HAL open science

Contribution à la fabrication des structures thermoplastiques actives

Louay El Soufi

To cite this version:

Louay El Soufi. Contribution à la fabrication des structures thermoplastiques actives. Mécanique [physics.med-ph]. Université de Technologie de Belfort-Montbeliard, 2009. Français. NNT : 2009BELF0110 . tel-00604087

HAL Id: tel-00604087

https://theses.hal.science/tel-00604087v1

Submitted on 6 Jul 2011

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.

N° d'ordre : 110 Année 2009

THESE

pour obtenir le grade de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITE DE TECHNOLOGIE DE BELFORT MONTBELIARD

Ecole Doctorale : Sciences Pour l'Ingénieur et Microtechniques
Spécialité : Mécanique

par

Louay ELSOUFI

Contribution à la fabrication des structures thermoplastiques actives

---

soutenue le 15 mai 2009 devant le jury composé de

Mme Cécile LANGLADE	Président
M. Luc GAUDILLER	Rapporteur
M. Pascal CASARI	Rapporteur
M. Willy CHARON	Directeur
M. Mohamed ZOAETER	Co-directeur
M. Rémy LACHAT	Co-encadrant
M. Khaled KHALIL	Co-encadrant

Thèse préparée au laboratoire M3M (Mécatronique/Méthodes-Modèles-Métiers) de l'Université de Technologie de Belfort-Montbéliard

À mon cœur . . . à Sally

Résumé

Les recherches effectuées sont centrées sur l'intégration de composants piézoélectriques dans des matrices thermodurcissables. Cependant, le problème de recyclage constitue un grand axe nécessitant le remplacement des matériaux thermodurcissables par des matériaux thermoplastiques. Toutefois, les procédés actuels de fabrication des pièces en composite actif à matière thermoplastique ne sont pas directement exploitables pour l'intégration de composants fragiles tels que les composants piézoélectriques. Le travail présenté dans ce mémoire de thèse est dédié à une contribution à la fabrication des structures thermoplastiques intelligentes. Dans ce contexte, l'objectif de la thèse est de déterminer le rapport entre le procédé de fabrication et les modèles de comportement à développer pour l'utilisation des composants piézoélectriques intégrés. Deux études sont réalisées séparément : Une première étude traite les conditions thermiques et mécaniques qui accompagnent la fabrication des structures thermoplastiques. L'influence de ces conditions sur le matériau piézoélectrique intégré est analysée dans une deuxième étude. Les résultats des deux études permettent de choisir le matériau approprié pour chaque procédé et condition de mise en œuvre, de manière à minimiser l'endommagement du matériau intelligent. Cet apport permet de surmonter les obstacles relatifs à l'utilisation du thermoplastique dans les structures intelligentes.

Mots Clés : matériaux composites, thermoplastique, procédés de mise en œuvre des thermoplastiques, piézoélectrique, piézoélectricité, PZT, structures intelligentes, modélisation par éléments finis.

Abstract

Researches are focused on the integration of piezoelectric components in thermosetting matrices. However, the problem of recycling constitutes an important axis requiring the replacement of thermosetting materials with thermoplastic ones. However, existing manufacturing processes for smart thermoplastic composite parts are not directly applied for integration of fragile elements such as piezoelectric components. This work is dedicated to a contribution in smart thermoplastic structures manufacturing. In this context, the objective of the thesis is to determine the relationship between manufacturing process and developed models of behavior for using integrated piezoelectric components. Two studies are realized separately: First study treats thermal and mechanical conditions occurred during the production of thermoplastic structures. The influence of these conditions on the integrated piezoelectric material is analyzed in a second study. Results of both studies are used to choose the suitable material for each process and condition of manufacturing in order to minimize smart material damage. This work allows overcoming problems related to thermoplastics use in smart structures.

Keywords: composite materials, thermoplastic, thermoplastic manufacturing process, piezoelectric, piezoelectricity, PZT, intelligent structures, finite elements modeling.

Remerciements

Les travaux de recherche présentés dans ce mémoire ont été menés au laboratoire M3M (Mécatronique/Méthodes-Modèles-Métiers) au sein de l'équipe Systèmes Mécaniques Adaptatifs (SMA). Ces travaux ont été financés par l'Agence Universitaire de la Francophonie (AUF).

Mes premiers remerciements iront à M. Willy CHARON, professeur à l'Université de Technologie de Belfort-Montbéliard de m'avoir accepté dans son équipe de recherche et d'avoir accepté d'être mon directeur de thèse. La pertinence de ses remarques, de ses conseils, des échanges que nous avons pu avoir, a éclairé mon chemin durant les années de thèse.

Je tiens ensuite à remercier :

M. Mohamed ZOAETER, professeur et doyen de la Faculté de Génie à l'Université Libanaise.

M. Khaled KHALIL, maître de conférences à l'Université Libanaise, et M. Rémy LACHAT, enseignant-chercheur à l'Université de Technologie de Belfort-Montbéliard, pour leur encadrement.

Mme Cécile LANGLADE, Professeur à l'Université de Technologie de Belfort-Montbéliard, pour m'avoir fait l'honneur d'accepter de présider le jury.

M. Luc GAUDILLER, Professeur à l'INSA de Lyon, ainsi que M. Pascal CASARI, Professeur à l'université de Nantes, pour avoir accepté d'être les rapporteurs du mémoire et pour l'intérêt qu'ils y ont porté, et pour les différentes remarques constructives dont ils ont fait preuve dans leur rapport.

Je tiens également à remercier le directeur du laboratoire M3M, M. Matthieu DOMASZEWSKI, Professeur à l'Université de Technologie de Belfort-Montbéliard, M. Philippe LESAGE, Ingénieur d'étude, M. Pascal ALDINGER, Technicien et Mme. Béatrice ROSSEZ, Secrétaire du laboratoire.

Que ce modeste travail vienne récompenser toute ma famille pour leur amour, leur soutien et leur encouragement. Je remercie infiniment ma femme pour la patience qu'elle m'a montrée durant ces longues études.

Table des matières

Introduction générale 1

Chapitre 1 : État de l'art d'un système mécanique intégré 5

1.1 Introduction 6
1.2 Principe de fonctionnement d'un système adaptatif 7
1.3 Matériaux utilisés dans les systèmes intelligents 8
1.3.1 Caractéristiques principales 8
1.3.2 Matériaux principaux 9
1.4 Matériau intelligent sélectionné pour l'étude 12
1.4.1 Limitation principale des matériaux intelligents 12
1.4.2 Orientation actuelle dans l'intégration de matériaux intelligents 12
1.4.3 Matrices pour l'intégration de matériaux intelligents 13
1.4.4 Evolution des matériaux piézoélectriques candidats à l'intégration 13
1.4.5 Conclusion 14
1.5 Choix de la matrice pour la fabrication des structures intelligentes 14
1.5.1 Etude comparative de matrices thermodurcissables et thermoplastiques 15
1.5.2 Recyclage des matières plastiques 15
1.5.3 Problématiques des structures piézoélectriques à matrice thermoplastique 16
1.6 Conclusion 17

Chapitre 2 : Procédés et outils de mise en oeuvre 19

Section 1 : Propriétés et procédés de mise en œuvre des matériaux thermoplastiques 21

2.1.1 Introduction 21
2.1.2 Polymère thermoplastique 21
2.1.3 Matériaux composites à matrice thermoplastique 28
2.1.4 Procédés de mises en œuvre des thermoplastiques 29
2.1.5 Conclusion 33

Section 2 : Les matériaux piézoélectriques 34

2.2.1 Introduction 34
2.2.2 Piézoélectricité 34
2.2.3 Polarisation 35
2.2.4 Modélisation 36
2.2.5 Propriétés 40

2.2.6 Conclusion 46

Section 3 : Matériels et logiciels 48

2.3.1 Introduction 48
2.3.2 Viscoanalyseur 48
2.3.3 Système d'acquisition TEAC GX-1 54
2.3.4 Logiciel ANSYS 54
2.3.5 Logiciel Robot Me 56

Section 4 : Propriétés des matériaux spécifiques mis en œuvre 57

2.4.1 Introduction 57
2.4.2 Matériaux thermoplastiques 57
2.4.3 Pastilles piézoélectriques 58

Chapitre 3 : Caractérisation par modélisation et simulation de l'évolution thermique d'une inclusion pendant le processus de fabrication en fonction de différents procédés de plasturgie 61

3.1 Introduction 62
3.2 Moulage par injection 62
3.2.1 Description du système étudié 62
3.2.2 Modélisation analytique 65
3.2.4 Modélisation numérique 70
3.2.4 Comparaison des résultats obtenus par le modèle analytique et le modèle numérique 71
3.2.5 Etudes de sensibilité en appliquant la modélisation par éléments finis 72
3.2.6 Application de l'analyse numérique à différentes matériaux thermoplastiques 78
3.2.7 Influence des paramètres thermiques du thermoplastique sur l'échauffement du PZT au cours du procédé de moulage 81
3.3 Surmoulage 86
3.3.1 Description du système étudié 86
3.3.2 Modélisation par éléments finis du dispositif de surmoulage 86
3.3.3 Influence de la position du PZT 87
3.4 Thermoformage 88
3.4.1 Modèle numérique 88
3.4.2 Conditions de la simulation numérique 89
3.4.3 Influence de la position du PZT 89
3.4.4 Influence des paramètres thermiques du thermoplastique sur l'échauffement du PZT au cours du procédé de thermoformage 91
3.5 Synthèse des résultats 93
3.5.1 Comparaison entre moulage par injection et moulage par co-injection 93
3.5.2 Thermoformage 94

Chapitre 4 : Comportement thermique des pastilles piézoélectriques 95

4.1 Introduction 96
4.2 Essais et de flexion annulaire 96
4.3 Validation de l'essai de flexion 97
4.3.1 Cas nominal 97
4.3.2 Erreur de décentrage de l'effort appliqué 99
4.3.3 Erreur de décentrage du disque en PZT par rapport au disque en laiton 99
4.3.4 Conclusion sur les erreurs de décentrage 100
4.4 Essai de mesure de raideur du buzzer 100
4.4.1 Détermination expérimentales des raideurs 100
4.4.2 Estimation de l'effet bilame par simulation numérique 102
4.4.3 Comparaison essais / simulation et conclusion 110
4.5 Mesure directe de la piézoélectricité sous contraintes thermiques 112
4.5.1 Dispositif expérimental 112
4.5.2 Résultats expérimentaux et conclusion 114
4.6 Conclusion 116

Chapitre 5 : Modélisation du comportement rhéologique d'un composite actif a matrice polypropylène 117

5.1 Introduction 118
5.2 Recherche des propriétés viscoélastiques 119
5.2.1 Dispositif d'essai 119
5.2.2 Essais de relaxation 120
5.2.3 Détermination des propriétés viscoélastiques 120
5.2.4 Essais dynamiques 123
5.2.5 Validation des essais dynamiques 125
5.3 Influence du contact entre la matrice PP et la pastille PZT 127
5.4 Conclusion 129

Chapitre 6 : Synthèse sur l'influence des conditions thermiques sur la piézoélectricité dans différents procédés de plasturgie 133

6.1 Introduction 134
6.2 Evolution de la perte de piézoélectricité pour différents matériaux et procédés 134
6.3 Influence des paramètres thermiques sur l'évolution de la perte de piézoélectricité dans le moulage par injection 139
6.4 Synthèse sur les conditions de fabrication du thermoplastique intelligent 141

Conlusion générale 143

References 147

Annexes 153

Table des figures

Chapitre 1 ----------

1.1 Organisation d'un système intelligent. 9

1.2 Structure cristalline quadratique de $PbTiO_3$ 11

1.3 L'effet de mémoire de forme. 12

Chapitre 2 ----------

2.1.1 Courbes DSC qui déterminent le point de fusion de polymères amorphes, cristallins et semi-cristallins. 24

2.1.2 Exemple de gamme des propriétés mécaniques des plastiques 25

2.1.3 Exemple d'une gamme de résistance à la traction, de module d'élasticité et de déformation de certaines plastiques T_D et T_P avec et sans fibres de verre. 26

2.1.4 Fluage et relaxation. 28

2.1.5 Presse à injection. 30

2.1.6 Anatomie d'une presse à injection. 31

2.1.7 Thermoformage. 32

2.2.1a Effet de capteur dans les matériaux piézoélectriques 35

2.2.1b Effet d'actionneur dans les matériaux piézoélectriques 35

2.2.2 Classes cristallines 35

2.2.3 Numérotation des directions (polarisation). 36

2.2.4 Domaines dipolaires électriques dans les matériaux piézoélectriques. 36

2.2.5 Cycle d'hystérésis absorbeur d'énergie. 42

2.2.6 Dépendance de ε_r et de δ en fonction de Epolarisation 43

2.2.7 Dépendance de d_{33} et de d_{31} en fonction de Epolarisation 43

2.2.8 Constante diélectrique en fonction de la température. 44

2.2.9 Coefficient piézoélectrique en fonction de la contrainte alternée à 10 Hz et 200°C 44

2.2.10 Coefficient piézoélectrique en fonction de la contrainte alternée à 10 Hz et 150°C 44

2.2.11 Hystérésis piézoélectrique à 1 Hz et 150°C 45

2.2.12 Coefficient piézoélectrique en fonction de la contrainte alternée à 1 Hz et 150°C 45

2.2.13 Changement du cycle d'hystérésis avec l'augmentation de la température 45

2.2.14 Cycle d'hystérésis en fonction de la contrainte 46

2.2.15 Effets de l'exposition à des contraintes de compression longitudinales sur les propriétés de 2 sortes de PZT à températures élevées 46

2.3.1 Viscoanalyseur 48

2.3.2 Enceinte du viscoanalyseur 50
2.3.3 Déphasage entre contrainte et déplacement d'un matériau viscoélastique soumis à une oscillation sinusoïdale 52
2.3.4 Géométrie de l'élément PLANE55 55
2.3.5 Géométrie de l'élément SHELL63 55
2.4.1a Pastille LAIT/PZT_{19} 59
2.4.1b Pastille LAIT/PZT_{25} 59

Chapitre 3 ----------

3.1 Description du système modélisé 63
3.2a Conductivité thermique du moule en fonction de la température 63
3.2b Capacité thermique du moule en fonction de la température 63
3.3 Modèle pour la simulation analytique. 66
3.4 Topologie du modèle par éléments finis (cas du moulage) 71
3.5 Variation de la température avec le temps, par modélisation analytique et par éléments finis. 71
3.6 Influence de l'épaisseur de la plaque sur la courbe T(t) au sein du PZT dans le cas du moulage par injection 72
3.7a Influence de la position de la pastille sur la courbe T(t) au sein du PZT dans le cas du moulage par injection 74
3.7b Variation de la Température maximale au sein du PZT avec sa position dans la plaque. 74
3.7c Courbe de variation du temps de surchauffage du PZT avec différentes position du PZT dans le cas du moulage par injection (h = 5 mm). 75
3.8 Section d'écoulement plan du PP en cours de solidification 76
3.9 Effet du remplissage sur la pastille PZT (h = 5mm, h_p = 1mm) 78
3.10a Conductivité, chaleur spécifique et densité des matériaux thermoplastique utilisés. 79
3.10b Variation de la Température maximale au sein du PZT avec sa position 80
3.10c Courbe de variation du temps de surchauffage du PZT avec différentes position du PZT. 80
3.10e Procédure d'obtention de l'évolution de la température maximale au sein du PZT en fonction des paramètres thermiques 82
3.11a Variation de la température maximale au sein du PZT avec la température d'injection de moulage par injection 83
3.11b Variation de la température maximale au sein du PZT avec la conductivité thermique du thermoplastique 84
3.11c Variation de la température maximale au sein du PZT avec la chaleur spécifique du thermoplastique 85
3.12 Topologie du modèle par éléments finis (cas du sur-moulage) 87
3.13a Influence de la position de la pastille sur la courbe T(t) au sein du PZT dans le cas du co-injection 87
3.13b Courbe de variation du temps de surchauffage du PZT avec différentes positions du PZT dans le cas du co-injection (h = 5 mm). 88
3.14 Topologie du modèle par éléments finis (cas du thermoformage) 89

3.15a Influence de la position de la pastille sur la courbe T(t) au sein du PZT dans le cas du thermoformage 90
3.15b Courbe de variation du temps de surchauffage du PZT avec différentes position du PZT dans le cas du thermoformage (h = 5 mm). 91
3.16a Température maximale au sein du PZT pour différents matériaux thermoplastiques dans le cas du thermoformage. 92
3.16b Courbe de variation du temps de surchauffage du PZT avec différentes positions du PZT dans le cas du thermoformage pour une température de Curie = 200°C 92

Chapitre 4 ----------

4.1a Sollicitation de l'échantillon. 97
4.1b Protocole expérimental. 97
4.2 Modèle éléments finis de la pastille PZT 97
4.3 Pastille PZT sollicitée par une force centrale 98
4.4 Déplacements dans le cas nominal 98
4.5 Force appliquée avec un décentrage de 8 %. 99
4.6 Décentrage du disque PZT de 30 %. 100
4.7a Variation de la raideur apparente au centre du capteur PZT en court-circuit. 101
4.7b Variation de la raideur apparente au centre du capteur PZT en circuit ouvert. 101
4.8a Pastille déformée sous forme de calotte suite à une élévation de température. 102
4.8b La flèche thermique de la pastille pour différentes températures. 103
4.9a Bloc testé (direction de z). 104
4.9b Bloc testé sur ROBOT Me (direction de z). 104
4.10a Bloc testé (direction de x). 106
4.10b Bloc testé sur ROBOT Me (direction de x). 106
4.11a Bloc testé (cisaillement). 108
4.11b Bloc testé sous ROBOT Me (cisaillement). 108
4.12 Déflexion de la pastille PZT sous force centrale, la pastille étant déjà déformée sous effet thermique 110
4.13 Comparaison entre la raideur mesurée par expérience et celle calculée par modélisation. 111
4.14 Équipements expérimentaux 113
4.15 Protocole expérimental 114
4.16 Pourcentage de perte de piézoélectricité avec la température 115

Chapitre 5 ----------

5.1 Eprouvette. 119
5.2 Essais de relaxation réalisés sur la plaque PP/verre. 120
5.3 le modèle de comportement viscoélastique de Maxwell généralisé. 121
5.4 Schéma expérimental. 124
5.5a Courbes de variation du déphasage avec la fréquence pour T = 30 et 60°C. 124

5.5b Courbes de variation du déplacement dynamique avec la fréquence pout T = 30 et 60°C. 125
5.6 Modèle pour la simulation. 125
5.7a Déphasage = f(fréquence), expérimental et simulé pour T = 30°C. 126
5.7b Déphasage = f(fréquence), expérimental et simulé pour T = 60°C. 126
5.7c Déplacement dynamique = f(fréquence), expérimental et simulé pour T = 30°C. 126
5.7d Déplacement dynamique = f(fréquence), expérimental et simulé pour T = 60°C. 127
5.8a Plaque composite (PP/verre) active étudiée. 128
5.8.b Forces d'excitation de l'actionneur PZT. 128
5.9 Plaque PZT avec les couches polypropylènes qui l'entourent. 130
5.10 Deux positions différentes du PZT dans la plaque selon z. 131

Chapitre 6 ----------

6.1 Schéma Bloc représentant la démarche de calcul de la perte en fonction de la position. 136
6.2 Pourcentage de perte de piézoélectricité avec la position du capteur PZT dans la plaque, et le matériau thermoplastique utilisé pour une fréquence du déplacement dynamique imposé = 10 Hz (cas du moulage). 137
6.3 Pourcentage de perte de piézoélectricité avec la position du capteur PZT dans la plaque, et le matériau thermoplastique utilisé pour une fréquence du déplacement dynamique imposé = 100 Hz (cas du moulage). 138
6.4 Pourcentage de perte de piézoélectricité avec la position du capteur PZT dans la plaque, et le matériau thermoplastique utilisé pour une fréquence du déplacement dynamique imposé = 10 Hz (cas du thermoformage). 139
6.5 Pourcentage de perte de piézoélectricité avec la position du capteur PZT dans la plaque, et le matériau thermoplastique utilisé pour une fréquence du déplacement dynamique imposé = 100 Hz (cas du thermoformage). 139
F.6 Schéma Bloc représentant la démarche de calcul de la perte en fonction des paramètres thermiques. 140
6.7 Pourcentage de perte de piézoélectricité en fonction de la température du procédé. 141
6.8 Pourcentage de perte de piézoélectricité en fonction de la conductivité du matériau thermoplastique. 141
6.9 Pourcentage de perte de piézoélectricité en fonction de la chaleur spécifique du matériau thermoplastique. 142

Liste des tableaux

Chapitre 2 ----------

2.1.1 Caractéristiques des matériaux thermoplastiques et thermodurcissables 23

2.1.2 T_f, K et C de quelques matériaux thermoplastiques..... 25

2.2.1 Caractéristiques des céramiques piézoélectriques molles et dures..... 41

2.4.1 Propriétés des matériaux thermoplastiques utilisés dans l'étude. 58

2.4.2 Dimensions des pastilles piézoélectriques. 59

Chapitre 4 ----------

4.1 Déplacements thermiques de la pastille LAIT/PZT_{19} 103

4.2 Déflexion et raideur en fonction de la température ambiante..... 110

Chapitre 5 ----------

5.1 Les valeurs de α_i^G et t_i^G calculées sous ANSYS..... 122

5.2 Écart du déplacement à l'extrémité de la plaque 129

Chapitre 6 ----------

6.1 Température maximale au sein du PZT pour les matériaux thermoplastiques étudiés 135

Introduction Générale

Contexte de la thèse

Le travail présenté dans ce mémoire de thèse est une contribution à la fabrication des structures thermoplastiques intelligentes incluant des études de modélisation et d'expérimentation sur l'intégration d'actionneurs et de capteurs dans une structure mécanique en thermoplastique.

Actuellement, les systèmes intelligents sont un domaine en plein développement et en pleine effervescence. Ils disposent d'un intérêt majeur : leur capacité d'adaptation au milieu ambiant, selon l'évolution des conditions environnantes. Dans ce cadre, on constate une envolée des publications dans ce domaine depuis le début des années 80. Depuis cette période, des efforts considérables en recherche fondamentale ont été consacrés au développement de nouveaux matériaux intelligents.

Sans vouloir être spécifiques mais pour rester concrètes, les recherches effectuées se sont focalisées sur l'intégration de composants piézoélectriques dans des matrices thermodurcissables. Cependant, la fabrication à grande série et le recyclage constituent deux grands défis nécessitant le remplacement des matériaux thermodurcissables par des matériaux thermoplastiques. Toutefois, les procédés actuels de fabrication des pièces en composite actif à matière thermoplastique ne sont pas directement exploitables pour l'intégration de composants fragiles tels que les composants piézoélectriques. En effet, lors de leur fabrication, les composites thermoplastiques actifs affrontent deux grandes problématiques principales d'origines thermique et mécanique :

- La problématique thermique se manifeste par le dépassement de la limite thermique fonction de la température de Curie des composants piézoélectrique. Ceci provoque une perte au niveau des propriétés piézoélectriques.
- La problématique mécanique est causée par l'élévation de la pression à l'intérieur du moule pendant le procédé de moulage. Ceci provoque une élévation de pression au

niveau du composant piézoélectrique intégré, et par suite, une étude spécifique est nécessaire afin d'éviter d'éventuels problèmes de nature mécanique ou piézoélectrique.

Comme le domaine abordé est très vaste et l'objectif ambitieux, beaucoup d'études de nature très différentes se sont avérées nécessaires et manifestement impossibles à réaliser au cours d'une seule thèse. Les études réalisées l'ont été en fonction des moyens disponibles. Ce rapport de recherche peut ainsi apparaître relativement hétérogène mais tous les aspects présentés contribuent bien au même but. Dans ce contexte, la thèse s'est concentrée sur la détermination du rapport entre le procédé de fabrication et les modèles de comportement à développer pour l'utilisation des composants piézoélectriques intégrés. On envisage des modèles intégrant l'histoire du composant lors de son intégration avec des variables exposant, par exemple, la perte partielle ou totale de certaines propriétés des composants intégrés, comme les actionneurs et les capteurs piézoélectriques, due aux dégradations d'origine thermique ou mécanique.

Le travail s'inscrit dans le cadre des activités de l'équipe de recherche *Systèmes Mécanique Adaptatifs* (SMA) du laboratoire *Mécatronique3M* (M3M) à *l'Université de Technologie de Belfort - Montbéliard* (UTBM). L'objectif de l'équipe SMA est de maîtriser la conception des systèmes mécaniques intelligents et les conditions de la production industrielle de leurs structures mécaniques en matériaux composites. Actuellement cet objectif se concrétise par le thème transversal de recherche « Modélisation probabiliste des systèmes mécaniques complexes ». En outre, il comporte des projets scientifiques relatifs à l'expérimentation et le diagnostic des systèmes mécaniques complexes (fiabilité [Fal01], sûreté de fonctionnement [Kou01], durabilité, gestion des pannes) ainsi que la fabrication et la modélisation des structures mécaniques composites intelligentes intégrées [Els06, Els07].

Plan de la thèse

Ce travail comporte sept parties.

Le premier chapitre présente le principe de fonctionnement du système intelligent suivi d'un panorama des différents types des matériaux intelligents utilisés dans la fabrication. Ensuite, il précise les problématiques principales de la fabrication des structures intelligentes en thermoplastique. Finalement, il présente la situation actuelle des composites intelligents à matrice thermoplastique afin de dégager l'objectif du travail.

Le deuxième chapitre présente les différents outils matériels et logiciels ainsi que les propriétés des matériaux utilisés dans nos études.

Le troisième chapitre est consacré à la caractérisation par modélisation et simulation, en fonction de différents ~~procèdes~~ procédés de plasturgie, de l'évolution thermique d'un disque piézoélectrique pendant le processus de fabrication. En fait la méthode est valable pour n'importe quel autre matériau intégré. Par contre, il est très intéressant de comparer les résultats de simulation avec les propriétés des céramiques piézoélectriques.

Le quatrième chapitre analyse de façon cette fois ciblée le comportement thermique de pastilles piézoélectriques. Cette analyse est majoritairement expérimentale.

Le chapitre cinq rend compte du comportement rhéologique d'un composite actif à matrice polypropylène. L'idée est d'analyser à partir d'expériences, le contact entre matrice et pastille. En réalité, les matériaux disponibles au laboratoire n'ont pas permis d'étudier une situation réelle. Cette étude constitue donc plutôt l'élaboration d'un outil qu'il faudra mettre en œuvre en liaison avec les procédés de fabrication. Dans ce chapitre, une démarche de caractérisation des propriétés viscoélastiques d'un composite thermoplastique est proposée en couplant l'analyse, l'expérimentale et la simulation.

Le dernier chapitre montre l'influence des conditions thermiques sur la piézoélectricité dans différents procédés de plasturgie. Cette influence est obtenue en faisant converger les résultats du troisième et du quatrième chapitre.

Des conclusions générales clôturent ce mémoire de thèse. Elles synthétisent les principaux résultats obtenus et exposent les perspectives importantes qui ouvrent la voie aux développements et recherches ultérieurs.

Chapitre 1

ÉTAT DE L'ART D'UN SYSTEME MÉCANIQUE ADAPTATIF INTÉGRÉ

Table des matières

1.1 Introduction 6
1.2 Principe de fonctionnement d'un système adaptatif 7
1.3 Matériaux utilisés dans les systèmes intelligents 8
1.3.1 Caractéristiques principales 8
1.3.2 Matériaux principaux 9
1.3.2.1 Matériaux piézoélectriques 9
1.3.2.2 Matériaux électrostrictifs 10
1.3.2.3 Matériaux magnétostrictifs 10
1.3.2.4 Alliages à mémoire de forme 11
1.3.2.5 Fibres optiques 11
1.4 Matériau intelligent sélectionné pour l'étude 12
1.4.1 Limitation principale des matériaux intelligents 12
1.4.2 Orientation actuelle dans l'intégration de matériaux intelligents 12
1.4.3 Matrices pour l'intégration de matériaux intelligents 13
1.4.4 Evolution des matériaux piézoélectriques candidats à l'intégration 13
1.4.5 Conclusion 14
1.5 Choix de la matrice pour la fabrication des structures intelligentes 14
1.5.1 Etude comparative de matrices thermodurcissables et thermoplastiques 15
1.5.2 Recyclage des matières plastiques 15
1.5.3 Problématiques des structures piézoélectriques à matrice thermoplastique 16
1.5.3.1 Problématique thermique 16
1.5.3.2 Problématique mécanique 17
1.6 Conclusion 17

1.1 Introduction

La technologie des systèmes mécaniques intelligents s'intègre dans un domaine multidisciplinaire qui regroupe plusieurs sciences telles que la physique, la chimie, la mécanique, l'informatique et l'électronique. De ce fait, le progrès au niveau de l'application des structures intelligentes reste à présent limité malgré l'évolution relativement rapide de la science des matériaux intelligents.

L'intérêt de cette technologie se manifeste par le fait qu'elle apporte des réponses optimales à des problèmes extrêmement complexes, comme la détection des comportements imprévus dans le but d'améliorer le cycle de vie. Ainsi, l'amélioration de certains produits mécaniques permet d'exercer un meilleur contrôle, une meilleure maintenance préventive et par conséquent, un meilleur rendement du système.

Les systèmes intelligents ont leurs applications dans différentes domaines : transport terrestre et spatial (stabilité vibratoire et acoustique interne des voitures), ailes d'avion (modification de la forme selon la vitesse et la pression d'air pour améliorer la performance et la consommation du carburant [Cul96]), génie civil (bâtiments qui résistent mieux aux tremblements de terre, ponts avec systèmes intelligents qui détectent et préviennent les déplacements non désirables [Ama90]), domaine médical (Tensiomètre ; Analyseur de glucose [Sri96]).

Jusqu'à présent, les recherches sur les structures intelligentes intégrées ont essentiellement porté sur des réalisations en matériaux composites à matrice thermodurcissable. Cette technologie est un frein à l'introduction des structures mécaniques intelligentes dans les secteurs industriels où le paramètre recyclage est prépondérant. Mais les procédés actuels de réalisation des pièces en matière thermoplastique ne sont pas directement exploitables pour l'intégration de composants intelligents. En effet, il faut tenir compte à la fois des propriétés de tenue mécanique des composants à intégrer et des propriétés électriques ou autres qui font de ces matériaux, des matériaux intelligents. C'est ainsi que les contraintes mécaniques associées aux procédés actuels de réalisation des pièces en matière thermoplastique ne sont pas adaptées à l'intégration de composants fragiles comme les actionneurs piézoélectriques ou les composants électroniques. De même les propriétés thermiques associées à ces procédés peuvent également affecter le comportement de certains matériaux intelligents comme les alliages à mémoire de forme et les matériaux piézoélectriques.

Pour situer correctement le travail dans son environnement global, l'état de l'art d'un système de structure mécanique intelligente est présenté en commençant par une explication du principe de fonctionnement de ces systèmes. Ensuite, les principaux types des matériaux intelligents ainsi que leurs utilisations sont présentés. Finalement, les matériaux de base des structures intelligentes (thermodurcissables et thermoplastiques) sont comparés afin de dégager les problématiques et l'objectif de la thèse.

1.2 Principe de fonctionnement d'un système adaptatif

Les systèmes adaptatifs sont des systèmes qui interagissent avec leur environnement. Cette interaction se manifeste par leur capacité à s'adapter de façon appropriée afin d'aboutir à un état maîtrisé de la structure conforme aux objectifs de performance.

Un système adaptatif ou intelligent met en œuvre des capteurs, des actionneurs et des microprocesseurs qui analysent les réponses obtenues auprès des différents capteurs et réagissent par différentes commandes logiques de contrôle induisant à l'aide des actionneurs, des déformations localisées visant au maintien fonctionnel de la structure.

Les systèmes intelligents utilisent les propriétés fonctionnelles des matériaux avancés. Chaque composante d'un système adaptatif traditionnel présente une fonctionnalité spécifique.

Comme l'indique la figure 1.1, les quatre composants fondamentaux d'un système intelligent sont les suivants :

- les capteurs qui sont des dispositifs qui fournissent des mesures représentant un état du système
- les microprocesseurs qui traitent en temps réel les mesures des capteurs pour commander les actionneurs
- les actionneurs qui sont les dispositifs d'activation. Commandé par le microprocesseur, ils exercent sur le système une action sous forme de travail mécanique
- la logique qui préside à la chaîne de retour (feedback). Elle est constituée des algorithmes de contrôle, de surveillance et de détection d'endommagements.

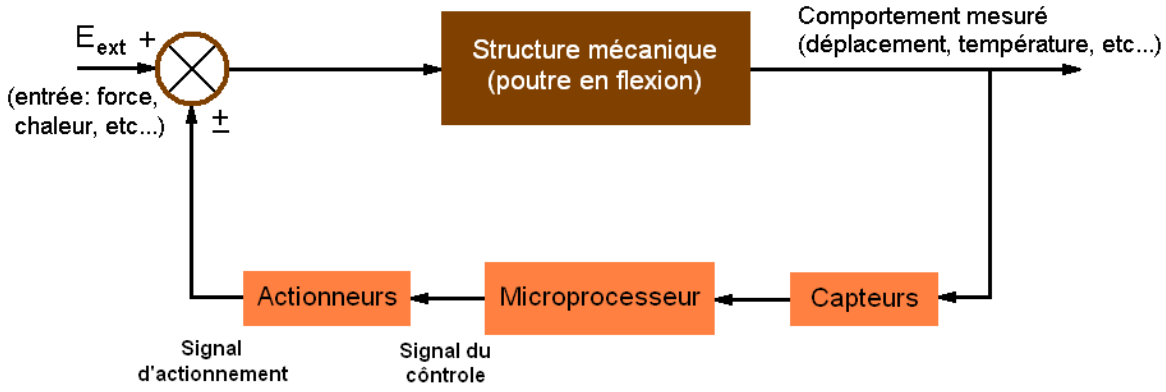


Fig. 1.1 - Organisation d'un système intelligent.

Ce travail concerne les capteurs et les actionneurs qui sont intégrés à la structure. Cette configuration permet d'élever considérablement la fiabilité du système.

1.3 Matériaux utilisés dans les systèmes intelligents

1.3.1 Caractéristiques principales

Le développement des systèmes intelligents va de pair avec le développement des matériaux. Partant de l'étude des matériaux inertes, la science des matériaux a permis d'élaborer d'abord des matériaux aux propriétés mécaniques spécifiques puis des matériaux intelligents qui ont des capacités d'observation, de distinction et de réponse plus précises.

Pour obtenir le statut d'intelligent, les matériaux doivent avoir idéalement des propriétés bien précises et obéir à des critères bien précis leur permettant d'aboutir à un objectif particulier. Ces caractéristiques ont évolué dans le temps jusqu'à aboutir pour certains auteurs [Akh99]) à respecter des :

- propriétés techniques (caractéristiques physiques et mécaniques) et technologiques (fabrication).
- coûts des matériaux et de production.
- critères environnementaux (pollution, etc.…).
- capacités de réutilisation et de recyclage.

Les matériaux intelligents à fonction mécanique peuvent être groupés selon leur principe de fonctionnement, c'est-à-dire leur sensibilité particulière à une propriété physique de leur environnement ou leur action particulière sur cette propriété :

- le champ électrique : les matériaux piézoélectriques et électrostrictifs, les fluides électrorhéologiques.
- le champ magnétique : les matériaux magnétostrictifs, les fluides magnétorhéologiques.
- la température : les alliages à mémoire de forme.
- la lumière : les fibres optiques.

Les matériaux les plus importants sont décrits brièvement dans les paragraphes suivants.

1.3.2 Matériaux principaux

1.3.2.1 Matériaux piézoélectriques

La piézoélectricité est une propriété résultant de la non coïncidence des centres de charges positives et négatives des structures cristallines. Du fait que ces dernières sont des structures non centro-symétriques, elles constituent des dipôles électriques (fig.1.2). D'une part, une déformation de ces dipôles conduit à la création d'un champ électrique (polarisation) créant ainsi un effet appelé "effet direct". D'autre part, une application d'un champ électrique au niveau de ces dipôles provoque leur déformation (effet inverse).

En d'autres termes, l'application d'une force sur un matériau piézoélectrique provoque une déformation élastique du réseau atomique qui, à son tour, provoque l'apparition de charges à la surface des matériaux. Ces charges qui sont emmagasinées dans la capacité propre du composant, donnent naissance à un champ électrique qui a tendance à rétablir l'équilibre initial. De même l'application d'un champ électrique déforme le matériau.

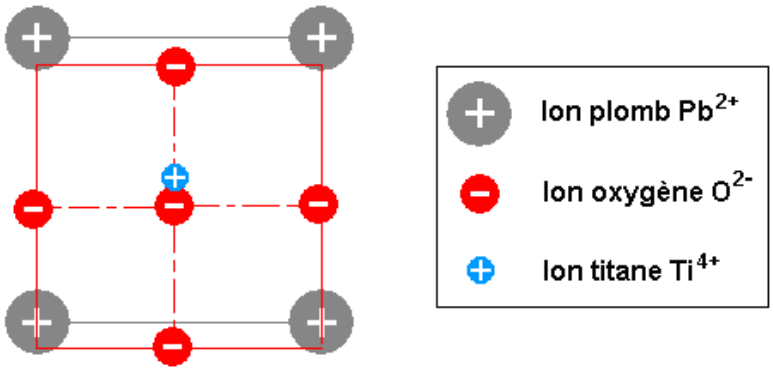


Fig. 1.2 - Structure cristalline quadratique de $PbTiO_3$.

Il est important de noter que la polarisation n'est stable que dans un domaine donné de température. Au delà d'une température, dite *température de Curie* pour les céramiques, il se produit une transition de phase et le matériau passe ainsi de l'état ferroélectrique à l'état paraélectrique. En conséquence, il se dépolarise et perd ses propriétés piézoélectriques.

L'avantage principal de ces matériaux est qu'ils sont intégrables dans des structures mécaniques. Ils sont homogènes et possèdent une densité de puissance élevée. Ils sont fabriqués sous différentes formes : éléments massifs (plaques, etc.) films, fibres, etc.

1.3.2.2 Matériaux électrostrictifs

Comme dans l'effet piézoélectrique inverse, le matériau électrostrictif subit une déformation sous l'action d'un champ électrique. Mais dans l'effet piézoélectrique inverse, la déformation est directement proportionnelle au champ électrique, alors que l'électrostriction est un effet du second ordre proportionnel au carré du champ électrique. Plus exactement, cette déformation est proportionnelle au carré de sa polarisation [Dam92].

De même que les céramiques piézoélectriques, les matériaux électrostrictifs doivent être polarisés avant utilisation. Leur avantage se manifeste par leur faible hystérésis (inférieur à 1 %). Cependant, ils possèdent une très faible température d'utilisation (maximum 40°C).

1.3.2.3 Matériaux magnétostrictifs

La magnétostriction [Len99] est un phénomène qui provoque la déformation d'un solide

lorsqu'il est soumis à un champ magnétique. Dans les matériaux magnétostrictifs, l'effet inverse est également observé. Le Terfenol-D est un exemple de matériau magnétostrictif.

Comparés aux matériaux électrostrictifs, leur capacité de déformation est double. Quoique leur rigidité et leur densité soient moins favorables à l'utilisation comme actionneurs, leur échelle de température est bien meilleure (de l'ordre de 75°C). De plus, leur coefficient de couplage est très élevé. L'inconvénient majeur de ces matériaux est le mode d'alimentation qui est complexe comparé aux matériaux piézoélectriques.

1.3.2.4 Alliages à mémoire de forme

Les alliages à mémoire de forme (AMF) sont des alliages métalliques qui peuvent garder (en mémoire) leur forme initiale et d'y retrouver par chauffage après être déformés à basse température (fig.1.3). L'alliage à mémoire de forme est caractérisé par l'existence de deux phases cristallines : une phase austénitique correspondant à une variante cristalline unique, et une phase martensitique pour laquelle la structure cristalline présente plusieurs variantes. Les AMF les plus répandus actuellement sont les alliages TiNi [Bue63].

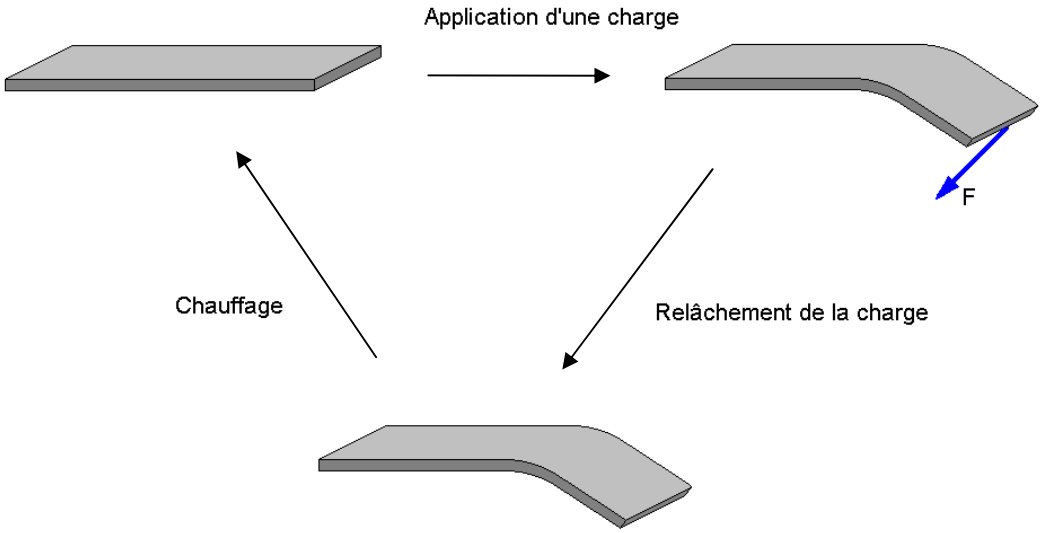


Fig. 1.3 - L'effet de mémoire de forme.

1.3.2.5 Fibres optiques

La fibre optique est généralement connue comme un fil en plastique ou en verre qui conduit un faisceau lumineux transmettant des données entre deux lieux distants de

milliers des kilomètres. La variation d'intensité lumineuse est capable de transmettre une grande quantité d'informations.

Sous forme courte, les fibres optiques peuvent être conditionnées comme interféromètres (par exemple Fabry-Perrot) pour mesurer principalement des déformations, voire des pressions et des températures.

1.4 Matériau intelligent sélectionné pour l'étude

1.4.1 Limitation principale des matériaux intelligents

De façon générale, nous avons vu que la limitation principale des matériaux intelligents les plus utilisés est la température. C'est pourquoi, il parait naturel de se concentrer ici sur le matériau le plus représentatif de cette catégorie par son usage, c'est-à-dire la céramique piézoélectrique. Cela correspond à l'orientation actuelle dans l'intégration de matériaux intelligents

1.4.2 Orientation actuelle dans l'intégration de matériaux intelligents

On constate en effet, jusque dans la littérature récente, un intérêt considérable pour la conception, la modélisation, le contrôle et la mise en œuvre de poutres intelligentes dans lesquelles ont été intégrées des pastilles piézoélectriques.

Hubbard et Baily [Bai85] ont étudié l'utilisation de matériaux piézoélectriques comme capteurs et actionneurs dans des structures sollicitées en flexion. Crawley et Luis [Cra87] ont présenté le développement de capteurs et d'actionneurs piézoélectriques comme éléments des structures intelligentes. Hanagud et al. [Han92] ont développé un modèle d'éléments finis pour une poutre contenant des capteurs et des actionneurs en céramique piézoélectrique distribués dans la structure. Une évaluation expérimentale de l'actionnement piézoélectrique dans le but de contrôler des vibrations d'une poutre cantilever a été présentée par Burdess et Fawcett [Bur92]. Yang et Lee [Yang93] ont développé un modèle analytique pour le contrôle de la structure, dans lequel le positionnement des capteurs et des actuateurs et le contrôle de la structure ont été considérés comme variables indépendantes. Hwang et Park [Hwa93] ont présenté une nouvelle technique de modélisation par éléments finis de poutres en flexion. Sun et Zhang [Sun95] ont suggéré l'idée d'exploiter le mode de cisaillement pour créer de déflexion transversal dans de structures (stratifié) en composite. Ils ont prouvé que les actionneurs

intégrés offrent de nombreux avantages par rapport aux actionneurs mis sur la surface. Zhang et Sun [Zha96] ont formulé un modèle analytique d'une structure stratifiée avec actionneur piézoélectrique qui occupe le fond de la structure. Le modèle a été simplifié en supposant que les couches périphériques suivent la théorie d'Euler-Bernoulli, alors que les couches de base obéissent à la théorie de Timoshenko. Une nouvelle méthode de modélisation et de contrôle de composites avec actionneurs piézoélectriques intégrés a été proposée par Donthireddy et Chandrashekara [Don96].

Dans de travaux plus récents, Brennan et al. [Bre99] ont effectué des expériences sur des poutres pour différentes technologies d'actionneur piézoélectrique. Des simulations par éléments finis de structures intelligentes en utilisant un contrôleur feedback optimal pour des vibrations et des bruits ont été réalisées par Young-Hun et al. [You99]. Aldraihem et Khdeir [Ald00] ont proposé des modèles analytiques et des solutions exactes pour de poutres avec actionneurs piézoélectriques. Ulrich et al. [Ulr02] ont conçu un schéma optimal LQG du contrôle pour amortir les vibrations d'une poutre cantilever en utilisant des actionneurs et des capteurs piézoélectriques. Azulay et Abramovich [Azu04] ont présenté une formulation analytique et de solutions exprimées par un nombre limité de termes pour de structures en composite avec actionneurs piézoélectriques.

1.4.3 Matrices pour l'intégration de matériaux intelligents

Les applications et les recherches des structures et des matériaux intelligentes sont limitées par la fabrication des composites à matrice thermodurcissables [Don96, Ald97, Hor01, Moi04] (exemple: contrôle de la forme des ailes d'avion [Tzo90], antenne de réflexion [Agr99]) qui sont largement utilisés dans les industries de l'aéronautique et de l'automobile.

1.4.4 Evolution des matériaux piézoélectriques candidats à l'intégration

D'autre part, en plus des travaux cités ci-dessus et qui s'intéressent à l'étude des composites thermodurcissables avec des matériaux piézoélectriques, il existe une autre piste de recherche portant sur le développent de nouvelles générations de matériaux piézoélectriques afin d'en améliorer les différents caractéristiques piézoélectriques. Plus précisément, Eitel et al. [Eit01] ont développé une nouvelle formule [(1-x)BiYbO3-(x)PbTiO3] du matériau piézoélectrique possédant une température de Curie plus élevée pouvant atteindre des valeurs allant de 400 à 600°C. Zhiguo et Qiang [Zhi07] ont élaboré une étude des propriétés diélectriques, ferroélectriques et piézoélectriques d'une nouvelle

structure [0.59Pb(Mg1/3Nb2/3)O3–0.31PbTiO3–0.10Pb(Fe1/2Nb1/2)O3] améliorant la température de Curie et diminuant les pertes diélectriques. Une autre structure ($CaBi_4Ti_4O_{15}$) a été déterminée par Zhang et al. [Zha06]. Cette structure possède d'excellentes propriétés mécaniques et piézoélectriques avec une température de Curie pouvant atteindre 800°C et une résistivité électrique élevée.

1.4.5 Conclusion

Les recherches sur les structures mécaniques intelligentes en composite sont donc centrées sur l'intégration de composants piézoélectriques dans des matrices constituées de matériaux thermodurcissables.

D'autres travaux de recherche se focalisent sur la construction de nouvelles formules pour des matériaux piézoélectriques possédant des propriétés piézoélectriques plus évolués y compris la température de Curie. Ces nouveaux matériaux piézoélectriques sont très chers comparativement aux matériaux piézoélectriques classiques, ce qui ralentit leur commercialisation et leur intégration dans la fabrication à grandes séries. Cependant, il est clair qu'à l'instar des matériaux piézoélectriques déjà sur le marché, ces nouveaux matériaux ont vraisemblablement vocation à se démocratiser.

Dans cette optique, et afin de répondre à la problématique principale liée à la température, notre action s'est focalisée sur les procédés permettant d'intégrer les composants piézoélectriques classiques tout en maintenant l'ouverture vers ces nouveaux matériaux aux propriétés améliorées, notamment à la température de Curie plus élevée.

Il reste à sélectionner le type de matériau utilisé comme matrice d'intégration.

1.5 Choix de la matrice pour la fabrication des structures intelligentes

Les indications données sur les matériaux intelligents nous permettent maintenant d'aborder les problématiques de fabrication des structures mécaniques actives. Contrairement aux expériences actuelles rapportées dans la section précédente, nous montrons la prédominance des matériaux thermoplastiques sur les matériaux thermodurcissables, puis nous évoquons les problématiques liées à la fabrication de ces structures composites à matrice thermoplastique.

1.5.1 Etude comparative de matrices thermodurcissables et thermoplastiques

Les résines les plus utilisées dans les matériaux composites sont les résines thermodurcissables et les résines thermoplastiques.

Les résines thermodurcissables sont des polymères qui se transforment en produits essentiellement infusibles et insolubles après un traitement thermique ou physico-chimique. Ces résines donc ne peuvent être mises en forme qu'une seule fois. Par contre, les résines thermoplastiques peuvent être continuellement ramollies par chauffage et durcies par refroidissement dans un intervalle de température propre au polymère utilisé.

Comparativement aux composites thermodurcissables, les composites thermoplastiques possèdent quand même les avantages suivants :

- L'avantage le plus important est la recyclabilité de ces matériaux.
- Les composites thermoplastiques à fibres courtes et longues permettent une grande simplicité de mise en œuvre en fabrication à grande série.
- Les résines thermoplastiques présentent l'aptitude à l'état liquide de se mouler facilement par plasticité.
- La possibilité de réchauffement et d'écoulement sur plusieurs cycles.
- Légèreté et liberté de conception
- Propriétés mécaniques et thermiques élevées : résistance aux chocs, ténacité ajoutée.
- Absence de réaction chimique (solvants) lors de la mise en œuvre.
- Longue durée de stockage.

1.5.2 Recyclage des matières plastiques

Sous l'impulsion des législations internationales dont françaises, le traitement des déchets de matières plastiques est devenu une préoccupation de tout projet, tant pour les industriels que pour les consommateurs. Aujourd'hui, ce traitement est devenu une réalité industrielle.

Ainsi, il convient de signaler que l'obligation de recyclage est l'une des causes essentielles qui ont poussé la fabrication internationale des composites (y compris les composites actifs) à se diriger vers l'utilisation des matériaux thermoplastiques comme matériaux de base au lieu des matériaux thermodurcissables dont le recyclage est difficile.

Parmi les matériaux sujets au recyclage actuellement, on peut citer : le Polyéthylène (PE) (sacs, tubes et tuyaux, flacons de produits alimentaires, films agricoles, housses d'emballages, produits lessiviels, etc.), le Polypropylène (PP) (liens, sacherie, pare-chocs, bacs de batteries, etc.), le Polychlorure de vinyle (PVC) (tuyaux, tubes, plaques, déchets de câbles, etc.), le Polyéthylène téréphtalate (PET) (flacons de produits alimentaires et ménagers, déchets de production, etc.), le Polyméthacrylate de méthyle (PMMA) (destruction d'épaves automobiles) et finalement le Polystyrène (PS) (Emballages et éléments de calage).

1.5.3 Problématiques des structures piézoélectriques à matrice thermoplastique

Il vient d'être montré que la fabrication à grande série et le recyclage sont les deux grandes raisons qui poussent à l'utilisation de matrices thermoplastiques dans les fabrications des composites et par conséquent des composites actifs.

Il est bien clair que, malgré les avantages de l'utilisation des matrices thermoplastiques, les procédés actuels de fabrication des pièces en composite actif à matière thermoplastique ne sont pas directement exploitables pour l'intégration de composants fragiles tels que les composants piézoélectriques utilisés comme actionneurs ou capteurs et les composants électroniques associés (connectiques, etc.).

Lors de la fabrication des composites thermoplastiques actifs nous affrontons deux grandes problématiques :

1.5.3.1 Problématique thermique

La première problématique est de nature thermique. En effet, La viscosité dynamique des matériaux thermodurcissables varie entre 0.05 et 0.5 Pa.s tandis que les matériaux thermoplastiques à la température ambiante sont à l'état solide et la viscosité de ces matériaux pendant le procédé de mise en œuvre peut atteindre 10^2 - 10^6 Pa.s. Cette viscosité relativement élevée des matériaux thermoplastiques fondus, conduit les fabricants des composites à matrice thermoplastique à élever la température et la pression de ces matériaux pendant les procédés de fabrication jusqu'à des températures pouvant atteindre 1.5 à 2 fois la température de fusion de ces matériaux [Cra93]. Les procédés principaux sont le moulage par injection de thermoplastiques, le surmoulage et le thermoformage. L'intégration des actionneurs ou des capteurs piézoélectriques dans des pièces en composite à matrice thermoplastique provoque le dépassement de la limite

thermique de ces composants : assez conventionnellement $T_c/2$ (où T_c est la température de Curie du composant piézoélectrique qui varie selon le type du piézoélectrique utilisé), et par conséquence la dégradation thermique de ces matériaux. Ainsi, la température nécessite d'être étudiée spécifiquement pour pouvoir déterminer son degré d'influence ainsi que les problèmes qu'elle peut causer au niveau des propriétés piézoélectriques.

1.5.3.2 Problématique mécanique

La deuxième problématique est de nature mécanique. En effet, pendant le procédé de moulage, la pression à l'intérieur du moule peut atteindre des valeurs de l'ordre de 1500 à 2000 bars. Une telle pression est considérée comme problématique au niveau du composant piézoélectrique intégré. La pression nécessite donc elle aussi une étude spécifique afin d'éviter d'éventuels problèmes de nature mécanique ou piézoélectrique.

1.6 Conclusion

Jusqu'à présent, la fabrication de structures mécaniques intelligentes s'effectue par l'utilisation des composites à matrice thermodurcissable. L'intégration du PZT dans des thermoplastiques n'est pas abordée à cause des problématiques thermique et mécanique du PZT vis-à-vis d'une matrice thermoplastique. A cette fin, nous avons étudié ces problèmes pour contribuer à l'objectif à plus long terme, à savoir aboutir à un procédé permettant d'intégrer le PZT dans des matériaux thermoplastiques.

Au point de vue méthodologique, il est apparu rapidement qu'un certain nombre de recherches devaient être menées parallèlement, ou frontalement, donnant au paysage de la recherche un aspect parfois hétéroclite. Il faut bien voir que les résultats ont vocation à être intégrés dans une procédure convergeant à l'objectif à long terme. Cette convergence a cependant pu être réalisée partiellement.

Chapitre 2

PROCÉDÉS ET OUTILS DE MISE EN ŒUVRE

Table des matières

Section 1 : Propriétés et procédés de mise en œuvre des matériaux thermoplastiques...21

2.1.1 Introduction 21
2.1.2 Polymère thermoplastique 21
2.1.2.1 Qu'est ce qu'un polymère 21
2.1.2.2 Les polymères thermoplastiques 22
2.1.2.3 Caractéristiques thermiques et mécaniques des matériaux thermoplastiques 23
2.1.3 Matériaux composites à matrice thermoplastique 28
2.1.3.1 Qu'est qu'un matériau composite 28
2.1.3.2 Composites à matrice thermoplastique 29
2.1.4 Procédés de mises en œuvre des thermoplastiques 29
2.1.4.1 Moulage par injection 29
2.1.4.2 Moulage par co-injection (surmoulage) 31
2.1.4.3 Thermoformage 31
2.1.5 Conclusion 33

Section 2 : Les matériaux piézoélectriques 34

2.2.1 Introduction 34
2.2.2 Piézoélectricité 34
2.2.3 Polarisation 35
2.2.4 Modélisation 36
2.2.4.1 Equations constitutives de l'élasticité linéaire avec les notations utilisées en piézoélectricité ... 36
2.2.4.2 Matrice des coefficients piézoélectriques 37
2.2.4.3 Céramiques 39
2.2.5 Propriétés 40
2.2.5.1 Température de Curie 40
2.2.5.2 Composition dure et molle (hard & soft) 41

2.2.5.3 Vieillissement 41
2.2.5.4 Hystérésis 42
2.2.5.5 Influence de la polarisation sur les paramètres piézoélectriques 43
2.2.5.6 Sensibilité thermique et mécanique des matériaux piézoélectriques 43
2.2.6 Conclusion 46

Section 3 : Matériels et logiciels 48

2.3.1 Introduction 48
2.3.2 Viscoanalyseur 48
2.3.2.1 Généralité 48
2.3.2.2 Description de la machine 49
2.3.2.3 Mode d'essai de relaxation 51
2.3.2.4 Essai dynamique 51
2.3.3 Système d'acquisition TEAC GX-1 54
2.3.4 Logiciel ANSYS 54
2.3.4.1 PLANE55 54
2.3.4.2 SHELL63, SHELL99 et SHELL181 55
2.3.4.3 SOLID185 56
2.3.5 Logiciel Robot Me 56

Section 4 : Propriétés des matériaux spécifiques mis en œuvre 57

2.4.1 Introduction 57
2.4.2 Matériaux thermoplastiques 57
2.4.3 Pastilles piézoélectriques 58

Section 1 | Propriétés et procédés de mise en œuvre des matériaux thermoplastiques

2.1.1 Introduction

Il s'agit ici d'introduire des notions et des propriétés concernant les matériaux thermoplastiques chargés et non chargés ainsi que les procédés de leur mise en œuvre.

Le chapitre présente d'abord quelques notions sur les types des polymères en illustrant l'intérêt du choix des polymères thermoplastiques, ainsi que les propriétés qui intéressent notre étude.

Ensuite, nous présentons les procédés de mise en œuvre des thermoplastiques non chargés utilisés dans l'étude de modélisation (chap.3).

Finalement, nous exposons des notions concernant les matériaux composites à matrice thermoplastique ainsi que leur mise en œuvre.

2.1.2 Polymère thermoplastique

L'étude des procédés de fabrication des pièces thermoplastiques actives nous pousse à prendre connaissance de quelques notions sur les polymères utilisés dans la fabrication ainsi que les propriétés qui nous intéressent.

2.1.2.1 Qu'est ce qu'un polymère

Un polymère est une macromolécule (organique ou inorganique) constituée par l'enchaînement d'un grand nombre de molécules appelées monomères. Les réactions par lesquelles elles se combinent sont appelées polymérisations ou polycondensation. On appelle degré de polymérisation le nombre de ces monomères reliés entre eux. Les polymères se distinguent non seulement par la composition chimique du monomère et le degré de polymérisation, mais aussi par son arrangement (ramifications). De point de vue structure moléculaire, les polymères sont répartis en deux catégories : les amorphes (chaînes irrégulièrement arrangées) et les semi-cristallines (chaînes enchevêtrées sous forme de pelotes) [Bra99].

Le polymère est classé en fonction de ses propriétés en trois catégories :

- Les polymères thermoplastiques
- Les polymères thermodurcissables
- Les élastomères

2.1.2.2 Les polymères thermoplastiques

Les polymères thermoplastiques, forment le groupe le plus important des polymères synthétiques linéaires ou ramifiées. Le mot "thermoplastique" vient du fait que ce type de polymère passe de l'état solide à l'état malléable par élévation de la température. Ce procédé est réversible. De ce fait, ces polymères sont faciles à mettre en œuvre et leur recyclage ne pose pas de gros problèmes [Bra99].

Trois classes des matériaux thermoplastiques se développent :

- Les polymères de grande diffusion sont principalement le polypropylène, seul ou sous forme de copolymère avec le polyéthylène.
- Les polymères techniques, dont les plus utilisés sont les polyamides et les polyesters thermoplastiques mais également les polyéthylméthacrylates, les polyacétates et les polycarbonates.
- Les polymères hautes performances pour applications de type aéronautique sont typiquement le PEEK, le PEI, le PES.

Différentes caractéristiques distinguent les matériaux thermoplastiques des matériaux thermodurcissables. Ces caractéristiques sont illustrées dans le tableau 2.1.1 [Adv02] :

Tab. 2.1.1 - Caractéristiques des matériaux thermoplastiques et thermodurcissables.

	Thermoplastiques	**Thermodurcissables**
Etat de base	Solide (prêt à l'emploi : polymérisé)	Liquide visqueux à polymériser
Stockage matière de base	Illimité	Temps réduit
Mouillabilité des renforts	Difficile	Aisée
Viscosité	Haute	Faible
Solidification	Refroidissement pour un changement de phase	Dégagement de la chaleur au cours de polymérisation
Moulage	Chauffage (fusion + refroidissement de fixation)	Chauffage continu
Cycle	Court	Plus long (refroidissement)
Tenue au choc	Assez bonne	Limitée
Tenue thermique	Réduite	Meilleure
Usage	Grande utilisation dans le moulage par injection	Principalement utilisées dans les composites
Recyclabilité	Recyclables	Perdus

2.1.2.3 Caractéristiques thermiques et mécaniques des matériaux thermoplastiques

Il est important pour notre étude d'analyser les matériaux thermoplastiques en vue de déterminer celui qui est le plus approprié pour le composant intelligent qui doit être intégré et de choisir le procédé de fabrication qui convient.

Propriétés thermiques

Les paramètres thermiques qui intéressent les études de modélisation réalisées dans le chapitre suivant sont : la température de fusion, la conductivité thermique et la chaleur spécifique.

Température de fusion (T_f) – La température de fusion est la température à laquelle une substance passe de l'état solide à l'état liquide. Les polymères cristallins et semi-cristallins

possèdent une température de fusion bien déterminée tandis que les polymères amorphes se fondent de façon progressive (figure 2.1.1) [Tro96].

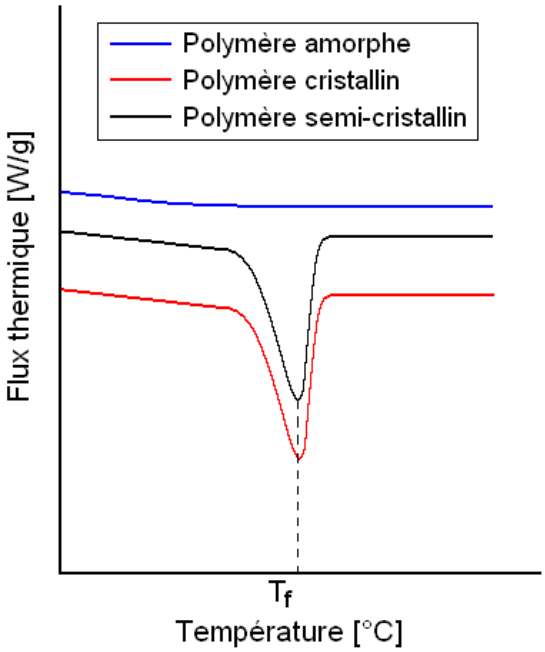


Fig. 2.1.1 - Courbes (DSC) qui déterminent le point de fusion de polymères amorphes, cristallins et semi-cristallins.

Conductivité thermique (K) - la conductivité thermique représente la quantité de chaleur transférée par unité de surface et de temps. Cette quantité de chaleur résulte d'un gradient de température.

Chaleur spécifique (C) - La chaleur spécifique est la quantité de chaleur nécessaire pour élever la température d'un degré, pour une masse d'un matériau.

Des exemples de températures de fusion, de conductivités thermiques et de chaleurs spécifiques des matériaux thermoplastiques sont présentés dans le tableau 2.1.2.

Tab. 2.1.2 - T_f, K et C de quelques matériaux thermoplastiques [MAT].

Matériaux thermoplastiques	Température de fusion (T_f) (°C)	Conductivité thermique (K) (W/m.K)	Chaleur spécifique (C) (J/kg.K)
PP	160 - 170	0.17 - 0.4	1500 - 2800
ABS	165 - 178	0.13 - 0.19	1950 - 2130
HDPE	125 - 135	0.28 - 0.42	2000 - 2600
PVC	80 - 100	0.14 - 0.17	1100 - 1900
PC	220 - 230	0.16 - 0.23	1130 - 1700
PEEK	335 - 345	0.24 - 0.26	1850 - 2160

Propriétés mécaniques

***Elasticité* -** Le module d'élasticité des polymères thermoplastiques est relativement faible par rapport aux métaux et le rapport résistance et poids est plus élevé. Les matériaux plastiques (thermoplastique ou thermodurcissable) ont une résistance au choc variant selon leur fragilité et leur ténacité (figure 2.1.2 et 2.1.3).

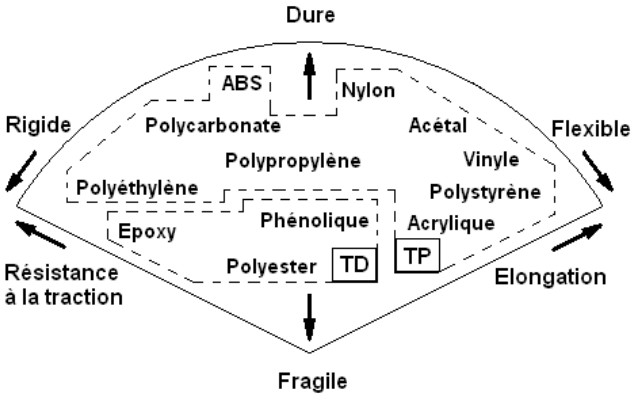


Fig. 2.1.2 - Exemple de gamme des propriétés mécaniques des plastiques [Ros01].

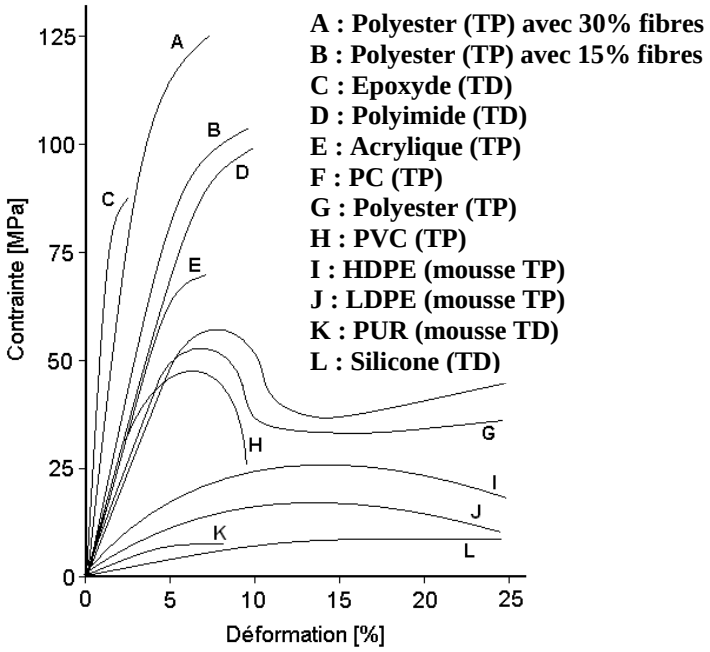


Fig. 2.1.3 - Exemple d'une gamme de résistance à la traction, de module d'élasticité et de déformation de certaines plastiques TD et TP avec et sans fibres de verre [Ros01].

Viscoélasticité - Les polymères ont un comportement viscoélastique, ce qui implique une dépendance du temps *t*, des relations que l'on peut établir entre les contraintes σ et les déformations ε.

La viscoélasticité définit le comportement mécanique intermédiaire entre le comportement d'un solide idéal "hookéen" et celui d'un liquide idéal "newtonien".

Le phénomène visqueux vient du déplacement lent de chaînes entières de polymères par rapport aux chaînes voisines.

Fluage – Le fluage consiste à appliquer une contrainte constante au matériau et à suivre l'évolution de la déformation en fonction du temps. L'expérience de fluage peut être suivie d'une expérience de recouvrance au cours de laquelle on suit l'évolution de la déformation après suppression de la contrainte [Car99].

Dans le cas du *comportement viscoélastique*, la déformation totale se décompose en trois parties :

- une déformation instantanée et réversible instantanément (donc de nature élastique) ;

- une déformation fonction du temps mais réversible ;
- une déformation fonction du temps et irréversible, correspondant à un écoulement (donc de nature visqueuse).

Pour un matériau viscoélastique, on définit une *complaisance de fluage*, rapport de la déformation à la contrainte imposée. Cette complaisance est une fonction du temps :

$$\mathbf{J(t) = \frac{\gamma(t)}{\tau_0}} \qquad \textbf{(1)}$$

Relaxation – La relaxation consiste à appliquer une déformation constante au matériau et à suivre l'évolution de la contrainte en fonction du temps. On définit un module de relaxation, rapport de la contrainte à la déformation imposée [Car99]. Ce module est une fonction du temps :

$$\mathbf{G(t) = \frac{\tau(t)}{\gamma_0}} \qquad \textbf{(2)}$$

La figure 2.1.4 montre la réponse mécanique obtenue en fluage et en relaxation en fonction du temps.

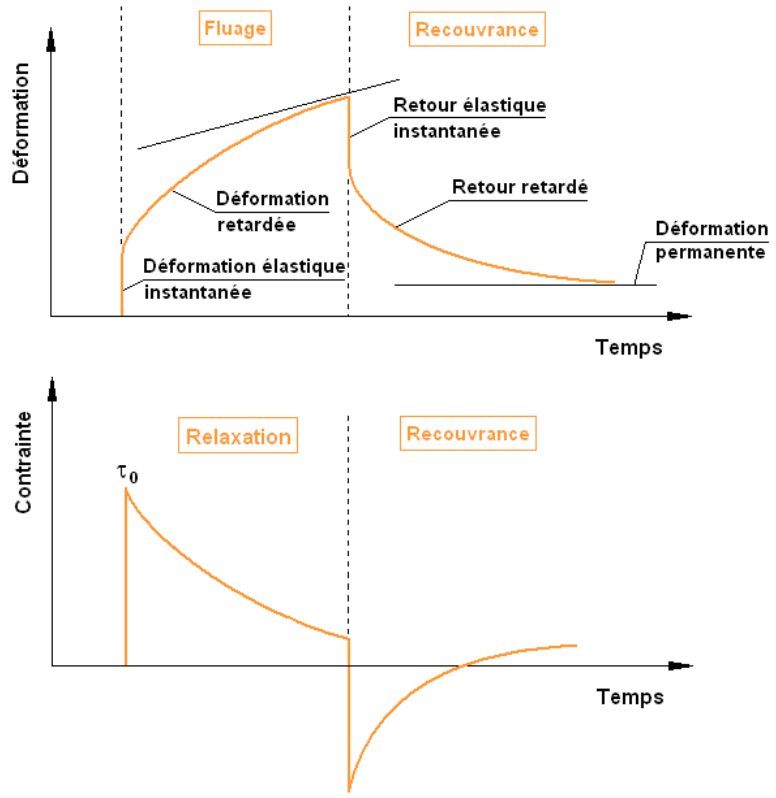


Fig. 2.1.4 - Fluage et relaxation.

2.1.3 Matériaux composites à matrice thermoplastique

2.1.3.1 Qu'est qu'un matériau composite

Un matériau composite est l'assemblage de plusieurs matériaux de natures différentes en aboutissant à un matériau dont le comportement mécanique est amélioré par rapport à celui des matériaux pris séparément. Les matériaux composites existent depuis très longtemps, le plus célèbre est le béton armé.

Les matériaux composites constitués de fibre et de résine possèdent de nombreux avantages : résistance mécanique et chimique, légèreté, maintenance réduite. Ils servent à :

- augmenter la durée de vie grâce à leurs propriétés : rigidité, résistance à la fatigue, résistance à la corrosion, et absence de plasticité.
- augmenter la sécurité par l'absorption d'une partie de l'énergie dégagée (exemple : vibration).

Un matériau composite est formé d'un squelette appelé "renfort" et d'une interconnexion protectrice appelée "matrice" (thermoplastique ou thermodurcissable).

Les matériaux composites sont classés en fonction de la matrice en trois familles :

- Les composites à matrices organiques.
- Les composites à matrices céramiques.
- Les composites à matrices métalliques.

2.1.3.2 Composites à matrice thermoplastique

Trois familles de composites à matrice thermoplastique sont actuellement commercialisées [Luc07] :

- Les composites sous forme de granulés, à fibre très courtes (environ 0.3 mm) et ceux à fibres longues (supérieures à 1 mm).
- Les thermoplastiques renforcés estampables (TRE).
- Les préimprégnés en thermoplastiques à fibres continues, qui sont en concurrence avec les préimprégnés thermodurcissables. Il existe trois familles : grande diffusion (PP/fibres de verre), technique (PET, PA,…/fibres de verre) et haute performance (PEEK, PPS,…/fibres de verre, de carbone ou de kevlar).

2.1.4 Procédés de mises en œuvre des thermoplastiques

On compte une dizaine des procédés de mise en œuvre des pièces en thermoplastique. On peut citer parmi ces procédés : injection, injection sandwich (surmoulage), moulage par réaction (RIM), extrusion, calandrage, soufflage, rotomoulage, thermoformage et d'autres procédés complémentaires comme l'usinage, le chaudronnage, l'assemblage et d'autres [Har06].

Dans les études réalisées dans les chapitres suivants, nous utilisons trois procédés de mise en forme des thermoplastiques : le moulage par injection, le surmoulage et le thermoformage.

2.1.4.1 Moulage par injection

Le moulage par injection est un procédé de fabrication des thermoplastiques en grande série et immédiatement utilisés (fig.2.1.5). La partie centrale de la presse à injection est le

moule qui comporte l'empreinte de la pièce à fabriquer. La matière thermoplastique est introduite dans le moule sous forme fondue à une température (température d'injection) de 1.5 à 2 fois supérieures à la température de fusion.

La presse à injection comporte (fig.2.1.6):

- Un dispositif chauffant pour fondre la matière thermoplastique.
- Un piston pour introduire sous pression la matière fondue dans le moule.
- Un système de refroidissement introduit dans le moule pour solidifier la pièce.
- Un système de démoulage.

Fig. 2.1.5 - Presse à injection.

Dans le procédé d'injection (figure 2.1.6), la température de la matière est souvent élevée, ce qui peut provoquer une perte de propriétés piézoélectriques d'un composant piézoélectrique pendant le procédé. La résistance thermique du composant piézoélectrique nécessite la connaissance des phénomènes thermiques au cours du cycle de moulage. Nous exposons, dans le chapitre suivant, les divers aspects des transferts thermiques lors du procédé d'injection des thermoplastiques. Nous traitons le refroidissement du modèle ainsi que l'échauffement du composant piézoélectrique. Nous introduisons également des notions moins classiques de compromis entre l'échauffement et le refroidissement du polymère lors du remplissage du moule et le sur-échauffement du composant piézoélectrique.

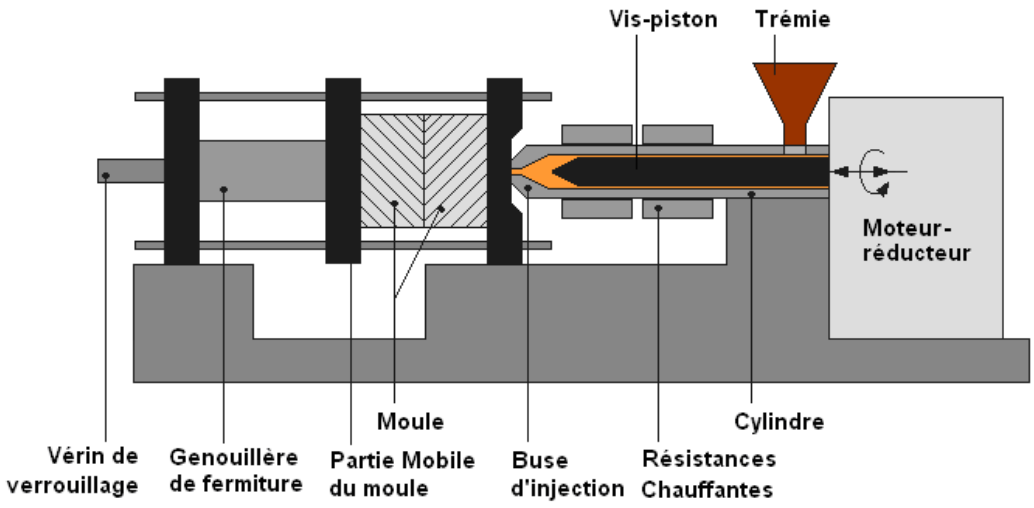


Fig. 2.1.6 - Anatomie d'une presse à injection.

2.1.4.2 Moulage par co-injection (surmoulage)

Le procédé de surmoulage consiste à injecter la matière thermoplastique en deux ou plusieurs étapes, dans un même moule.

2.1.4.3 Thermoformage

Dans notre travail, nous étudions un autre procédé de fabrication des thermoplastiques, appelé thermoformage, et son influence sur le capteur piézoélectrique intégré.

La technique de thermoformage (fig.2.1.7) consiste essentiellement à chauffer une plaque en matériau thermoplastique par conduction ou rayonnement jusqu'à ce qu'elle s'assouplisse et devienne extensible. Pour les polymères cristallins, essentiellement le polyéthylène et le polypropylène, la densité énergétique standard de chauffage varie de 30 à 45 kW/m². L'air qui se trouve entre le moule et les feuilles chaudes est évacué par une pompe à vide. La feuille adopte alors l'empreinte du moule.

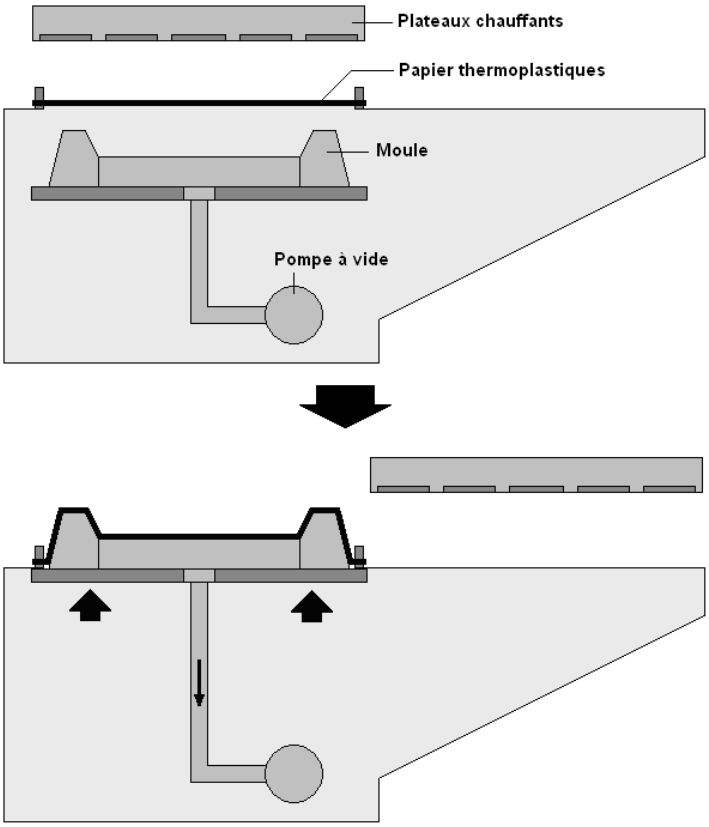


Fig. 2.1.7 - Thermoformage.

Le procédé de thermoformage se compose de trois phases principales :

- *Phase de chauffage* - La feuille thermoplastique est réchauffée pour atteindre la température de formage. La durée du cycle de réchauffement est régulée par rapport à la température au centre de la feuille. En conséquence, le coefficient d'échauffement doit être régulé de façon à éviter le surchauffage de la surface.
- *Phase intermédiaire (formage)* - Le but de cette phase est d'homogénéiser la température entre les couches de la pièce pour stabiliser la température dans les différents endroits. Lorsque la température optimale de thermoformage est atteinte, les équipements de chauffage sont enlevés. Le formage est réalisé soit par dépression (vide) soit par efforts mécaniques.
- *Phase de refroidissement* - La pièce est refroidie afin de pouvoir être éjectée sans défection. Le refroidissement des pièces est effectué par convection naturelle (cas de notre étude) ou forcée à l'aide d'un jet d'air. En général, cette étape passe par un ajustement de la température du moule.

2.1.5 Conclusion

Les propriétés et les notions thermiques et mécaniques des matériaux thermoplastiques sont utiles pour l'étude de modélisation des pièces en thermoplastique actives. Les chapitres suivants rapportent ces études. En outre, les procédés de mise en œuvre fournissent des informations sur l'environnement et les conditions de fabrication de ces pièces.

L'étude de l'effort mécanique sur le composant intégré au cours de la fabrication est indispensable pour dégager son influence. Cette étude est une perspective de notre travail.

Section 2 | Les matériaux piézoélectriques

2.2.1 Introduction

On ne prétend pas ici à l'exhaustivité dans une présentation des matériaux piézoélectriques. Il s'agit plutôt d'introduire les notions et propriétés nécessaires à une bonne maitrise de leur intégration dans les matrices thermoplastiques.

Les principes d'intégration étant illustrés par la mise en œuvre de pastilles en céramique piézoélectriques, on insistera sur les céramiques PZT en couches minces.

Le chapitre présente d'abord la piézoélectricité en général et l'étape indispensable de polarisation.

Avant de présenter les principales propriétés et particulièrement celles qui dépendent de la température, il est préférable de présenter les modélisations qui introduisent la plupart des concepts intervenant justement dans les propriétés.

2.2.2 Piézoélectricité

Un matériau est dit piézoélectrique s'il présente un couplage quasi linéaire entre le champ électrique à l'intérieur du matériau et son champ de déformation.

Cette piézoélectricité peut être présente de façon naturelle mais plus généralement elle apparait après une préparation du matériau par polarisation.

L'effet piézoélectrique s'aborde facilement par la présentation de deux expériences fondamentales, mettant en jeu une pièce cylindrique de matériau piézoélectrique dont chaque base est recouverte d'une électrode très rigide [Apc]. Le matériau piézoélectrique a été polarisé dans la direction de l'axe du cylindre.

Dans l'expérience de la figure 2.2.1a, les électrodes sont reliées à un galvanomètre à très grande impédance d'entrée. Si une force de compression est appliquée sur les bases du cylindre, on constate une déviation de l'aiguille du galvanomètre dans un sens. Une force dans le sens opposé produira une déviation de l'aiguille dans l'autre sens. Cet effet pourra être utilisé dans la construction de capteurs.

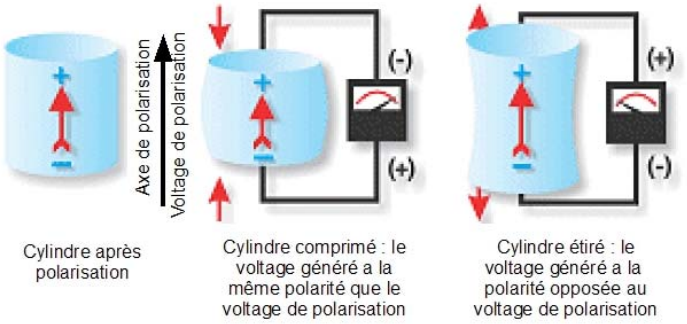


Fig. 2.2.1a - Effet de capteur dans les matériaux piézoélectriques.

Dans l'expérience de la figure 2.2.1b, les électrodes sont reliées à une source de tension électrique continue. On constate une dilatation du cylindre dans la direction de son axe. Si on inverse la source de tension électrique, on constate une contraction du cylindre dans la direction de son axe. Cet effet pourra être utilisé dans la construction d'actionneurs.

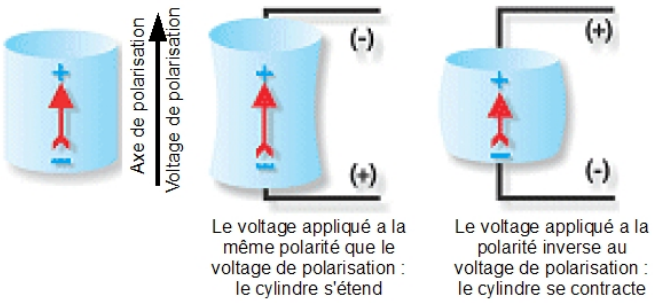


Fig. 2.2.1b - Effet d'actionneur dans les matériaux piézoélectriques.

La piézoélectricité ne peut s'observer que sur des matériaux ayant une structure cristalline non centrosymétrique. Ce qui ne veut pas dire que tout matériau à structure cristalline non centrosymétrique présente des propriétés piézoélectriques comme le montre la figure 2.2.2 (à partir de données issues de [Mil03]).

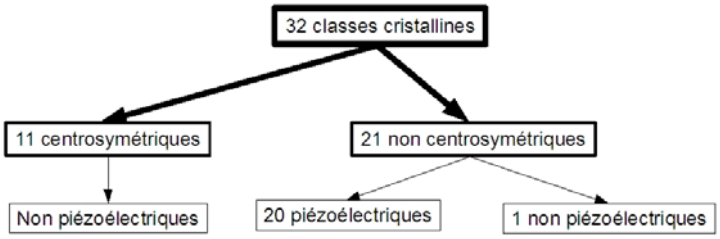


Fig. 2.2.2 – Classes cristallines.

2.2.3 Polarisation

Pour présenter la propriété de couplage entre le champ électrique à l'intérieur du matériau et son champ de déformation, les matériaux piézoélectriques doivent généralement être polarisés. Cette polarisation s'effectue par application d'un champ électrique constant dans une direction privilégiée nommée par convention, la troisième direction (la figure 2.2.3 montre les conventions pour la numérotation des directions). L'intensité du champ de polarisation, le temps de polarisation et la température de polarisation influencent

directement l'efficacité piézoélectrique du matériau comme montré plus loin. Par exemple, des échantillons sont polarisés dans un bain de silicone à une température de 120°C [Par05].

Avant la polarisation, les matériaux qui peuvent devenir piézoélectriques contiennent des dipôles électriques mais qui sont orientés de façon absolument quelconque.

La polarisation tend à orienter ces dipôles dans la direction du champ électrique appliqué lors de la polarisation comme le montre de façon idéale la figure 2.2.4 [Apc]. De manière plus réaliste, on peut se représenter le matériau comme composé de plusieurs domaines qui se réorientent par polarisation.

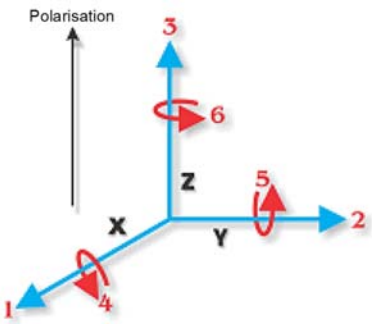


Fig. 2.2.3 - Numérotation des directions.

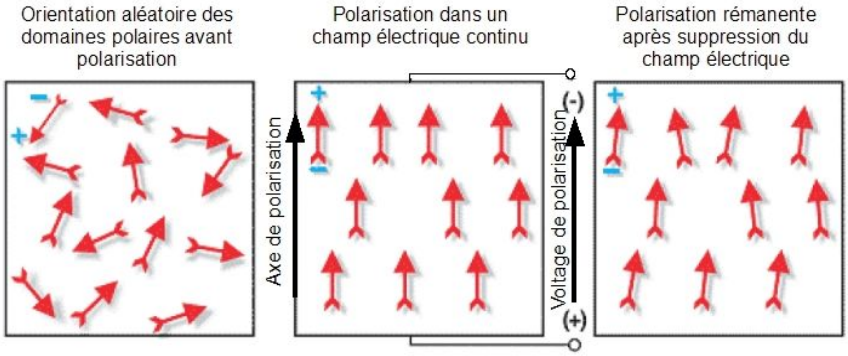


Fig. 2.2.4 – Domaines dipolaires électriques dans les matériaux piézoélectriques.

2.2.4 Modélisation

2.2.4.1 Equations constitutives de l'élasticité linéaire avec les notations utilisées en piézoélectricité

La relation générale reliant les tensions aux déformations est donnée habituellement en élasticité par la forme :

$$\varepsilon = H^{-1}\sigma \qquad \text{avec} \qquad \begin{array}{l} \varepsilon^T = (\varepsilon_1 \mid \varepsilon_2 \mid \varepsilon_3 \mid \gamma_{23} \mid \gamma_{31} \mid \gamma_{21}) \\ \sigma^T = (\sigma_1 \mid \sigma_2 \mid \sigma_3 \mid \tau_{23} \mid \tau_{31} \mid \tau_{21}) \end{array}$$

et $$H^{-1} = \begin{bmatrix} 1/E_1 & -\upsilon_{21}/E_2 & -\upsilon_{31}/E_3 & 0 & 0 & 0 \\ -\upsilon_{12}/E_1 & 1/E_2 & -\upsilon_{32}/E_3 & 0 & 0 & 0 \\ -\upsilon_{13}/E_1 & -\upsilon_{23}/E_2 & 1/E_3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1/G_{23} & & \\ 0 & 0 & 0 & & 1/G_{31} & \\ 0 & 0 & 0 & & & 1/G_{12} \end{bmatrix}$$

matrice de HOOKE inverse ou matrice de flexibilité.

Il faut la réécrire avec les notations habituelles utilisées en piézoélectricité. Les déformations y sont symbolisées par S_i et les tensions par T_j. Les relations entre tensions et déformations se résument à l'équation suivante en utilisant ces notations habituelles pour les matériaux piézoélectriques:

$$S_i = s_{ij}^E T_j \qquad \text{avec} \qquad s_{ij}^E = \begin{bmatrix} s_{11}^E & s_{12}^E & s_{13}^E & & & \\ s_{12}^E & s_{22}^E & s_{23}^E & & 0 & \\ s_{13}^E & s_{23}^E & s_{33}^E & & & \\ & & & s_{44}^E & & \\ & 0 & & & s_{55}^E & \\ & & & & & s_{66}^E \end{bmatrix}$$

matrice de flexibilité (compliances)

La relation inverse $\sigma = H\varepsilon$ s'écrit dans les notations piézoélectriques :

$$T_i = c_{ij} S_j \qquad \text{avec} \qquad c_{ij} = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} & & & \\ c_{12} & c_{22} & c_{23} & & 0 & \\ c_{13} & c_{23} & c_{33} & & & \\ & & & c_{44} & & \\ & 0 & & & c_{55} & \\ & & & & & c_{66} \end{bmatrix}$$

matrice de Hooke

2.2.4.2 Matrice des coefficients piézoélectriques

Les propriétés piézoélectriques des matériaux polarisés dans la troisième direction peuvent être caractérisées par une matrice de coefficients piézoélectriques. On a en général:

$$d_{ij} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & d_{24} & 0 & 0 \\ d_{31} & d_{32} & d_{33} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Les coefficients piézoélectriques dépendent du matériau et de caractéristiques comme les conditions de polarisation et la température.

En considérant des champs électriques imposés E_k dans les directions k, les relations entre les déformations S_i et les tensions T_j deviennent :

$$\begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \\ S_4 \\ S_5 \\ S_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_{11}^E & s_{12}^E & s_{13}^E & & & \\ s_{12}^E & s_{22}^E & s_{23}^E & & 0 & \\ s_{13}^E & s_{23}^E & s_{33}^E & & & \\ & & & s_{44}^E & & \\ & 0 & & & s_{55}^E & \\ & & & & & s_{66}^E \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \\ T_5 \\ T_6 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & d_{31} \\ 0 & 0 & d_{32} \\ 0 & 0 & d_{33} \\ 0 & d_{42} & 0 \\ d_{51} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{bmatrix}$$

Ou en bref :

$$S = s^E T + d^T E$$

Si des tensions mécaniques T_j existent dans le matériau, des déplacements électriques supplémentaires ΔD_i sont détectés et se calculent de la façon suivante:

$$\begin{bmatrix} \Delta D_1 \\ \Delta D_2 \\ \Delta D_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & d_{24} & 0 & 0 \\ d_{31} & d_{32} & d_{33} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \\ T_5 \\ T_6 \end{bmatrix}$$

Le champ électrique est relié au déplacement électrique par la permittivité électrique (constante diélectrique) du matériau:

$$\begin{bmatrix} D_1 \\ D_2 \\ D_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \varepsilon_{11}^T & & \\ & \varepsilon_{22}^T & \\ & & \varepsilon_{33}^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{bmatrix}$$

La permittivité d'un matériau se caractérise par rapport à la constante diélectrique du vide:

$$\varepsilon^T = \varepsilon_0 \varepsilon_r^T \qquad \text{avec} \qquad \varepsilon_0 = 8.85 \text{ pF/m}$$

2.2.4.3 Céramiques

Les céramiques sont des matériaux à priori homogènes mais leur polarisation dans la troisième direction différencie cette direction par rapport aux deux autres. Les céramiques sont donc isotropes dans le plan des directions 1 et 2 perpendiculaire à la direction 3 de polarisation.

Relations constitutives

En notant :

- s_{11}^E l'inverse du module de YOUNG dans le plan perpendiculaire à la direction de polarisation, et
- $\upsilon_{12} = -s_{12} / s_{11}$ et $\upsilon_{13} = -s_{13} / s_{33}$, les coefficients de Poisson,

Les équations générales données ci-dessus se réduisent dans le cas présent à:

$$S_i = s_{ij}^E T_j \qquad \text{avec} \qquad s_{ij}^E = \begin{bmatrix} s_{11}^E & s_{12}^E & s_{13}^E & & & \\ s_{12}^E & s_{11}^E & s_{13}^E & & 0 & \\ s_{13}^E & s_{13}^E & s_{33}^E & & & \\ & & & s_{44}^E & & \\ & 0 & & & s_{44}^E & \\ & & & & & 2(s_{11}^E - s_{12}^E) \end{bmatrix}$$

matrice de flexibilité

$$d_{ij} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 & 0 \\ d_{31} & d_{31} & d_{33} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

matrice des coefficients piézoélectriques

Couches céramiques minces

Les pièces à intégrer considérées sont des pastilles minces avec un axe de polarisation perpendiculaire au plan de la pastille. Les faces de la pastille constituent les électrodes et seul le champ électrique dans la direction 3 est considéré.

L'état plan de tension peut être retenu et les équations peuvent encore se simplifier. En effet, comme on a :

$$T_3=T_4=T_5=0$$

Les relations entre les déformations et les tensions se réduisent pour un matériau piézoélectrique à isotropie dans le plan 1-2, à :

$$\begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \\ S_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_{11} & s_{12} & \\ s_{12} & s_{11} & \\ s_{31} & s_{31} & \\ & & 2(s_{11}-s_{12}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_6 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} d_{31} \\ d_{31} \\ d_{33} \\ 0 \end{bmatrix} E_3$$

Si des tensions mécaniques T_j existent dans le matériau, des déplacements électriques supplémentaires ΔD_i et le champ électrique valent respectivement :

$$\Delta D_3 = \begin{bmatrix} d_{31} & d_{31} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_1 \\ T_3 \\ T_6 \end{bmatrix}, E_3 = \frac{\Delta D_3}{\varepsilon_{33}^T} \text{ avec } \varepsilon_{33}^T = \varepsilon_0 \times \varepsilon_{r33}^T \text{ et } \varepsilon_0 = 8.85 \text{ pF/m.}$$

Ce sont donc les paramètres de cette section qui concernent l'étude d'intégration.

2.2.5 Propriétés

Le type de céramique piézoélectrique la plus répandue est le PZT (Zirconate Titanate de Plomb), de symbole chimique général $Pb(Zr,Ti)O_3$. Selon la composition et le mode de fabrication, les propriétés peuvent varier fortement.

2.2.5.1 Température de Curie

La température de Curie est la température de fonctionnement au dessus de laquelle le matériau perd sa piézoélectricité. On préconise une utilisation ne dépassant pas la moitié

de la température de Curie exprimée en °C.

En ce qui concerne les céramiques piézoélectriques, la piézoélectricité peut cependant être réactivée par l'imposition d'un champ électrique intense dès le retour à une température de fonctionnement admissible. La température de Curie varie entre 170°C et 400°C selon le type de matériau et la mise en charge.

2.2.5.2 Composition dure et molle (hard & soft)

Par introduction de défauts polaires, on obtient des céramiques piézoélectriques molles fonctionnant à faible champ électrique mais possédant une basse température de Curie ou des céramiques piézoélectriques dures fonctionnant à champ électrique élevé mais possédant une haute température de Curie. Le tableau 2.2.1 traduit de [Apc] donne les caractéristiques comparées de ces deux sortes de céramique dont le choix peut s'avérer essentiel suivant le procédé d'intégration.

Tab. 2.2.1 - Caractéristiques des céramiques piézoélectriques molles et dures.

Propriété	Céramique molle	Céramique dure
Température de Curie	Plus basse	Plus haute
Champ électrique coercitif	Bas	Plus élevé
Constantes piézoélectriques	Plus élevées	Plus faibles
Permittivité	Plus haute	Plus basse
Constantes diélectriques	Plus grandes	Plus petites
Pertes diélectriques	Plus hautes	Plus basses
Facteurs de couplage électromécaniques	Plus grands	Plus petits
Résistance électrique	Très haute	Plus basse
Facteurs de qualité mécanique	Bas	Elevé
Linéarité	Pauvre	Meilleure
Polarisation/dépolarisation	Plus facile	Plus difficile

2.2.5.3 Vieillissement

Une des propriétés les plus complexes des céramiques ferroélectriques est la dépendance dans le temps de ses coefficients élastiques, diélectriques et piézoélectriques. Cette évolution existe même au repos à cause notamment de la relaxation lente des contraintes élevées qui apparaissent dans le matériau lors de la polarisation à haute température.

2.2.5.4 Hystérésis

Le comportement linéaire que laissent supposer les équations n'est qu'une première approche. La partie centrale de la figure 2.2.5 montre un cycle d'hystérésis absorbeur d'énergie pour le système à ressort présenté à gauche. La force F est présentée ici comme fonction de u comme c'est le cas dans la formulation du principe des déplacements : on tourne dans le sens des aiguilles d'une montre. On peut présenter cette courbe de façon différente en permutant les axes comme le montre la partie droite de la figure. Dans ce dernier cas, on tourne dans le sens contraire des aiguilles d'une montre pour des cycles absorbeurs d'énergie. Les cycles d'hystérésis relatifs aux matériaux piézoélectriques sont généralement présentés de cette dernière façon : en abscisse par exemple la tension électrique et en ordonnée, la déformation, la charge ou le déplacement électrique.

L'expérience montre en effet des relations d'hystérésis évidentes entre la polarisation et le champ électrique d'une part et entre le champ électrique et la déformation d'autre part.

L'énergie absorbée au cours du cycle est en fait de l'énergie thermique qu'il faut veiller à évacuer pour éviter les augmentations de température pouvant changer les caractéristiques de fonctionnement du matériau ou même provoquer sa ruine.

Les cycles d'hystérésis sont beaucoup plus marqués dans les céramiques piézoélectriques que dans les polymères. De plus, la force engendrée par un actionneur soumis à une tension électrique bien définie dépend fortement dans les céramiques de l'état de déformation.

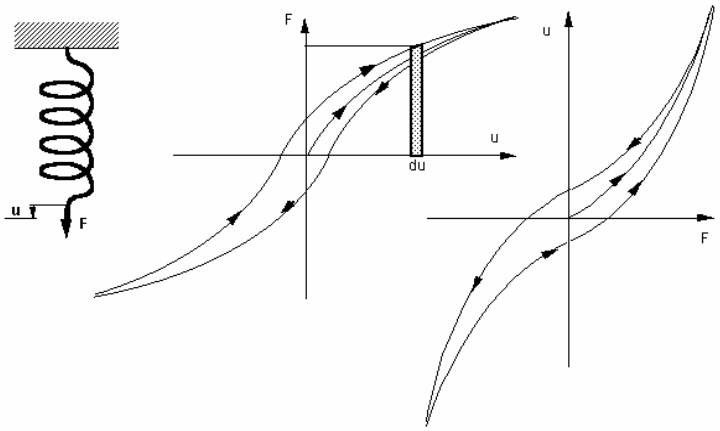


Fig. 2.2.5 - Cycle d'hystérésis absorbeur d'énergie.

2.2.5.5 Influence de la polarisation sur les paramètres piézoélectriques

Il est important de connaître l'influence de la polarisation sur les paramètres piézoélectriques car le processus d'intégration pourrait nécessiter une repolarisation des pastilles après intégration.

En définissant l'angle de perte diélectrique ou tangente δ par la vitesse avec laquelle l'énergie électrique est transformée en chaleur lorsqu'il est soumis à un champ électrique variable, la figure 2.2.6 issue de [Par05] montre la dépendance de ε_r et de δ en fonction du champ électrique constant de polarisation pour deux sortes de matériaux avec des températures de Curie de 350°C et 320°C respectivement. La figure 2.2.7 montre la dépendance des coefficients piézoélectriques d_{33} et d_{31}.

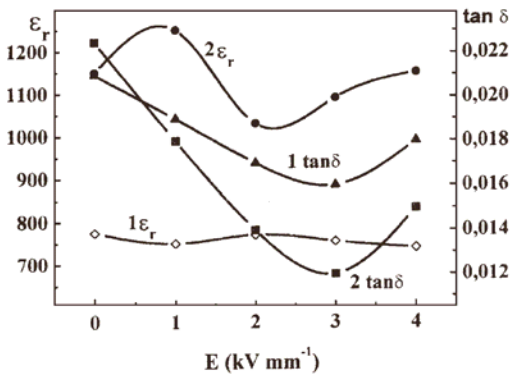


Fig. 2.2.6 - Dépendance de ε_r et de δ en fonction de $E_{polarisation}$.

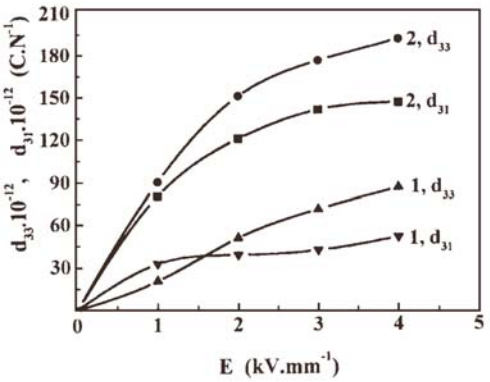


Fig. 2.2.7 - Dépendance de d_{33} et de d_{31} en fonction de $E_{polarisation}$.

L'idée est d'imposer un champ électrique suffisamment grand pour arriver à la saturation.

2.2.5.6 Sensibilité thermique et mécanique des matériaux piézoélectriques

Un autre point important concernant l'intégration d'éléments piézoélectriques est leur tenue à la chaleur.

La préconisation d'une utilisation ne dépassant pas la moitié de la température de Curie exprimée en °C a déjà été signalée. Dans ce domaine recommandé de température, les changements associés à la température dans l'orientation des domaines est réversible.

Des fluctuations soudaines de température peuvent générer des voltages relativement hauts qui peuvent dépolariser l'élément céramique. Un condensateur peut être incorporé

dans le système pour emmagasiner l'énergie électrique superflue [Apc]. Les coefficients des équations ont été présentés dans les équations comme constants. En réalité, ils dépendent de la polarisation du moment, de la température et des contraintes.

Le comportement des matériaux piézoélectriques, notamment leur hystérésis, peut donc se trouver modifié en raison de leur sensibilité à la température et à la pression.

La figure 2.2.8 issue de [Par05] montre la dépendance de la constante diélectrique ε_r en fonction de la température pour les deux matériaux.

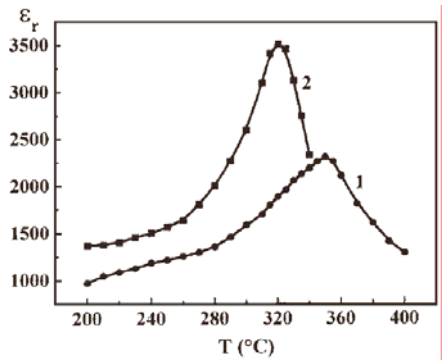


Fig. 2.2.8 - Constante diélectrique en fonction de la température.

Les figures 2.2.9 à 2.2.12 issues de [Voi00] montrent les dépendances vis-à-vis de la température et de la fréquence d'excitation de la céramique $SrBi_4Ti_4O_{15}$.

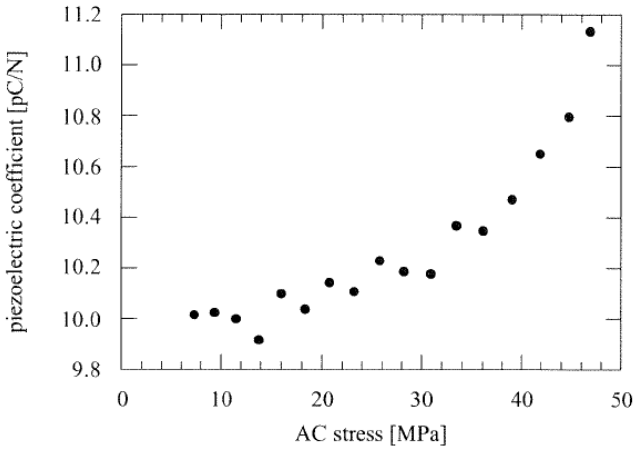


Fig. 2.2.9 - Coefficient piézoélectrique en fonction de la contrainte alternée à 10 Hz et 200°C.

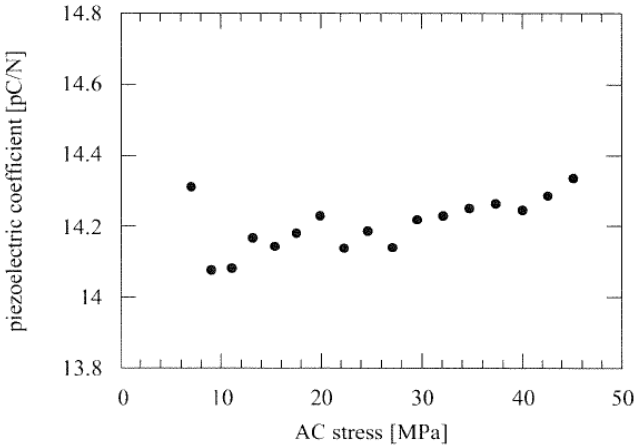


Fig. 2.2.10 - Coefficient piézoélectrique en fonction de la contrainte alternée à 10 Hz et 150°C.

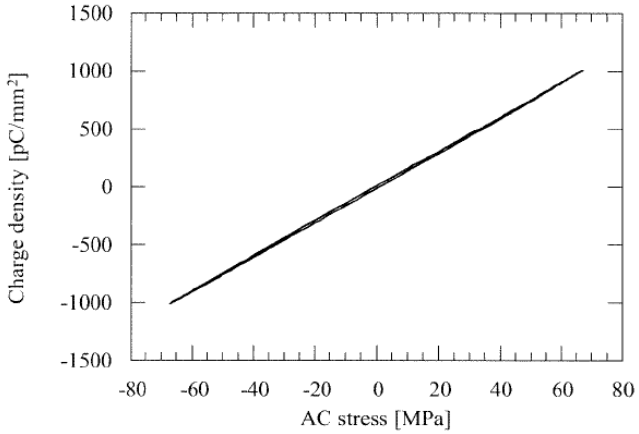


Fig. 2.2.11 - Hystérésis piézoélectrique à 1 Hz et 150°C.

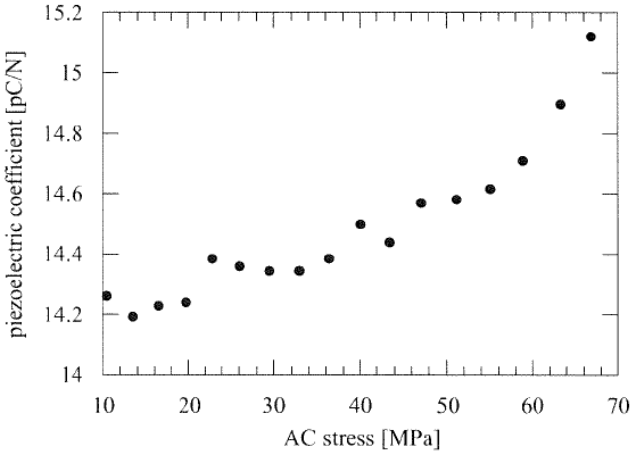


Fig. 2.2.12 - Coefficient piézoélectrique en fonction de la contrainte alternée à 1 Hz et 150°C.

La dépendance de la température s'explique par la modification des paramètres de maille : plus on se rapproche de la phase cubique en dépassant la température de Curie (dite para-électrique par opposition à ferro-électrique), plus la polarisation est petite et mobile. La figure 2.2.13 montre le changement de l'hystérésis d'une céramique de type PZT avec la température.

La contrainte va empêcher la déformation résultant de la polarisation limitant ainsi les réorientations de domaines comme l'ont présenté [Fan99] dans le cas des céramiques de type PZT douces. La figure 2.2.14 montre les cycles d'hystérésis avec deux contraintes $\sigma_{33} = 0$ *et* 80 *MPa*, D_3 est la polarisation suivant l'axe de polarisation, E_3 le champ électrique [Fan99].

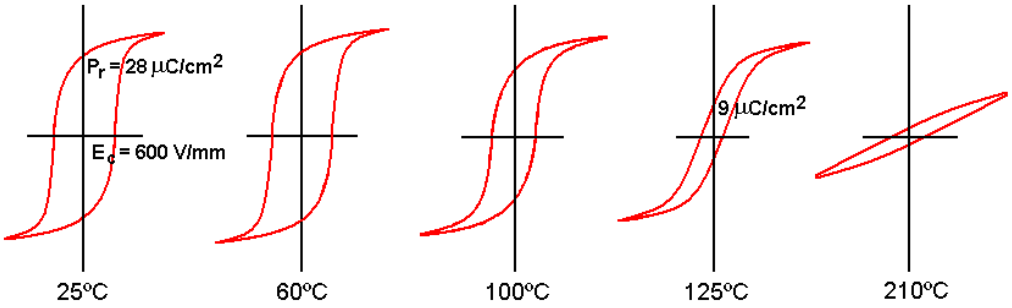


Fig. 2.2.13 - Changement du cycle d'hystérésis avec l'augmentation de la température.

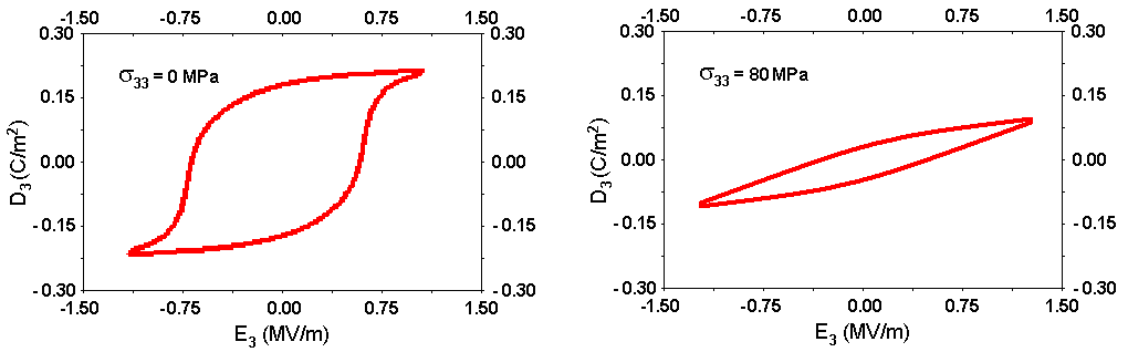


Fig. 2.2.14 - Cycle d'hystérésis en fonction de la contrainte.

La référence [Mor] aborde des essais où le temps d'exposition à des variables environnementales est pris en compte. Mais ce temps d'exposition n'est pas clairement exprimé pour les paramètres qui nous concernent. La référence montre néanmoins que les coefficients électriques peuvent être altérés de façon permanente par des contraintes statiques élevées, légèrement à température ambiante mais plus fortement à températures élevées (figure 2.2.15).

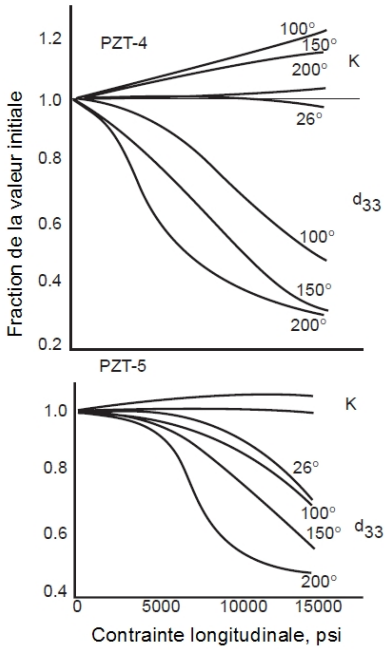


Fig. 2.2.15 - Effets de l'exposition à des contraintes de compression longitudinales sur les propriétés de 2 sortes de PZT à températures élevées.

2.2.6 Conclusion

Un grand nombre d'informations est disponible dans la littérature y compris la variation des principaux coefficients piézoélectriques en fonction de la température et l'importance des conditions de polarisation. Ce sont des indications opérationnelles importantes. Par contre ces indications concernent des phénomènes réversibles. Quelques informations sur le vieillissement sont disponibles. La notion de température de Curie aborde le problème des dégradations de performances irréversibles mais sans donner beaucoup de renseignements sur l'importance du temps passé au niveau de la température dégradante ni

de sa sensibilité par exemple au niveau de contrainte ou à la fréquence. Ce sont des indications qui nous manqueront.

Section 3 | Matériels et logiciels

2.3.1 Introduction

Notre étude comporte des simulations effectuées sur deux logiciels ANSYS et ROBOT ME, ainsi que des essais expérimentaux réalisés sur un viscoanalyseur avec un dispositif d'acquisition (TEAC). Ce chapitre est dédié à la présentation des différents outils utilisés dans notre travail.

2.3.2 Viscoanalyseur

Des mesures expérimentales ont été réalisées à l'aide d'un viscoanalyseur (METRAVIB RDS VA 2000) qui est une machine d'analyse dynamique-mécanique (DMA). Elle est représentée figure 2.3.1.

Fig. 2.3.1 - Viscoanalyseur.

2.3.2.1 Généralité

Un viscoanalyseur (METRAVIB RDS VA 2000) est un instrument scientifique dédié à l'étude et à la caractérisation des propriétés mécaniques de matériaux généralement viscoélastiques.

Cet appareil d'essais mécanique à support d'échantillon interchangeable possède plusieurs modes de fonctionnement :

- Un mode d'analyse dynamique-mécanique (DMA ou DMTA : Dynamic Mechanical Thermal Analysis) en faisant varier la température.
- Un mode d'essai statique de relaxation ou de fluage.
- Un mode de dilatométrie.

2.3.2.2 Description de la machine

Les viscoanalyseurs sont des appareils de mesure de haute technologie ; leur taille est modérée. La mécanique de mesure comprend [Wik08]:

- Un pot d'excitation électrodynamique à palier à air ;
- Un générateur de signaux sinusoïdaux à fréquence et amplitude programmables ;
- Un amplificateur de puissance linéaire ;
- Plusieurs capteurs de déplacement dynamique (résolution en nanomètres) capacitifs et optiques qui mesurent l'amplitude de la sollicitation;
- Une structure comprenant le porte-échantillon et l'échantillon à analyser ;
- Des capteurs de force dynamique et statique capacitifs et piézoélectriques.

Ordres de grandeur :

- La fréquence d'excitation des éprouvettes peut varier de 0,001 Hz à 200 Hz ;
- L'amplitude du déplacement dynamique varie de 1 µm à 6 mm ;
- L'amplitude de la force dynamique de 0,01 N à 100 N;
- Le déplacement statique jusqu'à 6 mm ;
- La force statique jusqu'à 100 N;
- La rigidité de l'échantillon entre 10^4 et 10^7 N/m ;
- La température de l'essai varie de - 150°C à + 450°C régulée à ± 0,3°C par rapport à la consigne;
- La vitesse de variation de la température varie de ± 0,1°C à ± 10°C/min.

Autres caractéristiques :

Les signaux délivrés par les capteurs subissent un traitement de façon à extraire les valeurs des grandeurs mécaniques.

- Le bâti mécanique est très rigide, avec une masse approchant les deux cents kilogrammes, garantissant la précision requise en analyse mécanique.
- L'échantillon (solide, pâteux ou liquide) et le porte-échantillon sont placés dans une enceinte thermostatée munie d'un thermocouple.
- L'enceinte (fig.2.3.2) peut être couplée à une source froide (utilisation d'azote liquide) pour des essais en dessous de la température ambiante.

Les multiples paramètres d'un essai sont gérés par logiciel. Le pilotage d'un test est automatique dans la gamme des essais proposés.

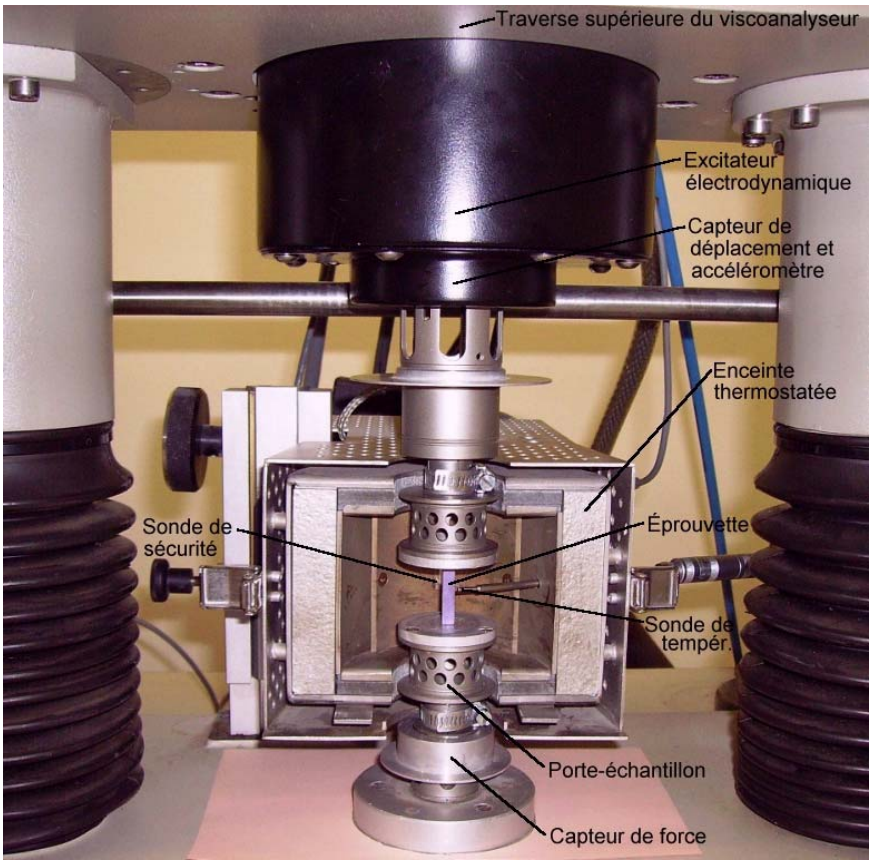


Fig. 2.3.2 – Enceinte de la machine [Wik08].

2.3.2.3 Mode d'essai de relaxation

Lors d'un essai de relaxation l'appareil régule un déplacement constant et mesure la force résultante sur l'échantillon.

En fonction du support d'échantillon utilisé et des dimensions de l'échantillon, il est possible de déterminer le module de traction (*D(t)*) ou de cisaillement (*G(t)*) résultant, en fonction du temps.

Le programme permet d'enchainer diverses séquences de relaxation et de recouvrance avec des niveaux de déplacement variable. Ces séquences peuvent elles-mêmes être répétées à différents niveaux de température.

- un solide parfaitement élastique (hookéen) se déforme instantanément ; la déformation élastique est réversible et indépendante du temps ;
- un fluide parfaitement visqueux (newtonien) se déforme progressivement et linéairement en fonction du temps ; la déformation visqueuse est irréversible ;
- un matériau montre des propriétés mécaniques situées entre ces deux cas idéaux (viscoélastiques) possède une composante élastique et une composante visqueuse.

L'étude de la rhéologie des polymères met le plus souvent en évidence des combinaisons complexes d'effets élastiques et visqueux, c'est-à-dire un comportement viscoélastique plus ou moins marqué. Selon l'échelle de temps de l'essai, la composante élastique ou la composante visqueuse du matériau domine.

Les propriétés de fluage ou de relaxation sont les effets de l'application d'une contrainte ou d'une déformation relativement sur une longue durée. Les mesures dynamiques correspondent à des durées de sollicitation plus courtes.

2.3.2.4 Essai dynamique

Lors d'un essai dynamique, l'appareil régule la force ou le déplacement afin d'obtenir une sollicitation sinusoïdale d'amplitude et de fréquence variable. A l'aide des capteurs, le viscoanalyseur mesure les deux grandeurs dynamiques : le déplacement et la force. Ces mesures peuvent être réalisées sur des rampes ou sur des paliers de température.

Le programme extrait essentiellement deux grandeurs : les amplitudes des signaux et leurs déphasages. Le déphasage provient des propriétés viscoélastiques du matériau. L'angle δ est calculé à partir du traitement de ces signaux selon une transformée de Fourier.

Lors d'une mesure mécanique dynamique, une contrainte sinusoïdale est appliquée à une fréquence *f*. Le signal de contrainte peut s'écrire :

$$\sigma(t) = \sigma_0 . sin(\omega t)$$

Avec :

σ_0 : amplitude de contrainte.

$\omega = 2\pi f$: pulsation.

Le signal de réponse en déplacement d'un matériau viscoélastique est déphasé (car ce dernier dissipe une partie de l'énergie en se déformant), soit :

$$z(t) = z_0 . sin(\omega t + \delta)$$

Avec :

z_0, amplitude de déplacement.

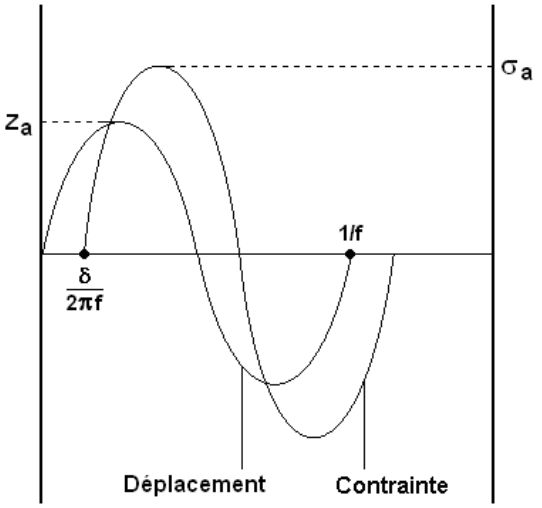


Fig. 2.3.3 - Déphasage entre contrainte et déplacement d'un matériau viscoélastique soumis à une oscillation sinusoïdale.

Rigidité dynamique

À partir des signaux de force *F(ω)* et de déplacement *D(ω)* délivrés par les capteurs, le module de la rigidité complexe k^* est calculé, ainsi que l'angle de phase *δ(ω)*.

$$K^* = K' + iK''$$

Avec :

K' et *K''* : respectivement, les parties réelle et imaginaire de K^*.

$K' = K^* \cos(\delta)$

$K'' = K^* \sin(\delta)$

$$K(\omega, T) = \left|K^*\right| = \frac{F_0}{d_0}$$

Dans un but de simplification de certaines équations, on suppose que la rigidité de la colonne de mesure du viscoanalyseur soit suffisamment supérieure à la rigidité mesurée de l'échantillon. Ainsi, on admet que la rigidité "réelle" de l'échantillon soit connue avec suffisamment d'exactitude.

Facteur d'amortissement ou de perte

Le facteur d'amortissement est une mesure du rapport de l'énergie dissipée par amortissement à l'énergie élastique conservée puis restituée durant un cycle de déformation sinusoïdale. Le facteur de perte est égal à :

$$tg\delta = \frac{G''}{G'}$$

Le viscoanalyseur mesure l'amortissement durant la déformation dynamique, soit la capacité du corps viscoélastique à dissiper l'énergie mécanique en chaleur. Plus l'angle de phase est élevé, plus l'amortissement des vibrations est important.

2.3.3 Système d'acquisition TEAC GX-1

Le TEAC GX-1 est un dispositif d'acquisition, qui peut être directement relié aux capteurs d'accélération, de température et de déformation, ou à un port (pour des cartes d'acquisition à un maximum de 64 chaînes analogiques). Sans besoin d'amplificateur ou d'autres équipements externes, les données peuvent être facilement transférées en temps réel directement à un ordinateur ou à un équipement d'analyse et ainsi être observées.

Les caractéristiques de la machine se résument par les points suivants :

- 16 voies d'acquisition (il est capable de mesurer 16 signaux simultanément).
- sa fréquence de mesure peut varier de 1 Hz à 200 kHz.
- son convertisseur analogique/numérique est de 16 bits. La précision de mesure est : précision = amplitude du signal/(2^{16}-1).
- son plus petit pas d'échantillonnage est de 5 μs.

Le dispositif est muni d'un logiciel qui effectue la gestion de l'acquisition et l'affichage des mesures sur l'ordinateur. Il permet la sauvegarde des données ainsi que leur traitement.

2.3.4 Logiciel ANSYS

Le logiciel ANSYS est un code de calcul par éléments finis. Il est utilisé en modélisation thermique et mécanique.

Notre étude utilise les éléments finis suivants :

- en thermique : PLANE55
- en mécanique : SHELL63, SHELL99, SHELL181.
  SOLID185

2.3.4.1 PLANE55

PLANE55 peut être utilisé comme élément plan (ou comme anneau axisymétrique) pour l'étude de transferts thermiques en 2-D. Cet élément possède quatre nœuds avec un seul degré de liberté, la température, à chaque nœud.

L'élément PLANE55 est approprié aux analyses thermiques en régime stationnaire ou transitoire. L'élément peut également être utilisé pour étudier un flux de chaleur et de masse avec un champ de vitesse constant.

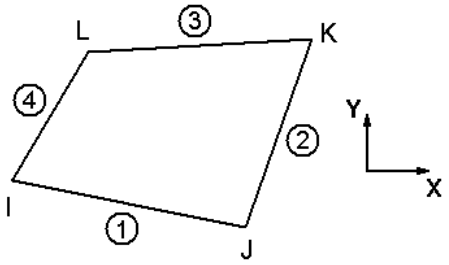


Fig. 2.3.4 - Géométrie de l'élément PLANE55.

2.3.4.2 SHELL63, SHELL99 et SHELL181

Les éléments SHELL63, SHELL99 et SHELL181 peuvent être utilisés pour des plaques en flexion. Ces éléments possèdent six degrés de liberté à chaque nœud : translations dans la direction de x, y, et z, et rotations autour de x, y, et z.

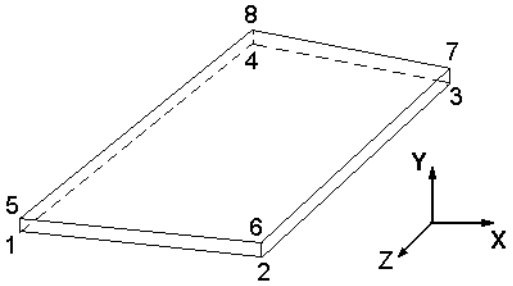


Fig. 2.3.5 - Géométrie de l'élément SHELL63.

L'élément SHELL99 se distingue de SHELL63 par la possibilité de représenter des plaques multicouches.

L'élément SHELL181 convient pour les applications non-linéaires, par exemple, viscoélastiques.

2.3.4.3 SOLID185

SOLID185 est utilisé pour la modélisation des structures en 3-D. Il est défini par 8 nœuds avec trois degrés de liberté : translation dans la direction de x, y et z.

2.3.5 Logiciel Robot Me

Le logiciel ROBOT Me est un logiciel de dimensionnement de structures mettant en œuvre la méthode des éléments finis. Il est utilisé en modélisation thermique et mécanique.

L'intérêt pour la recherche présente est qu'il peut travailler avec des éléments de plaque non-planaire (ex. calotte sphérique). Sous ROBOT Me on applique l'excitation (force seule) sur une plaque sous forme d'une calotte paraboloïde dont la courbure change avec le chargement.

Par contre, ROBOT Me ne contient pas d'élément de type « plaque mince multicouche ». On représentera une plaque mince multicouche par une plaque monocouche dont les caractéristiques sont obtenues préalablement par homogénéisation.

Section 4 | Propriétés des matériaux spécifiques mis en œuvre

2.4.1 Introduction

Cette section est dédié à la présentation des matériaux utilisés dans notre étude : matériaux thermoplastiques non chargés, composite à matrice polypropylène et composants piézoélectriques. Cette présentation comporte leur constitution ainsi que leurs différentes propriétés.

2.4.2 Matériaux thermoplastiques

Les matériaux thermoplastiques purs utilisés dans notre étude sont :

- Polypropylène (PP) : ce thermoplastique (de formule chimique $(CH_2\text{-}CH\text{-}CH_3)_n$) est un polymère obtenu par la polymérisation des monomères de propylène.
- Acrylonitrile Butadiène Styrène (ABS) : est un copolymère polyphasé constitué d'un copolymère acrylonitrile et styrène, avec des nodules de butadiène noyés dans la matrice acrylonitrile/styrène.
- Polyéthylène (PE) : est obtenu par la polymérisation des monomères d'éthylène en une structure complexe de formule chimique $(CH_2 = CH_2)_n$. Deux types de polyéthylène sont utilisés dans notre étude : le polyéthylène à haute densité (HDPE) et celui à basse densité (LDPE).
- Polychlorure de vinyle (PVC) : c'est une réaction entre de l'éthylène et de l'acide chlorhydrique, en présence d'oxygène, qui est effectuée. Le produit intermédiaire, le dichloroéthane se transforme en chlorure de vinyle sous l'effet de la chaleur.
- Polycarbonate (PC) : Le polycarbonate est un polymère issu de la polycondensation du bisphénol et d'un carbonate. On obtient ainsi une matière plastique disposant d'excellentes propriétés mécaniques et thermiques.
- Polyétheréthercétone (PEEK) : est obtenu par la substitution nucleophilique de dihalogénure aromatique et de sels bisphénolates.

Leurs caractéristiques sont rassemblées dans le tableau 2.4.1.

Tab. 2.4.1 - Propriétés des matériaux thermoplastiques utilisés dans l'étude.

	Type	Masse volumique (kg/m^3)	Conductivité thermique (W/m.K)	Chaleur spécifique (J/kg.K)	Température d'injection (°C)	Température du moule (°C)
PP	Borealis BD500P	800	0.179	2800	240	40
ABS	Dow MAGNUM 344HP	1040	0.155	2120	250	65
LDPE	Chevron-Philips KN226	930	0.3	2200	200	35
HDPE	Quadrant EPP TIVAR 1000 NV	940	0.41	2200	270	35
PVC	Omnia Plastica	1400	0.15	1100	150	35
PC	Quadrant EPP PC 1000	1200	0.2	1170	300	90
PEEK	RTP 2200 LF	1300	0.25	1900	360	145

Le matériau composite, à matrice polypropylène avec fibres de verre, utilisé dans notre étude est le TWINTEX T PP 60 745 AF (taux de verre en poids est 60 %), il possède les propriétés mécaniques suivantes :

- Propriétés du polypropylène pur : E_{pp} = 14 GPa et G_{pp} = 5 GPa.
- Composite PP/verre : $E_x = E_y$ = 26.31 GPa et G_{xy} = 7.06 GPa (calculés à partir E_{pp} et G_{pp}).

2.4.3 Pastilles piézoélectriques

Les pastilles piézoélectriques mises en œuvre dans cette recherche sont des produits de grande diffusion essentiellement utilisés comme buzzers. Elles sont formées de deux plaques circulaires, une en laiton et l'autre en matériau piézoélectrique PZT.

En fonction de leur disponibilité, deux types de pastilles piézoélectriques à dimensions différentes ont été utilisées dans notre travail : LAIT/PZT_{19} et LAIT/PZT_{25} (figures 2.4.1).

Les dimensions des éléments circulaires des pastilles sont données par le tableau 2.4.2.

Tab. 2.4.2 - Dimensions des pastilles piézoélectriques.

	LAIT/PZT$_{19}$		LAIT/PZT$_{25}$	
	PZT	Laiton	PZT	Laiton
Diamètre (mm)	19	27	25	35
Epaisseur (mm)	0.27		0.25	

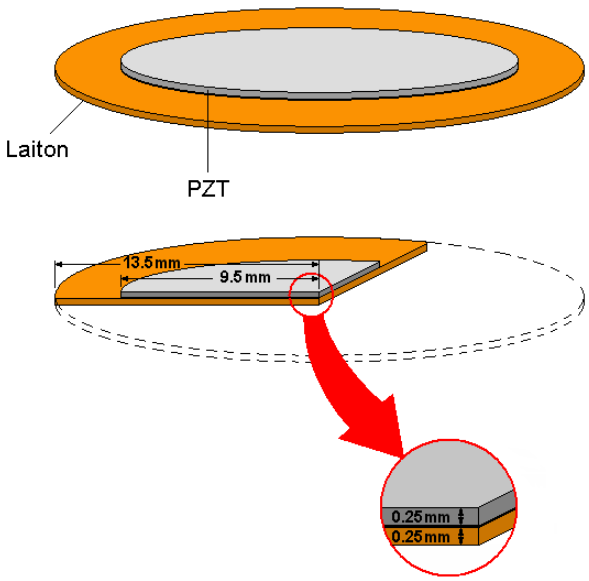


Fig. 2.4.1a - Pastille LAIT/PZT$_{19.}$

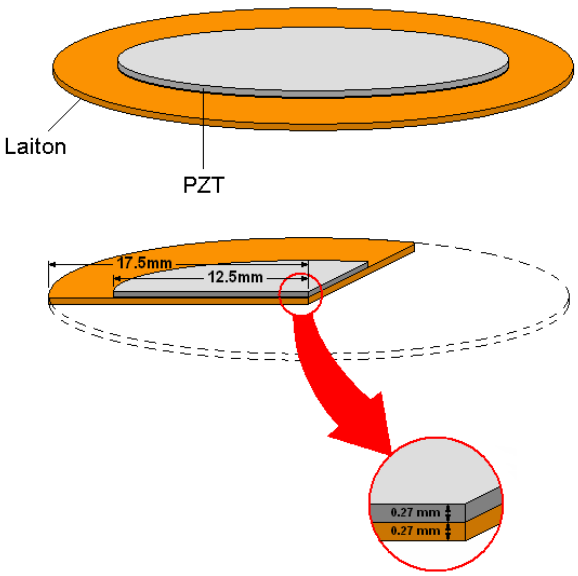


Fig. 2.4.1b - Pastille LAIT/PZT$_{25.}$

A priori, les caractéristiques mécaniques et piézoélectriques des matériaux composant les pastilles ne sont pas connues. Néanmoins les valeurs les plus fréquentes trouvées dans la littérature [MAT] sont :

Pour le PZT :

- Masse volumique : ρ_{PZT} = 7500 kg/m^3
- Conductivité thermique : K_{PZT} = 6 W/m.K
- Capacité thermique : C_{PZT} = 670 J/kg.K
- Module d'Young : E_{PZT} = 40 GPa

- Module de cisaillement : G_{PZT} = 12 GPa
- Coefficient de Poisson : ν_{PZT} = 0.3
- Coefficient de dilatation thermique : α_{PZT} = 9 µm/m°C
- La température de Curie, T_c est considérée comme paramètre (varie entre 150°C et 370°C [PI])
- Les valeurs des coefficients piézoélectriques ne sont pas directement utilisées dans cette étude.

Les valeurs traditionnelles du laiton [MAT] sont adoptées :

- Masse volumique : ρ_{laiton} = 8750 kg/m^3
- Conductivité thermique : K_{laiton} = 159 W/m.K
- Capacité thermique : C_{laiton} = 380 J/kg.K
- Module d'Young : E_{laiton} = 100 GPa
- Module de cisaillement : G_{laiton} = 44 GPa
- Coefficient de Poisson : ν_{laiton} = 0.307
- Coefficient de dilatation thermique : α_{laiton} = 19 µm/m°C

Chapitre 3

CARACTERISATION PAR MODÉLISATION ET SIMULATION DE L'ÉVOLUTION THERMIQUE D'UNE INCLUSION PENDANT LE PROCESSUS DE FABRICATION EN FONCTION DE DIFFÉRENTS PROCÉDÉS DE PLASTURGIE

Table des matières

3.1 Introduction 62
3.2 Moulage par injection 62
3.2.1 Description du système étudié 62
3.2.2 Modélisation analytique 65
3.2.2.1 Propriétés du modèle analytique 65
3.2.2.2 Equations du modèle 65
3.2.3 Modélisation numérique 70
3.2.4 Comparaison des résultats obtenus par le modèle analytique et le modèle numérique 71
3.2.5 Etudes de sensibilité en appliquant la modélisation par éléments finis 72
3.2.5.1 Influence de l'épaisseur de la plaque 72
3.2.5.2 Influence de la position du PZT 73
3.2.5.3 Effets additionnels 75
3.2.6 Application de l'analyse numérique à différentes matériaux thermoplastiques 78
3.2.7 Influence des paramètres thermiques du thermoplastique sur l'échauffement du PZT au cours du procédé de moulage 81
3.2.7.1 Influence de la température d'injection sur la température maximale au sein du PZT 83
3.2.7.2 Influence de la conductivité thermique sur la température maximale au sein du PZT 83
3.2.7.3 Influence de la chaleur spécifique sur la température maximale au sein du PZT 85
3.3 Surmoulage 86
3.3.1 Description du système étudié 86
3.3.2 Modélisation par éléments finis du dispositif de surmoulage 86
3.3.3 Influence de la position du PZT 87
3.4 Thermoformage 88
3.4.1 Modèle numérique 88
3.4.2 Conditions de la simulation numérique 89
3.4.3 Influence de la position du PZT 89
3.4.4 Influence des paramètres thermiques du thermoplastique sur l'échauffement du PZT au cours du procédé de thermoformage 91
3.5 Synthèse des résultats 93
3.5.1 Comparaison entre moulage par injection et moulage par co-injection 93
3.5.2 Thermoformage 94

3.1 Introduction

L'étude effectuée dans ce chapitre est valable pour n'importe quelle inclusion dans une structure en thermoplastique parce qu'elle prend en compte des températures typiques de manière à pouvoir généraliser l'approche. Nous avons cependant matérialisé cette inclusion sous forme d'une pastille en céramique piézoélectrique (PZT) dont la température typique est celle de Curie.

Les simulations ont été développées dans le but de calculer la variation de la température de la pastille en céramique piézoélectrique dont les coefficients piézoélectriques sont très sensibles à la température. Trop longtemps exposée à une température supérieure à la moitié de la température de Curie, la pastille peut perdre ses propriétés piézoélectriques.

L'objectif de la modélisation est de déterminer le profil de température dans la pièce pendant sa mise en forme lors de différentes conditions de fabrication : moulage par injection, surmoulage et thermoformage.

3.2 Moulage par injection

3.2.1 Description du système étudié

Le système étudié est constitué d'une pastille LAITON/PZT_{19} (Chap.2) intégrée dans une plaque mince en polypropylène (Chap.2). Le moule est en acier de type AISI 1008. Le dispositif est schématisé figure 3.1.

Les caractéristiques des différents composants liés au procédé sont :

- Moule [Mat] :
  - Masse volumique : ρ_1 = 7800 kg/m^3
  - La conductivité thermique (K_1) de ce type d'acier varie avec la température comme l'indique la figure 3.2a
  - La capacité thermique massique (C_1) elle aussi varie avec la température. La figure 3.2b montre les intervalles possibles.
- Matériau : polypropylène (Borealis BD500P) [Det03] :
  - Masse volumique : ρ_2 = 800 kg/m^3 (à 240°C)
  - Conductivité thermique: K_2 = 0.179 W/m.K
  - Capacité thermique: C_2 = 2800 J/kg.K
  - Consistance (dégrée de viscosité): K = 11000 S.I.
  - Indice de pseudoplasticité: n = 0.308

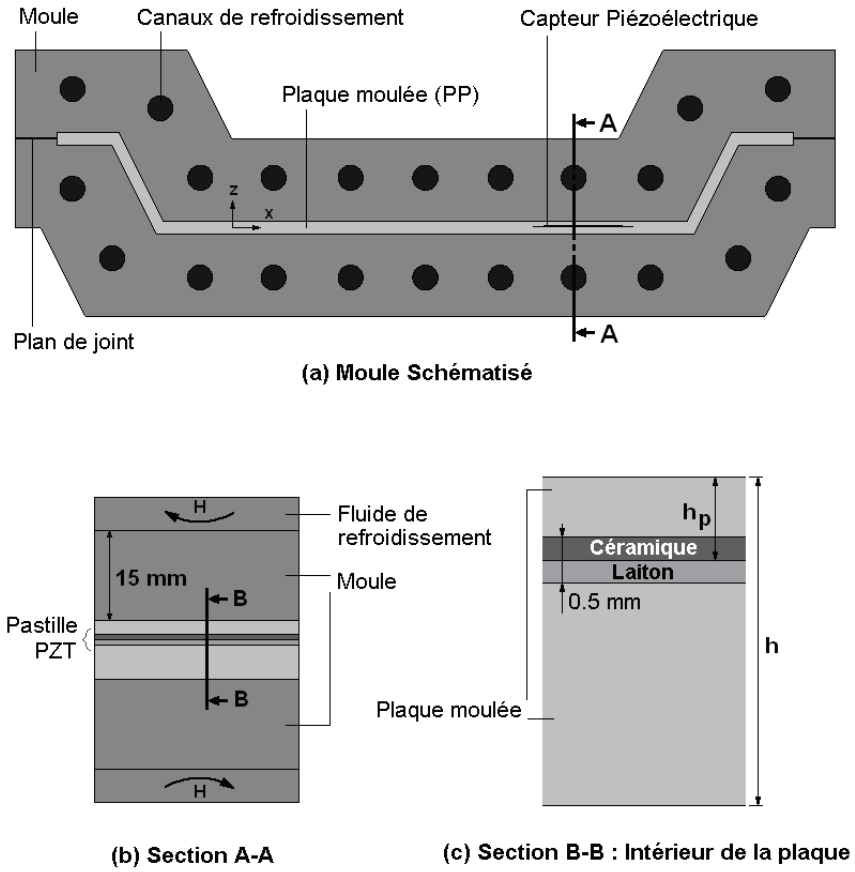


Fig. 3.1 - Description du système modélisé.

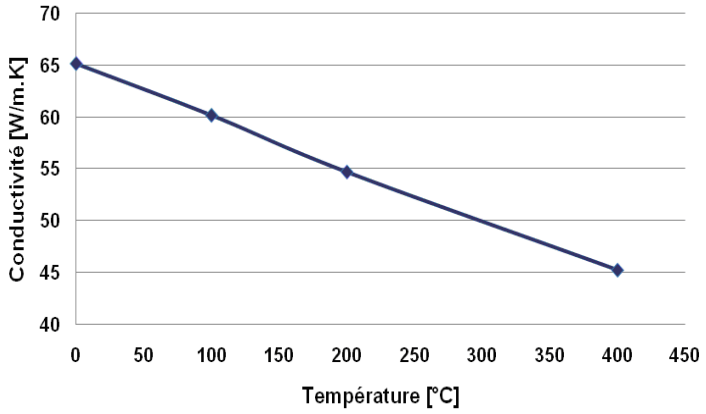


Fig. 3.2a - Conductivité thermique du moule en fonction de la température.

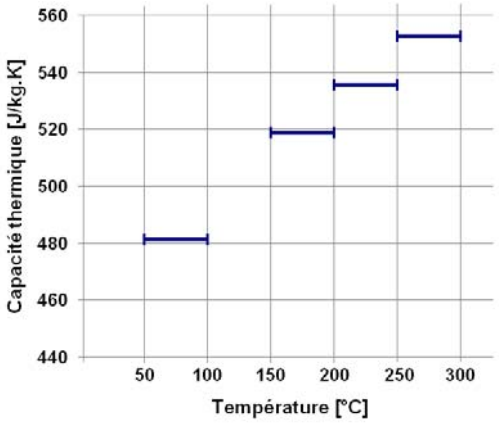


Fig. 3.2b - Capacité thermique du moule en fonction de la température.

- PZT :
  - Masse volumique : $\rho_3 = 7500$ kg/m^3
  - Conductivité thermique: $K_3 = 6$ W/m.K
  - Capacité thermique: $C_3 = 670$ J/kg.K
  - Température de Curie, T_c est considérée comme paramètre
- Laiton :
  - Masse volumique : $\rho_4 = 8750$ kg/m^3
  - Conductivité thermique: $K_4 = 159$ W/m.K
  - Capacité thermique: $C_4 = 380$ J/kg.K
- Conditions initiales et les conditions aux limites
  - Le refroidissement est réalisé par écoulement d'eau dans les canaux de refroidissement à une température $T_e = 25°C$ et une vitesse d'écoulement $v_e = 0.2$ m/s. La convection est contrôlée afin de maintenir le moule sous une température $T_m = 40°C$.
  - Le contact est considéré comme parfait, et la température de chaque couche est uniforme avec l'épaisseur.
  - La température d'injection de la pièce en PP est de $T_M = 240°C$.
  - La température initiale du capteur piézocéramique $T_p = 25°C$.

Deux types de modélisation du même système sont présentés : une modélisation analytique et une modélisation numérique par éléments finis. Cela permet une fiabilisation des résultats par approches différentes. Bien qu'une étude analytique permette en principe une approche paramétrique, la modélisation numérique est beaucoup plus souple pour l'étude de sensibilité à certains paramètres comme la position de l'actionneur ou l'épaisseur de la plaque retenue ici.

Le phénomène de conduction thermique est d'abord considéré seul (sans écoulement du plastique dans lequel est intégré l'élément actif).

Le remplissage du moule, c'est à dire l'écoulement du plastique, peut produire des élévations de température par effet convectif, dont on n'a d'abord pas tenu compte. Pour vérifier ce phénomène, on introduit des coefficients de convection dans le modèle numérique. Néanmoins, les résultats montrent que qualitativement, cette influence n'est peut-être pas négligeable. Il faudra revenir sur cet aspect si des divergences sont mises à jour entre résultats expérimentaux et calculs.

3.2.2 Modélisation analytique

3.2.2.1 Propriétés du modèle analytique

Voici les propriétés du modèle analytique :

- h = 5 mm, épaisseur de la plaque en polypropylène
- h_p = 0.75 mm, position de l'élément actif dans la plaque
- T_m = 40°C, température du moule
- T_M = 240°C, température d'injection de la pièce
- T_p = 25°C, température initiale de la pastille PZT.

3.2.2.2 Equations du modèle

Le refroidissement du moule est effectué par écoulement de l'eau froide dans des canaux cylindriques. Dans le cas de convection forcée (écoulement laminaire dans les canaux), la relation liant les paramètres thermodynamiques, peut s'écrire [Fra96] :

$$\mathbf{Nu} = \mathbf{0.21} \times \mathbf{Re}^{0.62} \times \mathbf{Pr}^{0.38} \qquad \textbf{(3.1)}$$

où : $$\mathbf{Nu} = \frac{\mathbf{H} \times \mathbf{D}}{\mathbf{K}} \text{ (nombre de Nusselt)} \qquad \textbf{(3.2)}$$

$$\mathbf{Pr} = \frac{\mu \times \mathbf{c_p}}{\mathbf{K}} = \frac{\nu}{\alpha} \text{ (nombre de Prandtl)} \qquad \textbf{(3.3)}$$

Avec :

c_p : chaleur spécifique à pression constante du fluide de refroidissement,

ν : viscosité cinématique du fluide,

ρ : Masse volumique du fluide,

μ : viscosité dynamique,

D : diamètre des canaux de refroidissement,

H : coefficient de convection thermique.

Le fluide de refroidissement est de l'eau avec les propriétés suivantes à $\mathbf{T_m}$ = 40ºC, température de l'eau ou de moule :

ρ_{eau} = 1000 kg/m^3

μ_{eau} = 5.8 × 10^{-4} Pa.s

c_p = 4.18 kJ/kg.K

Re = 2200 (écoulement laminaire)

De plus,

K_{eau} = 0.64 W/m.K

D = 8 mm

Ce qui donne :

Pr = 3.78 S.I.

Alors d'après (3.1) :

$$\frac{\mathbf{H \times D}}{\mathbf{K}} = \mathbf{0.21 \times 2200^{0.62} \times 3.78^{0.38}}$$

On obtient donc :

H = 3290 W/m^2 K

Le modèle étudié se compose de six couches comme l'indique la figure 3.3 :

- Couche 1 : la partie supérieure du moule avec une température T_1.
- Couche 2 : la partie supérieure de la plaque PP avec une température T_2.
- Couche 3 : la plaque PZT avec une température T_3.
- Couche 4 : la plaque du laiton avec une température T_4.
- Couche 5 : la partie inférieure de la plaque PP avec une température T_5.
- Couche 6 : la partie inférieure du moule avec une température T_6.

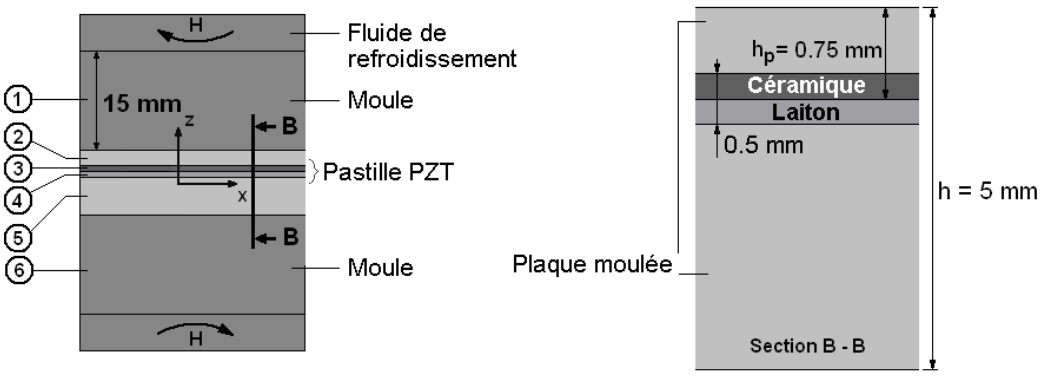


Fig. 3.3 - Modèle pour la simulation analytique.

L'équation fondamentale de transfert de la chaleur dans le cas d'un régime transitoire est [Sch55] :

$$\mathbf{W} + \mathbf{div}\left(\mathbf{K} \times \mathbf{grad}\,\vec{\mathbf{T}}\right) = \rho\mathbf{c}\left(\frac{\partial \mathbf{T}}{\partial \mathbf{t}} + \vec{\mathbf{v}} \times \mathbf{grad}\,\vec{\mathbf{T}}\right) \qquad \textbf{(3.4)}$$

Avec :

W : Source de chaleur interne permanente

K : Conductivité thermique du corps.

T : Température

ρ : Masse volumique du corps

c : Chaleur spécifique du corps

$\vec{v}$: Vitesse de mouvement du corps

Comme le modèle étudié est immobile, on a : $\vec{\mathbf{v}} = \vec{\mathbf{0}}$

De plus, il n'y a pas de source de chaleur interne permanente, donc : **W = 0**

Alors (3.4) peut s'écrire de la façon suivante :

$$\mathbf{div}\left(\mathbf{K} \times \overrightarrow{\mathbf{grad}}\,\mathbf{T}\right) = \rho\mathbf{c}\frac{\partial \mathbf{T}}{\partial \mathbf{t}} \;\Rightarrow \mathbf{K} \times \mathbf{div}\left(\overrightarrow{\mathbf{grad}}\,\mathbf{T}\right) = \rho\mathbf{c}\frac{\partial \mathbf{T}}{\partial \mathbf{t}} \qquad \textbf{(3.5)}$$

On sait que :

$$\mathbf{div}\left(\mathbf{grad}\,\vec{\mathbf{T}}\right) = \mathbf{Laplacien\,de\;T} = \Delta\mathbf{T} \;\Rightarrow \frac{\partial^2 \mathbf{T}}{\partial \mathbf{x}^2} + \frac{\partial^2 \mathbf{T}}{\partial \mathbf{y}^2} + \frac{\partial^2 \mathbf{T}}{\partial \mathbf{z}^2} = \frac{\mathbf{1}}{\alpha}\frac{\partial \mathbf{T}}{\partial \mathbf{t}} \qquad \textbf{(3.6)}$$

avec **:** $\alpha = \dfrac{\mathbf{K}}{\rho \times \mathbf{c}}$, diffusivité thermique

La faible épaisseur des différentes couches du modèle par rapport aux autres dimensions permet de considérer une conduction thermique unidirectionnelle et (3.6) devient :

$$\alpha_\mathbf{i}\frac{\partial^2 \mathbf{T_i(z,t)}}{\partial \mathbf{z}^2} = \frac{\partial \mathbf{T_i(z,t)}}{\partial \mathbf{t}} \quad \text{pour } z_i < z < z_{i+1}, \quad t > 0 \quad \text{et} \quad i = 1,2,\ldots,6 \qquad \textbf{(3.7)}$$

avec $\alpha_i = K_i/\rho_i c_i$ tel que K_i, ρ_i et c_i soient respectivement la conductivité, la masse volumique et la chaleur spécifique de la couche i.

Les conditions aux limites entre les interfaces des couches sont définies par la conservation du flux thermique et les transferts par convection :

$$-K_1 \frac{\partial T_1}{\partial z} + H \times T_1 = 0$$

$$\left.\begin{aligned} K_i \frac{\partial T_i}{\partial z} &= H_{i+1}(T_i - T_{i+1}) \\ K_i \frac{\partial T_i}{\partial z} &= K_{i+1} \frac{\partial T_{i+1}}{\partial z} \end{aligned}\right\} \text{à l'interface } z = z_{i+1}, \quad i = 1,2, \ldots ,5; \quad t > 0 \quad \textbf{(3.8)}$$

$$K_6 \frac{\partial T_6}{\partial z} + H \times T_6 = 0$$

H_{i+1} et H sont respectivement la convection thermique à l'interface $z = z_{i+1}$ et l'eau de refroidissement.

De plus, nous considérons qu'aucun gradient thermique n'est pris en compte dans les outillages et que le remplissage est suffisamment rapide pour avoir les conditions initiales suivantes :

$$T_i(z,t) = F_i(z) \text{ et } \begin{cases} F_1(z) = F_6(z) = T_m = \text{constante } \forall z \text{ dans la région 1 et 6} \\ F_2(z) = F_5(z) = T_M = \text{constante } \forall z \text{ dans la région 2 et 5} \\ F_3(z) = F_4(z) = T_p = \text{constante } \forall z \text{ dans la région 3 et 4} \end{cases}$$

Pour résoudre ce problème de conduction thermique unidirectionnelle transitoire, nous partons du principe de séparation des variables z et t [Ozi93] :

$$T_i(z,t) = \psi(z) \times \phi(t) \qquad \textbf{(3.9)}$$

En introduisant (3.9) dans (3.7), on obtient :

$$\alpha_i \frac{1}{\psi(z)} \frac{d^2\psi(z)}{dz^2} = \frac{1}{\phi(t)} \frac{d\phi(t)}{dt} = -\beta^2 \quad (\beta \text{ : constante de séparation}) \qquad \textbf{(3.10)}$$

D'où résultent les deux équations suivantes :

$$\frac{d\phi(t)}{dt} + \beta_n \phi(t) = 0 \qquad \text{pour } t > 0 \qquad \textbf{(3.11)}$$

$$\frac{d^2\psi_{in}}{dz^2} + \frac{\beta_n^2}{\alpha_i} \psi_{in} = 0 \qquad \text{pour} \quad z_i < z < z_{i+1}, \quad i = 1,2,\ldots,6 \qquad \textbf{(3.12)}$$

telle que $\psi_{in} \equiv \psi_i(\beta_n, z)$.

L'indice n est inclus pour indiquer qu'il existe un nombre infini de valeurs propres discrètes $\beta_1 < \beta_2 < ... < \beta_n < ...$, et des fonctions propres correspondants ψ_{in}.

La solution de la fonction $\phi(t)$ issue de (3.11) est:

$$\phi(t) = e^{-\beta_n^2 \times t} \tag{3.13}$$

La solution de distribution de la température $T_i(z,t)$, dans la couche i du modèle est obtenue d'après [Ozi93] :

$$T_i(z,t) = \sum_{n=1}^{\infty} e^{-\beta_n^2 \times t} \frac{1}{N_n} \psi_{in}(z) \sum_{j=1}^{6} \frac{k_j}{\alpha_j} \int_{z'=z_j}^{z_{j+1}} \psi_{jn}(z') F_j(z') dz' \tag{3.14}$$

Telle que la norme N_n est définie par:

$$N_n = \sum_{j=1}^{6} \frac{k_j}{\alpha_j} \int_{z'=z_j}^{z_{j+1}} \psi_{jn}^2(z') dz'$$

Les fonctions propres $\psi_{in}(z)$ sont déterminées à partir de la solution générale de l'équation différentielle (3.12) :

$$\psi_{in}(z) = A_{in} \times u_{in} + B_{in} \times v_{in} \tag{3.15}$$

Avec : $u_{in} = \sin\left(\frac{\beta_n}{\sqrt{\alpha_i}} z\right)$, et $v_{in} = \cos\left(\frac{\beta_n}{\sqrt{\alpha_i}} z\right)$, pour $i = 1,2,\ldots,6$

L'étape suivante est de l'analyse est la détermination des 12 coefficients A_{in}, B_{in} avec $i = 1,2,\ldots,6$.

Sans perte de la généralité, un des coefficients non-nuls peut être fixé. Soit A_{in} égale à l'unité: $A_{1n} = 1$.

Les fonctions propres données par (3.15) avec $A_{1n} = 1$ sont introduites dans les conditions aux limites. Le système d'équations résultant est :

$$\begin{bmatrix} X_1 & Y_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ u_{1n} & v_{1n} & -u_{2n} & -v_{2n} & 0 & 0 \\ k_1u_{1n} & k_1v_{1n} & -k_2u_{2n} & -k_2v_{2n} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & ... & ... & 0 & 0 \\ 0 & 0 & u_{5n} & v_{5n} & -u_{6n} & -v_{6n} \\ 0 & 0 & k_2u_{5n} & k_2v_{5n} & -k_1u_{6n} & -k_1v_{6n} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & X_6 & Y_6 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ B_{1n} \\ ... \\ ... \\ ... \\ A_{6n} \\ B_{6n} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ ... \\ ... \\ ... \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad \textbf{(3.16)}$$

$$\Rightarrow [\mathbf{UV}] \times [\mathbf{AB}] = [\mathbf{0}]$$

La solution de ces équations donnant les coefficients de **[AB]** est donnée par la méthode de Cramer.

Le calcul analytique se résume par les étapes suivantes [Ozi93] :

1. Détermination des valeurs propres β_n en effectuant le calcul inverse :

$$\mathbf{det}[\mathbf{UV}] = \mathbf{0} \quad \textbf{(3.17)}$$

2. On résout l'équation (3.16) pour trouver les 12 coefficients A_{in}, B_{in}

3. À partir des valeurs propres β_n et des coefficients A_{in}, B_{in} trouvées dans les deux premières étapes, on peut calculer les fonctions propres ψ_{in} à l'aide de (3.15) et par la suite, la température $T_i(z,t)$ à l'aide de (3.14).

3.2.3 Modélisation numérique

Parallèlement, le système de la figure 3.3, composé des 6 couches (moule : 2 couches, Plaque PP : 2 couches, la pastille PZT : 2 couches) a été modélisé par éléments finis. La simulation réalisée est une analyse thermique transitoire unidirectionnelle. Sous ANSYS, l'élément approprié pour cette analyse est PLANE55 (élément quadratique). Cet élément possède quatre nœuds avec un seul degré de liberté : la température à chaque nœud.

Le modèle par éléments finis (figure 3.4) compte 6550 éléments (moule : 3000 éléments, PP : 3050 éléments, PZT : 250 éléments, Laiton : 250 éléments) et 6732 degrés de liberté : la température à chaque nœud.

Les conditions initiales correspondantes sont rappelées ci-dessous :

- La température d'injection de la pièce en PP est de $T_M = 240°C$.
- La température initiale du capteur piézocéramique $T_p = 25°C$.
- Le contact est considéré comme parfait, et la température de chaque couche est uniforme dans l'épaisseur.
- La température du moule est stabilisée à 40°C.

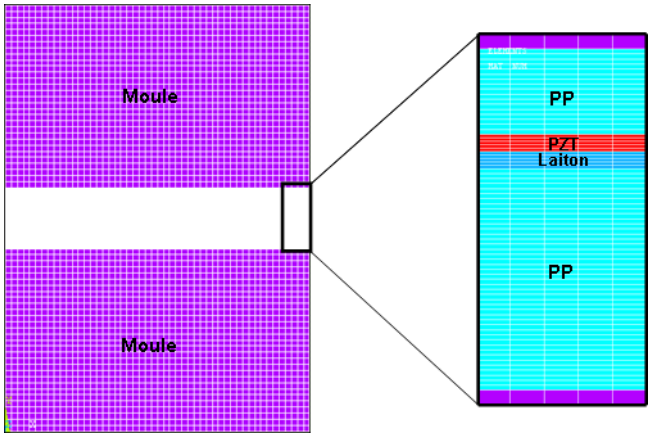


Fig. 3.4 – Topologie du modèle par éléments finis (cas du moulage).

3.2.4 Comparaison des résultats obtenus par le modèle analytique et le modèle numérique

Une courbe comparative (figure 3.5) montre l'évolution de la température avec le temps sur la surface de la plaque (côté PZT) pour les deux approches (modélisation analytique et simulation par éléments finis). L'écart entre les deux courbes ne dépasse pas 8%.

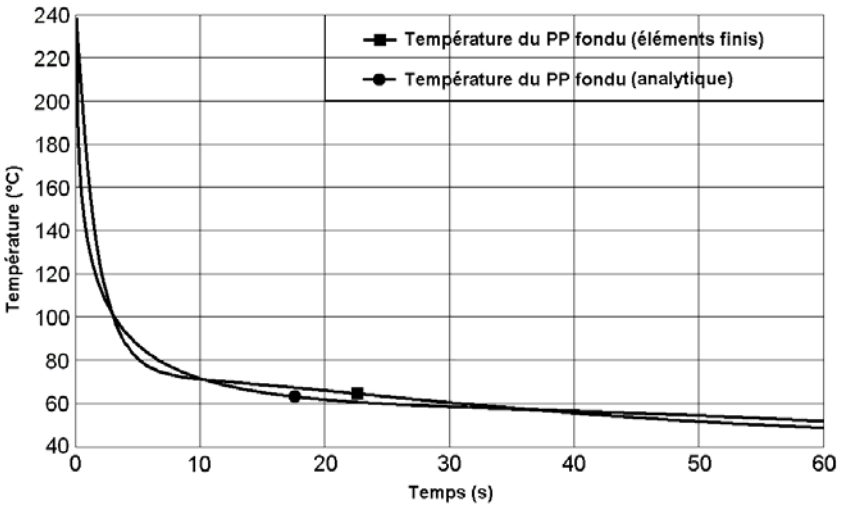


Fig. 3.5 - Variation de la température avec le temps, par modélisation analytique et par éléments finis.

Les deux modèles montrent des comportements équivalents, ce qui permet de prendre l'un ou l'autre modèle pour les études de sensibilité. L'utilisation des éléments finis parait plus souple et est conservée.

3.2.5 Etudes de sensibilité en appliquant la modélisation par éléments finis

Dans le but d'étudier l'influence de la fabrication des thermoplastiques sur les composants piézoélectriques intégrés, nous varions l'épaisseur de la plaque et simulons neuf positions de l'élément actif dans l'épaisseur de la plaque thermoplastique étudiée.

3.2.5.1 Influence de l'épaisseur de la plaque

Pour étudier l'influence de l'épaisseur de la plaque sur la résistance thermique de la pastille piézocéramique avec le temps, trois simulations ont été réalisées pour trois épaisseurs de plaque différentes (h = 2 mm, 5 mm et 10 mm), la pastille étant positionnée à h_p = 1 mm.

L'augmentation de l'épaisseur de la plaque (figure 3.6) entraîne une augmentation non négligeable, allant de 100 à 140°C, de la température au sein de la pastille piézocéramique. De plus, les températures décroissent beaucoup moins vite pour les plaques épaisses.

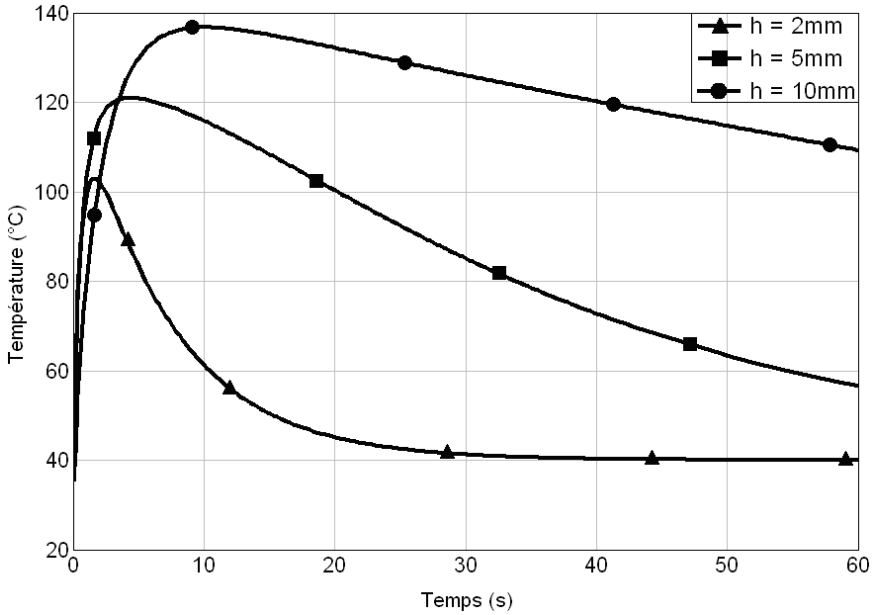


Fig. 3.6 - Influence de l'épaisseur de la plaque sur la courbe *T(t)* au sein du PZT dans le cas du moulage par injection.

3.2.5.2 Influence de la position du PZT

Pour étudier la variation de la sollicitation thermique sur la pastille avec le temps, la plaque d'épaisseur h = 5 mm a été modélisée avec neuf positions différentes de la pastille PZT dans l'épaisseur (h_p = 0.5, 0.75, 1, 1.25, 1.5, 1.75, 2, 2.25 et 2.5 mm), h_p = 2.5 mm correspondant au centre de la plaque.

De plus le temps de surchauffage a été analysé en prenant la température de Curie du PZT comme paramètre. On s'accorde généralement sur le fait qu'il ne faut guère dépasser la moitié de la température de Curie pour éviter le vieillissement piézoélectrique. Nous avons donc défini *le temps de surchauffage* de la pastille PZT, comme étant le temps durant lequel la pastille reste à une température T_s au dessus de la moitié température du curie $T_s > T_C/2$. 18 températures $T_C/2$ variant de 75°C à 160°C avec un pas de 5°C ont été considérées.

Les simulations montrent

- une augmentation systématique de la température maximale au sein du PZT vis-à-vis de sa pénétration transversale vers le centre de la plaque (figure 3.7a). La température maximale peut atteindre 165°C.
- un comportement parabolique de la température maximale du PZT en fonction de la position de la pastille active, avec le maximum correspondant au positionnement du PZT au centre de la plaque (figure 3.7b).
- que plus la pastille PZT est située à proximité du centre de la plaque, plus elle est exposée à une température élevée durant une longue durée.
- que le temps d'exposition du PZT à la chaleur dépend naturellement de la position de la pastille PZT dans la plaque et du choix de la température de Curie. La figure 3.7a montre que pour une température de Curie de 150°C, le temps de surchauffage est très faible pour une position du PZT près de la peau et long pour une position du PZT au centre. La figure 3.7c est une abaque donnant le temps de surchauffage en fonction de la position relative [nombre adimensionnel $h_p/(h/2)$ où h = 5 mm] et avec $T_c/2$ comme paramètre. La figure 3.7c montre, par exemple, pour h_p = 0,5 mm, que le PZT serait exposé à une température supérieure à $T_c/2$ = 80°C pendant 6s.

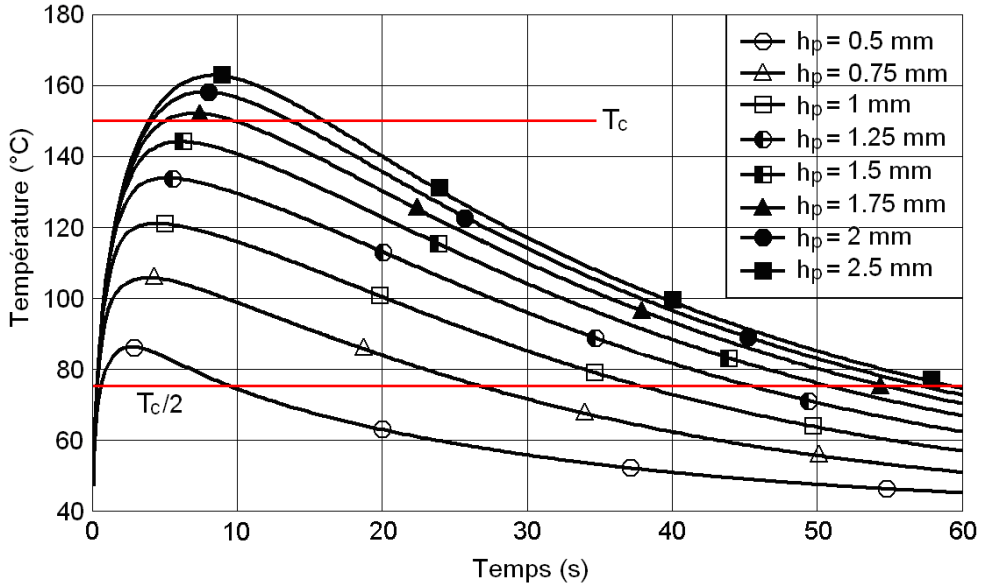


Fig. 3.7a - Influence de la position de la pastille sur la courbe *T(t)* au sein du PZT dans le cas du moulage par injection.

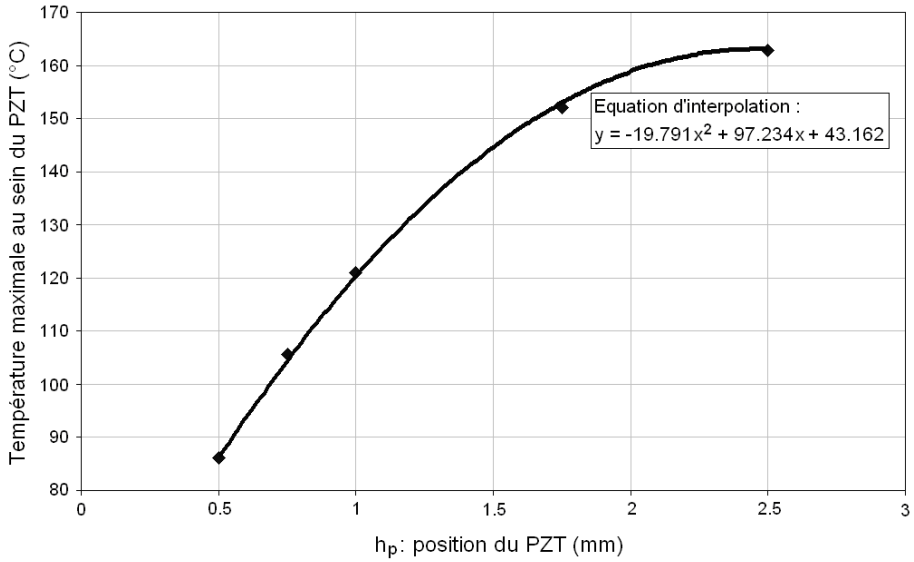


Fig. 3.7b - Variation de la Température maximale au sein du PZT avec sa position dans la plaque.

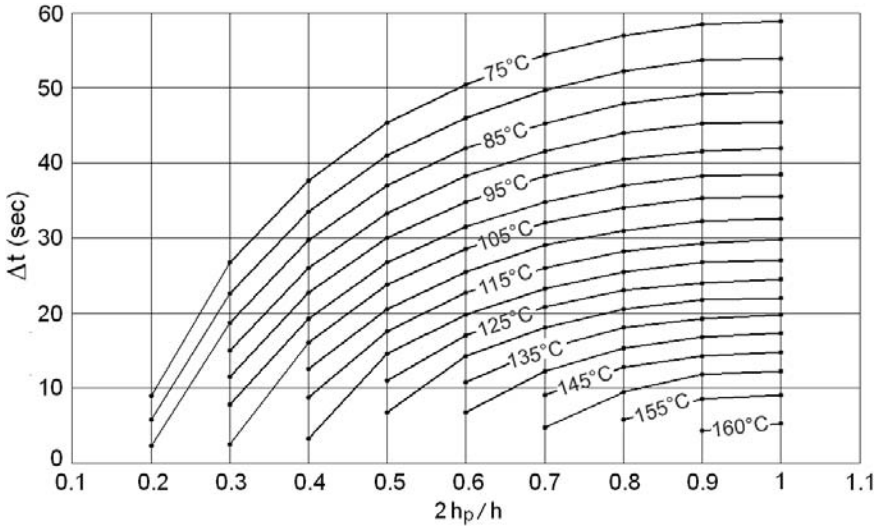


Fig. 3.7c - Courbe de variation du temps de surchauffage du PZT avec différentes position du PZT dans le cas du moulage par injection (h = 5 mm).

3.2.5.3 Effets additionnels

Le remplissage de l'empreinte d'un moule d'injection peut produire des élévations de température par effet convectif. Nous avons pris en compte ce phénomène en ajoutant un coefficient de convection dans le modèle éléments finis.

Le coefficient de convection forcée dans le cas d'écoulement sur une surface plane est donné par l'équation suivante [Fra96] :

$$\mathbf{H_{remp} = \frac{K}{L}\left[0.664 \times \left(\frac{\mu C}{k}\right)^{\frac{1}{3}} \times \left(\frac{\rho V L}{\mu}\right)^{\frac{1}{2}}\right]} \qquad \textbf{(3.18)}$$

avec : L = 240 mm, longueur du modèle étudié.

V = 1.2 m/s, vitesse de remplissage du moule calculé d'après (3.21).

μ = 100 Pa.s, viscosité dynamique du PP étudié.

$K, C, \rho,$ conductivité thermique, viscosité dynamique, chaleur spécifique et masse volumique du PP (déjà définies).

Le coefficient de convection pour le remplissage du moule est déterminé à partir de l'équation (3.18) : H_{remp} = 87 W/m.K.

Cependant, lors du remplissage du moule, on constate la formation d'une gaine solide près

des parois (surface du moule et de la pastille piézocéramique). Cette solidification est susceptible de réduire significativement l'épaisseur disponible pour l'écoulement (veine liquide moyenne $h_v(t)$, figure 3.8).

La réduction de la veine liquide, liée à une augmentation de la durée de remplissage, provoque une élévation de la pression de remplissage du moule et donc une variation du débit et du temps de remplissage. Une réduction significative du temps de remplissage est liée à une augmentation de la pression et une augmentation du débit.

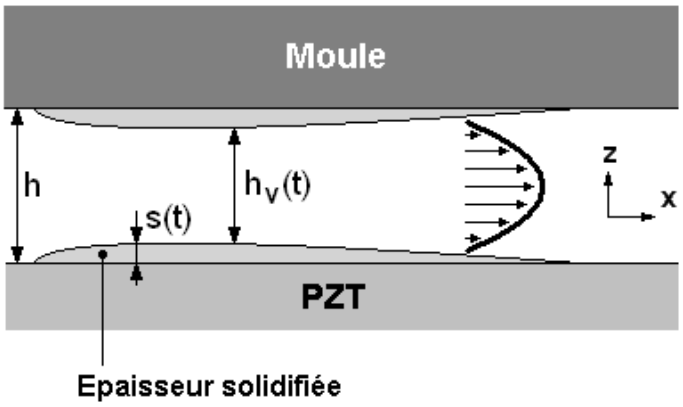


Fig. 3.8 - Section d'écoulement plan du PP en cours de solidification.

L'évolution de la pression de remplissage d'un moule en fonction du temps de remplissage présente un profil successivement décroissant en passant par une valeur minimale P* puis croissant [Mou05] :

$$\mathbf{P^*(z,h_v,t^*) = 2K\left(\frac{2(2n+1)}{n}\right)^n \times \left(\frac{2n}{3n+1}\right)^{-2n} \times \left[1-\left(\frac{2n}{3n+1}\right)\right]^{-(n+1)} \times z^{n+1} \times \frac{h^{-(3n+1)}}{\alpha^{-n}}} \qquad \textbf{(3.19)}$$

avec α : diffusivité thermique du PP.

Les valeurs de temps de remplissage optimales sont supérieures aux valeurs connues dans la pratique industrielle. Pour des raisons évidentes de productivité, il n'est pas nécessaire de prolonger le temps de remplissage jusqu'au minimum de la pression de remplissage. Il est préférable de se situer au point qui constitue le meilleur compromis entre une réduction de la durée de remplissage et une augmentation minimale de la pression de remplissage Δp.

Le temps de remplissage optimal t^* est la moyenne du temps de remplissage obtenu en

augmentant l'épaisseur d'écoulement $\mathbf{h - s(t)}$ et diminuant l'épaisseur solidifiée $\mathbf{z(t) = \sqrt{\alpha\ t^*}}$ comme suit [Mou05] :

$$t^* = \left[\frac{\left(\frac{1}{h}\right)^{\frac{n+1}{n}} + \left(\frac{3n+1}{h\,(n+1)}\right)^{\frac{n+1}{n}}}{2} \right] \times$$

$$\left[\frac{\Delta P}{2K\left(\frac{2(2n+1)}{n}\right)^{n} x^{n+1}} + \left[\frac{h^{\frac{3n+1}{n}}}{\alpha} \left(\frac{2n}{3n+1}\right)^{2} \left[1 - \left(\frac{2n}{3n+1}\right)\right]^{\frac{1}{n}+1} \right]^{-n} \right]^{-\frac{1}{n}} \quad \textbf{(3.20)}$$

La vitesse de remplissage est donnée par [Mou05] :

$$V = \left[\frac{-1.384\left(2\frac{3n+1}{n}\right)^{\frac{1}{3}} \left(\frac{aL}{h_V^2}\right)^{\frac{2}{3}}}{\left(\frac{2n+1}{n}\right)^{n} 2^{n+1} \frac{R\alpha L h_V^{-n-1}}{k\,\Delta T}} \right]^{\frac{3}{3n+2}} \quad \textbf{(3.21)}$$

avec $\Delta T = T_M - T_m$ et R : consistance du PP.

Par conséquence, la régulation au niveau des paramètres du procédé (pression, vitesse et temps de remplissage) en fonction des conditions réelles de fabrication (formation d'une gaine solide sur les parois et réduction de la veine liquide) peut influer sur le coefficient de convection thermique calculé.

On constate (figure 3.9) que le processus de remplissage provoque une forte élévation de la température maximale surtout au sein de la pastille PZT dans laquelle la température augmente de 42%. L'augmentation de la température et la diminution du refroidissement jouent un rôle efficace dans la réduction de l'épaisseur du plastique solidifié sur les surfaces froides (moule et PZT). Toutefois, une augmentation importante de la température du composant piézoélectrique qui dépasse sa limite thermique peut causer la

dégradation de ce composant.

Cette conclusion est purement qualitative et il faudra revenir sur ce genre de considération s'il s'avérait que les valeurs expérimentales s'éloignaient trop des valeurs simulées.

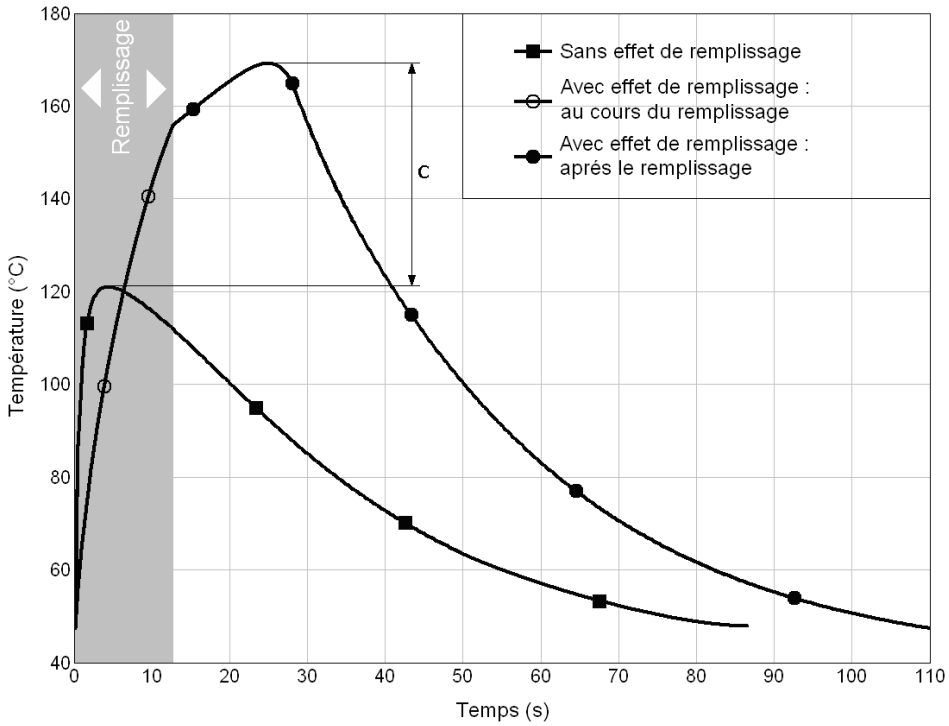


Fig. 3.9 - Effet du remplissage sur la pastille PZT (h = 5mm, h_p = 1mm).

3.2.6 Application de l'analyse numérique à différentes matériaux thermoplastiques

L'étude de base a été réalisée sur le polypropylène. Néanmoins, les méthodes développées peuvent être appliquées à la majorité des matériaux thermoplastiques. Parmi une grande variété de matériaux thermoplastiques, nous avons choisi les matériaux suivants qui sont les plus répandus dans le domaine de la plasturgie (caractéristiques : chapitre 2) :

- Polypropylène (PP)
- Acrylonitrile Butadiène Styrène (ABS)
- Polyéthylène basse densité (LDPE)
- Polyéthylène haute densité (HDPE)
- Polychlorure de vinyle (PVC)
- Polycarbonate (PC)
- Polyétheréthercétone (PEEK)

La figure (3.10a) montre la différence entre les divers paramètres thermiques de ces matériaux.

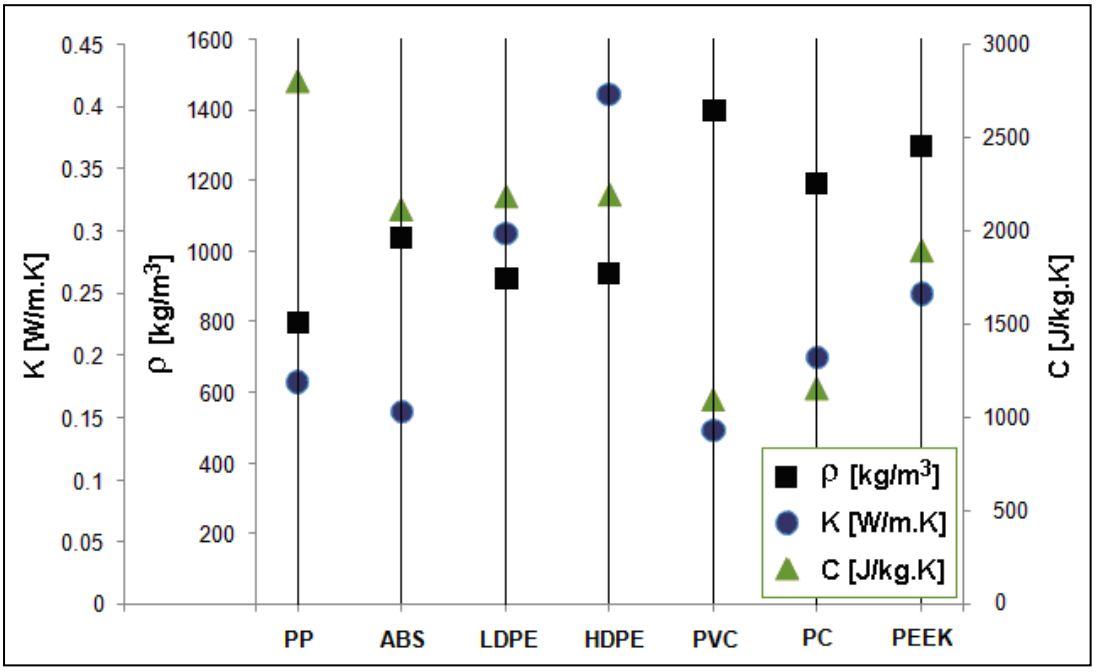


Fig. 3.10a – Conductivité, chaleur spécifique et masse volumique des matériaux thermoplastique utilisés.

L'étude réalisée dans cette partie est identique à celle effectuée pour le polypropylène dans le cas du moulage par injection (mêmes positions du PZT et même épaisseur de plaque). La pastille PZT étudiée est le LAIT/PZT_{19} (Ch. 2) et le modèle étudié est illustré figure 3.1. Le modèle de simulation par éléments finis est montré par la figure 3.4.

Dans un premier temps, nous avons simulé la variation avec le temps, de la température au sein du PZT pour les différents matériaux étudiés. Les résultats sont illustrés dans l'annexe A.1.1. À partir de ces résultats, nous avons retenu la valeur maximale de la température au sein du PZT pour chaque position. L'évolution de cette température maximale avec la position du PZT est donnée par la figure 3.10b.

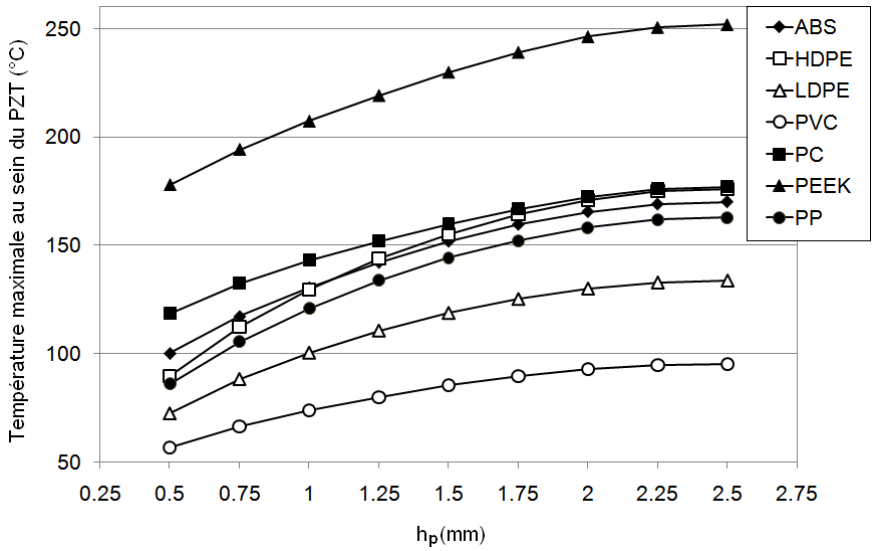


Fig. 3.10b - Variation de la Température maximale au sein du PZT avec sa position dans la plaque pour différents matériaux thermoplastiques.

Ensuite, nous avons simulé la variation du temps de surchauffage du PZT pour différentes positions. Les résultats sont illustrés dans l'annexe A.2.1 sous forme d'abaques. À partir de ces résultats, nous avons retenu l'évolution du temps de surchauffage du PZT avec la position, ceci pour un PZT bien déterminé (T_c=200°C). Cette évolution est représentée par la figure 3.10c.

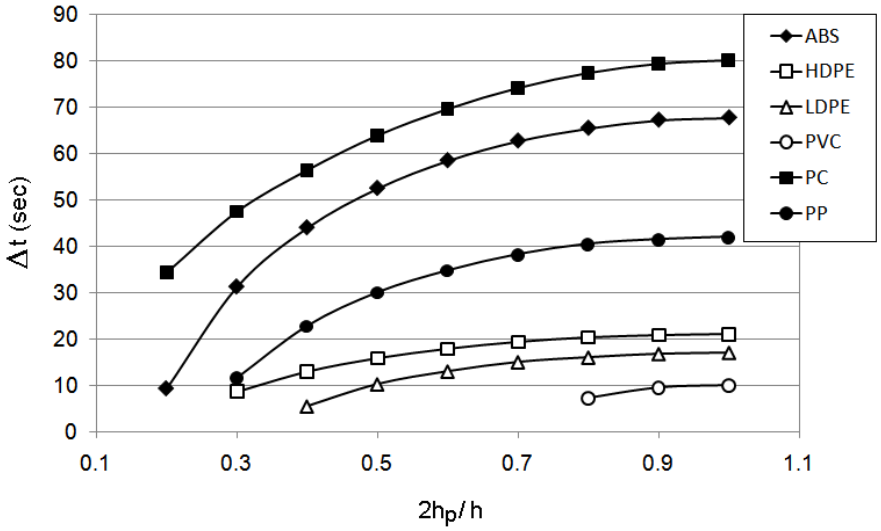


Fig. 3.10c - Courbe de variation du temps de surchauffage du PZT avec différentes position du PZT. dans le cas du moulage par injection pour une température de Curie = 200°C.

Les figures 3.10b et 3.10c montrent une distinction entre les conditions auxquelles le PZT

est exposé au cours du moulage par injection. En particulier, nous avons constaté qu'il y a des matériaux qui exposent le PZT à des conditions thermiques dures comme le PC et le PEEK. Cependant, d'autres matériaux comme le PVC et le LDPE procurent des conditions beaucoup plus favorables. Des conditions modérées sont assurées par un groupe de matériaux comme l'HDPE, l'ABS et le PP.

3.2.7 Influence des paramètres thermiques du thermoplastique sur l'échauffement du PZT au cours du procédé de moulage

L'existence d'une grande variété de matériaux thermoplastiques nous conduit à étudier l'échauffement du PZT selon leurs propriétés thermiques. Ce choix permet de couvrir la majorité de ces matériaux.

Le modèle considéré dans cette partie est identique à celui étudié précédemment (§1.3). Cependant, nous avons considéré uniquement la position milieu (h_p=2.5mm) pour laquelle le PZT est soumis aux conditions thermiques les plus dures.

Les paramètres thermiques étudiés sont : la température d'injection, la conductivité thermique et la chaleur spécifique du thermoplastique. La procédure suivie consiste dans un premier temps, à simuler l'évolution de la température au sein du PZT (pendant le procédé d'injection) en fonction du temps pour des paramètres thermiques fixes. De chaque courbe obtenue nous retenons la valeur maximale de la température. Dans un deuxième temps, ces valeurs maximales sont représentées en fonction de l'un des paramètres tout en fixant les deux autres paramètres autour d'une valeur moyenne. Les valeurs moyennes prises en compte sont $T_{inj.moy}$ = 220°C, K_{moy} = 0.2 W/m.K et C_{moy} = 2000 J/kg.K. Cette procédure est expliquée dans la figure 3.10e.

Dans cette étude, nous considérons la température instantanée atteinte par la pastille PZT au cours du procédé et non pas l'influence du temps d'exposition du PZT à des températures élevées et ses effets sur la dégradation du PZT. En effet, plus la température de la matière est élevée, plus le temps d'exposition du PZT à une température supérieure à $T_c/2$ est important.

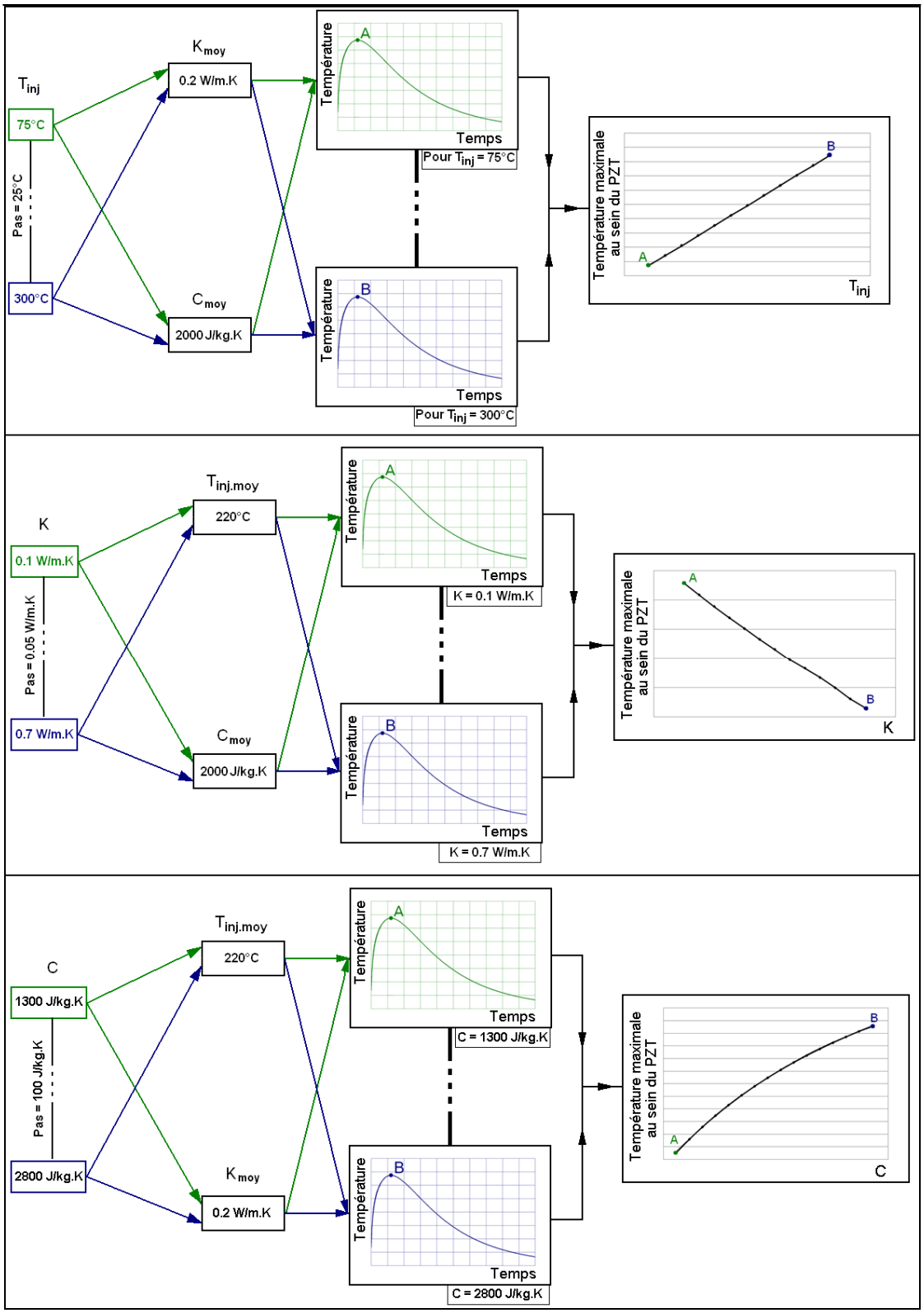


Fig. 3.10e - Procédure d'obtention de l'évolution de la température maximale au sein du PZT en fonction des paramètres thermiques.

3.2.7.1 Influence de la température d'injection sur la température maximale au sein du PZT

Dans cette partie, nous fixons tout d'abord la conductivité thermique et la chaleur spécifique, et nous varions la température d'injection. Les valeurs moyennes de la conductivité thermique et de la chaleur spécifique sont $K_{moy} = 0.2$ W/m.K et $C_{moy} = 2000$ J/kg.K. Les températures du procédé prises en compte varient de 75°C à 300°C avec un pas de 25°C (12 valeurs). Pour chaque température d'injection nous avons effectué une simulation. Ces simulations sont ensuite regroupées figure 3.11a qui montre l'évolution de la température maximale au sein du PZT en fonction de la température d'injection.

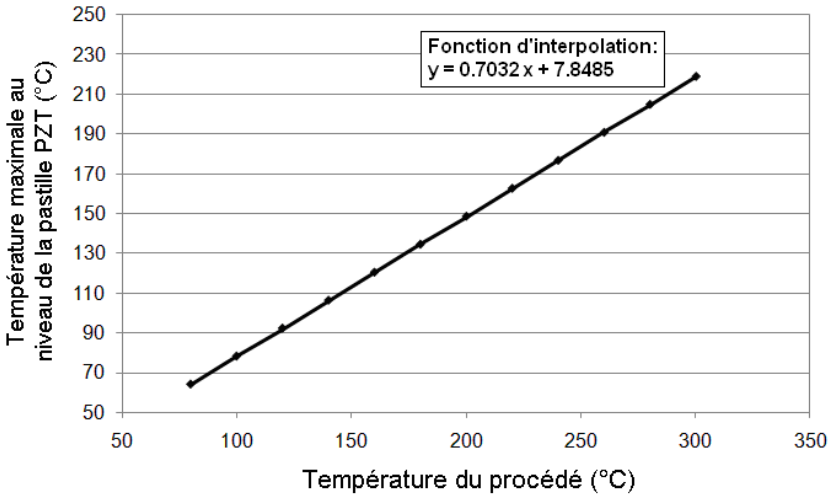


Fig. 3.11a - Variation de la température maximale au sein du PZT avec la température d'injection de moulage par injection.

3.2.7.2 Influence de la conductivité thermique sur la température maximale au sein du PZT

Maintenant, nous fixons la température d'injection et la chaleur spécifique, et nous varions la conductivité thermique. Les valeurs moyennes de la température d'injection et de la chaleur spécifique sont : $T_{inj.moy} = 220$°C, $C_{moy} = 2000$ J/kg.K. Les valeurs de la conductivité thermique considérées varient de 0.1 W/m.K à 0.7 W/m.K avec un pas de 0.05 W/m.K (13 valeurs). Nous montrons figure 3.11b l'évolution de la température maximale au sein du PZT en fonction de la conductivité thermique.

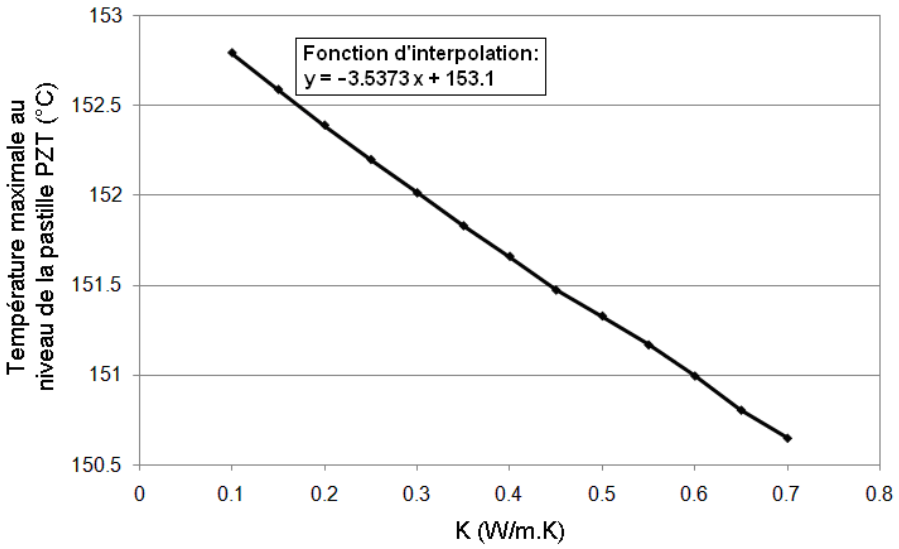


Fig. 3.11b - Variation de la température maximale au sein du PZT avec la conductivité thermique du thermoplastique.

Les résultats illustrés dans les figures 3.11a et 3.11b expriment une évolution linéaire de la température maximale. En effet, l'expression de la température $T_i(z, t)$, dans la couche i du modèle est obtenue d'après l'équation 14 :

$$\mathbf{T_i(z,t) = \sum_{n=1}^{\infty} e^{-\beta_n^2 \times t} \frac{1}{N_n} \psi_{in}(z) \sum_{j=1}^{6} \frac{k_j}{\alpha_j} \int_{z'=z_j}^{z_{j+1}} \psi_{jn}(z') F_j(z') dz'}$$

Dans la couche $j = 2$ (thermoplastique fondu) on a $F_j = F_2 = T_M$ (température d'injection : variable) et les autres valeurs sont constantes. Si on fait sortir F_2 de l'intégrale et des sommes, l'expression de $T_i(z, t)$ peut s'écrire sous la forme suivante :

$$\mathbf{T\ (F_2 = T_M) = C_1 \times T_M + C_2} \qquad \mathbf{(3.22)}$$

De même pour K, on trouve :

$$\mathbf{T\ (K) = C_3 \times K + C_4} \qquad \mathbf{(3.23)}$$

Ce qui explique l'évolution linéaire de la température maximale au sein du PZT en fonction de la température d'injection et de la conductivité thermique du thermoplastique.

3.2.7.3 Influence de la chaleur spécifique sur la température maximale au sein du PZT

Finalement, la température d'injection et la conductivité thermique sont fixées (K_{moy} = 0.2 W/m.K, $T_{inj.moy}$ = 220°C) et la chaleur spécifique varie de 1300 J/kg.K à 2800 J/kg.K avec un pas de 100 J/kg.K (16 valeurs). La figure 3.11c montre l'évolution de la température maximale au sein du PZT en fonction de la chaleur spécifique.

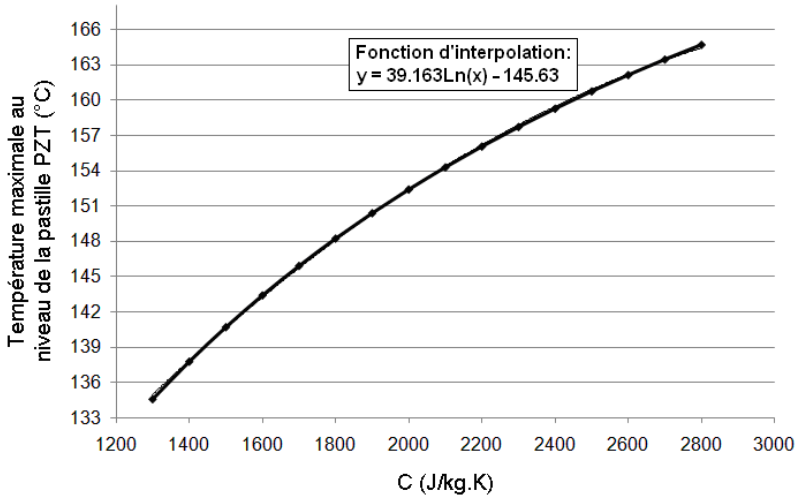


Fig. 3.11c - Variation de la température maximale au sein du PZT avec la chaleur spécifique du thermoplastique.

La figure 3.11c montre une évolution non linéaire (logarithmique) de la température maximale au sein du PZT en fonction de la chaleur spécifique du thermoplastique. En effet, la chaleur spécifique est donnée comme la suivante :

$$\mathbf{C = \frac{dQ}{dT} \quad \Rightarrow \quad dT = \frac{dQ}{C}} \qquad \textbf{(3.24)}$$

avec Q : quantité de chaleur et T : température.

Comme Q est directement proportionnelle à C, l'intégration de l'équation (3.24) aboutit à une forme logarithmique de T en fonction de C.

Les résultats obtenus dans cette étude seront exploités pour déterminer l'évolution de la perte de piézoélectricité en fonction des paramètres thermiques étudiés dans cette partie.

3.3 Surmoulage

3.3.1 Description du système étudié

Différente du procédé de moulage par injection, la fabrication de la plaque par surmoulage est réalisée en deux étapes :

- La première étape consiste à fabriquer à part par injection, la partie de la plaque qui se trouve en dessous du PZT.
- La deuxième étape est d'attacher le PZT sur cette partie avant de les placer ensemble dans une nouvelle empreinte (représentant la plaque finale) et de remplir cette dernière par du PP.

Le but de cette étude est de montrer le niveau d'efficacité d'un tel procédé sans se préoccuper des problèmes techniques liés à la fixation de la pastille PZT sur la pièce.

3.3.2 Modélisation par éléments finis du dispositif de surmoulage

Le modèle est identique à celui représenté dans la partie (§2) du moulage par injection (h = 5 mm), ainsi que la modélisation éléments finis du problème thermique transitoire dans le cas du surmoulage est similaire à celle développée dans le cas du moulage (9 simulations).

Le modèle par éléments finis (figure 3.12) compte 6550 éléments (moule : 3000 éléments, PP : 3050 éléments, PZT : 250 éléments, Laiton : 250 éléments) et 6732 degrés de liberté : la température à chaque nœud.

Les conditions initiales et les conditions aux limites sont données ci-après :

- Le refroidissement est réalisé par écoulement d'eau dans les canaux de refroidissement à une température T_e = 25°C et une vitesse d'écoulement de 0.2 m/s. La convection est contrôlée afin de maintenir le moule sous une température T_m = 40°C.
- Le contact est considéré comme parfait, et la température de chaque couche est uniforme avec l'épaisseur.
- La température d'injection de la partie superieure de la pièce PP est de T_M = 240°C.
- La température initiale du capteur piézocéramique T_p = 25°C.
- La température initiale de la partie inferieure de la pièce PP est T_i = 25°C.

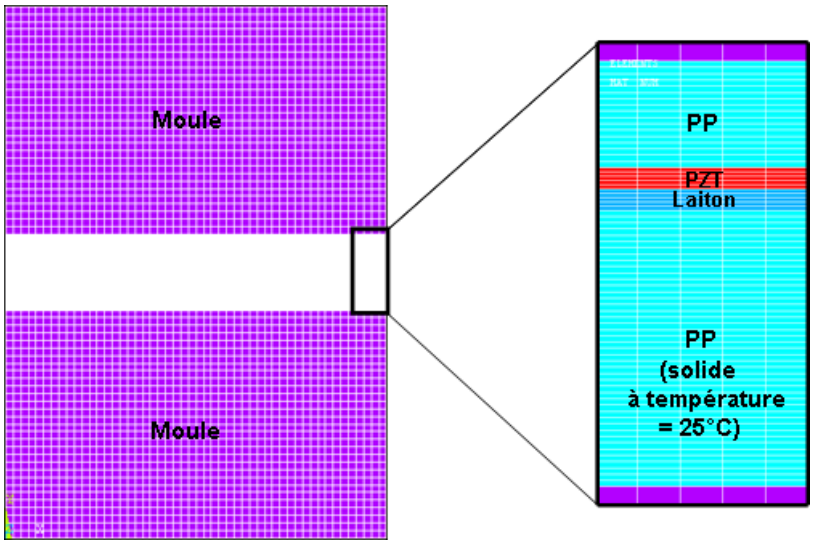


Fig. 3.12 – Topologie du modèle par éléments finis (cas du sur-moulage).

3.3.3 Influence de la position du PZT

Comme dans le cas de l'injection, neuf positions de la pastille piézocéramique dans l'épaisseur de la plaque PP sont considérées. La figure 3.13a montre l'influence de la position de la pastille sur la courbe de température au sein du PZT en fonction du temps. Cette figure est à comparer avec la figure 3.7a.

Lorsque la pastille est sous la peau, le comportement thermique reste identique. Par contre, lorsque la pastille est au centre, les températures maximales décroissent d'environ 70°C.

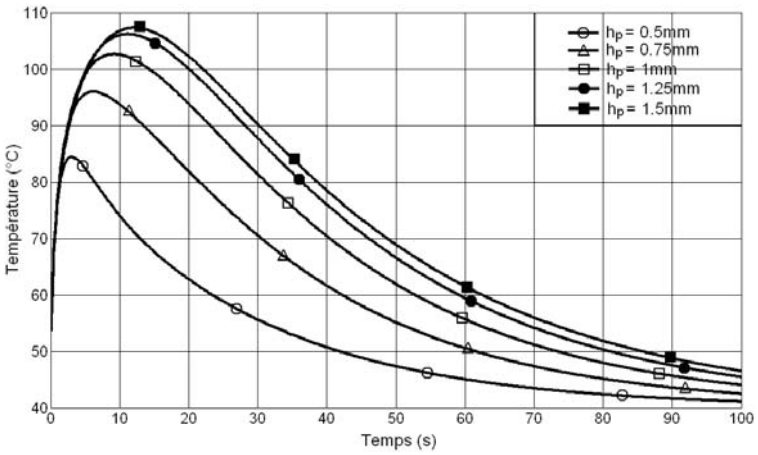


Fig. 3.13a - Influence de la position de la pastille sur la courbe *T(t)* au sein du PZT dans le cas du co-injection.

La figure 3.13b donne la courbe de variation du temps de surchauffage du PZT à comparer avec la figure 3.7c. On voit clairement que le maximum du surchauffage apparaît pour une pastille positionnée au quart de la hauteur de plaque, tout en restant inférieure à celle observée lors de l'injection directe, sauf pour une pastille positionnée sous la peau, où les deux méthodes ont des résultats équivalents.

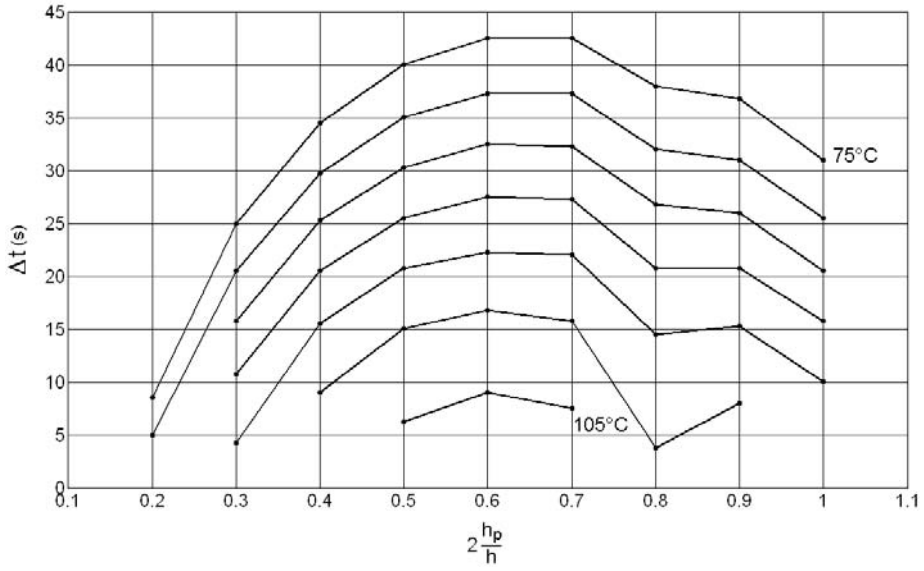


Fig. 3.13b - Courbe de variation du temps de surchauffage du PZT avec différentes positions du PZT dans le cas de la co-injection (h = 5 mm).

Il découle de ces comparaisons que la co-injection est d'autant plus attractive en ce qui concerne le niveau de surchauffage que la pastille est proche du centre de la plaque. Cette attractivité est particulièrement grande pour des positions de la pastille entre le quart et le centre de la plaque.

3.4 Thermoformage

3.4.1 Modèle numérique

Le modèle est identique à celui représenté dans la partie (§2) du moulage par injection (h = 5 mm) et la modélisation éléments finis du problème thermique transitoire dans le cas du thermoformage est similaire à celle développée dans le cas du moulage (9 simulations).

Le modèle par éléments finis (figure 3.14) compte 3550 éléments (PP : 3050 éléments, PZT : 250 éléments, Laiton : 250 éléments) et 3621 degrés de liberté: la température à chaque nœud.

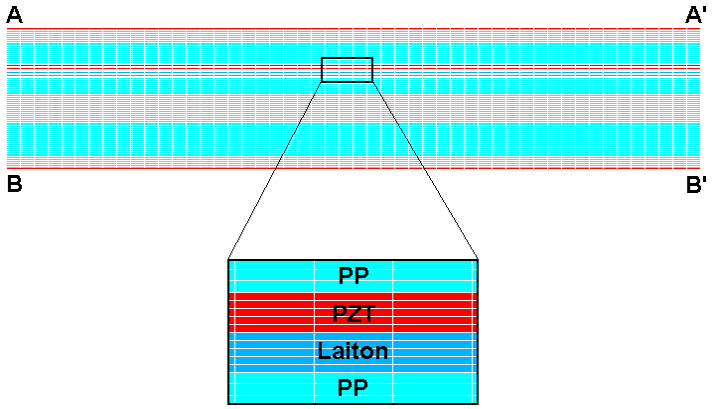


Fig. 3.14 – Topologie du modèle par éléments finis (cas du thermoformage).

3.4.2 Conditions de la simulation numérique

Afin d'obtenir un bon compromis entre les conditions de fabrication et de leurs dépendances, nous avons choisi une énergie d'échauffement du thermoformage classée parmi les conditions les plus contraignantes utilisées dans l'industrie du plastique [Flo96].

Voici les conditions initiales :

- La plaque et la pastille PZT sont initialement à 25°C.
- Le contact est considéré comme parfait.
- La température de chaque couche est uniforme dans l'épaisseur.

Et les conditions de la simulation :

- Le modèle est chauffé (AA' et BB' : 40 kW/m^2) et compressé jusqu'à atteindre l'état d'équilibre thermique de 235°C.
- La phase de refroidissement est réalisée à l'aide d'air froid en convection naturelle autour de la pièce (AA' et BB'), à température de 25°C et avec un coefficient de convection de 30 W/m^{2}K (convection naturelle sur une surface horizontale) [Rbl08].

3.4.3 Influence de la position du PZT

Afin de comparer les procédés de thermoformage et de moulage par injection, on s'intéresse ici aussi à la variation de température avec le temps des PZT. La figure 3.15a montre ces résultats pour le thermoformage.

La figure 3.15a [T(t,h_p)] est à comparer avec les figures 3.7a (injection) et 3.13a (co-

injection) tandis que la figure 3.15b (Abaque de surchauffage) est à comparer avec les figures 3.7c et 3.13b.

Il est à noter que :

- la température de la pastille piézoélectrique atteinte dans le procédé de thermoformage est plus élevée que dans le procédé d'injection.
- le temps nécessaire pour revenir à son état thermique initial est plus long.
- cet effet augmente plus au niveau du centre et des faces extérieures de la pièce.
- dans le plan médian la durée de l'exposition du PZT à la chaleur augmente considérablement.
- au niveau des faces extérieures, la température dépasse la température de transformation en raison du chauffage extérieur (voir chapitre 3).
- la durée de l'exposition à la chaleur est du même ordre de grandeur que la durée d'exposition la plus défavorable dans le procédé d'injection.
- en ce qui concerne le procédé de thermoformage, le positionnement du PZT le plus favorable doit être une position intermédiaire à environ ¼ de l'épaisseur de la plaque.

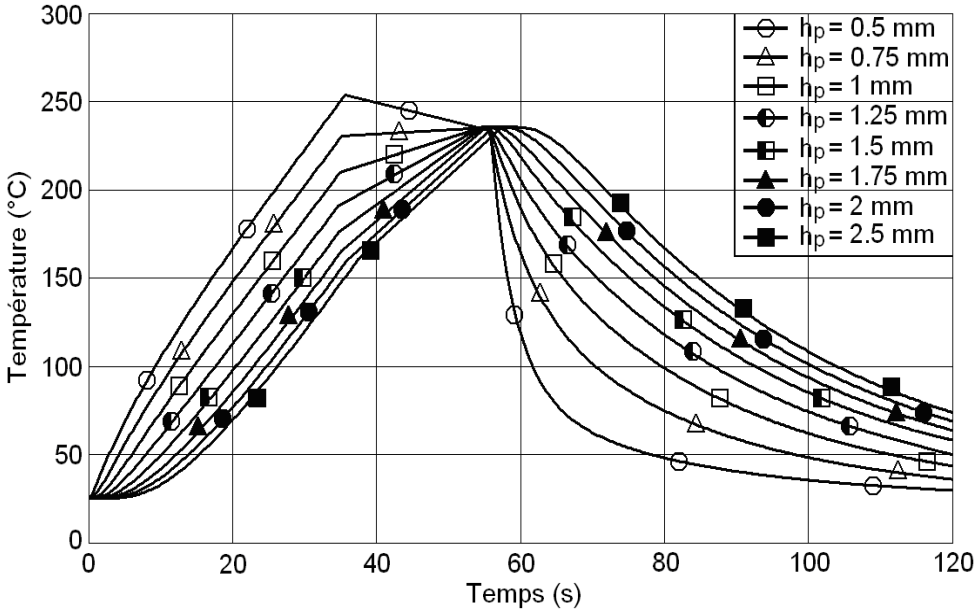


Fig. 3.15a - Influence de la position de la pastille sur la courbe *T(t)* au sein du PZT dans le cas du thermoformage.

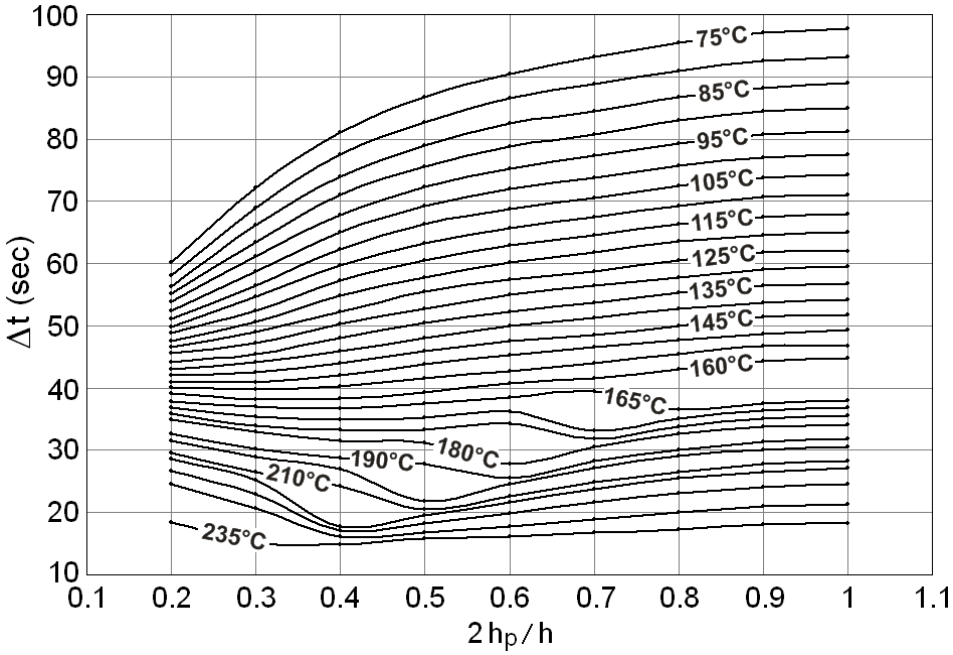


Fig. 3.15b - Courbe de variation du temps de surchauffage du PZT avec différentes position du PZT dans le cas du thermoformage (*h* = 5 mm).

3.4.4 Influence des paramètres thermiques du thermoplastique sur l'échauffement du PZT au cours du procédé de thermoformage

Dans cette partie, nous reprenons les mêmes matériaux thermoplastiques étudiés dans le procédé de moulage (ABS, PVC, HDPE, LDPE, PEEK, PC) et nous les étudions dans le procédé de thermoformage. Le modèle est toujours identique à celui représenté dans la partie moulage.

Dans un premier temps, nous avons simulé la variation avec le temps de la température au sein du PZT pour les différents matériaux étudiés. Les résultats sont illustrés dans l'annexe A.1.2. À partir de ces résultats, nous avons retenu la valeur maximale de la température au sein du PZT pour chaque position. L'évolution de cette température maximale avec la position du PZT est donnée par la figure 3.16a.

Ensuite, nous avons simulé la variation du temps de surchauffage du PZT pour différentes positions. Les résultats sont illustrés dans l'annexe A.2.2 sous forme d'abaques. À partir de ces résultats, nous avons retenu l'évolution du temps de surchauffage du PZT avec la position, ceci pour un PZT bien déterminé (T_c = 200°C). Cette évolution est représentée par la figure 3.16b.

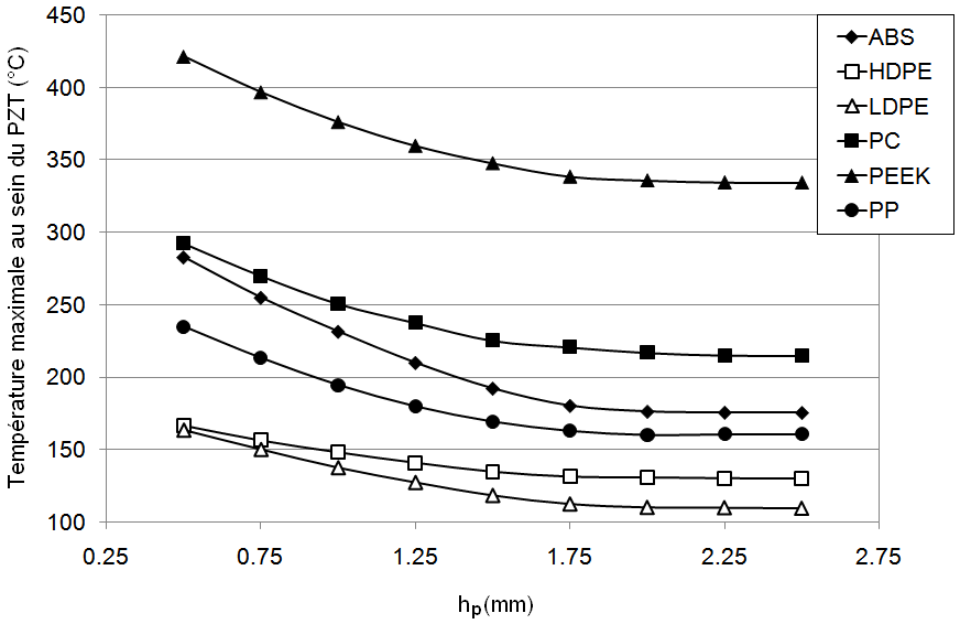


Fig. 3.16a - Température maximale au sein du PZT pour différents matériaux thermoplastiques (cas du thermoformage).

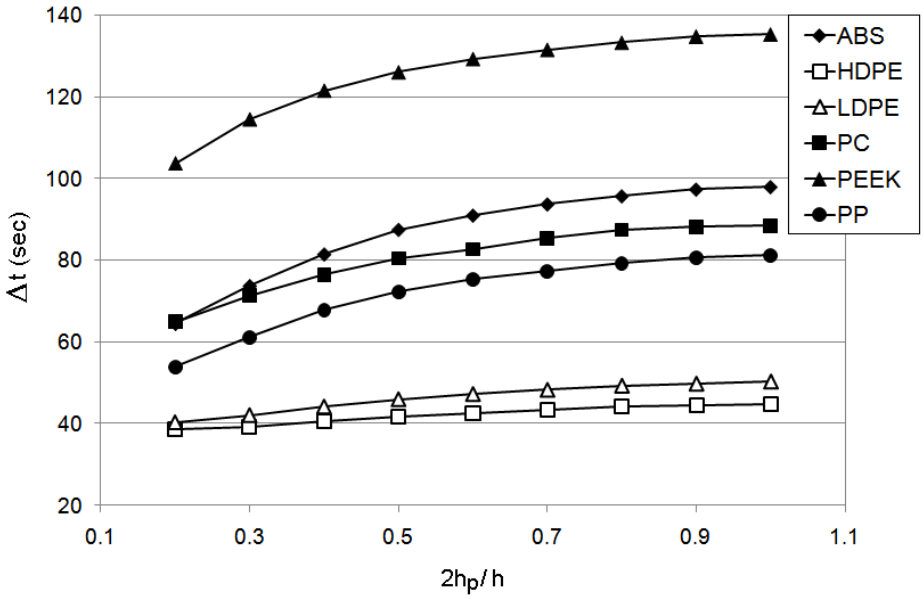


Fig. 3.16b - Courbe de variation du temps de surchauffage du PZT avec différentes positions du PZT dans le cas du thermoformage pour une température de Curie = 200°C.

Les figures 3.16a et 3.16b montrent une distinction entre les conditions auxquelles le PZT est exposé au cours du thermoformage. En particulier, nous avons constaté qu'il y a des matériaux qui exposent le PZT à des conditions thermiques dures comme le PEEK et le

PC. Cependant, d'autres matériaux comme le LDPE et le HDPE procurent des conditions beaucoup plus favorables. Des conditions modérées sont assurées par un groupe de matériaux comme l'ABS et le PP.

3.5 Synthèse des résultats

Les résultats les plus importants concernent le surchauffage de la pastille piézoélectrique. Ils ont été présentés sous forme d'abaques (figures 3.7c, 3.13b et 3.15b) incluant le temps, la température et la position du PZT dans la pièce fabriquée. Ces abaques sont exploités pour évaluer le temps d'exposition à la chaleur d'un PZT lorsque la fabrication des thermoplastiques a un point de fusion inférieur à 240°C.

En conclusion, les conditions de fabrication du thermoplastique intelligent peuvent être définies afin de réduire au minimum la perte des propriétés piézoélectriques et de choisir un composant PZT convenable.

Afin de compléter cette étude, il serait intéressant de faire varier, en plus du temps t (temps d'exposition du PZT à des hautes temperatures) et de la position h_p du PZT dans la plaque, l'épaisseur h de la plaque pour établir une représentation en 3D (t, h et h_p) de la pièce thermoplastique active.

3.5.1 Comparaison entre moulage par injection et moulage par co-injection

Dans le cas de moulage par injection ou co-injection (figures 3.7c et 3.13b), les abaques montrent que la meilleure position du PZT dans la pièce est au niveau des couches périphériques où l'exposition thermique (en température et en temps) est minimale. Pour cette position, les deux méthodes sont équivalentes au niveau thermique.

Pour une position intermédiaire (entre peau et ¼ de la hauteur), les deux méthodes sont semblables avec cependant un léger avantage pour la co-injection. Pour une position proche du centre, la méthode de co-injection est décidément plus favorable. Il est aussi à remarquer que plus la pastille s'approche du centre de la plaque, plus on a intérêt à choisir un PZT à haute valeur de la température de Curie. Cependant, il faut noter la présence d'un problème technique au cours du procédé de moulage par co-injection (surmoulage) lié à la fixation de la pastille PZT sur la pièce thermoplastique.

3.5.2 Thermoformage

Dans le cas du thermoformage, le PZT atteint la température maximale quel que soit la position du PZT dans la pièce pendant une courte période de l'exposition thermique. On a donc intérêt à choisir un PZT à haute valeur de la température de Curie.

En outre, la mise en œuvre de matériaux comme le PP produit dans le procédé de moulage par injection, des conditions thermiques favorables au PZT mais des conditions thermiques moyennes dans le procédé de thermoformage. Par contre, le HDPE se déplace du niveau modéré dans l'injection à un niveau favorable dans le thermoformage.

De plus, contrairement au moulage par injection, le thermoformage montre que la position défavorable du PZT dans le modèle est celui qui se rapproche le plus de l'extrémité. En particulier, la figure 3.16a indique que la température maximale au sein du PZT décroît avec son rapprochement du milieu.

Chapitre 4

COMPORTEMENT THERMIQUE DES PASTILLES PIÉZOÉLECTRIQUES

Table des matières

4.1 Introduction 96
4.2 Essais et de flexion annulaire 96
4.3 Validation de l'essai de flexion 97
4.3.1 Cas nominal 97
4.3.2 Erreur de décentrage de l'effort appliqué 99
4.3.3 Erreur de décentrage du disque en PZT par rapport au disque en laiton 99
4.3.4 Conclusion sur les erreurs de décentrage 100
4.4 Essai de mesure de raideur du buzzer 100
4.4.1 Détermination expérimentales des raideurs 100
4.4.2 Estimation de l'effet bilame par simulation numérique 102
4.4.2.1 Calcul de la déformation de la pastille PZT en fonction de la température 102
4.4.2.2 Déformation de la calotte sphérique sous l'effet du chargement 103
4.4.3 Comparaison essais / simulation et conclusion 110
4.5 Mesure directe de la piézoélectricité sous contraintes thermiques 112
4.5.1 Dispositif expérimental 112
4.5.2 Résultats expérimentaux et conclusion 114
4.6 Conclusion 116

4.1 Introduction

Les études ultérieures ont montré les températures auxquelles sont soumises les pastilles piézoélectriques lors de différents procédés de fabrications thermoplastiques. D'autre part, la sensibilité des matériaux piézoélectriques à la température est reconnue.

Il s'agit donc de voir si les pastilles piézoélectriques peuvent supporter ces processus de fabrication sans détérioration de leurs caractéristiques notamment piézoélectriques.

Associées à cet objectif, les caractéristiques thermodynamiques des pastilles en PZT sont déterminées conjointement par essais et modélisation.

On s'intéresse particulièrement à deux choses :

- la variation des propriétés mécaniques en fonction de la température et éventuellement les dégradations associées,
- la perte de piézoélectricité sous l'effet de la chaleur élevée.

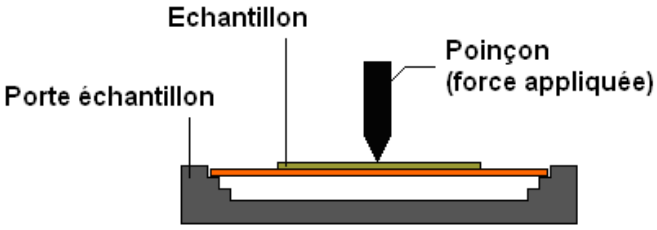
Des essais sont effectués par mise en œuvre du viscoanalyseur présenté par ailleurs. Ils mettent notamment en évidence le changement de comportement mécanique des composants PZT lors d'une élévation de température.

4.2 Essais de flexion annulaire

Le mode de fonctionnement de buzzers repose sur la symétrie axiale de sa structure et du matériau piézoélectrique. La réalisation d'un essai respectant cette axisymétrie semble être la meilleure solution pour obtenir des sollicitations homogènes dans les matériaux. Pour cela nous allons solliciter une pastille LAIT/PZT_{25} (Chap.2) simplement appuyée sur sa périphérie, par une force centrale comme représenté figure 4.1a à l'aide du viscoanalyseur (Chap.2).

Les caractéristiques complémentaires des essais sont les suivantes :

- Un déplacement dynamique est appliqué au centre
    - d'amplitude égale à 50 µm
    - autour d'une force de précharge d'amplitude de 20 N
    - à différentes fréquences (10, 15.85, 25.12, 39.81, 63.1, 100 Hz)
- La température s'élève linéairement suivant le protocole donné figure 4.1b.



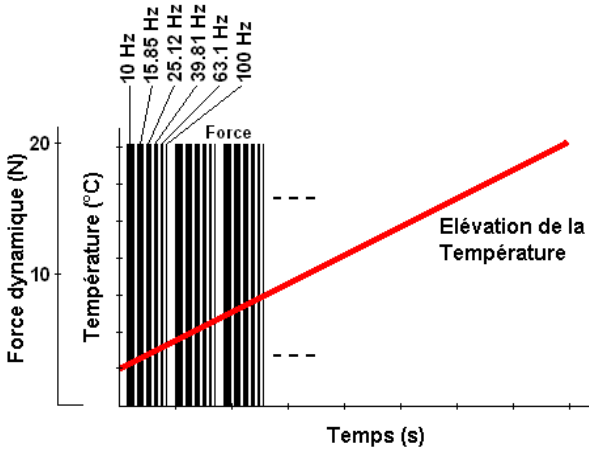


Fig. 4.1a - Sollicitation de l'échantillon.

Fig. 4.1b - Protocole expérimental.

4.3 Validation de l'essai de flexion

Le risque principal de ce genre d'essais est la perte de symétrie. Afin d'évaluer les incertitudes liées à une telle situation, nous allons étudier deux cas particuliers : le désalignent du montage d'essais et la mauvaise réalisation du buzzer.

4.3.1 Cas nominal

Dans un premiers temps le buzzer est modélisé par éléments finis (figure 4.2) et une force statique de 20 N est appliquée au centre ou à proximité.

Dans cette étude les éléments utilisés pour la modélisation sous ANSYS sont : SHELL63 (laiton seul : partie périphérique) et SHELL99 (laiton + PZT : partie centrale). Le modèle comporte 1430 éléments et 2701 degrés de liberté.

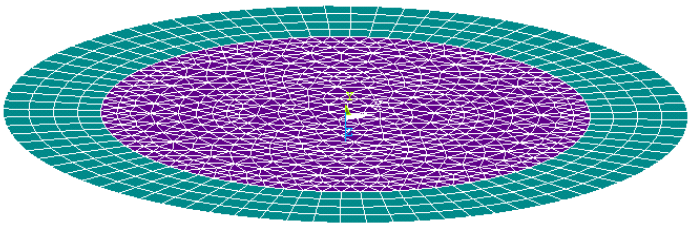


Fig. 4.2 – Modèle éléments finis de la pastille PZT.

La figure 4.3 décrit le système nominal où tout est bien centré.

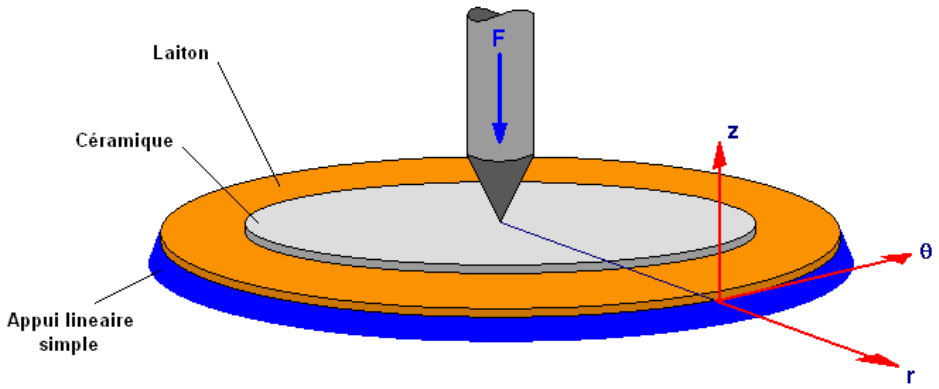


Fig. 4.3 - Pastille PZT sollicitée par une force centrale.

La figure 4.4 donne graphiquement les résultats pour ce le cas nominal : le déplacement maximal est W_{max} = 0.305 mm. Par ailleurs cela donne une raideur apparente de 65512 N/m.

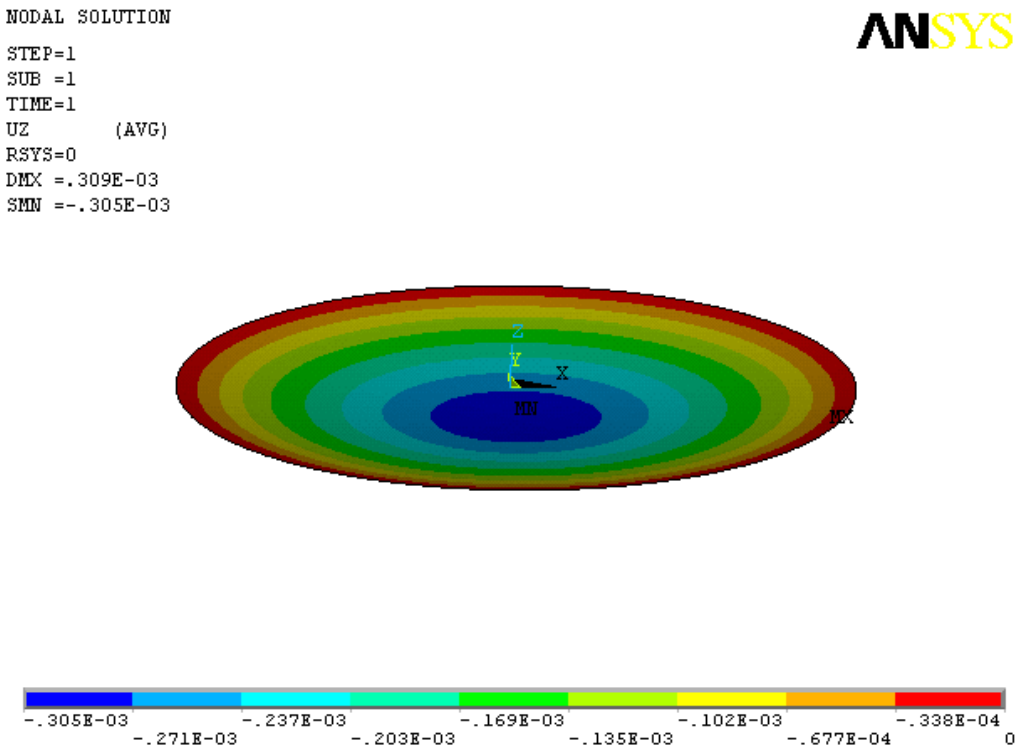


Fig. 4.4 – Déplacements dans le cas nominal.

Deux possibilités d'erreur sont à prendre en considération :

- erreur sur le positionnement de l'effort appliqué par la machine due à la mise en place de la pastille PZT dans la machine
- erreur dans le montage des composants, particulièrement le décentrage de la céramique par rapport au laiton.

Pour déterminer l'influence de ces deux erreurs par rapport à la pastille PZT dans le cas nominal, on a travaillé de manière inverse : on a fixé un faible écart de l'ordre de 1% au niveau du déplacement au droit de la force appliquée. On a trouvé que pour un tel écart, les erreurs de positionnement de la force appliquée et du centrage des composants intégrés devraient être respectivement de l'ordre de 8% et 30%.

4.3.2 Erreur de décentrage de l'effort appliqué

Une erreur de 8% de placement de la force par rapport au centre correspond à un décentrage de la force d'environ 1,38 mm (figure 4.5). Le déplacement maximal obtenu est W_{max} = 0.279 mm, soit un écart de - 0.84 % par rapport au cas nominal.

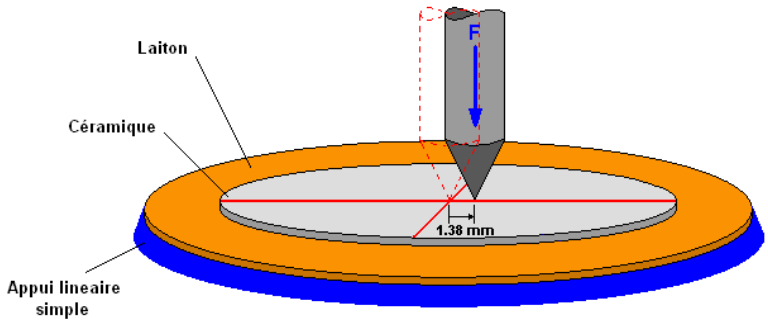


Fig. 4.5 - Force appliquée avec un décentrage de 8 %.

4.3.3 Erreur de décentrage du disque en PZT par rapport au disque en laiton

Le disque de PZT a été décentré de 1.4 mm ce qui correspond à 30 % de la distance maximale possible (figure 4.6). La force reste centrée par rapport au disque de laiton. Le déplacement maximal obtenu est maintenant W_{max} = 0.308 mm, soit un écart est de +0.98% par rapport au cas nominal.

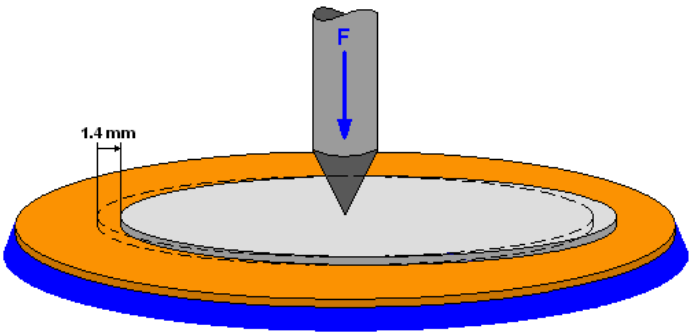


Fig. 4.6 - Décentrage du disque PZT de 30 %.

4.3.4 Conclusion sur les erreurs de décentrage

En conséquence, de telles erreurs n'auront pas beaucoup d'influence sur les résultats obtenus par les essais réalisés à l'aide du viscoanalyseur.

4.4 Essai de mesure de raideur du buzzer

Notre ambition première à ce stade est de détecter indirectement, par la mesure des propriétés mécaniques, la variation de la polarisation. On montre ici que la raideur apparente des buzzers varie en fonction de la fréquence, de la force extérieure et de la température ambiante. Une interprétation sera proposée.

4.4.1 Détermination expérimentales des raideurs

Le rapport entre la force appliquée et le déplacement au centre de la plaque donne directement la raideur vue de ce point. Les résultats exposés figures 4.7a et 4.7b montrent une élévation assez linéaire de la raideur K en fonction de la température variant entre 29°C et 85°C. Par ailleurs, les essais expérimentaux réalisés sur des capteurs en circuit ouvert montrent des raideurs supérieures à celles obtenues dans le cas des capteurs court-circuités.

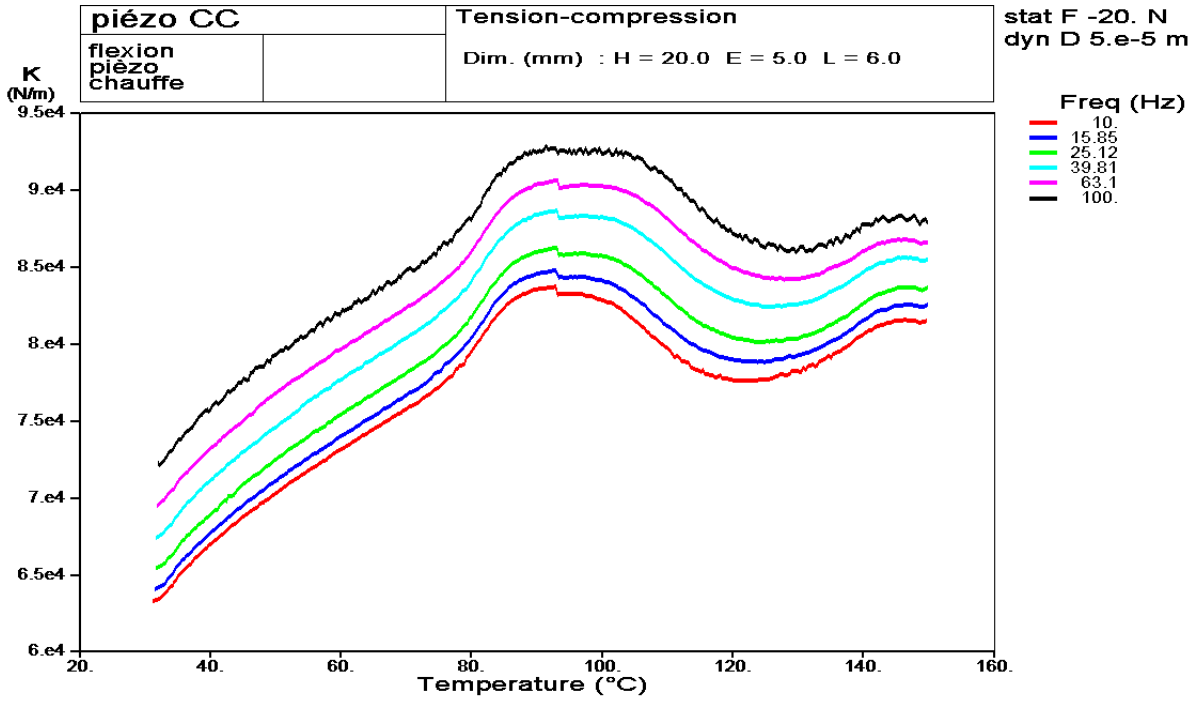


Fig. 4.7a - Variation de la raideur apparente au centre du capteur PZT en court-circuit.

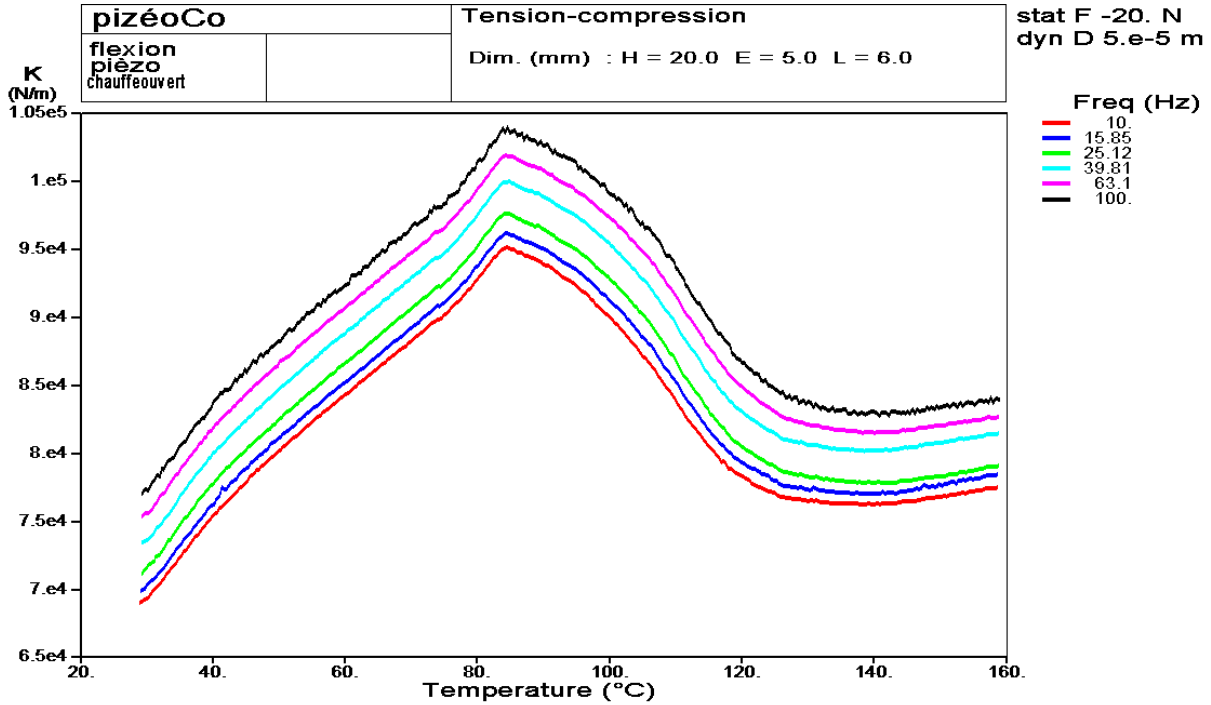


Fig. 4.7b - Variation de la raideur apparente au centre du capteur PZT en circuit ouvert.

Ces résultats à première vue étranges peuvent, peut-être en partie, provenir du fait que les échantillons testés sont des bilames. En effet, les coefficients de dilatation thermique de ces deux matériaux, (laiton et céramique) sont différents. L'élévation de la température provoque une déformation différentielle et la pastille se bombe et crée donc une forme géométrique qui résiste mieux à l'excitation appliquée. Cette assertion va être testée par modélisation et simulation.

4.4.2 Estimation de l'effet bilame par simulation numérique

Le calcul de la raideur en fonction de la température en tenant compte de l'effet bilame est réalisé en deux étapes :

- Calcul de la déformation de la pastille PZT, pour chaque température appliquée, due à l'effet de dilatation thermique dans le but de trouver la forme géométrique résultante (calotte sphérique).
- Calcul de la déformation mécanique de la pastille PZT due à l'excitation en son centre à partir de la forme géométrique trouvée à l'étape précédente.

4.4.2.1 Calcul de la déformation de la pastille PZT en fonction de la température

Il convient ici de rappeler que le modèle étudié est la pastille LAIT/PZT_{19} présentée au deuxième chapitre avec ses propriétés thermiques. La pastille est simplement appuyée sur sa périphérie.

La modélisation de la pastille est celle de la figure 4.2. La figure 4.8a montre la pastille déformée sous forme de calotte suite à une élévation de température.

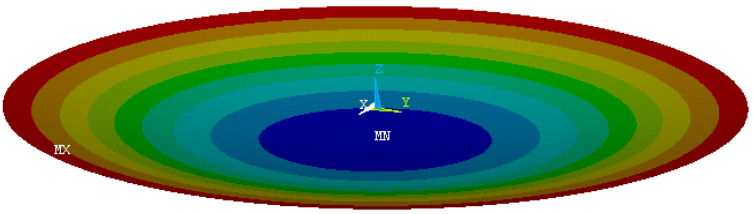


Fig. 4.8a - Pastille déformée sous forme de calotte suite à une élévation de température.

Le tableau 4.1 montre les résultats du calcul. Ce sont les déplacements verticaux du centre de la pastille PZT dus à l'effet bilame thermique pour différentes températures (figure 4.8b).

Tab. 4.1 - Déplacements thermiques de la pastille LAIT/PZT_{19} (µm).

Température (°C)	Flèches thermiques (µm)
35	1.53
45	2.29
55	3.05
65	3.82
75	4.58
85	5.34

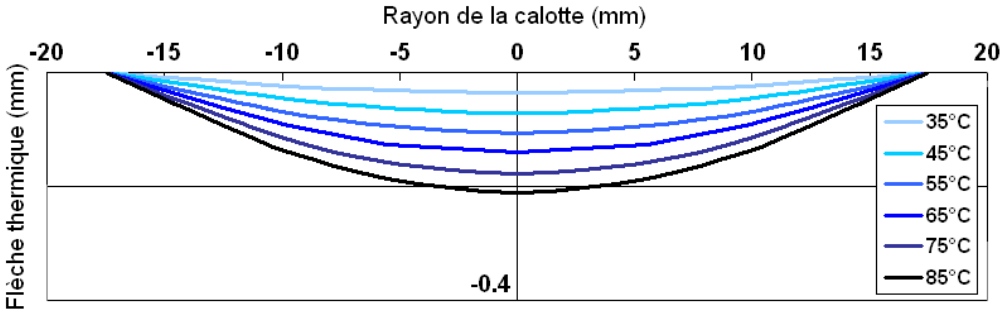


Fig. 4.8b - La flèche thermique de la pastille pour différentes températures.

4.4.2.2 Déformation de la calotte sphérique sous l'effet du chargement

La pastille PZT étudiée est une plaque mince, non-planaire et multicouches. Pour l'utilisation de ROBOT Me (Chap.2), il est nécessaire de la remplacer par une plaque monocouche avec des propriétés obtenues par homogénéisation.

Détermination de modules équivalents par homogénéisation

Il s'agit de chercher les modules équivalents ($E_{x.equiv}$, $E_{z.equiv}$, $\nu_{xz.equiv}$, $\nu_{zx.equiv}$, G_{equiv}) de la zone constituée de laiton et de céramique

L'étude d'homogénéisation [Pou01] est réalisée sous ANSYS par l'application des déformations planes imposées sur un modèle simple formé d'un bloc carré en laiton et en céramique identiques en hauteur [Cha06] tel que :

- Hauteur du laiton = hauteur de la céramique = 5 cm
- l = épaisseur dans la direction de y = 1 m (par unité de longueur)

- L = largeur = 10 cm

Recherche de E_z et ν_{zx} équivalent "direction verticale"

On comprime le bloc par un déplacement imposé de 0.1 mm sur le côté supérieur comme l'indique la figure 4.9a.

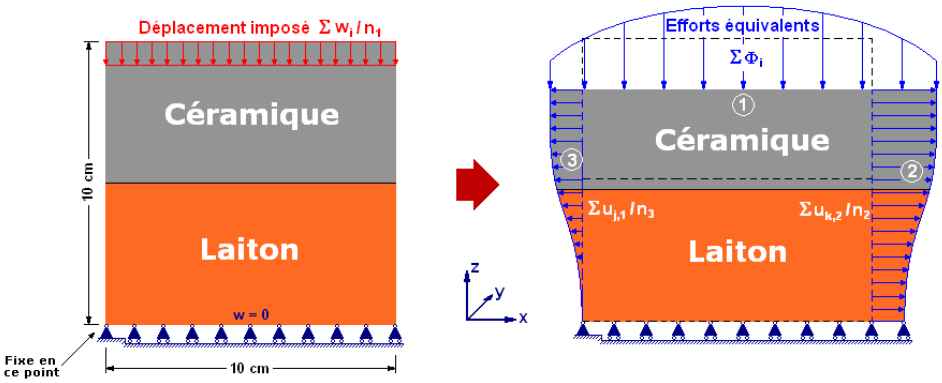


Fig. 4.9a - Bloc testé (direction de z).

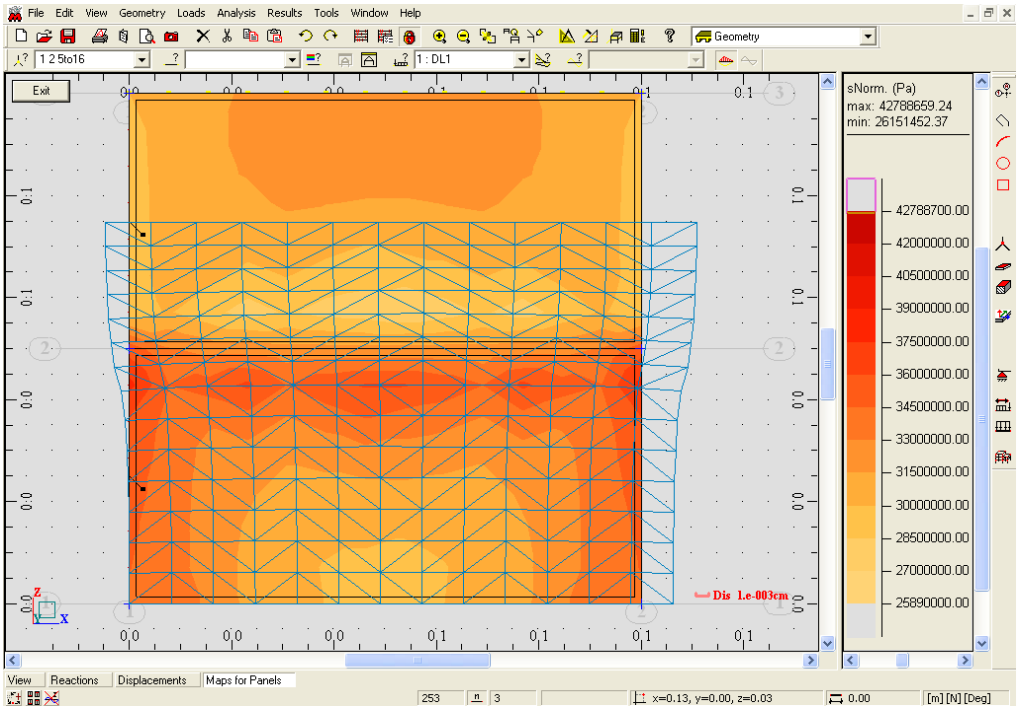


Fig. 4.9b - Bloc testé sur ROBOT Me (direction de z).

La contrainte dans la direction de *z* peut s'écrire :

$$\sigma_{zz} = \frac{\sum_i \Phi_i}{L \times l}$$, avec Φ_i : forces de réaction produites (output) sur le nœud *i*

La déformation dans la même direction est écrite par :

$$\varepsilon_{zz,I} = \frac{W}{L} \text{ avec } W = \frac{\sum w_i}{n_1}$$,

où : w_i : déplacement verticale imposé (input) sur 1 au nœud *i*,

n_1: nombre des nœuds sur le côté 1.

La déformation dans la direction de *x* est obtenue par :

$$\varepsilon_{xx,I} = \frac{U}{L} \text{ avec } U = \left|\overline{U}_1 - \overline{U}_2\right| \quad \text{où} \quad \begin{cases} \overline{U}_1 = \sum_j \frac{\overline{u}_{j,1}}{n_3} \\ \overline{U}_2 = \sum_j \frac{\overline{u}_{k,2}}{n_2} \end{cases} \quad \textbf{(valeurs algébriques)}$$

avec *j, k* : nombres des nœuds sur 3 et 2 respectivement,

n_2, n_3 : nombre des nœuds sur 2 et 3.

Tout simplement, on peut chercher le module d'Young E_z, et le coefficient de Poisson ν_{zx} équivalents comme suit :

$$E_z = \frac{\sigma_{zz}}{\varepsilon_{zz,I}} \quad \text{et} \quad \nu_{zx} = \frac{\varepsilon_{xx,I}}{\varepsilon_{zz,I}} \qquad \textbf{(4.1)}$$

La modélisation du bloc étudié est réalisée sous ROBOT Me. D'après les forces de réaction obtenues et le déplacement imposé, on peut calculer :

$$\sigma_{zz} = \frac{6337121.31\,N}{0.1\,m \times 1\,m} = 63371213.1\,Pa$$

$$\varepsilon_{zz,I} = \frac{0.1\,mm}{100\,mm} = 0.001 \qquad \varepsilon_{xx,I} = \frac{0.0000418}{0.1}$$

Finalement : $E_{z,equiv}$ = 63.4 GPa et $\nu_{xz,equiv}$ = 0.418

Recherche de E_x et ν_{xz} équivalent "direction horizontale" :

On applique le même déplacement imposé de 0,1 mm horizontal sur un côté latéral du bloc comme l'indique la figure 4.10a.

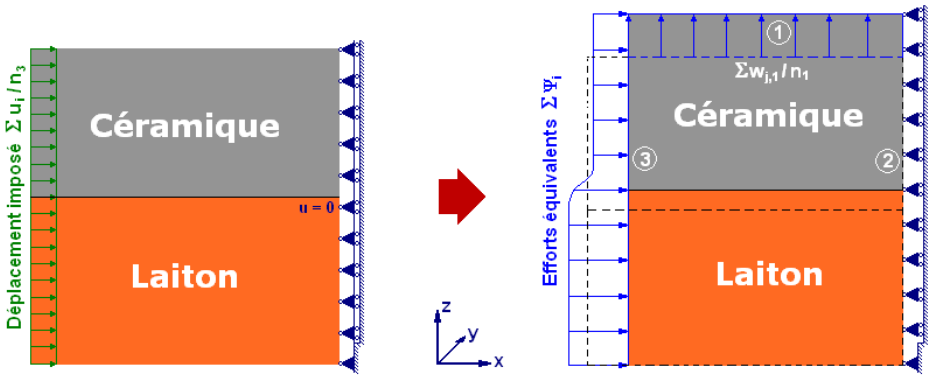


Fig. 4.10a - Bloc testé (direction de *x*).

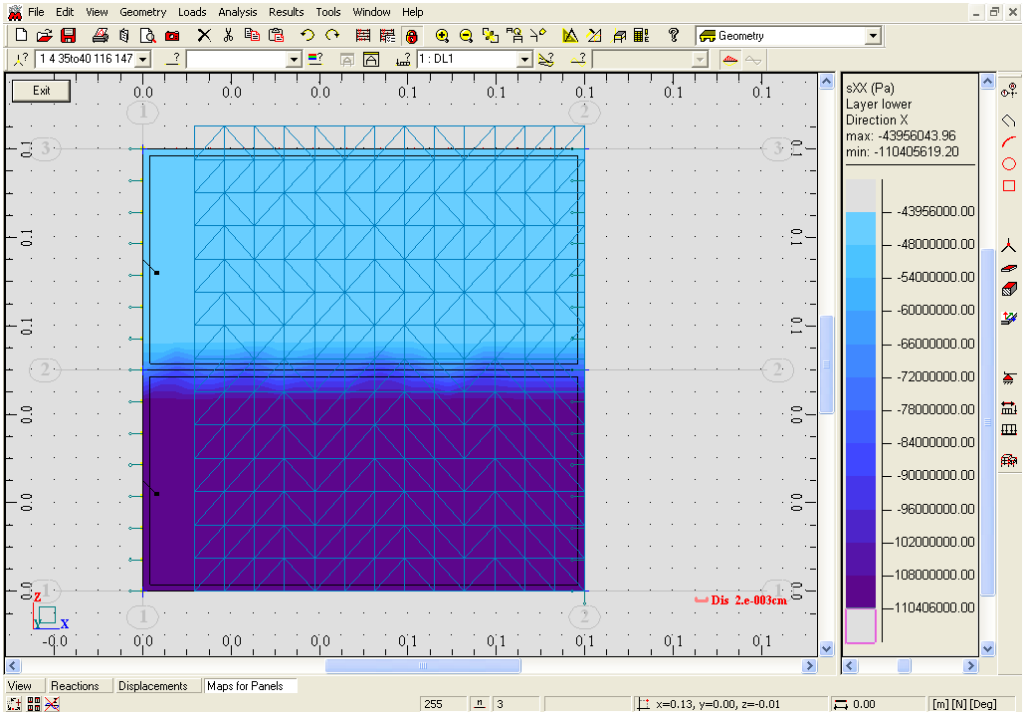


Fig. 4.10b - Bloc testé sur ROBOT Me (direction de *x*).

La contrainte dans la direction de *x* est peut s'écrire comme suit :

$$\sigma_{xx} = \frac{\sum_i \Psi_i}{L \times l}$$, avec Ψ_i : forces de réaction produites (output) sur le nœud *i*

La déformation dans la même direction est écrite par :

$$\varepsilon_{xx,II} = \frac{U}{L} \text{ avec } U = \frac{\sum_i u_i}{n_3}$$

avec u_i : déplacement horizontal imposé (input) sur le côté 3 au nœud *i*,
n_3 : nombre des nœuds sur le côté 3.

Ainsi que la déformation dans la direction de *z* est obtenue par :

$$\varepsilon_{zz,II} = \frac{W}{L} \text{ avec } W = \left|\overline{W}_1 - \overline{W}_2\right|$$

où : $$\begin{cases} \overline{W}_1 = \sum_j \frac{\overline{w}_{j,1}}{n_1} \\ \overline{W}_1 = 0 \end{cases}$$ (valeurs algébriques)

On peut écrire le module d'Young E_x et le coefficient de Poisson ν_{xz} comme suit :

$$E_x = \frac{\sigma_{xx}}{\varepsilon_{xx,II}} \quad \text{et} \quad \nu_{xz} = \frac{\varepsilon_{zz,II}}{\varepsilon_{xx,II}} \qquad \textbf{(4.2)}$$

D'après les forces de réaction obtenues par le logiciel et le déplacement imposé, on peut calculer :

$$\sigma_{xx} = \frac{7718083.18\,N}{0.1\,m \times 1\,m} = 77180831.8\,Pa$$

$$\varepsilon_{xx,II} = \frac{0.1\,mm}{100\,mm} = 0.001 \quad \varepsilon_{zz,II} = \frac{0.0000436}{0.1} = 0.000436$$

Finalement : $E_{x,equiv}$ = 77.18 GPa et $\nu_{xz,equiv}$ = 0.436

Recherche de G équivalent "Cisaillement"

On impose ici un déplacement de 0,1 mm parallèlement aux côtés 1 et 2 comme l'indique la figure 4.11a.

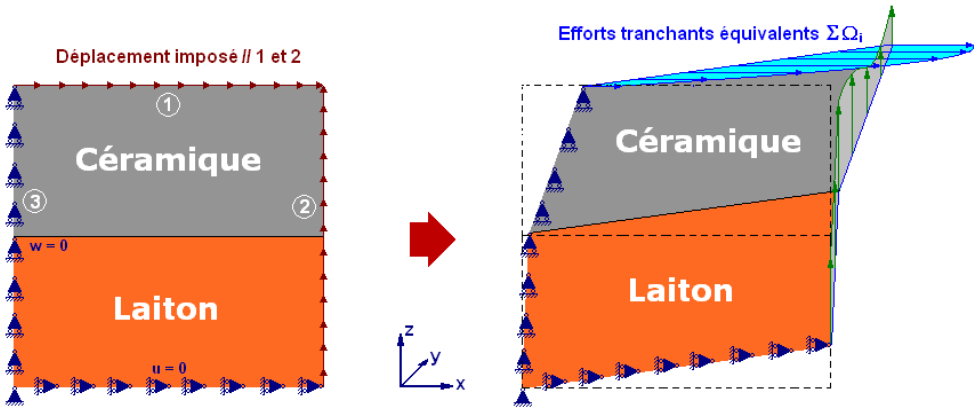


Fig. 4.11a - Bloc testé (cisaillement).

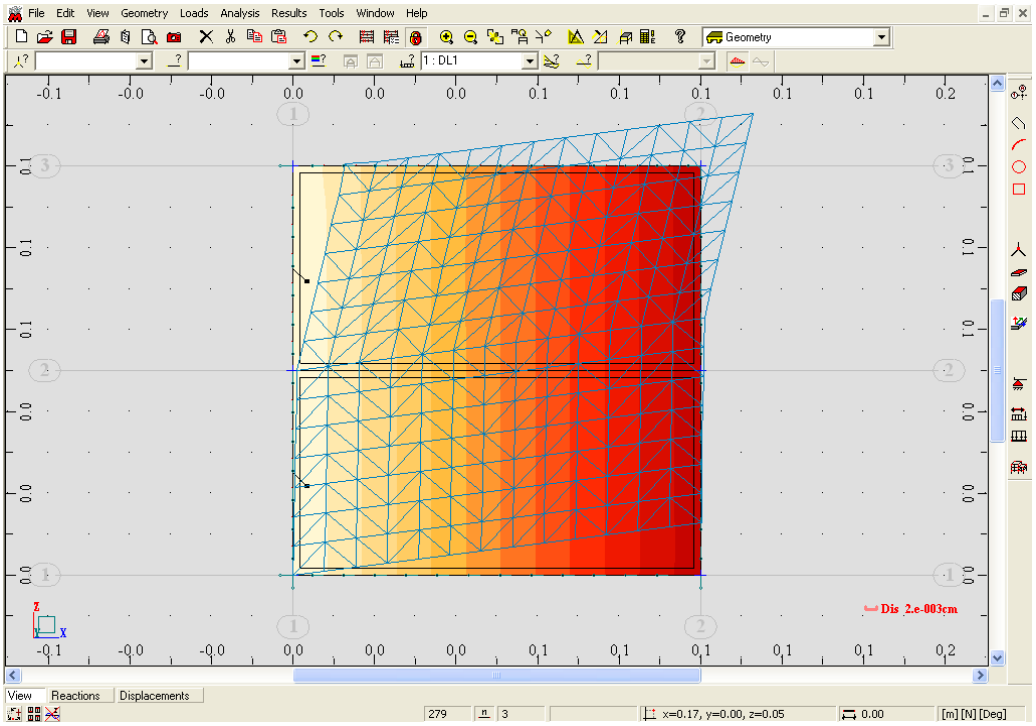


Fig. 4.11b - Bloc testé sous ROBOT Me (cisaillement).

La contrainte de cisaillement τ_{xy} peut s'écrire de la façon suivante :

$$\tau_{xy} = \frac{\sum_i \Omega_i}{L \times l}$$

avec Ω_i : forces tranchantes produites (output) sur le nœud *i* (côté 1 ou 2).

Pour la déformation γ_{xy} , on peut écrire :

$$\gamma_{xy} = 2 \times \frac{\Upsilon}{L} \quad , \quad \text{avec} \quad \Upsilon = \sum_i \frac{w_i}{n_1} + \sum_j \frac{u_j}{n_2}$$

avec u_j : déplacement horizontal obtenu sur le côté 2 au nœud *j*,
w_i : déplacement vertical obtenu sur le côté 1 au nœud *i*,
n_1, n_2 : nombre des nœuds sur les côté 1 et 2.

Alors *G* peut être calculé tout simplement comme suit : $$G = \frac{\tau_{xy}}{\gamma_{xy}} \qquad \textbf{(4.3)}$$

D'après les résultats donnés par le logiciel, on a :

$$\tau_{xy} = \frac{4382834.74 \text{ N}}{0.1 \text{ m} \times 1 \text{ m}} = 43828347.4 \text{ Pa}$$

$$\gamma_{xy} = \frac{2 \times (5.04286 \times 10^{-5} + 3.02667 \times 10^{-5}) \text{ m}}{0.1 \text{ m}} = 0.001613905$$

et $G = 27.16$ GPa

Après l'étude d'homogénéisation utilisée pour obtenir les modules équivalents, les propriétés mécaniques des différents matériaux constituant le capteur, peuvent écrire comme suit :

- Zone 1: zone centrale constituée d'un matériau homogénéisé (laiton + céramique)
  $E_x = 77.18$ GPa, $E_z = 63.4$ GPa, $\nu_{xz} = 0.436$, $\nu_{zx} = 0.418$, $G = 27.16$ GPa
- Zone 2: zone périphérique formé de laiton
  $E_{laiton} = 100$ GPa, $\nu_{laiton} = 0.307$

Calcul de la raideur apparente d'une calotte sphérique

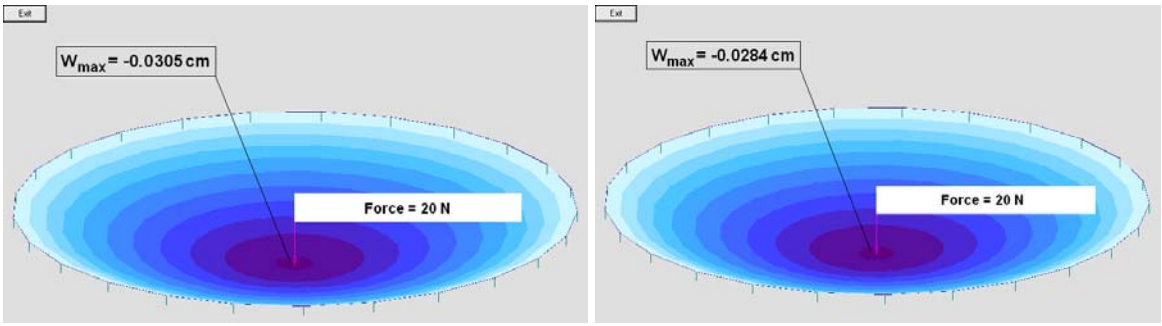
La modélisation réalisée a permis de déterminer la forme de calotte sphérique correspondant à la déformée de la pastille en fonction de la température ambiante.

Le comportement mécanique de cette calotte sphérique, c'est-à-dire la flèche au centre de la pastille, a été déterminé avec ROBOT Me sous l'effet d'une charge centrale de 20N. Ceci permet de calculer la rigidité apparente de la pastille et de montrer ainsi la variation en fonction de la température de raideur apparente due à l'effet bilame. Les résultats sont indiqués dans le tableau 4.2 suivant :

Tab. 4.2 - Déflexion et raideur en fonction de la température ambiante.

Température [°C]	Déflexion au centre de la calotte sphérique [mm]	Raideur apparente = force/déplacement [N/m]
35	0.305	65600
45	0.302	66300
55	0.298	67100
65	0.294	68000
75	0.289	69000
85	0.284	70500

Le déplacement mécanique de la pastille aux températures de 35°C et 85°C est illustré figure 4.12. La figure indique également la flèche au centre de la pastille.



35°C 85°C

Fig. 4.12 - Déflexion de la pastille PZT sous force centrale, la pastille étant déjà déformée sous effet thermique.

Les résultats de simulation montrent une réduction des déplacements mécaniques en fonction du changement de la forme géométrique ; ce qui explique l'augmentation de la rigidité en fonction de l'augmentation de la température.

4.4.3 Comparaison essais / simulation et conclusion

La figure 4.13 permet la comparaison entre la raideur mesurée par expérience et celle calculée par modélisation à la fréquence de 63.1 Hz.

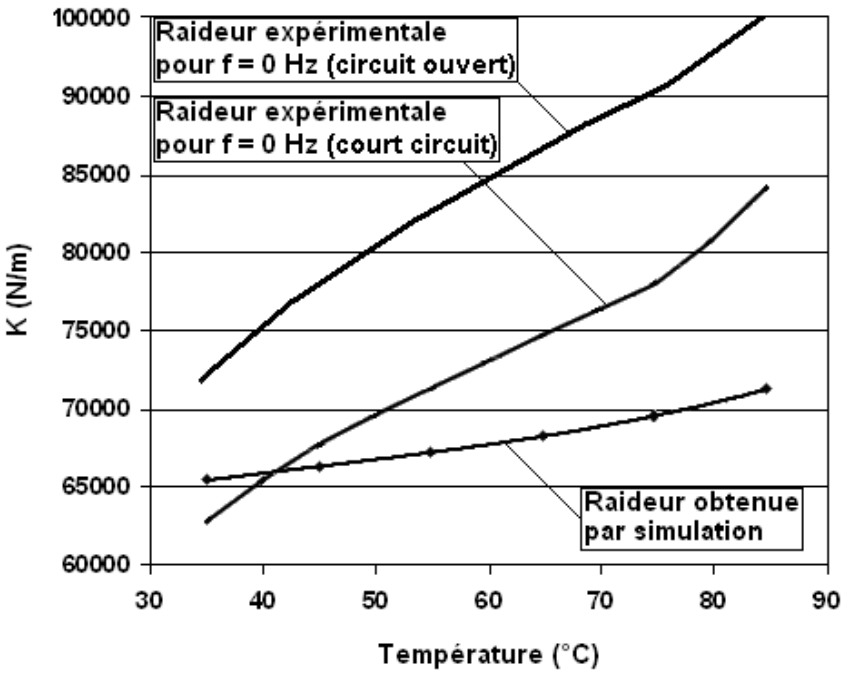


Fig. 4.13 - Comparaison entre la raideur mesurée par expérience et celle calculée par modélisation.

Ces résultats soulignent dans les deux cas une diminution significative du déplacement en fonction du changement des formes géométriques de la plaque. La figure montre cependant deux choses :

- L'effet bilame est bien responsable d'une partie de l'élévation apparente de raideur de la pastille avec la température,
- Cet effet bilame n'est pas forcément le seul responsable de cette propriété. En effet la variation de raideur est nettement plus importante dans le cas mesuré que dans le cas simulé. Cependant les paramètres du PZT réellement mis en oeuvre sont inconnus. Les valeurs utilisées pour le PZT sont des valeurs moyennes trouvées dans la littérature.

Lors de la tentative de mesurer les caractéristiques mécaniques du PZT à l'aide d'une pastille et du viscoanalyseur, une augmentation de la raideur apparente avec la température ambiante a été constatée. Cette propriété est troublante car la raideur du PZT augmente avec l'élévation de la température. L'observation demandait une explication pour voir si les mesures pouvaient effectivement nous conduire à une meilleure connaissance des caractéristiques du PZT. L'effet bilame a été identifié comme phénomène majeur. Il est possible d'ajuster le coefficient de dilatation thermique pour rendre compte de l'effet bilame. Néanmoins, il apparaît difficile de faire la part des choses

entre l'effet de la diminution de la raideur du PZT en fonction de la température et l'effet du coefficient de dilatation thermique sur l'effet bilame.

Nous rappelons que notre étude est cernée dans une plage de température allant de 25 °C à 85 °C. Dans cette plage de variation, l'évolution de la raideur du PZT en fonction de la température est croissante. Par ailleurs, il convient de mentionner qu'au-delà de 85 °C la raideur subit une diminution avant de remonter de nouveau (figures 4.7a et 4.7b). L'étude de cette zone peut constituer une des suites de notre travail.

4.5 Mesure directe de la piézoélectricité sous contraintes thermiques

Dans le paragraphe précédent nous avons montré qu'il serait délicat d'exploiter la raideur d'un système buzzer pour remonter à la propriété piézoélectrique. Afin d'étudier l'influence de la température sur la piézoélectricité, des essais thermiques non-linéaires ont été conduits dans des conditions thermiques correspondant aux procédés de fabrication des structures thermoplastiques.

L'essai consiste à mesurer la perte de tension générée par la pastille fonctionnant en capteur après un cycle thermique. La pastille est déformée en son milieu de 50 µm (déplacement dynamique).

4.5.1 Dispositif expérimental

Afin de suivre au mieux l'évolution des caractéristiques du système piézoélectrique et d'avoir une bonne précision sur le cycle thermique appliqué, nous avons décidé de réaliser le cycle thermique directement sur le viscoanalyseur. Ceci nous permet d'avoir directement la réponse électrique avant et après le cycle thermique sans soucis de repositionnement. Un système d'acquisition de données (TEAC GX-1 : chap.2) est utilisé pour mesurer en continu la tension électrique générée par le capteur testé (figure 4.14). La période d'échantillonnage utilisée dans l'acquisition est 2 KHz.

Voici les caractéristiques des essais :

- L'échantillon étudié dans l'essai est la pastille piézoélectrique LAIT/PZT_{19} (Chap.2), simplement appuyée sur la périphérie.
- Un déplacement dynamique a été appliqué au centre du capteur :
  - d'amplitude 50 µm et
  - de fréquence allant de 10 à 100 Hz

- L'échantillon a été testé pour plusieurs profils de températures, identifiés par leur température maximale 50, 75, 100, 125, 150, 175 et 200°C.
- L'échantillon est changé après chaque profil de température et chaque valeur de la fréquence.
- La période d'échantillonnage utilisée dans l'acquisition de la tension électrique générée par le capteur PZT est de 2 KHz (2000 Points/s).

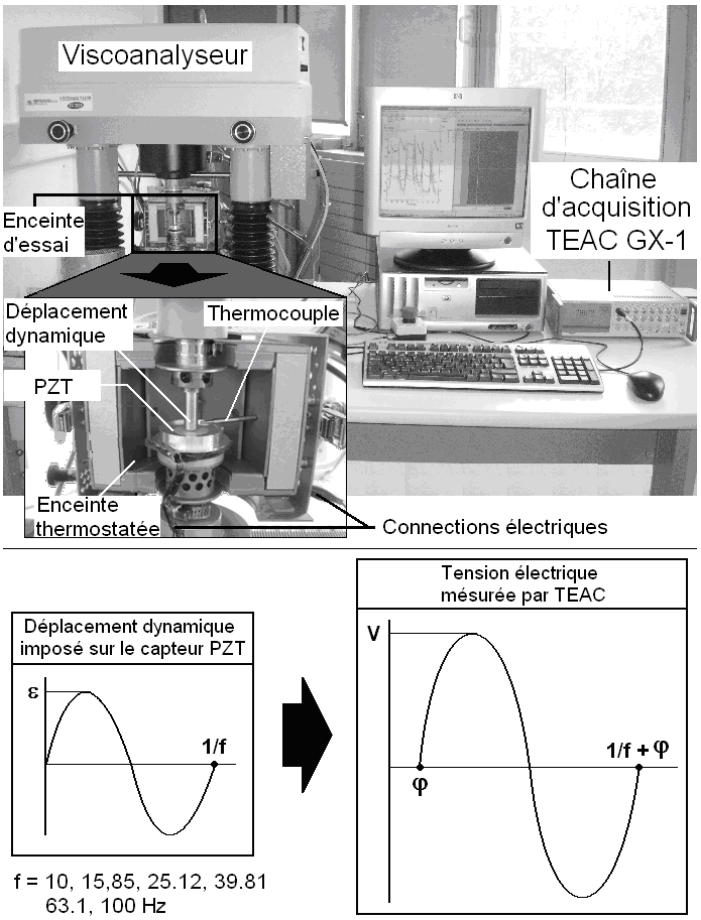


Fig. 4.14 - Équipements expérimentaux.

Le protocole de régulation thermique est montré figure 4.15 : à partir de la température ambiante, la température monte à une vitesse de 10 °C/min (phase PM), elle est stabilisé à un seuil donné pendant 5 minutes (phase MN), et enfin l'échantillon est refroidi en revenant à la température ambiante (phase NQ).

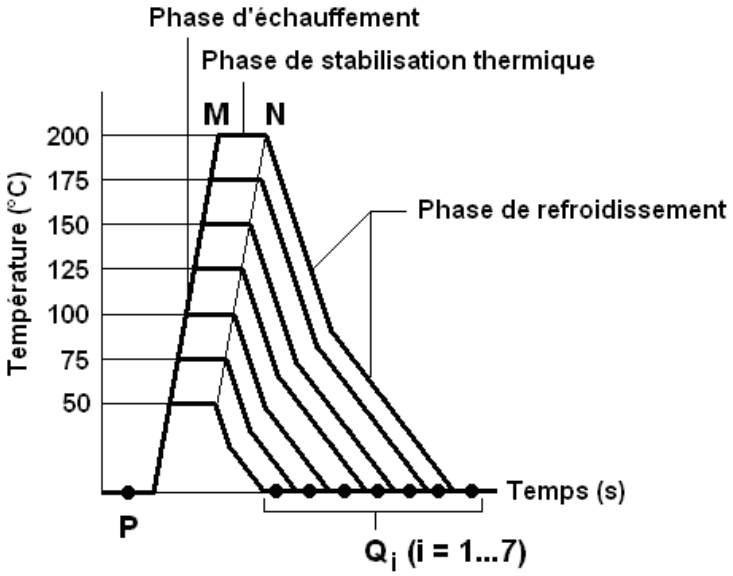


Fig. 4.15 - Protocole expérimental.

4.5.2 Résultats expérimentaux et conclusion

Les tensions électriques sont mesurées au point $P(V_0)$ et aux points $Q_i(V)$ pour des déplacements imposés à des fréquences allant de 10 à 100 Hz. Les valeurs de V et V_0 sont des moyennes de 30 mesures.

La plus petite et la plus grande perte de piézoélectricité correspondent respectivement aux fréquences de 10 Hz et 100 Hz.

Le pourcentage de perte de la tension électrique $100 \times [(V_0\text{-}V)/V_0]$ est représenté figure 4.16 pour 10 Hz et 100 Hz.

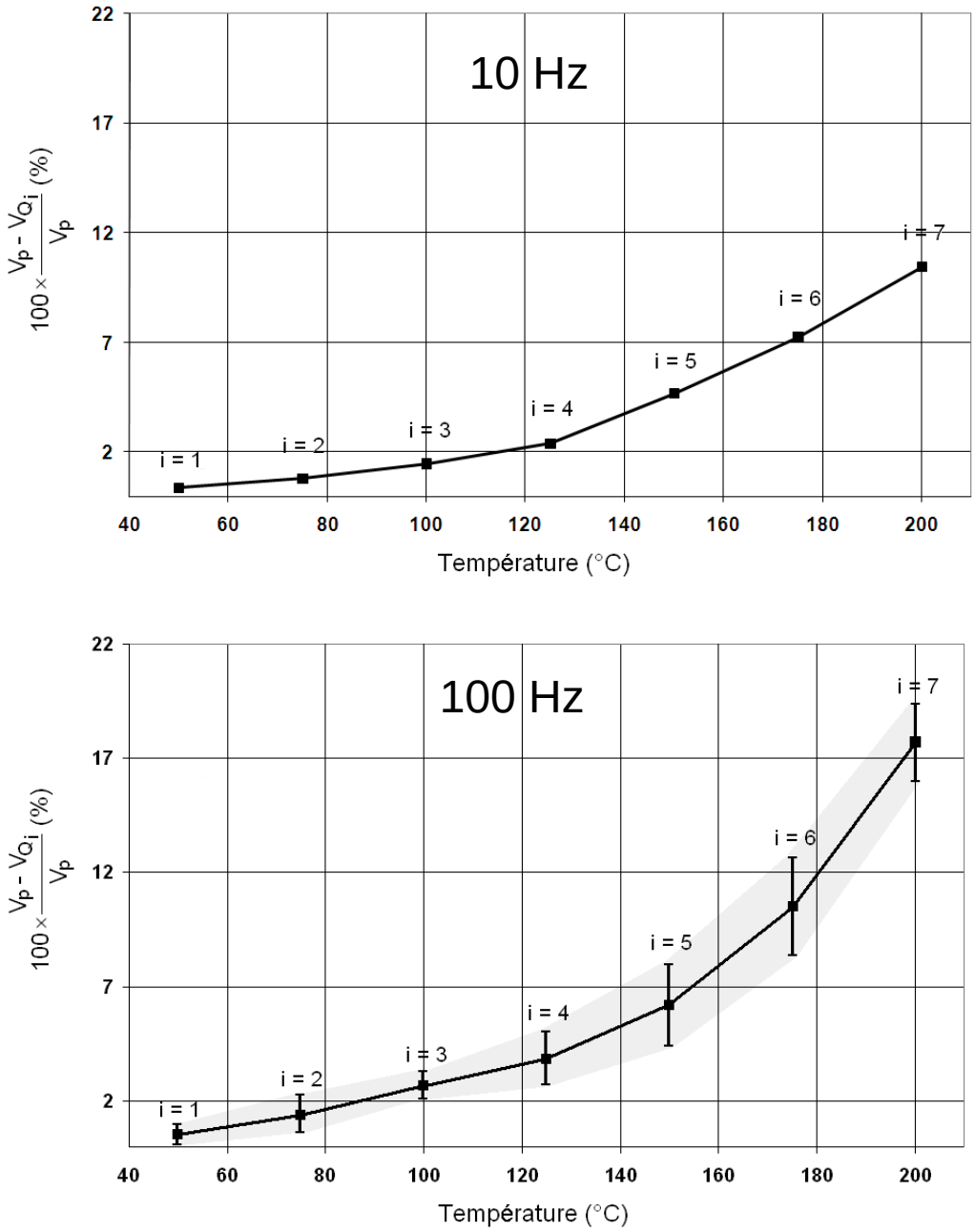


Fig. 4.16 - Pourcentage de perte de piézoélectricité avec la température.

La figure montre que le pourcentage de perte au niveau de la tension électrique augmente de manière non-linéaire avec la température, quelle que soit la fréquence d'excitation (au moins dans la gamme de fréquence mesurée : 10 - 100 Hz).

On s’est limité à extraire seulement les résultats pour les fréquences extrêmes (10 et 100 Hz) car ces valeurs sont issues des fichiers énormes qui prennent énormément de temps à être lus.

La limite thermique des composants piézoélectriques varie d’un type à l'autre. Les composants piézoélectriques qui ont une très faible température de Curie sont plus susceptibles de révéler des pertes piézoélectriques.

4.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons réalisé des essais physiques sur des composants en PZT dans le but d’évaluer leurs caractéristiques thermomécaniques et de mesurer leur degré de perte en piézoélectricité sous des conditions thermiques réalistes correspondants aux cycles caractéristiques des fabrications thermoplastiques présentés par ailleurs.

Des calculs préalables ont montré que les défauts de fabrication conduisant à un décentrage de la pastille en PZT par rapport à la pastille en laiton et les défauts expérimentaux conduisant à décentrer la force appliquée par rapport à la pastille complète n'induisaient pas d'erreurs expérimentales significatives.

L'idée de déduire des informations sur les propriétés mécaniques du PZT mis en oeuvre par des essais sur la pastille composite complète s'est avérée moins efficace que prévue à cause de l'effet bilame et de son couplage avec la variation de raideur due à une variation de température.

En revanche, les pertes au niveau de la piézoélectricité ont pu être analysées correctement. Elles dépendent de différents paramètres : le type de PZT, la vitesse de chauffage et de refroidissement, la température de régulation ainsi que la fréquence d’excitation.

Chapitre 5

MODÉLISATION DU COMPORTEMENT RHÉOLOGIQUE D'UN COMPOSITE ACTIF À MATRICE POLYPROPYLÈNE

Table des matières

5.1 Introduction 118

5.2 Recherche des propriétés viscoélastiques 119

5.2.1 Dispositif d'essai 119

5.2.2 Essais de relaxation 120

5.2.3 Détermination des propriétés viscoélastiques 120

5.2.4 Essais dynamiques 123

5.2.5 Validation des essais dynamiques 125

5.2.5.1 Modélisation par éléments finis 125

5.2.5.2 Comparaison des déphasages et des déplacements dynamiques entre essais et simulation . 125

5.3 Influence du contact entre la matrice PP et la pastille PZT 127

5.4 Conclusion 129

5.1 Introduction

Lorsqu'un élément actif doit être intégré dans une matrice plastique, l'environnement "matériau" de l'élément actif intégré dépend du procédé de fabrication.

Soit une plaque en composite à matrice polypropylène où a été positionnée une pastille active, on peut imaginer que du polypropylène pur entoure la pastille.

L'objectif est de montrer l'influence du contact entre la structure en composite et le composant intégré (pastille PZT). Dans un premier temps, on suppose que l'environnement de la pastille est la matrice homogène constituée de polypropylène et de fibres de verre. Cette situation sert de référence. Dans un second temps le contact entre matrice et pastille est représenté par une couche fine en polypropylène pur qui sépare le composite de la surface de la pastille PZT.

Dans le cas réel, le composite à matrice thermoplastique se comporte comme un élément viscoélastique (élasticité avec amortissement structural). Dans ce contexte, le modèle étudié (plaque composite PP/verre avec pastille PZT) doit prendre en considération ce fait.

Pour connaître le comportement viscoélastique du polypropylène, des essais de relaxation sur une plaque composite à matrice polypropylène avec fibres de verre ont été réalisés avec le viscoanalyseur.

Des simulations fondées sur des modélisations numériques par éléments finis ont permis, par comparaison, d'identifier les coefficients d'amortissement structuraux qui correspondaient à ces essais.

D'autres simulations en dynamique ont été réalisées sur une plaque en composite de type PP/verre contenant un actionneur PZT soumis à une excitation sinusoïdale pour pouvoir qualifier l'importance du contact entre matrice et pastille.

5.2 Recherche des propriétés viscoélastiques

Cette section est dédiée à la recherche des propriétés viscoélastiques d'un composite à matrice polypropylène. La démarche suivie consiste à réaliser dans un premier temps, des essais de relaxation sur le composite polypropylène dans le but de trouver son modèle de comportement viscoélastique (variation du module de cisaillement en fonction du temps). Ensuite les courbes de variation du module de cisaillement en fonction du temps sont introduites dans ANSYS afin d'obtenir les propriétés viscoélastiques du composite étudié. En outre et dans un but de valider la démarche, une comparaison entre des essais et des simulations en dynamique sur le même composite a été effectuée.

5.2.1 Dispositif d'essai

Dans le but de trouver le modèle de comportement viscoélastique d'un composite à matrice polypropylène TWINTEX T PP 60 745 AF (propriétés illustrées dans chapitre 2), deux types d'essai ont été réalisés sur viscoanalyseur : essai de relaxation et essai dynamique.

L'éprouvette testée ($10\times2\times0.5$ mm^3) est une plaque composite (TWINTEX T PP 60 745 AF) avec fibres orthotropes orientées dans les directions 0° et 90° comme l'indique la figure 5.1.

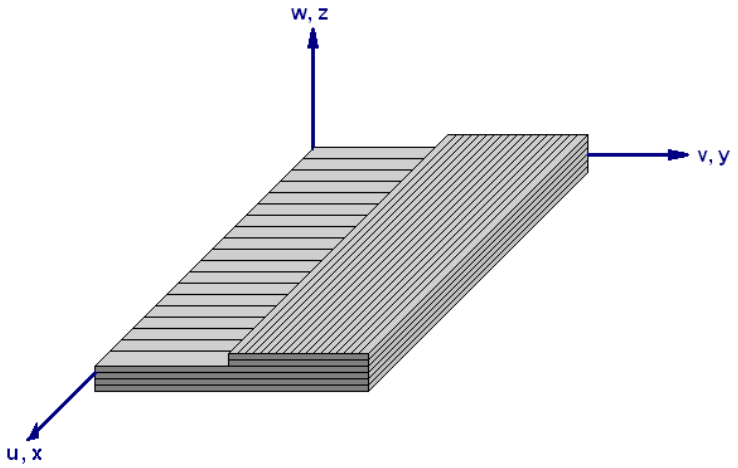


Fig. 5.1 - Eprouvette.

5.2.2 Essais de relaxation

Dans ce test, l'éprouvette est mesurée en régime transitoire : on applique un déplacement statique de 21 μm et on suit la variation de la contrainte en fonction du temps. On a effectué des essais de relaxation pour les températures : T = 30, 40, 50, 60, 80, 100 °C.

Les résultats issus de ces essais présentent des courbes de variation avec le temps du module de cisaillement pour différentes températures comme indiqué figure 5.2.

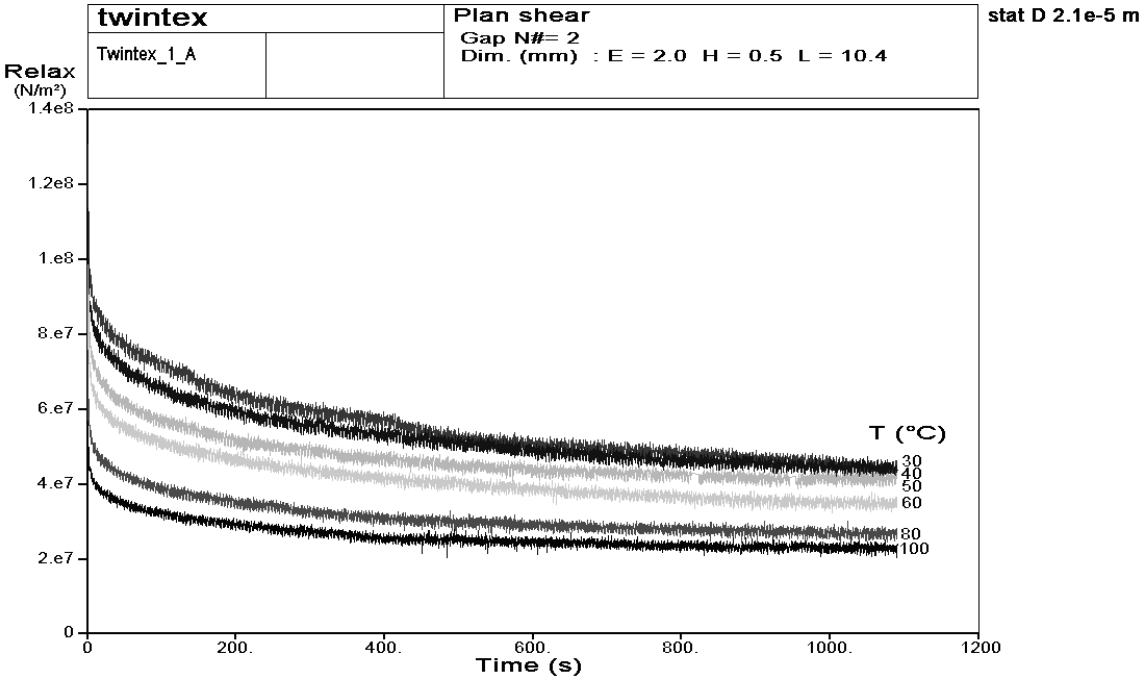


Fig. 5.2 - Essais de relaxation réalisés sur la plaque PP/verre.

5.2.3 Détermination des propriétés viscoélastiques

Les propriétés viscoélastiques sont extraites par un calcul sous ANSYS introduisant les résultats expérimentaux de relaxation, en utilisant le modèle de comportement viscoélastique de Prony.

L'établissement d'une expression mathématique du comportement viscoélastique linéaire des polymères peut se faire à l'aide de modèles analogiques mécaniques. Le modèle rhéologique élémentaire comprenant un ressort idéal de raideur G_i et un amortisseur idéal de viscosité η_i disposés en série (modèle de Maxwell) et/ou en parallèle (modèle de Kelvin-Voigt) peut être utilisé pour modéliser le comportement viscoélastique d'un matériau.

Le modèle de comportement viscoélastique de Prony généralise celui de Maxwell. Il est constitué par l'association en parallèle de *n* liquides de Maxwell comme l'indique la figure 5.3. Dans notre étude, on a travaillé avec 5 composants viscoélastiques (nombre maximal de composants du logiciel).

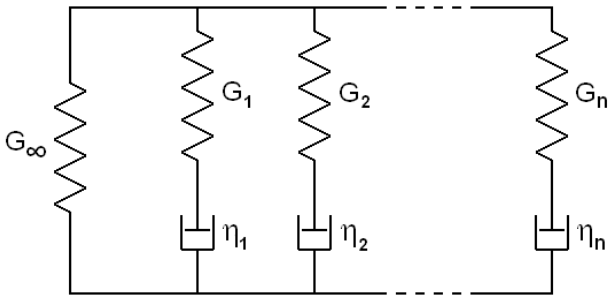


Fig. 5.3 - le modèle de comportement viscoélastique de Maxwell généralisé.

L'équation constitutive du tenseur de la contrainte pour un matériau viscoélastique isotrope peut s'écrire comme suit [Sim87] :

$$\sigma = \int_0^t 2G(t-\tau)\frac{de}{d\tau}d\tau + I \times \int_0^t K(t-\tau)\frac{d\Delta}{d\tau}d\tau \qquad \textbf{(5.1)}$$

avec : *e* : déformation de cisaillement

Δ : déformation volumétrique

G : module de cisaillement

K : module de compressibilité volumique

I : tenseur unité

L'expression du module de cisaillement *G* est donnée par la série de Prony suivante :

$$G = G_\infty + \sum_{i=1}^{n_G} G_i \exp\left(\frac{-t}{t_i^G}\right) \qquad \textbf{(5.2)}$$

avec : G_∞, G_i : Modules de cisaillement

t_i^G : Temps de relaxation pour chaque composant du modèle viscoélastique.

Introduisant le module relatif suivant :

$$\alpha_i^G = \frac{G_i}{G_0}, \text{ avec } G_0 = G_\infty + \sum_{i=1}^{n_G} G_i$$

L'expression du module de cisaillement *G* peut s'écrire :

$$\mathbf{G = G_0\left[\alpha_\infty^G + \sum_{i=1}^{n_G}\alpha_i^G \exp\left(\frac{-t}{t_i^G}\right)\right]} \qquad \textbf{(5.3)}$$

Les valeurs de α_i^G et t_i^G calculées sous ANSYS à partir des résultats expérimentaux de relaxation, sont (tab.5.1):

Tab. 5.1 - Les valeurs de α_i^G et t_i^G calculées sous ANSYS.

Composant i	α_i^G	t_i^G
1	0.18448	27.043
2	0.20592	0.16715
3	0.085192	2.8512
4	0.19553	843.85
5	0.12015	981.63

Le passage entre les courbes expérimentales pour différentes températures, est représenté par la fonction "shift" de William-Landel-Ferry suivante [Han96] :

$$\log \mathbf{a_T} = \frac{\mathbf{C_1(T - T_{ref})}}{\mathbf{C_2 + (T - T_{ref})}} \qquad \textbf{(5.4)}$$

avec : C_1 et C_2 : constantes de W-L-F.

T_{ref} : température de référence.

Les valeurs de C_1, C_2 et T_{ref} calculées sous ANSYS sont :
T_{ref} = 99.266°C, C_1 = 6.2699, C_2 = 257.31°C.

Les équations différentielles de comportement du système en dynamique sont représentées comme suit :

Cas parallèle : $$\boldsymbol{\sigma_i(t) = G_i\varepsilon_i + \eta_i\dot{\varepsilon}_i} \qquad \textbf{(5.5)}$$

Cas série : $$\boldsymbol{\dot{\varepsilon}_i(t) = \frac{1}{\eta_i}\sigma_i + \frac{1}{G_i}\dot{\sigma}_i} \qquad \textbf{(5.6)}$$

Le ressort représente la composante élastique de la réponse du modèle ; tandis que l'amortisseur représente la composante visqueuse de la réponse. Les constantes caractéristiques G_i et η_i font respectivement un module d'élasticité et à la viscosité du

matériau.

Un temps caractéristique relié aux constantes caractéristiques G_i et η_i est désigné par le temps de relaxation. Le temps de relaxation d'un polymère est lié à la masse molaire, à la distribution des masses molaires et à la ramification :

$$\mathbf{t_i^G = \frac{\eta_i}{G_i}} \qquad \textbf{(5.7)}$$

5.2.4 Essais dynamiques

Dans les essais dynamiques, une amplitude d'une force est appliquée à l'échantillon et la réponse de l'échantillon est mesurée pour différentes fréquences d'oscillation. C'est en fait la relation entre la force sinusoïdale appliquée et la réponse du déplacement sinusoïdal mesuré correspondant (rigidité et déphasage) qui est identifiée.

La plaque est sollicitée en cisaillement avec une force sinusoïdale $F = 20 \times \sin(\omega t)$ comme indiqué dans la figure 5.4.

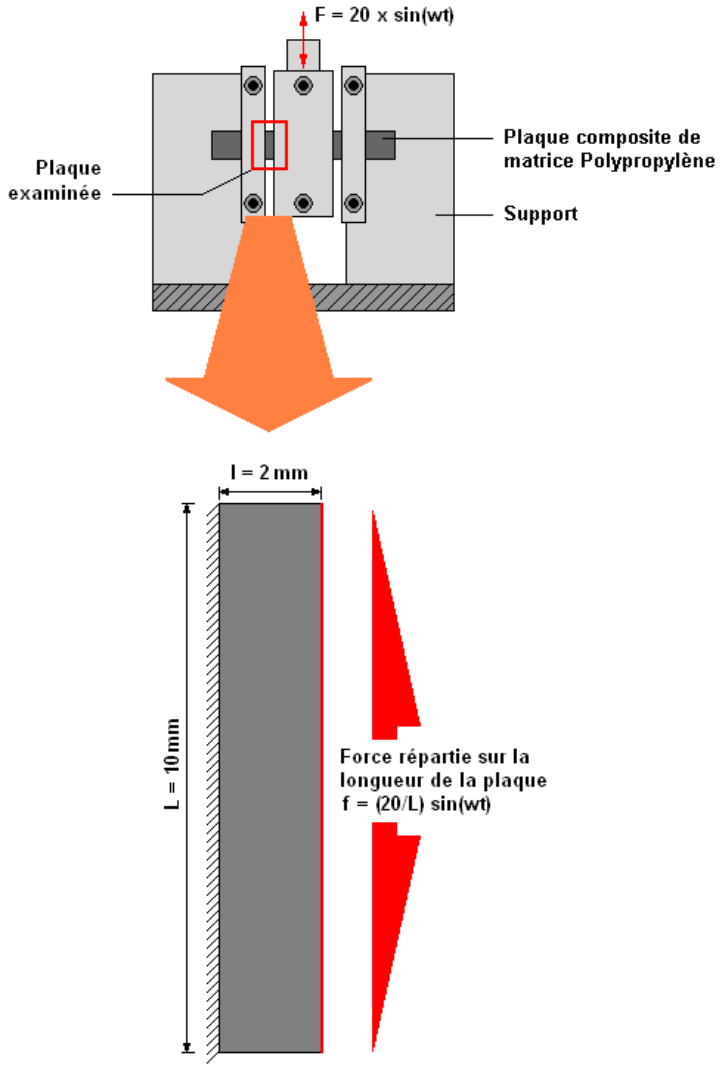


Fig. 5.4 - Schéma expérimental.

Les résultats des essais dynamiques sont présentés dans les figures 5.5a et 5.5b.

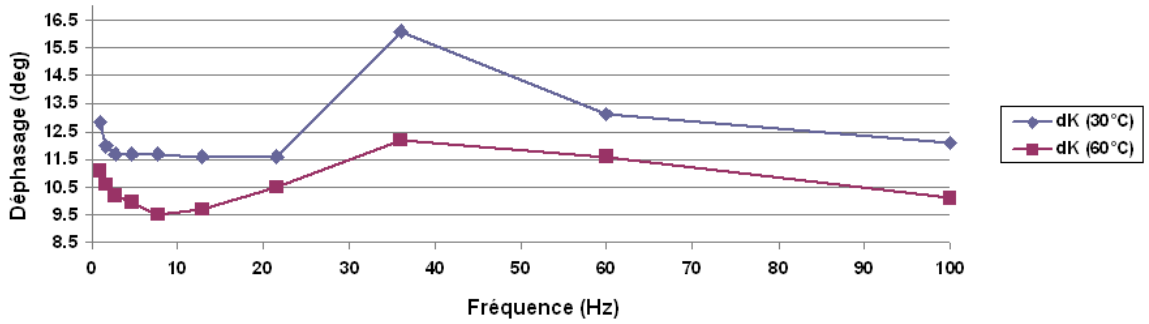


Fig. 5.5a - Courbes de variation du déphasage avec la fréquence pour T = 30 et 60°C.

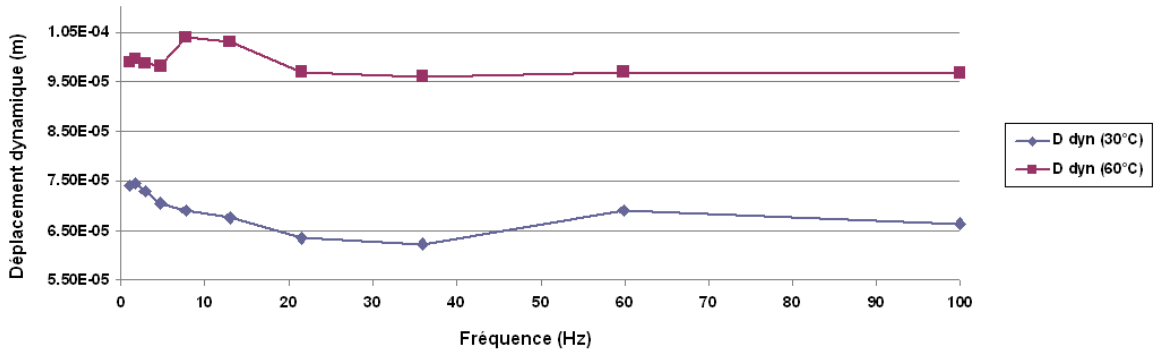


Fig. 5.5b - Courbes de variation du déplacement dynamique avec la fréquence pout *T* = 30 et 60°C.

5.2.5 Validation des essais dynamiques

5.2.5.1 Modélisation par éléments finis

Une modélisation par éléments finis a été développée et des simulations effectuées pour valider les essais dynamiques effectués.

La plaque testée a donc été modélisée par éléments finis comme indiqué figure 5.6. Le modèle ANSYS comporte 3498 degrés de liberté (6 degrés de liberté à chaque nœud : translations dans la direction de x, y, et z, et rotations autour de x, y, et z) et 520 éléments de type SHELL181 (élément quadratique). Cet élément possède quatre nœuds ayant chacun six degré de liberté : trois translations suivant x, y, z et trois rotations autour de x, y, z.

Les mêmes sollicitations et conditions aux limites considérées dans la partie "essais dynamiques" sont prises en compte dans les simulations.

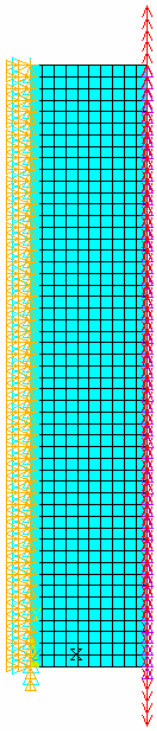


Fig. 5.6 - Modèle pour la simulation.

5.2.5.2 Comparaison des déphasages et des déplacements dynamiques entre essais et simulation

Il convient de rappeler que l'objet de cette comparaison est de valider les coefficients viscoélastiques obtenus par ANSYS.

La comparaison des déphasages et des déplacements dynamiques entre les essais et la simulation est illustrée dans les figures 5.7a à 5.7d et conduit aux considérations suivantes:

- l'écart de phase entre l'expérience et la simulation varie de 18% à 20%.
- l'écart du déplacement dynamique varie de 7% à 11% avec la température de fonctionnement (température acquise par l'actionneur).

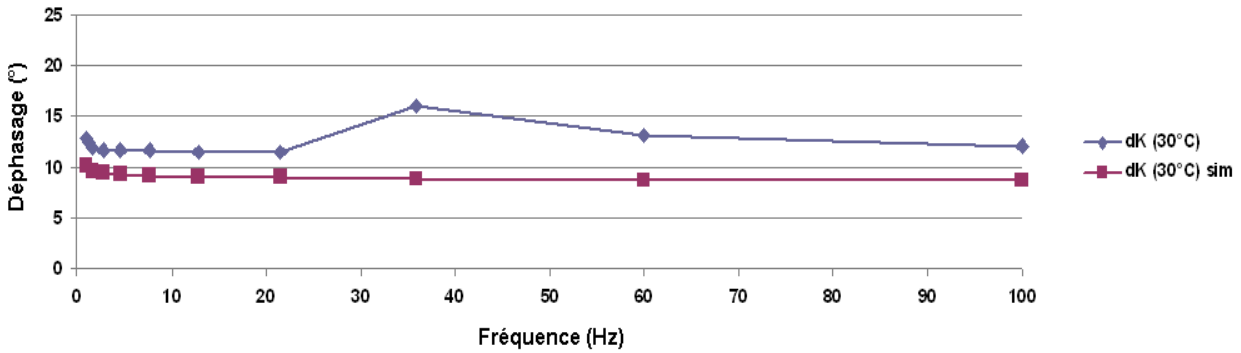


Fig. 5.7a - Déphasage = f(fréquence), expérimental et simulé pour *T* = 30°C.

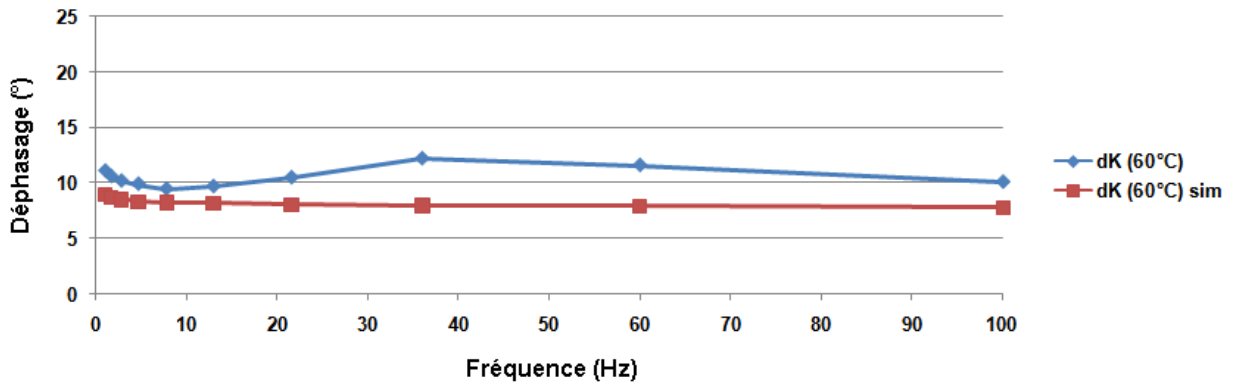


Fig. 5.7b - Déphasage = f(fréquence), expérimental et simulé pour *T* = 60°C.

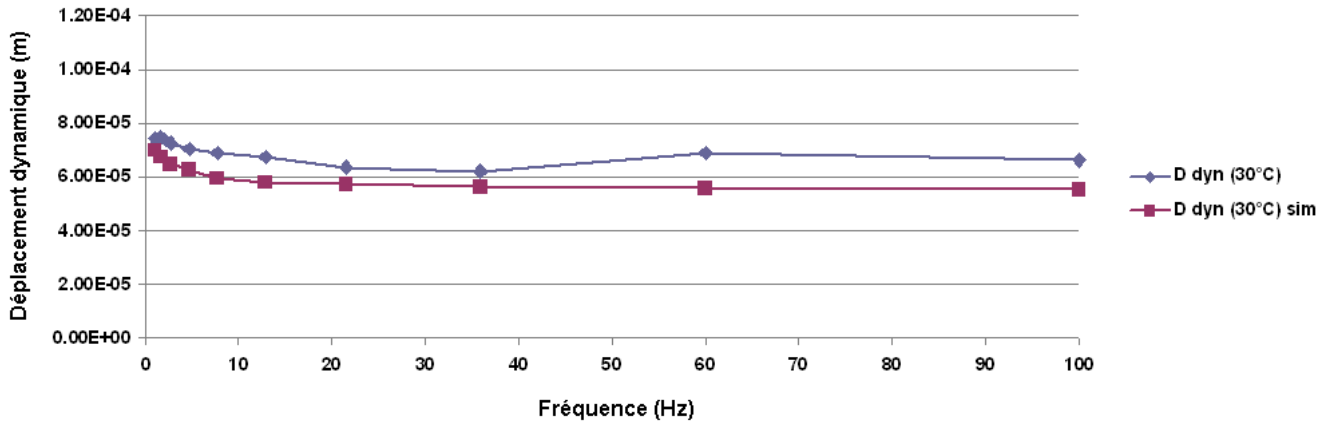


Fig. 5.7c - Déplacement dynamique = f(fréquence), expérimental et simulé pour *T* = 30°C.

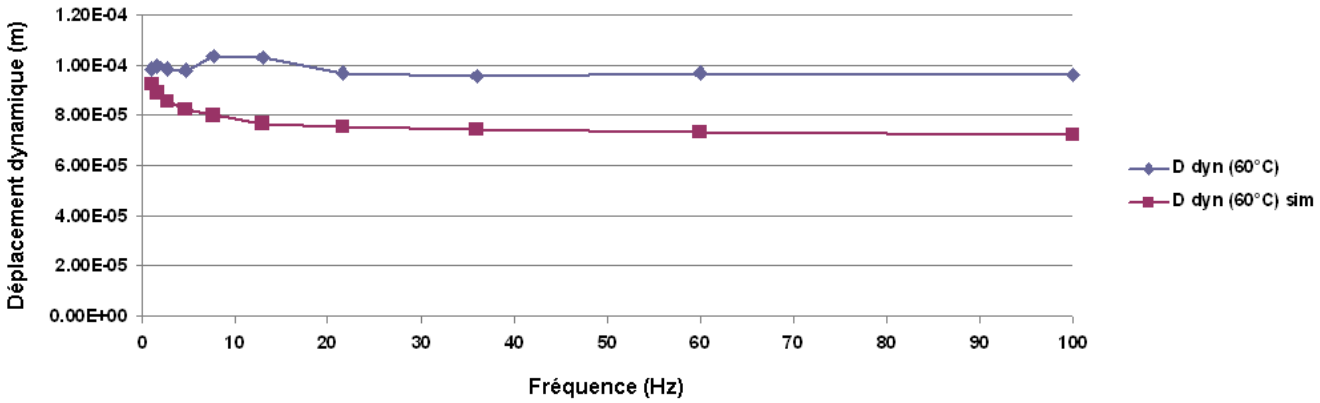


Fig. 5.7d - Déplacement dynamique = f(fréquence), expérimental et simulé pour *T* = 60°C.

D'une part, nous constatons à partir de cette comparaison la présence de zones fréquentielles où l'évolution des résultats expérimentaux est similaire à celle des résultats de simulation avec la présence d'un certain écart. D'autre part, il existe des zones où leurs évolutions sont dissemblables. Ceci est dû à des phénomènes non identifiés qui demandent des études plus poussées.

5.3 Influence du contact entre la matrice PP et la pastille PZT

Ce travail consiste à étudier l'influence de la viscoélasticité sur le comportement global d'une plaque composite active à matrice polypropylène.

Le corps étudié est formé d'une plaque composite rectangulaire (polypropylène / fibres de verre) encastrée-libre contenant une pastille (LAIT/PZT_{19} : chap.2) comme représenté figure 5.8a. Les simulations, faites à partir du modèle éléments finis, prennent en considération les propriétés viscoélastiques de la plaque. Grâce à la symétrie de la plaque par rapport à *x*, on a réalisé la simulation d'une mi-plaque comme l'indique la figure 5.8a.

La pastille est entourée par une couche mince en polypropylène non chargé (figure 5.9). Cette étude montre l'influence de ces couches sur le comportement global de la plaque.

Le modèle ANSYS comporte 12132 degrés de liberté (3 degrés de liberté à chaque nœud : translations dans la direction de x, y, et z) et 1012 éléments de type SOLID185 (élément 3D).

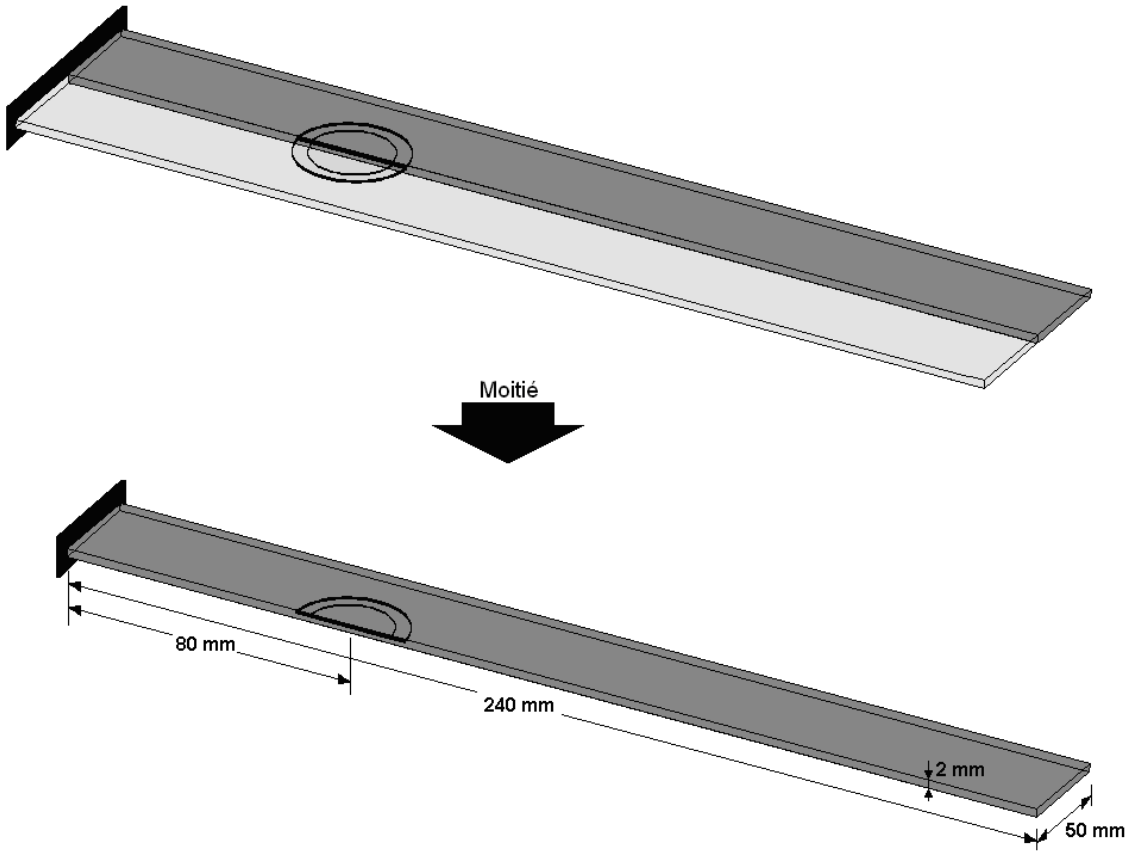


Fig. 5.8a - Plaque composite (PP/verre) active étudiée.

Quand la pièce en céramique piézoélectrique fonctionne comme actionneur, elle est excitée par un courant électrique sinusoïdal de façon à exercer une force sinusoïdale radiale d'amplitude 20 N (fig.5.8b) et de fréquence 100 Hz.

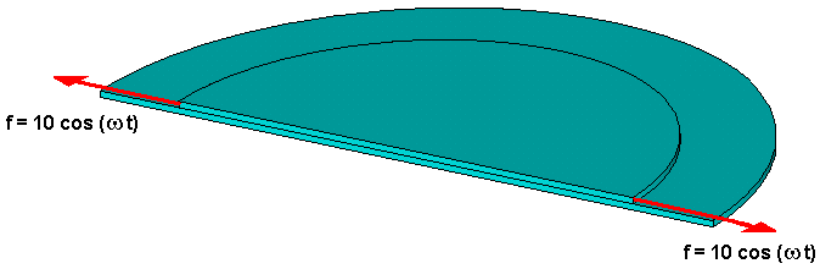


Fig. 5.8.b - Forces d'excitation de l'actionneur PZT.

Deux positions de la pastille dans l'épaisseur (axe *z*) ont été considérées : l'une est à une distance de 0,25 mm de la surface supérieure et l'autre à une distance de 0,5 mm (figure 5.10).

L'influence des couches fines inférieure et supérieure en polypropylène pur sur le déplacement à l'extrémité de la plaque est illustrée dans le tableau 5.2 :

Tab. 5.2 - Écart du déplacement à l'extrémité de la plaque.

Écart du déplacement à l'extrémité de la plaque par rapport à un contact parfait entre pastille et matrice fibreuse (%)	
position 1 du PZT	1.6 %
position 2 du PZT	1.3 %

Ces résultats de simulation montrent que l'influence des couches fines inférieure et supérieure en polypropylène pur sur le déplacement à l'extrémité de la plaque est limitée.

5.4 Conclusion

Un premier intérêt de ce chapitre consiste en démarche proposée pour la caractérisation des propriétés viscoélastiques d'un composite polypropylène. Il faut insister sur le fait que cette démarche peut être utilisée pour déterminer les propriétés viscoélastiques pour d'autres matériaux thermoplastiques.

L'étude de l'influence du contact entre la matrice PP et l'actionneur PZT a montré que l'influence sur le comportement global des couches fines en polypropylène pur entourant l'actionneur est limitée. Cette étude a été effectuée pour une fréquence unique (100 Hz). Il est utile qu'elle soit généralisée pour d'autres valeurs de fréquences. L'une des difficultés qui a empêché la généralisation de l'étude est la présence d'un grand nombre de degrés de liberté du modèle étudié. Cette généralisation peut constituer une perspective de ce travail.

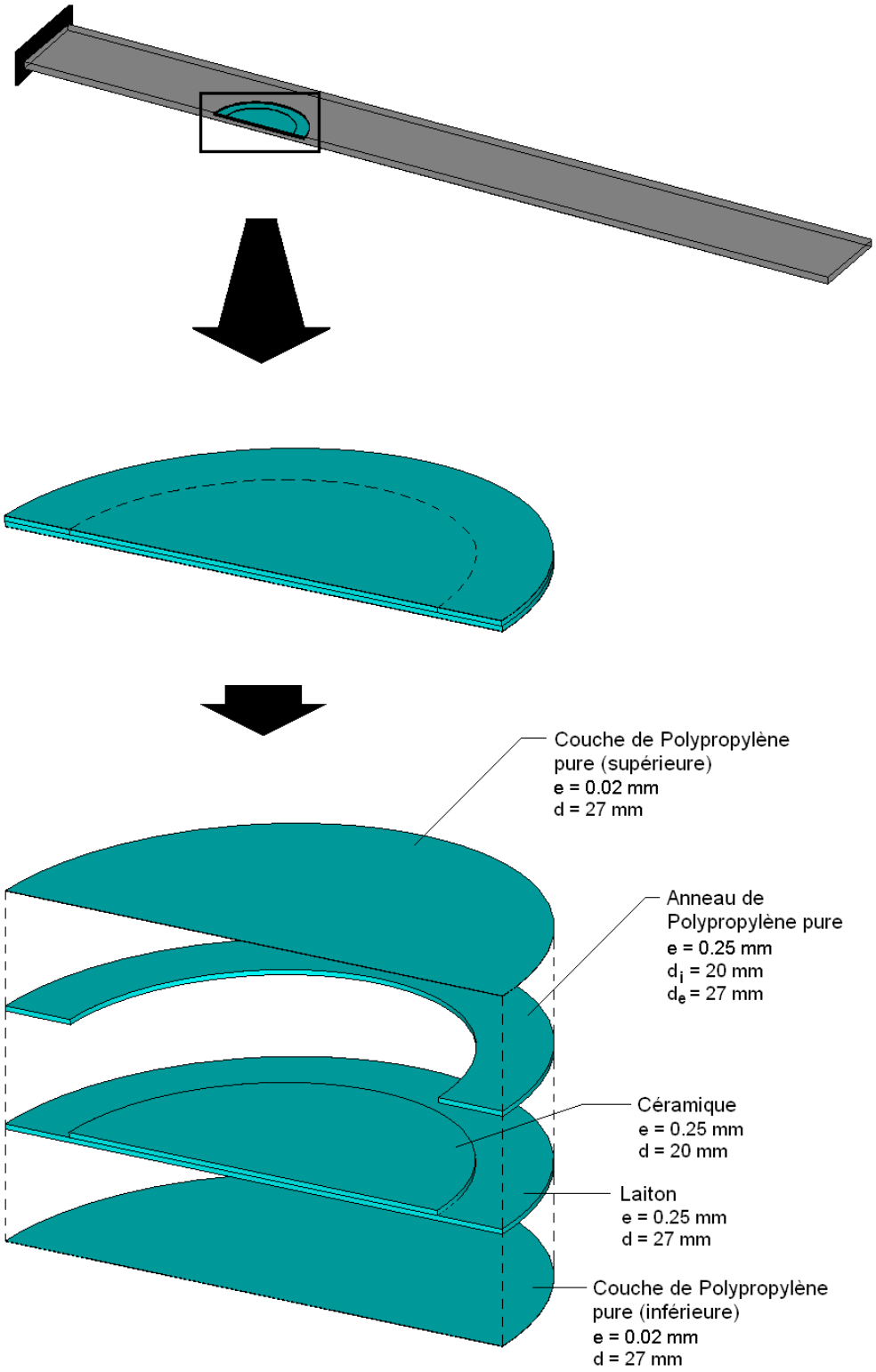


Fig. 5.9 - Plaque PZT avec les couches polypropylènes qui l'entourent.

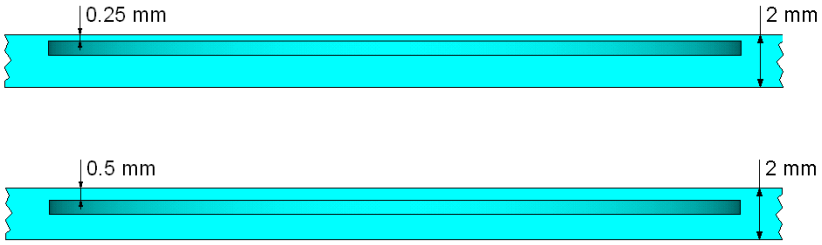


Fig. 5.10 - Deux positions différentes du PZT dans la plaque selon z.

Chapitre 6

SYNTHÈSE SUR L'INFLUENCE DES CONDITIONS THERMIQUES SUR LA PIÉZOÉLECTRICITÉ DANS DIFFÉRENTS PROCÉDÉS DE PLASTURGIE

Table des matières

6.1 Introduction 134

6.2 Evolution de la perte de piézoélectricité pour différents matériaux et procédés 134

6.3 Influence des paramètres thermiques sur l'évolution de la perte de piézoélectricité dans le moulage par injection 139

6.4 Synthèse sur les conditions de fabrication du thermoplastique intelligent 141

6.1 Introduction

Il convient tout d'abord de rappeler que les conditions de fabrication du thermoplastique intelligent doivent être définies afin de réduire au minimum la perte des propriétés piézoélectriques et de choisir un composant PZT convenable.

Ainsi, notre objectif est de présenter les pertes par rapport :

- À la position du PZT dans le modèle, pour différents matériaux thermoplastiques fabriqués en deux procédés (moulage et thermoformage).
- À la variation des différents paramètres thermiques (température du procédé, conductivité, chaleur spécifique) dans le cas du moulage par injection.

6.2 Evolution de la perte de piézoélectricité pour différents matériaux et procédés

Dans cette partie nous visons à étudier l'évolution de la perte piézoélectrique en fonction de la position du PZT dans le modèle finale. Les deux procédés de plasturgie sont étudiés (moulage et thermoformage) et les mêmes matériaux thermoplastiques (Chap.3) sont considérés (ABS, HDPE, LDPE, PVC, PP, PC, PEEK).

La procédure suivie est la suivante :

- Tout d'abord la température maximale atteinte par le PZT pour chaque position est extraite de la modélisation élaborée dans le troisième chapitre.
- Ensuite, la perte de piézoélectricité en fonction de la température et de la fréquence d'excitation est retirée à partir des essais effectués dans le quatrième chapitre
- Finalement, l'évolution de la perte de piézoélectricité est établie en fonction de la position pour les différents matériaux comparés.

Les valeurs de la température maximale atteinte par le PZT pour différents matériaux, procédés et positions sont illustrées dans le tableau 6.1 suivant :

Tab. 6.1- Température maximale au sein du PZT pour les matériaux thermoplastiques étudiés (°C).

	h_p (mm)	0.5	0.75	1	1.25	1.5	1.75	2	2.25	2.5
Moulage	PP	86	106	121	134	144	152	158	162	163
	ABS	100	117	130	142	152	160	165	169	170
	HDPE	90	112	129	144	155	164	171	175	176
	LDPE	72	88	100	111	119	125	130	133	134
	PVC	57	66	74	80	85	90	93	95	95
	PC	119	133	143	152	160	167	173	176	177
	PEEK	178	194	207	219	230	239	246	251	252
Thermoformage	PP	235	213	195	180	170	163	160	161	161
	ABS	283	255	232	210	192	180	176	176	176
	HDPE	167	157	148	141	135	132	131	131	131
	LDPE	163	150	137	127	118	113	110	110	110
	PVC	143	128	114	102	91	83	80	80	80
	PC	292	270	251	238	225	221	217	215	215
	PEEK	421	397	376	360	348	339	336	335	335

D'une part, le résultat de la partie modélisation (Chap.3) décrit l'évolution de la température maximale au sein du PZT en fonction de sa position. D'autre part, les essais expérimentaux (Chap.4) fournissent l'évolution de la perte piézoélectrique en fonction de la température. La combinaison de ces deux résultats procure l'évolution de la perte piézoélectrique en fonction de la position du PZT (figure 6.1).

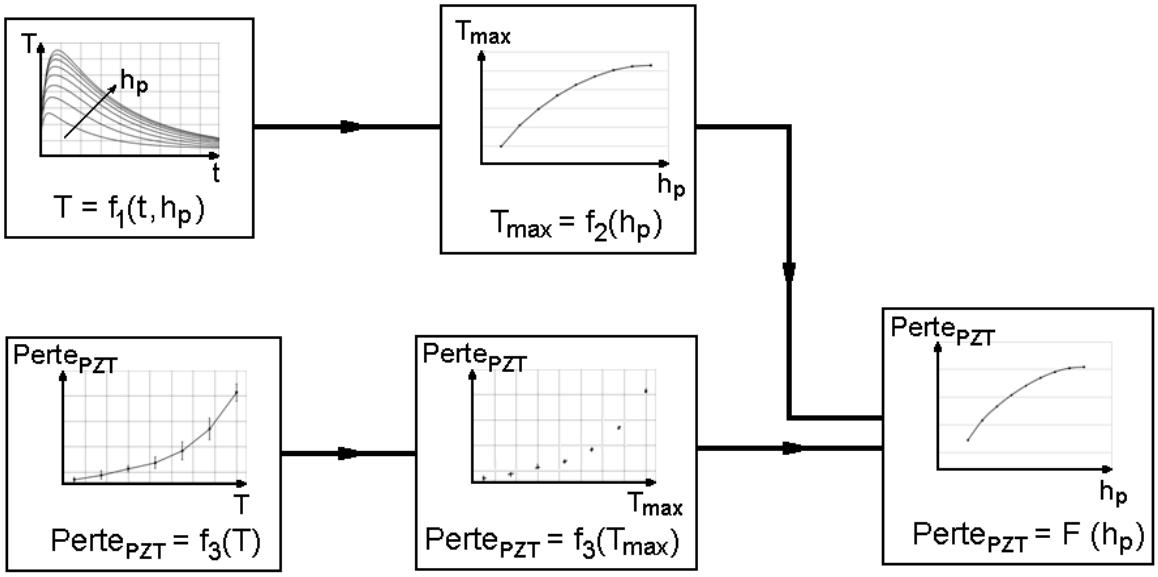


Fig. 6.1 - Schéma Bloc représentant la démarche de calcul de la perte en fonction de la position.

En vertu du schéma bloc illustré dans la figure 6.1, l'expression de la perte de piézoélectricité est :

$F(h_p) = f_3(f_2(h_p))$

où f_2 et f_3 sont des fonction obtenues par interpolation numérique.

Dans les figures 6.2 et 6.3 nous représentons l'évolution tridimensionnelle de cette perte en fonction de la position du PZT et du matériau thermoplastique utilisé, ceci dans le cas de moulage par injection. Nous constatons à partir des résultats que :

- Plus la pastille PZT est située à proximité du centre de la plaque, plus sa perte piézoélectrique est grande. Cette évolution est expliquée par le fait que dans le procédé de moulage, les conditions thermiques les plus dures se trouvent au niveau de la position milieu.
- Le choix du matériau thermoplastique est judicieux. À titre d'exemple, la perte piézoélectrique dans le cas du PEEK est beaucoup plus grande comparativement au PVC.
- Plus la fréquence d'excitation est élevée, plus la perte est grande.

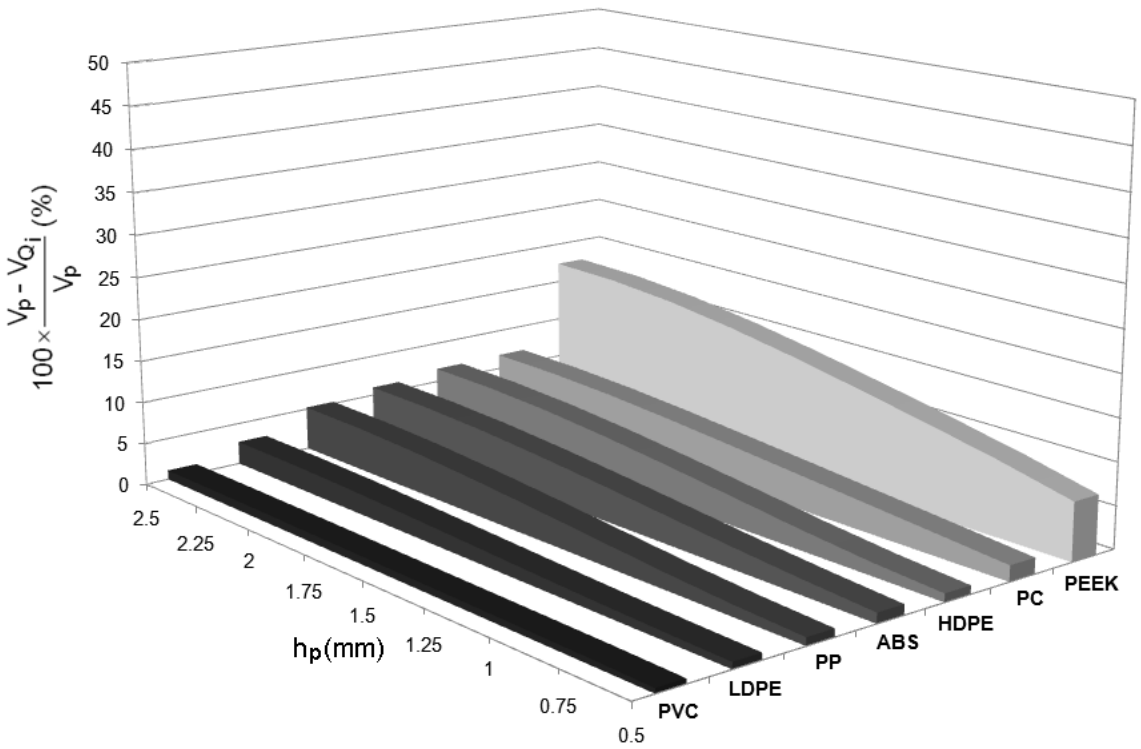


Fig. 6.2 - Pourcentage de perte de piézoélectricité avec la position du PZT dans la plaque, et le matériau thermoplastique utilisé pour une fréquence du déplacement dynamique imposé = 10 Hz (cas du moulage).

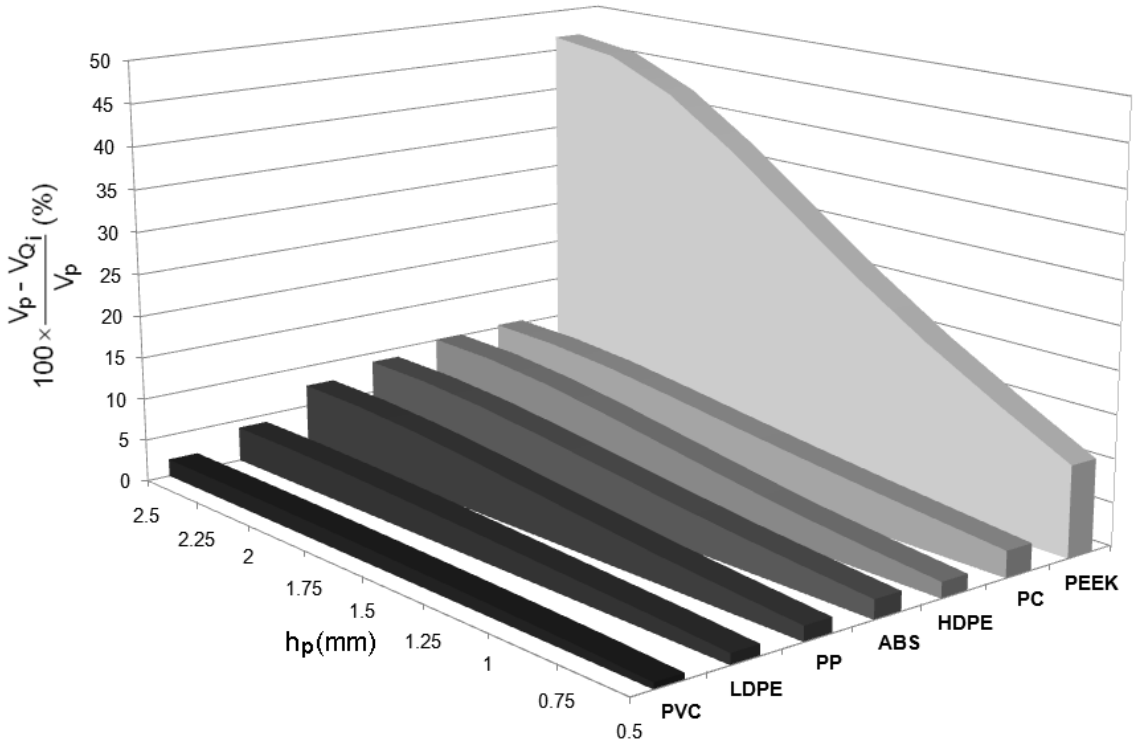


Fig. 6.3 - Pourcentage de perte de piézoélectricité avec la position du PZT dans la plaque, et le matériau thermoplastique utilisé pour une fréquence du déplacement dynamique imposé = 100 Hz (cas du moulage).

Contrairement au moulage par injection, dans le thermoformage (figures 6.4 et 6.5) nous remarquons que plus la pastille PZT est située à proximité du centre de la plaque, plus sa perte piézoélectrique est petite. Ceci est tout à fait cohérent avec le procédé de thermoformage dans laquelle l'extrémité de la plaque se situe en contact direct avec la source d'échauffement.

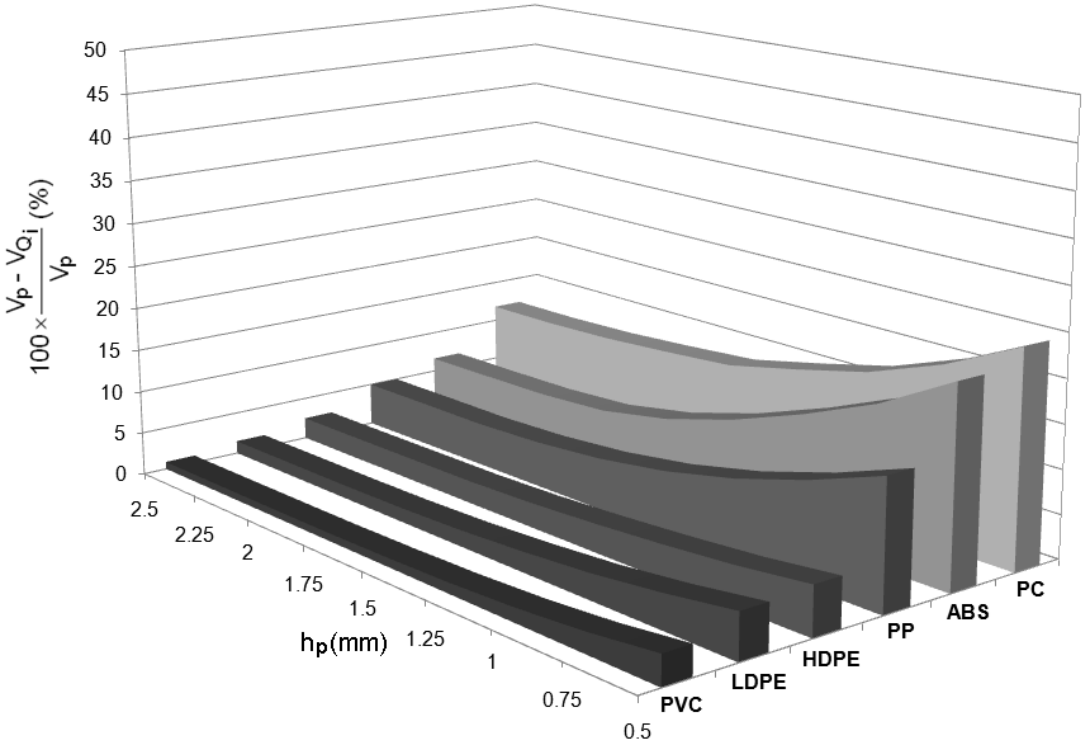


Fig. 6.4 - Pourcentage de perte de piézoélectricité avec la position du PZT dans la plaque, et le matériau thermoplastique utilisé pour une fréquence du déplacement dynamique imposé = 10 Hz (cas du thermoformage).

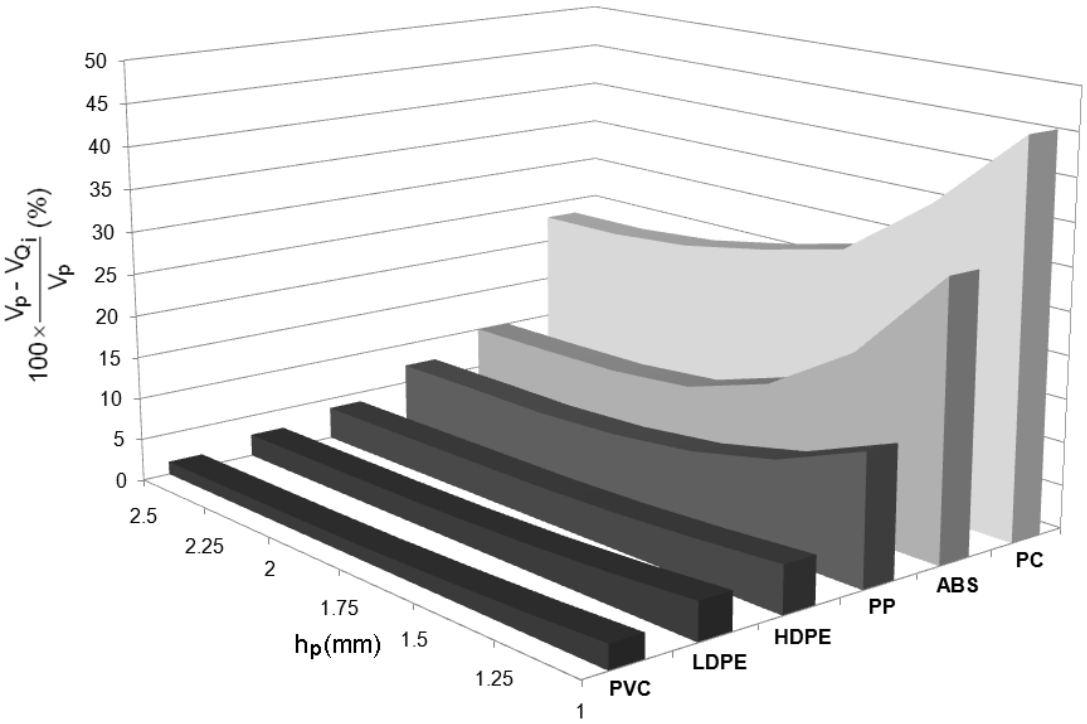


Fig. 6.5 - Pourcentage de perte de piézoélectricité avec la position du PZT dans la plaque, et le matériau thermoplastique utilisé pour une fréquence du déplacement dynamique imposé = 100 Hz (cas du thermoformage).

6.3 Influence des paramètres thermiques sur l'évolution de la perte de piézoélectricité dans le moulage par injection

Dans la partie précédente, nous avons étudié les matériaux thermoplastiques les plus répandus. Dans le but de couvrir une grande variété de matériaux thermoplastiques, nous allons étudier dans cette partie, l'évolution de la perte piézoélectrique en fonction des paramètres thermiques (température du procédé, conductivité thermique et chaleur spécifique). Cette évolution est obtenue en combinant l'étude des paramètres thermiques (Chap.3) avec les essais expérimentaux (Chap.4). Nous avons étudié la perte au niveau de la position milieu (h_p = 2.5mm) pour laquelle le PZT est soumis aux conditions thermiques les plus dures. La procédure suivie est illustrée par la figure 6.6.

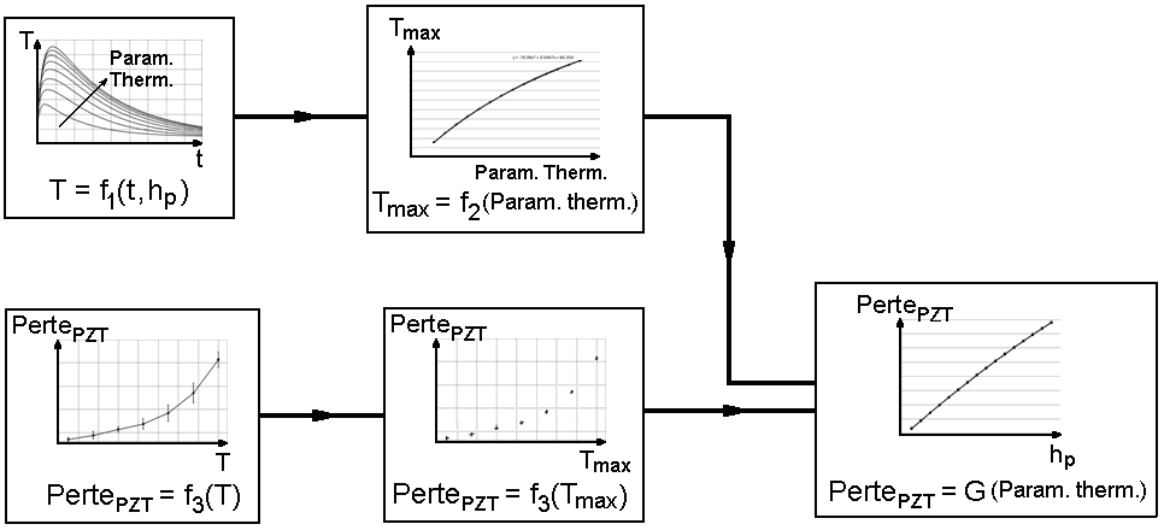


Fig. 6.6 - Schéma Bloc représentant la démarche de calcul de la perte en fonction des paramètres thermiques.

Les résultats montrent que la perte de piézoélectricité :

- Augmente en fonction de la température du procédé (figure 6.7). Elle suit une évolution polynomiale d'ordre 4. Ceci est cohérent avec les essais expérimentaux qui montrent une évolution similaire de la perte avec la température.
- Décroît en fonction de la conductivité thermique du thermoplastique (figure 6.8). Cette évolution est justifiée par le fait que plus la conductivité thermique est élevée plus l'évacuation de la chaleur au niveau du PZT est grande.
- Augmente avec la chaleur spécifique du thermoplastique (figure 6.9) car ce paramètre représente la capacité du matériau à stocker de l'énergie calorifique.

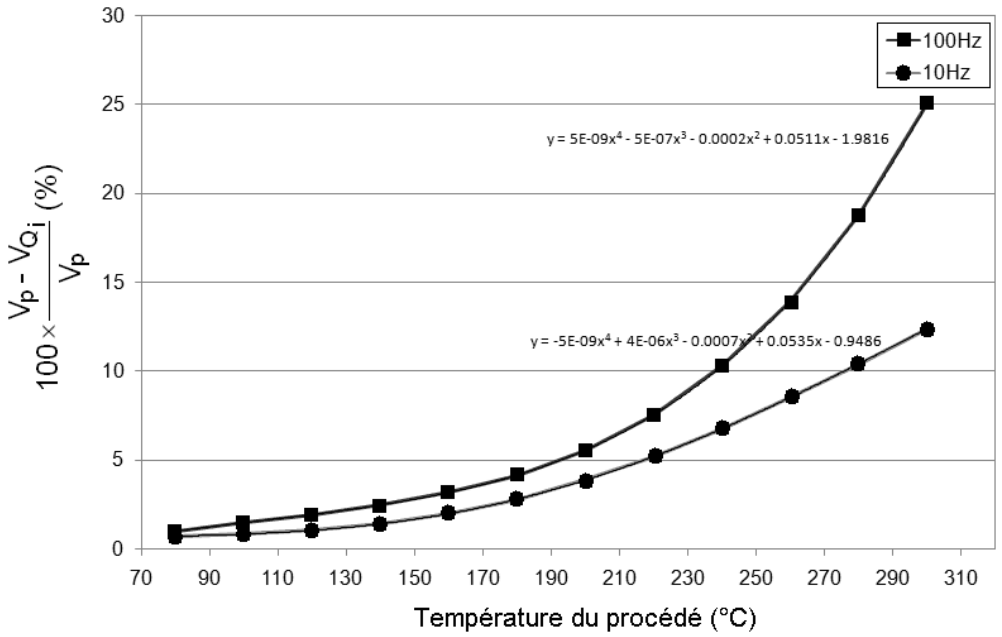


Fig. 6.7 - Pourcentage de perte de piézoélectricité en fonction de la température du procédé.

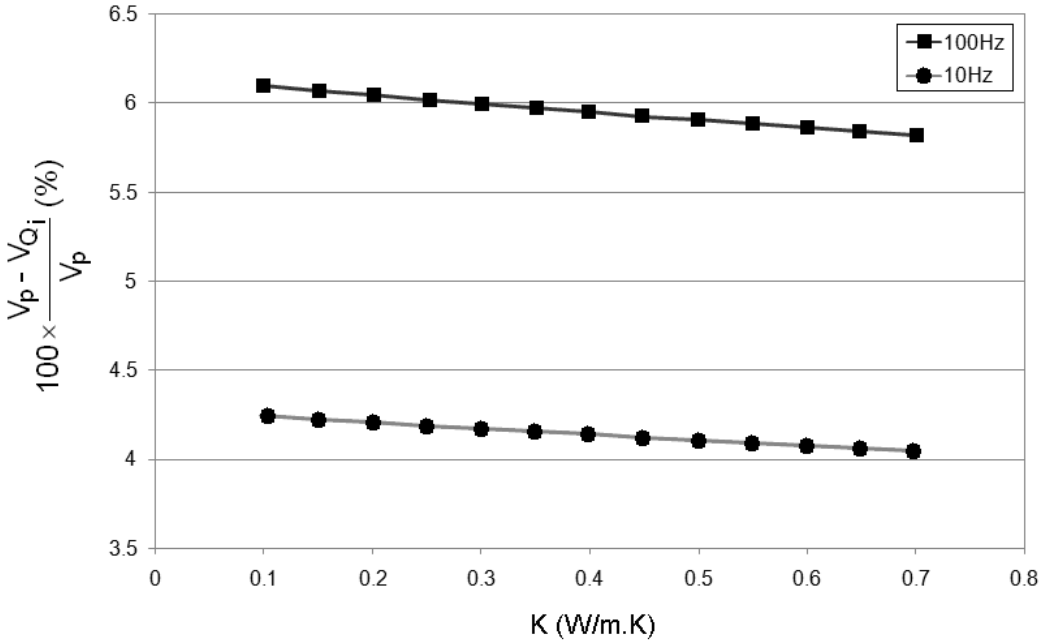


Fig. 6.8 - Pourcentage de perte de piézoélectricité en fonction de la conductivité du matériau thermoplastique.

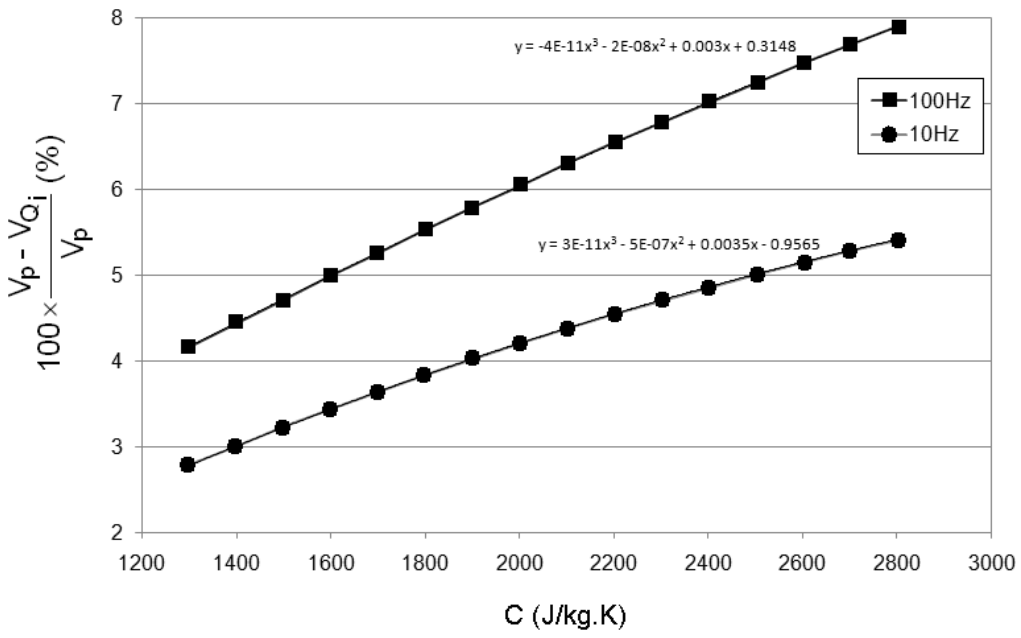


Fig. 6.9 - Pourcentage de perte de piézoélectricité en fonction de la chaleur spécifique du matériau thermoplastique.

6.4 Synthèse sur les conditions de fabrication du thermoplastique intelligent

Il semble en première vue qu'il soit plus avantageux de choisir le PVC comme matériau thermoplastique pour une position du PZT :

- proche de l'extrémité dans le cas du moulage par injection
- au milieu dans le cas du thermoformage

Cependant, ce n'est pas toujours le cas le plus favorable par rapport aux besoins de l'application. En particulier, si on est limité par le choix du matériau pour des considérations mécaniques, on joue sur le choix de la position pour assurer un minimum de perte. Par contre, si les besoins de l'application imposent la position du PZT, on peut jouer sur le choix du matériau tout en respectant les contraintes mécaniques de cette application. Ainsi, il faut trouver un compromis entre le choix du matériau et celui de la position, dans le but d'optimiser la perte des propriétés piézoélectriques. En outre, il faut prendre en considération l'influence d'un autre facteur : l'épaisseur de la plaque. En effet, l'étude effectuée dans la partie 1.5.1 du troisième chapitre a montré que l'augmentation de l'épaisseur de la plaque entraîne une augmentation non négligeable de la température au sein du PZT (augmentation de la perte piézoélectrique).

Conclusion Générale

Le travail présenté dans ce mémoire de thèse apporte une contribution à l'étude des conditions de fabrication des structures thermoplastiques actives. Les matériaux constitutifs de ces structures sont étudiés séparément : matériau composite à matrice thermoplastique et matériau piézocéramique. Une première étude sur les structures thermoplastiques a traité des conditions thermiques et mécaniques qui accompagnent leur fabrication. L'influence de ces conditions sur le matériau piézocéramique intégré a été analysée dans une deuxième étude. Une série de modélisations numériques et d'essais expérimentaux a été effectuée dans les deux parties. Les résultats des deux études permettent de choisir le matériau approprié pour chaque procédé et condition de mise en œuvre, de manière à minimiser l'endommagement du matériau intelligent. Cet apport permet de surmonter les obstacles relatifs à l'utilisation du thermoplastique dans la structure active.

Dans une première partie de ce travail, l'état de l'art a montré qu'actuellement les structures actives sont essentiellement réalisées en matériaux composites à matrice thermodurcissable. Une étude comparative entre les matériaux thermoplastiques et thermodurcissables, prouve que l'utilisation du premier présente plus d'avantages (recyclage, fabrication, etc.). Cependant, le thermoplastique est rarement utilisé comme matériau de base dans les structures actives. En effet, les propriétés piézoélectriques des composants intégrés subissent une perte en raison de leur sensibilité thermique et mécanique. Ce premier chapitre nous a permis de dégager une piste de travail pour répondre à cette problématique.

Dans le deuxième chapitre, nous avons cité les outils matériels et logiciels ainsi que les matériaux utilisés dans notre travail. Les propriétés physiques et mécaniques des matériaux thermoplastiques ainsi que les procédés de fabrication qui intéressent notre étude, ont également été présentées. En outre, ce chapitre comporte une présentation des caractéristiques relatives au PZT qui contribuent à la maîtrise de leur intégration dans les matrices thermoplastiques et par suite à l'évaluation de leur dégradation d'origine thermique.

Le troisième chapitre a été consacré à la modélisation de l'évolution thermique d'une pastille piézoélectrique pour différents procédés de fabrication : moulage par injection, surmoulage et thermoformage. Les résultats ont permis de déterminer le profil de la température au sein de la pastille PZT, lors de la mise en forme de la pièce thermoplastique active. Les résultats les plus importants concernent le surchauffage de la pastille piézoélectrique au dessus de la mi-température de curie ($T_c/2$: valeur empirique). Ils sont présentés sous forme d'abaques incluant le temps de surchauffage du PZT, la température $T_c/2$ et la position du PZT dans la pièce. La comparaison entre les abaques des procédés de fabrication a montré que :

- Dans le cas du moulage par injection ou du surmoulage, les meilleures positions du PZT dans la pièce se trouvent au niveau des couches périphériques. Ceci est justifié par le fait que l'exposition thermique est minimale au niveau de ces positions.
- Pour une position intermédiaire entre la périphérie et le quart de la hauteur, les résultats des procédés de moulage par injection sont semblables à ceux de la co-injection avec un léger avantage pour ce dernier.
- Pour une position proche du centre, la co-injection est clairement plus favorable.
- Dans le cas du thermoformage, le PZT atteint la température maximale quelle que soit la position du PZT dans la pièce pour une courte période d'exposition thermique.

En outre, nous avons étudié l'influence de différents matériaux thermoplastiques et de leurs paramètres thermiques sur les conditions thermiques des PZT. La comparaison a montré que pour chaque procédé, certains matériaux sont mieux appropriés.

L'évolution en fonction de la température, des propriétés mécaniques et piézoélectriques des pastilles en PZT au cours du processus de fabrication a été étudiée dans le quatrième chapitre. Les simulations ont montré que les défauts de centrage issus de la fabrication ou les défauts d'alignement expérimentaux n'induisent pas d'erreurs significatives. Les essais expérimentaux ont montré que la rigidité de la pastille PZT augmente avec l'élévation de la température à cause de l'effet bilame. L'analyse des pertes de la piézoélectricité a montré qu'elle dépend du type de PZT, de la vitesse de chauffage et de refroidissement, de la température de régulation ainsi que de la fréquence d'excitation.

L'influence du contact entre la structure en composite et la pastille PZT a fait le sujet du cinquième chapitre. Des essais statiques et dynamiques ainsi que des simulations, sur une plaque en composite à matrice polypropylène avec fibres de verre, ont permis de déterminer ses propriétés viscoélastiques. Il est important de mentionner que la démarche

proposée pour la détermination de ces propriétés peut être utilisée pour d'autres matériaux thermoplastiques. Des simulations en dynamique ont été réalisées sur une plaque en composite PP/verre contenant un actionneur PZT. Elles ont montré que l'influence des couches fines entourant la pastille, sur le comportement global de la plaque, est limitée.

Dans le dernier chapitre, nous avons étudié, pour différents matériaux thermoplastiques, la perte de la piézoélectricité par rapport à la position du PZT dans le modèle. En outre, la perte de la piézoélectricité est aussi étudiée par rapport à la variation des différents paramètres thermiques représentant une plage de matériaux thermoplastiques. Les résultats permettent de choisir le matériau thermoplastique, le PZT, la position de la pastille PZT dans la structure ainsi que le procédé de fabrication, les plus adéquates dans le but de minimiser la perte de la piézoélectricité.

En conclusion, ce travail contribue à la réduction des difficultés qui empêchent la fabrication des structures en thermoplastique actives. La connaissance des conditions de fabrication et de ses influences sur le composant intégré, permet de déterminer les choix adéquats des matériaux, de l'emplacement du composant intégré et du procédé de fabrication.

Les résultats issus des travaux de la thèse ont abouti à la publication suivante :

- L. Elsoufi, K. Khalil, R. Lachat, W. Charon, *Modeling the thermal behavior of PZT patches during the manufacturing process of smart thermoplastic structures*, Smart Materials and Structures, Vol. 16, No. 4, pp. 1076-1082, 2007.

Une autre contribution en phase de finalisation va être soumise au même journal

- L. Elsoufi, K. Khalil, W. Charon, R. Lachat, *Influence of the thermoplastic type on the PZT patch thermal evolution during the manufacture of a smart thermoplastic part by injection molding process*.

Il faut aussi noter une participation aux conférences internationales suivantes :

- L. Elsoufi, W. Charon, M. Zoaeter, R. Lachat, K. Khalil, *Finite elements modeling for the characterization of rigidity increment of a piezoelectric actuator integrated in thermoplastic parts*, 15th IASTED international conference (ASM2006), 26-28 June 2006, Rhodes, Greece.

- L. Elsoufi, K. Khalil, R. Lachat, W. Charon, M. Zoaeter, *Methodology for the manufacture of smart composites with thermoplastic matrix*, 13th international conference on computational methods and experimental measurements (CMEM2007), WIT Transactions on Modeling and Simulation, 2007.

Une partie de la thèse, basée sur les travaux effectués en DEA, a donné lieu à une publication dans la revue du CNRS libanais :

L. Elsoufi, K. Khalil, R. Lachat, *Déformation d'un stratifié composite au voisinage d'actionneurs piézoélectriques discrets intégrés dans le stratifié*, Lebanese Science Journal (CNRS-LB), Vol. 7, No. 2, 2006.

Les perspectives de ce travail peuvent être résumées par les points suivants :

- Application de l'étude concernant les paramètres thermiques du thermoplastique, effectuée pour le moulage par injection, sur le thermoformage.
- Etude de l'influence de l'effort mécanique sur le composant intégré au cours de la fabrication de pièces en thermoplastique actives.
- Prise en considération des autres effets qui participent avec l'effet bilame dans l'élévation de raideur du composant PZT en fonction de la température (25°C - 85°C), et extrapolation de l'étude de l'évolution de cette raideur pour couvrir une plage de température plus large (25°C - 160°C).
- Etude de l'influence du temps d'exposition du PZT sur la température dégradante.
- Etude de la sensibilité du PZT à la contrainte mécanique à laquelle il est sollicité.
- Généralisation de l'étude rhéologique de contact entre le composite thermoplastique et le composant PZT pour différentes valeurs de fréquences.

Références

[Adv02] S. G. Advani and E. M. Sozer, *Process Modeling in Composites Manufacturing*, CRC, 2002.

[Agr99] B. N. Agrawal and K. E. Treanor, *Shape control of a beam using piezoelectric actuators*, Smart Materials and Structures, 8(6):729-40, 1999.

[Akh99] G. Akhras, *Advanced Composites for Smart Structures*, 12e Conférence internationale sur les matériaux composites, Paris, France, 1999.

[Ald00] O. J. Aldraihem and A. A. Khedir, *Smart beams with extension and thickness-shear piezoelectric actuators*, Smart Materials and Structures, 9(1):1-9, 2000.

[Ald97] O. J. Aldraihem, T. Wetherhold and T. Singh, *Distributed control of laminated beams: Timoshenko and Euler-Bernoulli theory*, Journal of Intelligent Materials Systems and Structures, 8(5):149-157, 1997.

[Ama90] I. Amato, *Smart as a brick*, Science News, 137(10):152-153, 1990.

[APC] *Piezoelectric Ceramics: Principles and Applications*, AmericanPiezo (APC).

[Azu04] L. E. Azulay and H. Abramovich, *Piezoelectric actuation and sensing mechanisms : Closed form solutions*, Composite Structures, 64:443-453, 2004.

[Bai85] T. Baily and J. E. Jr. Hubbard, *Distributed piezoelectric polymer active vibration control of a cantilever beam*, Journal of Guidance, Dynamics and Control, 8(5):605-611, 1985.

[Bra99] J. Brandrup, E.H. Immergut, and E.A. Grulke, *Polymer handbook*, Wiley, New York, 1999.

[Bre99] M. J. Brennan, J. G. Bonita, S. J. Elliot, A. David and R. J. Pinnington, *Experimental investigation of different actuator technologies for active vibration control*, Smat Materials and Structures, 8(3):145-153, 1999.

[Bue63] W. J. Buehler, J. V. Gilfrich and R. C. Wiley, *Effect of low-temperature phase changes on the mechanical properties of alloys near composition TiNi*, Journal of applied physics, 34(5):1475-1477, 1963.

[Bur92] J. S. Burdess and J. N. Fawcett, *Experimental evaluation of piezoelectric actuator for the control of vibrations in a cantilever beam*, Journal of Systems and Control Engineering, 206(12):99-106, 1992.

[Car99] C. Carrot et J. Guillet, *Viscoélasticité linéaire des polymères fondus*, technique de l'ingénieur, AM 3620, 1999.

[Cha06] M. Chalhoub, A. Pouya, *Determination of the representative elementary volume of a fractured rock mass using numerical homogenization method*, Sixth European conference on numerical methods in geothechnical engineering, Graz, Austria, 2006.

[Cra87] E. F. Crawley and J. de Luis, *Use of Piezoelectric Actuators as Elements of Intelligent Structures*, AIAA Journal, 25(10), 1987.

[Cra93] P. S. Cracknell and R.W. Dyson, *Handbook Of Thermoplastics Injection Mould Design*, Blackie Academic & Professional, 1993.

[Cul96] B. Culshaw, *Smart Structures and Materials*, Artech House, 1996.

[Dam92] D. Damajonavic and R. E. Newnham, *Electrostrictive and piezoelectric materials for actuator applications*, Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 3:190-208, 1992.

[Det03] R. Deterre, P. Mousseau and A. Sarda, *Injection des polymères simulation optimisation et conception*, TEC & DOC, 2003.

[Don96] P. Donthireddy and K. Chandrashekara, *Modeling and shape control of composite beam with embedded piezoelectric actuators*, System and Control Letters, 35(2):237-244, 1996.

[Eit01] R. E. Eitel, C. A. Randall, T. R. Shrout, P. W. Rehrig, W. Hackenberger and S. E. Park, *New High Temperature Morphotropic Phase Boundary Piezoelectrics Based on Bi(Me)O_3-$PbTiO_3$ Ceramics*, The Japan Society of Applied Physics, 40(1):5999-6002, 2001.

[Els06] L. Elsoufi, K. Khalil, R. Lachat, W. Charon and M. Zoaeter, *Methodology for the manufacture of smart composites with thermoplastic matrix*, 13th international conference on computational methods and experimental measurements (CMEM2007), WIT Transactions on Modeling and Simulation, 2007.

[Els07] L. Elsoufi, K. Khalil, R. Lachat and W. Charon, *Modeling the thermal behavior of PZT patches during the manufacturing process of smart thermoplastic structures*, Smart Materials and Structures, 16(4):1076-1082, 2007.

[Fal01] H. Fall, R. Kouta et W. Charon, *Evaluation de la fiabilité des systèmes mécaniques actifs soumis à des vibrations aléatoires*, Proccedings of 2nd International Design and Production, Conception et Production Intégrées, Fez, Maroc, 2001.

[Fan99] D. Fang, C. LI, *Non-linear electric-mechanical behaviour of a soft PZT-51 ferroelectric ceramic*, Journal of material science, 34(16), 1999.

[Flo96] J. Florian, *Practical Thermoforming, Principales and Applications*, CRC press, 1996.

[Fra96] F. P. Incropera, D. P. DeWitt, *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, John Wiley & Sons, 1996.

[Han92] S. Hanagud, M. W. Obal and A. J. Calise, *Optimal vibration control by the use of piezoceramic sensors and actuators*, Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 15(5):1199-1206, 1992.

[Han96] H. Gao and J. P. Harmon, *Para-substituted polystyrenes: Stress relaxation, creep, dynamic mechanical and dielectric analyses*, Thermochimica Acta, 284:85-102, 1996.

[Har06] C. A. Harper, *Handbook of plastic processes*, Wiley-Interscience, 2006.

[Hor01] M. Hori, T. Aoki, Y. Ohira and S. Yano, *New type of mechanical damping composites composed of piezoelectric ceramics, carbon black and epoxy resin*, Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 32(2):287-290, 2001.

[Hwa93] W. S. Hwang and H. C. Park, *Finite element modeling of piezo-electric sensors and actuators*, AIAA Journal., 31(5):930-937, 1993.

[Kou01] R. Kouta, H. Fall and W. Charon, *Design of experiments for reliability assessment of active mechanical structures*, proceedings of 10th International Conference on Fracture, Honolulu, USA, 2001.

[Len99] E. Lenglet, *Développement dans le code ATILA d'un élément fini pour un matériau magnétostrictif : Comportement non linéaire*, Rapport de DEA, Université des Sciences de Techniques de Lille, 1999.

[Luc07] P. Lucas et G. Zanella, *Mise en œuvre des composites TP*, Techniques de l'ingénieur, AM5235, 2007.

[Mat] *Automation Creations Inc, MatWeb Materials Database*, web: www.matweb.com.

[Mil03] C. Million, *Contribution à l'étude de procédés de réalisation de structures métal/PZT/métal sur silicium pour microsystèmes piézoélectriques*, Thèse INSA-Lyon, 2003.

[Moi04] J. Moita, I. Coreia, C. Soares and C. Soares, *Active control of adaptive laminated structures with bonded piezoelectric sensors and actuators*, Computers and Structures, 82:1349-1358, 2004.

[Mor] *Effects of High Static Stress on the Piezoelectric Properties of Transducer Materials*, Technical Publication TP-220 / Piezoelectric Transducer Materials Stress, web: www.morgan-electroceramics.com.

[Mou05] P. Mousseau, A. Sarda et R. Deterre, *Thermique de l'injection des thermoplastiques / Optimisation*, Technique de l'ingénieur, AM 3 685, 2005.

[Ozi93] M. N. Özişik, *Heat conduction*, Wiley-IEEE: 2nd edition, 1993.

[Par05] V. D. Parvanova and M. M. Nadoliisky, *Polarization Processes in PZT Ceramics*, Bulgarian Journal of Physics, 32:45-50, 2005.

[PI] *PI ceramic piezotechnology*, web: www.piceramic.com.

[Pou01] A. Pouya, M. Ghoreychi, *Determination of rock mass strength properties by homogenization*, International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 25:1285-1303, 2001.

[Rbl08] *RBL Plastiques*, web. : www.thermoformage.com, 2008.

[Ros01] Dominick V. Rosato, Donald V. Rosato and M. G. Rosato, *Plastics design handbook*, Kluwer Academic Publishers, 2001.

[Sch55] P. J. Schneider, *Conduction Heat Transfer*, Addison-Wesley, 1955.

[Sim87] J.C. Simo, *On fully three-dimensional finite strain viscoelastic damage model: Formulation and computational aspects*, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 60:153-173, 1987.

[Sri96] A.V. Srinivasan, *Smart biological systems as models for engineered structures*, Materials Sciences & Engineering, C(4):19-26, 1996.

[Sun95] C. T. Sun and X. D. Zhang, *Use of thickness-shear mode in adaptive sandwich structures*, Smart Materials and Structures, 3(4):202-206, 1995.

[Tro96] J. P. Trotignon, J. Verdu, A. Dobracginsky et M. Piperaud, *Matières plastiques, structures-propriétés, mise en œuvre, normalisation*, Afnor/Nathan, 1996.

[Tzo90] H. S. Tzou and C. I. Tseng, *Distributed piezoelectric sensor/actuator design for dynamic measurement/control of distributed parameter systems: a piezoelectric finite element approach*, Journal of Sound and Vibration, 138:17-34, 1990.

[Ulr02] U. Gabbert, T. N. Trajkov and H. Kppel, *Modeling, control and simulation of piezoelectric smart structures using finite element method and optimal LQ control, Facta Universitatis Series : Mechanics, Automatic*, Control and Robotics, 12(3):417-430, 2002.

[Voi00] C. Voisard, *Conductivity, dielectric and piezoelectric properties of* $SrBi_4Ti_4O_{15}$, Thèse EPFL, 2000.

[Wik08] Analyse mécanique dynamique, l'encyclopédie libre Wikipedia, web: www.wikipedia.org.

[Yang93] S. M. Yang and Y. J. Lee, *Optimization of non-collocated sensor/actuator location and feedback gain in control systems*, Smart Materials and Structures, 8:96-102, 1993.

[You99] L. Young-Hun, V. S. Gopinathan, V. V. Varadhan and K. V. Varadan, *Finite element simulation of smart structures using an optimal output feedback controller for vibration and noise control*, Smart Materials and Structures, 8(8):324-337, 1999.

[Zha06] S. Zhang, N. Kim, T. R. Shrout, M. Kimura and A. Ando, *High temperature properties of manganese modified CaBi4Ti4O15 ferroelectric ceramics*, Solid State Communications, 140:154-158, 2006.

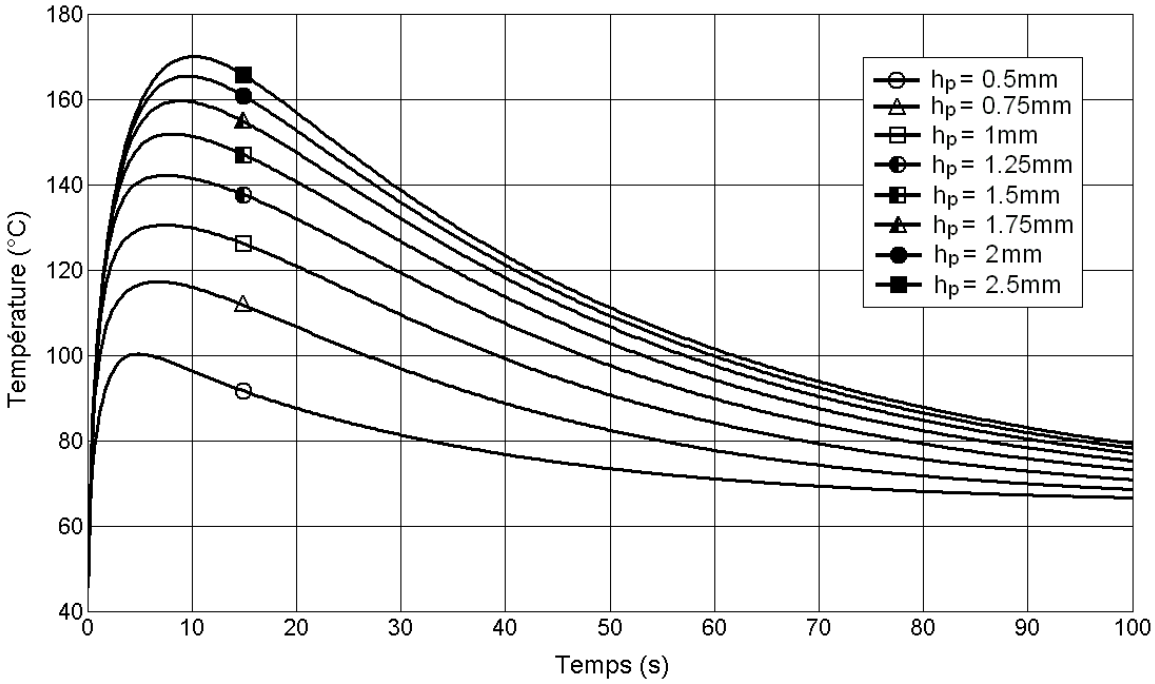
[Zha96] X. D. Zhang and C. T. Sun, *Formulation of and adaptive sandwich beam*, Smart Materilas and Structures, 5(6):814-823, 1996.

[Zhi07] Z. Xia and Q. Li, *Structural and electrical properties investigations of* $Pb(Mg_{1/3}Nb_{2/3})O_3$–$PbTiO_3$–$Pb(Fe_{1/2}Nb_{1/2})O_3$ *ceramics*, Scripta Materialia, 57:981-984, 2007.

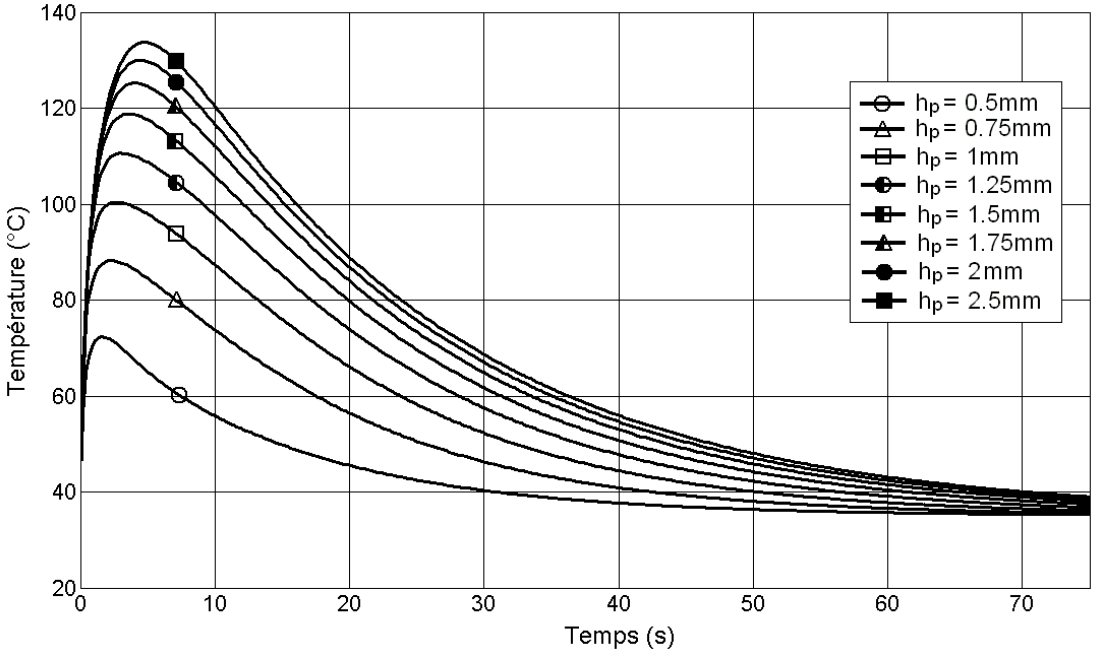
A.1 Résultats des simulations pour l'étude de variation de la température en fonction du temps au sein de la pastille PZT

A.1.1 Cas du procédé de moulage par injection

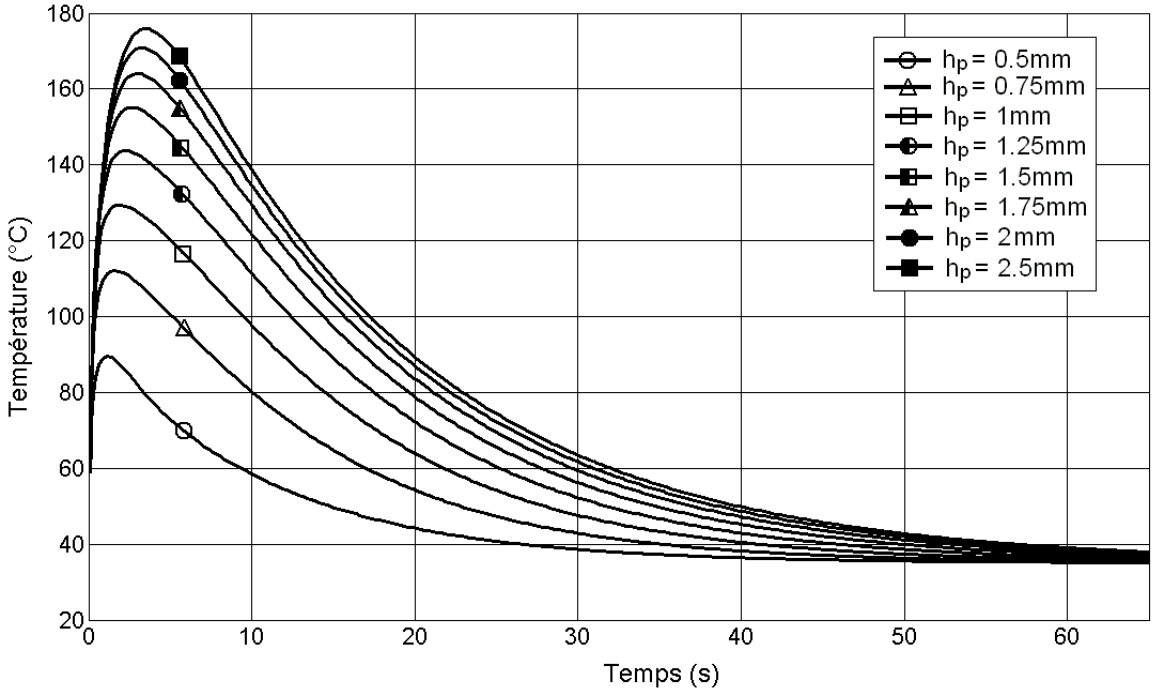
A.1.1.1 Dow MAGNUM 344HP (ABS)



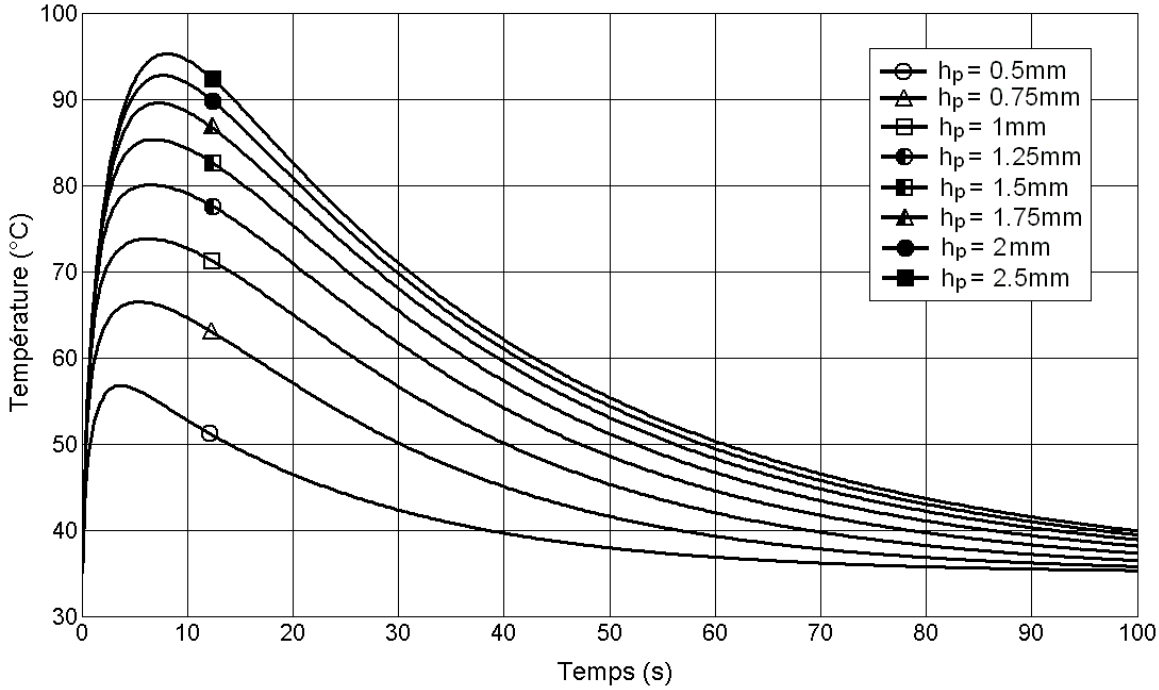
A.1.1.2 Chevron-Philips KN226 (LDPE)



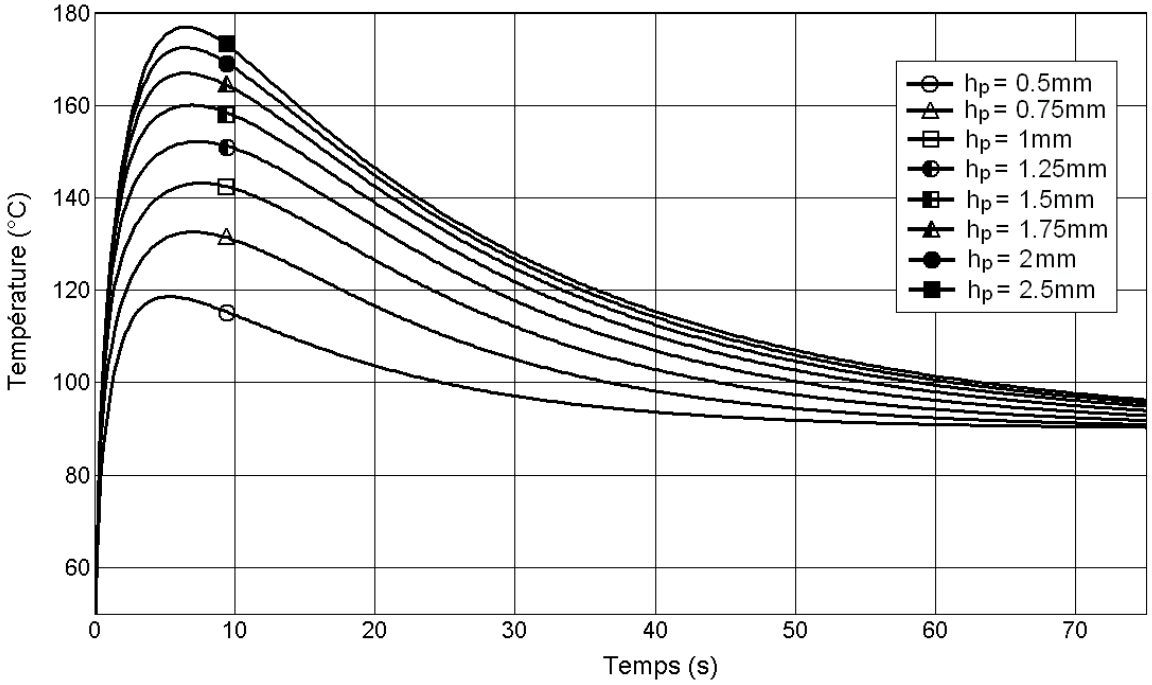
A.1.1.3 Quadrant EPP TIVAR 1000 NV (HDPE)



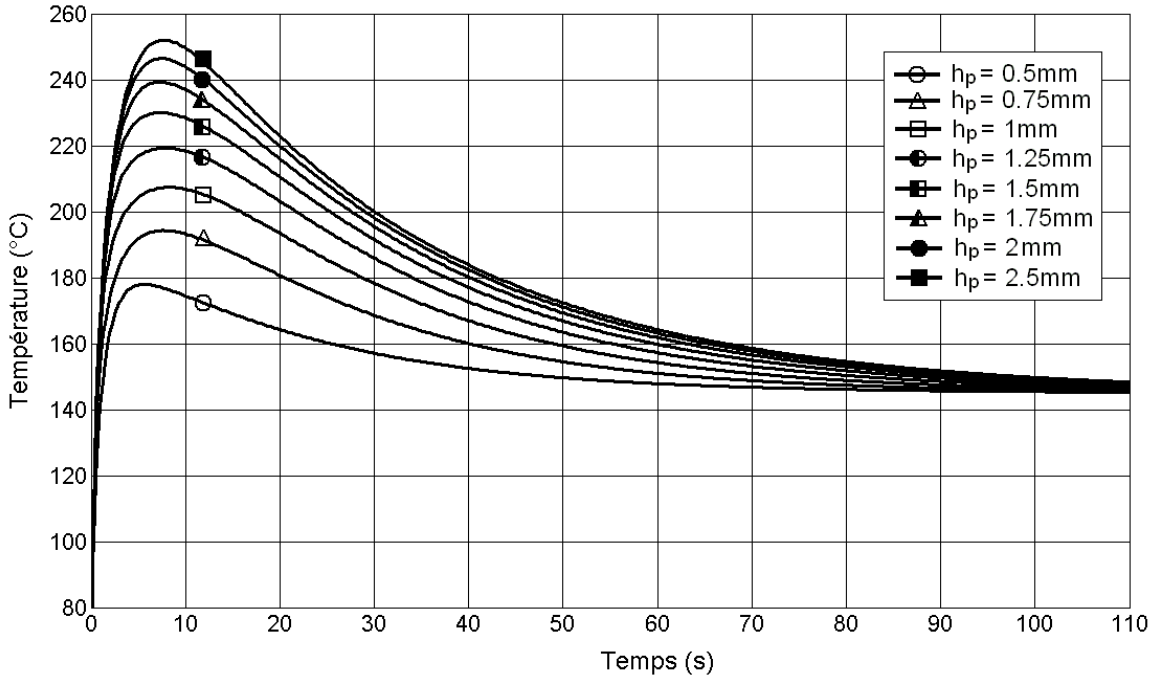
A.1.1.4 Omnia Plastica (PVC)



A.1.1.5 Quadrant EPP PC 1000 (PC)

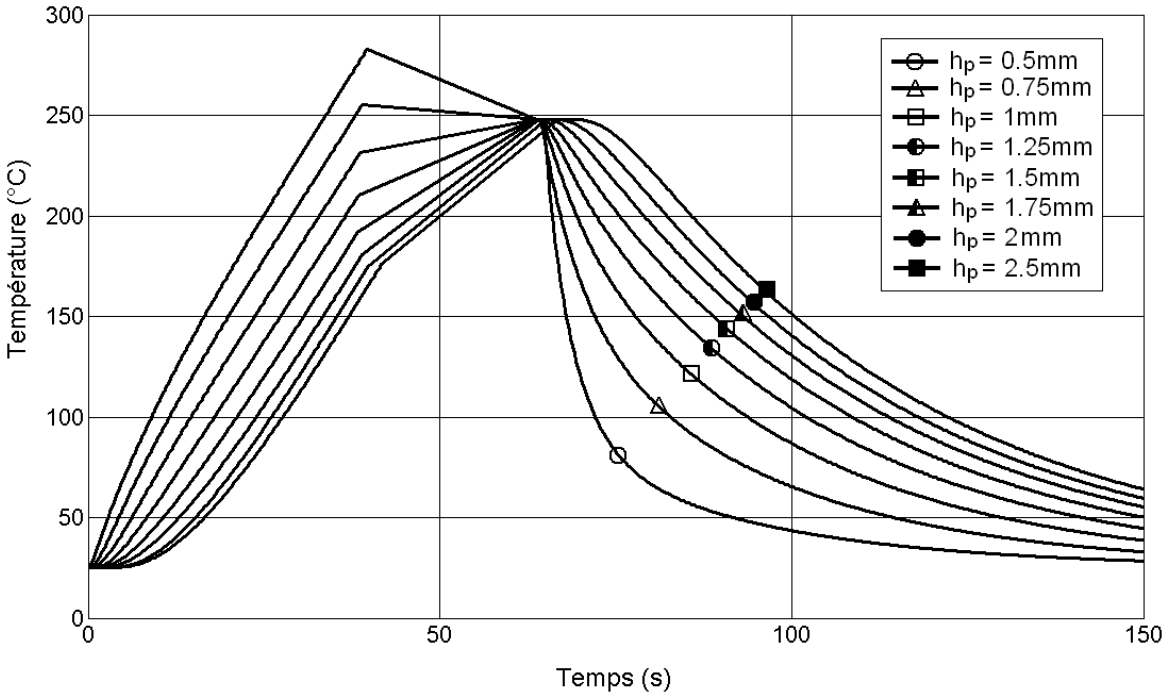


A.1.1.6 RTP 2200 LF (PEEK)

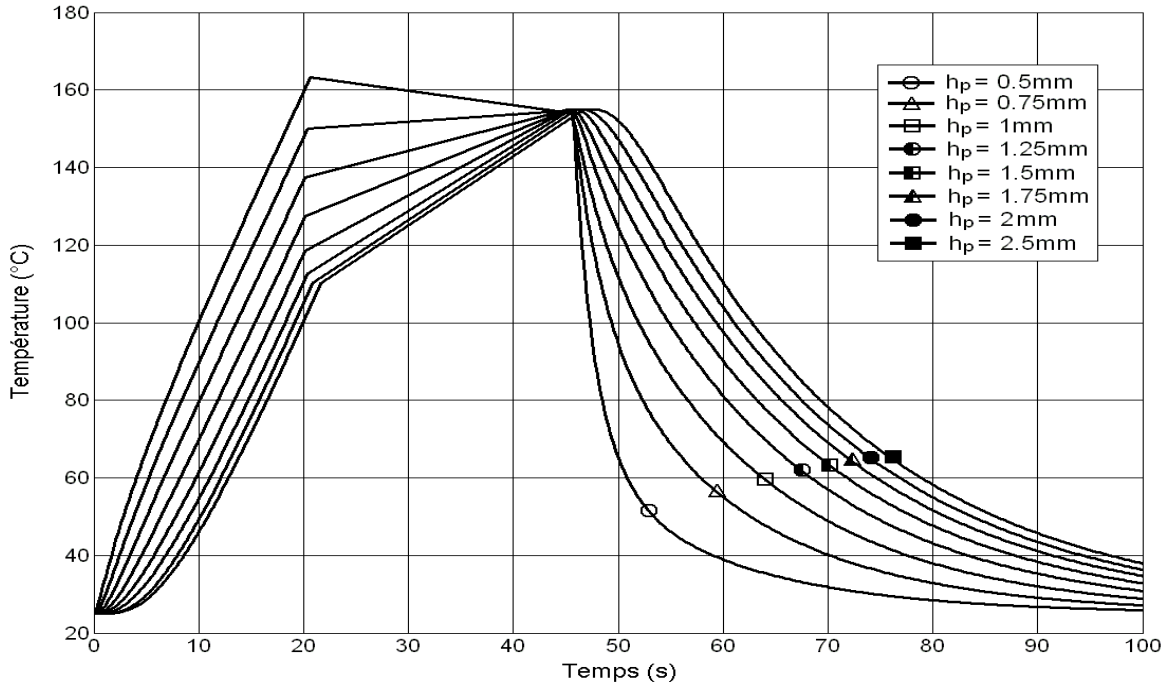


A.1.2 Cas du procédé de thermoformage

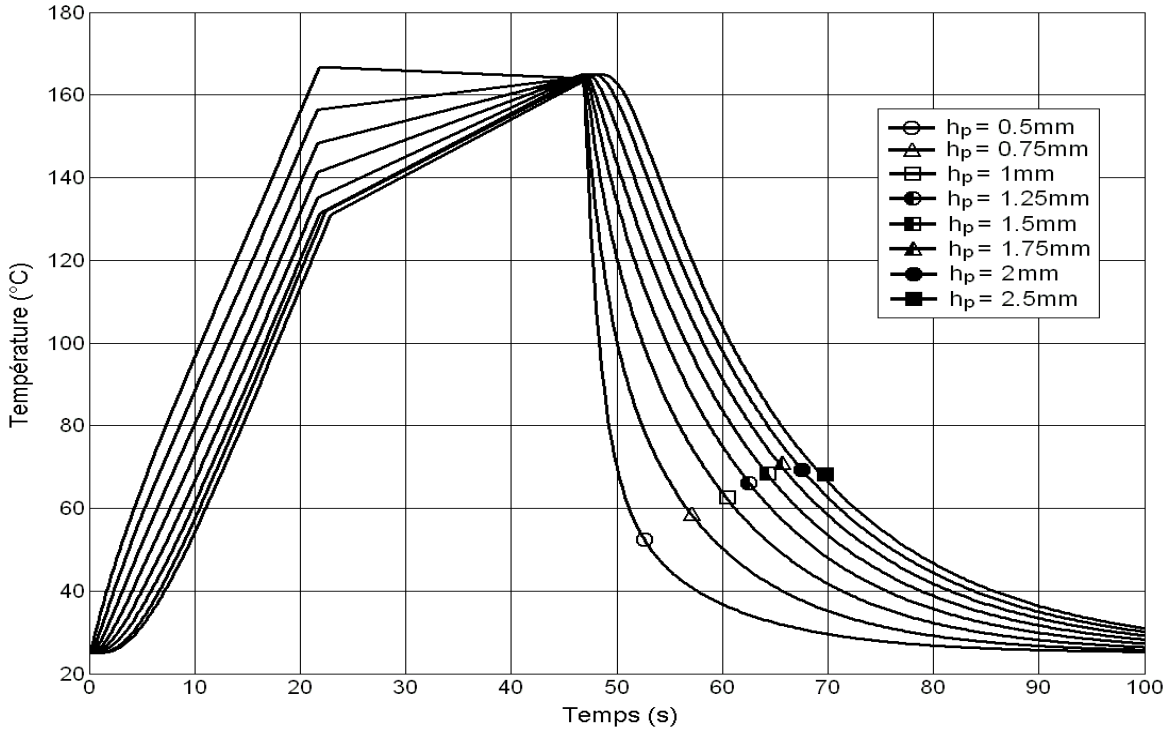
A.1.2.1 Dow MAGNUM 344HP (ABS)



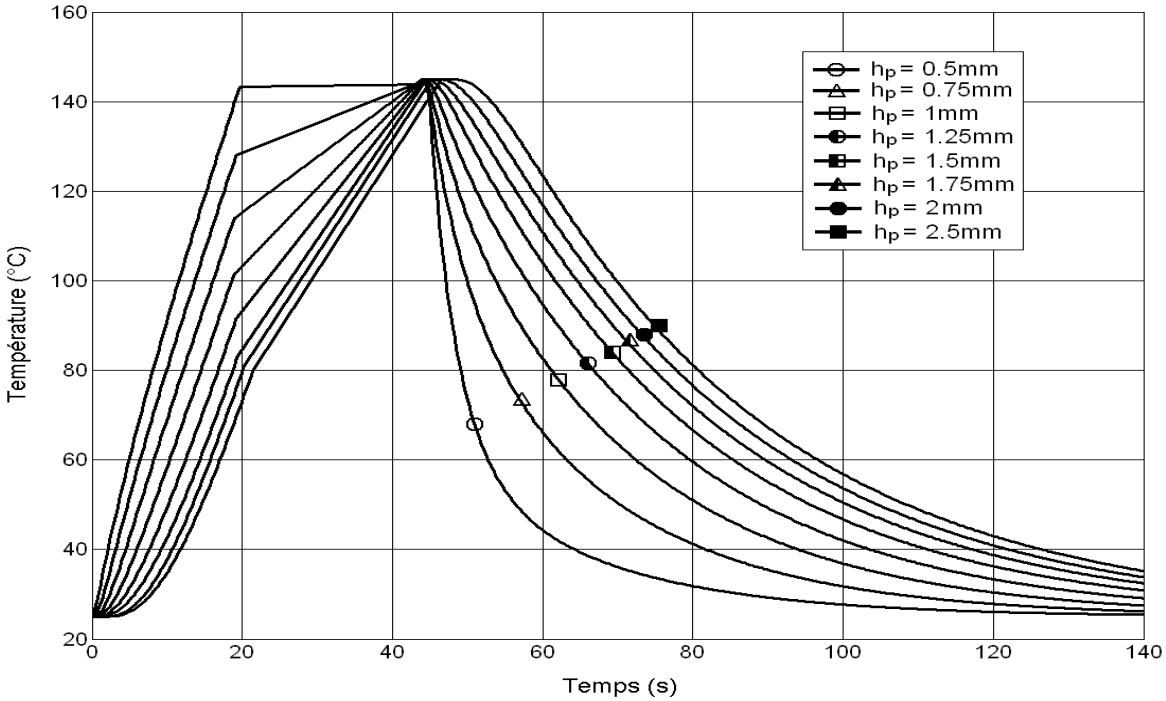
A.1.2.2 Chevron-Philips KN226 (LDPE)



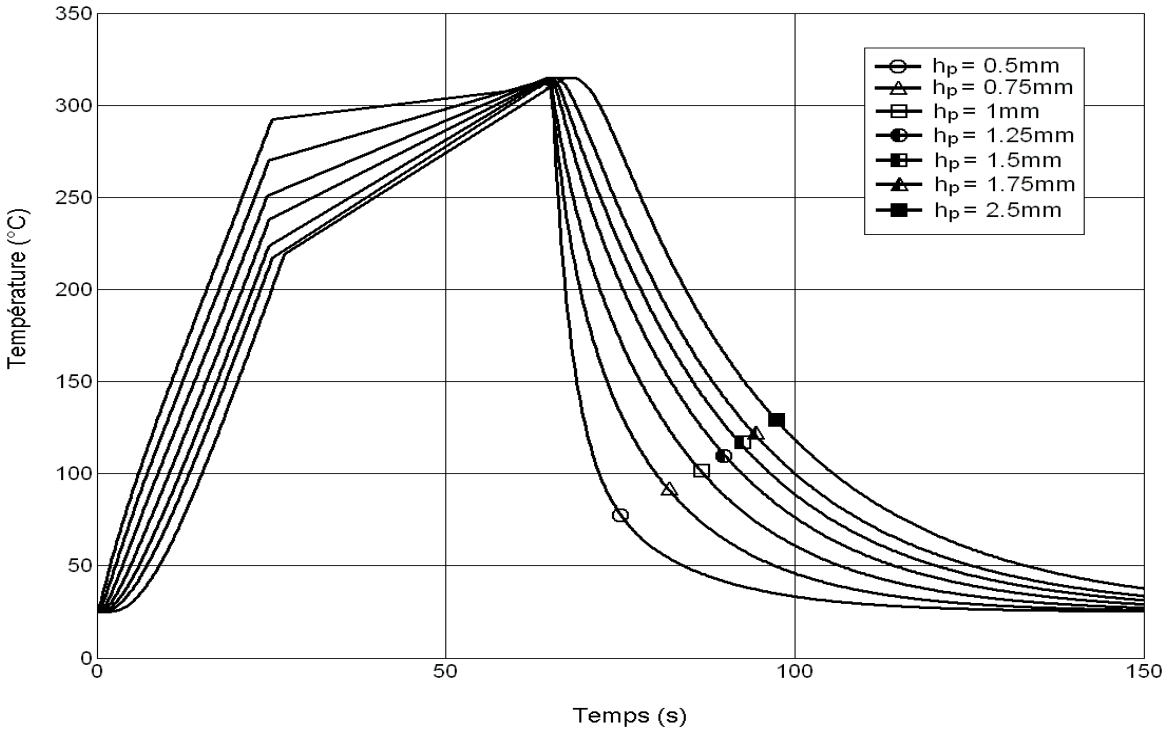
A.1.2.3 Quadrant EPP TIVAR 1000 NV (HDPE)



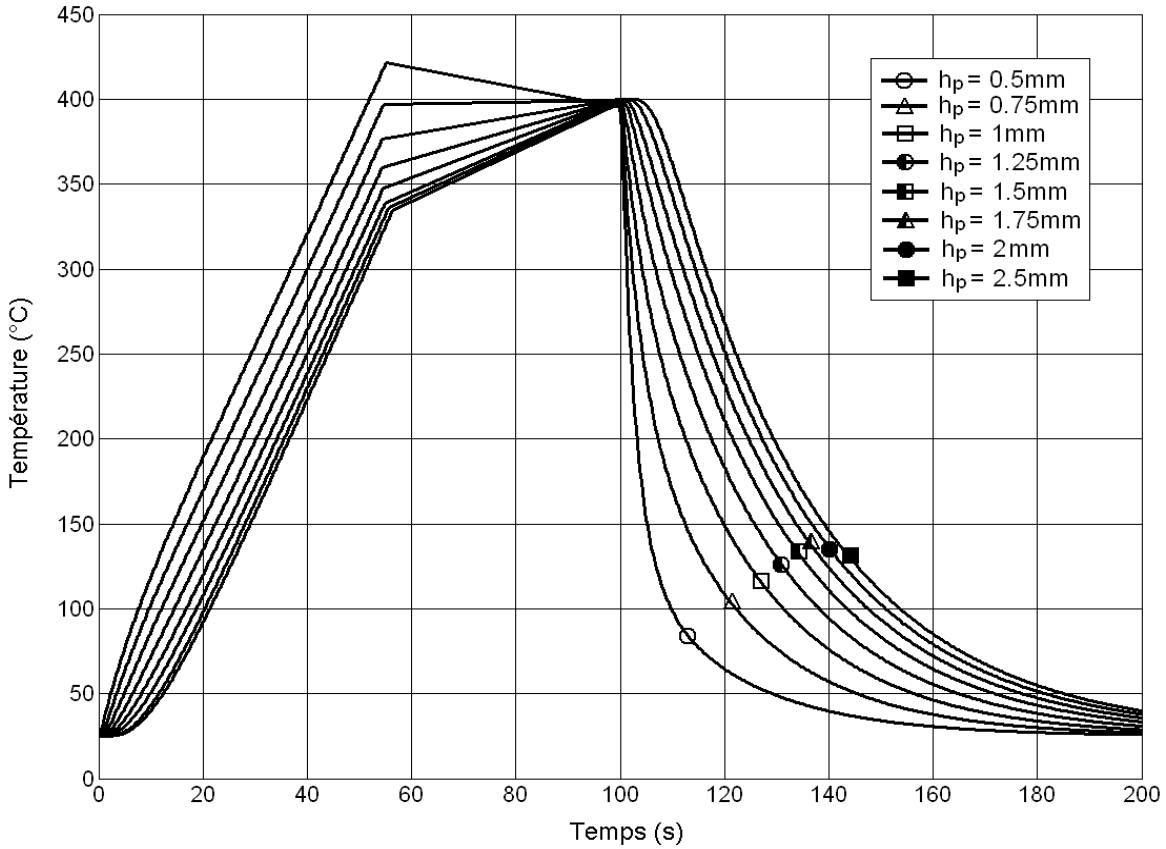
A.1.2.4 Omnia Plastica (PVC)



A.1.2.5 Quadrant EPP PC 1000 (PC)



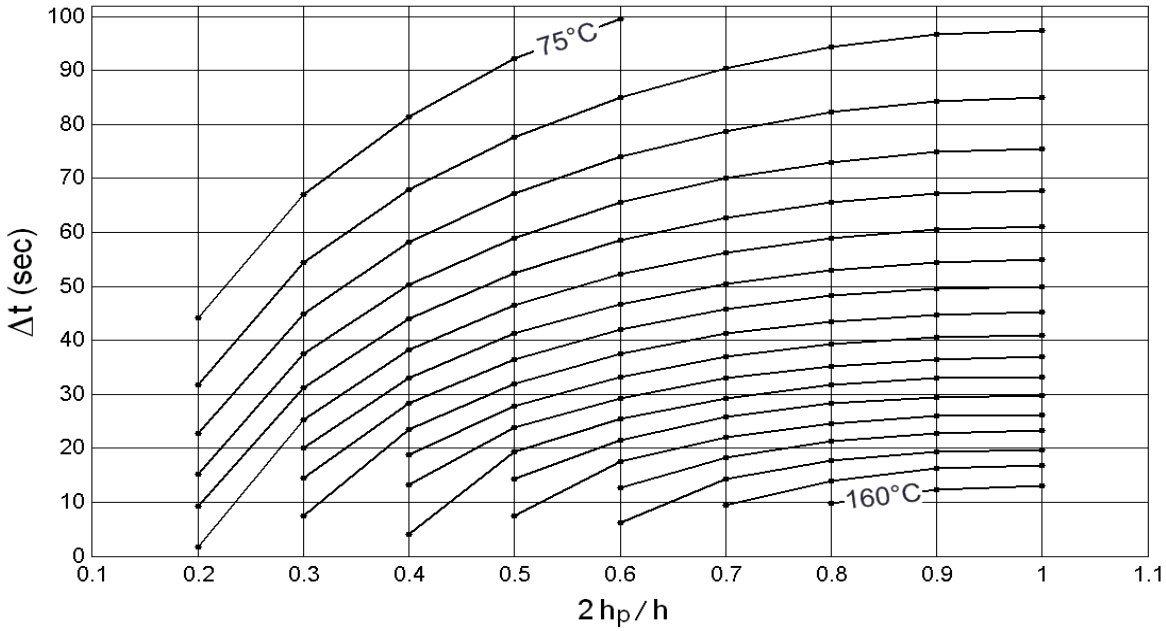
A.1.2.6 RTP 2200 LF (PEEK)



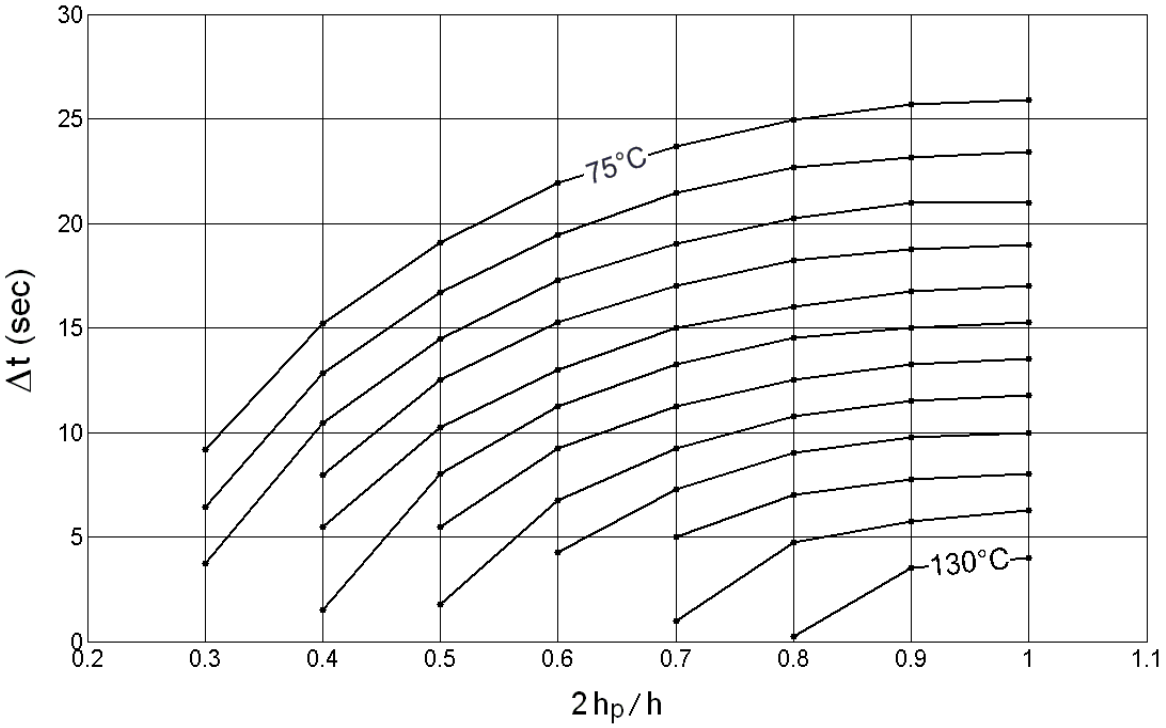
A.2 Résultats des simulations pour l'étude de variation du temps de surchauffage de la pastille PZT pour différentes position dans la structure

A.2.1 Cas du procédé de moulage par injection

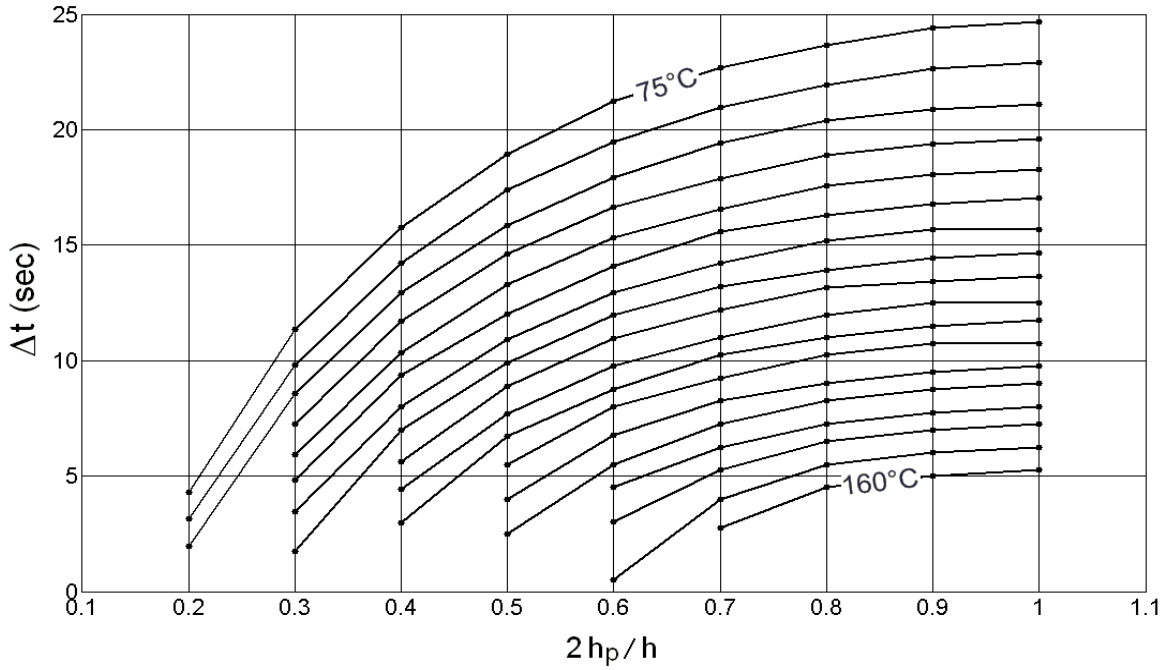
A.2.1.1 Dow MAGNUM 344HP (ABS)



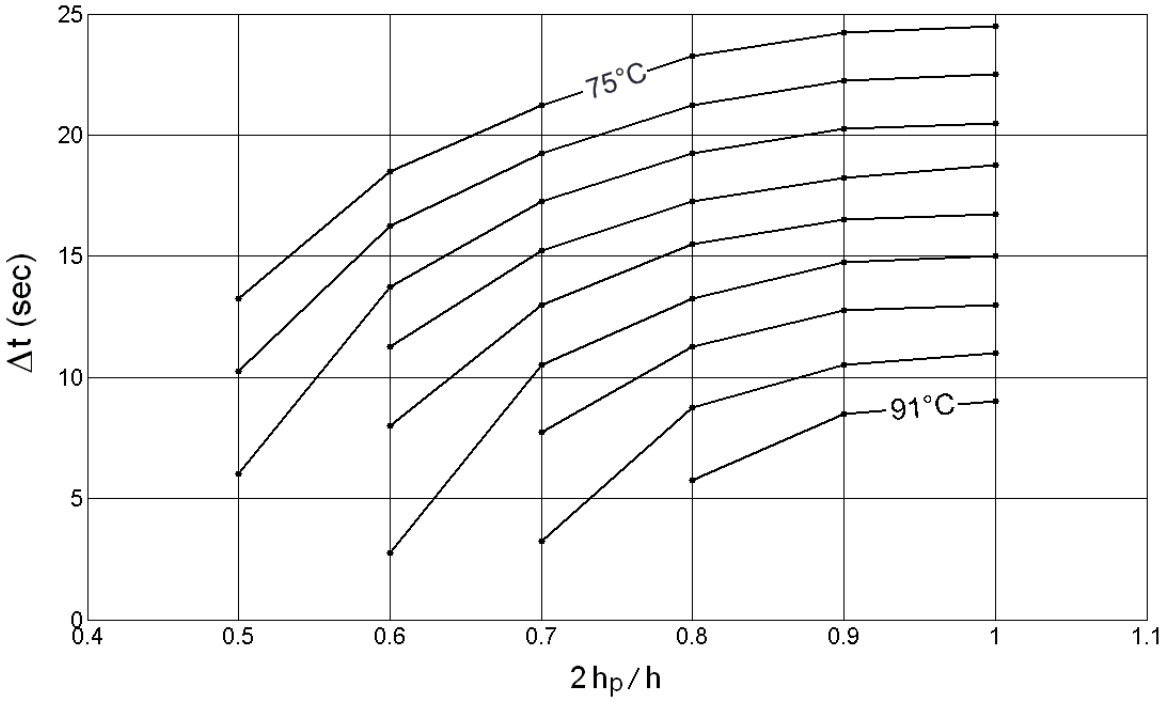
A.2.1.2 Chevron-Philips KN226 (LDPE)



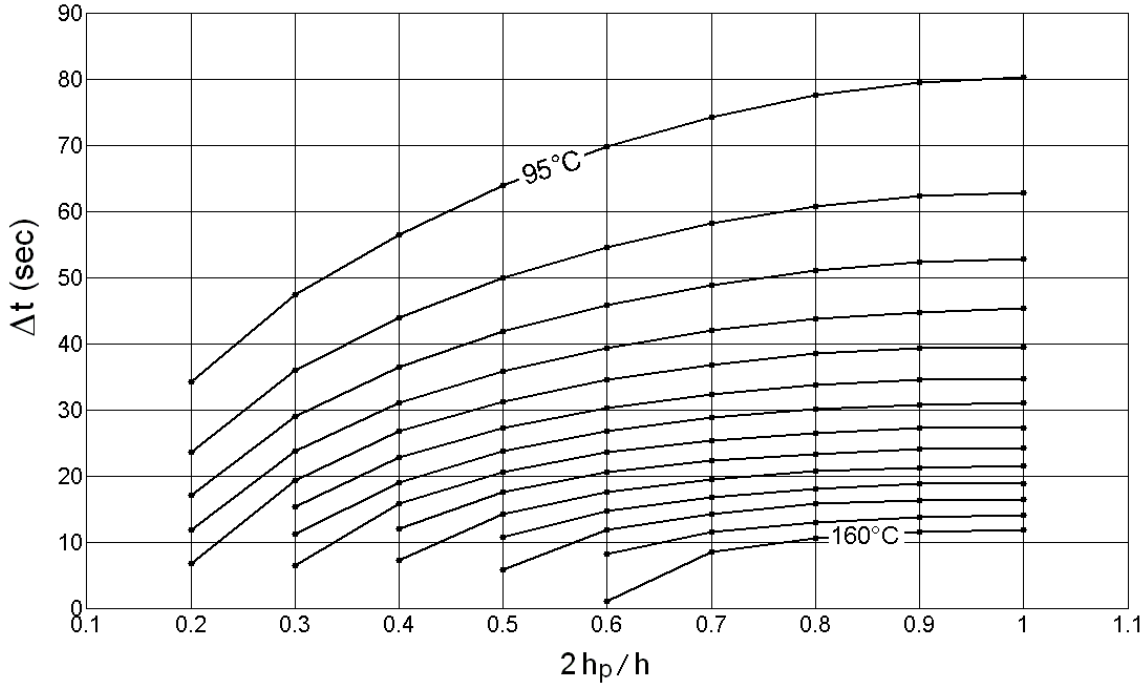
A.2.1.3 Quadrant EPP TIVAR 1000 NV (HDPE)



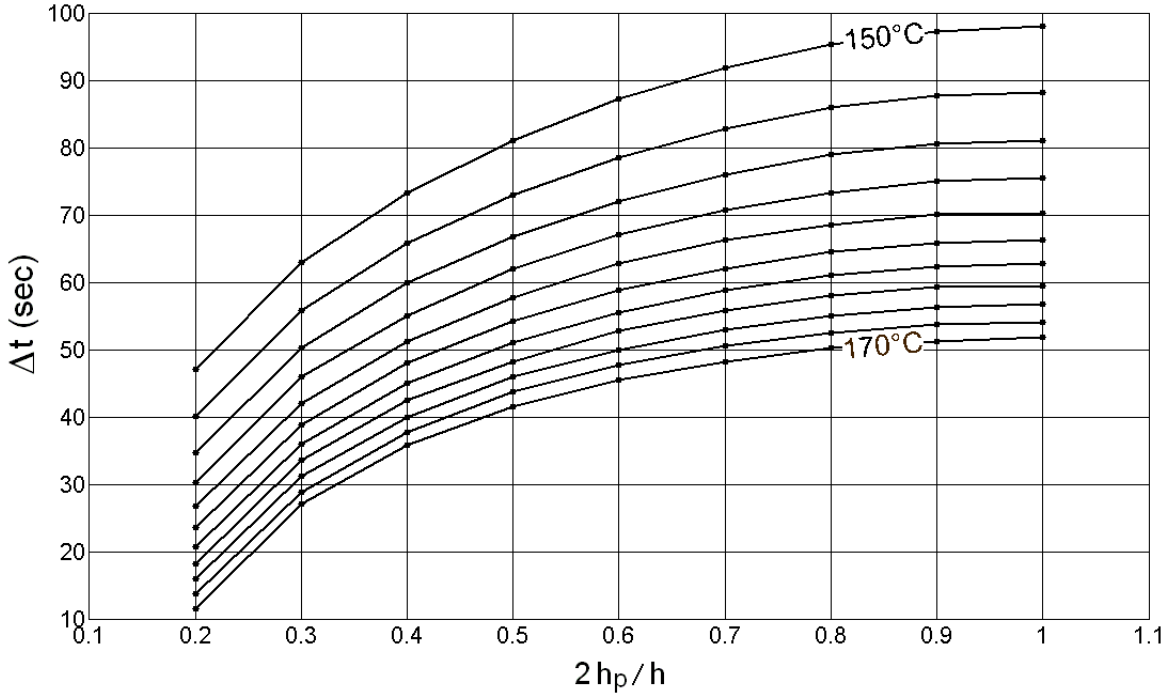
A.2.1.4 Omnia Plastica (PVC)



A.2.1.5 Quadrant EPP PC 1000 (PC)

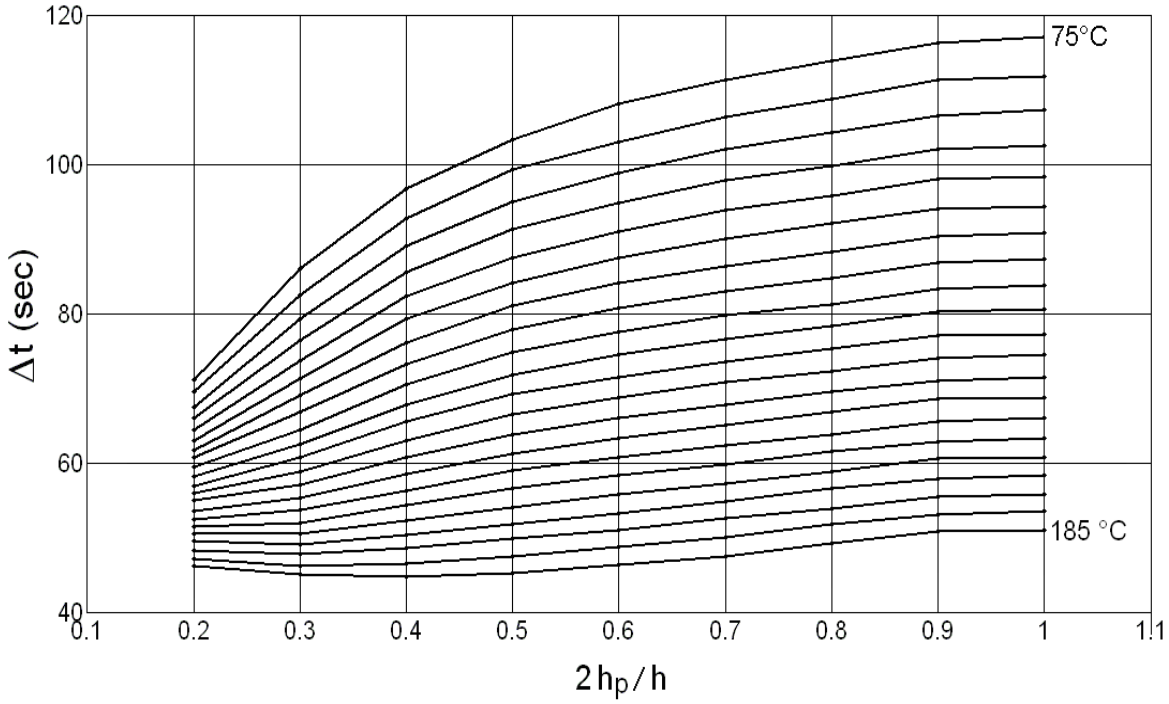


A.2.1.6 RTP 2200 LF (PEEK)

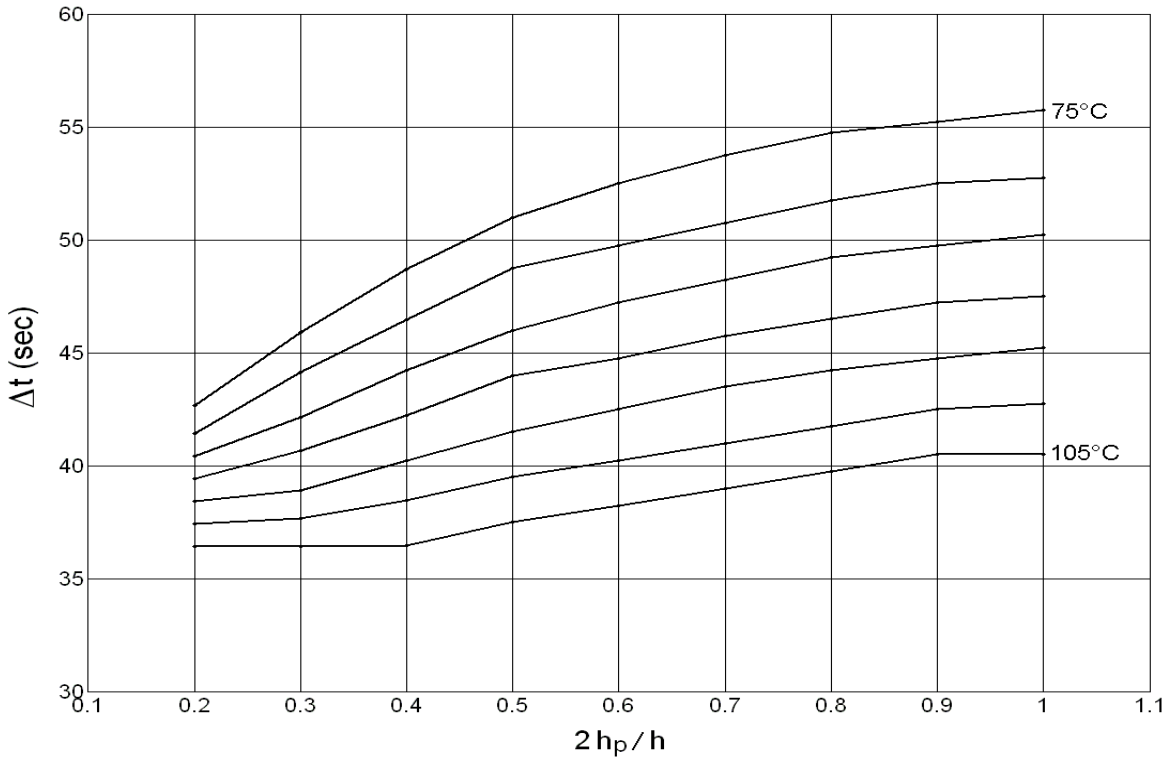


A.2.2 Cas du procédé de thermoformage

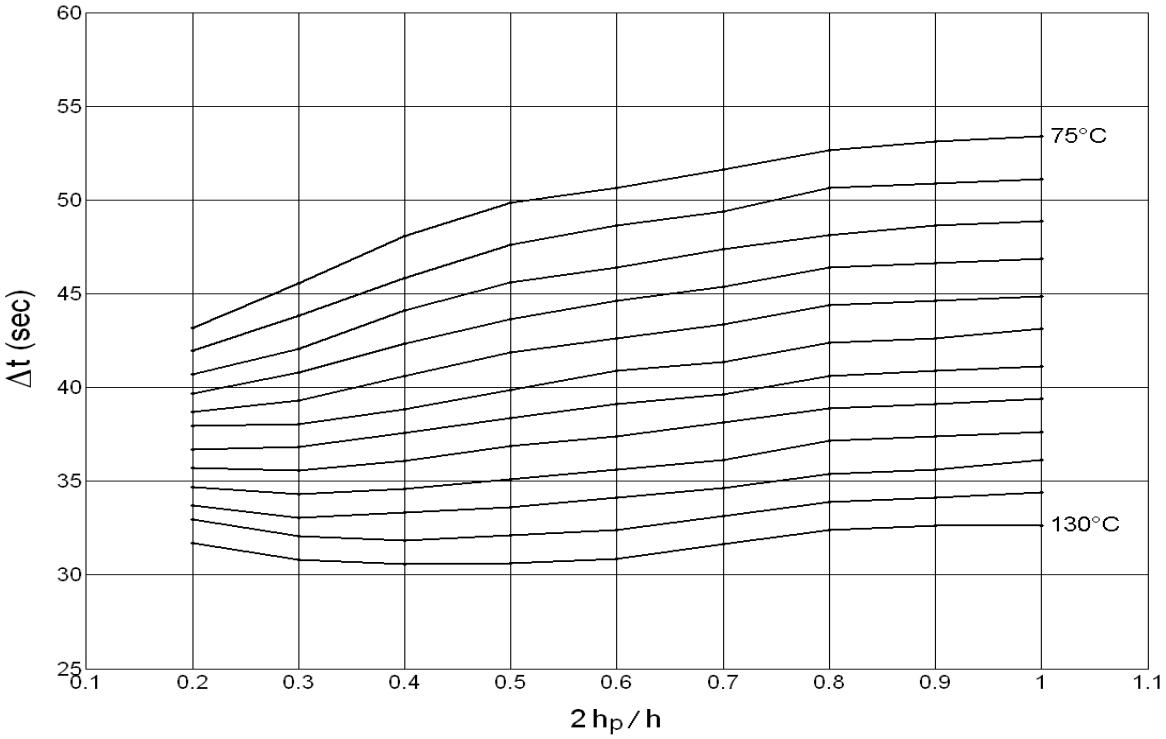
A.2.2.1 Dow MAGNUM 344HP (ABS)



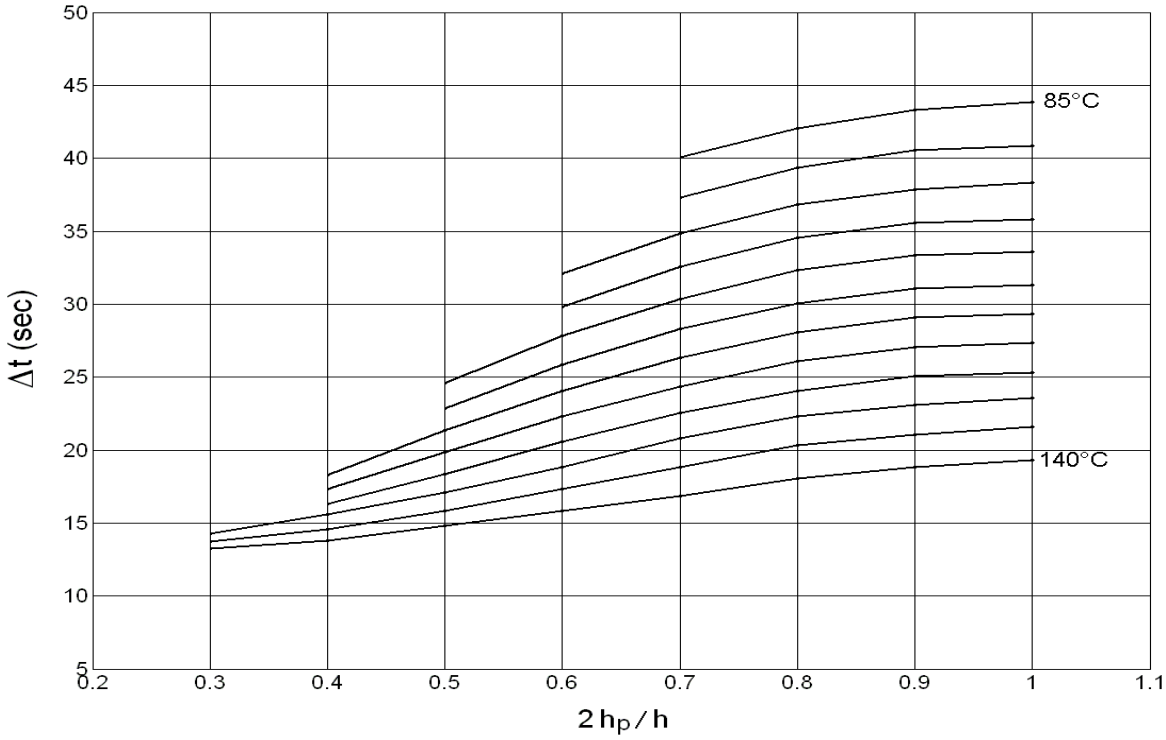
A.2.2.2 Chevron-Philips KN226 (LDPE)



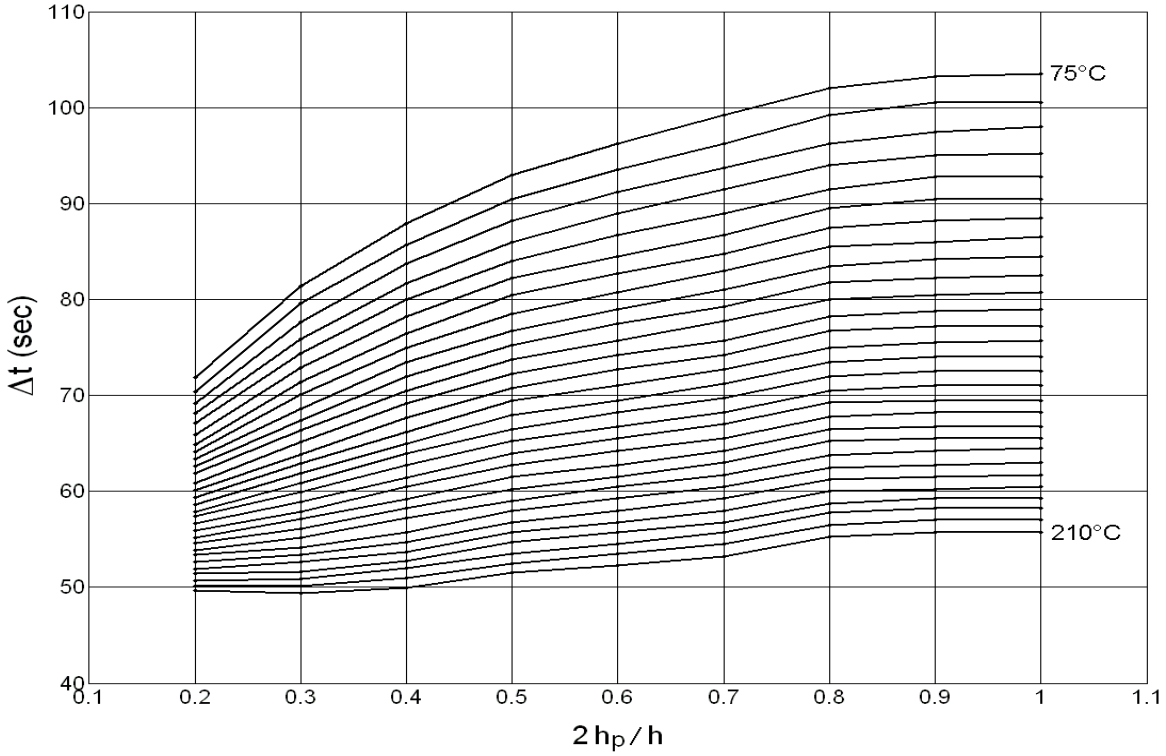
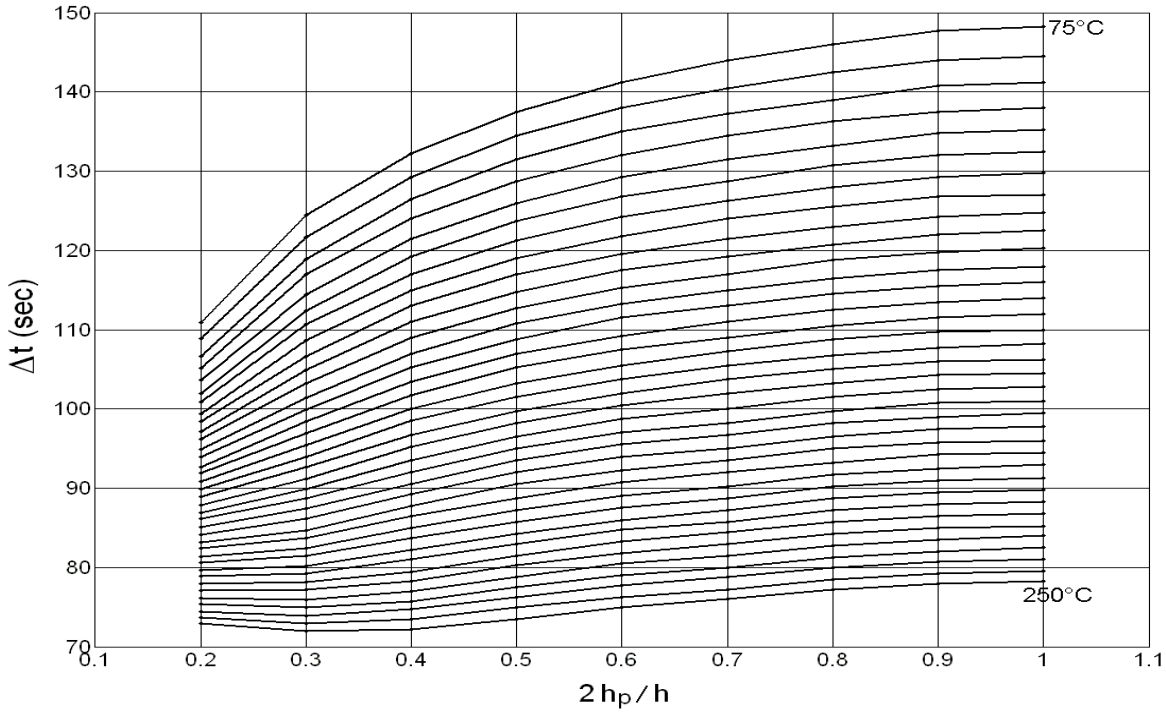
A.2.2.3 Quadrant EPP TIVAR 1000 NV (HDPE)



A.2.2.4 Omnia Plastica (PVC)



A.2.2.5 Quadrant EPP PC 1000 (PC)



A.2.2.6 RTP 2200 LF (PEEK)