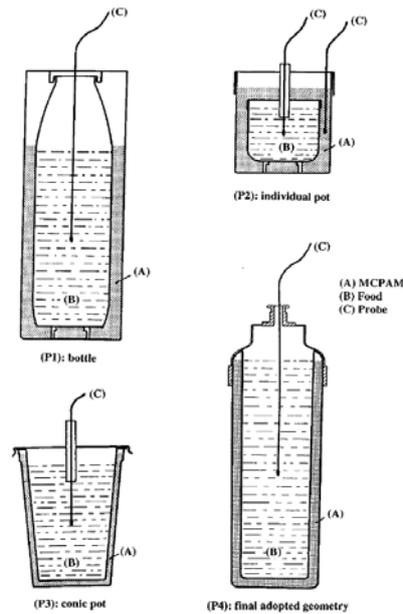
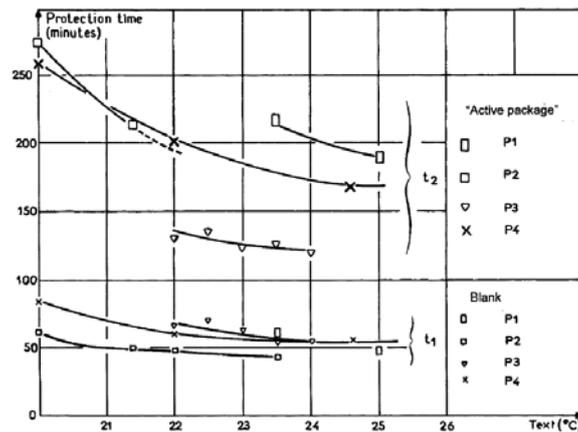
1.4.3 Emballages thermiques

Les emballages thermiques correspondent à l'association d'un corps constitué de matériaux isolants afin de protéger l'intérieur de la caisse des températures extérieures, et d'accumulateurs de froid dont le rôle est d'absorber les variations de température à l'intérieur de la caisse. Quelques études ont été menées sur ce type de dispositif dans le cadre de transport de produits pharmaceutiques mais aussi de produits alimentaires. Dans un premier temps l'efficacité de ces dispositifs peut être mise en évidence, la question de l'optimisation des configurations se pose aussi. Enfin un aperçu de quelques méthodes de modélisation est réalisé.

1.4.3.1 Mise en évidence de l'efficacité des emballages thermiques

Espeau *et al.* [31] ont étudié le cas de conteneurs constitués de parois doubles remplies de matériau à changement de phase de type paraffine. Ces conteneurs avaient pour rôle de maintenir des produits alimentaires (des yaourts et de l'eau) dans un intervalle de température compris entre 6 ° C et 13 ° C. Le matériau à changement de phase alors sélectionné pour l'étude possédait une température de fusion de 10.8 ° C et une chaleur latente de fusion de 155 kJ kg⁻¹. La température était mesurée au centre des produits. Les différents types de conteneurs utilisés sont visibles sur la figure 1.11.

Chaque conteneur a été testé avec et sans présence de MCP dans la double paroi, et ce pour plusieurs valeurs de température extérieure (pour un profil de température constant). Les résultats de l'expérience (fig.1.12) ont permis d'observer une réelle amélioration de la capacité de conservation des produits dans l'intervalle de température souhaité, confirmant ainsi l'efficacité des matériaux à changement de phase.

FIGURE 1.11 – Conteneur étudiés par Espeau *et al.* [31].FIGURE 1.12 – Temps de conservation des produits suivant le type de conteneur, par rapport à la valeur de la température extérieure, Espeau *et al.* [31].

Les auteurs ont aussi remarqué que le gain en temps de conservation, représenté par le rapport $\frac{t_2}{t_1}$ (où t_1 est le temps de conservation des produits dans le cas sans présence de MCP, et t_2 dans le cas avec MCP), pouvait être relié à la quantité de MCP, ou plus exactement le ratio entre la quantité de MCP et la quantité de produit transporté (fig.1.13). Leur conclusion fut qu'en première approximation, il est possible de considérer que l'épaisseur des parois ou l'air de la surface de contact avec l'environnement extérieur sont des paramètres moins importants que la quantité de MCP par rapport à la quantité de produit.

Rentas *et al.* [32] ont, quand à eux, étudié plusieurs types de conteneurs de modèle sacoche constitués de mousses ou de panneaux d'isolation sous vide (VIP). Les produits transportés étaient des solutions sanguines, devant être conservées dans un intervalle de température compris entre 1 °C et 10 °C. Les matériaux à changement de phase utilisés étaient présentés sous trois formes : des briques solides, des pochettes souples, ou des matériaux préintégrés. Les pro-

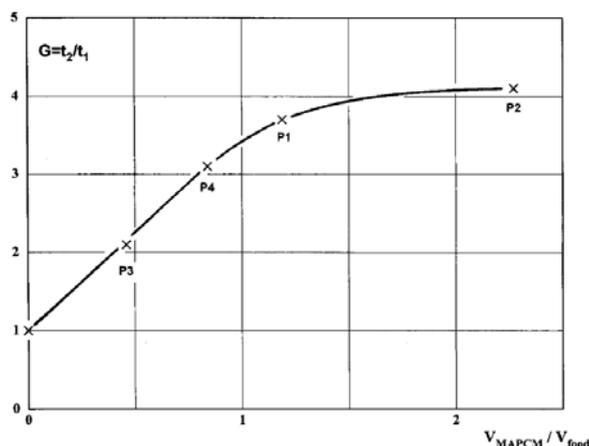


FIGURE 1.13 – Gain en temps de conservation par rapport au ratio entre quantité de MCP et quantité de produit, Espeau *et al.* [31].

priétés des MCP non intégrés ont été déterminées par calorimétrie différentielle à balayage, et les résultats ont montré une différence importante par rapport aux données des fabricants. Les emballages chargés ont ensuite été testés en étant soumis à des températures constantes (-24°C et 40°C).

Les auteurs ont conclu des résultats expérimentaux que les MCP présents dans les emballages remplissaient bien leur rôle d'absorption ou de restitution d'énergie, toutefois les valeurs des températures de changement de phase réelle des MCP en brique ou en pochette (à opposer aux températures indiquées par les fabricants) étaient trop basses (-6.7°C et 0.7°C au lieu des -1.1°C et 4.4°C indiqués) et ont dégradé les résultats attendus pour les caisses qui en étaient équipées. En revanche, le recours à des MCP préintégrés a offert de bien meilleurs résultats en terme de durée de conservation, ainsi qu'en terme d'homogénéité des températures internes. Un test supplémentaire a été réalisé en simulant l'ouverture ponctuelle de l'emballage afin d'en retirer des produits, les résultats ont montré une perte de durée de conservation de trois heures sur l'ensemble du test.

D'autres auteurs ont aussi étudiés divers emballages thermiques de petits volumes, équipés de matériaux à changement de phase, et on pu mettre en évidence l'efficacité de ces dispositifs. On peut citer ainsi Mondieig *et al.* [33][34] et Sharley *et al.* [35] pour le transport de poches de sang, ou encore Kendal *et al.* [36] et Rooney *et al.* [37] qui mettent en œuvre l'utilisation de carboglace pour le transport de produit à des températures négatives.

1.4.3.2 Modélisation des emballages

L'expérimentation et les tests en conditions réelles des différents emballages n'est pas la seule voie possible d'étude. Plusieurs auteurs se sont ainsi intéressés à la possibilité de modéliser l'évolution des températures à l'intérieur des emballages.

On peut citer par exemple Laguerre *et al.* [38], qui ont cherché à développer un modèle mathématique permettant la prédiction des températures à l'intérieur d'un emballage thermique en fonction de la sollicitation extérieure. L'emballage considéré était une caisse de dimension $0.8\text{ m} \times 1.2\text{ m} \times 1.47\text{ m}$, constituée de panneaux de polystyrène de 6 cm d'épaisseur. Le chargement était constitué de cartons de produits pharmaceutiques séparés en deux blocs et répartis entre trois couches de MCP.

Les auteurs ont remarqué que l'expression de la température adimensionnée $T^*(x, t) = (T(x, t) - T_f)/(T_0 - T_f)$ (où T_0 est la température initiale au point x et T_f est la température

de fusion du MCP) en un point du système pouvait, dans le cas où la température du MCP était considérée comme constante et égale à sa température de fusion, être écrite comme une fonction linéaire de la température ambiante adimensionnée $T_{\text{Ext}}^* = (T_{\text{Ext}} - T_f)/(T_0 - T_f)$. Soit donc pour une température ambiante constante que :

$$\frac{T(x, t) - T_f}{T_0 - T_f} = \alpha(x, t) + \beta(x, t) \frac{T_{\text{Ext}} - T_f}{T_0 - T_f} \quad (1.4)$$

où α et β sont des coefficients sans dimension dépendant de la géométrie du chargement et des propriétés des matériaux. Ces coefficients sont calculés à partir de résultats expérimentaux correspondant à deux situations différentes, ici la température ambiante a été changée entre l'expérience *A* et l'expérience *B*. En implémentant les valeurs mesurées par expérimentation dans l'équation 1.4, on obtient un système à deux inconnues et à deux équations que l'on peut résoudre pour obtenir les valeurs de α et β :

$$(T_A(x, t) - T_f) = (T_{0,A} - T_f)\alpha(x, t) + (T_{\text{Ext},A} - T_f)\beta(x, t) \quad (1.5)$$

$$(T_B(x, t) - T_f) = (T_{0,B} - T_f)\alpha(x, t) + (T_{\text{Ext},B} - T_f)\beta(x, t) \quad (1.6)$$

Pour le cas d'un profil de température extérieure variable par paliers, le modèle peut être adapté par une méthode d'excitation-réponse, où l'excitation est décomposée en autant de pas n qu'il y a de paliers de température. Lorsque l'on considère un système linéaire, alors la réponse est égale à la somme des réponses pour chaque excitation, et on peut écrire :

$$(T(x, t) - T_f) = (T_0 - T_f)\alpha(x, t) + (T_{\text{Ext}} - T_f)\beta(x, t) + \sum_{k=2}^n (T_k - T_{k-1})\beta(x, t - t_{k-1}) \quad (1.7)$$

Les résultats issus du modèle mathématiques comparés à ceux issus de l'expérimentation (fig. 1.14) montrent une assez bonne correspondance dans les trentes premières heures du test, après quoi, le MCP étant en partie fondu, le modèle sort de son domaine de définition.

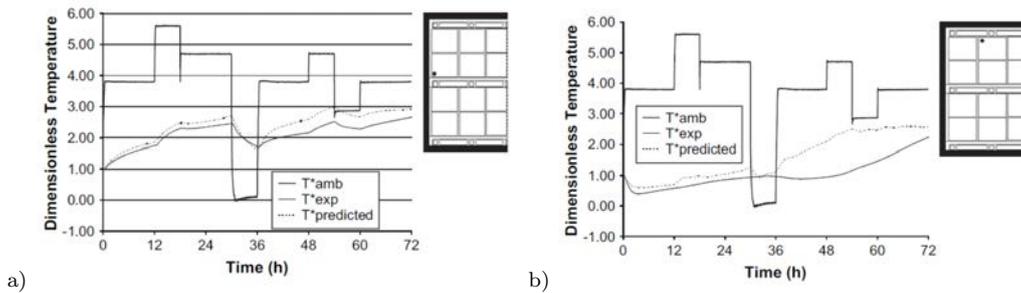


FIGURE 1.14 – Comparaison de résultats issu du modèle mathématique de prédiction avec ceux issus de l'expérimentation, par Laguerre *et al.* [38].

East et Smale [39], pour le besoin de leur étude, on développé un modèle numérique basé sur une approche zonale des transferts thermiques. Dans chaque zone du système, on considère l'équation de conservation de l'énergie pour chaque matériau telle que :

$$m \frac{dH}{dt} = \sum_{s=1}^S \Phi_s \quad (1.8)$$

avec m la masse du matériau, H son enthalpie et Φ_s le flux de chaleur dans la zone s . A chaque zone, cette équation est transcrite en sous-équations traduisant les différents transferts de chaleur y prenant place (conduction, convection...). L'ensemble constitue un système d'équations aux dérivées partielles, que les auteurs résolvent par la méthode de Runge-Kutta-Fehlberg.

1.4.3.3 Optimisation des emballages

Si l'effet d'absorption/libération de l'énergie par l'introduction de matériaux à changement de phase a pu être vérifié et son efficacité confirmée, il convient néanmoins de porter une attention particulière à la configuration des emballages utilisés. En effet, la quantité de matière et la manière dont les différents éléments sont assemblés joue un rôle prépondérant dans la capacité de conservation des emballages.

Ainsi, Net *et al.* [40] ont cherché à améliorer la configuration d'un emballage utilisé pour le transport de cornées après avoir constaté que l'emballage tel qu'il était utilisé ne permettait pas de répondre aux attentes en terme de conservation du produit transporté, à savoir le maintien de la température intérieure entre 2 °C et 6 °C.

Ils ont ainsi fait varier plusieurs paramètres, tels que le nombre de briques de MCP ou l'épaisseur des parois de l'emballage pour tenter de déterminer une meilleure solution.

En faisant varier le nombre de briques de MCP, les auteurs ont remarqué qu'utiliser 3 briques au lieu de deux faisait diminuer la température moyenne à l'intérieur de l'emballage (qui est alors passée de 15 °C à 0 °C). En revanche, en utilisant quatre briques, la température moyenne à l'intérieur a été mesurée à 15 °C, elle était donc plus élevée, mais avec des extrêmes plus importants (un minimum à -10 °C et un maximum à 23 °C), le froid a donc été consommé plus vite sans qu'aucune explication ne soit avancée par les auteurs. La même observation a été faite en utilisant deux briques congelées à -40 °C au lieu de -20 °C.

En augmentant l'épaisseur des parois de l'emballage (et donc de la couche d'isolation), la température moyenne au sein de ce dernier a diminué, passant de 13 °C à 8 °C. Enfin l'ajout de particules de polystyrène pour combler les espaces a permis d'améliorer encore les résultats, montrant alors une température quasi-constante à l'intérieur de l'emballage sur les 24 heures de test.

Elliott et Halbert [41] ont eux aussi cherché à optimiser la quantité de MCP introduite dans un emballage thermique. Ils ont remarqué qu'une trop grande quantité de MCP introduits à température négative avait pour conséquence de maintenir la température interne en dessous de zéro, ce qui ne correspondait pas aux attentes de conditions de conservation des produits. Diminuer la quantité de MCP était donc nécessaire, afin de s'assurer que le froid puisse être consommé sans trop refroidir le chargement. Toutefois, même en définissant une quantité de MCP permettant de maintenir les produits dans l'intervalle de température souhaité sur la majorité du trajet, un pic froid intervenait toujours en début de test (fig. 1.15, a) à cause de la température d'introduction des MCP avant qu'ils ne puissent commencer à se décharger. La solution envisagée fut de préconditionner les MCP en les introduisant dans la caisse 4 heures avant le lancement du test, la température de surface des MCP étant alors plus élevée, elle permet d'éviter le pic froid au démarrage (fig. 1.15,b), mais elle a aussi pour conséquence de diminuer la quantité de froid à l'intérieur de l'emballage, ce qui augmente globalement la température des produits.

Le modèle numérique défini par East et Smale [39] leur a permis de développer une méthode pour la définition d'une configuration optimale d'un type d'emballage pré-défini. Cette méthode combine d'une part un modèle numérique, permettant de simuler la température à l'intérieur des produits, et un algorithme génétique d'autre part. La configuration originelle de l'emballage est fixée telle que représentée sur la figure 1.16, avec un volume intérieur divisé en deux

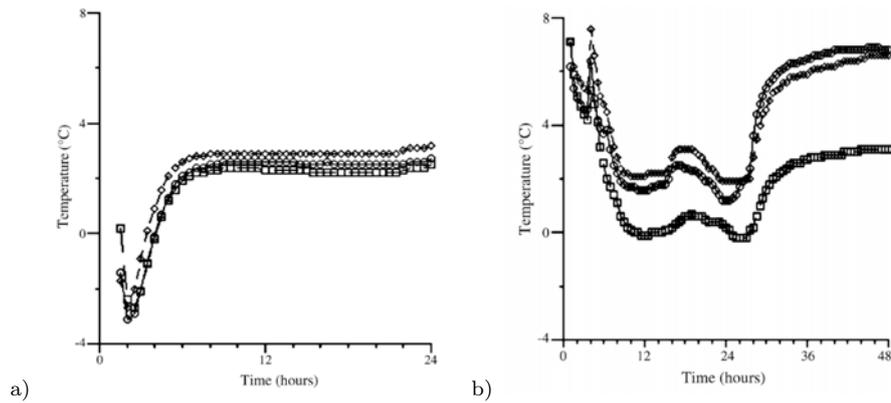


FIGURE 1.15 – Température à l’intérieur d’un emballage thermique en présence de briques de MCP congelées, a) introduites au lancement du test, b) introduites 4h avant le lancement du test. D’après Elliott et Halbert [41].

compartiment, l’un en dessous contenant le MCP et le second au dessus contenant les produits à transporter.

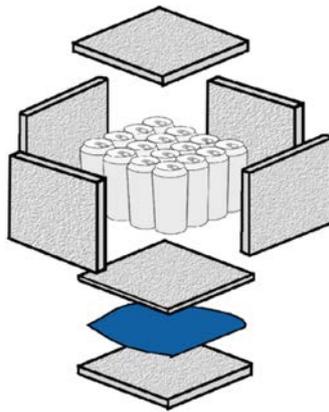


FIGURE 1.16 – Configuration de départ de l’emballage considéré par East et Smale [39].

Les auteurs définissent ensuite les paramètres à faire varier de manière à pouvoir optimiser cette configuration. Ces paramètres sont la nature et l’épaisseur du matériau isolant, des MCP et de la plaque de séparation, ainsi que la température de démarrage des produits et des MCP. La configuration de la caisse est ensuite encodée par son génome. Chaque paramètre est assimilé à un gène et est représenté par un nombre défini par l’utilisateur et représentant les différentes valeurs que peut prendre ce paramètre. Le génome est ensuite formé en assemblant les gènes pour chaque paramètre, en créant ainsi une chaîne de nombres représentant une configuration possible de l’emballage.

Un critère de sélection doit alors être choisi, de manière à pouvoir trier les individus. Les auteurs ont défini comme critère le coût de l’emballage et de son transport. Ce coût est calculé à partir du coût des différents matériaux utilisés rapporté à leur quantité, ainsi que le coût de transport proportionnel au poids du système. A cette valeur calculée est rajouté une pénalité de dépassement des limites de température. Ainsi lorsque la température à l’intérieur de l’emballage dépasse 8°C la pénalité est de 1000 \$ par degré, et lorsque la température descend en dessous de -1°C , la pénalité est de 10 000 \$ par degré. Le coût total calculé permet de classer les individus entre eux pour une même génération de sorte que le meilleur individu ait le rang le

plus élevé (ici $r_n = 90$) et le plus mauvais le rang le plus faible (ici $r_n = 1$).

Chaque génération doit posséder le même nombre d'individu, afin de sélectionner les couples qui généreront un nouvel individu chacun, à chaque génome est associé une probabilité d'accouplement p_n proportionnelle à son rang et telle que :

$$p_n = \left(\frac{r_n}{\sum_{n=1}^{90} r_n} \right) \quad (1.9)$$

89 paires d'individus sont alors choisies de manière semi-aléatoire (car prenant en compte la probabilité d'accouplement) afin de générer chacune un nouvel individu? Il est possible qu'un même individu soit sélectionné plusieurs fois dans des paires différentes. Aux individus sélectionnés sur la base de la probabilité d'accouplement, sont rajouté 11 autres individus sélectionnés comme les meilleurs de la génération précédente. Les auteurs ont aussi pris en compte la possibilité d'une mutation spontanée des gènes en fixant un taux de mutation de 5%. Ainsi, pour chaque gène d'un nouvel individu, la génération aléatoire d'un nombre permet de définir si le gène subit une mutation ou non. Si le gène subit une mutation alors la valeur de ce gène est généré aléatoirement dans l'intervalle de valeurs possibles défini en amont. Si le gène ne subit pas de mutation, alors il hérite de ses parents, et chaque parent à 50% de chance d'être celui qui transmettra son gène à l'enfant.

Ce processus de création de génération dure jusqu'à ce que l'on ait atteint le nombre de génération maximum défini au préalable. Ici, les auteurs ont arrêté le nombre de génération à 40, et les configurations optimales sont celles offrant les meilleurs résultats dans la dernière génération.

Trois modèles de caisses générées par cette méthode ont ensuite été testés (East *et al.* [42]) pour différents voyages afin de vérifier leur validité, avec des résultats satisfaisants.

1.5 Conclusion

La première partie de ce chapitre a permis de montrer que la bonne conservation des médicaments lors de leur transport et de leur stockage avant distribution est un enjeu crucial, tant du point de vue de la santé que du point de vue économique. Des médicaments mal conservés peuvent se dégrader et des études de stabilité doivent être menées pour définir pour chacun les bonnes conditions de conservation.

Le rôle de la chaîne du froid décrite dans la deuxième partie est de s'assurer que ces conditions sont bien respectées sur toute la durée du trajet, du laboratoire de fabrication jusqu'au client final. Chaque intervenant possède alors son lot de responsabilité et d'outils pour y faire face.

Il existe un panel relativement important de moyens logistiques permettant le contrôle des températures d'un chargement lors du transport. Ces différents moyens sont décrits dans la troisième partie. On constate deux grandes méthodes de maintien de la température : une méthode active, ayant recours à des systèmes générateurs de froid utilisant une source d'énergie électrique, et une méthode passive, utilisant les propriétés énergétiques des matériaux à changement de phase pour absorber les variations de températures de l'environnement et ainsi protéger les produits transportés. Si les températures peuvent être ainsi bien maintenues lors du transport entre deux acteurs de la chaîne du froid, des ruptures peuvent intervenir lors de la transition des produits d'un transporteur à un autre (comme par exemple le stockage des produits sur un tarmac d'aéroport ou sur les quais d'un port). Une solution apportée à ce problème consiste en l'utilisation d'emballage thermiques réfrigérés.

La description des emballages thermiques réfrigérés est réalisé en quatrième partie. Ces emballages font intervenir d'une part les capacités d'isolation des matériaux en constituant le

corps, et d'autre part les propriétés d'absorption et de libération de la chaleur des matériaux à changement de phase. Si le rôle et l'efficacité des MCP dans ce genre de système a déjà été largement étudié et confirmé, on constate que tous les paramètres pouvant faire varier la température au sein des emballages ne sont pas nécessairement mis en avant. Ainsi par exemple, l'infiltration d'air dans les emballages n'est pas documentée. Par ailleurs la recherche d'une solution optimale pour un transport donné constitue encore un défi étant donné le nombre important de paramètres pouvant être pris en compte. L'expérimentation permet de vérifier l'efficacité de différentes configurations d'emballages, mais le processus demeure long et coûteux. On peut alors chercher à développer un modèle numérique permettant de faire varier les valeurs des différents paramètres de manière à simuler en amont différentes configurations et ainsi diminuer la quantité de tests expérimentaux nécessaires à la définition d'une solution.

Bibliographie

- [1] Organisation mondiale de la Santé. *Les soins de santé primaires : Rapport de la conférence internationale sur les soins de santé primaire.*, Alma-Ata(URSS), septembre 1978.
- [2] Organisation mondiale de la Santé. *Assurance de la qualité des produits pharmaceutiques : recueil de directives et autres documents.* Organisation mondiale de la Santé, 1998.
- [3] A.M. Sautter. Conservation des médicaments : stabilité et dates limites d'utilisation. *CAPP-INFO*, 7, Novembre 1999.
- [4] D.W. Newton and K.W. Miller. Estimating shelf-life of drugs in solution. *American Journal of Health-System Pharmacy*, 44(7) :1633–1640, 1987.
- [5] M. Dawson. Expiry dates. *Australian Prescriber*, 17 :46–8, 1994.
- [6] P. Goldstein. Devenir des médicaments de l'urgence soumis à des températures extrêmes. *Revue des SAMU*, 9(4) :175–179, 1986.
- [7] www.ich.org.
- [8] W. Grimm. Storage conditions for stability testing in the EC, Japan and USA ; the most important market for drug products. *Drug Development and Industrial Pharmacy*, 19(20) :2795–2830, 1993.
- [9] Le Conseil des Ministres. Résolution d'ensemble n 2002/2 sur les transports combinés. Conférence européenne des ministres des transports, mai 2002.
- [10] J.E. Mark. *Physical properties of polymers handbook.* Springer Science, 2007.
- [11] N. A. Gokcen and R. G. Reddy. Phase equilibria. In *Thermodynamics*, pages 119–137. Springer US, 1996.
- [12] P. Papon, J. Leblond, and P.H.E. Meijer. *The Physics of Phase Transitions.* Springer Berlin Heidelberg, 2002.
- [13] A. Abhat. Low temperature latent heat thermal energy storage : Heat storage materials. *Solar Energy*, 30(4) :313–332, 1983.
- [14] J. Zuo, W. Li, and L. Weng. Thermal performance of caprylic acid/1-dodecanol eutectic mixture as phase change material (PCM). *Energy and Buildings*, 43(1) :207–210, janvier 2011.
- [15] M.N.R. Dimaano and A.D. Escoto. Preliminary assessment of a mixture of capric and lauric acids for low-temperature thermal energy storage. *Energy*, 23(5) :421–427, mai 1998.
- [16] D. Feldman, D. Banu, D. Hawes, and E. Ghanbari. Obtaining an energy storing building material by direct incorporation of an organic phase change material in gypsum wallboard. *Solar Energy Materials*, 22(2-3) :231–242, juillet 1991.

- [17] A. Karaipekli and A. Sari. Capric–myristic acid/expanded perlite composite as form-stable phase change material for latent heat thermal energy storage. *Renewable Energy*, 33(12) :2599–2605, decembre 2008.
- [18] H. Kimura and J. Kai. Mixtures of calcium chloride hexahydrate with some salt hydrates or anhydrous salts as latent heat storage materials. *Energy Conversion and Management*, 28(3) :197–200, janvier 1988.
- [19] H.G. Lorsch, K.W. Kauffman, and J.C. Denton. Thermal energy storage for solar heating and off-peak air conditioning. *Energy Conversion*, 15(1) :1–8, janvier 1975.
- [20] H. Inaba and P. Tu. Evaluation of thermophysical characteristics on shape-stabilized paraffin as a solid-liquid phase change material. *Heat and Mass Transfer*, 32(4) :307–312, avril 1997.
- [21] L. Royon and G. Guiffant. Investigation on heat transfer properties of slurry of stabilized paraffin during a melting process. *Energy Conversion and Management*, 52(2) :1073–1076, février 2011.
- [22] R. Nikolić, M. Marinović-Cincović, S. Gadžurić, and I. J. Zsigrai. New materials for solar thermal storage—solid/liquid transitions in fatty acid esters. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 79(3) :285–292, septembre 2003.
- [23] A.A. Aydın and A. Aydın. High-chain fatty acid esters of 1-hexadecanol for low temperature thermal energy storage with phase change materials. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 96 :93–100, janvier 2012.
- [24] A. Sharma, V. V. Tyagi, C. R. Chen, and D. Buddhi. Review on thermal energy storage with phase change materials and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(2) :318–345, February 2009.
- [25] A. Sari, R. Eroglu, A. Biçer, and A. Karaipekli. Synthesis and Thermal Energy Storage Properties of Erythritol Tetrastearate and Erythritol Tetrapalmitate. *Chemical Engineering & Technology*, 34(1) :87–92, janvier 2011.
- [26] J. Q. Sun, R. Y. Zhang, Z. P. Liu, and G. H. Lu. Thermal reliability test of Al–34%Mg–6%Zn alloy as latent heat storage material and corrosion of metal with respect to thermal cycling. *Energy Conversion and Management*, 48(2) :619–624, fevrier 2007.
- [27] T. Wada, R. Yamamoto, and Y. Matsuo. Heat storage capacity of sodium acetate trihydrate during thermal cycling. *Solar Energy*, 33(3) :373–375, janvier 1984.
- [28] H. Kimura and J. Kai. Feasibility of trichlorofluoromethane (CCl₃F, R11) heptadecahydrate as a heat storage material. *Energy Conversion and Management*, 25(2) :179–186, 1985.
- [29] V. V. Tyagi and D. Buddhi. Thermal cycle testing of calcium chloride hexahydrate as a possible PCM for latent heat storage. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 92(8) :891–899, aout 2008.
- [30] R. Naumann and H.-H. Emons. Results of thermal analysis for investigation of salt hydrates as latent heat-storage materials. *Journal of thermal analysis*, 35(3) :1009–1031, mai 1989.
- [31] P. Espeau, D. Mondieig, Y. Haget, and M. A. Cuevas-Diarte. 'Active' Package for Thermal Protection of Food Products. *Packaging Technology and Science*, 10(5) :253–260, septembre 1997.
- [32] F.J. Rentas, V.W. Macdonald, D.M. Houchens, P.J. Hmel, and T.J. Reid. New insulation technology provides next-generation containers for “iceless” and lightweight transport of RBCs at 1 to 10 ° C in extreme temperatures for over 78 hours. *Transfusion*, 44(2) :210–216, fevrier 2004.
- [33] D. Mondieig, Y. Haget, M. Labrador, M. A. Cuevas Diarte, P. R. van der Linde, and H. A. J. Oonk. Molecular alloys as phase change materials (MAPCM) for the storage of thermal energy. *Materials Research Bulletin*, 26(10) :1091–1099, octobre 1991.

- [34] D. Mondieig, F. Rajabalee, A. Laprie, H.A. J Oonk, T. Calvet, and M. Angel Cuevas-Diarte. Protection of temperature sensitive biomedical products using molecular alloys as phase change material. *Transfusion and Apheresis Science*, 28(2) :143–148, avril 2003.
- [35] P.H. Sharley, I. Williams, and S. Hague. Blood transportation for medical retrieval services. *Air Medical Journal*, 22(6) :24–27, novembre 2003.
- [36] A.P. Kendal, R. Snyder, and P.J. Garrison. Validation of cold chain procedures suitable for distribution of vaccines by public health programs in the USA. *Vaccine*, 15(12–13) :1459–1465, aout 1997.
- [37] P. Rooney, M. J. Eagle, and J. N. Kearney. Validation of cold chain shipping environment for transport of allografts as part of a human tissue bank returns policy. *Cell and Tissue Banking*, 16(4) :553–558, fevrier 2015.
- [38] O. Laguerre, M. F. Ben Aissa, and D. Flick. Methodology of temperature prediction in an insulated container equipped with PCM. *International Journal of Refrigeration*, 31(6) :1063–1072, septembre 2008.
- [39] A. R. East and N. J. Smale. Combining a hybrid genetic algorithm and a heat transfer model to optimise an insulated box for use in the transport of perishables. *Vaccine*, 26(10) :1322–1334, mars 2008.
- [40] M Net, E Trias, A Navarro, A Ruiz, P Diaz, J. R Fontenla, and M Manyalich. Cold chain monitoring during cold transportation of human corneas for transplantation. *Transplantation Proceedings*, 35(5) :2036–2038, août 2003.
- [41] M. A. Elliott and G. W. Halbert. Maintaining the cold chain shipping environment for Phase I clinical trial distribution. *International Journal of Pharmaceutics*, 299(1–2) :49–54, août 2005.
- [42] A. East, N. Smale, and S. Kang. A method for quantitative risk assessment of temperature control in insulated boxes. *International Journal of Refrigeration*, 32(6) :1505–1513, September 2009.

CHAPITRE 2

ÉTUDE EXPÉRIMENTALE

Sommaire

2.1 Perméabilité à l'air des emballages	35
2.1.1 Cas des bâtiments	36
2.1.2 Mesure de la perméabilité des emballages	39
2.1.3 Évaluation du coefficient de perméabilité pour différentes configurations	41
2.2 Mesures thermiques sur une caisse SB24	47
2.2.1 Dispositif expérimental	48
2.2.2 Résultats	50
2.3 Conclusion	60
Bibliographie	60

Les campagnes expérimentales présentées dans ce chapitre ont deux objectifs distincts. Le premier est la caractérisation de la perméabilité à l'air des emballages, afin de déterminer l'importance des fuites sur leurs performances thermiques. Le second est l'observation de la répartition des températures et leur évolutions dans les différents éléments des emballages.

La première section s'attachera à la description de la méthode utilisée pour l'évaluation de la perméabilité de l'enveloppe. Le dispositif expérimental sera détaillé ainsi que le protocole de mesure. Pour finir les résultats seront présentés afin de montrer l'influence de différentes configurations et modèles d'emballages sur la perméabilité à l'air.

La deuxième section décrira le dispositif expérimental utilisé afin de procéder aux mesures thermiques au sein de l'emballage. Les mesures sont réalisées à l'aide de thermocouples, le montage et l'instrumentation seront détaillés. Le profil de température extérieur a été calqué sur un profil utilisé lors de tests de qualification, et un second test a été effectué en simulant l'ensoleillement à l'aide de projecteurs.

2.1 Perméabilité à l'air des emballages

La perméabilité à l'air des emballages est un sujet qui n'a à notre connaissance encore jamais été réellement traité. La plupart des études s'intéressent uniquement à la caractérisation des matériaux à changement de phase. Pourtant on sait pertinemment que les emballages ne peuvent être imperméables de part les matériaux utilisés, les méthodes d'assemblage, et la configuration des caisses.

La perméabilité des enveloppes implique un transfert de matière entre l'extérieur et l'intérieur de l'emballage, et donc un renouvellement de l'air avec les variations de température

associées. Le taux de renouvellement d'air est une donnée potentiellement importante car une partie au moins du chargement est en contact direct avec ce dernier sans protection d'une épaisseur de matériaux à changement de phase.

On sait aussi que certaines solutions transportées peuvent être sensibles aux variations de pression (on peut par exemple penser aux cellules souches ou autres solutions vivantes). Ainsi Rozak *et al* [1] ont cherché à étudier un caisson de petite taille et renforcé de manière à éviter les variations de pression à l'intérieur de l'emballage, après avoir observé que la pression exercée sur l'emballage pouvait fortement varier lors d'un voyage en avion (fig. 2.1).

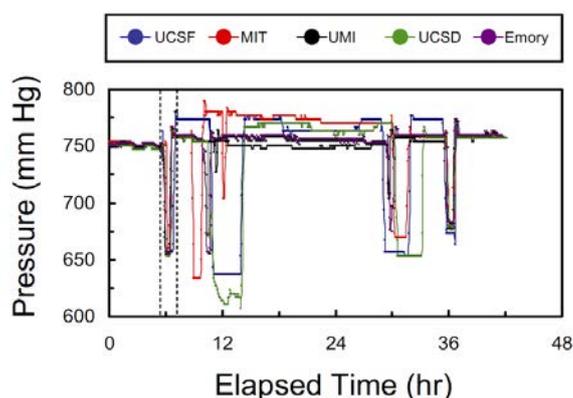


FIGURE 2.1 – Pressions enregistrées lors du transport d'un chargement de cellules souches vers différents centres de recherches (Rozak *et al*, [1]).

2.1.1 Cas des bâtiments

Il n'existe à ce jour aucun procédé de mesure de perméabilité pour les emballages tels que ceux utilisés pour le transport de produit thermosensibles. En revanche, la question de la caractérisation de la perméabilité à l'air d'enceintes s'est posée dans d'autres domaines, notamment dans le bâtiment.

En effet, dans le cadre de l'habitat, la quantification des échanges d'air entre l'extérieur et l'intérieur revêt une importance toute particulière, car elle est directement liée à la consommation d'énergie et au confort des occupants. La consommation énergétique étant un dossier auquel on porte maintenant beaucoup d'attention, les pouvoirs publics ont cherché à répondre à cette problématique en instaurant divers standards et normes.

Les fuites d'air d'un bâtiment trouvent leur origine dans la différence de pression entre l'intérieur et l'extérieur de ce bâtiment. Cette différence résulte de l'effet conjoint de paramètres externes comme la pression du vent et le tirage thermique, ou internes comme le système de ventilation et de chauffage. La pression cherchant à se rééquilibrer, elle va provoquer des mouvements d'air : les fuites à travers l'enveloppe du bâtiment.

2.1.1.1 Pression du vent

L'effet du vent sur les bâtiments est la plupart du temps représenté par une pression d'arrêt qui correspond à la pression du vent exercée localement. La répartition de cette pression sur les surfaces du bâtiment dépend de la vitesse et de la direction du vent, de la hauteur et de la forme du bâtiment ainsi que du terrain avoisinant.

La pression du vent se calcule à partir de l'équation de Bernoulli simplifiée :

$$P_v = \frac{1}{2} k_P \rho u_v^2 \quad (2.1)$$

où u_v correspond à la vitesse du vent à une hauteur de référence (m s^{-1}), k_P est le coefficient de pression du vent, et ρ la masse volumique de l'air (kg m^{-3}).

On considère les pressions positives sur les surfaces dites « faces au vent », entraînant des infiltrations. Et les pressions négatives sur les surfaces dites « sous le vent », entraînant des exfiltrations. L'angle d'incidence du vent sur les autres côtés définira la valeur de la pression.

2.1.1.2 Tirage thermique

Le tirage thermique est un phénomène qui a pour origine la différence de température entre l'extérieur et l'intérieur du bâtiment.

Si on pose $P_{ref,i}$ la pression de référence d'une zone i du bâtiment étudié (pression statique au niveau du sol), alors la pression statique $P_{z,i}$ à la hauteur z s'écrit :

$$P_{z,i} = P_{ref,i} - \rho_i g z \quad (2.2)$$

où g est l'accélération de la pesanteur ($9,81 \text{m s}^{-2}$) et ρ_i la masse volumique de l'air dans la zone i .

La masse volumique est elle même dépendante de la température et peut s'écrire comme suit :

$$\rho = \rho_{ref}(1 - \beta \Delta T) \quad (2.3)$$

où ρ_{ref} est la densité de l'air à une température de référence T_{ref} , ΔT le différentiel de température ($T - T_{ref}$) et β le coefficient d'expansion thermique.

Cette relation n'est cependant valable qu'à la condition que la variation de densité du fluide reste faible et que $\beta \Delta T \ll 1$

Un changement de température entraînant un changement de pression, il provoque alors un mouvement d'air et des échanges de matière.

2.1.1.3 Plusieurs méthodes de caractérisation des fuites

Une certaine variété de méthodes ont été développées afin de caractériser la perméabilité des enveloppes des bâtiments, dont une liste non exhaustive a été réalisée par Roulet & Vandaele [2].

On peut distinguer les méthodes qualitatives telles que la thermographie infrarouge, permettant la détection de la présence de fuites dans un bâtiment et leurs localisations. Et les méthodes quantitatives, principalement la méthode de pressurisation, permettant de mesurer un taux de fuite ou de perméabilité d'une enveloppe donnée.

Thermographie infrarouge : La thermographie infrarouge met en œuvre une caméra thermique qui transforme le rayonnement thermique émanant de la surface considérée en une image thermique (fig. 2.2). Elle permet de localiser les fuites d'air et les ponts thermiques d'une enceinte par une visualisation simple et efficace.

La thermographie infrarouge a malgré tout des contraintes qui réduisent son usage, ou qui, en tout cas, doivent rendre prudentes les interprétations faites des résultats. En effet, la mesure étant basé sur le rayonnement, plusieurs facteurs entrent en jeu :

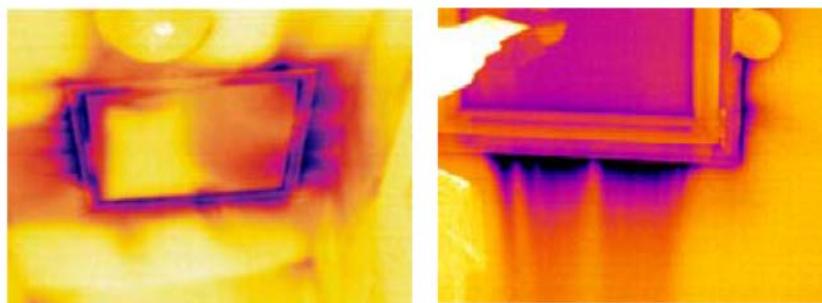


FIGURE 2.2 – Exemple d’images thermiques permettant d’identifier des fuites dans diverses parties d’une habitation.

- la valeur de l’émissivité des matériaux, laquelle est souvent mal connue et peut même varier en fonction de la température ;
- l’angle de vue : la caméra mesurant un rayonnement, l’angle d’incidence de l’objet par rapport à la caméra a de fait une influence sur les résultats ;
- la distance entre l’objet étudié et la caméra : plus elle est grande et plus le rayonnement perd en précision. De plus avec l’éloignement, l’épaisseur d’air augmente et avec elle le parasitage dû à la qualité de l’air (poussière, humidité. . .) ;
- les sources de chaleurs secondaires, qui si elles existent peuvent déformer l’image thermique en rajoutant des informations parasites.

Il convient donc d’être extrêmement prudent lors de l’interprétation des résultats issus de la thermographie infrarouge, à plus forte raison lorsque les objets étudiés ont une géométrie compliquée ou sont constitués de matériaux dont l’émissivité est mal connue.

Méthode de pressurisation : La méthode de pressurisation est l’une des méthodes les plus utilisées pour évaluer la perméabilité à l’air des enveloppes des bâtiments. Elle fait l’objet de plusieurs normes françaises et internationales (norme ISO 9972, norme EN 13829. . .). Le matériel utilisé et la précision requise varient d’une application à une autre, en fonction de l’usage de la mesure : validation d’un modèle ou simplement évaluation approximative des débits aérauliques, mais aussi en fonction de la taille des bâtiments.

La méthode de pressurisation consiste à injecter de l’air à un débit connu dans le bâtiment et à mesurer simultanément le différentiel de pression entre l’intérieur et l’extérieur, ce afin d’obtenir une série de couples « débit/pression » que l’on peut relier à l’aide d’une équation de régression du type :

$$\dot{q}_v = k \Delta P^n \quad (2.4)$$

où \dot{q}_v est le débit volumique d’air injecté, ΔP le différentiel de pression et k le coefficient de perméabilité. L’exposant n quant à lui, dépend de la nature de l’écoulement : s’il est proche de 1 il caractérise un écoulement laminaire, s’il est proche de 0.5, alors il caractérise un écoulement inertiel.

Par régression linéaire on peut obtenir la valeur du coefficient k , laquelle est ensuite utilisée pour calculer divers indicateurs de fuites dont on peut citer quelques exemples (Carrié *et al.* [3]).

Surface de fuite équivalente : La surface équivalente de fuite A_L correspond à la surface d’un orifice unique à travers lequel, pour une pression de référence ΔP_{ref} , le débit mesuré serait

identique au débit de fuite de l'enveloppe. On la calcule comme suit :

$$A_L(\Delta P_{\text{ref}}) = \frac{k}{C_d} \sqrt{\frac{\rho}{2}} (\Delta P_{\text{ref}})^{(n-\frac{1}{2})} \quad (2.5)$$

où ρ est la densité de l'air à 20°C, et C_d est le coefficient de décharge de l'ouverture de référence, égal à 0,6 pour un orifice à bord vifs ou 1 pour un orifice à bords moulés.

Indice de perméabilité à l'air I_4 : L'indice de perméabilité à l'air I_4 est le débit de fuite sous 4 Pa divisé par la surface de parois froides :

$$I_4 = \frac{\dot{q}_v(\Delta P = 4\text{Pa})}{A_{\text{SF}}} \quad (2.6)$$

Taux de renouvellement d'air sous 10 Pa n_{10} : Le taux de renouvellement d'air n_{10} est le débit de fuite sous 10 Pa divisé par le volume chauffé :

$$n_{10} = \frac{\dot{q}_v(\Delta P = 10\text{Pa})}{V} \quad (2.7)$$

Taux de renouvellement d'air sous 50 Pa n_{50} : Le taux de renouvellement d'air n_{50} est le débit de fuite sous 50 Pa divisé par le volume chauffé :

$$n_{50} = \frac{\dot{q}_v(\Delta P = 50\text{Pa})}{V} \quad (2.8)$$

2.1.2 Mesure de la perméabilité des emballages

Afin de pouvoir quantifier les fuites à travers l'enveloppe de emballages isothermes, la méthode de pressurisation utilisée pour les bâtiments a été adaptée au cas de caisses de plus faibles volumes.

2.1.2.1 Dispositif expérimental

Le dispositif expérimental est constitué d'un circuit d'air, raccordé au réseau d'air comprimé du bâtiment. Un filtre situé en début de circuit permet d'assurer la qualité de l'air en retirant l'eau et les particules qui pourraient fausser les mesures et abîmer les appareils de mesure.

Un débitmètre massique thermique, *Brooks 5853s* (plage de mesure de 100 à 1000 Lmn⁻¹, précision de ±0.2% de la pleine échelle), permet d'imposer et contrôler le débit d'air à travers le circuit. Le circuit se termine par un tube en cuivre permettant l'introduction de l'air dans la caisse (fig. 2.3 (a)). L'embout du tube est percé de plusieurs trous de manière à disperser le jet, afin d'éviter que celui-ci soit concentré en direction de la porte et ne risque alors de la déformer.

Pour mesurer la différence de pression entre l'intérieur de la caisse et l'extérieur, on utilise un manomètre différentiel *Druck LP1000* (intervalle de mesure : -50 Pa à 50 Pa, précision de ±0.5% de l'intervalle de calibrage). L'un des deux connecteurs est connecté à la caisse via un tuyau (fig. 2.3 (a)), l'autre est laissé à l'air libre à l'extérieur de la caisse.

Les températures extérieure et intérieure sont mesurées à l'aide de deux thermocouples raccordés à une carte d'acquisition *NI 9214* équipée de son dispositif de compensation interne (sensibilité de 0.02 K). Un schéma de principe est présenté sur la figure 2.3 (b).

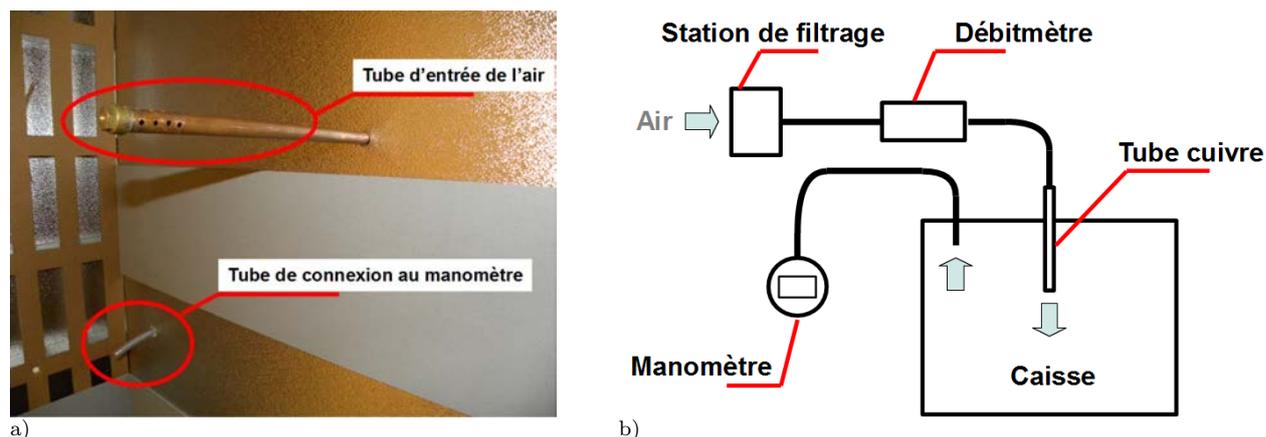


FIGURE 2.3 – (a) Photographie de l'intérieur de la caisse instrumentée pour les mesures de perméabilité, (b) Schéma de principe du dispositif.

2.1.2.2 Protocole expérimental

Le protocole expérimental se déroule comme suit :

1. Mise en service du débitmètre massique thermique (il est préconisé de le laisser chauffer durant trois quarts d'heure avant le début des mesures).
2. Contrôle de la conformité de la caisse (pas de jours dans l'assemblage, porte non cintrée...).
3. Fermeture de la caisse.
4. Injection de l'air à l'intérieur de la caisse à débit fixé par le débitmètre. La valeur la plus haute doit permettre d'atteindre au moins 50 Pa de différence de pressions entre intérieur et extérieur, la plus faible ne doit pas être inférieure à 5 Pa. On commence la série de mesure par la valeur la plus importante.
5. Relevé des valeurs de la pression différentielle, des températures extérieure et intérieure, et de la pression atmosphérique.
6. On réitère les mesures pour une dizaine de valeurs de débit.

2.1.2.3 Traitement des résultats

On corrige tout d'abord la valeur du débit d'air mesuré \dot{q}_m par la valeur des masses volumiques de l'air intérieur et extérieur, de manière à obtenir la valeur du débit volumique d'air sec à travers l'enveloppe \dot{q}_v :

$$\dot{q}_v = \dot{q}_m \left(\frac{\rho_{\text{Ext}}}{\rho_{\text{Int}}} \right) \quad (2.9)$$

où les valeurs des masses volumiques sont calculées comme suit :

$$\rho = \frac{p_{\text{atm}} - 0.37802 p_v}{287.055 T_{\text{air}}} \quad (2.10)$$

avec p_{atm} la pression atmosphérique (Pa), T_{air} la température de l'air (K), et p_v la pression partielle de vapeur d'eau dans l'air :

$$p_v = \phi_h p_{vs}$$

ϕ_h est l'humidité relative en pourcentage et p_{vs} est la pression de saturation de la vapeur d'eau dans l'air à température T_{air} :

$$p_{vs} = \exp \left(59.484085 - \frac{6790.4985}{T_{\text{air}}} - 5.02802 \ln(T_{\text{air}}) \right)$$

Les résultats peuvent être présentés sur un graphique en portant le débit d'air à travers l'enveloppe en fonction des différences de pression induites (cf figure 2.4)

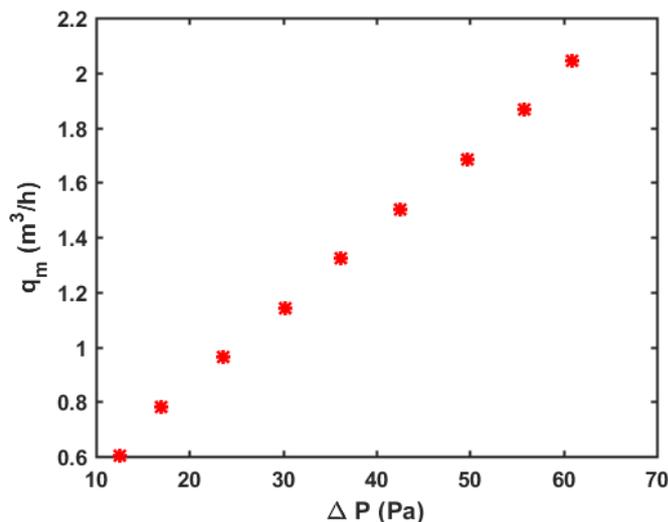


FIGURE 2.4 – Débit d'air à travers l'enveloppe en fonction du différentiel de pression entre extérieur et intérieur.

Les données ainsi corrigées, peuvent être utilisées pour déterminer le coefficient de débit d'air à travers l'enveloppe k par régression linéaire et tel que :

$$\dot{q}_v = k \Delta p^n \quad (2.11)$$

Pour obtenir le coefficient de perméabilité k_L , on applique à k une nouvelle correction pour des conditions « normales » de température et de pression :

$$k_L = k \left(\frac{\rho_{\text{Int}}}{\rho_0} \right)^{1-n} \quad (2.12)$$

avec ρ_{Ext} la masse volumique de l'air intérieur, et ρ_0 la masse volumique de l'air dans des conditions de référence de température et de pression (20 °C et 101325 Pa).

2.1.3 Évaluation du coefficient de perméabilité pour différentes configurations

Deux modèles d'emballage ont été testés ici, il s'agit du Pallet Shipper Frizbox® en version XXL et en version SB24 (fig. 2.5).

La version XXL correspond à une caisse de dimensions extérieures 1.52 m × 1.2 m × 1.45 m, d'un volume intérieur de 1890 litres elle est dimensionnée de manière à correspondre parfaitement aux palettes de chargement des avions et des bateaux dans leur plus grand format. Il existe deux types de fermeture pour cette caisse, qui seront tous deux testés : la fermeture avec sangles classique, et la fermeture avec un système de verrous.

La version SB24 correspond à une caisse de dimensions extérieures 1 m × 1.2 m × 1.45 m et d'un volume intérieur de 1169 litres.

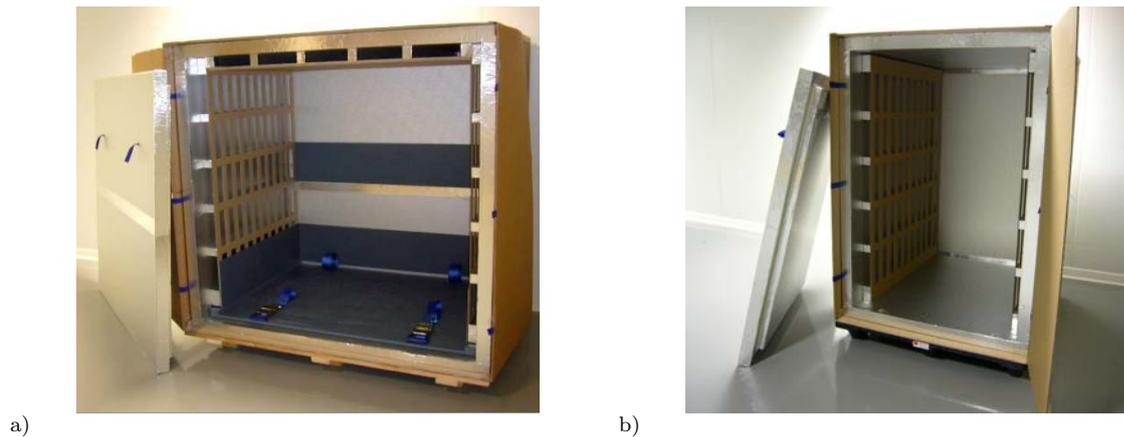


FIGURE 2.5 – Pallet Shipper Frizbox[®], (a) version XXL, (b) version SB24.

Évaluation du coefficient de perméabilité pour la caisse XXL : Sur la figure 2.6 sont présentés les résultats d'une première série de mesures, réalisée sur une caisse XXL fermée à l'aide de ses 3 sangles. Il s'agit d'une courbe représentant l'évolution du débit d'air à travers l'enveloppe en fonction du différentiel de pressions entre l'extérieur et l'intérieur de la caisse. Il peut être observé que les résultats sont très proches les uns des autres pour chaque série de mesure, ce qui permet d'affirmer une bonne répétabilité des mesures sur une même caisse (ouverte puis refermée entre chaque essai). Le coefficient de perméabilité est alors estimé à $0.12 \text{ m}^3 \text{ Pa}^{-2/3} \text{ h}^{-1}$, ce qui correspond à une surface de fuite équivalente sous un différentiel de pression de référence de 10 Pa et en considérant des bords vifs : $A_L(\Delta P_{\text{ref}} = 10 \text{ Pa}) = 6.32 \times 10^{-5} \text{ m}^2$, ou encore une ouverture de la porte sur tout son pourtour de 0.0106 mm.

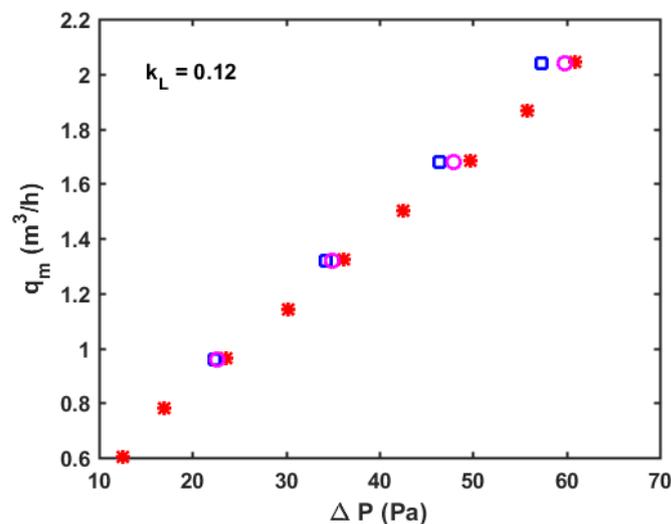


FIGURE 2.6 – Mesures du débit en fonction de la pression pour la caisse XXL, fermée à l'aide de ses trois sangles.

Influence du serrage des sangles : Une deuxième série de mesures a été effectuée sur une nouvelle caisse, afin d'observer les variations de la perméabilité à l'air des caisses en fonction de la manière dont les sangles ont été serrées. Pour ce faire, les sangles ont tout d'abord été serrées au maximum, puis pour chaque essai les sangles ont été desserrées de 0.5 cm au niveau

de la boucle. Les résultats sont visibles sur la figure 2.7. En première observation, on peut voir que lorsque les sangles sont serrées au maximum, le coefficient de perméabilité est estimé à $0.26 \text{ m}^3 \text{ Pa}^{-2/3} \text{ h}^{-1}$, il est donc supérieur à celui précédemment mesuré. On en conclut que d'une caisse à l'autre déjà le coefficient est fluctuant. On peut expliquer cela par le fait que les caisses sont assemblées par collage, à la main, ce qui implique des imperfections qui se traduisent par des différences de perméabilité entre les caisses. On constate ensuite que, comme on pouvait s'y attendre, le coefficient va croissant lorsque le serrage décroît. Lorsque les sangles sont complètement lâches, alors il n'est plus possible de mesurer de variation de pression.

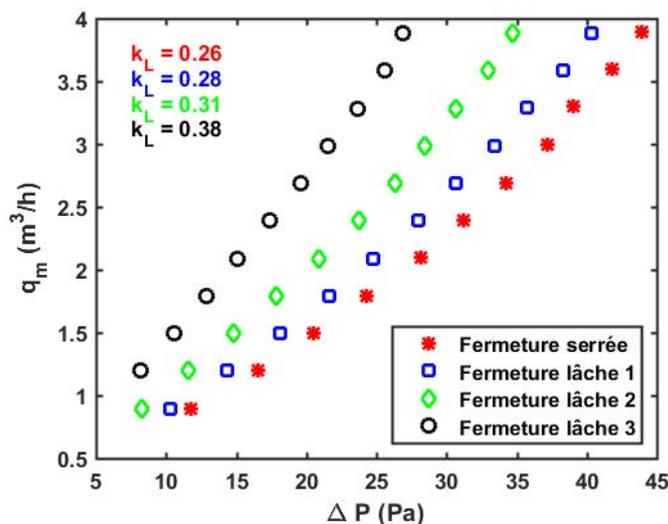


FIGURE 2.7 – Évaluation du coefficient de perméabilité de la caisse XXL version sangles pour plusieurs serrages.

Influence du nombre de sangles utilisées : Le nombre de sangles utiles à la fermeture des caisses n'avait pas encore fait l'objet de questionnement. La question s'est posée de la conséquence d'une fermeture mobilisant moins de sangles. Un test a donc été mené, en fermant tour à tour la caisse avec 3, 2 ou 1 sangle de manière à observer les différences. Les résultats sont visibles sur la figure 2.8 qui montrent que lorsque la caisse est fermée avec 3 ou 2 sangles, les résultats sont très proches et jouissent toujours d'une bonne répétabilité. En revanche, lorsque la caisse n'est plus fermée qu'avec une seule sangle, alors la caisse devient plus perméable d'une part, et d'autre part les résultats sont plus difficilement répétables.

Influence de la largeur du joint de fermeture de la porte : Les portes des caisses sont équipées d'un joint sur leur pourtour afin de diminuer les infiltrations d'air à ce niveau. Un premier test a été effectué afin de vérifier l'utilité de la présence de ce joint. Il a été observé qu'en l'absence de joint, les fuites étaient trop importantes pour qu'il soit possible de mesurer des variations significatives de pression en fonction des débits d'air injectés. La présence d'un joint s'avère donc impérative, toutefois pouvait se poser encore la pertinence de la largeur de ce dernier. En effet, jusqu'alors les joints utilisés étaient des bandes de 4 cm de largeur. Un test a été réalisé avec une porte dont les joints ont été rapportés à 1 cm de largeur, dont les résultats sont présentés sur la figure 2.9. On peut observer qu'un joint moins large offre une meilleure étanchéité de la caisse (un débit d'air moins élevé). L'explication peut se trouver dans le fait que pour que le joint puisse se déformer et épouser les irrégularités des surfaces une certaine force doit y être exercée. Plus le joint est large, plus la force à appliquer est importante. A

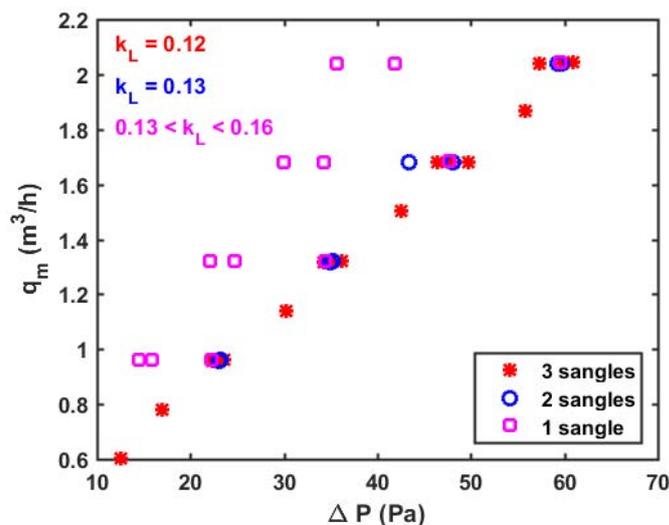


FIGURE 2.8 – Comparaison des mesures débit/pression en fonction du nombre de sangles fermant la caisse.

l'inverse, pour une force finie, un joint moins large se déforme d'avantage, réduisant ainsi les interstices.

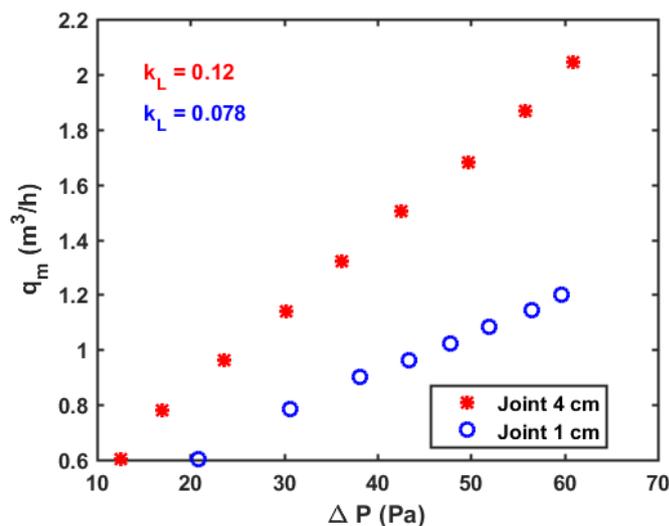


FIGURE 2.9 – Comparaison des mesures débit/pression pour la caisse XXL pour deux joints de largeur différente.

Cas du système de fermeture à verrous Un système de fermeture à verrous a été développé afin de permettre une fermeture plus aisée des caisses tout en offrant à la fois une plus grande homogénéité des fermetures d'une caisse à l'autre et l'introduction d'un dispositif de sécurité permettant de vérifier que la caisse n'a pas été ouverte lors du transport (fig. 2.10). Toutefois, l'intégration des verrous à la porte nécessite de faire traverser cette dernière par ces systèmes dans toute son épaisseur, ce qui peut potentiellement augmenter la perméabilité à l'air des caisses. Des tests ont donc été menés afin de vérifier l'influence de la présence de ces verrous en lieu et place d'un système de fermeture à sangles classique.



FIGURE 2.10 – (a) Système de fermeture à verrou, (b) dispositif de sécurité, (c) caisse XXL équipée de verrous.

Les premiers tests, réalisés sur une caisse XXL fermée avec le système de verrous, s'avérant négatifs (pas de variation de pression à plein débit), les essais suivants ont été réalisés en appliquant la porte avec verrous au corps de la caisse testée précédemment avec un système de fermeture à sangles. Les résultats sont présentés sur la figure 2.11. Les coefficients de perméabilité sont alors estimés avec et sans le dispositif de sécurité respectivement à $0.29 \text{ m}^3 \text{ Pa}^{-2/3} \text{ h}^{-1}$ et $0.35 \text{ m}^3 \text{ Pa}^{-2/3} \text{ h}^{-1}$. La présence du dispositif de sécurité diminue la perméabilité de la caisse, ce qui indique par ailleurs que la présence de verrous est bel et bien la cause de fuites d'air.

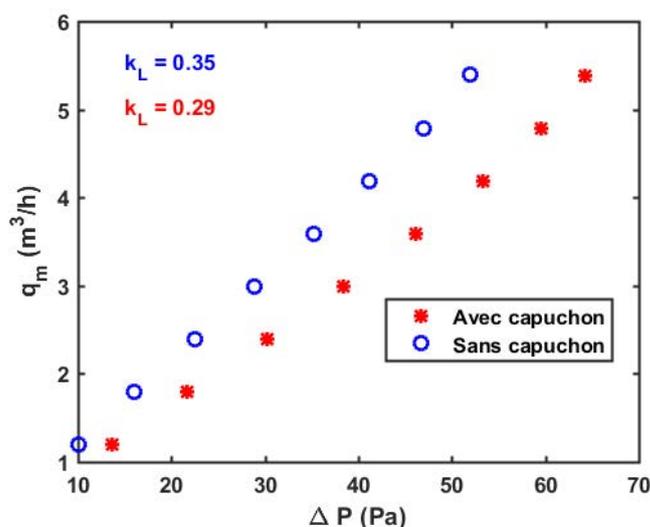


FIGURE 2.11 – Mesures débit/pression dans le cas où la porte à verrous est utilisée avec le corps de la XXL version sangles.

Pour quantifier la différence essentiellement due aux verrous, deux tests ont été ensuite effectués sur le même corps de caisse (version sangle) avec les deux versions de porte, et dont les contours ont été mastiqués pour éliminer les fuites au niveau du contact entre la porte et la caisse. Les résultats de ces tests sont présentés sur la figure 2.12. Le débit étant une grandeur extensive on peut considérer que le débit d'air engendré par l'ensemble des fuites de la caisses est égale à la somme du débit d'air lié aux fuites propres au corps même de la caisses et du débit lié aux verrous :

$$\dot{q}_v = \dot{q}_{\text{corps}} + \dot{q}_{\text{verrous}} = k_{\text{corps}} \Delta P^n + k_{\text{verrous}} \Delta P^n \quad (2.13)$$

On a alors : $\dot{q}_v = k_L \Delta P^n = (k_{\text{corps}} + k_{\text{verrous}}) \Delta P^n$
 et donc $k_{\text{verrous}} = k_L - k_{\text{corps}} = 0.13 - 0.059 = 0.071 \text{ m}^3 \text{ Pa}^{-2/3} \text{ h}^{-1}$.

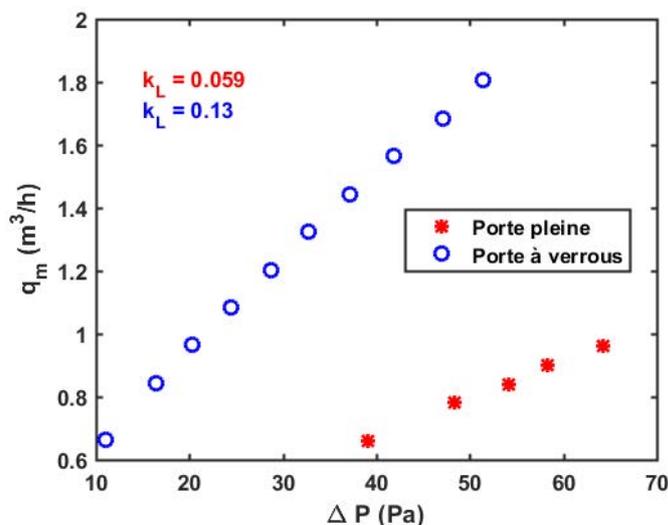


FIGURE 2.12 – Mesures débit/pression pour les deux types de porte, utilisées sur la XXL version sangle et mastiquées sur la jointure.

On peut en conclure que les fuites inhérentes aux verrous ne sont pas excessivement importantes, elles ne peuvent en tout cas pas justifier l'impossibilité d'effectuer des mesure lors des premiers tests sur la version verrous. C'est donc bien au niveau des contours de la porte que se trouve la cause des fuites d'air les plus importantes. La pression exercée par le système de verrous n'était de toute évidence pas suffisamment forte pour permettre au joint de se déformer et d'épouser les surfaces avec lesquels il fait le contact. Il a donc été décidé de réitérer les tests sur la version verrous en adaptant les joints. Deux types de joints ont alors été testés : un joint *Alveosoft* et un joint *PVC BB5*, de largeurs 40 mm et 15 mm. Les résultats sont visibles sur la figure 2.13. Les coefficients de perméabilité sont alors estimés entre $0.76 \text{ m}^3 \text{ Pa}^{-2/3} \text{ h}^{-1}$ et $0.91 \text{ m}^3 \text{ Pa}^{-2/3} \text{ h}^{-1}$, soit une surface de fuite équivalente comprise entre $4 \times 10^{-4} \text{ m}^2$ et $4.79 \times 10^{-4} \text{ m}^2$ ou encore une ouverture de la porte sur tout son pourtour entre 0.0673 mm et 0.0806 mm.

La conduite de ces essais a donc permis d'identifier la source principale des problèmes d'étanchéité des caisses, à savoir la compression du joint lors de la fermeture de la porte. Cette observation a ensuite permis d'améliorer le cas de la caisse verrou qui présentait alors des fuites trop importantes pour pouvoir effectuer des mesures de perméabilité. Toutefois, la perméabilité de la caisse en version verrous reste toujours plus importante que dans le cas de la version sangle, la force exercée par les verrous atteignant difficilement celle exercée par les sangles lors de la fermeture de la caisse.

Cas de la Pallet Shipper Frizbox SB24 version verrous : Une dernière série de tests a été effectuée sur le modèle SB24 de la Pallet Shipper Frizbox. Celle ci était équipée elle aussi d'un système de fermeture à verrous. Lors de ces tests, deux raideurs de ressort différentes ont été essayées dans une tentative d'augmenter la force exercée par les verrous sur la porte. Les résultats sont présentés sur la figure 2.14. Les valeurs des coefficients sont alors estimées entre $0.14 \text{ m}^3 \text{ Pa}^{-2/3} \text{ h}^{-1}$ et $0.17 \text{ m}^3 \text{ Pa}^{-2/3} \text{ h}^{-1}$. Ce qui correspond à des surfaces de fuite équivalente comprises entre $7.37 \times 10^{-5} \text{ m}^2$ et $8.95 \times 10^{-5} \text{ m}^2$, ou encore une ouverture de la porte sur tout son pourtour de 0.015 mm à 0.0183 mm. La version SB24 semble donc bien moins perméable que la version XXL de la Pallet Shipper Frizbox, ce qui s'explique par le fait que la caisse étant

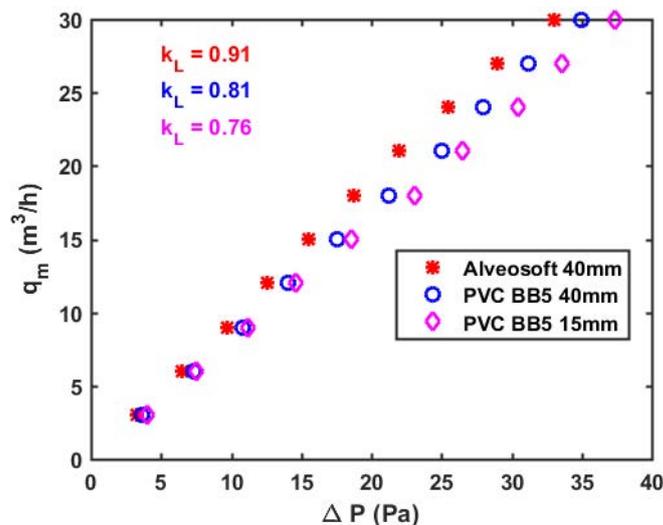


FIGURE 2.13 – Mesures débit/pression dans le cas de la XXL version verrous, pour différents types de joints.

moins grande, notamment la porte, la force à exercer pour compresser les joints est moins importante.

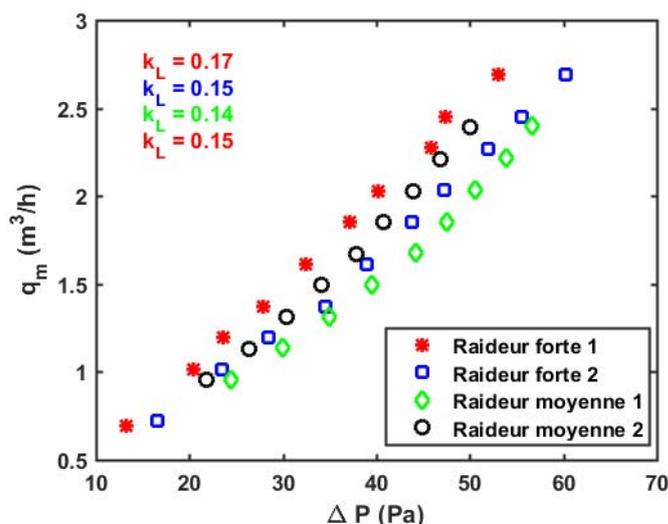


FIGURE 2.14 – Mesures débit/pression dans le cas de la SB24 verrous, pour des ressorts de raideurs différentes.

2.2 Mesures thermiques sur une caisse SB24

La seconde partie de l'étude expérimentale s'intéresse la répartition des températures au sein de la caisse de transport. En effet, l'objectif premier de ces emballage demeure le maintien des produits transportés dans une plage de températures acceptables. Il devient alors nécessaire de comprendre la manière dont la température est transmise de l'extérieur vers l'intérieur, et la manière dont elle évolue en fonction des différents éléments présents dans la caisse. Les modèles

et les configurations possibles sont nombreux et il a fallu faire un choix, ce choix c'est porté sur le modèle le plus couramment utilisé, à savoir la SB24, dans une configuration correspondant à un voyage se déroulant en été.

2.2.1 Dispositif expérimental

Vont donc être décrits la configuration de la caisse qui a été retenue, les moyens de mesure utilisés et le protocole expérimental.

2.2.1.1 Configuration

La configuration des caisses est limitée par un cahier des charges faisant intervenir à la fois des besoins d'ordre économique (ils ne doivent pas coûter trop cher, ni être trop lourds pour ne pas augmenter le prix du transport) et des besoins de praticité pour la manutention (les caisses doivent être suffisamment faciles à charger et à manipuler). Ces restrictions ne permettent pas de charger la caisse en accumulateurs de froid sur toutes les faces. En effet si cela permettrait d'augmenter l'inertie globale de l'emballage en plus de protéger directement les produits, cela aurait aussi pour conséquence de diminuer le volume utile, d'alourdir la caisse et compliquerait grandement la tâche des manutentionnaires lors du chargement car il est compliqué d'apporter des accumulateurs dans le fond de la caisse et à l'avant.

Les accumulateurs de froid sont alors disposés sous forme de plaques dans des logements latéraux (fig. 2.15), ainsi qu'en dessous et au dessus du chargement. Une plaque de séparation en carton triple canelure est introduite entre les accumulateurs et le chargement en dessous et au dessus afin de protéger les produits du froid car ces accumulateurs sont chargés à température négative (-16°C dans notre cas) tandis que les latéraux sont chargés à température positive ($+5^{\circ}\text{C}$).

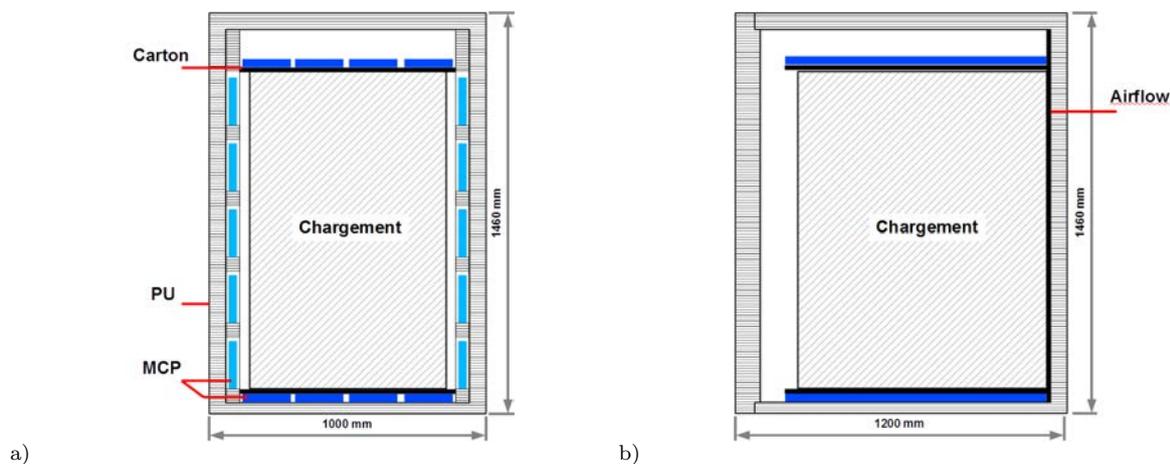


FIGURE 2.15 – Schema de la caisse SB24 dans la configuration retenue : a) vue de face, b) vue de profil.

2.2.1.2 Thermocouples

La mesure des températures au sein du dispositif expérimental est effectuée à l'aide de 167 thermocouples. Les thermocouples utilisés ont été fabriqués à partir de bobines de fils pour thermocouples de type K (chromel/alumel) de 0.2 mm de diamètre et torsadés. Les soudures froides de ces thermocouples sont réparties en 5 groupes, chacun insérés dans une pièce cylindrique en cuivre de 5 cm de diamètre et de 8 cm de haut. Les cinq cylindres sont eux même placés dans un boîtier isolé. La température de chaque cylindre est relevée par une sonde platine

PT100. Des cables en cuivre font ensuite le lien entre les soudures froides et les 5 cartes d'acquisitions *Keithley 7708* disposant chacune de 40 canaux différentiels. Ces cartes d'acquisitions sont branchées sur un multimètre *Keithley 2700* permettant la mesure des tensions du système, lesquelles sont relevées via un ordinateur en utilisant une interface d'acquisition développée sous *Labview*. Un schéma de principe est présenté sur la figure 2.16

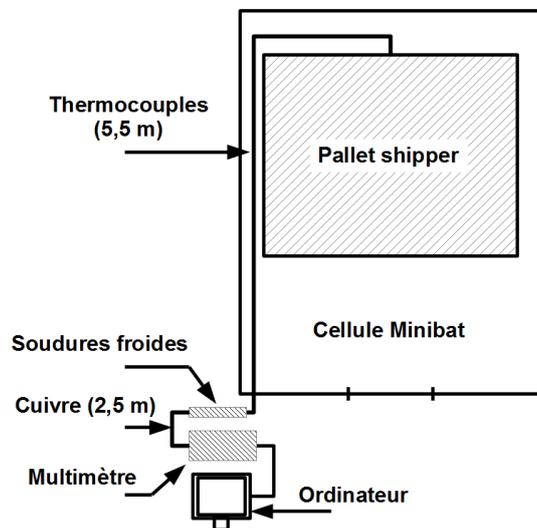


FIGURE 2.16 – Schéma de principe du dispositif expérimental.

La disposition des thermocouples dans le montage s'effectue de la manière suivante : chaque face est équipée de 5 thermocouples, un à chaque angle et un au centre. Cette disposition est ensuite répétée pour chaque couche de matériaux jusqu'à arriver au chargement (fig. 2.17). Enfin un thermocouple est placé au centre du chargement et un autre dans la cellule MiniBat afin de mesurer la température extérieure.

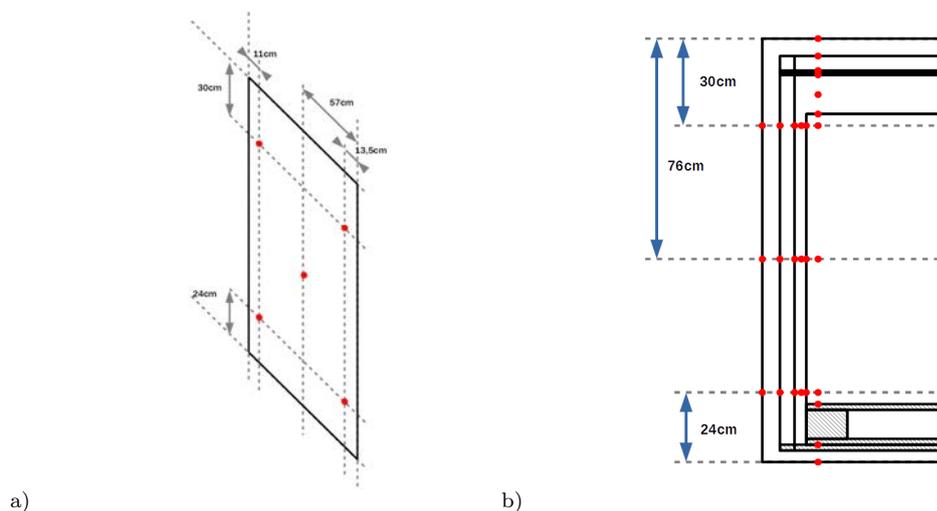


FIGURE 2.17 – Disposition des thermocouples : a) vue de l'une des faces extérieures, b) coupe en profil.

L'étalonnage des thermocouples a été effectué à l'aide d'un bain thermostaté. Pour chaque échelon de température, on réalise $N = 10$ mesures en relevant à chaque fois la tension aux bornes des thermocouples (U_i), la température au niveaux des soudures froides (T_{SF} , mesurées à l'aide des sondes platine) et la valeur de la température de référence (T_{ref}). Pour chaque

échelon on calcule les moyennes des tensions aux bornes du thermocouple et du différentiel de température entre la référence et la soudure froide :

$$\Delta T_{\text{ref}} = \frac{\sum_{i=1}^N T_{\text{ref},i}}{N} - T_{\text{ref}} \quad (2.14)$$

$$\bar{U} = \frac{\sum_{i=1}^N U_i}{N} \quad (2.15)$$

À partir de ces valeurs et par la méthode des moindres carrés on peut alors calculer la valeur de la température mesurée.

2.2.1.3 Protocole expérimental

Le protocole expérimental se déroule comme suit :

1. stockage des plaques de MCP au congélateur 24h avant le début de l'essai pour les amener à la température de chargement ;
2. démarrage de la cellule minibat et stabilisation de l'enceinte à 5 ° C 24h avant le début de l'essai pour amener la caisse, chargée des produits et des plaques de MCP latérales, à 5 ° C ;
3. avant le démarrage, mise en route de la centrale d'acquisition ;
4. introduction des plaques de MCP congelées et des plaques de séparation ;
5. lancement du test après sélection du profil de température extérieure souhaité.

2.2.2 Résultats

Dans cette section sont présentés les résultats issus des expérimentations thermiques sur la caisse Pallet Shipper Frizbox SB24. Plusieurs profils de température ont été testés, notamment un profil basé sur la norme ISTA7E, puis un profil constant auquel a été rajouté la simulation de l'ensoleillement à l'aide de lampes solaires dont est équipée la chambre d'essais.

2.2.2.1 Essai pour un profil de température extérieure sans ensoleillement

Les résultats suivant sont issus d'un essai réalisé avec un profil de température basé sur un profil ISTA7E chaud avec une première partie correspondant à la montée en température de l'enceinte. En effet, la stabilisation des produits et des accumulateurs de froid se faisant dans cette même enceinte, la température démarre alors aux alentours de 5 ° C, et il faut ensuite le temps à l'enceinte de monter jusqu'aux 28 ° C marquant le début du profil ISTA7E chaud qui consiste en une variation sinusoïdale de la température de 5 degrés autour de 28 ° C. Le profil correspondant est visible sur la figure 2.18.

Températures sur les faces extérieures : Les premières sondes considérées ont été placées au centre de chaque face, entre le carton d'emballage et le corps en polyuréthane de la caisse. On peut voir sur la figure 2.19 que ces températures sont très proches les unes des autres (au plus 0.5 degrés d'écart) et sont consistantes avec la température du profil extérieur. Ce qui permet d'affirmer à la fois une bonne homogénéité des températures appliquées à la caisse, et un effet restreint en matière de protection thermique de l'emballage carton (dont ce n'est pas la fonction, puisqu'il est présent sur les caisses en premier lieu pour les protéger des chocs et des éraflures).

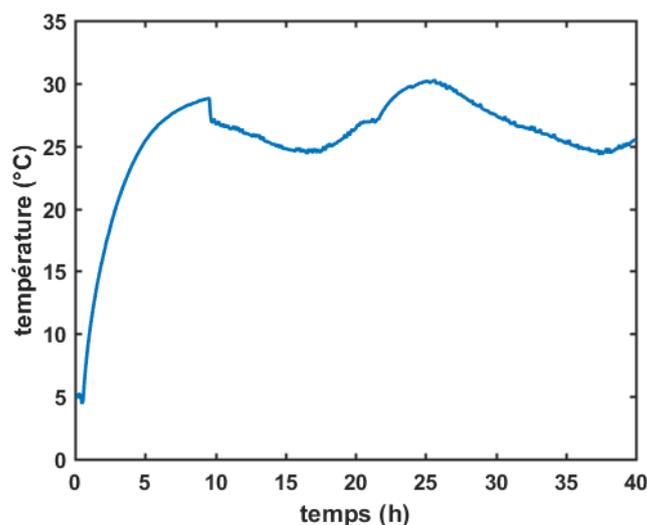


FIGURE 2.18 – Profil de température extérieure, basé sur l'ISTA7E.

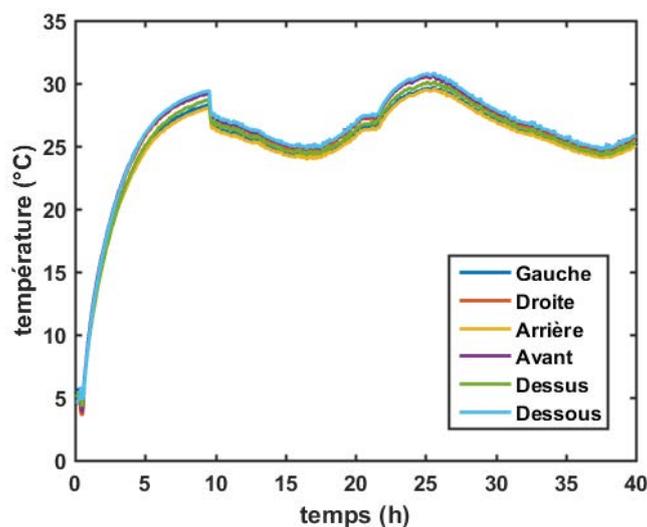


FIGURE 2.19 – Évolution de la température à l'extérieur de la caisse, entre le carton d'emballage et le corps en PU.

Températures des surfaces internes en contact avec les MCP : Dans le cas des sondes placées entre le corps PU et les MCP (fig. 2.20) on observe des comportements assez différents en fonction de l'emplacement de la sonde sur le panneau correspondant. Ainsi dans le cas des panneaux latéraux on constate que, de manière générale, les sondes situées à l'arrière de la caisse (1 et 4) affichent des températures plus élevées que celles situées à l'avant (2 et 3). On constate aussi que les sondes situées vers le bas de la caisse (3 et 4) présentent de plus fortes variations, en particulier au démarrage du test, que celles situées vers le haut de la caisse. Il est intéressant de remarquer que les sondes du bas évoluent vers un même pic froid avant d'ensuite afficher des évolutions différentes, celles étant placées vers l'arrière de la caisse remontant plus rapidement en température. Cela préfigure d'une influence de la présence des MCP à -25°C au dessus et au dessous du chargement. Ces derniers refroidissent le corps en PU de la caisse et créent de forts gradients de température sur les différents panneaux. Les sondes supérieures sont toutefois

protégées par la présence d'accumulateurs de froid à $+5\text{ }^{\circ}\text{C}$, le transfert de chaleur entre les MCP froids et les panneaux latéraux ne peut alors se faire que via le panneau arrière, tandis que dans le bas de la caisse, les panneaux latéraux ne sont pas protégés des MCP froids et en subissent donc plus fortement l'influence.

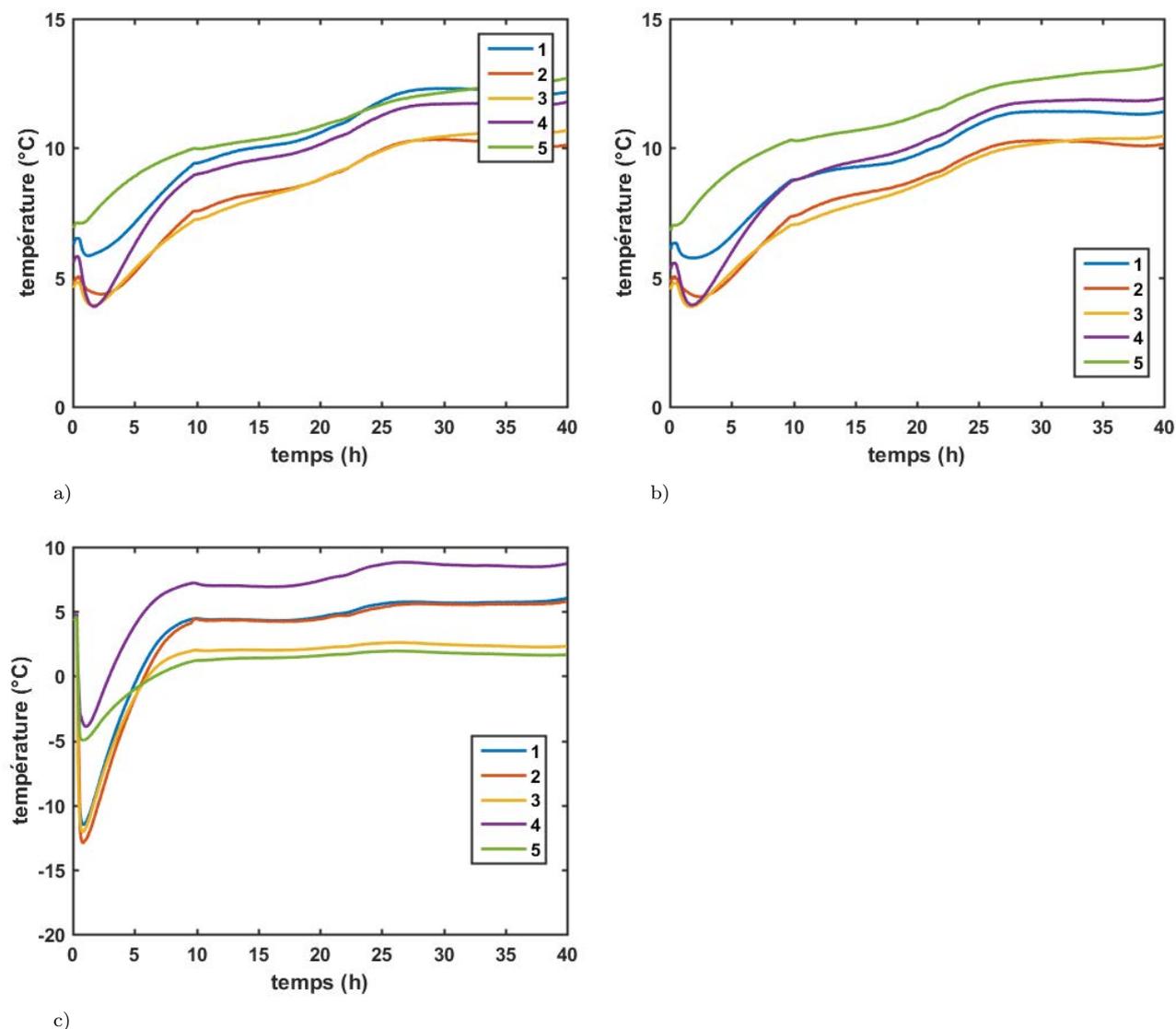


FIGURE 2.20 – Évolution de la température entre le corps et les MCP, (a) face gauche, (b) face droite, (c) face inférieure.

Températures des surfaces internes en contact avec un volume d'air : Toutes les faces intérieures de la caisse ne sont pas forcément en contact avec des matériaux à changement de phase, soit parce qu'il n'y en a pas sur ces faces là (à l'avant et à l'arrière) soit parce qu'un volume d'air fait tampon entre le PU et le MCP (dans la partie supérieure). Les températures mesurées sur ces faces sont présentées sur la figure 2.21. Une première observation que l'on peut faire est que dans le cas du panneau avant (la porte), les températures sont relativement homogènes, ce qui n'est pas le cas pour le panneau arrière. En effet, à l'arrière de la caisse on remarque une certaine stratification des températures, les sondes supérieures (1 et 2) affichant des températures plus élevées que les sondes inférieures (3 et 4). L'influence des MCP froids est là encore évidente, mais on peut aussi supposer que le volume d'air à l'arrière étant trop confiné et ne communiquant pas avec les autres volumes d'air, il ne peut y avoir de mouvement de

convection pour homogénéiser les températures, créant de fait une stratification. On remarque aussi que les températures ne descendent pas aussi bas sur le panneau avant que sur le panneau arrière, cela est très certainement dû au fait qu'à l'arrière les MCP sont en contact direct ou quasiment avec le panneau arrière, tandis qu'à l'avant, il y a une distance certaine entre les MCP et la porte, diminuant d'autant leur influence.

Dans le cas du panneau supérieur, on peut observer que les sondes situées vers l'arrière de la caisse (1 et 2) affichent des températures légèrement plus chaudes que celles situées à l'avant (3 et 4).

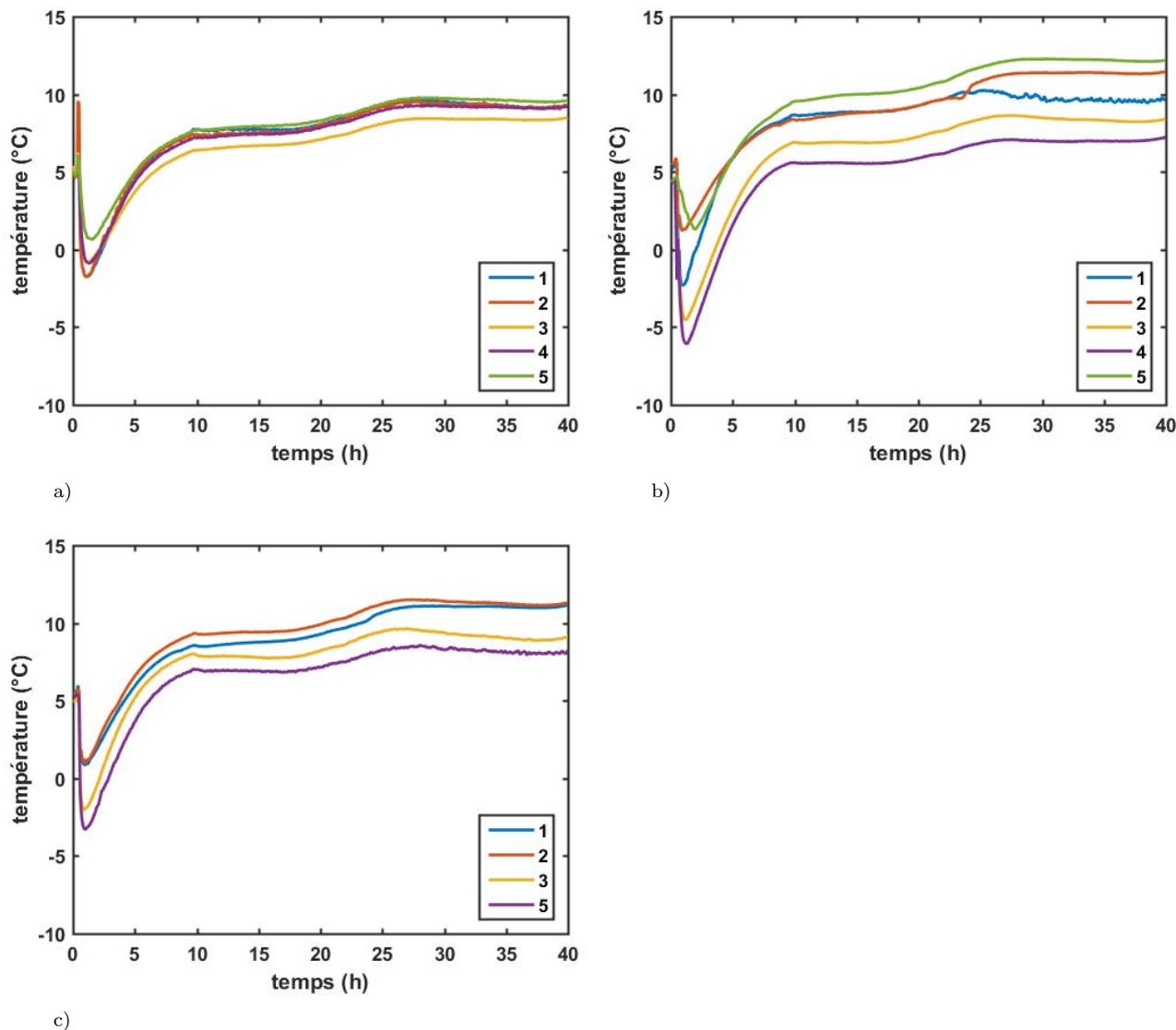


FIGURE 2.21 – Évolution de la température entre le corps et l'air, (a) face avant, (b) face arrière, (c) face supérieure.

Températures sur la surface des matériaux à changement de phase, en contact avec les plaques de séparation en carton : Les matériaux à changement de phase ne sont pas en contact direct avec le chargement : les panneaux latéraux présentent des plaques en carton ajourées qui servent principalement à maintenir les accumulateurs dans leurs emplacements. Ces accumulateurs là étant chargés à $+5\text{ °C}$, il n'est pas nécessaire d'en protéger les produits. En revanche dans le cas des accumulateurs supérieurs et inférieurs, qui sont chargés à -25 °C , il est alors nécessaire de protéger les produits pour éviter qu'ils ne gèlent, d'où la présence de

plaques en carton de plus forte épaisseur (carton triple canelure de 1.5 cm d'épaisseur). Les températures mesurées entre les plaques de MCP et ces séparations en cartons sont présentées sur la figure 2.22. Il est plus délicat ici d'établir des comportements généraux tant chaque sonde semble réagir différemment. En première observation, on peut remarquer que la sonde arrière supérieure (1) est celle qui affiche le plus de variation, elle est celle qui subit de toute évidence le plus l'influence des MCP froids. La sonde arrière inférieure quant à elle semble moins subir de variation, même si on peut observer le même pic froid au démarrage du test. Les deux sondes avant sont celles qui sont les plus aisément regroupables, affichant un comportement assez similaire, avec une faible descente en température au démarrage puis une montée progressive et constante sur la durée du test. La sonde centrale quant à elle semble ne quasiment pas subir d'influence des MCP froids, elle affiche une montée en température constante et faible sur toute la durée de l'essai.

Au dessus et au dessous, on observe de nouveau une différence de températures entre l'avant et l'arrière de la caisse, les sondes situées à l'arrière (1 et 2) affichant des températures plus élevées que celles situées à l'avant.

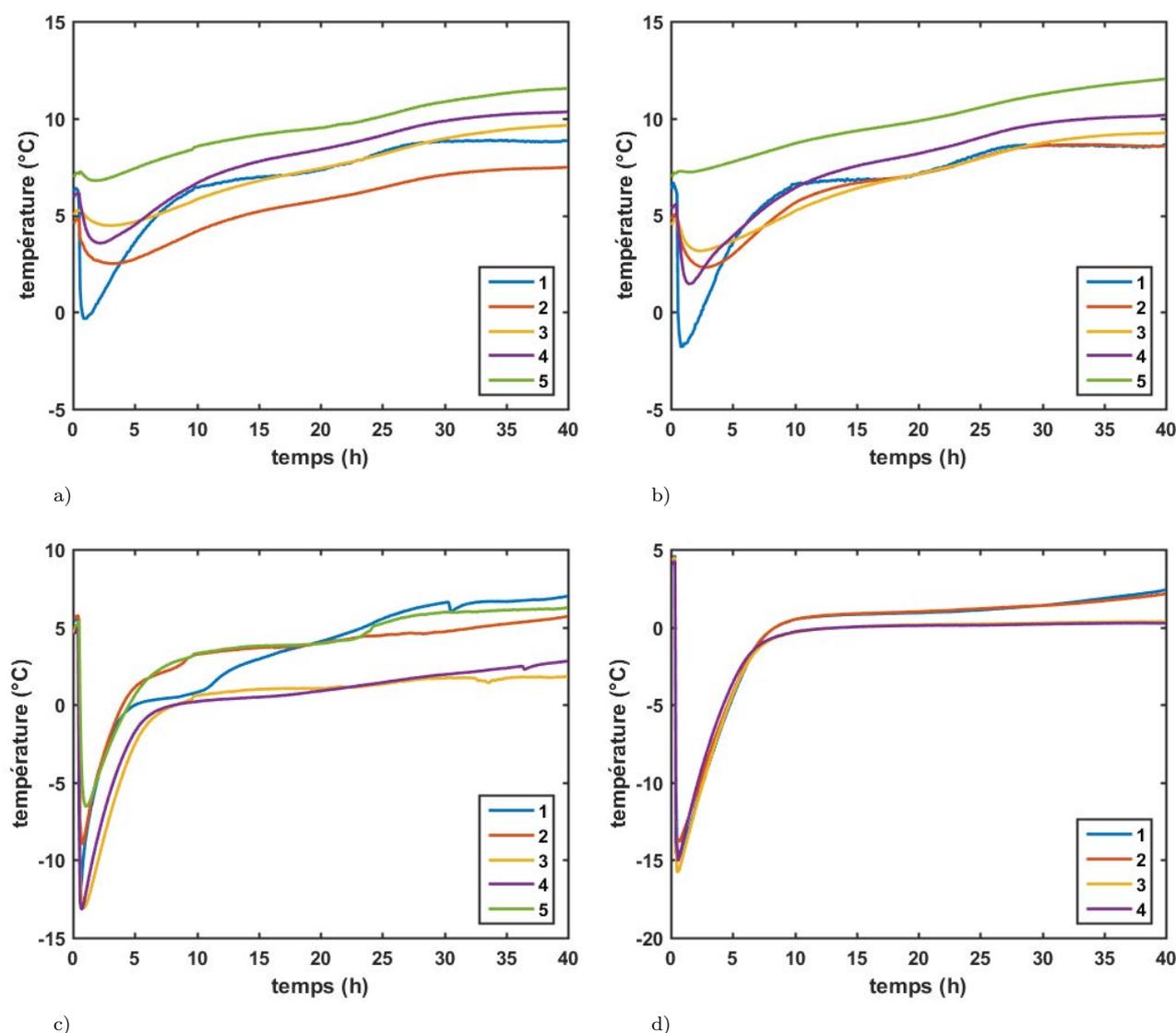


FIGURE 2.22 – Évolution de la température entre les MCP et la plaque de séparation en carton, (a) face gauche, (b) face droite, (c) face supérieure, (d) face inférieure.

Températures au niveau des joints de la porte : Sur la figure 2.23 on peut observer les variations de températures au niveau des joints aux quatre angles de la porte. On peut remarquer tout d'abord que les températures sont encore une fois plus élevées sur la partie supérieure de la caisse que sur sa partie inférieure. Les sondes situées sur le dessus de la porte semblent subir une plus forte influence de la température extérieure, en effet elles affichent les températures les plus élevée jusque là mesurées, et les courbes varient d'une manière très similaire à la température extérieure, à l'exception du démarrage où l'on peut observer une descente en température du à l'influence des MCP froids. Les sondes situées dans la partie inférieure de la porte montrent que l'influence de la température extérieure y est quelque peu atténuée, probablement par une plus grande proximité des MCP froids.

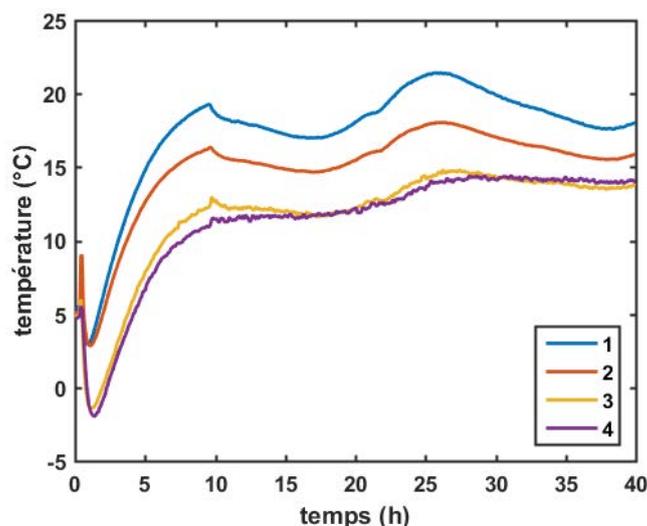
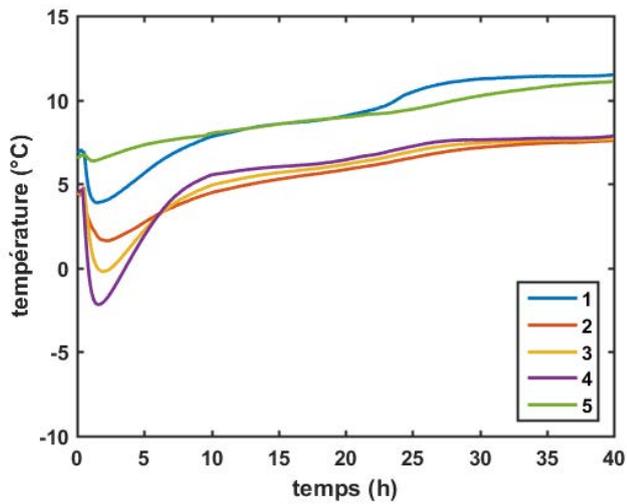


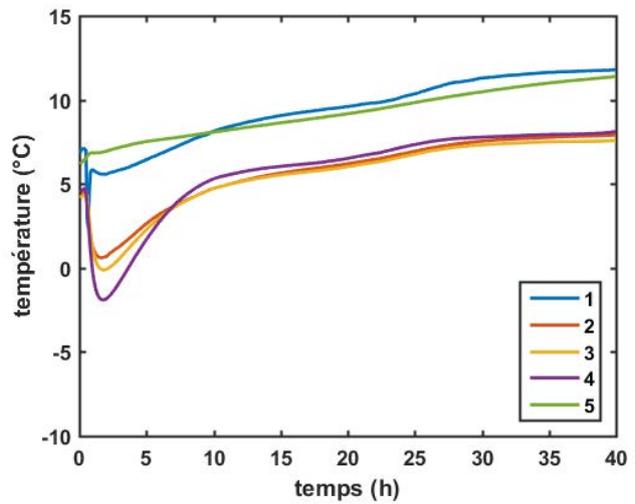
FIGURE 2.23 – Évolution de la température au niveau des joints de la porte.

Températures sur les surfaces du chargement : L'observation des températures sur la surface du chargement (fig. 2.24), permet d'aboutir à des constats semblables à ceux formulés précédemment. Ainsi on observe une stratification des températures du bas vers le haut (les températures les plus froides étant vers le bas, sur les faces latérales du chargement). Cette stratification est particulièrement importante à l'arrière du chargement où l'air demeure stagnant et confiné, tandis qu'à l'avant, où le volume d'air est plus important, les températures sont bien plus homogènes. On observe aussi des températures généralement plus importantes à l'arrière de la caisse qu'à l'avant, ce qui est consistant avec le fait que le volume d'air étant moins épais à l'arrière par rapport à l'avant, le chargement y est moins protégé de la température extérieure. Les sondes latérales arrières basses constituent une exception à ces observations due à leur proximité avec les MCP froids. Les sondes situées sur les centres des faces sont celles qui affichent les variations les moins importantes correspondant aux emplacements les plus inertiels au sein de la caisse.

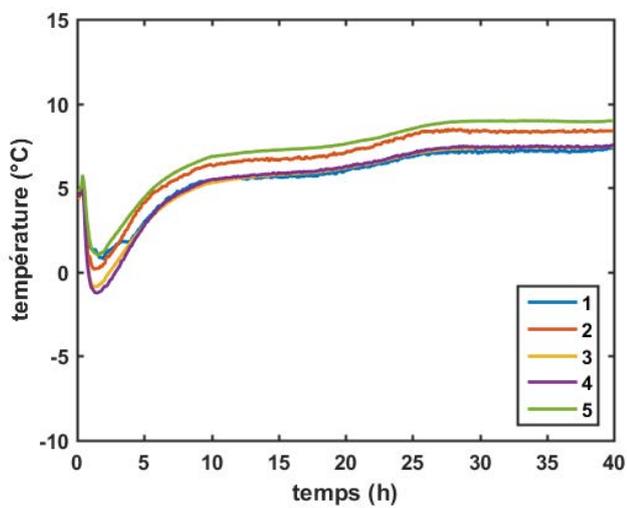
Conclusion : Les résultats du premier test réalisé sur la caisse SB24, faisant intervenir un profil de température extérieur variable, correspondant à un voyage dans une période chaude de l'année, ont permis de mieux comprendre la manière dont évoluaient les températures au sein de l'emballage. On a pu observer que les effets de la conduction sont les plus prépondérants, aussi bien pour la communication de la température extérieure vers l'intérieur de la caisse que pour la répartition du froid à l'intérieur. Les faces avant et arrières subissent le plus les influences de la température extérieure car elles ne sont pas protégées par les plaques de matériaux à



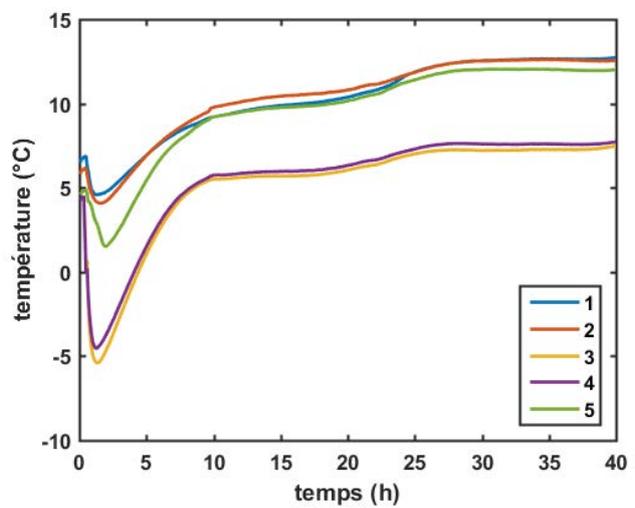
a)



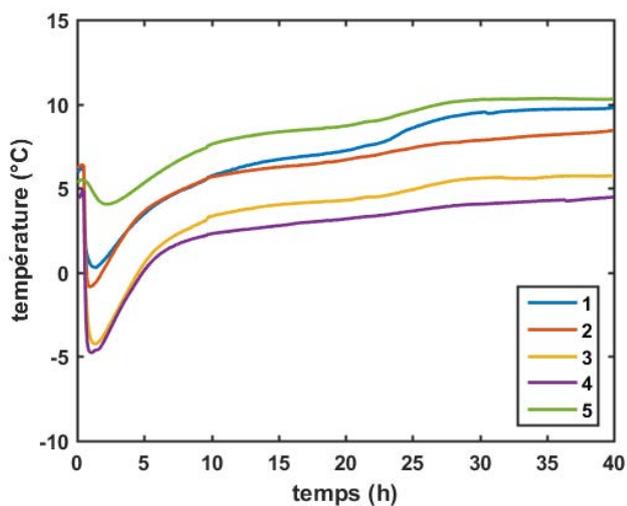
b)



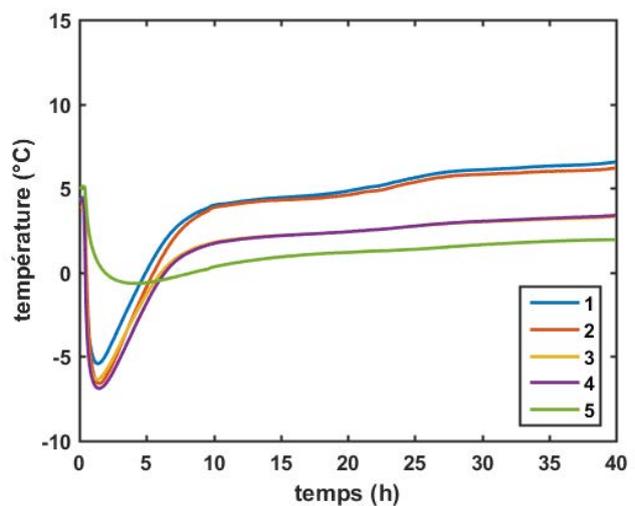
c)



d)



e)



f)

FIGURE 2.24 – Évolution de la température sur la surface du chargement.

changement de phase. Toutefois la présence d'un volume d'air à l'avant de la caisse permet d'homogénéiser les températures, ce qui n'est pas le cas à l'arrière où le volume d'air est trop fin pour permettre une bonne circulation et les températures sont alors fortement stratifiées. La manière dont le froid des accumulateurs chargés à température négative se répartit, par conduction, dans la caisse, engendre des disparités importantes selon la position des sondes et on remarque que seules les faces latérales présentent une certaine symétrie l'une par rapport à l'autre.

2.2.2.2 Profil ISTA7E avec ensoleillement

Les résultats suivants ont été réalisés en soumettant la caisse à un profil de température avec un premier palier à 30 ° C pendant les 20 premières heures avec une simulation d'ensoleillement à l'aide de lampes solaires. Puis un deuxième palier à 20 ° C. Les lampes solaires étaient situées sur le mur gauche de l'enceinte. Les puissances solaires reçues par chaque face et mesurées à l'aide d'un pyranomètre sont présentées sur le tableau 2.1. De fait, on s'attend à une forte dissymétrie entre les faces latérales, c'est pourquoi on détaillera en particulier ces résultats là.

Face	Puissance solaire
Gauche	338 W m ⁻²
Droite	15 W m ⁻²
Avant	6 W m ⁻²
Arrière	78 W m ⁻²
Dessus	25 W m ⁻²

TABLE 2.1 – Valeur de la puissance solaire reçu par chaque face de la caisse.

Températures sur les faces extérieures : Les températures mesurées sur les faces externes de la caisse sont présentées sur la figure 2.25. Contrairement à ce qu'on a pu observer précédemment dans un cas sans ensoleillement, les températures sont cette fois très différentes selon la face considérée. Les faces recevant le plus de puissance solaire sont celles dont les températures sont les plus élevées. Les valeurs atteintes sont par ailleurs particulièrement élevées, allant jusqu'à 56 ° C sur la face gauche (en ensoleillement direct). Pourtant le profil de température imposé à l'enceinte n'est pas sensé dépasser 30 ° C. La présence d'ensoleillement s'avère donc très préoccupante, pouvant augmenter de près de 20 degrés la température sur les faces ensoleillées.

Températures des surfaces internes en contact avec les MCP : Concernant les températures mesurées par les sondes placées entre le corps et les MCP, sur les faces latérales (fig. 2.26), on observe bien une dissymétrie certaine entre les résultats de la face gauche (recevant directement l'ensoleillement) et ceux de la face droite. Pourtant il est intéressant de remarquer que si les différences de températures entre ces deux faces pouvaient atteindre les 15 degrés sur les faces externes de la caisse, à l'intérieur cette différence s'amenuise significativement, attestant de l'efficacité des plaques de MCP comme protection thermique. On peut remarquer encore que là où dans le cas sans ensoleillement on pouvait distinguer les sondes arrières et les sondes avant en deux groupes, dans le cas avec ensoleillement les résultats semblent plus disparates avec notamment la sonde arrière haute (1) qui est celle qui monte le plus en température, laissant supposer qu'elle subit donc le plus l'influence de la température extérieure comparativement à la sonde arrière basse (4) qui semble elle plus protégée.

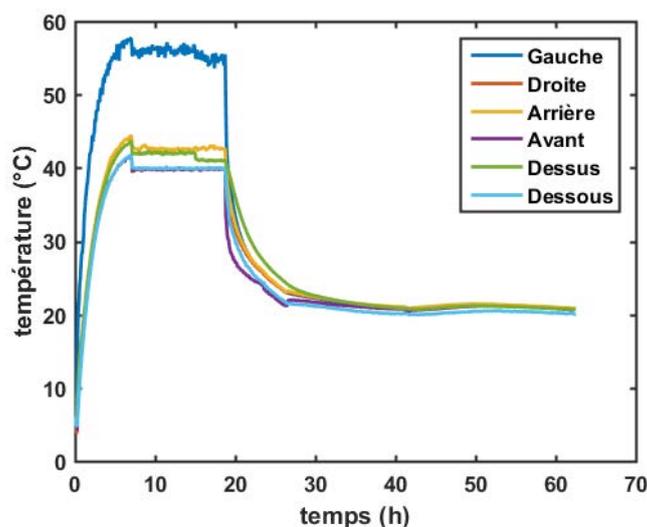


FIGURE 2.25 – Évolution de la température à l’extérieur de la caisse, entre le carton d’emballage et le corps en PU.

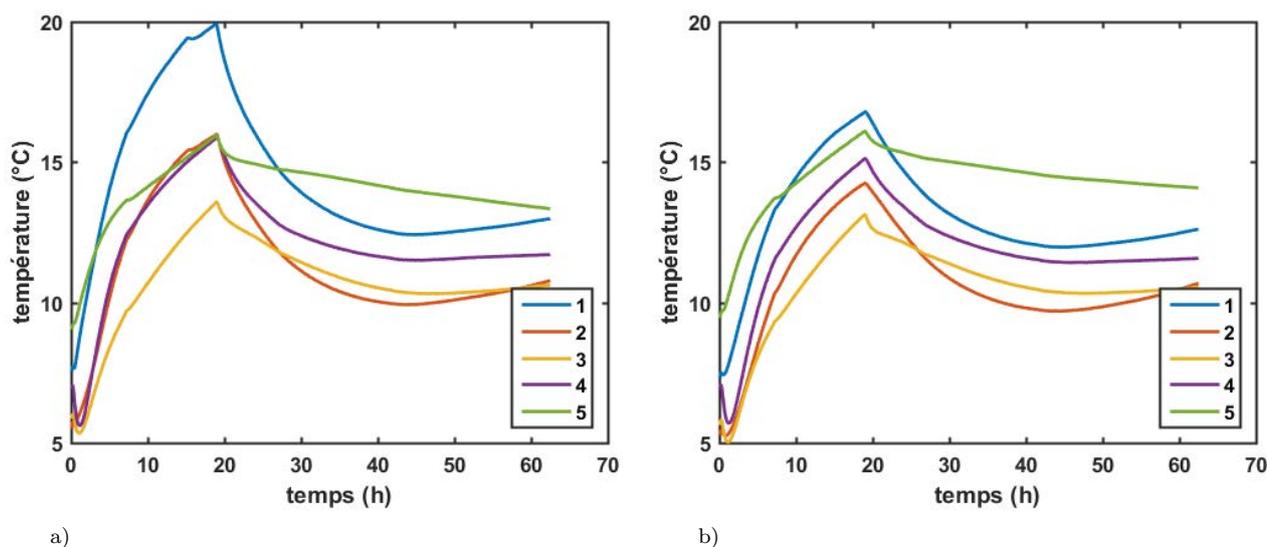


FIGURE 2.26 – Évolution de la température entre le corps et les MCP, (a) face gauche, (b) face droite.

Températures sur la surface des matériaux à changement de phase, en contact avec les plaques de séparation en carton : Sur la figure 2.27 sont présentées les températures enregistrées par les sondes placées entre les plaques de MCP et les séparations en carton (constituant les logements des plaques de MCP dans le cas des faces latérales). La forte dissymétrie qui pouvait être observée sur les faces externes entre la gauche et la droite, semble ici totalement estompée. On peut donc être rassuré sur le fait que la présence de MCP sur le pourtour de la caisse assure une solide protection face aux événements extérieurs. On peut remarquer en revanche la présence d’un minima après le pic du à l’arrêt de l’ensoleillement, qui laisse supposer que le froid n’a alors pas été totalement consommé et a continué à refroidir la caisse pendant quelques heures avant de laisser finalement la caisse remonter lentement en température.

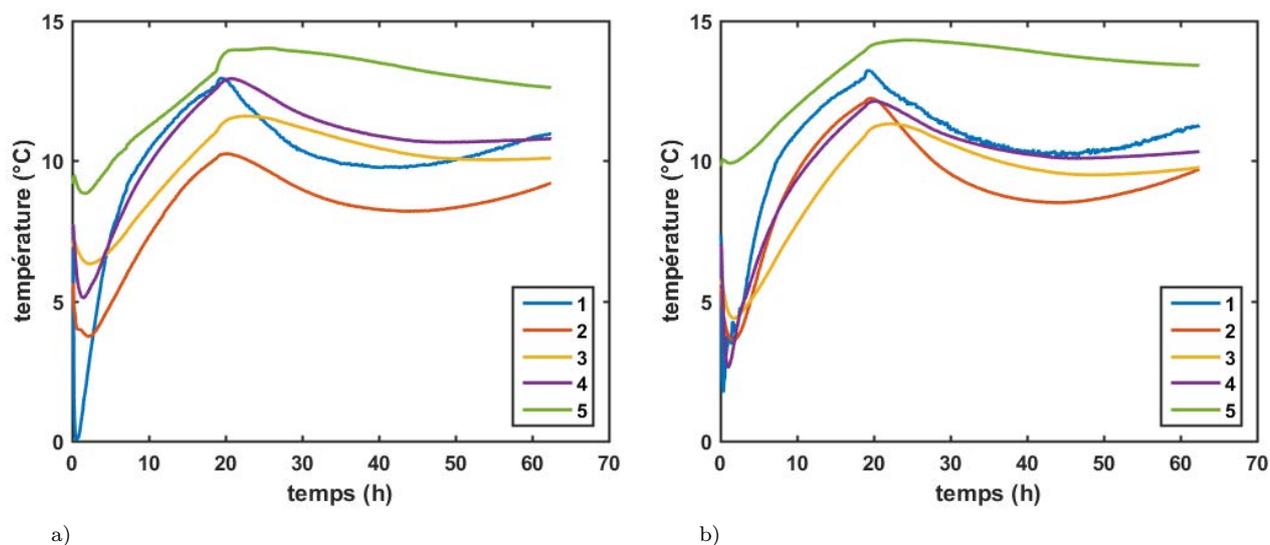


FIGURE 2.27 – Évolution de la température entre les MCP et la plaque de séparation en carton, (a) face gauche, (b) face droite.

Températures au niveau des joints de la porte : Les températures au niveau des joints de la porte sont présentées sur la figure 2.28. On peut cette fois observer une forte similitude de résultats pour les sondes situées au bas de la porte (sondes 3 et 4) avec une descente en température significative, qui laisse indiquer l'influence des MCP inférieurs qui compense la dissymétrie du flux de chaleur dû au rayonnement. En revanche, dans le cas des résultats des sondes situées sur le haut de la porte, on observe d'importantes différences, avec les températures les plus fortes enregistrées par la sonde de gauche. Ces sondes là subissent donc de toute évidence grandement l'influence de la température extérieure et du flux.

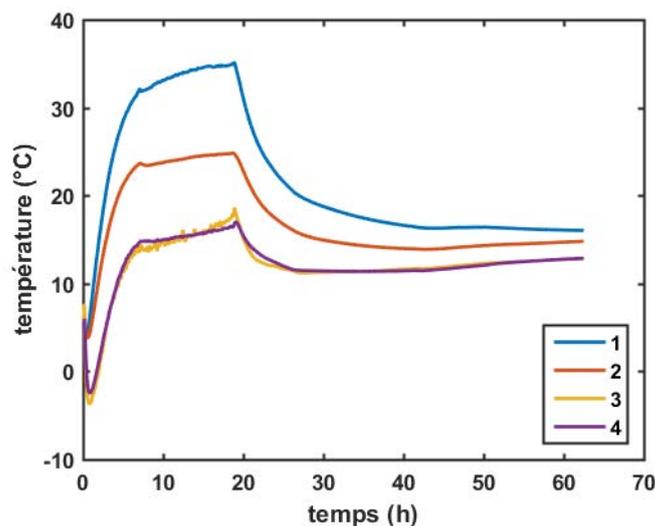


FIGURE 2.28 – Évolution de la température au niveau des joints de la porte.

Températures sur les surfaces du chargement : En observant les résultats des mesures prises sur la surface du chargement présentés sur la figure 2.29, on peut remarquer que l'influence de l'ensoleillement se fait ressentir par une augmentation globale des températures.

Toutefois, là où l'on pouvait s'attendre à de grandes différences selon l'éclairement des faces (notamment une face gauche en ensoleillement direct), on constate que la présence des MCP est efficace pour absorber l'énergie correspondante et atténuer grandement les dissymétries. On peut alors faire les mêmes observations que dans le cas sans ensoleillement, c'est à dire la présence d'une stratification des températures, particulièrement marquée à l'arrière, et des résultats relativement homogènes à l'avant. Là encore, bien que l'avant et l'arrière de la caisse ne soient pas directement protégés par des MCP, les températures enregistrées sont moindres que celles auxquelles on aurait pu s'attendre, étant donné les résultats observés sur les faces externes.

Conclusion : L'effet de l'ensoleillement est radical sur les températures mesurées sur la surface externe de la caisse. En effet, les températures sont alors bien plus élevées que dans le cas sans ensoleillement et l'augmentation est d'autant plus forte que la puissance solaire est élevée. Cela a pour conséquence de créer de fortes disparités et de faire perdre à la caisse la relation de symétrie qu'elle avait entre ses faces latérales. Pourtant, plus on pénètre au sein de la caisse plus cette dissymétrie s'efface, jusqu'à ce que l'on puisse faire de nouveau les mêmes observations que dans le cas sans ensoleillement (avec toutefois des températures nettement plus élevées). Cela permet entre autre de confirmer l'importance de la présence des MCP dans l'absorption de l'énergie thermique venue de l'extérieur.

2.3 Conclusion

Les différentes campagnes expérimentales ont permis d'une part de caractériser la perméabilité de deux types de caisses (la XXL et la SB24) et d'autre part de mieux comprendre la manière dont la température évoluait au sein de l'une d'elle.

La mesure de perméabilité a permis de tester différentes configurations de caisses et de les comparer les unes aux autres de manière simple et quantifiable. Ainsi on a pu mettre en évidence que le passage d'une fermeture à sangle à une fermeture avec un système de verrous augmente sensiblement la perméabilité de la caisse. A contrario, modifier les dimensions du joint de fermeture de la porte permet d'en améliorer l'étanchéité.

Les tests thermiques ont permis d'observer notamment une certaine stratification des températures au sein de la caisse. De plus des effets de contact et de conduction rendent certains points de la caisse plus ou moins sujets aux variations de températures extérieures. De manière générale le bas de la caisse est plus froid que le haut, mais on peut noter que la présence d'un volume d'air suffisamment épais à l'avant permet une meilleure homogénéisation des températures, comparativement à l'arrière où l'air est trop confiné et les températures nettement stratifiées.

La présence d'ensoleillement s'avère critique pour les caisses de transport. En effet, la température augmente significativement, particulièrement sur les surfaces les plus exposées, et peut gagner plus d'une dizaine de degrés par rapport à un cas sans ensoleillement. Toutefois, si les températures sont nettement plus élevées en présence d'ensoleillement, il apparaît que les matériaux à changement de phase constituent une protection efficace qui permet de nettement atténuer les effets des variations de températures, et notamment la dissymétrie engendrée par le fait que le soleil ne peut éclairer toutes les faces d'un objet en même temps.

Bibliographie

- [1] P.R. Rozak, B.P. Weegman, E.S. Avgoustiniatos, J.R. Wilson, D.P. Welch, B.J. Hering, and K.K. Papas. Devices and methods for maintenance of temperature and pressure during islet shipment. *T. Proceedings*, 40 :407–410, 2008.

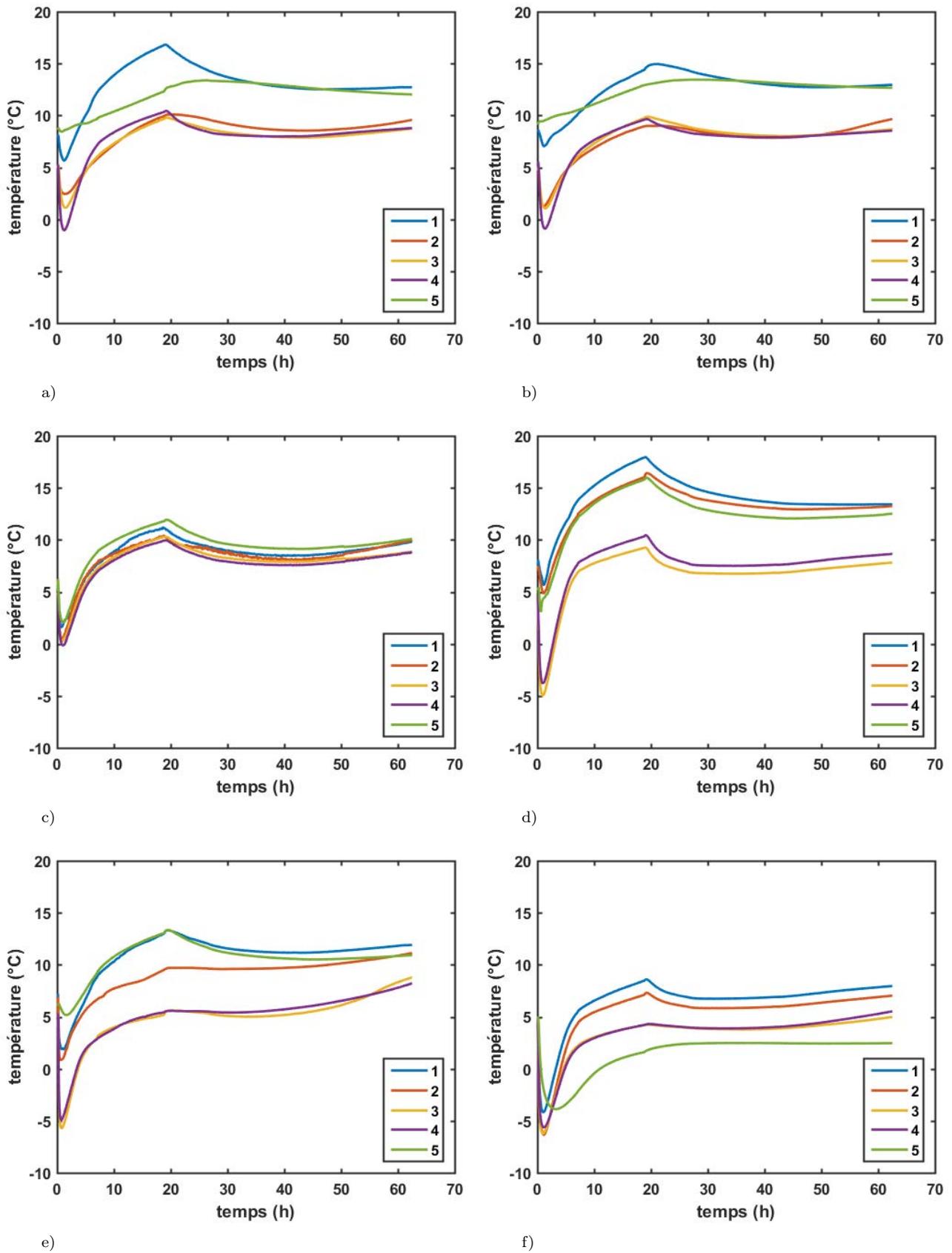


FIGURE 2.29 – Évolution de la température sur la surface du chargement.

- [2] C.A. Roulet and L. Vandaele. Technical note 34 : Air flow patterns within buildings : Measurements techniques. *Coventry : Air Infiltration and Ventilation Center*, page 298, 1991.
- [3] R. Carrié, R. Jobert, M. Fournier, and S. Berthault. Perméabilité à l'air des bâtiments : généralités et sensibilisation. *CETE de Lyon*, 2006.

CHAPITRE 3

MODÉLISATION

Sommaire

3.1	Élaboration d'un modèle simplifié pour la simulation des transferts de chaleur dans un emballage	63
3.1.1	Transferts dans les parois	64
3.1.2	Transferts dans les matériaux à changement de phase	68
3.1.3	Transferts dans le volume d'air	73
3.1.4	Transferts dans le chargement	75
3.1.5	Architecture du code	76
3.2	Modélisation de la convection à l'intérieur de l'emballage en utilisant un code CFD	78
3.2.1	Mise en équation et méthodes de résolutions	78
3.2.2	Application au cas du volume d'air intérieur d'un emballage thermique	82
3.2.3	Résultats	83
3.3	Conclusion	87
	Bibliographie	87

Dans ce chapitre est décrit le modèle simplifié développé pour la simulation du transport des emballages thermiques. Les différents bilan entrant en jeu sont explicités ainsi que l'architecture du code. Dans une deuxième partie, une simulation CFD du volume d'air intérieur d'un emballage a été effectué afin d'observer les mouvements de convection naturelle présents à l'intérieur de l'emballage.

3.1 Élaboration d'un modèle simplifié pour la simulation des transferts de chaleur dans un emballage

La technique de modélisation à laquelle on a recours est la méthode nodale, notamment décrite par Saulnier et Alexandre [1]. Le principe de cette méthode consiste à décomposer le système que l'on cherche à modéliser en sous-système qui constitueront autant de nœuds. Chaque nœud est caractérisé par sa géométrie (longueurs, surfaces, volumes...), ses propriétés thermophysiques (masse volumique, chaleur spécifique...) et son état (température, pression...). Ces nœuds interagissent entre eux en échangeant de la matière et/ou de l'énergie, et ces échanges sont exprimés mathématiquement sous forme d'équations de bilans. Le système mathématique obtenu est ensuite résolu à l'aide d'un logiciel de calcul.

La caisse est ici modélisée comme une enceinte cubique dont chaque face est identifiée par un nombre (fig. 3.1). A chacune des faces est ensuite associé un ensemble de nœuds, dont le nombre varie en fonction de l'épaisseur des différents constituants de chacune des faces.

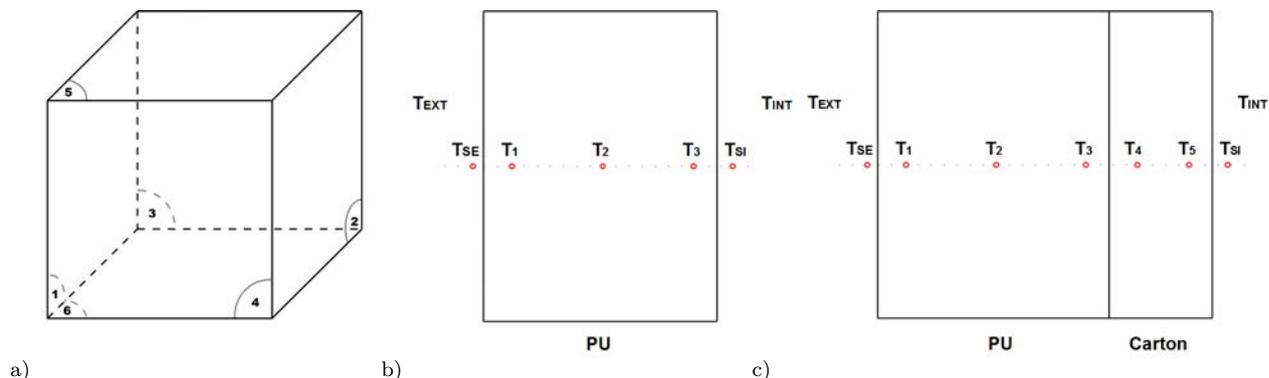


FIGURE 3.1 – (a) Schématisation extérieure de la caisse et numérotation associée à ses faces, (b) exemple de nœuds associés aux épaisseurs des faces latérales et de la porte, (c) exemple de nœuds associés à l'épaisseur du plafond.

3.1.1 Transferts dans les parois

Les transferts dans les parois peuvent se décomposer en deux parties : d'une part les bilans thermiques sur les surfaces (extérieures et intérieures) et d'autre part le bilan conductif au sein du matériau.

3.1.1.1 Bilans surfaciques

Le bilan sur les surfaces s'exprime comme la somme des flux appliqués aux surfaces, cette dernière étant nulle. Les différents flux sont : le flux conductif entre la surface et le nœud de paroi le plus proche de la surface, le flux convectif entre la surface et l'air extérieur, et le flux de rayonnement :

$$\phi_{\text{cond}_j} + \phi_{\text{conv}_j} + \phi_{\text{ray}_j} = 0 \quad ; \quad \text{pour } j=1 \dots 6 \quad (3.1)$$

j identifiant la face de la caisse sur laquelle on réalise le bilan.

Flux conductif : il est exprimable d'après la loi du Fourier, le reliant au gradient de température en un point. Dans le cas d'un transfert monodimensionnel, selon la direction x et en supposant la conductivité λ indépendante de la température T on écrit :

$$\phi_{\text{cond}} = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \quad (3.2)$$

Le flux conductif à la surface correspond aux transferts thermiques entre la surface et le matériau constituant la paroi. Il est calculé par rapport nœud le plus proche de la surface ($i = 1$ pour la surface extérieure et $i = n_{\text{paroi}}$ pour la surface intérieure, où n_{paroi} correspond au nombre de nœuds dans une épaisseur de paroi). En ayant recours à la méthode des différences finies en espace on obtient alors, pour les surfaces extérieures :

$$\phi_{\text{cond Ext}_j} = \frac{2\lambda_{j,1}}{\Delta x_{j,1}} (T_{j,1} - T_{\text{SE},j}) \quad (3.3)$$

et pour les surfaces intérieures :

$$\phi_{\text{cond Int}_j} = \frac{2\lambda_{j,n_{\text{paroi}}}}{\Delta x_{j,n_{\text{paroi}}}} (T_{j,n_{\text{paroi}}} - T_{\text{SI},j}) \quad (3.4)$$

Flux convectif : il est exprimé à l'aide de la formule de Newton, tel que :

$$\phi_{\text{conv}} = h(T_{\text{air}} - T_{\text{S}}) \quad (3.5)$$

où h est le coefficient d'échange convectif (en $\text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}$). Ce coefficient est déterminé par la nature de l'écoulement du fluide le long des parois, on distingue la convection naturelle de la convection forcée. Dans les deux cas, des relations ont été déterminées à partir de résultats expérimentaux ou numériques de manière à pouvoir exprimer la valeur du coefficient d'échange convectif à partir de divers nombres adimensionnels [2].

Ainsi, dans le cas d'une plaque plane de longueur L et de température uniforme, soumise à un écoulement turbulent le coefficient d'échange convectif peut être exprimé comme :

$$h = 0.0296 \frac{\lambda}{L} Re^{4/5} Pr^{1/3} \quad (3.6)$$

où $Re = Lu/\nu$ (u la vitesse du fluide et ν sa viscosité cinématique) est le nombre de Reynolds et $Pr = \nu/\alpha$ (α la diffusivité thermique du fluide) le nombre de Prandtl, généralement évalué à 0.75 pour un gaz.

Dans le cas de la convection naturelle dans une enceinte de longueur L et de largeur δ , le coefficient peut s'exprimer comme :

$$h = \frac{\lambda}{\delta} 0.046 Ra^{1/3} \quad (3.7)$$

avec $Ra = \beta g(T_{\text{S1}} - T_{\text{S2}})\delta^3/\nu\alpha$ le nombre de Rayleigh.

Eyglument [3] donne aussi quelques relations pour la détermination des coefficients de convection. Dans le cas d'une plaque verticale de hauteur H supérieure à 30 cm on a ainsi :

$$h = 1.78 \Delta T^{1/2} \quad (3.8)$$

Pour une plaque horizontale de longueur L échangeant de la chaleur par le haut :

$$h = 1.32 \left(\frac{\Delta T}{L} \right)^{1/4} \quad (3.9)$$

Ou encore pour une plaque horizontale de longueur L échangeant de la chaleur par le bas :

$$0.66 \left(\frac{\Delta T}{L} \right)^{1/4} \quad (3.10)$$

Le plus couramment, pour de la convection naturelle, les valeurs du coefficient de convection sont comprises entre 1 et $10 \text{ W m}^{-2} \text{K}^{-1}$.

Flux de rayonnement : le flux net rayonné par la surface j d'un corps noir s'exprime comme la différence entre le flux émis et le flux absorbé, soit :

$$\phi_{j\text{net}} = \epsilon_j M_j^0 - \alpha_j E_j \quad (3.11)$$

où ϵ et α correspondent respectivement au coefficient d'émissivité et au coefficient d'absorption du matériau.

On considère deux sources principales de rayonnement, que l'on peut différencier par la gamme de longueur d'onde à laquelle elles appartiennent : le rayonnement solaire, correspondant à de courtes longueurs d'ondes ($\leq 2.5 \mu\text{m}$) et le rayonnement induit par la différence de température entre plusieurs surfaces, correspondant à de grandes longueurs d'ondes ($> 2.5 \mu\text{m}$).

Le rayonnement solaire est directement dépendant des données météorologiques, et il a deux composantes : le rayonnement direct, directionnel et orienté, et le rayonnement diffus, supposé isotrope.

D'après Lefebvre [4], la densité de flux direct incident peut être évaluée telle que :

$$\phi_{\text{dir}} = \phi_{\perp} \Omega \quad (3.12)$$

où ϕ_{\perp} est la densité de flux direct sur le plan perpendiculaire aux rayons. Ω est l'angle d'indice du rayonnement sur le plan mesuré par rapport à la normal, il s'exprime en fonction de la hauteur h_{sol} et de l'azimut z_{sol} du soleil d'une part, et de l'inclinaison θ et de l'orientation ψ du plan récepteur d'autre part :

$$\Omega = \cos \theta \cos \psi \cos h_{\text{sol}} \cos z_{\text{sol}} + \cos \theta \sin \psi \cos h_{\text{sol}} \sin z_{\text{sol}} + \sin \theta \sin h_{\text{sol}} \quad (3.13)$$

La densité de flux diffus incident est la somme du flux diffus tombant directement sur la surface considérée et de celui provenant de la réflexion des flux direct et diffus par le sol (supposé plan et horizontal) :

$$\phi_{\text{dif}} = \frac{1 + \sin \theta}{2} \phi_{\text{U}} + a \frac{1 - \sin \theta}{2} (\phi_{\perp} \sin h + \phi_{\text{U}}) \quad (3.14)$$

avec ϕ_{U} la densité de flux diffus sur le plan horizontal et a le facteur de réflexion du sol ($a = 0$ pour la terre, $a = 0.2$ pour l'herbe, $a = 0.5$ pour la neige).

Comme le système que l'on cherche à modéliser est un système fermé composé de parois opaques, le rayonnement solaire n'intervient que dans le bilan sur les faces extérieures.

Le rayonnement aux grandes longueurs d'ondes correspond au flux de rayonnement échangé entre deux surfaces de températures différentes. Le flux émis par une surface S_1 et arrivant sur une surface S_2 est exprimé par la relation :

$$S_2 \phi_{12} = S_1 F_{12} M_1^0 \quad (3.15)$$

où F_{12} est le facteur de forme, décrivant la proportion de flux total émis par S_1 et arrivant sur S_2 .

Ainsi, l'éclairement reçu par une surface correspondra à la somme des flux transmis par l'ensemble des autres faces du système par émission et par réflexion :

$$S_i E_{i\text{GLO}} = \sum_j S_j F_{ij} (\epsilon_j M_j^0 + \rho E_{j\text{GLO}}) \quad (3.16)$$

Par linéarisation de l'expression obtenue, il est alors possible d'écrire le flux net tel que :

$$\phi_{inet} = \sum_j F_{ij} hr_{ij} (T_{S_i} - T_{S_j}) \quad (3.17)$$

avec $hr_{ij} = \sigma_0 (T_{S_i}^2 + T_{S_j}^2) (T_{S_i} + T_{S_j})$ dont la valeur est généralement supposée constante et égale à $5 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$.

Les facteurs de forme peuvent être calculés selon plusieurs méthodes, on peut citer la méthode de Monte-Carlo, ou la méthode d'Ondracek. Mais elles nécessitent des calculs coûteux en ressource, et on a plus généralement recours à des formules et des abaques. Howell *et al.* [5] ont compilé un certain nombre de formules permettant de déterminer les facteurs de formes correspondant à différents types de situations.

Les échanges radiatifs en grandes longueurs d'ondes à l'extérieurs se font quant à eux avec le sol et avec la voûte celeste, que l'on peut exprimer comme :

$$\phi_{GLO} = hr \left(\frac{1 + \cos \theta}{2} \right) (T_{ciel} - T_{SE_j}) + hr \left(\frac{1 - \cos \theta}{2} \right) (T_{sol} - T_{SE_j}) \quad (3.18)$$

Ainsi, l'ensemble des bilans sur les surfaces permet d'aboutir à un système matriciel de la forme :

$$[A_{SE}] \{T\} = \{U_{SE}\} \quad (3.19)$$

pour les surfaces extérieures, et :

$$[A_{SI}] \{T\} = \{0\} \quad (3.20)$$

pour les surfaces intérieures.

3.1.1.2 Bilan conductif

Sur un élément solide, sans production d'énergie interne, l'équation générale de la chaleur en une dimension s'écrit :

$$mc_p \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \frac{d^2 T}{dx^2} \quad (3.21)$$

Ce qui nous donne, pour $i = 1 \dots n_j$ et $j = 1 \dots 6$:

$$\rho_{j,i} c_{p_{j,i}} \Delta x_{j,i} \frac{\partial T_{j,i}}{\partial t} = \frac{T_{j,i-1} - T_{j,i}}{\frac{\Delta x_{j,i-1}}{2\lambda_{j,i-1}} + \frac{\Delta x_{j,i}}{2\lambda_{j,i}}} - \frac{T_{j,i} - T_{j,i+1}}{\frac{\Delta x_{j,i}}{2\lambda_{j,i}} + \frac{\Delta x_{j,i+1}}{2\lambda_{j,i+1}}} \quad (3.22)$$

avec $T_{j,0} = T_{SE,j}$ et $T_{j,n_j+1} = T_{SI,j}$.

Afin de s'affranchir de la dérivation temporelle, on choisit d'avoir recours à un schéma aux différences finies. Il existe plusieurs types de schémas (explicite, implicite, Crank-Nicholson...), un schéma implicite offre l'avantage d'être non-conditionnellement stable (contrairement à un schéma explicite), c'est donc celui que l'on va choisir. L'équation précédente devient alors :

$$\rho_{j,i} c_{p_{j,i}} \Delta x_{j,i} \frac{T_{j,i}^{n+1} - T_{j,i}^n}{dt} = \frac{T_{j,i-1}^{n+1} - T_{j,i}^{n+1}}{\frac{\Delta x_{j,i-1}}{2\lambda_{j,i-1}} + \frac{\Delta x_{j,i}}{2\lambda_{j,i}}} - \frac{T_{j,i}^{n+1} - T_{j,i+1}^{n+1}}{\frac{\Delta x_{j,i}}{2\lambda_{j,i}} + \frac{\Delta x_{j,i+1}}{2\lambda_{j,i+1}}} \quad (3.23)$$

que l'on peut encore écrire :

$$\left(\frac{\rho_{j,i} c_{p,j,i} \Delta x_{j,i}}{dt} + \frac{1}{\frac{\Delta x_{j,i-1}}{2\lambda_{j,i-1}} + \frac{\Delta x_{j,i}}{2\lambda_{j,i}}} + \frac{1}{\frac{\Delta x_{j,i}}{2\lambda_{j,i}} + \frac{\Delta x_{j,i+1}}{2\lambda_{j,i+1}}} \right) T_{j,i}^{n+1} - \frac{1}{\frac{\Delta x_{j,i-1}}{2\lambda_{j,i-1}} + \frac{\Delta x_{j,i}}{2\lambda_{j,i}}} T_{j,i-1}^{n+1} - \dots \quad (3.24)$$

$$\dots - \frac{1}{\frac{\Delta x_{j,i}}{2\lambda_{j,i}} + \frac{\Delta x_{j,i+1}}{2\lambda_{j,i+1}}} T_{j,i+1}^{n+1} = \frac{\rho_{j,i} c_{p,j,i} \Delta x_{j,i}}{dt} T_{j,i}^n$$

Ainsi, à chaque pas de temps, on cherchera à calculer les T_j^{n+1} en fonction des T_j^n qui ont été calculés au pas de temps précédent et peuvent donc être assimilés à des températures initiales pour chaque pas de temps. On peut alors écrire une équation matricielle de la forme :

$$[A_{\text{cond}}]\{T\} = [B_{\text{cond}}]\{T_{\text{init}}\} \quad (3.25)$$

3.1.2 Transferts dans les matériaux à changement de phase

Il existe plusieurs approches permettant de traiter le changement de phase d'un matériau.

3.1.2.1 Modèle enthalpique

Ce modèle est basé sur une formulation enthalpique de l'équation de la chaleur, il a été décrit notamment par Hunter et Kuttler [6], Binet et Lacroix [7] ou encore Lamberg et Sirén [8]. Le système que l'on va chercher à modéliser consiste en un bloc de matériau à changement de phase (assimilé à de l'eau), en contact avec de l'air sur deux de ses surfaces, les surfaces constituant le contour du bloc sont adiabatiques. Ce bloc est alors découpé en volumes de contrôle, on associe à chacun d'eux une température, une densité, une capacité et un coefficient de conduction. Les nœuds du modèle sont associés aux surfaces extérieures et au centre de chaque volume de contrôle.

Afin de simplifier le problème, il est utile de considérer un certain nombre d'hypothèses :

- les transferts thermiques sont considérés monodimensionnels dans l'épaisseur du bloc de MCP,
- les propriétés thermophysiques sont indépendantes de la température mais peuvent être différentes selon la phase du matériau,
- la convection à l'intérieur du fluide est négligeable,
- le MCP est de l'eau pure, homogène et isotrope,
- on néglige la variation volumétrique du MCP avec la température,
- on néglige les effets de surfusion ou de sous-refroidissement,
- le changement de phase intervient à la température T_{fusion} et la température du MCP demeure constante et égale à T_{fusion} jusqu'à ce qu'il ait complètement changé de phase.

A partir de ces hypothèses et simplifications, le bloc de MCP peut alors être réduit à un système tel que schématisé sur la figure 3.2.

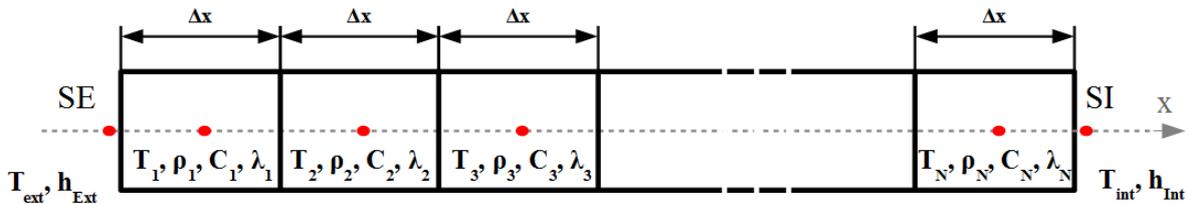


FIGURE 3.2 – Schématisation du système modélisé.

Les équations régissant les bilans sur les surfaces sont les mêmes que celles intervenant dans le modèle de la caisse. L'équation de la chaleur en une dimension et sans terme convectif s'écrit pour chaque nœud du MCP à l'état monophasique :

$$\rho_i C_{pi} \frac{\partial T_i}{\partial t} = \nabla(\lambda_i \nabla T_i) \quad (3.26)$$

Pour prendre en compte le changement de phase, l'approche consiste alors à écrire l'équation générale de la chaleur sous forme enthalpique :

$$\rho_i \frac{\partial H_i}{\partial t} = \nabla(\lambda_i \nabla T_i) \quad (3.27)$$

L'enthalpie H peut être décomposée en une partie sensible et une partie liée à la chaleur latente comme suit :

$$H = h_s + L_h f_l \quad (3.28)$$

où h_s est l'enthalpie sensible et f_l correspond à la fraction liquide du MCP que l'on définit comme :

$$f_l(T) = \begin{cases} 1 & \forall T > T_{\text{fusion}} \\ 0 & \forall T < T_{\text{fusion}} \end{cases} \quad (3.29)$$

Avec cette écriture de l'enthalpie, l'équation 3.27 devient :

$$\rho_i \frac{\partial h_{si}}{\partial t} + \rho_i L_{hi} \frac{\partial f_{li}}{\partial t} = \nabla(\lambda_i \nabla T_i) \quad (3.30)$$

Si à présent on considère un volume de contrôle en particulier, le MCP compris dans ce volume peut être pleinement solide, pleinement liquide ou en situation de changement de phase. Dans le cas où le MCP est soit pleinement solide soit pleinement liquide on a :

$$\rho_i \frac{\partial h_{si}}{\partial t} = \rho_i C_{pi} \frac{\partial T_i}{\partial t} \quad \text{et} \quad \frac{\partial f_{li}}{\partial t} = 0 \quad (3.31)$$

En combinant alors 3.30 et 3.31 on obtient :

$$\rho_i C_{pi} \frac{\partial T_i}{\partial t} = \nabla(\lambda_i \nabla T_i) \quad (3.32)$$

qui correspond à l'équation de la chaleur.

En revanche, dans le cas où le MCP change de phase, puisque l'on a supposé un changement de phase isotherme, on a $T_i = T_{\text{fusion}}$, d'où :

$$\frac{\partial h_{si}}{\partial t} = 0 \quad (3.33)$$

et donc 3.30 devient :

$$\rho_i L_{hi} \frac{\partial f_{li}}{\partial t} = \nabla(\lambda_i \nabla T_i) \quad (3.34)$$

En fonction de l'état du fluide dans le volume de contrôle considéré, c'est l'une ou l'autre des équations 3.32 et 3.34 qui sera utilisée. Ce sont aussi deux types de nœuds qu'il faut tester : ceux pour lesquels le changement de phase est susceptible de démarrer, et ceux pour lesquels il est susceptible de se terminer. Initialement le MCP est supposé pleinement solide ou pleinement liquide, et le changement de phase ne peut être initié qu'aux bords du bloc de MCP. A ce stade les nœuds pour lesquels le changement de phase est susceptible de démarrer sont donc le premier nœud du MCP ou le dernier. Ainsi ils sont soumis à l'issue de chaque pas de temps à un test que l'on peut traduire comme suit :

Pour le nœud i au temps t .

- Si $T_i(t) \geq T_f$ et $T_i(t - \Delta t) < T_f$ alors la fusion démarre au nœud i .
- Si $T_i(t) \leq T_f$ et $T_i(t - \Delta t) > T_f$ alors la solidification démarre au nœud i .
- Sinon il n'y a pas de démarrage d'un changement de phase au nœud i .

Si, suite à ce test, le changement de phase démarre au nœud i , alors à l'itération suivante le test d'initiation du changement de phase sera étendu au nœud $i + 1$, tandis que le nœud i sera lui soumis à un autre test dans le but de déterminer si le changement de phase se termine ou non, qui se traduit comme suit :

Pour le nœud i au temps t .

- Si $f_{li}(t) \geq 1$ et $f_{li}(t - \Delta t) < 1$ alors la fusion se termine.
- Si $f_{li}(t) \leq 1$ et $f_{li}(t - \Delta t) > 1$ alors la solidification se termine.
- Sinon le changement de phase ne se termine pas.

Ainsi, dans le système d'équations, pour certains nœuds il s'agit de calculer la température, tandis que pour d'autres nœuds cette température est fixée et c'est la valeur de la fraction liquide qui est calculée. Une solution pour résoudre ce genre de système consiste à le scinder en plusieurs sous-systèmes en assimilant les températures constantes des nœuds soumis au changement de phase à des conditions aux limites. Une fois le champ de températures déterminé, on peut alors calculer la fraction liquide pour les nœuds concernés.

Le déroulement du programme est explicité à l'aide du logigramme présenté sur la figure 3.3.

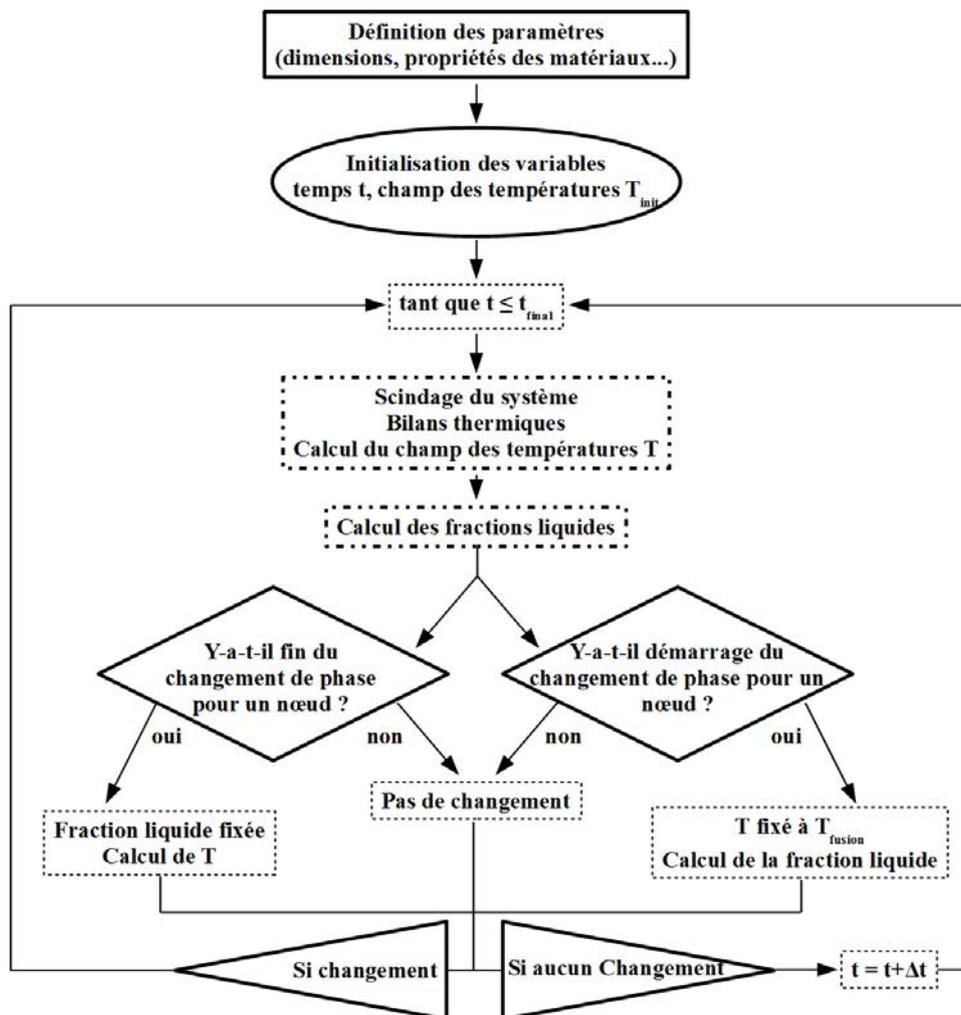


FIGURE 3.3 – Schéma de principe du modèle enthalpique

3.1.2.2 Modèle capacitif

Le principe du modèle capacitif est de considérer l'équation de la chaleur (eq. 3.26) valable à tout moment du changement de phase, mais de faire varier la capacité calorifique du MCP avec la température. Il a été notamment décrit par Lamberg *et al.* [9] et Lamberg [10]. En réalité la capacité varie peu lorsque le MCP est à l'état solide ou à l'état liquide, mais augmente fortement lors du changement de phase. Les hypothèses que l'on formule sont sensiblement les mêmes que pour le modèle enthalpique, à ceci près que l'on considère cette fois que le changement de phase intervient dans un intervalle de température compris entre la température de début de fusion (T_{solidus}) et la température de fin de fusion (T_{liquidus}) et que la température du MCP ne cesse d'évoluer.

Dans ces conditions, il est possible d'écrire la capacité calorifique comme une fonction continue par morceaux de la forme :

$$C_p = \begin{cases} C_p \text{ solide} & \forall T < T_{\text{solidus}} \\ \frac{L_h}{(T_{\text{liquidus}} - T_{\text{solidus}})} + C_p & \forall T_{\text{solidus}} \leq T \leq T_{\text{liquidus}} \\ C_p \text{ liquide} & \forall T > T_{\text{liquidus}} \end{cases} \quad (3.35)$$

De cette manière on s'affranchi de la dépendance en température de la capacité sur des intervalles de température définis, ce qui permet de simplifier les calculs.

Le système d'équations à résoudre est donc fondamentalement le même que pour le modèle de la caisse, avec les bilans surfaciques, de volume d'air et conductif exprimés en un système matriciel, toujours de la forme $[A]\{T\} = [B]\{T_{\text{init}}\} + \{U\}$. Le travail consiste ici à identifier le (ou les) nœud(s) sur le(s)quel(s) s'effectue le changement de phase, et de modifier les valeurs de la capacité en conséquence.

Pour ce faire, il faut identifier les nœuds sur lesquels le changement de phase est susceptible d'intervenir, et les soumettre à un test pour déterminer s'il intervient ou non. On considère pour cela qu'à l'état initial le MCP est soit pleinement solide, soit pleinement liquide et que le changement ne peut pas intervenir au cœur du MCP mais est initié aux bords, constituant un front de changement de phase, qui se propage ensuite vers le cœur. Au démarrage des calculs, ce sont donc uniquement les nœuds extrêmes (le premier et le dernier) qui seront testés. Si le test est négatif (il n'y a pas de changement de phase), on passe au pas de temps suivant, si il est positif (il y a changement de phase) alors il faut d'une part changer les valeurs de capacité pour ce nœud, mais aussi étendre le test au nœud suivant pour suivre le déplacement éventuel du front de changement de phase, avant de réitérer le calcul sur ce même pas de temps.

Le test auquel on soumet les nœuds du MCP, consiste dans un premier temps à déterminer l'état du MCP en fonction de sa température. Ainsi pour le nœud i au temps t :

- Si $T_i(t) < T_{\text{solidus}}$ alors il est à l'état solide.
- Si $T_i(t) > T_{\text{liquidus}}$ alors il est à l'état liquide.
- Si $T_{\text{solidus}} \leq T_i(t) \leq T_{\text{liquidus}}$ alors il est à l'état de transition.

A chaque pas de temps on détermine alors l'état de chaque nœud du MCP à partir du profil de température que l'on a calculé, et on peut ensuite comparer cet état à celui du pas de temps précédent.

Le déroulement du programme est explicité à l'aide du logigramme présenté sur la figure 3.4.

3.1.2.3 Modèle à capacité calorifique effective

Leonhardt et Müller [11] proposent quant à eux d'avoir recours à une fonction continue pour l'approximation de la chaleur spécifique. Pour ce faire on observe que par définition la chaleur spécifique s'écrit :

$$c_p = \frac{1}{m} \left(\frac{\partial H}{\partial T} \right)_p = \frac{\partial h}{\partial T} \quad (3.36)$$

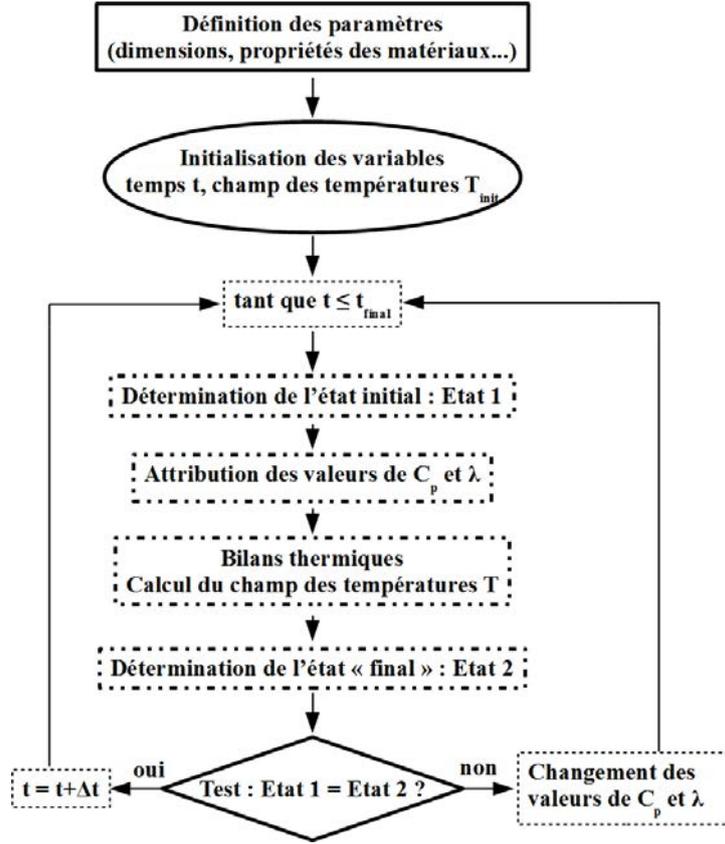


FIGURE 3.4 – Schéma de principe du modèle capacitif.

avec H et h respectivement l'enthalpie et l'enthalpie massique.

Par ailleurs, l'enthalpie peut se décomposer en un terme d'enthalpie sensible h_s et un terme associé à la chaleur latente L_h :

$$h = h_s + L_h f_l \quad (3.37)$$

avec f_l la fraction de liquide dans le volume considéré. Cette fraction liquide a la forme d'une fonction échelon nulle lorsque $T < T_{\text{fusion}}$ et égale à 1 lorsque $T > T_{\text{fusion}}$. Une telle fonction peut s'écrire à l'aide d'une arctangente de la manière suivante :

$$f_l = \frac{\arctan((T - T_{\text{fusion}})r_t)}{\pi} + \frac{1}{2} \quad (3.38)$$

avec r_t le rayon de transition permettant de jouer sur la « raideur » de l'échelon.

De plus on peut exprimer l'enthalpie sensible comme :

$$h_s = h_{\text{ref}} + c_p(T - T_{\text{ref}}) \quad (3.39)$$

Par conséquent la chaleur spécifique effective devient :

$$c_{\text{eff}} = \frac{\partial h}{\partial T} = c_p + \frac{L_h r_t}{\pi[1 + ((T - T_{\text{fusion}})r_t)^2]} \quad (3.40)$$

In fine cette forme de chaleur spécifique est injectée dans l'équation générale de la chaleur (ici sans terme de convection ni production d'énergie interne) :

$$\rho c_{\text{eff}} \frac{\partial T}{\partial t} = \rho \left[c_p + \frac{L_h r_t}{\pi[1 + ((T - T_{\text{fusion}})r_t)^2]} \right] \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla(\lambda \nabla T) \quad (3.41)$$

T_{fusion}	29.9	° C
L_h	187	kJ kg ⁻¹
ρ_{solide}	1710	kg m ⁻³
ρ_{liquide}	1530	kg m ⁻³
c_{solide}	1400	J kg ⁻¹ K ⁻¹
c_{liquide}	2200	J kg ⁻¹ K ⁻¹
λ_{solide}	1.09	W m ⁻¹ K ⁻¹
λ_{liquide}	0.53	W m ⁻¹ K ⁻¹

TABLE 3.1 – Propriétés thermophysiques du CaCl₂·6H₂O.

Il convient cependant d'ajouter que les valeurs de la conductivité thermique, de la chaleur spécifique et de la masse volumique sont susceptibles de changer en fonction de la température. Si généralement on peut supposer ces variations négligeables, ça n'est plus le cas lors d'un changement de phase. On peut cependant associer à chaque phase une valeur, et approximer une valeur lors du changement de phase en fonction de la proportion de chaque phase présente dans le volume considéré, ainsi pour une grandeur A on a :

$$A = A_{\text{solide}}f_s + A_{\text{liquide}}f_l = A_{\text{solide}}(1 - f_l) + A_{\text{liquide}}f_l = A_{\text{solide}} + (A_{\text{liquide}} - A_{\text{solide}})f_l \quad (3.42)$$

A ce stade on observe que les équations considérées sont fortement non linéaires. De ce fait et afin de simplifier la résolution du système, il a été décidé d'avoir recours à l'un des solveurs proposés par MatLab, *ode15i* qui permet la résolution de systèmes d'équations de la forme :

$$F(t, y, \frac{dy}{dt}) = 0 \quad (3.43)$$

Sur la figure 3.5 sont tracés les résultats d'une expérience réalisée par Zivkovic et Fujii [12] et ceux issus de notre modèle. Les propriétés thermophysiques du matériau utilisé (chlorure de calcium hexahydraté) sont résumé dans la table 3.1. Le bloc de MCP est de dimension $0.1 \times 0.1 \times 0.02$ m³, isolé sur les bords de manière à ce que le changement de phase se déroule dans l'épaisseur, et a été placé dans un bain à température fixée à 60 °C. Les différences observées peuvent être attribuées à la difficulté d'estimer le coefficient d'échange convectif. En dehors de cela les résultats semblent cohérent et le modèle adapté.

3.1.3 Transferts dans le volume d'air

L'enveloppe de la caisse est considérée comme un système ouvert. Le premier principe de la thermodynamique appliqué aux systèmes ouverts nous permet d'écrire la variation d'énergie interne dans le volume d'air intérieur :

$$\frac{dU}{dt} = \frac{\delta Q}{dt} + \frac{\delta W_e}{dt} + \sum_i \dot{m}_i h_i \quad (3.44)$$

Le corps de la caisse étant rigide, on suppose qu'il n'y a pas de déformation et donc pas de variation de volume intérieur, par conséquent le travail des forces extérieures est nul. Le transfert de masse à travers l'enveloppe a pour moteur la différence de pression entre l'intérieur et l'extérieur, considérant que la pression extérieure s'applique également sur tout le pourtour de la caisse alors le débit ne peut être que entrant ou sortant et entraîne une variation de masse du système. Dans ces conditions l'équation 3.44 devient :

$$\frac{dU}{dt} = \frac{\delta Q}{dt} + h_{\text{air}} \frac{dm}{dt} \quad (3.45)$$

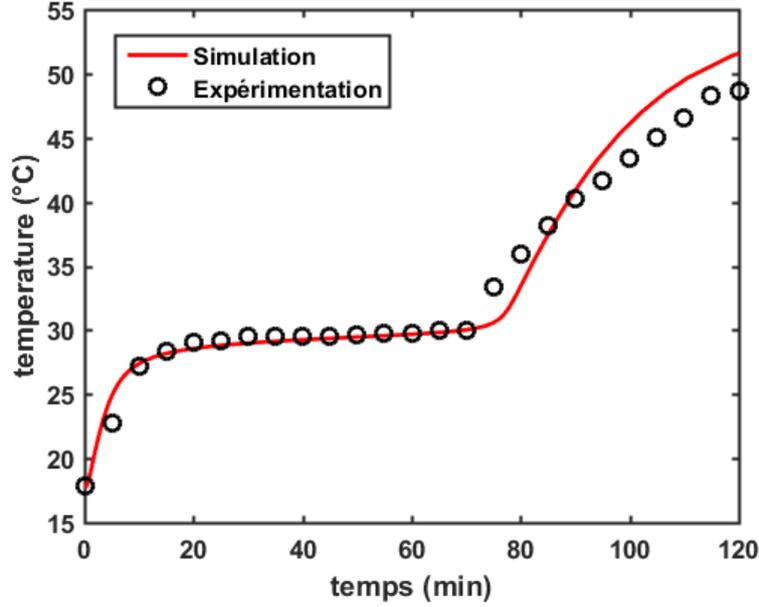


FIGURE 3.5 – Evolution de la température au centre du bloc de MCP.

avec h_{air} l'enthalpie de la masse d'air « voyageant » à travers l'enveloppe et $\frac{dm}{dt}$ le débit de masse associé. La masse du système variant avec le temps, il convient de la prendre en compte dans l'écriture des équations :

$$\frac{dU}{dt} = \frac{d(mu)}{dt} = m \frac{du}{dt} + u \frac{dm}{dt} \quad (3.46)$$

On peut écrire l'enthalpie comme $h = u + rT$ et l'énergie interne massique comme $u = u_{\text{ref}} + c_v(T - T_{\text{ref}})$. On obtient alors :

$$mc_v \frac{dT}{dt} + (u_{\text{ref}} + c_v(T - T_{\text{ref}})) \frac{dm}{dt} = \frac{\delta Q}{dt} + (u_{\text{ref}} + c_v(T_{\text{air}} - T_{\text{ref}}) + rT_{\text{air}}) \frac{dm}{dt} \quad (3.47)$$

On distingue alors deux cas de figure : soit la pression extérieure est inférieure à la pression intérieure, et dans ce cas c'est l'air de l'intérieur de la caisse qui en sort, soit la pression extérieure est supérieure à la pression intérieure et alors l'air extérieur pénètre dans la caisse :

$$mc_v \frac{dT}{dt} = \begin{cases} \frac{\delta Q}{dt} + rT \frac{dm}{dt} & \text{si } P_{\text{ext}} < P_{\text{int}} \\ \frac{\delta Q}{dt} & \text{si } P_{\text{ext}} = P_{\text{int}} \\ \frac{\delta Q}{dt} + (c_v(T_{\text{ext}} - T) + rT_{\text{ext}}) \frac{dm}{dt} & \text{si } P_{\text{ext}} > P_{\text{int}} \end{cases} \quad (3.48)$$

$\frac{\delta Q}{dt}$ correspond à la somme des flux échangés avec les parois en contact avec le volume d'air, que l'on exprime à l'aide de la loi de Newton, soit :

$$\frac{\delta Q}{dt} = \sum_i S_i h_i (T_{\text{SI}_i} - T_{\text{air}}) \quad (3.49)$$

3.1.4 Transferts dans le chargement

Les transferts thermiques dans le chargement sont essentiellement conductifs. Le chargement est considéré comme un volume plein dans lequel les transferts s'effectuent selon les trois dimensions d'espace. Le chargement est alors maillé selon un modèle simple, composé de parallélépipèdes (fig.3.6). Les dimensions de ces éléments sont régulières et correspondent à des divisions de la largeur L , la hauteur H et la profondeur P du chargement selon le nombre de nœuds n que l'on choisit pour une longueur : $\Delta x = L/n$, $\Delta y = P/n$ et $\Delta z = H/n$. Le maillage est donc régulier et relativement simple à appréhender.

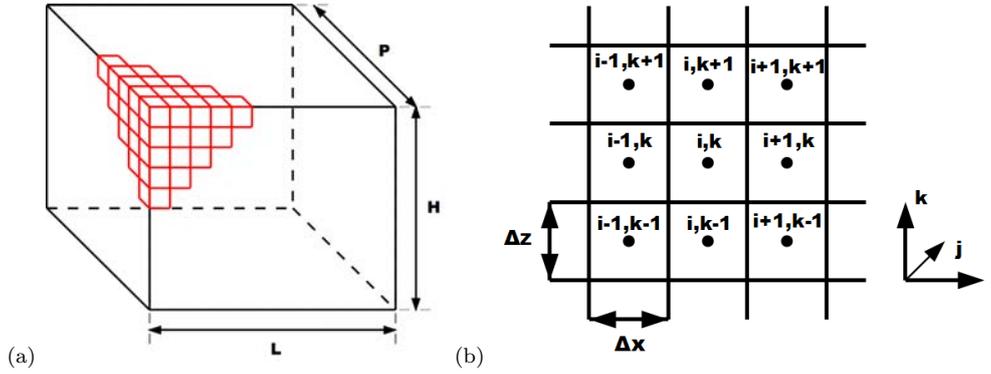


FIGURE 3.6 – (a) Le chargement est discrétisé en éléments parallélépipédiques, (b) à chaque élément correspond un nœud.

A chaque nœud on résout alors l'équation de conduction 3D :

$$\rho_{Ch} c_p Ch \frac{\partial T_{i,j,k}}{\partial t} \Delta x \Delta y \Delta z = 2\lambda_{Ch} \left(\frac{T_{i-1,j,k} - T_{i,j,k}}{\Delta x_{i-1} + \Delta x_i} - \frac{T_{i,j,k} - T_{i+1,j,k}}{\Delta x_i + \Delta x_{i+1}} \right) \Delta y \Delta z \dots$$

$$\dots + 2\lambda_{Ch} \left(\frac{T_{i,j-1,k} - T_{i,j,k}}{\Delta y_{i-1} + \Delta y_i} - \frac{T_{i,j,k} - T_{i,j+1,k}}{\Delta y_i + \Delta y_{i+1}} \right) \Delta x \Delta z + 2\lambda_{Ch} \left(\frac{T_{i,j,k-1} - T_{i,j,k}}{\Delta z_{i-1} + \Delta z_i} - \frac{T_{i,j,k} - T_{i,j,k+1}}{\Delta z_i + \Delta z_{i+1}} \right) \Delta x \Delta y$$
(3.50)

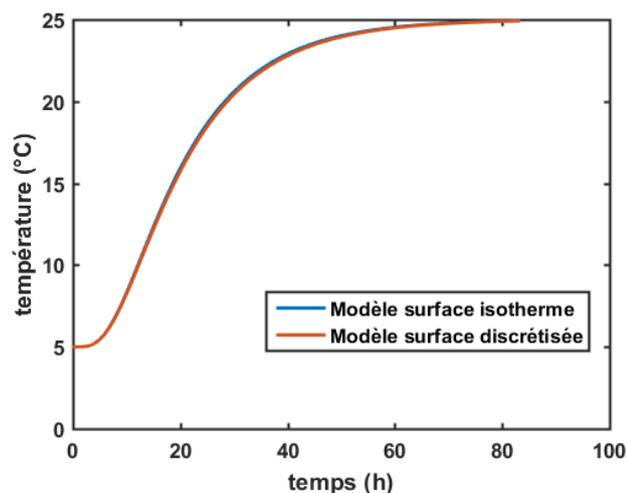
En ce qui concerne le traitement des températures de surface du chargement, plusieurs possibilités s'offrent à nous. On peut considérer qu'un volume d'air donné en contact avec la paroi considérée est relativement uniforme en température et que la température de surface présente peu de gradient de température, auquel cas on réduira la surface considérée à un seul nœud. On aura alors six équations de bilan sur les surfaces de la forme (exemple de la surface 1) :

$$\frac{2\lambda_{Ch}}{\Delta x} \frac{1}{n \times n} \sum_{j,k=1}^{n \times n} (T_{1,j,k} - T_{Sch,1}) + h_{Ch,1} (T_{air} - T_{Sch,1}) = 0$$
(3.51)

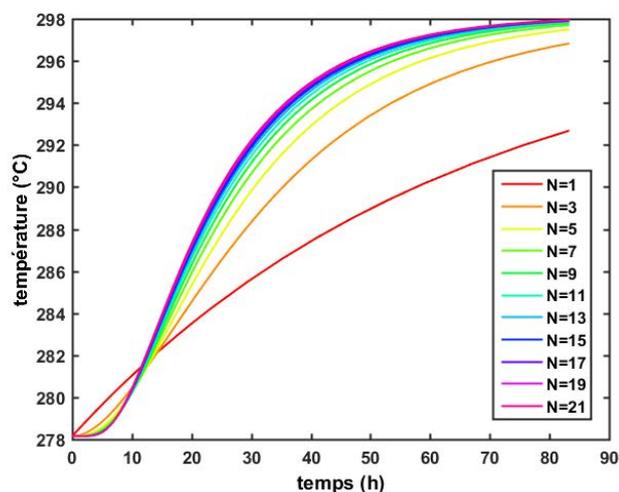
Une autre possibilité consiste à discrétiser les surfaces sur le même modèle que l'intérieur du chargement, chaque surface comportera alors $n \times n$ éléments et chaque maille de bord du chargement échangera avec l'environnement à travers l'élément de surface adjacent. On aura alors $6 \times n \times n$ équations de bilan sur les surfaces de la forme :

$$\frac{2\lambda_{Ch}}{\Delta x} (T_{1,j,k} - T_{Sch,1,j,k}) + h_{Ch,1} (T_{air} - T_{Sch,1,j,k}) = 0$$
(3.52)

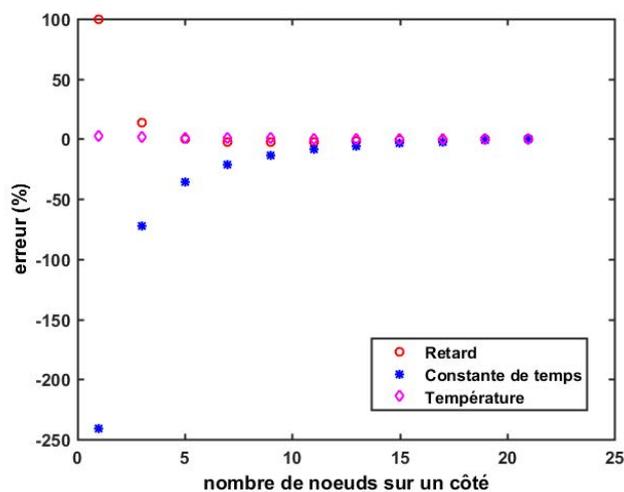
En comparant les résultats issus de ces deux approches (fig., (a)), on constate qu'il n'y a quasiment pas de différences entre elles. En revanche le nombre de mailles influe sur la représentativité du modèle (fig. 3.7, b). Il apparaît qu'à partir de $n = 9$ les résultats sont relativement en adéquation avec ceux issus de la simulation Star CCM+.



a)



b)



c)

FIGURE 3.7 – (a) Comparaison des deux approches pour le modèle tridimensionnel, (b) évolution du modèle avec surface discrétisée en fonction du nombre de mailles sur une longueur, (c) erreur sur la température au centre par rapport au modèle Star CCM+.

3.1.5 Architecture du code

Le code a été construit en utilisant le logiciel Matrix Laboratory (MatLab). MatLab utilise un langage de programmation de quatrième génération (proche des langues naturelles comparativement à un langage assembleur), il est particulièrement adapté au calcul matriciel et dispose déjà d'une bibliothèque conséquente de fonctions et de programme permettant la résolution de nombre de systèmes mathématiques. Il offre de plus la possibilité de réaliser une interface graphique pour interagir avec le programme et peut exporter les programmes sous forme d'exécutable, de manière à pouvoir les utiliser sur des machines ne disposant pas de licence MatLab.

3.1.5.1 Cahier des charges

Le programme à réaliser doit remplir un certain nombre de critères afin de permettre son utilisation future dans le cadre du développement de nouvelles solutions de transport ou du diagnostic de problèmes rencontrés sur les caisses actuelles. Ces critères sont les suivant :

- un temps de calcul modéré ;
- une interface aisée à utiliser par un tiers ;
- possibilité de changer les valeurs des caractéristiques thermophysiques des différents matériaux ;
- possibilité de changer les dimensions des différents constituants ;
- possibilité de définir la présence ou l'absence des plaques de séparation et des MCP.

Le temps de calcul dépend de plusieurs paramètres (valeur de la tolérance, données d'entrées...) mais le plus important reste en premier lieu le nombre d'équations à résoudre, découlant directement du nombre de nœuds du système. C'est pourquoi il est nécessaire d'avoir recours à des hypothèses simplificatrices concernant les échanges thermiques, afin de réduire le nombre de nœuds du système.

Les caractéristiques thermophysiques et les dimensions constituent des données d'entrées qui sont pour la plupart des constantes, aisément modifiables (via l'interface graphique pour les utilisateurs finaux). Toutefois, dans le cas des matériaux à changement de phase, les caractéristiques thermophysiques (conductivité thermique et capacité calorifique) ne sont pas constantes, elles dépendent de la phase dans laquelle le matériaux se trouve, et donc de la température du matériaux.

La définition de la présence ou de l'absence de divers constituants au sein de la caisse, entraîne une modification importante des matrices constituant le système. Selon qu'un matériaux est ou non en contact avec un autre, les bilans conductifs vont être amenés à changer et cela peut entraîner la disparition ou l'apparition de certaines équations de bilan.

3.1.5.2 Méthodologie et fonctionnement

L'ensemble des équations du système peut donc être converti en un système matriciel de la forme :

$$[J]\{\dot{T}\} = [A]\{T\} + [B]\{U\} \quad (3.53)$$

avec $\{U\}$ le vecteur des sollicitations extérieures.

Il s'agit d'un système algèbro-différentiel non-linéaire, que l'on résout à l'aide d'un solveur MatLab dédié à ce genre de calcul (*ode15i*). Pour faire appel à ce solveur, il convient de définir au préalable la fonction F telle que :

$$F(t, y, y') = 0$$

Soit d'après l'équation 3.53 :

$$F(t, y, y') = [J]\{\dot{T}\} - [A]\{T\} - [B]\{U\} \quad (3.54)$$

Le travail consiste donc à écrire les matrices $[J]$, $[A]$ et $[B]$. Lesquelles vont être amenées à changer en fonction de la présence ou non de divers éléments.

Le programme se décompose en plusieurs fichiers (fig.3.8) : le fichier principal, dans lequel sont traitées toutes les constantes et sont construites les parties constantes des matrices. Un fichier contenant la fonction correspondant aux sollicitations extérieures, et un fichier définissant la fonction F . Ce dernier fichier fait appel aux valeurs et aux matrices déjà définies et créées dans le fichier principal et y rajoute les termes non-constants, autrement dit les termes associés au traitement du changement de phase.

C'est dans le fichier principal que l'on fait appel au solveur, lequel prend comme argument la fonction F , la valeur de la tolérance et les conditions initiales. Afin de donner la possibilité au programme de prendre en compte la modulabilité du programme, l'idée consiste à considérer le système dans sa configuration la plus complète (avec présence des tous les éléments possibles sur

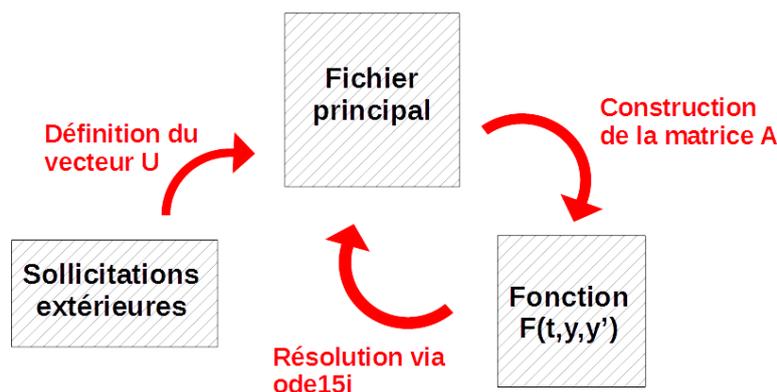


FIGURE 3.8 – Schématisation de l'organisation du programme MatLab.

toutes les faces de la caisse) et, lorsqu'un élément est supprimé (absence de séparation sur l'une des faces par exemple), de supprimer les équations correspondantes. Toutefois, il faut prendre garde, lors de l'écriture des matrices à ne pas introduire de zéro malencontreux qui rendrait le système irrésolvable. Pour ce faire, il est possible de passer par l'introduction d'ensembles vides, que MatLab sait interpréter, et qui nous permettent ainsi de supprimer des lignes aux matrices. Le même principe est utilisé pour traiter des échanges entre deux nœuds de nature différente, en définissant les valeurs des paramètres comme des vecteurs dont les membres peuvent être vides selon que l'élément correspondant est absent ou non.

3.2 Modélisation de la convection à l'intérieur de l'emballage en utilisant un code CFD

3.2.1 Mise en équation et méthodes de résolutions

Le développement des méthodes numériques permet aujourd'hui l'utilisation de techniques de simulation numérique afin de résoudre les problèmes les plus complexes que peuvent poser la thermique et la mécanique des fluides. Il convient néanmoins de préciser le problème considéré et les méthodes utilisées pour la résolution.

3.2.1.1 Equations régissant le mouvement d'un fluide

Si on considère un fluide dans son état macroscopique, contenu dans un élément de volume. Chaque élément de volume peut être défini par ses variables d'état : la pression, la température, la masse volumique et la vitesse.

Les équations régissant l'écoulement du fluide sont :

L'équation de continuité :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \vec{u}) = 0 \quad (3.55)$$

L'équation de conservation de quantité de mouvement (Navier-Stokes) :

$$\rho \left[\frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + (\vec{u} \cdot \vec{\nabla}) \vec{u} \right] = -\vec{\nabla} p + \mu [\nabla^2 + \frac{1}{3} \vec{\nabla}(\vec{\nabla} \cdot \vec{u})] + \rho \vec{f} \quad (3.56)$$

L'équation de conservation de l'énergie :

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} - \lambda \Delta T = \frac{P_{th}}{\lambda} \quad (3.57)$$

Avec : \vec{u} la vitesse du fluide, ρ sa masse volumique, p la pression, μ la viscosité dynamique, \vec{f} la résultante des forces massiques, c la capacité calorifique, λ la conductivité thermique et P_{th} la source volumique de chaleur.

3.2.1.2 Résolution numérique des équations

Devant la complexité des équations à résoudre, il est indispensable de se tourner vers les méthodes numériques pour résoudre ce système. Il existe deux grandes familles de méthodes de discrétisation spatiale permettant de résoudre les équations de Navier-Stokes : la méthode des éléments finis et la méthode des volumes finis. Ces deux méthodes ont en commun qu'elles consistent à discrétiser les équations aux dérivées partielles sur une grille spatiale afin de les ramener à un système d'équation algèbro-différentiel non-linéaire. Elles diffèrent en revanche sur la nature de cette grille de discrétisation. Dans le domaine de la simulation des écoulements d'air, c'est la méthode des volumes finis qui est la plus répandue, et celle à laquelle nous allons nous intéresser.

3.2.1.3 Méthode des volumes finis

La méthode des volumes finis consiste à intégrer les équations aux dérivées partielles sur un volume élémentaire dit de contrôle du fluide, que l'on assimile à une maille de la grille de discrétisation. La technique de résolution peut se décomposer en trois étapes :

- maillage du domaine, ou subdivision en volumes de contrôle ;
- intégration des équations pour chaque maille ou volume de contrôle ;
- résolution des équations discrétisées.

Le système considéré est donc tout d'abord discrétisé en un ensemble de volumes de contrôle, auxquels sont associées pour chacun les valeurs des caractéristiques thermophysiques et dynamiques du fluide (conductivité, température, vitesse...). Chaque volume est ensuite considéré comme en contact avec ses voisins par le biais des équations de conservation.

Dans le cas des équations de Navier-Stokes, on peut les re-écrire, pour chaque volume de contrôle et pour une grandeur scalaire Φ sous une même forme générale :

$$\frac{\partial \rho \Phi}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_i \Phi}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\Gamma_{\Phi} \frac{\partial \Phi}{\partial x_i} \right) + S_{\Phi} \quad (3.58)$$

Les deux premiers termes de l'équation correspondent alors respectivement à la variation temporelle et au transport par convection de la grandeur Φ . Les termes du second membre représentent le transport par diffusion de Φ et sa production locale.

Si on considère le cas où la grandeur Φ étudiée serait la température, alors l'équation de Navier-Stokes deviendrait l'équation de convection-diffusion. En considérant un problème monodirectionnel, l'intégration de l'équation de convection-diffusion sur le volume de contrôle devient :

$$(\rho u T)_{i+1} - (\rho u T)_{i-1} = \left(\Gamma \frac{dT}{dx} \right)_{i+1} + \left(\Gamma \frac{dT}{dx} \right)_{i-1} \quad (3.59)$$

Il s'agit d'une relation algébrique qui ne peut être résolue qu'à la condition de relier les valeurs inconnues des paramètres ρ , u et T des volumes de contrôle voisins à ceux du volume considéré. Pour ce faire, on a recours à des méthodes d'interpolation dont on peut donner les exemples suivants.

3.2.1.4 Schémas d'interpolation

Il existe différents schémas d'interpolation, parmi lesquels on peut citer le schéma aux différences centrées, le schéma amont, le schéma hybride et le schéma en loi de puissance. On considérera un volume de contrôle tel que défini sur la figure 3.9.

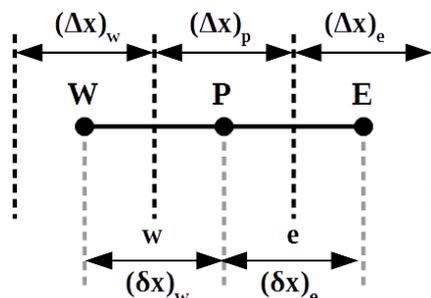


FIGURE 3.9 – Volume de contrôle.

Schéma aux différences centrées : Le schéma aux différences centrées se base sur l'hypothèse d'une variation linéaire de la grandeur scalaire recherchée (ici T) entre deux nœuds du maillage. En supposant les interfaces à mi-distance des nœuds on peut alors écrire :

$$T_W = \frac{1}{2}(T_W + T_P), T_E = \frac{1}{2}(T_P + T_E) \quad (3.60)$$

et

$$\left(\frac{\partial T}{\partial x}\right)_w = \frac{T_P - T_W}{(\partial x)_w}, \left(\frac{\partial T}{\partial x}\right)_e = \frac{T_E - T_P}{(\partial x)_e} \quad (3.61)$$

Cette approximation du deuxième ordre en précision présente très peu de diffusion numérique et est bien adaptée à la majorité des problèmes. Toutefois, lorsque la convection devient largement prépondérante devant les effets de conduction la solution devient alors instable. En effet, on peut noter que d'après les expressions 3.60 et 3.61, les points situés en amont et en aval ont le même poids pour le calcul des valeurs à l'interface quelles que soient la vitesse et la direction de l'écoulement, ce qui n'est plus valable dans le cas d'un problème de convection. Patankar ([13]) a montré que si ce schéma reste valable à faible nombre de Reynolds, il peut conduire à des solutions irréalistes dans certains cas.

Schéma amont La schéma amont correspond à une amélioration du schéma aux différences centrées (Courant *et al.* [14]). Les échanges diffusifs sont modélisés de la même manière que dans le schéma aux différences centrées, en revanche les échanges convectifs sont supposés n'avoir lieu que de l'amont vers l'aval de l'écoulement. Il s'agit d'un schéma de premier ordre en précision (donc moins précis que le schéma aux différences centrées). Il est inconditionnellement stable d'un point de vue numérique mais susceptible d'introduire une diffusion numérique « artificielle » pouvant affecter la précision du calcul, notamment lorsque la direction de l'écoulement ne correspond pas strictement à celle des lignes du maillage. Pour éviter que la précision du calcul ne soit affectée, on peut donc affiner le maillage et/ou aligner le maillage sur l'écoulement. Toutefois l'affinage du maillage reste limité par la puissance de calcul des ordinateurs, et l'alignement du maillage sur l'écoulement n'est possible que lorsque l'on a affaire à un écoulement simple, ne présentant pas de circulation multiple ou cyclique.

Schéma hybride Le schéma hybride a été développé par Spalding en 1972 ([15]). Il s'agit d'une combinaison des deux schémas précédents : on a recours à un schéma aux différences centrées lorsque le nombre de Péclet (exprimant le rapport entre les transferts par convection et les transferts par diffusion) est inférieur à 2, et à un schéma amont lorsque le nombre de Péclet est supérieur ou égal à 2.

Schéma en loi de puissance L'interpolation en loi de puissance a été définie par Patankar ([13]). Ce schéma prend en compte la valeur de la variable T à l'interface du volume de contrôle, en utilisant la solution exacte de l'équation de convection-diffusion. Cette équation peut être intégrée analytiquement et l'on obtient la variation de la température en fonction de x et du nombre de Péclet P_e :

$$\frac{T(x) - T_0}{T_L - T_0} = \frac{e^{P_e \frac{x}{L}} - 1}{e^{P_e} - 1} \quad (3.62)$$

où L est une longueur caractéristique de l'écoulement.

Lauder et Spalding ([16]) observent toutefois que lorsque le nombre de Péclet local, construit sur la dimension du maillage et de la vitesse à l'interface, est supérieur à 2, la discrétisation centrée des termes convectifs en régime permanent conduit à des instabilités numériques.

3.2.1.5 Contrôle de la convergence

La résolution numérique de problèmes à caractère non linéaire nécessite d'avoir recours à un processus itératif. Il devient alors indispensable de faire appel à des critères permettant d'apprécier la convergence du calcul, et donc de déterminer à quel moment mettre fin au processus. C'est ainsi que l'on va s'intéresser au concept de résidu. On considérera que les équations bilan auront convergé lorsque toutes les équations présenteront un résidu inférieur à un seuil normalisé fixé.

Après discrétisation, l'équation de conservation d'une variable Φ sur un volume de contrôle de centre P peut s'écrire telle que :

$$a_P \cdot \Phi_P = \sum_i a_i \cdot \Phi_i + b \quad (3.63)$$

où a correspond aux contributions convectives et diffusives, i est lié aux cellules adjacentes et b représente la contribution de la partie constante du terme source.

Le résidu normalisé s'exprime alors comme :

$$R^\Phi = \frac{\sum_{\text{domaine}} |\sum_i a_i \cdot \Phi_i + b - a_P \cdot \Phi_P|}{\sum_{\text{domaine}} |a_P \cdot \Phi_P|} \quad (3.64)$$

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

$$R^c = \sum |\text{taux de création de matière dans le domaine}| \quad (3.65)$$

Typiquement, la valeur seuil pour le résidu des équations de conservation du bilan de masse est prise égale à 10^{-3} , et celle pour le résidu des équations de conservation du bilan d'énergie est prise égale à 10^{-6} .

3.2.2 Application au cas du volume d'air intérieur d'un emballage thermique

Selon les emballages et les configurations considérées, les volumes d'air au sein de la caisse peuvent être plus ou moins importants. Ils restent néanmoins le plus souvent significatifs, particulièrement dans le cas d'emballages de grands volumes. On va donc chercher à déterminer les mouvements convectifs de l'air intervenant dans la caisse afin de mieux comprendre la manière dont le froid peut se répartir à l'intérieur grâce à la convection naturelle.

3.2.2.1 Configuration des emballages

Les deux modèles du Pallet Shipper Frizbox[®] ont été modélisés (la version XXL et la version SB24).

La configuration de la SB24 est la même que celle utilisée lors des essais thermiques, à savoir donc des accumulateurs de froid à -20°C en haut et en bas, séparés des produits par deux plaques en cartons triple canelure. Des accumulateurs de froid à $+5^{\circ}\text{C}$ sur les côtés, et la présence de bandes en carton triples canelure collées sur l'arrière de la caisse de manière à créer un volume d'air entre l'arrière et le chargement.

La XXL quant à elle est équipée d'accumulateurs de froid à -20°C en haut placés dans les logements prévus à cet effet et dont le plateau est constitué d'un carton triple canelure ajouré. Des accumulateurs de froid à $+5$ degré sont placés dans les logements latéraux. Le chargement est constitué de cartons de produits pharmaceutiques standards formant un bloc de dimension $1.2\text{ m} \times 1\text{ m} \times 1\text{ m}$, posé sur une palette en bois de dimension $1.2\text{ m} \times 1\text{ m} \times 0.14\text{ m}$.

3.2.2.2 Maillage de la configuration

Il existe plusieurs modèles de maillage (tetrahedral, polyhedral ou trimmer mesher) parmi lesquels on va choisir en fonction de différents facteurs, notamment la précision de la solution recherchée, le taux de convergence, la capacité de mémoire de l'ordinateur utilisé ou encore la qualité de la surface à partir de laquelle on génère le maillage.

Les modèles dis « polyhedral » ou « trimmer » produiront toujours un résultats plus précis comparativement au modèle « tetrahedral » pour un nombre donné de cellules. Pour avoir une précision équivalente il faut alors faire varier le nombre de cellules du maillage.

Les modèles « polyhedral » et « tetrahedral » sont directement dépendants de la qualité de la surface génératrice, ainsi une surface de mauvaise qualité générera un maillage de mauvaise qualité, ce qui dégradera la solution. Le modèle « trimmer » quant à lui n'est pas directement dépendant de la qualité de la surface génératrice, en revanche, lorsque l'on souhaite modéliser un système constitué de plusieurs régions, ce modèle ne permet pas de générer de maillage conforme aux interfaces et il faut alors mailler les régions comme autant d'ensembles différents.

Compte tenu des avantages et des inconvénients, le modèle « trimmer » semble être celui qui permettra de donner les meilleurs résultats, il sera donc utilisé afin de mailler le volume d'air intérieur de la caisse.

3.2.2.3 Procédure et paramètres du calcul

Une fois le maillage effectué, l'étape suivante consiste à établir les conditions aux limites, ces dernières étant évidemment fondamentales dans l'élaboration d'un modèle numérique.

Le volume que l'on cherche à modéliser étant le volume d'air intérieur, les conditions aux limites décrivent la nature des échanges entre l'air et les parois avec lesquelles il est en contact. Les échanges sont ici essentiellement thermiques (il n'y a pas d'échange de matière). L'air à l'intérieur de l'emballage est en contact avec le corps en polyuréthane de la caisse, avec les accumulateurs de froid et avec le chargement (les cartons contenant les vaccins). On considèrera

chaque surface du polyèdre constituant le volume d'air comme une frontière de type « mur » à laquelle la température et le coefficient d'échange convectif sont spécifiés.

3.2.3 Résultats

3.2.3.1 Mouvement du fluide dans le volume d'air à l'intérieur de la caisse XXL

La modélisation du Pallet Shipper en version XXL a permis d'établir des cartographies des vecteurs vitesse de l'écoulement au sein du volume d'air, nous donnant ainsi la possibilité de visualiser la manière dont l'air se déplace à l'intérieur de la caisse par convection naturelle.

L'observation du plan de coupe sagittal de la caisse (fig. 3.10,a) permet d'identifier plusieurs structures de circulation. Tout d'abord on observe une zone de recirculation dans la partie supérieure de la porte, échangeant de la matière avec le volume présent au dessus du chargement. Dans ce dernier volume, l'air semble globalement se diriger vers l'avant de la caisse, à l'exception d'une plus petite zone de recirculation située tout à l'arrière. L'air refroidi par les accumulateurs de froid supérieurs est donc envoyé vers l'avant de la caisse où il se déverse ensuite le long de la porte.

Le plan de coupe transversal (fig. 3.10,b) permet d'observer que la circulation dans le volume d'air au dessus du chargement se décompose en plusieurs zones de recirculation en rouleau de chaque côté de l'axe de symétrie de la caisse ou l'air au contact des accumulateurs supérieurs se dirige vers le centre de la caisse en se refroidissant, pour ensuite descendre sur le chargement et se diriger vers les côtés de la caisse. En dessous du chargement, les espaces compris dans la palette sur laquelle il repose forment deux volumes d'air, dans lesquels les mouvements de convection sont minimaux.

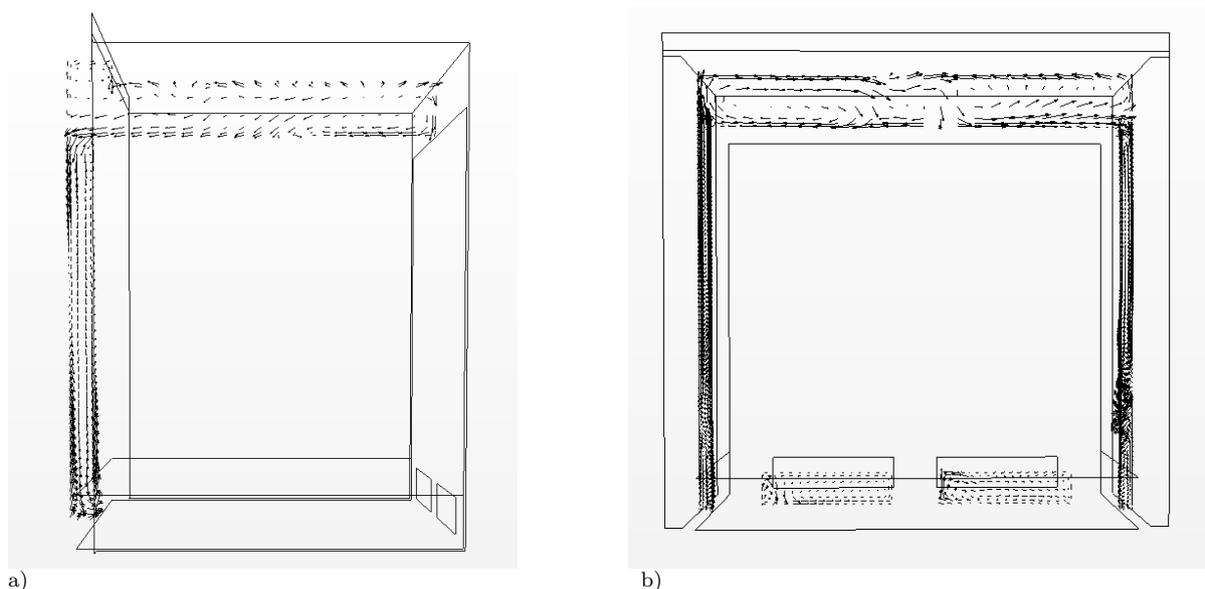


FIGURE 3.10 – Cartographie des vecteurs vitesse dans le volume d'air interne à l'emballage (version XXL), a) coupe sagittale, b) coupe transversale.

Les coupes longitudinales des volumes d'air supérieur et inférieur sont aussi présentées sur la figure 3.11. On peut ainsi observer que le volume d'air supérieur (fig. 3.11,a) présente quatre structures circulaires. Les deux structures à l'arrière de la caisse sont symétriques par rapport à l'axe sagittal et le mouvement de l'air peut être décrit comme suit : l'air présent à l'arrière de la caisse converge vers le centre pour être amené ensuite au milieu de la face supérieure du chargement, de là il continue le mouvement vers les côtés de la caisse et se sépare en deux courants, l'un qui retourne à l'arrière de la caisse et l'autre qui se dirige vers l'avant. Les

structures circulaires à l'avant sont elles un peu moins marquées, mais on constate que l'air est amené vers le centre de la porte, pour être ensuite poussé sur les côtés.

Dans la partie inférieure de la caisse (fig. 3.11,b), les mouvements de convection observés sont bien symétriques par rapport à l'axe sagittal. L'air provenant du centre de la porte est amené vers les côtés de la caisse où l'on observe une zone de recirculation dans les extrémités. En se dirigeant vers les bords, l'air de l'avant de la caisse entraîne avec lui une partie de l'air présent dans les volumes de la palette sur laquelle repose le chargement, créant ainsi une légère structure circulaire. Dans ces mêmes volumes en revanche, les mouvements de convections sont plutôt faibles, particulièrement vers l'arrière de la caisse.

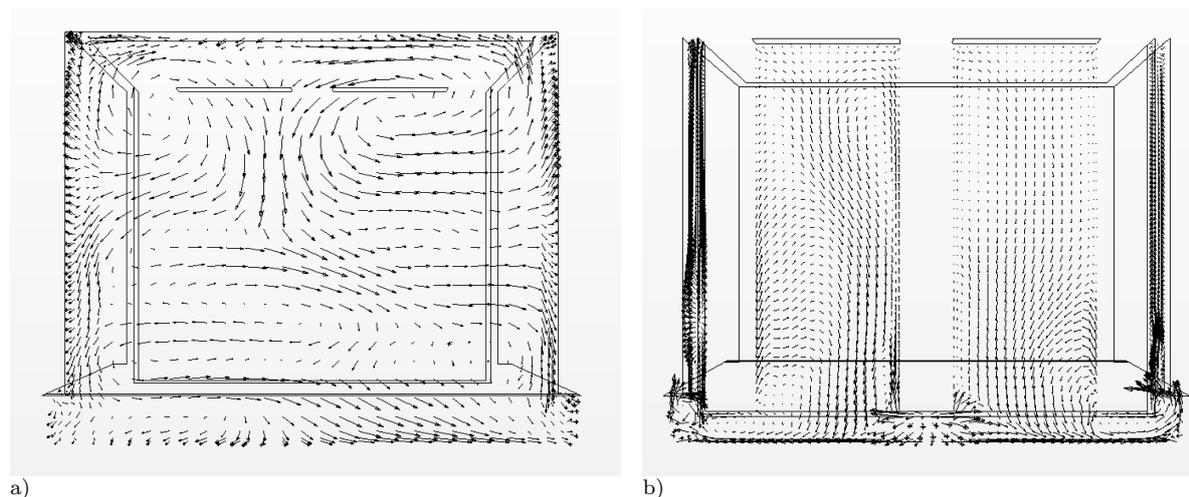


FIGURE 3.11 – Cartographie des vecteurs vitesse dans le volume d'air interne à l'emballage (version XXL) dans un plan de coupe longitudinal, a) partie supérieure, b) partie inférieure.

Au niveau de la porte (fig. 3.12) on peut observer que l'air est globalement amené du haut du chargement vers le milieu de la porte d'où il descend jusqu'en bas de la caisse pour ensuite se répartir de chaque côté et finir par remonter sur les bords de la caisse. Des structures circulaires sont observables de part et d'autre de l'axe vertical. Au dessus du chargement en revanche, les mouvements de convection sont plus diffus.

De ces observations, on peut donc déduire le déplacement global de l'air au sein de l'emballage dans le cas de la version XXL. L'air présent dans l'espace au dessus du chargement est refroidi par la présence des accumulateurs de froid à température négative, le gradient de température entre les accumulateurs situés au dessus de cet espace et le chargement en constituant la surface inférieure engendre des instabilités provoquant l'apparition de structures convectives circulaires verticales et horizontales. L'air refroidi longe le dessus du chargement pour se déverser à l'avant au niveau de l'axe de symétrie vertical. Une fois arrivé en bas de la caisse, l'air se répartit de part et d'autre pour ensuite remonter sur les bords latéraux. La présence d'espaces non utiles sur le contour de la porte pouvant être assimilés à des renforcements, engendre l'apparition de zone de recirculation. En dessous du chargement, dans les volumes compris entre les pieds de la palette, l'air montre peu de mouvements de convection, on observe surtout un effet d'entraînement du au mouvement de l'air provenant du centre et se dirigeant vers les bords latéraux.

3.2.3.2 Mouvement du fluide dans le volume d'air à l'intérieur de la caisse SB24

La version SB24 du Pallet Shipper offre une configuration assez différente de la XXL, de par ses dimensions d'une part, mais aussi par une disposition des accumulateurs de froid différente. En effet, ici les accumulateurs supérieurs ne sont plus placés dans des logements au plafond de

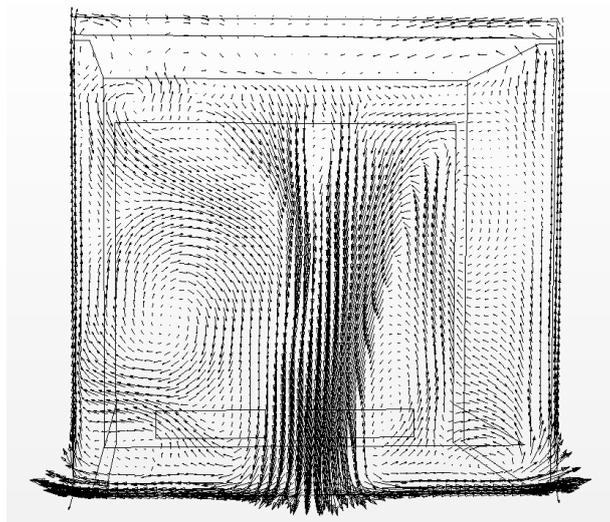


FIGURE 3.12 – Cartographie des vecteurs vitesse dans le volume d'air interne à l'emballage (version XXL) dans un plan de coupe transversal au niveau de la porte.

la caisse, mais posés directement sur le chargement. De même, le chargement ne repose plus sur une palette, mais directement sur un étage d'accumulateurs, supprimant alors les volumes d'air inférieurs présents entre les pieds de la palette de la XXL.

L'observation de la coupe sagittale (fig. 3.13,a) permet de constater l'influence du placement des accumulateurs de froid par rapport au volume d'air sur les structures convectives. En effet, dans l'espace supérieur, les mouvements convectifs semblent très faibles et il est difficile d'identifier une réelle structure convective. L'air provenant du dessus du chargement descend en bas de la caisse en longeant le chargement pour remonter ensuite directement en longeant la porte, ce courant ascendant emplit la quasi totalité de l'espace situé entre la porte et le chargement.

Sur le plan de coupe transversal (fig. 3.13,b), on peut observer là encore l'absence de structure convective circulaire dans l'espace supérieur comparativement au cas de la XXL. L'air provenant du dessus descend là encore en longeant le chargement pour ensuite remonter le long des bords de la caisse. La symétrie est parfaite entre la droite et la gauche de l'emballage.

Les coupes longitudinales des volumes d'air supérieur et inférieur sont aussi présentées sur la figure 3.14. On peut alors observer dans le volume supérieur deux structures convectives circulaires à l'avant de la caisse, entraînant l'air provenant des bords de la porte vers l'intérieur de l'espace en direction du centre. À l'arrière de la caisse, l'air est relativement stagnant, à l'exception d'une structure en arc de cercle, entraînant l'air provenant des angles arrières vers l'avant.

Dans la partie inférieure de la caisse on peut constater que globalement l'air a tendance à se déplacer du milieu de l'avant vers les bords pour revenir sur les côtés du chargement, de manière symétrique par rapport à l'axe sagittal. Toutefois les mouvements de convections sont plutôt faibles sur les côtés du chargement. On observe aussi qu'au plus proche de la porte, le mouvement semble s'inverser et l'air se déplacer des bords vers le centre.

Au niveau de la porte (fig. 3.15) on peut observer que l'air présente trois courants ascendants, deux sur les bords de la porte et le troisième au centre. Le courant ascendant central ne remonte toutefois pas jusqu'en haut de la caisse, car il subit l'influence des courants latéraux retournant vers le centre après avoir atteint le haut de la caisse. De part et d'autre du courant ascendant central on peut observer des structures convectives circulaires.

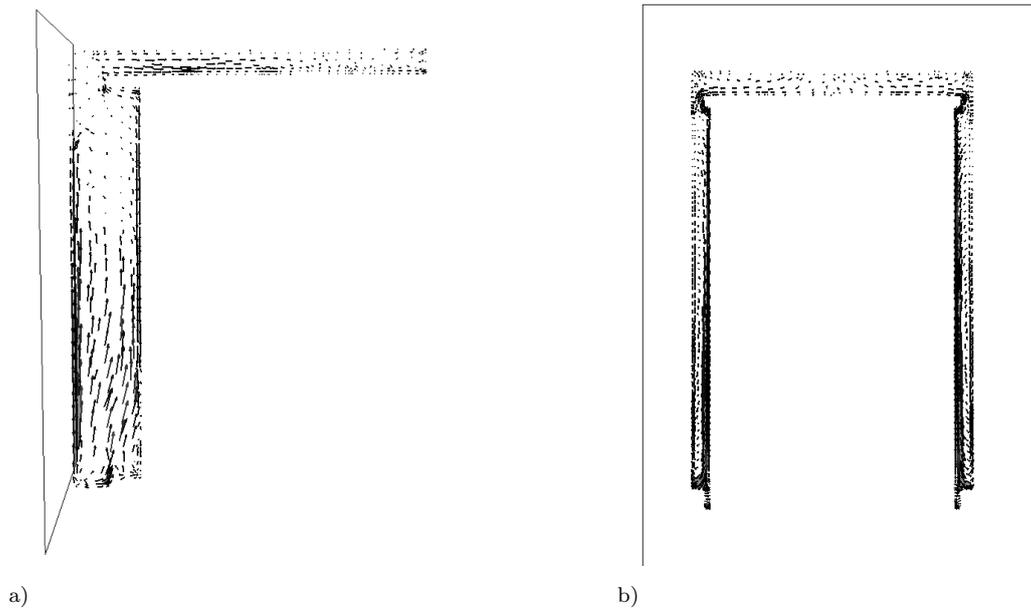


FIGURE 3.13 – Cartographie des vecteurs vitesse dans le volume d’air interne à l’emballage (version SB24), a) coupe sagittale, b) coupe transversale.

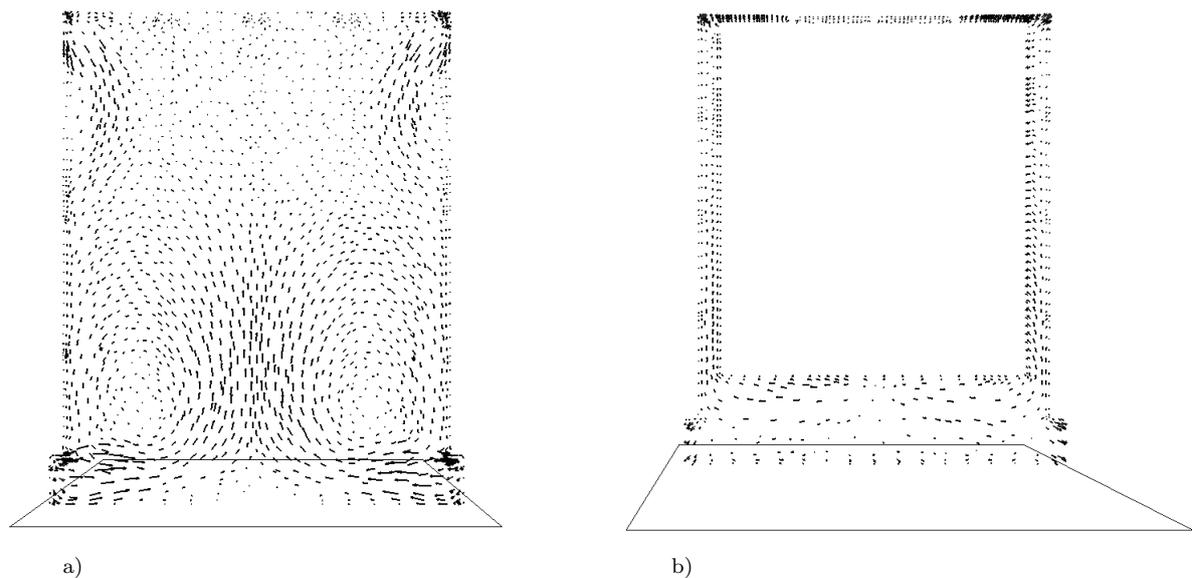


FIGURE 3.14 – Cartographie des vecteurs vitesse dans le volume d’air interne à l’emballage (version SB24) dans un plan de coupe longitudinal, a) partie supérieure, b) partie inférieure.

On peut alors décrire de manière globale le déplacement de l’air à l’intérieur de l’emballage en version SB24. L’air présent dans l’espace au dessus du chargement est refroidi par les accumulateurs de froid à température négative posés sur le dessus du chargement, toutefois le sens du gradient de température (le plus froid en bas) correspond à un cas stable et l’on n’observe plus alors d’instabilité dans le sens vertical. L’air refroidi se déverse vers le bas de la caisse aussi bien par le devant que les côtés du chargement via un courant descendant longeant parfaitement le chargement. Une fois arrivé une bas, l’air remonte en longeant cette fois-ci le corps de la caisse. Les différents courants et structures convectives observés sont parfaitement symétriques par rapport à l’axe sagittal.

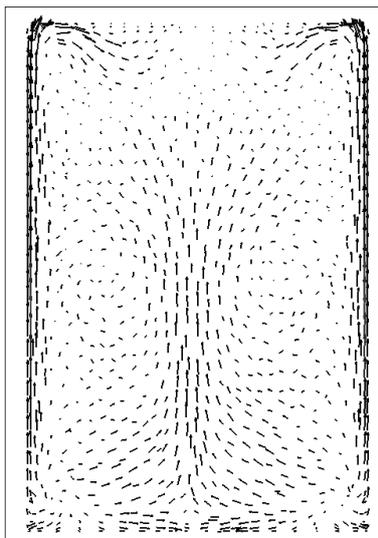


FIGURE 3.15 – Cartographie des vecteurs vitesse dans le volume d’air interne à l’emballage (version SB24) dans un plan de coupe transversal au niveau de la porte.

3.3 Conclusion

Un modèle a été développé ayant pour support le logiciel de calcul MatLab, afin de simuler la répartition des températures au sein de l’emballage lors d’un voyage.

Un certain nombre de simplifications ont du être adoptées de manière à diminuer notamment les temps de calcul. On a alors recours à un modèle nodal où chaque élément du système est représenté par un nœud auquel on applique les différentes équations issues des bilans énergétiques.

La présence de matériaux à changement de phase engendre la non-linéarité du système mathématique que l’on cherche à résoudre, ce qui a pour effet, entre autres, de compliquer le recours à la réduction de modèle.

Le programme a été écrit de manière à permettre à un utilisateur tiers et non averti de faire varier la configuration des emballages que l’on souhaite modéliser. Un changement de configuration implique une modification de la présence des éléments et de leurs contacts entre eux, et donc une modification profonde des matrices du système mathématique.

Le recours à la modélisation CFD via StarCCM+ a permis de bien comprendre la manière dont la convection naturelle agit à l’intérieur de deux emballages différents (Pallet Shipper en version XXL et SB24). Les dimensions de ces emballages ainsi que la manière dont les accumulateurs de froid sont disposés à l’intérieur ont une influence importante sur les déplacements de l’air engendrés par convection naturelle. Ces simulations ont permis d’élaborer des recommandations en matière de conception des emballages.

Bibliographie

- [1] J.B. Saulnier and A. Alexandre. La modélisation thermique par la méthode nodale : ses principes, ses succès et ses limites. *Revue Générale de la Thermique*, 280 :371–383, 1985.
- [2] L.M. Jiji. Correlation equations : forced and free convection. In *Heat convection*, pages 387–435. Springer Berlin Heidelberg, 2009.
- [3] B. Eyglunent. *Manuel de thermique*. Hermès - Lavoisier, 2003.

- [4] G. Lefebvre. Comportement thermique des bâtiments : simulation et analyse. techniques de l'ingénieur, 1994.
- [5] J.R. Howell, R. Siegel, and M. Pinar Mengüç. *Thermal radiation heat transfer*. CRC Press, 2010.
- [6] L. W. Hunter and J. R. Kuttler. The Enthalpy Method for Heat Conduction Problems With Moving Boundaries. *Journal of Heat Transfer*, 111(2) :239–242, mai 1989.
- [7] B. Binet and M. Lacroix. Étude numérique de la fusion dans des enceintes rectangulaires chauffées uniformément ou discrètement par les parois latérales conductrices. *Revue Générale de Thermique*, 37(7) :607–620, juillet 1998.
- [8] P. Lamberg and K. Sirén. Approximate analytical model for solidification in a finite PCM storage with internal fins. *Applied Mathematical Modelling*, 27(7) :491–513, juillet 2003.
- [9] P. Lamberg, R. Lehtiniemi, and A.M. Henell. Numerical and experimental investigation of melting and freezing processes in phase change material storage. *International Journal of Thermal Sciences*, 43(3) :277–287, mars 2004.
- [10] P. Lamberg. Approximate analytical model for two-phase solidification problem in a finned phase-change material storage. *Applied Energy*, 77(2) :131–152, février 2004.
- [11] *Modelling of residential heating system using a phase change material storage system.*, Como, Italy, 2009.
- [12] B. Zivkovic and I. Fujii. An analysis of isothermal phase change of phase change material within rectangular and cylindrical containers. *Solar Energy*, 70(1) :51–61, 2001.
- [13] S.V. Patankar. *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*. Hemisphere, 1980.
- [14] R. Courant, E. Isaacson, and M. Rees. On the solution of nonlinear hyperbolic differential equations by finite differences. *Communications on Pure and Applied Mathematics*, 5 :243–255, 1952.
- [15] D.B. Spalding. A novel finite difference formulation for differential expressions involving both first and second derivatives. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 4 :551–559, 1972.
- [16] B.E. Launder and D.B. Spalding. *Mathematical Models of Turbulence*. Academic Press, 1972.

CHAPITRE 4

VALIDATION ET EXPLOITATION DU MODÈLE

Sommaire

4.1 Validation du modèle	89
4.1.1 Caractéristiques thermiques des matériaux	90
4.1.2 Modèle SB1, profil froid	92
4.1.3 Modèle SB24, profil chaud	93
4.2 Exploitation du modèle	94
4.2.1 Perméabilité de l'emballage	95
4.2.2 Densité du chargement	99
4.2.3 Conductivité des séparations	101
4.2.4 Epaisseur des séparations	104
4.2.5 Température de conditionnement de l'emballage	104
4.2.6 Température d'introduction des accumulateurs froids	106
4.2.7 Nature des matériaux à changement de phase	107
4.3 Conclusion	111
Bibliographie	112

Dans ce chapitre, une première partie est consacré à la validation du modèle simplifié développé, afin de s'assurer que les résultats issus de la simulation soit cohérents avec la réalité. Dans une seconde partie, le modèle est utilisé afin d'observer l'effet de la variation de divers paramètres d'entrée et de configuration des emballages sur les températures des produits transportés.

4.1 Validation du modèle

Afin de pouvoir évaluer la représentativité du modèle simplifié développé, les résultats issus de la simulation ont été confrontés à ceux issus d'expérimentations réalisées au sein du laboratoire *Ater métrologie*. Deux cas ont été considérés : celui d'une caisse de petite taille soumise à un profil de température extérieure correspondant à un voyage ayant lieu en hiver (donc avec régulièrement des températures négatives), et une caisse de grande taille soumise à un profil de température extérieure correspondant à un voyage ayant lieu en été.

4.1.1 Caractéristiques thermiques des matériaux

Les deux caisses utilisées sont constituées des mêmes matériaux : leurs corps sont construits à l'aide de panneaux en mousse de polyuréthane, les accumulateurs de froid sont constitués d'eau et des panneaux de carton doubles cannelures sont utilisés comme séparation à certains endroits. Les produits chargés dans les caisses sont des seringues de simili-vaccins (remplies avec de l'eau) avec leur emballage, contenus dans des cartons de groupages, à raison de 200 vaccins par carton.

4.1.1.1 Panneaux de polyuréthane

Les panneaux de polyuréthanes utilisés pour la construction des emballages thermiques sont fournis par l'entreprise *Recticel insulation*. Il s'agit de panneaux initialement prévus pour l'isolation de toitures de bâtiments. Les caractéristiques thermiques définies par le fournisseur sont consistantes avec celles que l'on peut retrouver dans la littérature (cf §1.4.1.3) et sont regroupées dans le tableau 4.1.

λ	0.028	$\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$
ρ	30	kg m^{-3}
c_p	1450	$\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$

TABLE 4.1 – Caractéristiques thermiques d'un panneau de mousse de polyuréthane, d'après *Recticel insulation*.

4.1.1.2 Panneaux de séparation

Selon les configurations, il est parfois nécessaire de rajouter des séparations entre les produits et les accumulateurs de froid, généralement lorsque l'on introduit des accumulateurs à température négative, de manière à protéger les produits du froid et éviter ainsi qu'ils ne descendent trop en température. Ces séparations peuvent être de plusieurs types de matériaux : carton (simple, double ou triple cannelure), polystyrène expansé, mousse de polyuréthane ou panneau d'isolation sous vide. Dans les cas que nous considérons ici, ces panneaux sont constitués de carton en doubles cannelures.

Asdrubali *et al.* [1][2] ont cherché à déterminer les caractéristiques thermiques et acoustiques de différents panneaux de carton. Ils ont ainsi pu déterminer la valeur de la conductivité thermique équivalente des panneaux à simple cannelure. En répétant leurs mesures pour plusieurs couches de cartons, ils sont parvenus à la conclusion que le nombre de couches ne faisait pas varier significativement la valeur de la conductivité thermique. Les caractéristiques thermiques des panneaux de carton sont regroupées dans le tableau 4.2.

λ	0.058	$\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$
ρ	276	kg m^{-3}
c_p	1700	$\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$

TABLE 4.2 – Caractéristiques thermiques des panneaux de carton à cannelure, d'après Asdrubali *et al.* [1].

4.1.1.3 Accumulateurs de froid

Les accumulateurs de froid sont des briques solides contenant de l'eau. Les caractéristiques thermiques de l'eau sont bien établies aujourd'hui et sont regroupées dans le tableau 4.3 pour

chacune de ses phases liquide et solide.

On notera que par soucis de simplification, la densité de l'eau est supposée constante lors du changement de phase. Enfin la température de fusion de l'eau est fixée à 0 ° C et sa chaleur latente $L_h = 330 \text{ kJ kg}^{-1}$.

	Phase liquide	Phase solide	
λ	0.56	2.1	$\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$
ρ	1000	1000	kg m^{-3}
c_p	4180	2100	$\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$

TABLE 4.3 – Caractéristiques thermiques de l'eau.

4.1.1.4 Produits pharmaceutiques

Les produits utilisés lors des tests sont des seringues contenant de l'eau servant à simuler un vaccin, avec leur emballage (fig. 4.1).



FIGURE 4.1 – Simili-vaccins utilisés comme chargement.

Chaque unité de vaccin pèse 20.6 g. La masse volumique d'un carton de groupage, de dimension $0.43 \text{ m} \times 0.34 \text{ m} \times 0.25 \text{ m}$, contenant 200 vaccins est ainsi estimée à : $\rho = 120 \text{ kg m}^{-3}$.

La capacité thermique massique peut être évaluée proportionnellement à la quantité de chaque matériau constituant une unité de vaccin, telle que :

$$c_{p,tot} = \frac{\sum_{i=1}^n m_i c_{p,i}}{\sum_{i=1}^n m_i} \quad (4.1)$$

On estime alors la capacité thermique massique du chargement telle que : $c_p = 2300 \text{ J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$

La conductivité thermique du chargement constitué des simili-vaccins ne pouvant pas être calculé simplement, on a alors recours à la technique de la plaque chaude gardée pour en évaluer la valeur.

Il s'agit d'une technique normalisée (ISO 8302) qui permet de mesurer la résistance thermique d'un matériau. Le principe peut être décrit comme suit [3] :

Un flux de chaleur est généré, par effet joule, au centre d'une plaque chaude, placée entre deux échantillons du matériau dont on veut mesurer la résistance thermique. Le pourtour de la zone de chauffage est entouré d'une résistance électrique : la garde. Une régulation maintient un écart de température nul entre la garde et la zone de chauffage. Le flux qui traverse la paire d'échantillons est alors monodimensionnel. Deux plaques froides placées contre les

faces extérieures des éprouvettes permettent d'imposer leur température (fig. 4.2). Si les deux échantillons sont identiques, le flux traverse à part égale chaque éprouvette. La mesure des températures sur les deux faces de chaque échantillon, une fois le régime permanent atteint, permet alors de calculer la résistance thermique. En effet, la résistance thermique R_{th} relie l'écart de température ΔT entre les faces d'un milieu plan et la densité de flux de chaleur q qui le traverse en régime permanent d'après l'équation :

$$R_{th} = \frac{\Delta T}{q} \quad (4.2)$$

par ailleurs la résistance thermique peut être reliée à la conductivité du matériau λ et l'épaisseur de l'échantillon e par l'équation :

$$R_{th} = \frac{e}{\lambda} \quad (4.3)$$

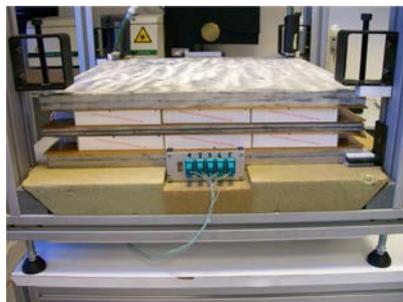


FIGURE 4.2 – Mesure de la résistance thermique des boîtes de vaccin par la technique de la plaque chaude gardée.

La valeur de résistance thermique des boîtes de vaccin mesurée par cette technique est de : $R_{th} = 0.41 \text{ m}^2 \text{ K W}^{-1}$, ce qui correspond à une conductivité thermique de : $\lambda = 0.106 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$.

Les caractéristiques thermiques du chargement ainsi évaluées sont regroupées dans le tableau 4.4.

λ	0.106	$\text{W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$
ρ	120	kg m^{-3}
c_p	2300	$\text{J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$

TABLE 4.4 – Caractéristiques thermiques du chargement constitué de boîtes de simili-vaccins.

4.1.2 Modèle SB1, profil froid

L'emballage de modèle SB1 est construit de manière à pouvoir contenir un carton de produits (soit 200 vaccins). La configuration retenue est illustrée sur la figure 4.3.

Le carton de produit est entouré d'un fourreau en carton doubles cannelures de 15 mm d'épaisseur. Des accumulateurs de froid sont disposés en dessous et au dessus du carton de produits, ainsi que sur chaque grand côté. Ces accumulateurs sont introduits au démarrage du test à 5° C .

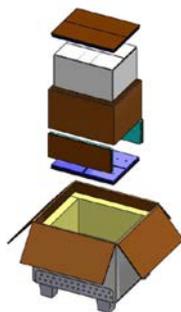


FIGURE 4.3 – Vue éclatée de la configuration de l’emballage SB1 testé.

Les dimensions extérieures de la caisse sont de : $0,62 \times 0,585 \times 0,45 \text{ m}^3$. Tous les panneaux de mousse polyuréthane ont une épaisseur de $0,06 \text{ m}$.

Le carton de produits a été stabilisé à 5°C pendant 24 heures avant le lancement du test, tandis que l’emballage a été stocké à température ambiante.

Les résultats issus de la simulation sont comparés à ceux issus de l’expérimentation sur la figure 4.4. Les valeurs mesurées sont celles de points situés sur les bords du chargement (correspondant à la deuxième couche de boîtes de vaccins).

On constate que les résultats sont globalement très proches les uns des autres. Le modèle permet de bien rendre compte des variations de température dans le chargement en réponse à la sollicitation du système par l’environnement. L’erreur moyennée sur l’ensemble des points de mesure est de $0,29^\circ \text{C}$.

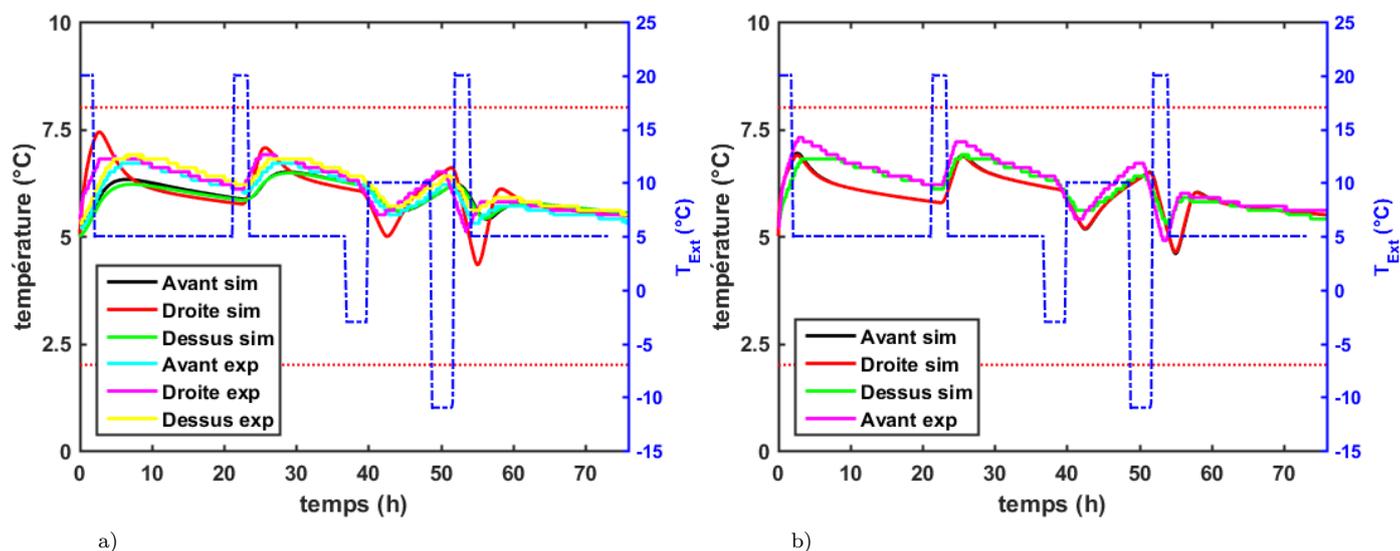


FIGURE 4.4 – Comparaison des résultats issus de la simulation avec ceux issus de l’expérimentation pour le cas de la SB1, a) points situés dans les milieux des faces, b) points situés dans les angles.

4.1.3 Modèle SB24, profil chaud

L’emballage de modèle SB24 est construit de manière à pouvoir contenir vingt-quatre cartons de produits (soit 4800 vaccins). La configuration retenue est illustrée sur la figure 4.5.

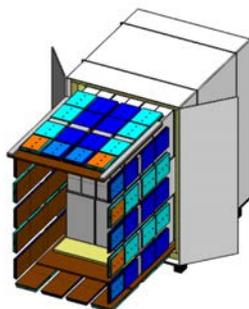


FIGURE 4.5 – Vue éclatée de la configuration de l’emballage SB24 testé.

Le chargement de 24 cartons constitue un parallélépipède de dimensions : $0,78 \times 0,99 \times 1,18 \text{ m}^3$. Des accumulateurs de froid sont disposés en dessous et au dessus du chargement, ainsi que sur les faces latérales. Des plaques de séparation en carton doubles cannelures, d’épaisseur 15 mm, sont insérées entre les accumulateurs et le chargement en dessous et au dessus. Tous les accumulateurs sont introduits au démarrage du test à -20° C .

Les dimensions extérieures de la caisse sont de : $1 \times 1,2 \times 1,46 \text{ m}^3$. Tous les panneaux de mousse polyuréthane ont une épaisseur de 0,06 m, à l’exception de la porte (le panneau avant), équipée d’une contreporte constituée d’un panneau de polyuréthane de 0,03 m d’épaisseur. On considèrera donc, pour la simulation, que le panneau avant est constitué d’un seul bloc de polyuréthane d’une épaisseur de 0,09 m.

Le chargement a été stabilisé à 5° C pendant 24 heures avant le lancement du test, tandis que l’emballage a été stocké à température ambiante.

Les résultats issus de la simulation sont comparés à ceux issus de l’expérimentation sur la figure 4.6. Les valeurs mesurées sont celles de points situés sur les bords du chargement (correspondant à la deuxième couche de boîtes de vaccins).

On constate que le modèle permet là encore de bien rendre compte des variations de température dans le chargement. Toutefois, on peut noter que dans le cas de la température du point situé au milieu de la face supérieure, les valeurs après une dizaine d’heures sont plus élevées pour la simulation que pour l’expérimentation. Cela est certainement dû au fait que la simplification choisie ne faisant intervenir dans la couche de matériaux à changement de phase que des échanges monodimensionnels, elle ne permet pas de bien rendre compte de l’effet inertiel. L’erreur moyennée sur l’ensemble des points de mesure est alors de $1,8^\circ \text{ C}$.

4.2 Exploitation du modèle

Le modèle développé a pour but l’aide à la décision lors de la recherche de solutions pour des configurations d’emballages répondant à un cahier des charges défini par le client souhaitant pouvoir transporter des produits thermosensibles. En ce sens, son utilisation consiste en la simulation d’un emballage, pour lequel on fait varier divers paramètres, afin d’observer les conséquences de ces variations en fonction des profils de température extérieure.

Généralement, les dimensions extérieures de l’emballage sont fixées par le mode de transport et la quantité totale de produits à transporter. Ainsi les dimensions au sol des emballages sont définies de manière à pouvoir être transportés sur des palettes de dimensions standard, largement utilisées par les transporteurs et à partir desquelles les différents conteneurs existant (camions, Reefers...) ont été dimensionnés. De même, la hauteur maximale d’un emballage est fixée par les transporteurs, qui doivent pouvoir disposer d’une marge de sécurité suffisante pour le chargement des conteneurs à l’aide de véhicules de manutention.

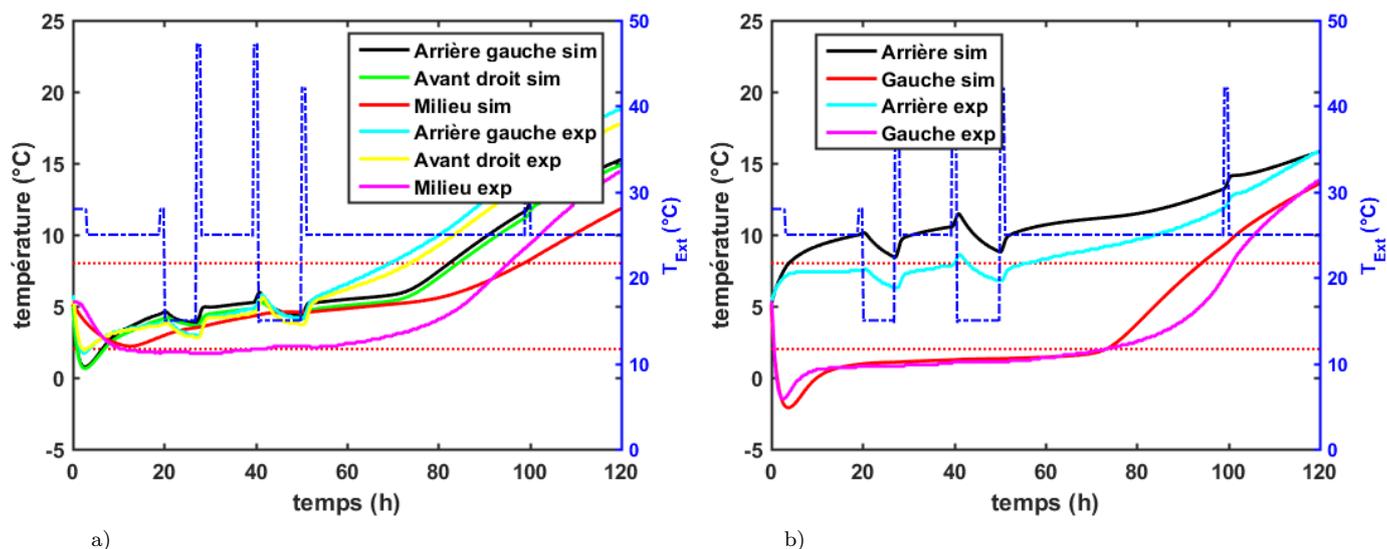


FIGURE 4.6 – Comparaison des résultats issus de la simulation avec ceux issus de l’expérimentation pour le cas de la SB24, a) points situés sur l’étage supérieur du chargement, b) points situés sur l’étage intermédiaire du chargement (au milieu).

Nous allons ici étudier les cas des deux modèles SB24 et SB1 tels que décrits précédemment, et qui répondent bien à ces impératifs de dimensionnement. Nous allons ici faire varier les valeurs de divers paramètres afin d’estimer leur influence sur les performances des emballages. On pourra s’intéresser notamment au temps de conservation des produits, correspondant au temps avant que la température du chargement à l’intérieur de l’emballage ne sorte des limites pré-établies pour la bonne conservation des produits. Nous allons ici considérer le cas d’un intervalle de conservation compris entre 2°C et 8°C , celui-ci étant le plus utilisé. Il peut aussi être intéressant d’observer les valeurs des températures maximales et minimales atteintes lors du transport, car un dépassement de $0,1^{\circ}\text{C}$ n’aura de fait pas les mêmes conséquences qu’un dépassement de plusieurs degrés.

4.2.1 Perméabilité de l’emballage

Les transferts de matière (en l’occurrence l’air) à travers l’enveloppe de l’emballage ont pour moteur le différentiel de pression entre l’extérieur et l’intérieur. On considère généralement trois origines possibles à ce différentiel de pression : les variations de la pression atmosphérique, le vent, et le tirage thermique, de sorte que ce différentiel s’exprime comme :

$$\Delta P = P_{\text{Ext}} - P_{\text{Int}} + (\rho_{\text{Int}} - \rho_{\text{Ext}})gz + \frac{1}{2}\rho_{\text{Ext}}\bar{u}^2 \quad (4.4)$$

Les variations de pression atmosphériques sont généralement plutôt faibles et étalées dans le temps. Toutefois, dans le cas du transport des emballages, ceux-ci sont amenés à transiter par plusieurs moyens de transport, et notamment l’avion. Or la montée à l’altitude de croisière d’un avion et la descente pour l’atterrissage supposent de fortes variations de pression en raison de la variation d’altitude et qui prennent place dans des temps relativement courts. Ainsi, les mesures de pression effectuées par Rozak *et al.* [4] pour le besoin de leur étude montre que les variations de pression les plus importantes correspondent aux périodes d’acheminement par avion. Les valeurs de pression sont alors comprises entre 650 mmHg et 775 mmHg (86660 Pa et 103320 Pa), soit une variation d’environ 0.17 Bar.

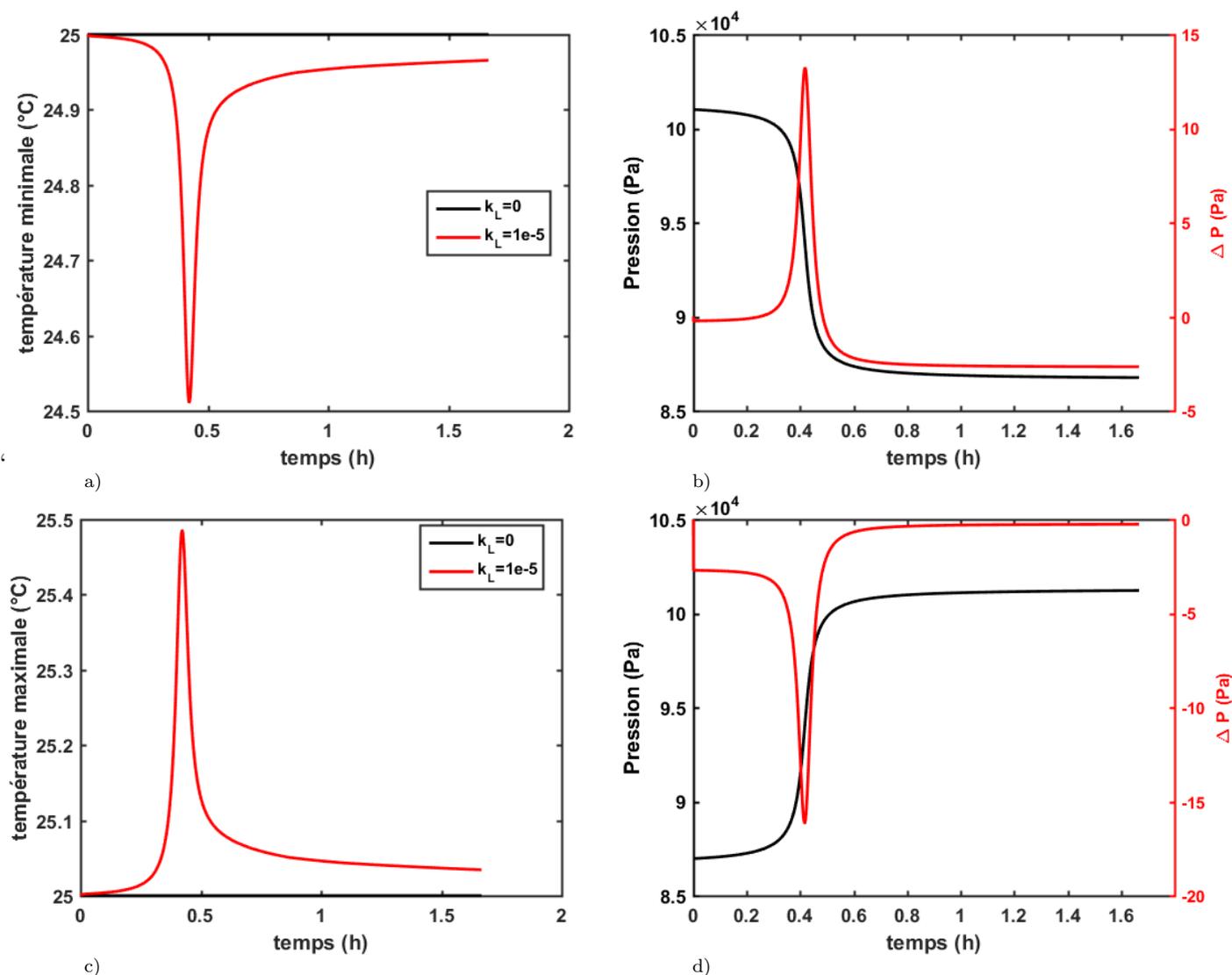


FIGURE 4.7 – Comparaison des modèles avec et sans présence de débit d’air, (a) température minimale au sein du chargement lors du décollage, (b) Variation de pression lors du décollage, (c) température maximale au sein du chargement lors de l’atterrissage, (d) Variation de pression lors de l’atterrissage.

Sur la figure 4.7 sont comparés les résultats issus de la simulation numérique avec et sans présence de débit d’air à travers l’enveloppe ($k_L = 0$ et $k_L = 1 \cdot 10^{-5}$) pour le cas d’un emballage SB24 chargé, sans MCP, soumis à une température constante ($T_{Ext} = 25^\circ\text{C}$) égale à la température de consigne et à une variation de la pression extérieure correspondant à un décollage et un atterrissage lors d’un transport par voie aérienne. On constate que les températures minimale et maximale au sein du chargement présentent une nette variation lors de la diminution (ou de l’augmentation) de la pression extérieure, d’environ 0.5°C . Une fois que la pression extérieure se stabilise, la température tend à se rééquilibrer autour de la température extérieure. Cette variation de température peut s’expliquer par l’effet de détente ou de compression d’un gaz occupant un volume constant. En effet, lors du transport, le volume d’air intérieur demeure constant, dans ces conditions, et d’après la loi des gaz parfaits, la diminution de la pression d’un volume de gaz entraîne la diminution de sa température et inversement. Le chargement au contact de ce volume d’air en subira alors les variations de température.

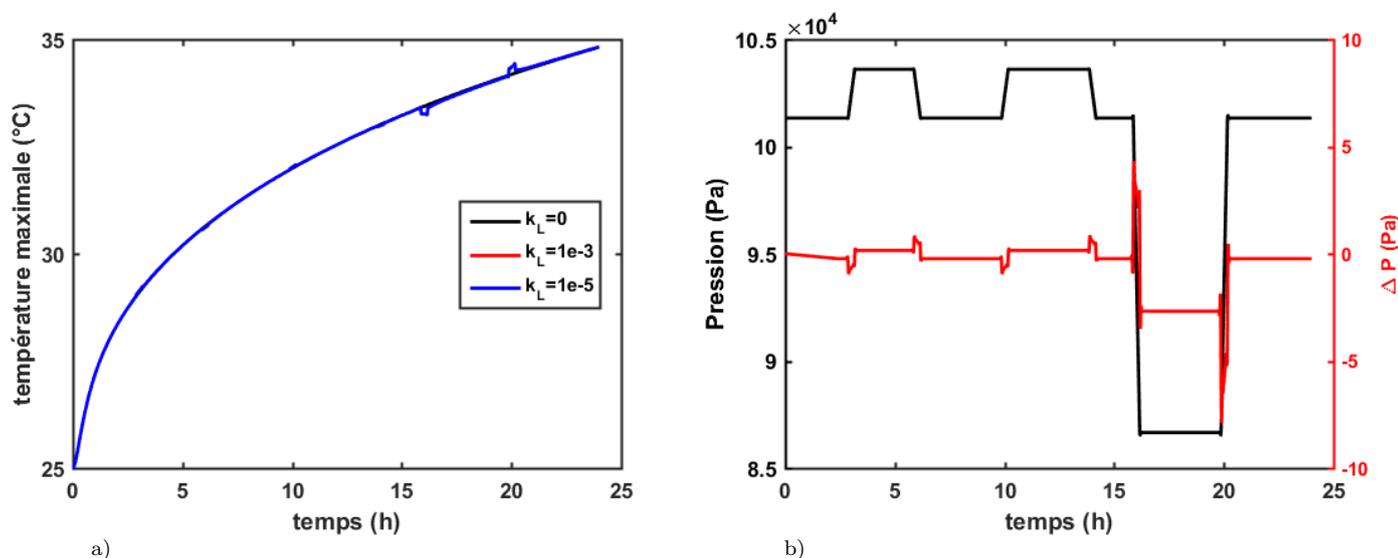


FIGURE 4.8 – Comparaison des modèles pour différentes valeurs de coefficient de perméabilité et soumis à un profil de pression variable, (a) température maximale au sein du chargement, (b) Variation de pression au cours du transport.

Outre cet effet de compression/détente, la température de l'air intérieur sera amenée à changer par l'introduction d'une quantité d'air extérieur de température différente, de part la variation de la pression extérieure ou par l'effet de tirage thermique. Ainsi, sur la figure 4.8 sont montrés les résultats de la simulation du transport d'un emballage soumis à un profil de température constant ($T_{\text{Ext}} = 40^\circ\text{C}$) et un profil de pression variable.

On remarque en premier lieu que les variations de températures sont très ponctuelles (correspondant exactement aux variations de pression) et très faibles, et se rééquilibrent très rapidement au même niveau que dans le cas sans débit d'air à travers l'enveloppe, de sorte qu'à la fin des 24 heures de transport, la différence entre le cas avec débit d'air et sans débit d'air est de l'ordre de $5 \cdot 10^{-4}^\circ\text{C}$. Ainsi la présence de l'effet de tirage thermique ne semble pas affecter les résultats, c'est alors l'effet de compression/détente qui semble le plus impactant. Le calcul du différentiel de pression dû à l'effet de tirage thermique nous donne en effet une valeur de 2 Pa pour un différentiel de température de 35°C , qui est négligeable devant les valeurs de variation de pression atmosphériques (supérieures à 100 Pa).

En second lieu, on peut remarquer que les résultats sont identiques pour les deux valeurs de coefficient de perméabilité non nulles testées, et ce malgré un facteur de 10 entre les deux valeurs. La question se pose alors de l'effet de la valeur du coefficient de perméabilité sur les variations de températures. En reprenant les cas simulés précédemment du décollage et de l'atterrissage d'un avion, considérant que l'effet de compression/détente est le moteur principal des échanges de matière à travers l'enveloppe, on peut réitérer ces simulations pour plusieurs valeurs de coefficient. Les résultats de ces simulations sont regroupés sur la figure 4.9. On peut alors observer, d'une part, qu'en plus d'une différence d'amplitude, la variation du coefficient de perméabilité engendre un léger déphasage de la réponse, d'autre part, pour des valeurs supérieures à $10^{-7} \text{ m}^3 \text{ Pa}^{-1} \text{ s}^{-1}$, il n'y a plus de différence entre les divers profils de température. On peut expliquer cet effet par le fait que plus le coefficient de fuite est élevé et plus la pression se rééquilibre vite entre l'intérieur et l'extérieur, mais au final la pression à l'intérieur de la caisse ne peut tout simplement pas évoluer plus vite que la pression extérieure. Et donc, à partir du moment où l'on n'observe plus de différence entre pressions externe et interne, alors les profils de température s'harmonisent. En revanche, pour que la variation de pression extérieure n'ait plus d'influence sur la température intérieure, on observe que le coefficient de perméabilité doit

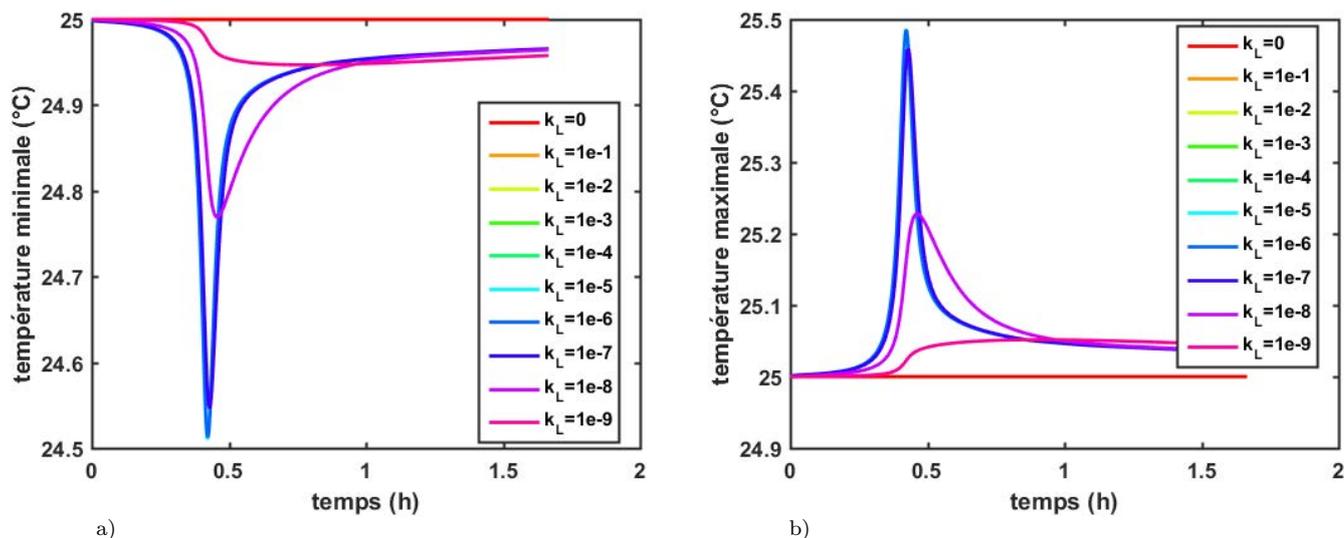


FIGURE 4.9 – Comparaison des modèles pour différentes valeurs du coefficient de perméabilité et soumis à un profil de température constant, (a) température minimale du chargement lors du décollage, (b) température maximale du chargement lors de l’atterrissage.

être inférieur à $10^{-9} \text{ m}^3 \text{ Pa}^{-1} \text{ s}^{-1}$.

On peut retrouver ce résultats via le calcul. En effet, il est possible de déterminer le coefficient de fuite en dessous duquel le système devient « sourd » aux sollicitations extérieures de pression. Soit donc le coefficient à partir duquel le temps nécessaire à l’équilibrage entre la pression extérieure et la pression intérieure du système devient supérieur au temps d’évolution de la température intérieure.

On considère alors le cas fictif où le système étudié est soumis à une pression extérieure constante P_{ext} supérieure à la pression interne, à l’instant initial la différence de pression entre l’extérieur et l’intérieur est ΔP_0 et la température du système est fixe. Pour simplifier les calculs, on peut considérer un écoulement de fuite laminaire, auquel cas l’exposant n du différentiel de pression dans l’expression du débit massique d’air à travers l’enveloppe (eq. 2.4) est égal à 1. Si l’on cherche à déterminer la variation de pression interne du système, alors cette même équation peut s’écrire (à l’aide de la loi des gaz parfaits) :

$$\frac{dP}{dt} = \frac{P_{\text{ext}}}{V} k_L (P_{\text{ext}} - P) \quad (4.5)$$

de plus on a pour condition initiale :

$$P(t = 0) = P_{\text{ext}} - \Delta P_0 \quad (4.6)$$

La résolution de ce système nous permet de déterminer la forme de P :

$$P(t) = -\Delta P_0 e^{-\frac{P_{\text{ext}} k_L}{V} t} + P_{\text{ext}} \quad (4.7)$$

Le temps caractéristique (constante de temps de l’équation différentielle 4.5 τ est donné par :

$$\tau = \frac{V}{P_{\text{ext}} k_L} \quad (4.8)$$

On constate que le temps caractéristique du système est bien fonction du coefficient de perméabilité, et compte tenu des paramètres du système considéré (V et P_{ext} constants), c’est

ce même coefficient qui conditionnera la valeur du temps caractéristique. Si maintenant on considère que les principales variations de pressions sont dues au décollage et à l'atterrissage des avions de fret, lesquels se déroulent à des échelles de temps de l'ordre de la demi-heure, alors on cherche pour quelles valeurs de k_L on a $\tau \gg 1800$:

$$\frac{V}{P_{\text{ext}} k_L} \gg 1800 \leftrightarrow k_L \ll \frac{V}{P_{\text{ext}} \cdot 1800} \simeq 1.65 \cdot 10^{-9} \text{ m}^3 \text{ Pa}^{-1} \text{ s}^{-1} \quad (4.9)$$

Ainsi pour que les effets de la variation de la pression extérieure deviennent négligeables il faut que le coefficient de perméabilité soit inférieur à un ordre de $10^{-9} \text{ m}^3 \text{ Pa}^{-1} \text{ s}^{-1}$.

On peut conclure de ces résultats que si les infiltrations d'air à l'intérieur de la caisse peuvent faire varier la température du chargement, ces variations sont ponctuelles et de faible amplitude. Elle deviennent inquiétantes lorsque les températures fleurissent avec les limites de conservations, risquant alors de provoquer des excursions. En dehors de ces cas là, les conséquences sur le long terme sont minimales. Le moteur de ces infiltrations est la différence de pression entre l'extérieur de l'emballage et l'intérieur, l'effet de tirage thermique étant négligeable de par la faible hauteur du système, ce sont les variations de pression atmosphérique et le vent qui seront l'origine du différentiel de pression. Pour que les variations de pression n'aient pas d'effet sur les températures à l'intérieur de la caisse, il faudrait une valeur de coefficient de perméabilité extrêmement faible, qui n'est pas envisageable au vu du processus de fabrication des emballages (assemblage par collage de panneaux de polyuréthane). Les valeurs de coefficient de perméabilité mesurées lors des campagnes expérimentales sont comprises entre $2.78 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3 \text{ Pa}^{-2/3} \text{ s}^{-1}$ et $2.53 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3 \text{ Pa}^{-2/3} \text{ s}^{-1}$, valeurs pour lesquelles il faudrait une variation très rapide de la pression pour que l'on puisse voir des différences de réponses.

4.2.2 Densité du chargement

L'expression de l'équation générale de la chaleur telle qu'utilisée dans des échanges purement conductifs est fortement dépendante de la capacité thermique du système considéré. Cette capacité thermique s'exprime ici comme le produit de la densité ρ par la capacité thermique massique c_{th} :

$$\rho c_{th} \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \frac{dT^2}{dx^2} \quad (4.10)$$

De fait, la variation de la valeur de la densité du chargement aura donc pour effet de faire varier sa capacité thermique. La capacité thermique d'un matériau correspond à sa capacité à absorber ou restituer de l'énergie sous l'effet d'une variation de température, on peut donc en déduire qu'une valeur plus élevée de densité aura pour conséquence une augmentation de l'inertie thermique du chargement.

La figure 4.10 montre les résultats de la simulation du modèle SB24 soumis à un profil de température correspondant à un transport ayant lieu en été, pour deux valeurs de densité du chargement. Les accumulateurs de froids latéraux sont introduits à 5°C et les accumulateurs supérieurs et inférieurs à -20°C . On peut alors en effet constater qu'une densité plus élevée rend le chargement moins sensible aux variations de température extérieure, le chargement possédant une plus grande inertie, il faut alors une énergie plus importante pour le faire changer de température.

Cela signifie aussi que la nature du chargement aura des conséquences sur la capacité de conservation de l'emballage.

Sur la figure 4.11 sont montrées les valeurs du temps de conservation et des températures maximale et minimale, en fonction de la densité du chargement. On peut remarquer que le temps de conservation en fonction de la densité de chargement se présente sous la forme d'une fonction

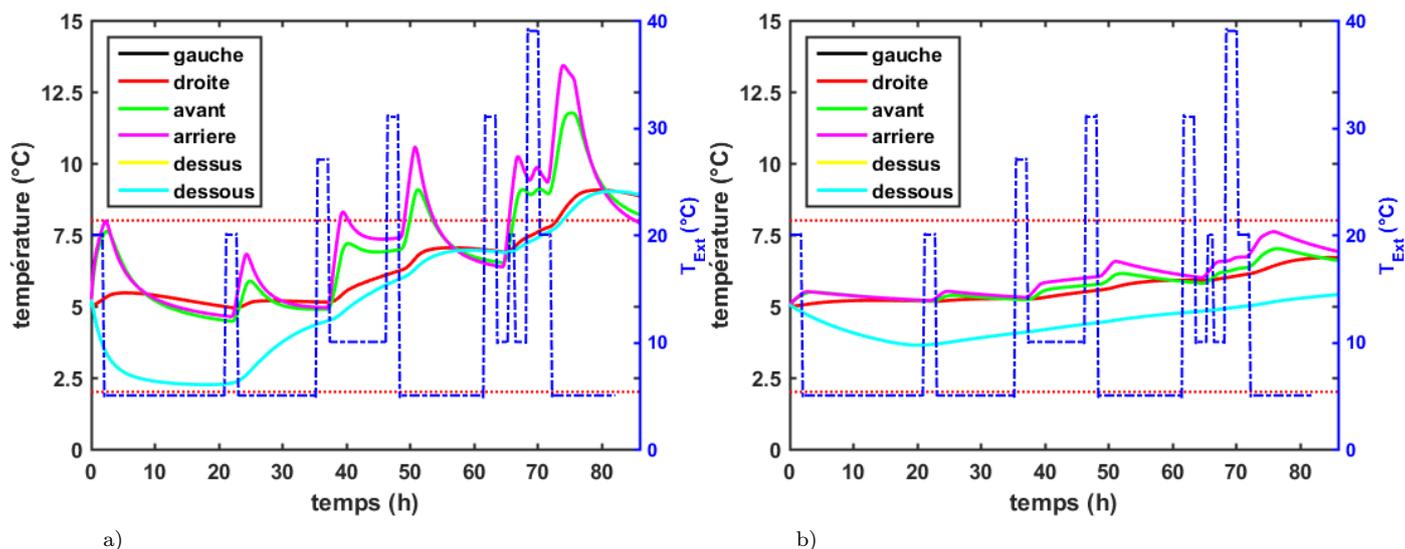


FIGURE 4.10 – Simulation des températures au sein du chargement d'une caisse PSF SB24, a) $\rho_{Ch} = 50 \text{ kg m}^{-3}$, b) $\rho_{Ch} = 500 \text{ kg m}^{-3}$.

à plusieurs paliers. Les paliers aux environs de 40 h, 50 h et 70h correspondent à la présence de pics chauds importants sur le profil de température extérieure, lorsque le temps de conservation est égale à 86h cela signifie que les produits sont restés dans les limites de conservation durant la totalité du trajet. Augmenter la densité du chargement pour ce profil a donc pour effet de décaler le moment de sortie des limites d'un pic chaud à un autre augmentant alors le temps de conservation en fonction du temps entre ces pics chauds. La valeur de la température minimale augmente avec la densité car elle correspond à la valeur atteinte lors du pic froid présent au démarrage du test et dû à l'influence des accumulateurs froids proches du chargement. Ainsi des produits de plus grande densité, moins sensibles aux variations, résisteront mieux au froid apporté par les accumulateurs. La valeur de la température maximale quant à elle diminue avec l'augmentation de la densité.

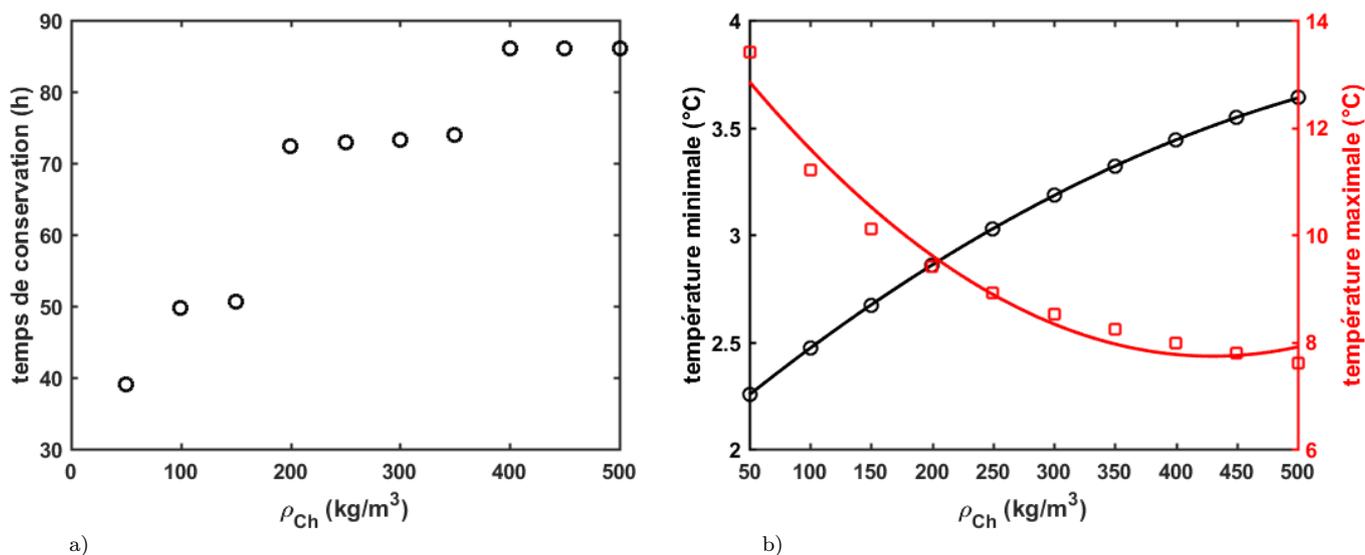


FIGURE 4.11 – Résultats d'une série de simulation pour la PSF SB24 faisant varier la densité du chargement pour un profil de température d'été, a) temps de conservation, b) température maximale au sein du chargement, c) température minimale au sein du chargement.

Afin de s'affranchir de l'effet des pics de chaleurs (se traduisant par des paliers dans la fonction de temps de conservation), on réalise les mêmes simulations pour un profil extérieur de température constante égale à $30\text{ }^{\circ}\text{C}$, dont les résultats sont alors visibles sur la figure 4.12. La fonction de temps de conservation est alors clairement linéaire vis à vis de la densité du chargement, et le temps de conservation évolue proportionnellement à la densité selon un facteur $S_{\rho_{\text{Ch}}} = 2.44 \cdot 10^{-2} \text{ h/kg m}^{-3}$.

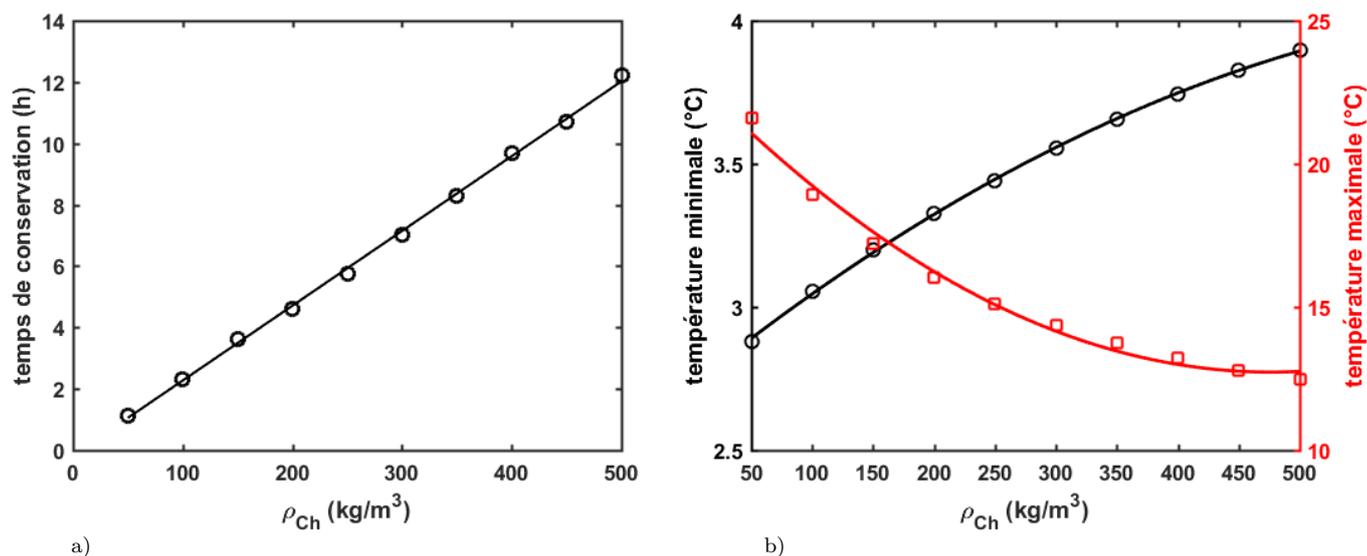


FIGURE 4.12 – Résultats d'une série de simulation pour la PSF SB24 faisant varier la densité du chargement pour un profil de température extérieure constant à $30\text{ }^{\circ}\text{C}$, a) temps de conservation, b) température maximale au sein du chargement, c) température minimale au sein du chargement.

L'opération peut être répétée pour le cas du modèle SB1 soumis à un profil hiver. Dans ce cas toutefois, les produits ne sortent jamais des limites de conservation durant la totalité du test, aussi le temps de conservation est-il toujours égal à 76 h. Avec l'augmentation de la densité, le refroidissement des produits en réponse aux températures négatives s'atténue et la température minimale finit par être égale à la température initiale du chargement (fig. 4.13,a). De son côté, la température maximale diminue avec l'augmentation de la masse volumique du chargement indiquant ainsi un resserrement des températures (fig. 4.13,b).

Pour forcer une sortie de la température intérieure des limites de conservation afin d'observer l'évolution du temps de conservation, on peut imposer à l'emballage un profil de température constant égal à $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$. Les résultats de cette simulation sont présentés sur la figure 4.14. On observe une fois encore une évolution linéaire du temps de conservation par rapport à la densité du chargement, selon un facteur de $S_{\rho_{\text{Ch}}} = 2.15 \cdot 10^{-2} \text{ h/kg m}^{-3}$.

4.2.3 Conductivité des séparations

Les séparations sont des éléments placés entre les blocs de matériaux à changement de phase et les produits, de manière à protéger ces derniers lorsque les MCP sont introduits à des températures inférieures aux limites de conservation. L'effet attendu de l'utilisation de panneaux de matériaux de faible conductivité thermique (polyuréthane, panneaux VIP) est la réduction des pics froids au démarrage sur les sondes présentes sur les faces supérieures et inférieures.

Les résultats des simulations effectuées en faisant varier les valeurs de conductivité du matériau constituant les séparations de l'emballage PSF SB24 sont visibles sur la figure 4.15.

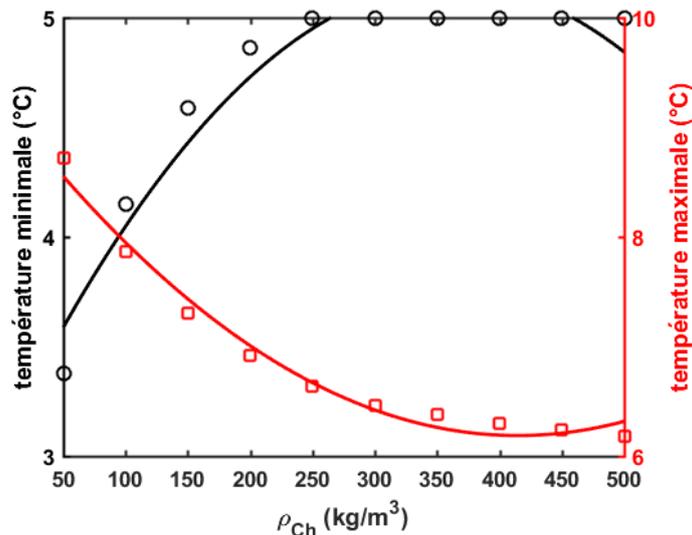


FIGURE 4.13 – Résultats d’une série de simulation pour la PSF SB1 faisant varier la densité du chargement pour un profil de température d’hiver.

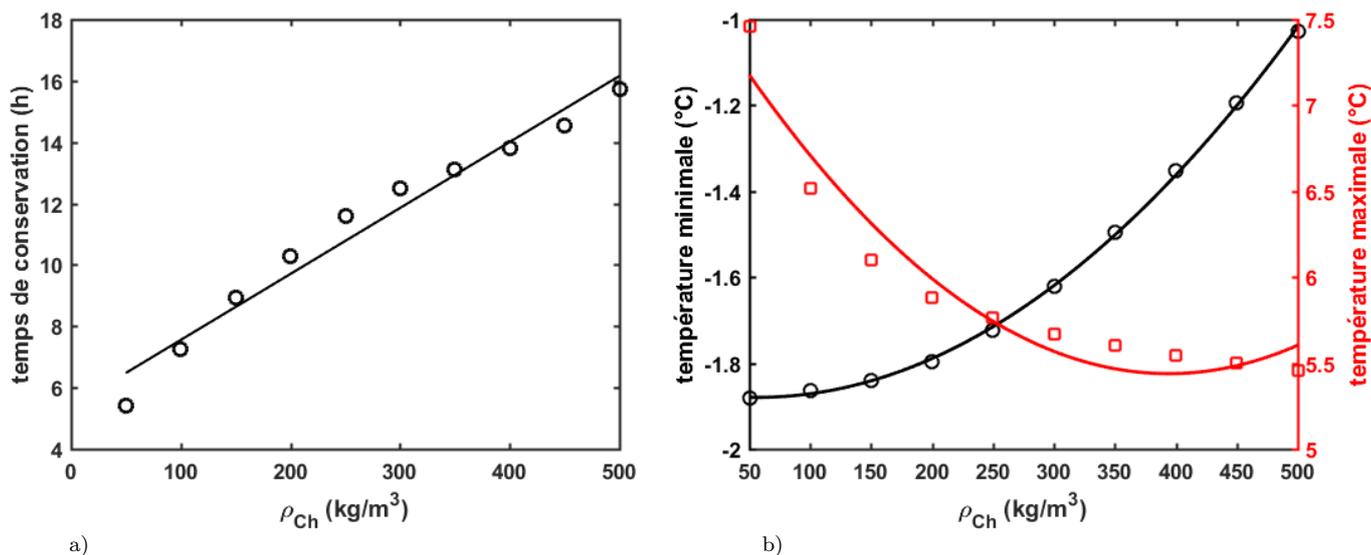


FIGURE 4.14 – Résultats d’une série de simulation pour la PSF SB1 faisant varier la densité du chargement pour un profil de température extérieur constant à -10°C , a) temps de conservation, b) température maximale au sein du chargement, c) température minimale au sein du chargement.

On peut alors constater que si le pic froid, observable sur les faces supérieure et inférieure en début de test, est bien réduit avec la diminution du coefficient de conductivité de la séparation, en revanche les valeurs atteintes par les pics chauds présents à l’avant et à l’arrière de la caisse sont elles plus élevées. Cela s’explique par le fait que lorsque l’on diminue la conductivité thermique des séparations, la transmission du froid vers le chargement est réduite d’autant, et donc les faces avant et arrière, n’étant pas protégées par des blocs de MCP et étant moins refroidies par les blocs supérieurs et inférieurs, subissent plus fortement les effets de la chaleur provenant de l’extérieur par conduction à travers le corps de la caisse.

Ce constat se retrouve ensuite dans les valeurs des températures maximales atteintes par le chargement, visibles sur la figure 4.16. En effet, on peut alors observer que l’augmentation de

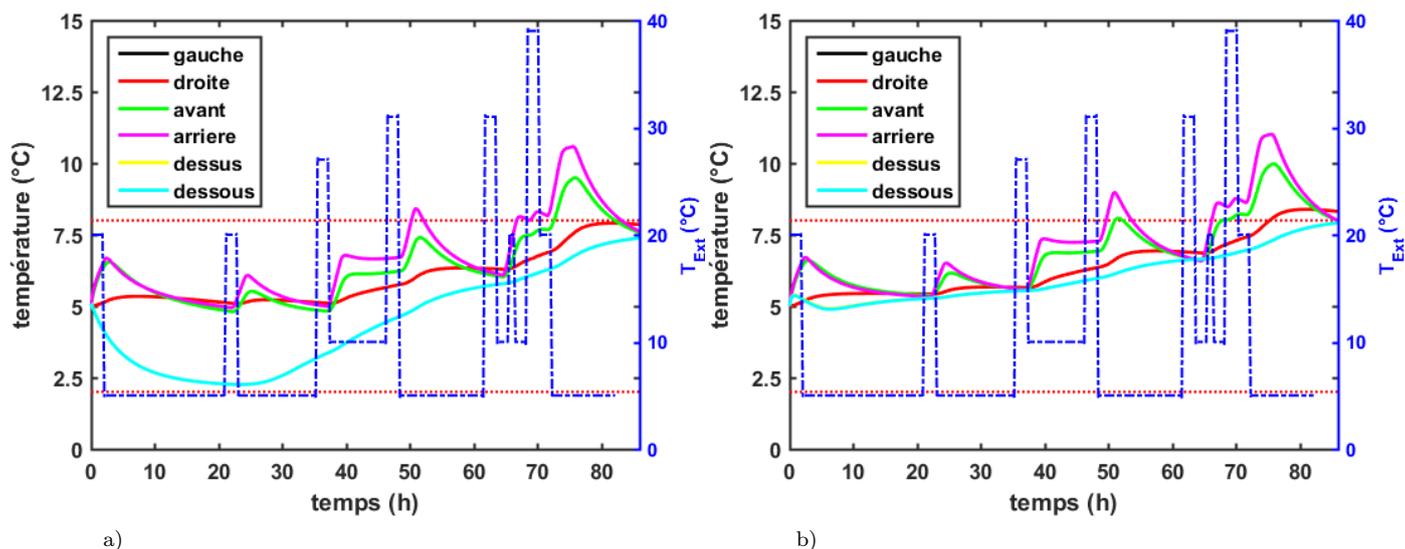


FIGURE 4.15 – Simulation des températures au sein du chargement d'une caisse PSF SB24, a) $\lambda_{\text{Sep}} = 0.1 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$, b) $\lambda_{\text{Sep}} = 0.01 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$.

la valeur de la conductivité des séparations s'accompagne d'une diminution des températures maximales atteintes par le chargement, ainsi que d'une augmentation du temps de conservation des produits lors du transport.

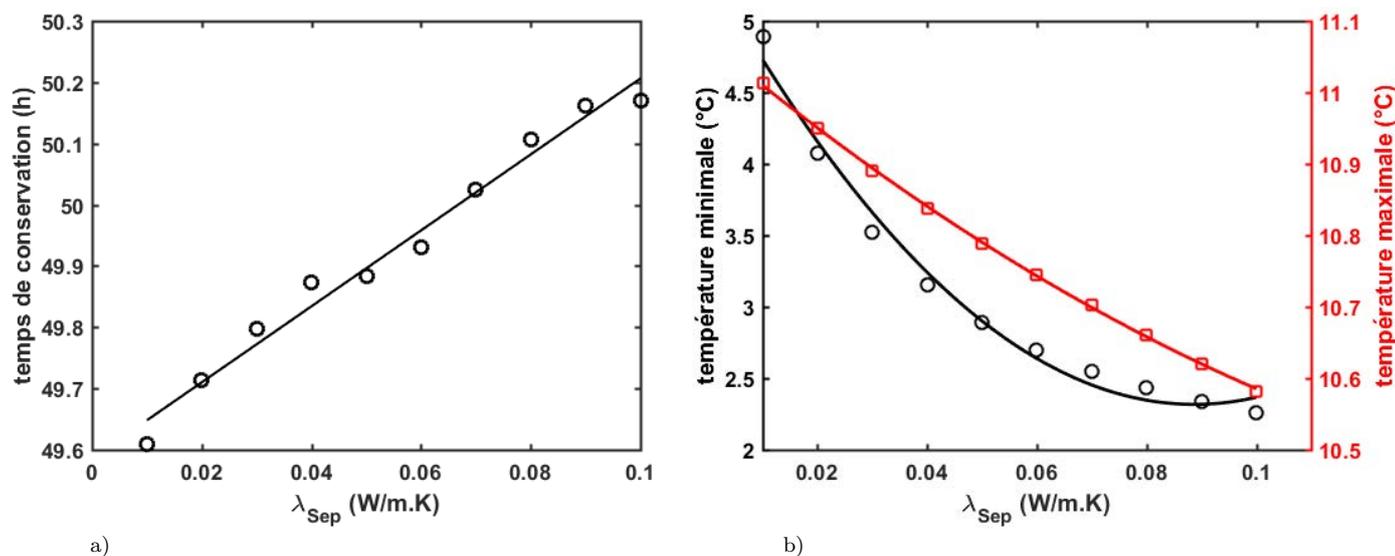


FIGURE 4.16 – Résultats d'une série de simulation pour la PSF SB24 faisant varier la conductivité des séparations pour un profil de température d'été, a) temps de conservation, b) température maximale au sein du chargement, c) température minimale au sein du chargement.

Dans le cas de la SB1 en revanche, en l'absence de MCP à température négative, il n'y a pas de pic froid à absorber ni même de froid à transmettre au chargement pour le bon déroulement du transport. Les résultats présentés sur la figure 4.17 permettent de constater qu'ici les séparations agissent uniquement comme une couche isolante supplémentaire pour protéger les produits des températures extérieures. Ainsi l'augmentation de la conductivité des séparations s'accompagne d'une augmentation des températures maximales observées au sein du chargement.

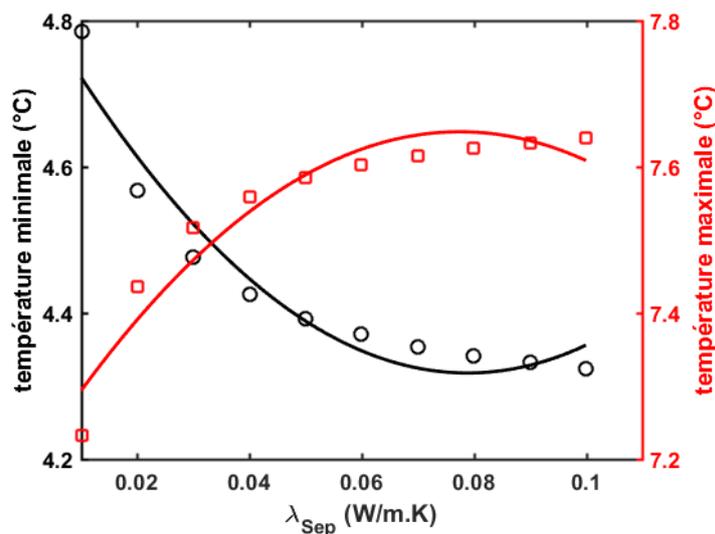


FIGURE 4.17 – Résultats d’une série de simulation pour la PSF SB1 faisant varier la conductivité des séparations pour un profil de température d’hiver, a) température maximale au sein du chargement, b) température minimale au sein du chargement.

4.2.4 Epaisseur des séparations

On a pu remarquer que la diminution de la conductivité des séparations, si elle permettait effectivement de protéger le chargement des accumulateurs froids, avait pour effet secondaire d’augmenter la valeur des pics chauds sur les faces avant et arrière du chargement. Ces faces ne sont protégées de la température extérieure que par le corps de l’emballage, et ont besoin qu’une partie du froid des accumulateurs leur soit transmise pour résister aux pics chauds.

Il est donc nécessaire d’utiliser pour les séparations un matériau qui ne soit pas trop isolant pour permettre au froid d’être transmis au chargement, mais suffisamment pour le protéger des pics froids en démarrage. Une autre paramètre permettant de faire varier cette isolation est l’épaisseur du panneau de séparation. Ainsi pour un matériau donné, une plus grande épaisseur fournira une meilleure isolation. Compte tenu des résultats des simulations pour plusieurs valeurs de conductivité thermique, on peut estimer que la conductivité n’a pas nécessairement à être le critère de choix du matériau constituant la séparation. Il est alors possible de sélectionner un matériau en fonction de son prix par exemple.

Le carton est un matériau bon marché, disponible en abondance et qui possède une conductivité thermique dans la gamme de celles simulées. Sur la figure 4.18, on peut visualiser le temps de conservation des produits pour plusieurs épaisseurs de panneaux de carton constituant les séparations. On peut alors constater que la présence de pics froids diminue drastiquement le temps de conservation des produits pour une épaisseur de panneaux de carton inférieure à 0.75 cm, pour des épaisseurs supérieures, le pic froid au démarrage semble suffisamment réduit pour ne plus impacter le temps de conservation.

4.2.5 Température de conditionnement de l’emballage

Selon les capacités logistiques, il est parfois possible de stabiliser les emballages à la même température que les produits (5 °C) avant le démarrage. On peut observer sur la figure 4.19 les résultats de deux simulations d’une caisse SB24, la première stabilisée à 5 °C et la seconde stabilisée à 20 °C (assimilée à la température ambiante de l’entrepot). On constate que l’effet d’une différence de températures de conditionnement de l’emballage ne se ressent que dans les premières heures du transport, augmentant les températures mesurées à l’avant et à l’arrière

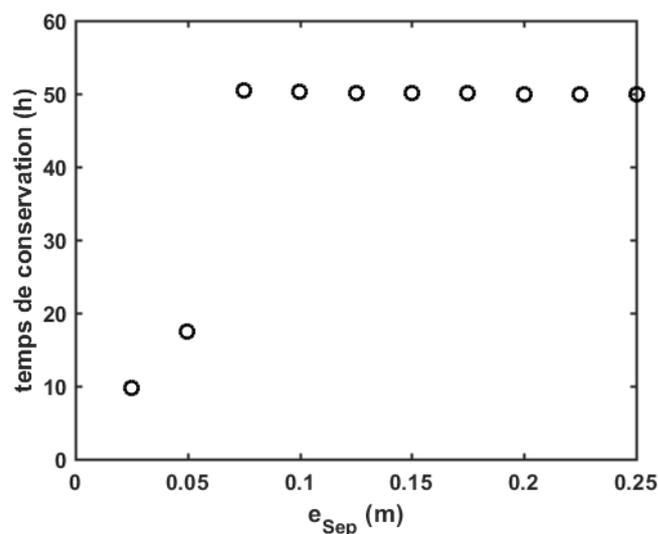


FIGURE 4.18 – Résultats d’une série de simulation pour la PSF SB24 faisant varier l’épaisseur du panneau de séparation en carton pour un profil été.

du chargement lorsque l’on augmente la température de conditionnement. Les autres faces du chargement, protégées par la présence de matériaux à changement de phase, n’affichent pas de différences notables.

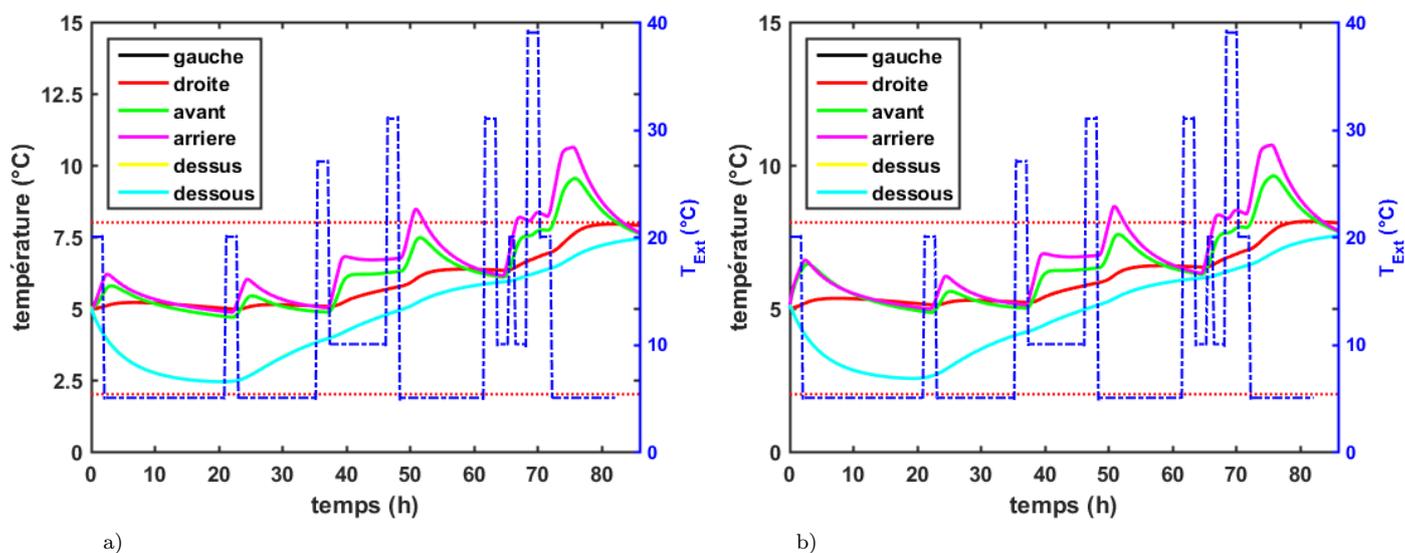


FIGURE 4.19 – Simulation des températures au sein du chargement d’une caisse PSF SB24, a) emballage conditionné à 5 °C, b) emballage conditionné à 20 °C.

La même observation peut être faite dans le cas d’une SB1 (fig. 4.20).

Ainsi la température de conditionnement de l’emballage influence majoritairement les faces du chargement qui ne sont pas protégées par des MCP, elle a pour effet de faire varier le pic chaud au démarrage présenté par ces faces. L’effet sur le long terme (le temps de conservation) est négligeable, mais il convient néanmoins de s’assurer que les températures de conditionnement restent raisonnables, une température trop élevée pouvant provoquer des excursions importantes en début de transport.

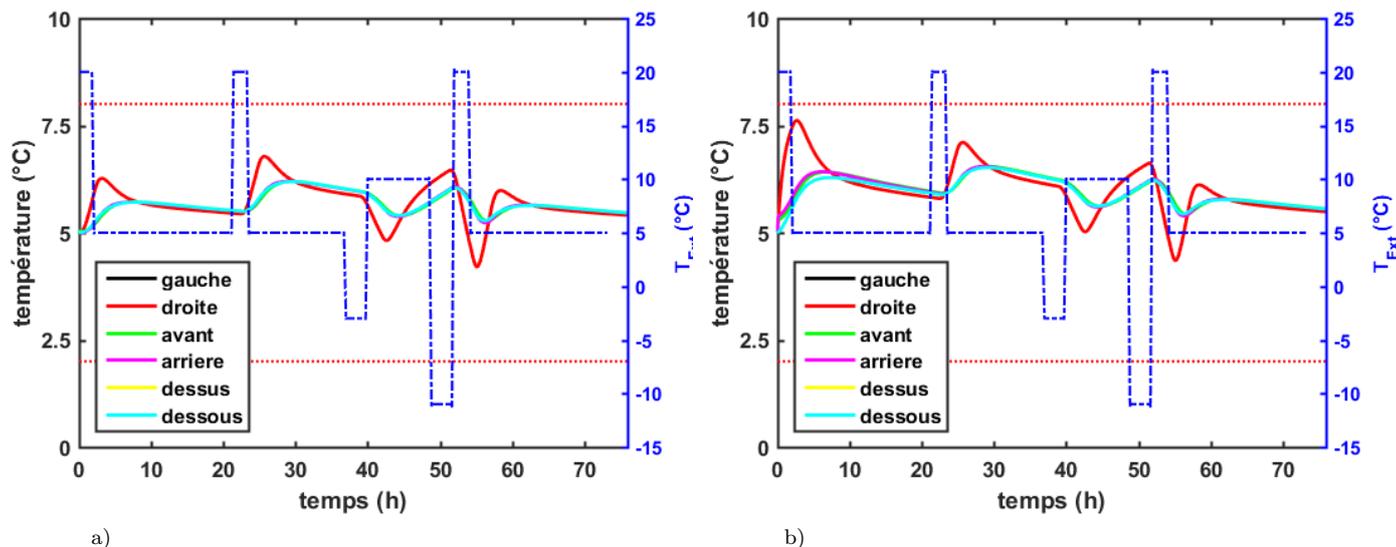


FIGURE 4.20 – Simulation des températures au sein du chargement d’une caisse PSF SB1, a) emballage conditionné à 5 °C, b) emballage conditionné à 20 °C.

4.2.6 Température d’introduction des accumulateurs froids

Les accumulateurs froids placés au dessus et au dessous du chargement ont pour rôle d’apporter au système la quantité de froid nécessaire à l’absorption de la chaleur provenant de l’extérieur. Cette quantité de froid est emmagasinée dans les matériaux à changement de phase, sous forme de chaleur latente, et est ensuite libérée lors du changement de phase. Cette quantité de froid est donc directement dépendante de la valeur de la chaleur latente du MCP. Il convient alors de s’assurer que les accumulateurs froids soient bien solidifiés au moment de l’introduction dans l’emballage de manière à s’assurer que le système possède la quantité de froid nécessaire au maintien des conditions de transport.

Généralement, les accumulateurs de froid sont congelés à la température de -20 °C. En effet, afin de s’assurer d’une solidification efficace des matériaux à changement de phase, il convient d’imposer un différentiel de température important, sans quoi un effet de surfusion dû à une descente en température trop lente peut apparaître, auquel cas les accumulateurs ne se solidifient pas et le froid n’est pas emmagasiné. Par ailleurs, les installations frigorifiques présentes sur les sites de chargement sont le plus couramment réglées pour des températures standards, à savoir 5 °C pour les produits, et -20 °C pour les accumulateurs.

On peut toutefois se demander de quelle manière l’introduction d’accumulateurs congelés à des températures différentes pourrait faire varier les résultats sur les températures du chargement. Les résultats des simulations correspondantes sont regroupés sur la figure 4.21. On peut alors remarquer que le temps de conservation varie très peu à partir du moment où l’on est assuré que les MCP sont solidifiés et à température strictement négative (compte tenu du fait que la séparation est telle qu’elle est suffisante pour réduire l’effet du pic froid au démarrage). De même, si on remarque une augmentation des températures minimales et maximales au sein du chargement, cette augmentation reste de faible amplitude jusqu’à ce que l’on introduise des accumulateurs non solidifiés. On peut en déduire que c’est bel est bien l’effet de libération de froid lors de la fusion qui permet de stabiliser les températures au sein de la caisse, tandis que la température initiale des MCP joue un rôle limité dans le bon déroulement du transport. La température initiale des MCP influencera principalement les premières heures du transport, jusqu’à ce que la surface des accumulateurs ait atteint la température de changement de phase, où l’on pourra observer des pics froids.

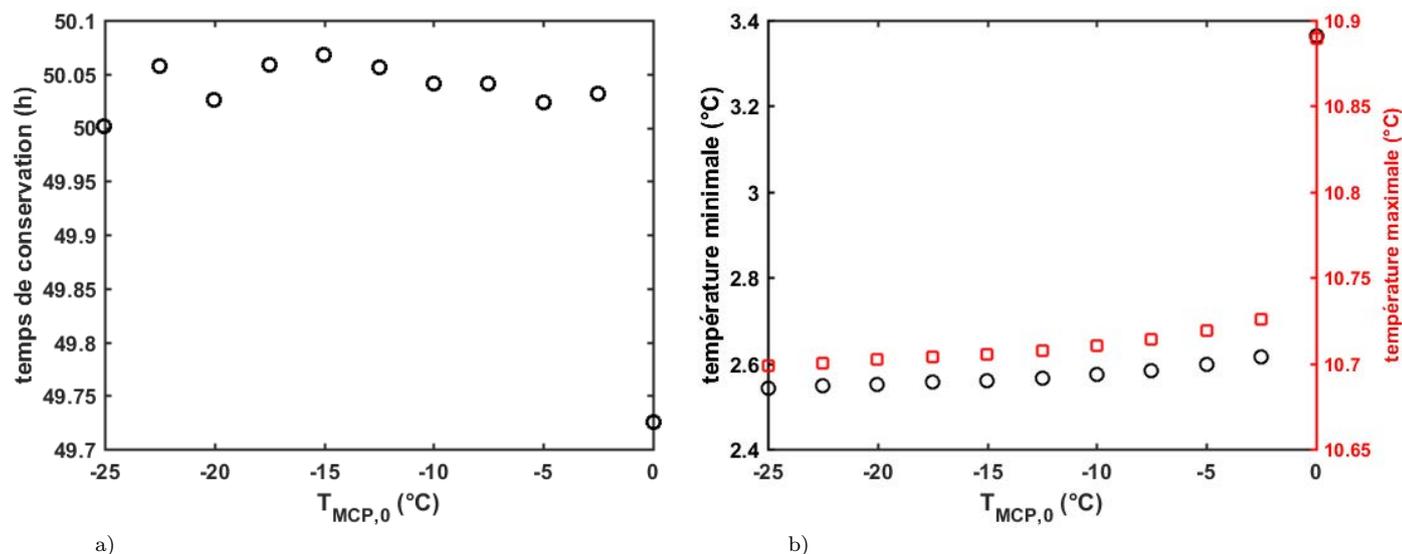


FIGURE 4.21 – Résultats d’une série de simulation pour la PSF SB24 faisant varier la température d’introduction des accumulateurs froids pour un profil de température d’été, a) temps de conservation, b) température maximale au sein du chargement, c) température minimale au sein du chargement.

4.2.7 Nature des matériaux à changement de phase

On a pu constater que c’est l’effet d’absorption et de libération de la chaleur par les matériaux à changement de phase qui constitue l’un des éléments clés des performances de l’emballage. Cet effet est conditionné par deux des propriétés thermiques des matériaux : la température de changement de phase et la chaleur latente.

On peut s’intéresser dans un premier temps à la réponse de l’emballage en fonction de la température de changement de phase des MCP. Sur la figure 4.22 sont montrés les résultats de simulations pour plusieurs valeurs de température de fusion.

Les courbes de température au sein du chargement permettent d’observer qu’avec l’augmentation de la valeur de la température de fusion, le pic froid en début de transport tend à disparaître, indiquant une montée rapide en température des MCP jusqu’au point de fusion. Lorsque la valeur de la température de fusion est égale à 5 °C, correspondant à la température de conditionnement du chargement et sa température idéale de conservation, alors les températures aux points proches des MCP évoluent très peu et restent quasiment à 5 °C sur la totalité du trajet. Cela signifie notamment que le froid n’est alors pas totalement consommé lors du transport. En revanche pour des valeurs de température de changement de phase inférieures, le froid est consommé bien avant la fin, causant des variations de température significatives sur la fin du trajet.

Lorsque la température de fusion est supérieure à 5 °C, une fois encore le froid n’est pas totalement consommé, néanmoins la température de stabilisation du système est alors globalement plus élevée, rendant plus dangereuse la présence de pics chauds en fin de trajet.

L’observation des valeurs des temps de conservation et températures maximales et minimales au sein du chargement (fig. 4.23) permet de confirmer ces constats en y apportant un nouvel éclairage.

Ainsi le temps de conservation des produits lors du transport est globalement décroissant avec l’augmentation de la valeur de la température de changement de phase des MCP, avec l’exception remarquable du cas où cette température est égale à la température de conservation idéale des produits ($T_f = 5$ °C) qui affiche alors le temps de conservation le plus élevé. Le temps de conservation est ici directement lié au pic chaud intervenant aux environs de la cinquantième

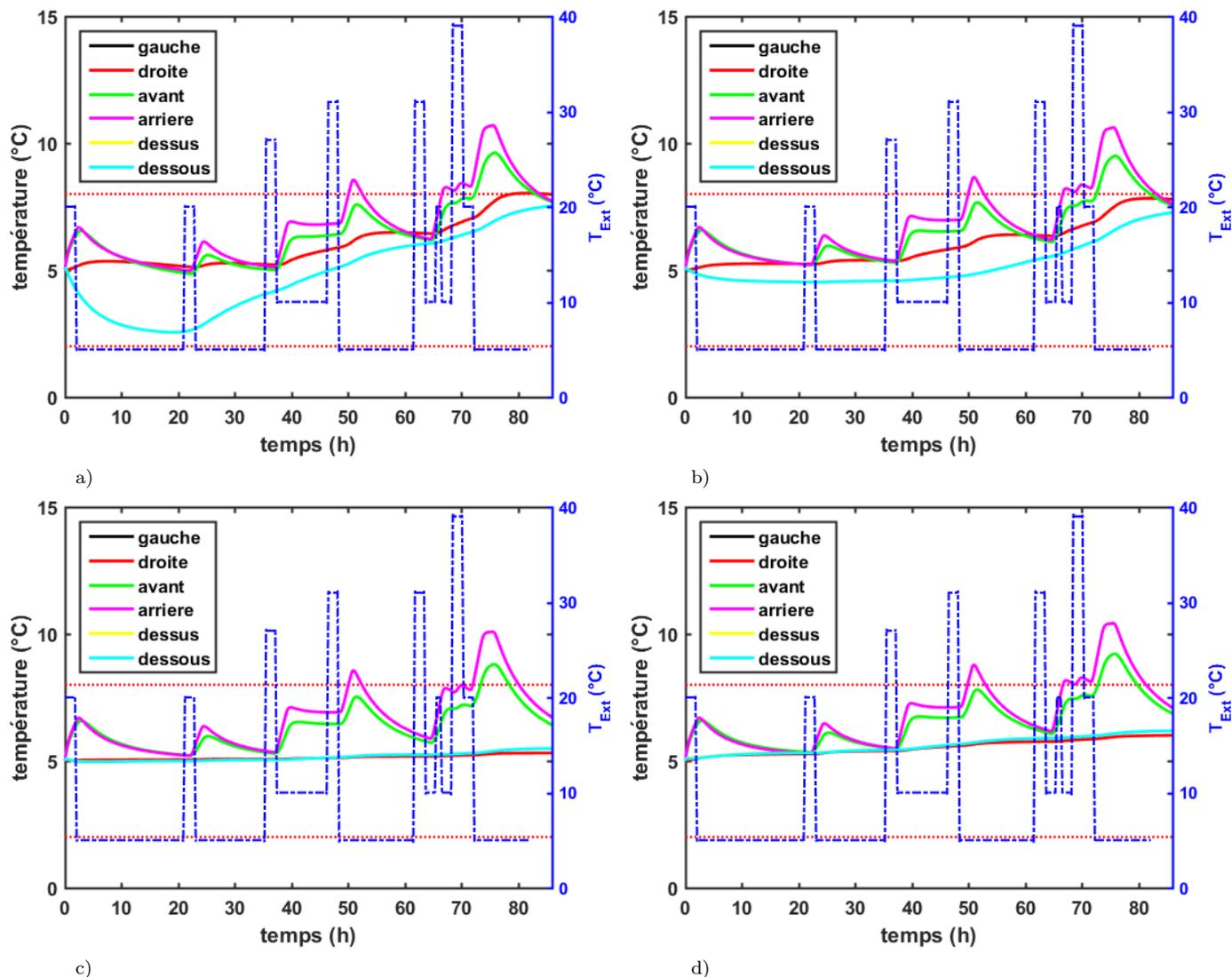


FIGURE 4.22 – Simulation des températures au sein du chargement d'une caisse PSF SB24 , a) $T_f = 0^\circ\text{C}$, b) $T_f = 4^\circ\text{C}$, c) $T_f = 5^\circ\text{C}$, d) $T_f = 6^\circ\text{C}$.

heure de transport. Lorsque la température de fusion est inférieure à 5°C , on observe que le froid a déjà été en bonne partie consommé lorsque ce pic intervient, ce qui se traduit par une montée globale des températures au sein de l'emballage avant la cinquantième heure et donc une excursion intervenant plus tôt. Lorsque la température de fusion est supérieure à 5°C , alors le froid n'est pas encore consommé, en revanche la température de stabilisation de l'emballage lors de la fusion est alors globalement plus élevée, ce qui une fois de plus se traduit par une excursion intervenant plus tôt. Ainsi la température de 5°C correspond ici à la température la plus faible qui permette de conserver le froid sur la totalité du trajet.

L'évolution des températures maximales en fonction de la température de changement de phase des MCP présente une explication similaire. Pour les valeurs de température de fusion inférieures à 5°C , la valeur de la température maximale, correspondant à la valeur atteinte lors du dernier pic chaud intervenant aux environs de la soixante-quinzième heure, dépend de la consommation de froid, ainsi, lorsque le froid est consommé plus tard, la température maximale est alors plus faible. Pour des valeurs de température de fusion supérieures ou égale à 5°C , le froid n'étant plus consommé sur la durée du trajet, c'est la valeur de la température de stabilisation globale du chargement qui conditionne la valeur de la température maximale. La

température maximale la plus faible est observée pour $T_f = 5^\circ\text{C}$, car c'est la température la plus faible pour laquelle le froid n'est pas consommé lors du transport.

Les températures minimales, quand à elles, correspondent ici aux températures atteintes lors du pic froid des premières heures du transport. L'augmentation de la température de changement de phase des MCP tend à faire disparaître ce pic froid, c'est pourquoi pour des valeurs de température de fusion supérieures ou égales à 5°C la température minimale correspond à la température initiale du chargement.

On peut tirer comme conclusion de ces observations que dans le cas considéré, la température idéale de changement de phase est $T_f = 5^\circ\text{C}$, toutefois une variation de 1 degré autour de cette valeur va provoquer des résultats significativement différents, parfois moins bon que dans le cas d'une température de fusion $T_f = 0^\circ\text{C}$. Il est donc alors indispensable de s'assurer de la valeur de la température de changement de phase du matériau utilisé, ainsi que de sa stabilité dans le temps sous peine d'obtenir des résultats moins bon que ceux escomptés.

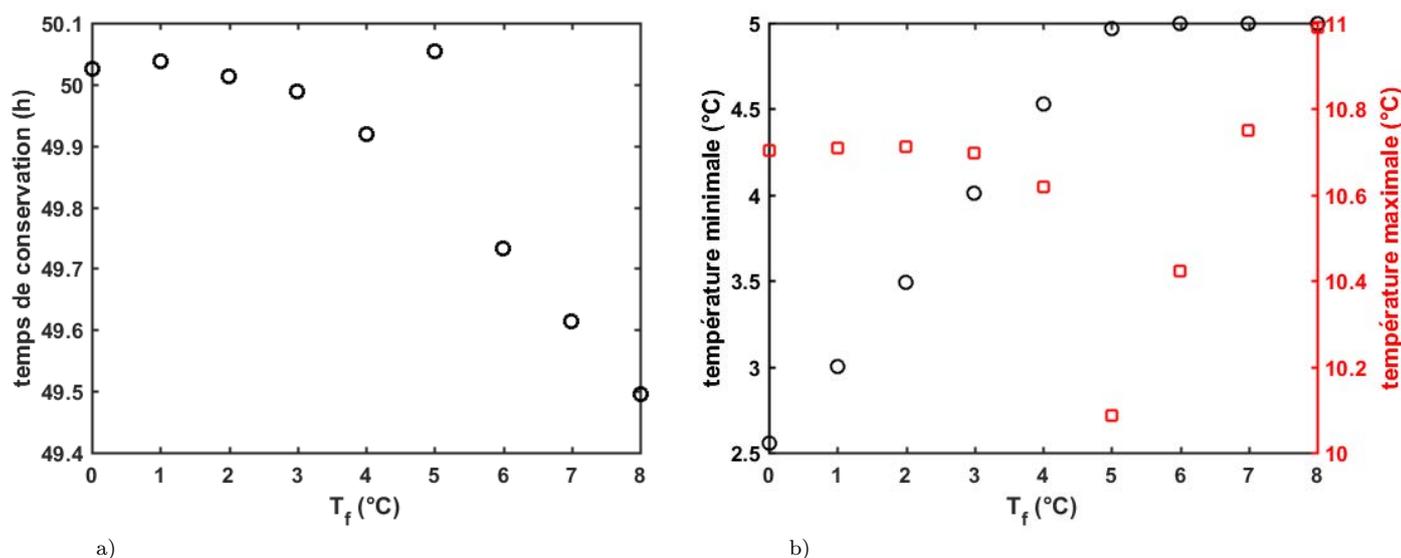


FIGURE 4.23 – Résultats d'une série de simulation pour la PSF SB24 faisant varier la température de changement de phase des MCP, a) temps de conservation, b) température maximale au sein du chargement, c) température minimale au sein du chargement.

On peut ensuite s'intéresser à l'influence de la valeur de la chaleur latente de fusion des matériaux à changement de phase sur l'évolution des températures au sein de l'emballage. Sur la figure 4.24 sont présentés les résultats de la simulation d'un emballage SB24 pour plusieurs valeurs de chaleur latente des MCP. On peut constater que l'augmentation de la chaleur latente de fusion se traduit par une augmentation du temps de consommation du froid. En effet, le pic froid du début de transport est alors plus important et dure plus longtemps. Une consommation plus lente de froid signifie aussi des températures globalement plus faibles au sein de l'emballage.

Ce constat bien plus direct se trouve confirmé par l'observation des temps de conservation et températures maximales et minimales présentés sur la figure 4.25. On peut remarquer en effet que l'augmentation de la chaleur latente de fusion s'accompagne d'une augmentation quasi-linéaire du temps de conservation et d'une diminution des températures maximales et minimales au sein du chargement.

On a pu constater que dans le cas considéré, le matériau à changement de phase le plus idéal serait un matériau dont la température de fusion serait de 5°C . Les matériaux les plus couramment utilisés aujourd'hui pour des températures de fusion positives sont les paraffines qui présentent l'avantage d'être facilement disponibles. En revanche les paraffines présentent généralement des valeurs de chaleur latente relativement faibles. Toutefois, comme on a pu voir

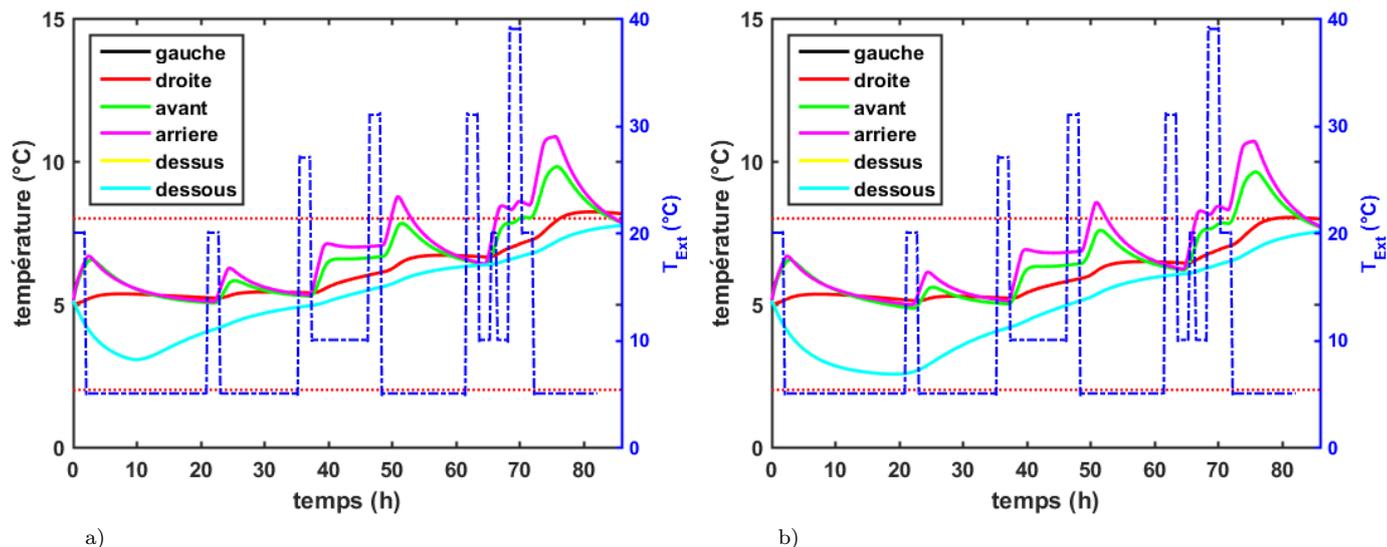


FIGURE 4.24 – Simulation des températures au sein du chargement d'une caisse PSF SB24 , a) $L_h = 100 \text{ kJkg}^{-1}$, b) $L_h = 300 \text{ kJkg}^{-1}$.

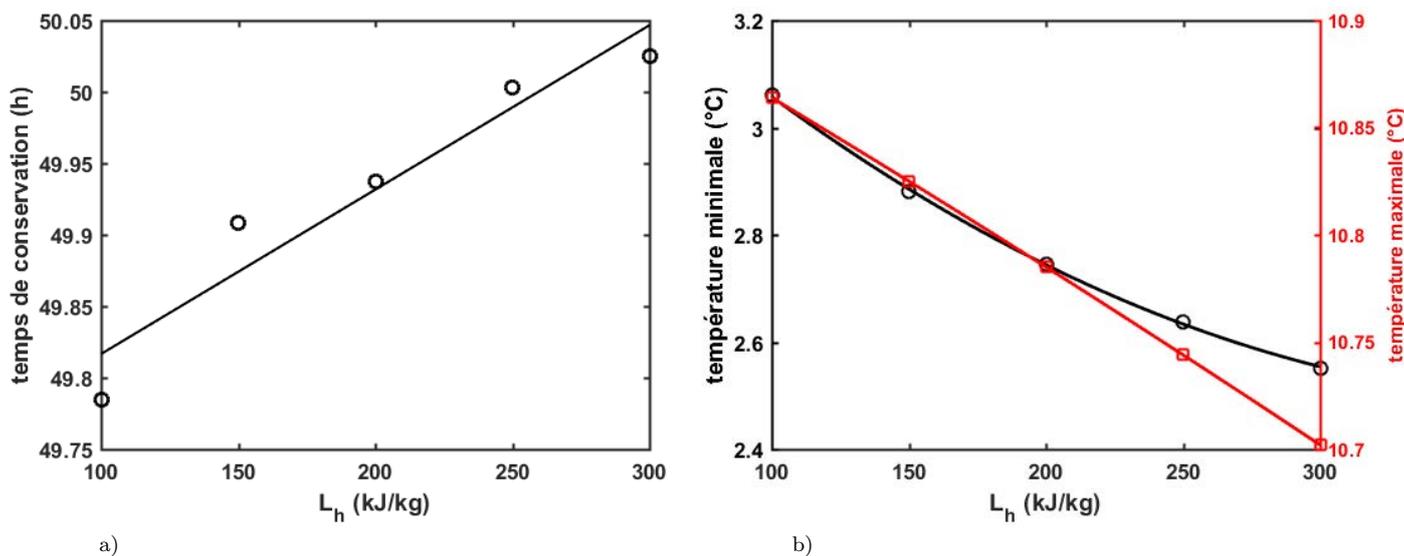


FIGURE 4.25 – Résultats d'une série de simulation pour la PSF SB24 faisant varier la chaleur latente de fusion, a) temps de conservation, b) température maximale au sein du chargement, c) température minimale au sein du chargement.

que dans le cas d'un MCP à température de fusion égale à 5 °C le froid n'était pas totalement consommé, on peut probablement se permettre d'avoir recours à des matériaux possédant une chaleur latente moins élevée que l'eau. *Rubitherm* commercialise différents types de MCP à base de paraffine, parmi lesquels le *RT 5* offrant une température de fusion de 5 °C d'après le fabricant, et dont les caractéristiques thermiques sont regroupées dans le tableau 4.5.

Sur la figure 4.26 sont présentés les résultats d'une simulation dans le cas de l'utilisation de MCP à base de paraffine *RT 5*. On peut alors constater que malgré une chaleur latente plus faible le froid n'est pas totalement consommé lors du transport et les températures des points proches des MCP présentent une bonne stabilité à 5 °C sur la durée du trajet. Ainsi l'utilisation d'un MCP à base de paraffine semblerait judicieux afin d'améliorer les capacités de l'emballage. Toutefois il convient de noter que les données des fabricants sont fréquemment

λ	0.2	$\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$
ρ	800	kg m^{-3}
c_p	2000	$\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$
T_f	5	$^{\circ}\text{C}$
L_h	180	kJ kg^{-1}

TABLE 4.5 – Caractéristiques thermiques du MCP *Rubitherm RT 5* d’après les données du fabricant.

différentes de celles que l’on peut mesurer, de plus la stabilité des MCP est sujette à caution, aussi il est nécessaire de procéder avec prudence dans l’optique de l’utilisation de MCP à base de paraffine.

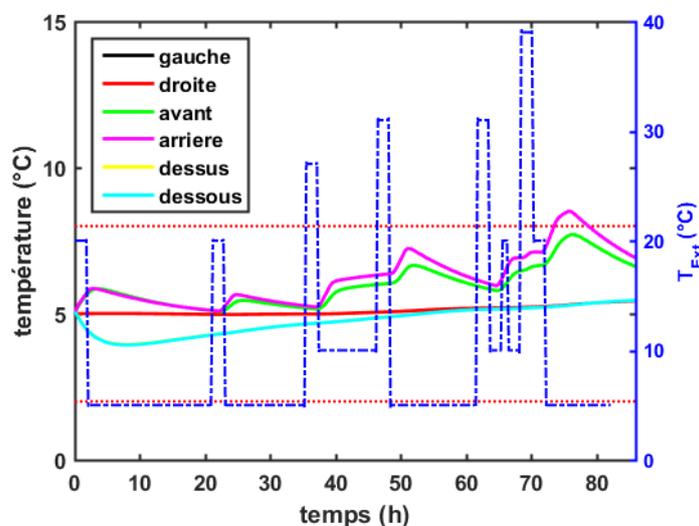


FIGURE 4.26 – Simulation des températures au sein du chargement d’une caisse PSF SB24 pour des MCP *Rubitherm RT 5*.

4.3 Conclusion

Le modèle simplifié comparé à des résultats expérimentaux affiche des résultats proches de la réalité. Les variations de température en réponse au profil de température extérieure sont fidèles à l’observation et le modèle permet de simuler plusieurs configurations d’emballage.

La simulation de différentes conditions et configurations permet d’observer l’influence de divers paramètres sur la capacité de l’emballage à bien conserver les produits.

Les infiltrations d’air au sein de l’emballage sont essentiellement dues à la variation atmosphérique et au vent, l’effet de tirage thermique est négligeable compte tenu de la faible hauteur des systèmes étudiés. Les variations de pression extérieures ponctuelles, causées par exemple par la montée en altitude de l’avion de transport, entraîne des variations de température au sein de l’emballage de faible amplitude et sans conséquence sur le long terme, mais qui peuvent ponctuellement faire franchir les limites de conservation du chargement.

Les caractéristiques thermiques des produits transportés ont une influence importante sur la capacité de l’emballage à les conserver dans les limites de température établies. En effet, l’augmentation de la densité par exemple a pour effet d’augmenter l’inertie thermique du chargement, le rendant moins sensible aux variations de température.

L'importance de la nature des MCP a été mise en évidence. Notamment la valeur de la température de changement de phase à une influence significative sur la stabilité thermique au sein du chargement. Bien qu'une chaleur latente importante soit intéressante pour assurer le stockage d'une quantité de chaleur importante, une température de fusion idéalement choisie permet d'avoir recours à des matériaux possédant une chaleur latente moins importante pour de meilleurs résultats. Cependant une variation d'un degré autour de la température de fusion à des effets notables sur la capacité de conservation de l'emballage aussi il faut pouvoir s'assurer de la véracité des propriétés thermiques des matériaux utilisés.

Bibliographie

- [1] F. Asdrubali, A. L. Pisello, F. D. Alessandro, F. Bianchi, M. Cornicchia, and C. Fabiani. Innovative cardboard based panels with recycled materials from the packaging industry : thermal and acoustic performance analysis. *Energy Procedia*, 78 :321–326, novembre 2015.
- [2] F. Asdrubali, A. L. Pisello, F. D'Alessandro, F. Bianchi, C. Fabiani, M. Cornicchia, and A. Rotili. Experimental and numerical characterization of innovative cardboard based panels : Thermal and acoustic performance analysis and life cycle assessment. *Building and Environment*, 95 :145–159, janvier 2016.
- [3] F. De Ponte and S. Klarsfeld. Conductivité thermique des isolants. *Techniques de l'ingénieur Mesure des grandeurs thermophysiques*, 2016.
- [4] P.R. Rozak, B.P. Weegman, E.S. Avgoustiniatos, J.R. Wilson, D.P. Welch, B.J. Hering, and K.K. Papas. Devices and methods for maintenance of temperature and pressure during islet shipment. *T. Proceedings*, 40 :407–410, 2008.

CONCLUSION GÉNÉRALE ET PERSPECTIVES

Synthèse des travaux effectués et des résultats obtenus

LES emballages thermiques des produits de santé, constitués de matériaux isolants et de matériaux à changement de phase, sont les systèmes utilisés pour le transport de certains de ces produits nécessitant d'être conservés dans une certaine gamme de températures (définie par des études de stabilité des principes actifs). Les parois isolantes réduisent les flux thermiques traduisant les échanges thermiques ayant lieu entre l'environnement extérieur et l'intérieur de la caisse. Les matériaux à changement de phase permettent le stockage de la chaleur et ainsi la diminution des fluctuations de la température à l'intérieur de l'emballage. Le rôle des matériaux à changement de phase a été bien identifié et documenté dans la littérature. L'effet d'absorption et de libération de la chaleur lors du changement de phase a été observé par de nombreux auteurs et leur efficacité couplée avec des emballages isolants mise en avant. Toutefois, la définition d'une configuration (épaisseur, nature des isolants, agencement des composants, nature et quantité de MCP...) s'avère délicate et onéreuse, étant donné qu'elle se fait actuellement principalement par « tâtonnement » expérimental.

Afin de bien comprendre les différents facteurs influençant les transferts à l'intérieur d'un emballage, une étude expérimentale a été réalisée. Parmi les facteurs étudiés, nous nous sommes intéressés à la perméabilité des emballages dont le coefficient a été déterminé pour plusieurs configurations. Les emballages testés correspondent à un modèle SB24 et un modèle XXL. Les coefficients mesurés sont compris entre $2.78 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3 \text{ Pa}^{-2/3} \text{ s}^{-1}$ et $2.53 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3 \text{ Pa}^{-2/3} \text{ s}^{-1}$ selon la configuration. Ainsi on a pu remarquer que l'utilisation de différents systèmes de fermeture avait une influence notable sur la perméabilité des caisses.

Les températures au sein d'un emballage de modèle SB24 (tel que testé expérimentalement) présentent une certaine stratification. Cette stratification est particulièrement notable à l'arrière du chargement, où le volume d'air n'est pas suffisant pour permettre l'homogénéisation des températures comparativement à ce que l'on peut observer à l'avant du chargement. Ce constat est confirmé par la modélisation de la convection naturelle à l'intérieur de l'emballage par CFD, qui permet d'observer l'absence de mouvements de convections à l'arrière, tandis que des zones de circulation à l'avant permettent de distribuer les températures.

La présence d'un ensoleillement testé expérimentalement augmente drastiquement les températures observées, particulièrement sur les faces les plus exposées, où la température mesurée peut gagner plus d'une dizaine de degrés par rapport à un cas sans ensoleillement. Tou-

tefois la présence de matériaux à changement de phase s'avère alors efficace pour atténuer l'effet de cet accroissement de température, et notamment la dissymétrie engendrée par l'éclairement partiel de la caisse.

Un modèle simplifié a été développé, qui permet la simulation de différentes configurations d'emballage, prenant en compte la présence ou l'absence sur chaque face de matériaux à changement de phase ou de séparation, et permettant de changer la nature de tous les matériaux impliqués. Ce modèle, basé sur une méthode nodale, a été validé à partir d'essais de qualification d'emballages. Il permet de représenter correctement les températures atteintes à l'intérieur de l'emballage au cours de la simulation de différents trajets.

Le modèle a permis de montrer l'importance de différents paramètres :

- la nature du chargement a une influence importante sur les résultats, aussi la connaissance des caractéristiques thermophysiques des produits transportés s'avère-t-elle cruciale pour le bon conditionnement du chargement. Des produits de grande densité offriront une meilleure inertie thermique permettant un meilleur maintien des températures ;
- L'infiltration d'air a un impact limité sur la température au sein de l'emballage. Les effets du tirage thermique sont négligeables de part la faible hauteur des systèmes considérés. Les effets de variations de pression par la variation d'altitude ou la présence de vent sont prépondérants, mais leur conséquence est ponctuelle et n'a pas d'effet sur le long terme ;
- La valeur de la température de fusion a un impact considérable sur la capacité de conservation des emballages. Une valeur la plus proche possible de la température idéale de conservation permet d'éviter les pics froids en début de trajet tout en allongeant le temps de consommation du froid. En revanche, si la température de fusion est au-dessus de cette valeur idéale, alors l'ensemble du chargement se stabilise à une température globalement plus élevée, ce qui a pour effet d'avancer l'apparition des pics chauds. Ainsi, puisque les températures de fusion des matériaux à changement de phase peuvent être mal définies (en particulier dans le cas de l'utilisation de paraffine, dont la solution n'est pas stable au fur et à mesure de son vieillissement), il peut être préférable d'avoir recours à des matériaux dont la température de fusion est inférieure à la température idéale de conservation des produits. Toutefois, dans ce cas doivent être pris en compte l'apparition de pics froids en début de trajet, nécessitant la protection du chargement par des plaques de séparation. Ces plaques de séparation doivent avoir une isolation suffisante pour limiter la transmission du froid sur les faces du chargement en communication directe avec les accumulateurs. Mais cette isolation doit aussi ne pas être trop importante pour que le froid puisse être transmis aux faces du chargement non protégées par des MCP.

perspectives

Le modèle simplifié permet déjà de simuler une grande partie des configurations existantes, mais il peut encore être complété de manière à prendre en compte d'autres configurations d'emballages. Notamment par la superposition de plusieurs couches de MCP de natures différentes ou l'introduction sur une même face de plusieurs types de MCP.

Une stratégie devra être mise en place pour l'intégration du modèle dans le processus d'optimisation des emballages. La faisabilité d'un algorithme génétique pourra être étudiée pour la définition d'un emballage répondant à un cahier des charges prédéfini et en associant le modèle développé avec les moyens de dimensionnement déjà utilisés au sein de l'entreprise.

De plus, le modèle développé pourrait être utilisé afin de prévoir le comportement d'un emballage en temps réel sur un horizon de temps fixé et de déclencher des alarmes préventives au cours du transport lorsque le risque d'excursion devient trop important.

Par ailleurs, le modèle pourrait être un élément clef des études de risques nécessaires à l'établissement de devis d'assurance.



FOLIO ADMINISTRATIF

THESE DE L'UNIVERSITE DE LYON OPEREE AU SEIN DE L'INSA LYON

NOM : PECH

DATE de SOUTENANCE : 22/04/2016

Prénoms : Thibault

TITRE : Etude expérimentale et modélisation d'emballages de produits de santé utilisant des matériaux à changement de phase

NATURE : Doctorat

Numéro d'ordre : 2016LYSEI039

Ecole doctorale : MEGA (Mécanique, énergétique, génie civil et acoustique)

Spécialité : Thermique et énergétique

RESUME : Les emballages thermiques, fabriqués à partir de matériaux isolants et associés à des matériaux à changement de phase, constituent une solution à la problématique de la conservation de produits thermosensibles tout au long de la chaîne de distribution. Cependant, l'optimisation des configurations représente un défi, compte tenu du nombre de paramètres en jeu, et la voie expérimentale demeure coûteuse en temps et en ressources. C'est pourquoi un modèle numérique simplifié a été développé dans le cadre de cette thèse.

La thèse comporte un volet expérimental sur la détermination de la perméabilité des emballages ainsi que l'observation de la répartition des températures au sein d'un modèle d'emballage, et un volet numérique.

Le volet expérimental a permis de déterminer les coefficients de perméabilité de deux types d'emballages pour différentes configurations, montrant des différences notables selon le modèle de caisse considéré. Les fuites d'air sont principalement dues à l'ouverture de la porte, d'où l'importance du type de joint utilisé et du système de fermeture. Le corps de la caisse, de par sa méthode de manufacture, présente lui aussi des fuites, rendant impossible l'éventualité d'une caisse totalement imperméable.

L'observation des températures au sein d'un emballage met en évidence une certaine stratification des températures intérieures, pouvant être diminuée par la présence d'un volume d'air suffisamment important pour permettre des mouvements de convection. Un test avec simulation d'ensoleillement a permis d'observer l'impact important du flux solaire sur le comportement thermique de la caisse, tout en mettant en évidence l'efficacité des matériaux à changement de phase pour l'absorption des variations de température.

Le modèle développé est basé sur une méthode nodale, associant à chaque épaisseur de paroi un nœud, pour lequel sont résolues les équations de bilans thermiques associées. Le traitement du changement de phase se fait par une méthode dite de « capacité calorifique équivalente ». Le programme a été construit de manière à pouvoir simuler un grand nombre de configuration en faisant varier l'agencement des éléments et leur nature. La simulation d'un certain nombre de ces configurations a permis de déterminer la sensibilité du système à divers paramètres.

Ainsi il a été montré que la nature du chargement (caractérisée par les valeurs de conductivité, densité et capacité thermique) constitue un paramètre influent sur le système, et donc la connaissance des produits transportés s'avère indispensable à la définition d'une configuration optimale. De la même manière, la nature des matériaux à changement de phase, et en particulier la température de fusion, a une importance notable sur le comportement du système.

En revanche, la température d'introduction des MCP a peu d'influence, du moment que le matériau est introduit dans la bonne phase correspondant à son application. La perméabilité de l'emballage quant à elle montre peu d'incidence sur les résultats à long terme, mais des effets de sursaut de température ponctuels dus à des variations brusques de pression extérieure peuvent être observés localement.

MOTS-CLÉS : emballages thermiques, chaîne du froid, matériaux à changement de phase, stockage de chaleur, modèle nodal.

Laboratoire (s) de recherche : CETHIL (Centre d'énergétique et de thermique de Lyon)

Directeurs de thèse: Philippe HABERSCHILL, Frédéric KUZNIK.

Président de jury : Michel FEIDT

Composition du jury : Jean-Pierre BEDECARRATS – Michel DE PAEPE – Michel FEIDT – Philippe HABERSCHILL – Frédéric KUZNIK – Gilles LABRANQUE.

Cette thèse est accessible à l'adresse : <http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI039/these.pdf>

© [T. Pech], [2016], INSA Lyon, tous droits réservés

