UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

MESURE DES CONTRAINTES RÉSIDUELLES DANS LES PIÈCES MOULÉES PAR INJECTION

CATHERINE BAUCHER DIT MORENCY
DÉPARTEMENT DE GÉNIE MÉCANIQUE
ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

MÉMOIRE PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION
DU DIPLÔME DE MAÎTRISE ÈS SCIENCES APPLIQUÉES
(GÉNIE MÉCANIQUE)
FÉVRIER 1998

© Catherine Baucher dit Morency, 1998.

National Library of Canada
Bibliothèque nationale du Canada

Acquisitions and Bibliographic Services
Acquisitions et services bibliographiques

395 Wellington Street
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

395, rue Wellington
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

Your file Votre référence

Our file Notre référence

The author has granted a non-exclusive licence allowing the National Library of Canada to reproduce, loan, distribute or sell copies of this thesis in microform, paper or electronic formats.

L'auteur a accordé une licence non exclusive permettant à la Bibliothèque nationale du Canada de reproduire, prêter, distribuer ou vendre des copies de cette thèse sous la forme de microfiche/film, de reproduction sur papier ou sur format électronique.

The author retains ownership of the copyright in this thesis. Neither the thesis nor substantial extracts from it may be printed or otherwise reproduced without the author's permission.

L'auteur conserve la propriété du droit d'auteur qui protège cette thèse. Ni la thèse ni des extraits substantiels de celle-ci ne doivent être imprimés ou autrement reproduits sans son autorisation.

0-612-37429-7

Canada

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

Ce mémoire intitulé:

MESURE DES CONTRAINTES
RÉSIDUELLES DANS LES PIÈCES
MOULÉES PAR INJECTION

présenté par:BAUCHER DIT MORENCY Catherine
en vue de l'obtention du diplôme de :Maîtrise ès sciences appliquées
a été dûment accepté par le jury d'examen constitué de:

M. FISA Bohuslav, Ph.D., président
M. SANSCHAGRIN Bernard, Dr.Ing., membre et directeur de recherche
M. TROCHU François, Ph.D., membre

REMERCIEMENTS

J'aimerais tout d'abord remercier mon directeur de recherche, M. Bernard Sanschagrin, pour ses conseils et l'aide qu'il m'a apportée.

Je remercie aussi l'Institut des Matériaux Industriels du Conseil National de Recherches Canada pour avoir gracieusement accepté de mouler mes échantillons.

J'aimerais souligner l'aide technique des techniciens lors de la réalisation de mon montage expérimental.

Enfin, je tiens à remercier tout particulièrement François, Silvio et Stéphane, dont les conseils et les encouragements m'ont aidé tout au long de ce projet.

RÉSUMÉ

Ce rapport présente les résultats d'une étude portant sur l'influence des conditions de moulage sur la distribution et l'amplitude des contraintes résiduelles dans des échantillons de polypropylène et de polycarbonate moulés par injection. Les conditions de moulage étudiées sont la température du moule et la vitesse d'injection.

Les échantillons ont été moulés dans les conditions suivantes : températures du moule de 15°C, 40°C et 100°C pour le polypropylène et de 10°C, 41°C et 75°C pour le polycarbonate, avec des vitesses d'injection de 1,3 cm/s, 3,8 cm/s et 7,6 cm/s pour les deux matériaux.

La méthode d'enlèvement par couche, mise au point par Treuting et Read, a été utilisée. Les contraintes résiduelles étant calculées à partir des courbures des échantillons, nous avons développé une méthode numérique pour mesurer ces courbures : les échantillons sont tout d'abord photographiés, puis les courbures sont déterminées à l'aide d'un système de traitement par image.

Les résultats obtenus montrent que les échantillons présentent des contraintes résiduelles en tension au centre et en compression en surface. Dans tous les cas, les contraintes résiduelles sont plus élevées pour le polypropylène que pour le polycarbonate et ce, tant à la surface des échantillons qu'au centre. Une augmentation et une diminution de

la température du moule conduisent à une diminution des contraintes résiduelles, tandis qu'aucune conclusion ne peut être tirée d'une variation de la vitesse d'injection. De plus, une variation de la température du moule ou de la vitesse d'injection influence davantage le niveau des contraintes résiduelles situées à la surface des échantillons que le niveau des contraintes résiduelles au centre.

Une évaluation de l'influence de l'incertitude lors de la mesure des courbures des échantillons montre que les calculs des contraintes résiduelles présentent une grande sensibilité à la mesure des courbures. Ainsi, l'incertitude rattachée à la mesure des courbures est d'au plus 20%, tandis que l'incertitude reliée aux calculs des contraintes résiduelles peut s'élever jusqu'à 100% dans certains cas. Considérant ces résultats, les distributions de contraintes résiduelles obtenues en utilisant la méthode de Treuting et Read devraient être utilisées d'une manière qualitative plutôt que quantitative.

ABSTRACT

The objective of this work is to study the influence of the molding conditions on the distribution and magnitude of residual stresses in polypropylene and polycarbonate bars. The molding conditions studied are the mold temperature and the injection speed.

The exact molding conditions are : mold temperatures of 15°C, 40°C and 100°C for the polypropylene and of 10°C, 41°C and 75°C for the polycarbonate, with injection speeds of 1,3 cm/s, 3,8 cm/s et 7,6 cm/s for both materials.

The layer removal method developed by Treuting and Read was used. The residual stresses are determined from measurements of sample curvatures following layer removal. The method is enhanced in the present study by using digital photography of the deformed samples and by calculating curvatures through numerical image analysis.

Results show that the molded samples are subjected to tension at the mid plane and compression at the surfaces. In all cases, residual stresses in the polypropylene samples are higher than in the polycarbonate samples. Where as an increase and decrease in mold temperature result in decrease in residual stresses, nothing can be concluded with respect to variation in injection speed. Variations in the molding conditions have more effect on the residual stresses at the surface than in the mid plane of the samples.

An evaluation of the effect of scatter in curvature measurements on the calculated values of residual stresses was performed. Results show that the scatter in the curvature measurements is in the order of 20% and causes variation in the calculated values of residual stresses in the order of 100%. Despite these drawbacks, the method can be used for qualitative analysis to compare the effect of molding conditions on different materials.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS iv

RÉSUMÉ v

ABSTRACT vii

TABLE DES MATIÈRES ix

LISTE DES TABLEAUX xii

LISTE DES FIGURES xiv

LISTE DES ANNEXES xvi

LISTE DES SYMBOLES xvii

CHAPITRE 1 : INTRODUCTION

1.1 Généralités 1

1.2 Organisation du mémoire 2

CHAPITRE 2 : LES CONTRAINTES RÉSIDUELLES

2.1 Revue de la littérature 3

2.2 Généralités 4

2.2.1 Définition 4

2.2.2 Types de contraintes résiduelles 4

2.3 Processus de formation 6

2.3.1 Injection du polymère 6

2.3.2 Refroidissement du polymère 7

2.4 Influence des paramètres de mise en forme 7

2.4.1 Température du polymère injecté 7

2.4.2 Pression d'injection 9

2.4.3 Température du moule 9

2.4.4 Vitesse d'injection 10

2.5 Méthodes de mesure 10

2.5.1 Perçage 11

2.5.2 Enlèvement par couche 11

2.5.3 Autres méthodes 12

CHAPITRE 3 : PROCÉDURE EXPÉRIMENTALE

3.1 Introduction 16

3.2 Matériaux et échantillons 16

3.3 Appareillage expérimental 19

3.3.1 Fraisage 19

3.3.2 Photographie 20

3.4 Mesure des contraintes résiduelles 22

3.4.1 Mesure du rayon de courbure 22

3.4.2 Calcul de la courbure 25

3.4.3 Mesure des contraintes résiduelles 26

CHAPITRE 4 : ANALYSE DES RÉSULTATS

4.1 Introduction 28

4.2 Influence de la température du moule : comparaison entre les températures basse, nominale et haute 30

4.2.1 Polypropylène 30

4.2.2 Polycarbonate 32

4.2.3 Conclusion 33

4.3 Influence de la vitesse d'injection : comparaison entre les vitesses basse, nominale et haute 36

4.3.1 Polypropylène 37

4.3.2 Polycarbonate 38

4.3.3 Conclusion 39

4.4 Influence de la mesure du rayon de courbure sur les contraintes résiduelles 50

4.4.1 Polypropylène 51

4.4.2 Polycarbonate 54

4.4.3 Discussion 57

CONCLUSION 58

RÉFÉRENCES 60

ANNEXES 64

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 3.1 : Caractéristiques des polymères 18

Tableau 3.2 : Conditions de moulage des échantillons 19

Tableau 4.1 : Températures du moule 30

Tableau 4.4 : Vitesses d'injection 36

Tableau 4.3 : Influence de la température du moule : principaux résultats (polypropylène) 42

Tableau 4.4 : Influence de la température du moule : principaux résultats (polycarbonate) 44

Tableau 4.5 : Influence de la vitesse d'injection : principaux résultats (polypropylène) 46

Tableau 4.6 : Influence de la vitesse d'injection : principaux résultats (polycarbonate) 48

Tableau 4.7 : Rayons de courbure moyens, minimums et maximums 51

Tableau 4.8 : Rayons de courbure moyens, minimums et maximums 54

Tableau I.1 : Polypropylène 64

Tableau III.1.A : Condition de moulage : nominale 69

Tableau III.1.B : Condition de moulage : température du moule basse 70

Tableau III.1.C : Condition de moulage : température du moule haute 71

Tableau III.1.D : Condition de moulage : vitesse d'injection basse 72

Tableau III.1.E : Condition de moulage : vitesse d'injection haute 73

Tableau III.2.A : Condition de moulage : nominale 74

Tableau III.2.B : Condition de moulage : température du moule basse 75

Tableau III.2.C : Condition de moulage : température du moule haute 76

Tableau III.2.D : Condition de moulage : vitesse d'injection basse 77

Tableau III.2.E : Condition de moulage : vitesse d'injection haute 78

LISTE DES FIGURES

Figure 2.1 : Distribution des contraintes résiduelles 8

Figure 2.2 : Influence de la température du polymère injecté : noryl 13

Figure 2.3 : Influence de la pression d'injection : noryl 13

Figure 2.4 : Influence de la température du moule 14

Figure 2.5 : Influence de la vitesse d'injection 15

Figure 3.1 : Méthode de l'enlèvement par couche 17

Figure 3.2 : Montage photographique 21

Figure 3.3 : Appareil photographique 23

Figure 3.4 : Photographie d'un échantillon 24

Figure 3.5 : Approximation de la courbure pour du polypropylène (condition de moulage nominale) 25

Figure 4.1 : Températures du moule : basse, nominale et haute (polypropylène) 43

Figure 4.2 : Températures du moule : basse, nominale et haute (polycarbonate) 45

Figure 4.3 : Vitesses d'injection : basse, nominale et haute (polypropylène) 47

Figure 4.4 : Vitesses d'injection : basse, nominale et haute (polycarbonate) 49

Figure 4.5 : Incertitude liée au calcul de la courbure 52

Figure 4.6 : Incertitude liée au calcul des contraintes résiduelles 53

Figure 4.7 : Incertitude liée au calcul de la courbure 55

Figure 4.8 : Incertitude liée au calcul des contraintes résiduelles 56

Figure IV.1.A : Condition de moulage : température du moule basse 79

Figure IV.1.B : Condition de moulage : température du moule haute 79

Figure IV.1.C : Condition de moulage : vitesse d'injection basse 80

Figure IV.1.D : Condition de moulage : vitesse d'injection haute 80

Figure IV.2.A : Condition de moulage : nominale 81

Figure IV.2.B : Condition de moulage : température du moule basse 81

Figure IV.2.C : Condition de moulage : température du moule haute 82

Figure IV.2.D : Condition de moulage : vitesse d'injection basse 82

Figure IV.2.E : Condition de moulage : vitesse d'injection haute 83

LISTE DES ANNEXES

ANNEXE I : Calcul du module d'Young et du coefficient de Poisson 64

ANNEXE II : Conditions de moulage des échantillons 65

ANNEXE III : Courbures des échantillons 69

ANNEXE IV : Approximation des courbures par un polynôme d'ordre trois 79

LISTE DES SYMBOLES

σ_x : contrainte résiduelle longitudinale

E : module d' Young

υ : coefficient de Poisson

ρ_x et ρ_y : courbures parallèles aux directions x et y, respectivement

x, y : coordonnées cartésiennes dans les directions longitudinales et transversales de l'échantillon

$z = z_0$: surfaces supérieures et inférieures initiales de l'échantillon

$z = z_1$: nouvelle surface formée après chaque enlèvement de couche

CHAPITRE 1

INTRODUCTION

1.1 GÉNÉRALITÉS

Pratiquement toutes les méthodes de fabrication et les procédés de mise en oeuvre entraînent la formation de contraintes résiduelles qui peuvent favoriser une rupture prématurée du matériau. Le procédé de moulage par injection des polymères n'échappe pas à cette règle : en effet, les polymères moulés par injection présentent des contraintes résiduelles plus ou moins importantes, mais dont l'effet sur les propriétés mécaniques et en fatigue peut être indésirable.

De ce fait, il existe plusieurs méthodes permettant d'évaluer la distribution et l'amplitude des contraintes résiduelles dans les matériaux. Une des méthodes expérimentales les plus couramment utilisées pour les polymères est la méthode d'enlèvement par couche. Du côté numérique, plusieurs logiciels simulent le procédé de moulage par injection des polymères. Il serait d'ailleurs intéressant, données expérimentales à l'appui, que ces logiciels soient en mesure de prédire avec réalisme le phénomène complexe de formation des contraintes résiduelles. En ce sens, les résultats expérimentaux présentés dans le cadre de ce mémoire pourraient être utilisés pour développer et valider les résultats numériques obtenus avec ces logiciels.

L'objectif de ce mémoire est d'évaluer l'influence des conditions de moulage sur la distribution et l'amplitude des contraintes résiduelles dans des échantillons de polypropylène et de polycarbonate et ce, en utilisant la méthode d'enlèvement par couche. Les conditions de moulage étudiées ici sont la température du moule et la vitesse d'injection.

1.2 ORGANISATION DU MÉMOIRE

Ce mémoire se divise en cinq chapitres. Dans le chapitre 2, nous présentons une brève revue de la littérature, suivi d'une description détaillée des types de contraintes résiduelles et de leur processus de formation. Nous discutons aussi des différentes méthodes de mesure des contraintes résiduelles habituellement utilisées et de l'influence des paramètres de mise en forme du procédé d'injection sur la formation des contraintes résiduelles.

Le chapitre 3 résume la procédure expérimentale utilisée. Les matériaux et les conditions de moulage choisis pour fabriquer les échantillons y sont présentés, de même que l'appareillage expérimental. Nous expliquons plus en détail le fonctionnement de la méthode de mesure des contraintes résiduelles et les développements mathématiques qui y sont rattachés.

Enfin, dans le chapitre 4, nous discutons des résultats obtenus. Des graphiques illustrent, pour chacune des conditions de moulage choisie, la distribution des contraintes résiduelles en fonction de l'épaisseur enlevée.

CHAPITRE 2

LES CONTRAINTES RÉSIDUELLES

2.1 REVUE DE LA LITTÉRATURE

La détermination expérimentale des contraintes résiduelles dans les polymères moulés par injection a été, il y a une dizaine d'années, le sujet de plusieurs articles. Bon nombre de ces articles utilisent la méthode d'enlèvement par couche mise au point par Treuting et Read (1951) pour calculer les contraintes résiduelles [27]. Nous présentons ici une brève revue des principaux travaux (utilisant la méthode de Treuting et Read) effectués dans ce domaine.

Siegmann *et al.* (1982) ont examiné l'influence des conditions de moulage sur les contraintes résiduelles dans le cas des polymères amorphes. Plus précisément, les paramètres étudiés sont : température de la matière, température du moule, vitesse d'injection et pression d'injection [21]. Sandilands et White (1980) ont, quant à eux, étudié les effets de la pression d'injection sur la formation des contraintes résiduelles [17]. Mandell *et al.* (1981) se sont intéressés aux effets des contraintes résiduelles sur le comportement en fatigue du polysulfone [11]. So et Broutman (1976) ont travaillé sur l'influence des contraintes résiduelles sur le comportement mécanique du polycarbonate soumis à des essais d'impact et de déformation [23]. Russell et Beaumont (1980) ont étudié la distribution des contraintes résiduelles à travers des plaquettes de nylon-6 [15]. Enfin, plus récemment, Pham *et al.*

(1993) se sont intéressés à la distribution des contraintes résiduelles dans des plaquettes de polycarbonate [13].

2.2 GÉNÉRALITÉS

2.2.1 Définition

Les contraintes résiduelles sont des contraintes mécaniques internes qui existent en tout point d'une pièce et ce, en l'absence de forces extérieures. Presque toutes les méthodes de fabrication introduisent des contraintes résiduelles : par exemple, dans le cas des métaux, des contraintes peuvent être générées par de l'usinage ou de l'assemblage et dans le cas des polymères, par des procédés de mise en oeuvre d'extrusion ou d'injection.

Dans les pièces fabriquées par le procédé de moulage par injection, procédé auquel nous nous intéressons plus précisément dans le cadre de ce mémoire, ces contraintes sont généralement produites par un changement non-uniforme du volume des pièces [15], conséquence d'un refroidissement non-uniforme et des pressions appliquées dans le moule lors de la phase de solidification [4].

2.2.2 Types de contraintes résiduelles

Les contraintes résiduelles sont généralement divisées en deux catégories, tout

dépendant de leurs dimensions par rapport à l'échelle de la pièce [20]. La première catégorie, les contraintes résiduelles microscopiques, regroupe les contraintes résiduelles de faible amplitude, agissant au niveau moléculaire, tandis que la seconde, les contraintes résiduelles macroscopiques, comprend les contraintes résiduelles dont l'action est importante sur le comportement mécanique de la pièce.

- **Microscopiques**

Les contraintes résiduelles dites microscopiques sont situées au niveau moléculaire. Elles sont le résultat de l'orientation moléculaire qui se produit lors de l'écoulement du polymère dans le moule. Plus précisément, lorsque des changements locaux de volume dans la pièce (au niveau moléculaire) sont restreints par le matériau tout autour, il y a formation de contraintes résiduelles microscopiques.

La présence de contraintes résiduelles microscopiques dans les pièces moulées favorise l'anisotropie de certaines propriétés à travers le matériau, comme par exemple le module d'élasticité [13]. Néanmoins, pour un matériau généralement isotrope, l'effet de ce type de contraintes sur les propriétés mécaniques est plutôt limité.

- **Macroscopiques**

Les contraintes résiduelles macroscopiques résultent des contraintes imposées au

matériau durant la fabrication, qui résultent d'un refroidissement et d'un écoulement non-uniformes du polymère [20]. Ces contraintes résiduelles affectent les propriétés mécaniques et physiques d'un matériau. Entre autres, elles diminuent la résistance en fatigue des pièces moulées. Lorsqu'additionnées aux contraintes dues à des forces extérieures ou aux effets environnementaux, elles peuvent mener à une rupture prématurée de la pièce. De ce fait, les contraintes résiduelles macroscopiques doivent être prises en considération lors du design de la pièce.

2.3 PROCESSUS DE FORMATION

Dans le procédé de moulage par injection, la formation des contraintes résiduelles s'effectue en deux temps : une première partie des contraintes apparaît durant l'étape d'injection du polymère dans le moule, tandis que la seconde prend forme pendant le refroidissement du polymère [13].

2.3.1 Injection du polymère

Lors de l'étape d'injection, le polymère est injecté à haute vitesse dans le moule, entraînant ainsi une orientation des macromolécules dans une certaine direction (généralement celle de l'écoulement du polymère) et par le fait même, la formation de contraintes. Les contraintes formées à ce stade sont dites microscopiques.

2.3.2 Refroidissement du polymère

Au fur et à mesure que le polymère est injecté dans le moule, une fine couche de matière se refroidit au contact des parois froides du moule. Une fois l'étape d'injection complétée, le moule est refroidi à la température ambiante. Comme le polymère est encore chaud au centre du moule et relativement froid en surface, il s'ensuit une situation de refroidissement non-uniforme, causant ainsi l'apparition de contraintes résiduelles macroscopiques. Une fois la pièce démoulée et les conditions d'équilibre atteintes, on obtient un profil de contraintes classique, soit une région extérieure en compression et une région intérieure en tension (figure 2.1). Il est toutefois intéressant de souligner que certains auteurs présentent des résultats contraires (section 2.4.4).

2.4 INFLUENCE DES PARAMÈTRES DE MISE EN FORME

La répartition et le niveau des contraintes résiduelles dans une pièce moulée par injection dépendent des conditions auxquelles cette pièce a été fabriquée. Plusieurs paramètres jouent un rôle important dans le processus de formation des contraintes résiduelles : nous présentons plus en détail quatre de ces paramètres dans les pages qui suivent.

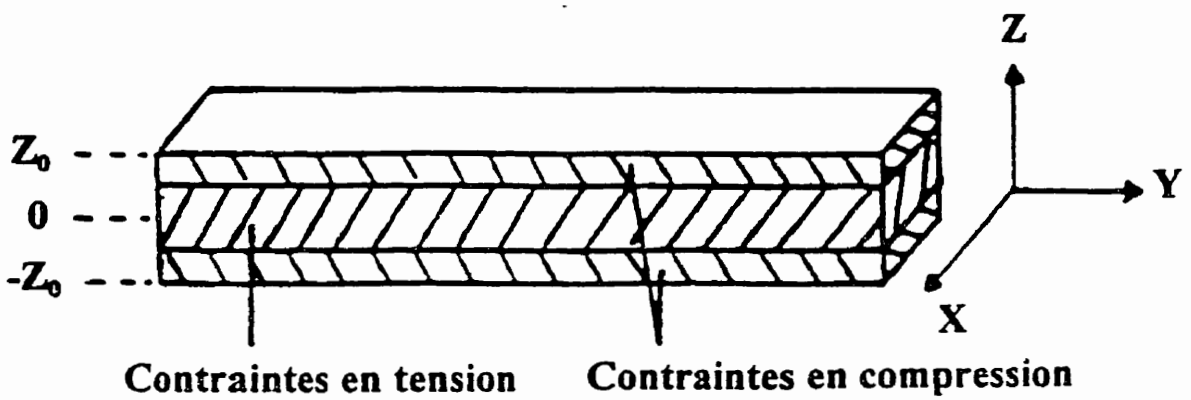


Figure 2.1 - Distribution des contraintes résiduelles (Russell et Beaumont) [15]

2.4.1 Température du polymère injecté

Les résultats expérimentaux obtenus par Siegmann *et al.* [21] avec des plaques de Noryl montrent qu'un changement de la température de la matière injectée influence principalement les contraintes résiduelles situées en surface de la pièce : une augmentation de la température de la matière apporte une diminution des contraintes résiduelles (figure 2.2, page 13).

2.4.2 Pression d'injection

D'après Siegmann *et al.* [21], l'effet d'une modification de la pression d'injection sur les contraintes résiduelles pour du Noryl suit sensiblement le même profil que celui obtenu en faisant varier la température de la matière, à savoir qu'une augmentation de la pression d'injection conduit à une diminution des contraintes résiduelles et que son influence se fait surtout sentir à la surface de la pièce (figure 2.3, page 13). D'un autre côté, Sandilands et White [17] ont noté qu'une variation de la pression d'injection de 37 à 143 MPa n'avait qu'une incidence très faible sur les contraintes résiduelles pour des plaques de polystyrène.

2.4.3 Température du moule

Les essais menés par Russell et Beaumont [15] sur des plaques de nylon-6 et ceux effectués par Siegmann *et al.* sur du Noryl [21] montrent que l'amplitude des contraintes

résiduelles est inversement proportionnelle à la température du moule. Dans les deux cas, le profil de distribution des contraintes résiduelles obtenues en modifiant la température du moule est invariablement semblable : en surface, des contraintes résiduelles en compression et à l'intérieur, des contraintes résiduelles en tension (figure 2.4, page 14). Par contre, les résultats obtenus par Pham *et al.* [13] avec des plaques de polycarbonate montrent qu'une variation de la température du moule n'exerce qu'une influence très restreinte sur la distribution des contraintes résiduelles.

2.4.4 Vitesse d'injection

Selon Siegmann *et al.* [21], qui ont travaillé sur des plaques de Noryl, lorsque les vitesses d'injection sont basses, les contraintes résiduelles en tension se développent à la surface de la pièce. Éventuellement, pour des vitesses d'injection plus élevées, les contraintes résiduelles obtenues présentent un profil plus classique, soit des contraintes résiduelles en compression en surface et en tension à l'intérieur (figure 2.5 a, page 15). Cependant, en utilisant des plaques de polycarbonate, Pham *et al.* [13] ont obtenu des contraintes résiduelles en tension en surface et en compression à l'intérieur, ce qu'ils expliquent par l'utilisation de moules différents (figure 2.5 b, page 15). Néanmoins, il est intéressant de noter que les résultats ci-haut concordent sur le point suivant : une augmentation de la vitesse d'injection provoque une augmentation des contraintes résiduelles importante en surface et très faible à l'intérieur.

2.5 MÉTHODES DE MESURE

Plusieurs méthodes expérimentales peuvent être utilisées pour évaluer la distribution des contraintes résiduelles dans les matériaux polymériques. Ces méthodes sont basées sur la perturbation de l'état d'équilibre des contraintes ou encore sur les propriétés physiques sensibles à la contrainte. Nous n'aborderons ici que les méthodes les plus couramment utilisées dans la littérature, soit la technique du perçage et celle de l'enlèvement par couche.

2.5.1 Perçage

Cette méthode présente l'avantage de ne causer qu'un endommagement très localisé de la pièce dans laquelle les contraintes doivent être évaluées. Le principe est très simple : il s'agit de percer un trou dans l'échantillon, ce qui entraîne un relâchement important des contraintes résiduelles situées aux abords du trou. Ce relâchement est ensuite mesuré à l'aide de quatre jauges de déformation situées autour du trou dans des directions perpendiculaires les unes par rapport aux autres [14].

Quoique très populaire pour les métaux, la méthode du perçage n'est pas fréquemment utilisée dans le cas des matériaux polymériques car elle présente plusieurs difficultés, comme le perçage du trou, qui doit être fait sans induire de contraintes supplémentaires dans le matériau, ou encore la nécessité d'utiliser un équipement spécial pour coller les jauges [7].

2.5.2 Enlèvement par couche

De toutes les méthodes de mesure de contraintes résiduelles disponibles actuellement, celle de l'enlèvement par couche est la plus appropriée et la plus utilisée dans le cas des polymères [18]. Comme elle permet d'étudier non seulement les contraintes en surface, mais aussi celles présentes au milieu de la pièce, il est possible d'obtenir la distribution des contraintes à travers toute l'épaisseur de la pièce, ce qui est un net avantage sur les autres méthodes.

Selon cette méthode, il s'agit de perturber l'état d'équilibre des contraintes présentes dans une pièce. Pour ce faire, de très fines couches de matériau sont enlevées successivement de la surface d'une plaquette rectangulaire. L'équilibre interne des contraintes étant brisé, la plaquette courbe en forme d'arc de cercle. Les contraintes résiduelles peuvent être par la suite calculées à partir de ces arcs de cercle [27].

2.5.3 Autres méthodes

A titre de références, mentionnons entre autres la photoélasticité [12], le relâchement des contraintes [9], la biréfringence [16] ainsi que la diffraction par rayons-X [2].

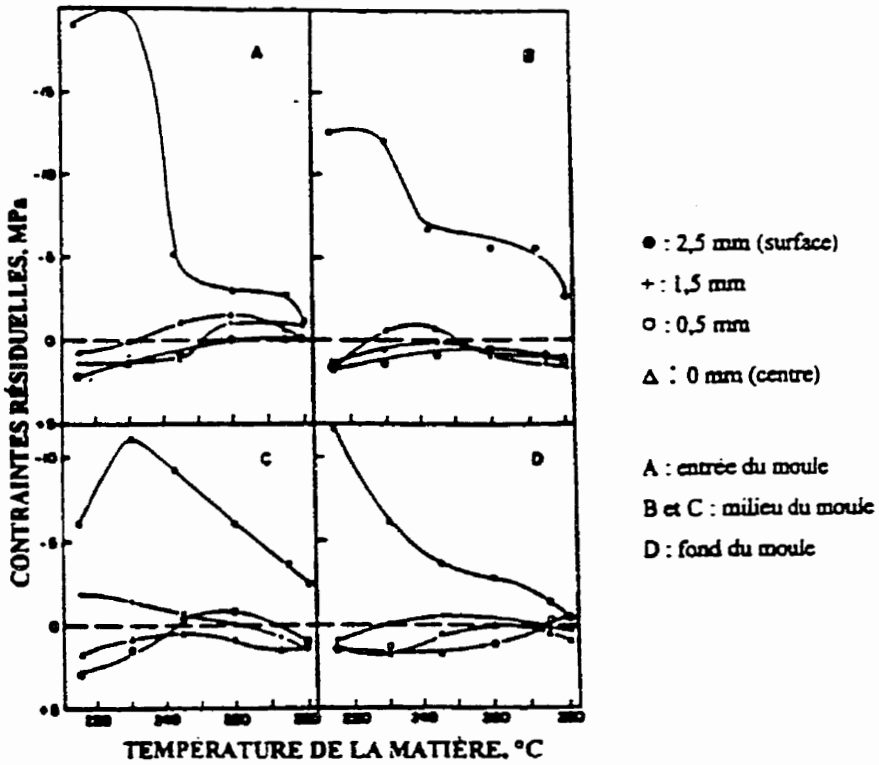


Figure 2.2 - Influence de la température du polymère injecté:Noryl (Siegmann *et al.*) [21]

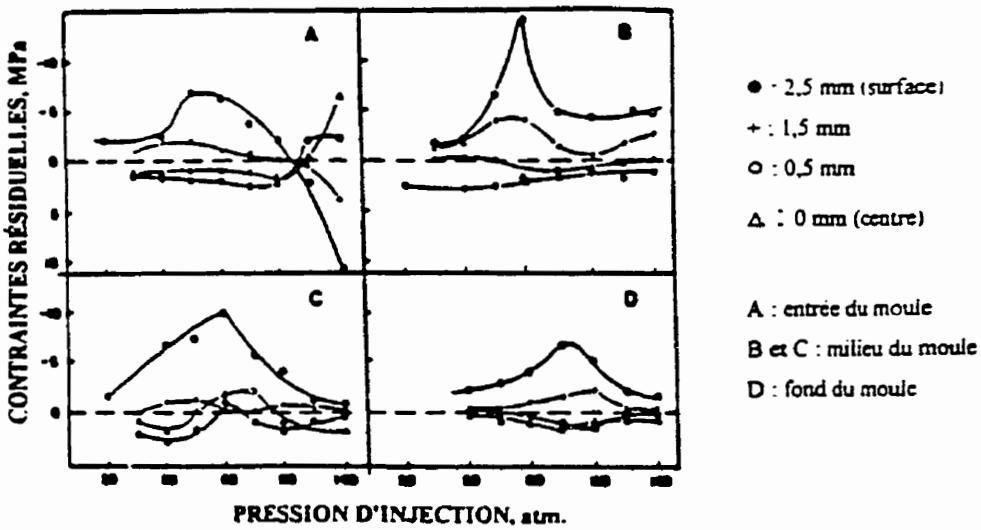
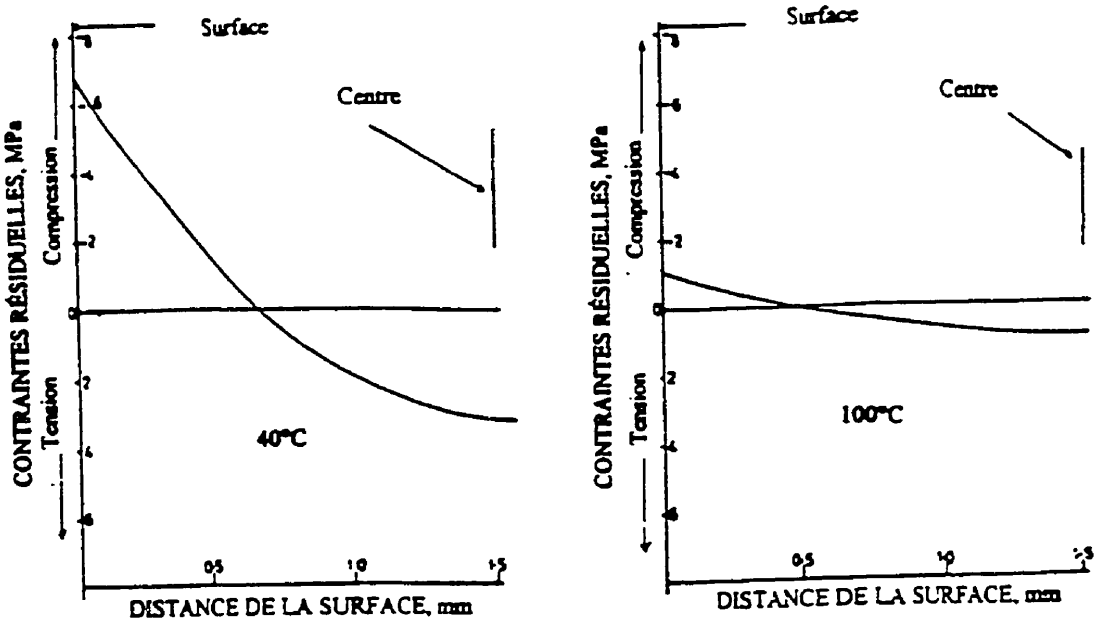
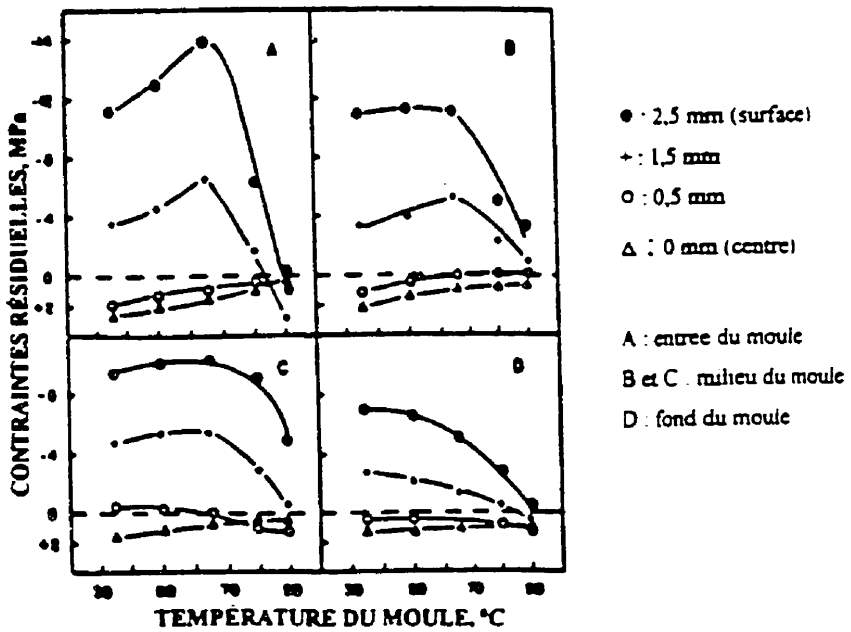


Figure 2.3 - Influence de la pression d'injection:Noryl (Siegmann *et al.*) [21]

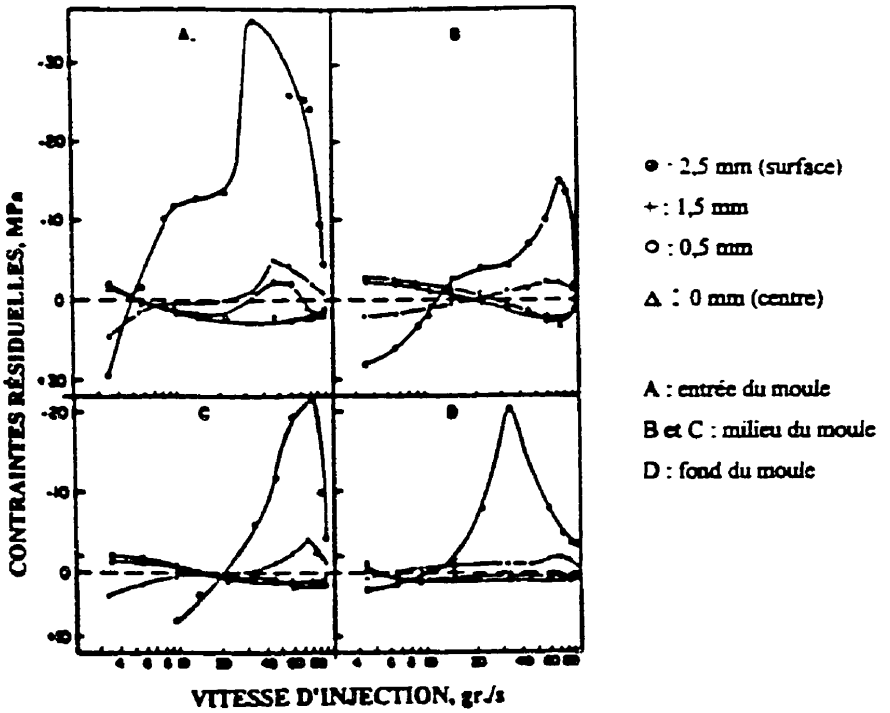


a) nylon-6 (Russell et Beaumont) [15]

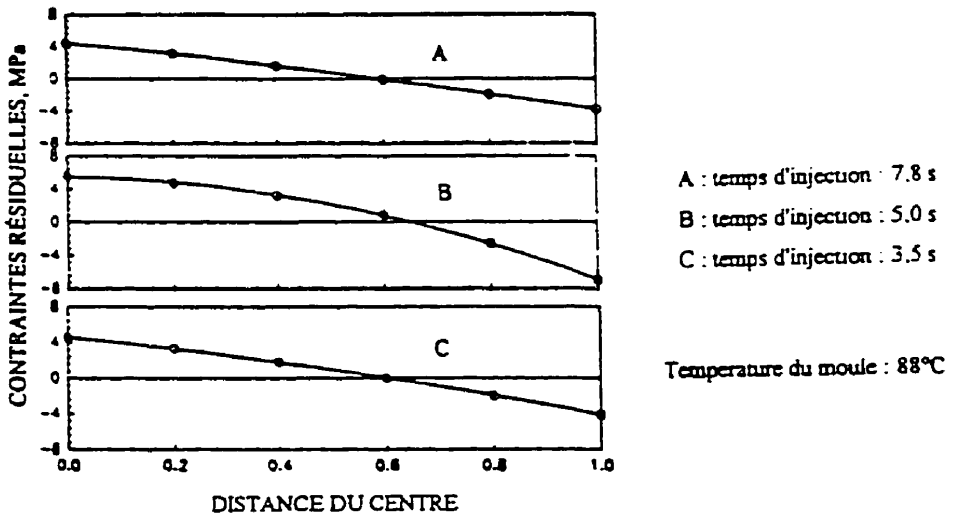


b)Noryl (Siegmann *et al.*) [21]

Figure 2.4 - Influence de la température du moule



a)Noryl (Siegmann *et al.*) [21]



b) polycarbonate (Pham *et al.*) [13]

Figure 2.5 - Influence de la vitesse d'injection

CHAPITRE 3

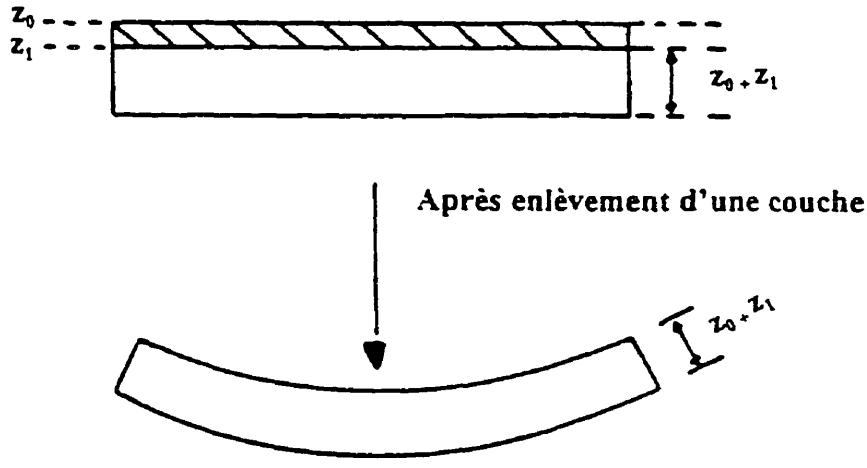
PROCÉDURE EXPÉRIMENTALE

3.1 INTRODUCTION

Afin d'être en mesure de suivre l'évolution des contraintes résiduelles dans les échantillons, nous avons opté pour une méthode d'évaluation des contraintes résiduelles dite destructrice (c'est-à-dire qui endommage le matériau), soit l'enlèvement par couche. Le principe de cette méthode est le suivant : lorsqu'une ou plusieurs couches de matière sont successivement enlevées de la surface d'un échantillon, ce dernier courbe d'une façon plus ou moins prononcée (figure 3.1). Les courbures ainsi obtenues sont calculées à l'aide d'un système de traitement d'image. Une fois les valeurs des courbures connues, il est facile, par le biais de manipulations mathématiques, d'obtenir aussi les contraintes résiduelles.

3.2 MATÉRIAUX ET ÉCHANTILLONS

Les matériaux étudiés sont du polypropylène 6301 provenant de la compagnie Montel Canada Inc. et du polycarbonate, également de la même compagnie. Les principales caractéristiques de ces polymères se retrouvent au tableau 3.1 ainsi qu'à l'annexe I.



où z_0 : épaisseur initiale
$z_0 - z_1$: épaisseur enlevée

Figure 3.1 - Méthode de l'enlèvement par couche (Russell et Beaumont) [15]

Tableau 3.1 - Caractéristiques des polymères

Matériaux	Structure cristalline	Module d' Young (GPa)	Coefficient de Poisson
polypropylène	semi-cristallin	1,38	0,40
polycarbonate	amorphe	2,47	0,38

Les échantillons utilisés ont été moulés à l'Institut des Matériaux Industriels sur une presse à injection Engel de 65 tonnes. Les dimensions des échantillons, qui se présentent sous forme de plaquettes rectangulaires, sont de 127 x 32 x 3 mm.

Comme mentionné au chapitre deux, le procédé de moulage par injection entraîne l'apparition de contraintes résiduelles dans les pièces moulées. Ces contraintes résiduelles sont présentes d'une manière plus ou moins importante, tout dépendant des paramètres de mise-en-forme choisis pour la fabrication.

Afin d'étudier l'effet de différentes conditions de moulage sur la distribution et l'amplitude des contraintes résiduelles dans les pièces moulées, les échantillons ont été préparés en faisant varier les paramètres de mise-en-forme les plus susceptibles d'influencer les contraintes résiduelles, soit la température du moule et la vitesse d'injection. Dans les deux cas, nous avons essayé d'obtenir les conditions extrêmes de moulage, sans toutefois dégrader le matériau : vitesse d'injection la plus rapide et la plus lente possible et température du moule la plus basse et la plus élevée possible. Ces conditions de moulage sont présentées au tableau suivant. Les conditions exactes de moulage sont détaillées à l'annexe II.

Tableau 3.2 - Conditions de moulage des échantillons

Polypropylène		Polycarbonate	
Température du moule (°C, ± 0,5°C)	**Vitesse d'injection (cm/s, ± 0,6cm/s)**	**Température du moule (°C, ± 0,5°C)**	**Vitesse d'injection (cm/s, ± 0,6cm/s)**
41	3,8	40	3,8
41	7,6	40	7,6
40	1,3	40	1,3
71	3,8	100	3,8
15	3,8	20	3,8

3.3 APPAREILLAGE EXPÉRIMENTAL

L'étude des contraintes résiduelles a nécessité l'utilisation d'une fraiseuse pour effectuer l'enlèvement des couches de matériau ainsi qu'un appareil photo numérique et un système de traitement d'image pour mesurer les courbures.

3.3.1 Fraisage

L'enlèvement des couches a été effectué sur des fraiseuses SHW et MAXMILL avec, pour conditions d'opération, une vitesse de coupe de 560 rpm et une vitesse d'avance de 4,6 cm/min (1,8 po/min). Pour des échantillons provenant de chacune des conditions de moulage énumérées précédemment (tableau 3.2), nous avons procédé à des enlèvements de

0,25 mm à la fois, jusqu'à ce que la moitié de l'épaisseur originale de l'échantillon, qui est de 3 mm, soit enlevée (la méthode d'enlèvement de couches successives présuppose que les contraintes sont réparties symétriquement de part et d'autre de l'axe neutre de l'échantillon) (figure 2.1, page 8). Comme nous avions beaucoup d'échantillons à traiter en peu de temps, plutôt que de travailler toujours avec les mêmes échantillons en mesurant la courbure à chaque enlèvement de 0,25 mm, nous avons préféré utiliser des échantillons différents pour chaque épaisseur enlevée, ce qui nous a permis de réduire les délais dus à l'usinage. Plus précisément, nous avons procédé de la manière suivante : pour un premier lot d'échantillons, nous avons enlevé une seule couche de 0,25 mm : la courbure a ensuite été mesurée. Pour un second lot d'échantillons, nous avons retranché deux couches successives de 0,25 mm (0,50 mm au total) et mesuré la courbure. Pour un troisième lot d'échantillons, nous avons enlevé trois couches de 0,25 mm chacune (0,75 mm au total) et évalué la courbure et ainsi de suite jusqu'à ce que 1,50 mm aient été retranchés. Nous obtenons ainsi les valeurs des contraintes résiduelles pour six profondeurs différentes, ce qui permet une évaluation intéressante de la distribution des contraintes résiduelles à travers l'épaisseur.

3.3.2 **Photographie**

Pour pallier à différentes difficultés, dont le nombre important d'échantillons à mesurer, nous avons mis au point une méthode de mesure de la courbure tout à fait originale et très simple d'utilisation : les échantillons usinés sont photographiés à tour de rôle par un appareil photo relié à un système d'acquisition d'image ODCI (figure 3.2). Les images

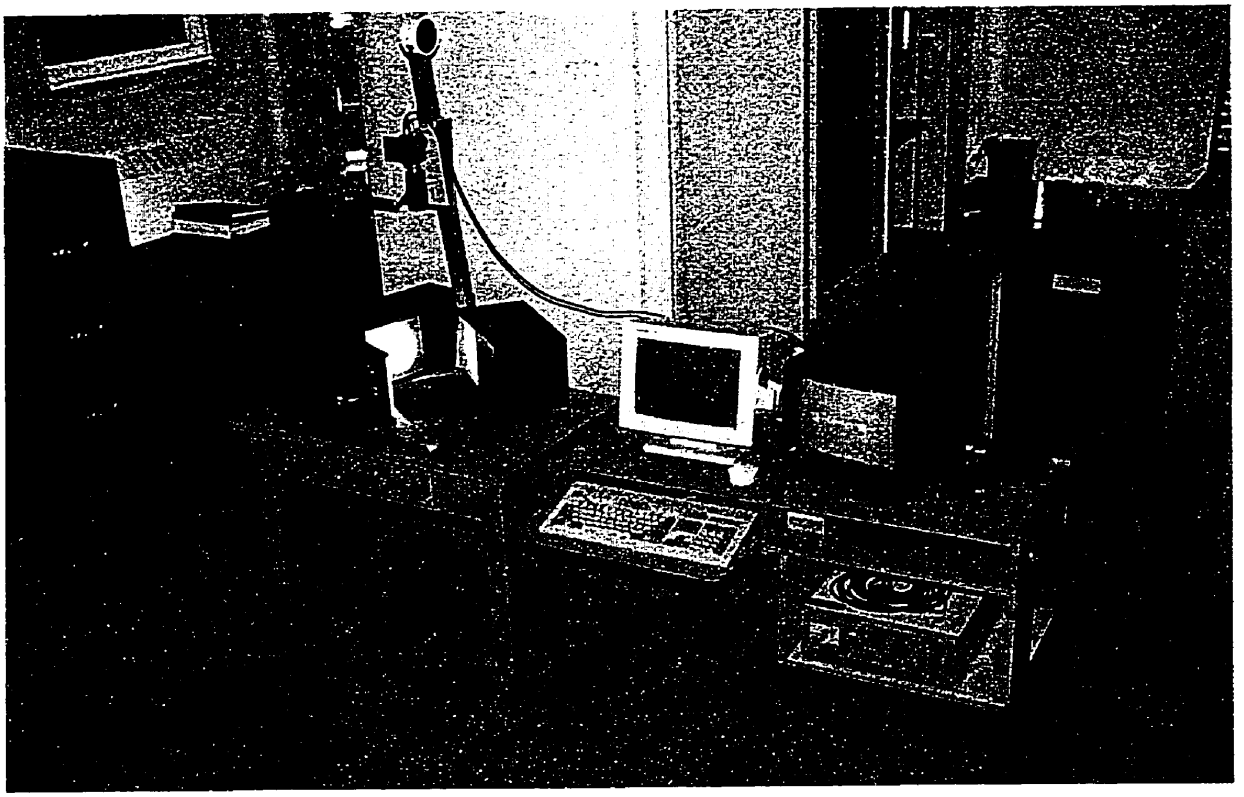


Figure 3.2 - Montage photographique

numériques ainsi recueillies sont par la suite transformées en matrices de m x m pixels, contenant les valeurs numériques associées aux différents niveaux de gris de la photographie, ce qui en facilite l'analyse. Par exemple, pour mesurer la courbure d'un échantillon de polypropylène, il suffit de prendre une photo de cet échantillon (figure 3.3). Cette photo (figure 3.4) est contenue dans un fichier-image. Comme un fichier-image définit une image en pixels et non pas en coordonnées numériques, il doit être transformé pour être lu correctement. Pour ce faire, nous utilisons d'une part une photographie d'un témoin (une feuille de papier) dont les dimensions sont connues et d'autre part, un programme pour permettre l'ouverture et la lecture du fichier-image. Une fois le fichier-image ouvert nous pouvons, à l'aide du témoin, convertir les valeurs des pixels en mm et par le biais d'une régression linéaire, trouver la courbure de l'échantillon. Ce procédé présente l'avantage non-négligeable de permettre une lecture rapide d'un grand nombre d'échantillons et réduit considérablement les erreurs dues aux manipulations.

3.4 MESURE DES CONTRAINTES RÉSIDUELLES

3.4.1 Mesure du rayon de courbure

A l'aide d'un programme de régression linéaire, les rayons de courbure des échantillons sont approximés par un polynôme de degré deux (arc de cercle), ce qui correspond de très près à la réalité. Les valeurs des rayons de courbure pour chacun des échantillons sont données dans l'annexe III.

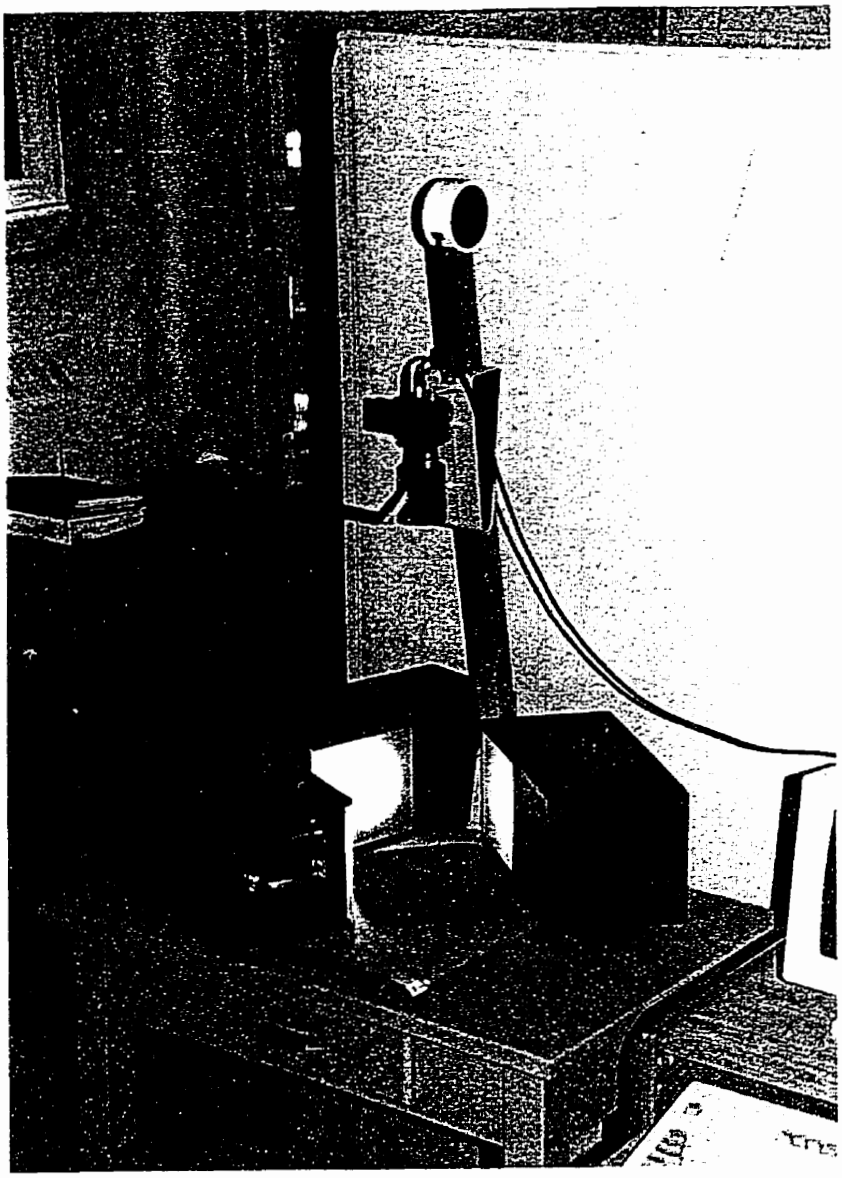


Figure 3.3 - Appareil photographique

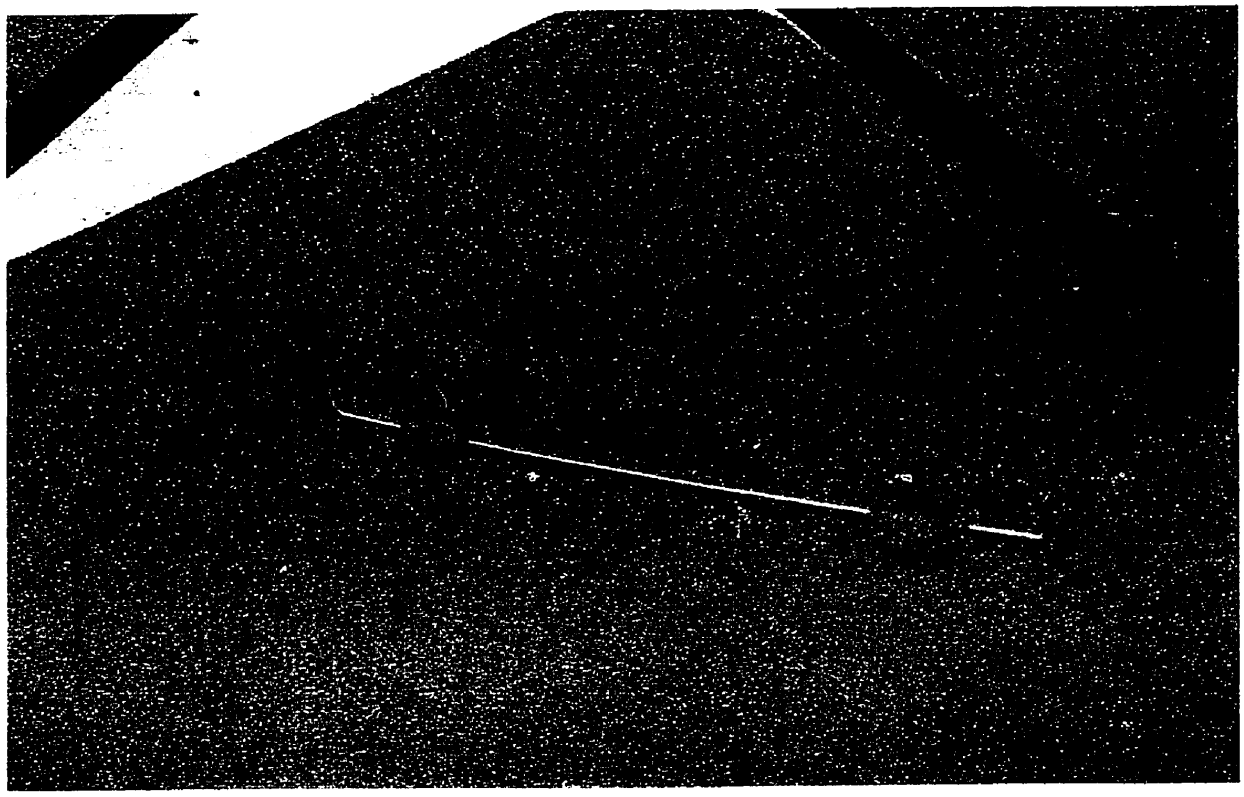


Figure 3.4 - Photographie d'un échantillon

3.4.2 Calcul de la courbure

Les rayons de courbure mesurés sont ensuite transformés en courbures et mis sous forme graphique. Pour ce faire, les courbures sont approximées par un polynôme d'ordre trois. Par exemple, pour du polypropylène, avec la condition de moulage nominale, nous obtenons :

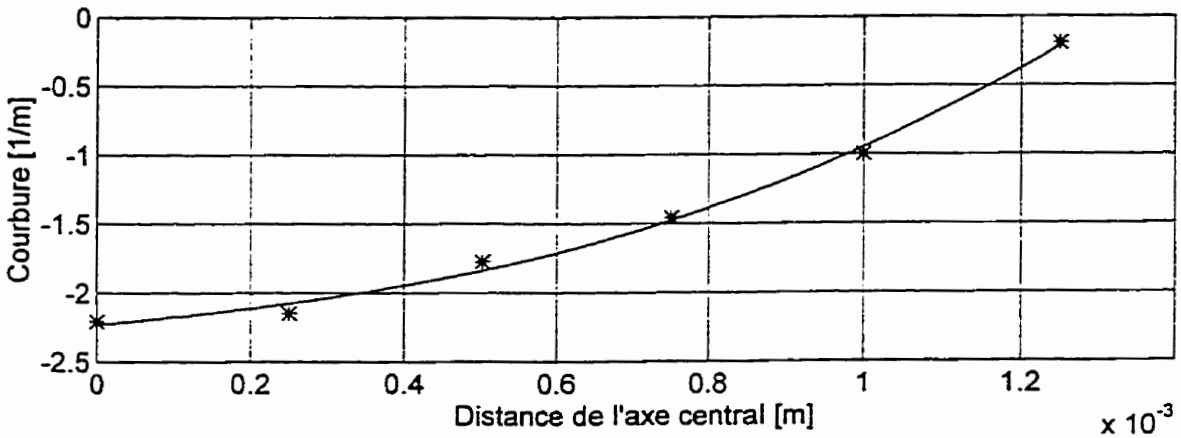


Figure 3.5 - Approximation de la courbure pour du polypropylène (condition de moulage nominale)

Les autres approximations des courbures sont présentés à l'annexe IV.

3.4.3 Mesure des contraintes résiduelles

Une fois les valeurs des courbures en fonction de l'épaisseur enlevée connues, nous calculons les contraintes résiduelles avec la méthode mise au point par Treuting et Read. Pour un cas général de contraintes biaxiales, nous avons :

$$\sigma_x(z_1) = \frac{-E}{6(1-\upsilon^2)} \left[(z_0 + z_1)^2 \left[\frac{d\,\rho_x(z_1)}{dz_1} + \upsilon \frac{d\,\rho_y(z_1)}{dz_1} \right] + 4(z_0 + z_1)\left[\rho_x(z_1) + \upsilon\,\rho_y(z_1) \right] - 2\int_{z_1}^{z_0} \left[\rho_x(z) + \upsilon\,\rho_y(z) \right] dz \right] \quad (1)$$

où σ_x : contrainte résiduelle longitudinale ;

E : module d'Young ;

υ : coefficient de Poisson ;

ρ_x et ρ_y : courbures parallèles aux directions x et y, respectivement ;

x, y : coordonnées cartésiennes dans les directions longitudinales et transversales de l'échantillon ;

$z = \pm z_0$: surfaces supérieures et inférieures initiales de l'échantillon ;

$z = z_1$: nouvelle surface formée après chaque enlèvement de couche.

Nous utilisons la même équation pour calculer σ_y. La courbure dans la direction y (transversale) étant négligeable ($\rho_y \approx 0$), l'équation (1) se simplifie et devient :

$$\sigma_x(z_1) = \sigma_y(z_1) = \frac{-E}{6\,(1-\upsilon)} \left[(z_0+z_1)^2 \frac{d\rho_x(z_1)}{dz_1} + 4\,(z_0+z_1)\,\rho_x(z_1) - 2\int_{z_1}^{z_0} \rho_x(z)dz \right] \quad (2)$$

Les dérivées et intégrales de la courbure présentes dans les équations (1) et (2) sont obtenues graphiquement.

CHAPITRE 4

ANALYSE DES RÉSULTATS

4.1 INTRODUCTION

Ce chapitre explique l'influence des conditions de moulage sur la distribution des contraintes résiduelles dans des plaquettes de polypropylène et de polycarbonate. Plus précisément, les paramètres d'injection étudiés ici sont la température du moule et la vitesse d'injection.

Les contraintes résiduelles se répartissent de manière inégale à travers l'épaisseur des pièces moulées. Ainsi, les contraintes résiduelles en surface sont généralement des contraintes en compression, tandis que celles situées au milieu de la pièce sont en tension. Considérant ce fait, nous avons trouvé intéressant et pertinent de présenter les résultats de la façon suivante : pour chacune des conditions de moulage étudiées, la distribution des contraintes résiduelles est montrée en fonction de la distance par rapport au centre de l'échantillon, ce qui permet une meilleure compréhension de la distribution des contraintes.

À ce point-ci, une remarque sur la méthode expérimentale utilisée s'impose. En effet, la méthode de Treuting et Read part du principe que le module de Young demeure constant à travers toute l'épaisseur de la pièce. En réalité, Siegmann *et al.* [17] ont montré que ce n'est pas le cas. Ainsi, dans des pièces moulées par injection, il peut y avoir une différence

importante entre le module d'Young calculé en surface et au centre de la pièce. Cette différence s'explique par les phénomènes d'orientation moléculaire et de refroidissement. Cependant, et malgré ces réserves, les auteurs considèrent que les résultats obtenus en utilisant la méthode mise au point par Treuting et Read constituent une bonne approximation de la distribution des contraintes résiduelles.

Le présent chapitre se divise en deux sections : la première section présente les résultats obtenus avec le polypropylène et le polycarbonate pour trois températures de moule différentes et la deuxième section, les résultats obtenus avec le polypropylène et le polycarbonate pour trois vitesses d'injection différentes.

4.2 INFLUENCE DE LA TEMPÉRATURE DU MOULE : COMPARAISON ENTRE LES TEMPÉRATURES BASSE, NOMINALE ET HAUTE

Afin d'étudier l'effet de la température du moule sur la distribution des contraintes résiduelles à travers l'épaisseur des plaquettes de polypropylène et de polycarbonate, les plaquettes ont été moulées à trois températures différentes : une température nominale, une température très basse et une température très élevée, la température nominale servant d'étalon de comparaison aux deux autres températures. Ces températures sont présentées au tableau 4.1.

Tableau 4.1 - Températures du moule (°C, ± 0,5°C)

Température	Polypropylène	Polycarbonate
basse	15	20
nominale	41	40
haute	75	100

Dans le but de mieux visualiser l'incidence d'une variation de la température du moule sur la distribution des contraintes résiduelles, nous présentons plusieurs courbes sur chacun des graphiques suivants. Tout d'abord, nous comparons entre elles les courbes des températures de moule basse, nominale et haute obtenues avec le polypropylène (figure 4.1) et ensuite, les courbes des températures basse, nominale et haute (figure 4.2) obtenues avec le polycarbonate. Ces figures se retrouvent à la fin du chapitre, aux pages 43 et 45.

4.2.1 Polypropylène

Conditions de moulage : température de moule de 15°C pour la température basse, de 41°C pour la température nominale et de 75°C pour la température haute, avec une vitesse d'injection de 3,8 cm/s dans les trois cas.

Résultats et discussion : les courbes de distribution des contraintes obtenues avec ces trois conditions de moulage sont présentées à la figure 4.1 (page 43). Les principaux résultats sont présentés au tableau 4.3 (page 42) : valeurs maximums obtenues en tension et en compression, distance du centre de l'échantillon à laquelle sont situés ces maximums et

distance à laquelle la transition tension-compression s'effectue.

Le maximum en tension est atteint près du milieu de l'échantillon pour les trois températures. Le maximum en compression est situé près de la surface de l'échantillon pour les températures nominale et haute et à mi-chemin entre le centre et la surface de l'échantillon pour la température basse. Ce dernier résultat est assez surprenant, vu que théoriquement, nous devrions retrouver le maximum assez près de la surface de l'échantillon.

Pour les températures nominale et haute, l'amplitude des contraintes résiduelles situées à la surface de l'échantillon (compression) est environ 2 fois plus élevée que celle des contraintes résiduelles situées au milieu (tension), comparativement à la température basse, pour laquelle ce sont les contraintes résiduelles au milieu qui sont plus élevées et ce, par un facteur d'environ 1,4.

Les courbes des températures nominale et haute présentent un profil parabolique, ce qui n'est pas le cas pour celle de la température basse, qui s'en éloigne à cause de sa distribution de contraintes en surface : à 1,13 mm du centre de l'échantillon, la pente commence à remonter au lieu de descendre.

Pour les trois températures, les profils de distribution de contraintes résiduelles obtenus sont semblables à ceux retrouvés dans la littérature, en ce sens que les couches extérieures (surface) sont en compression et celles intérieures (milieu), en tension.

4.2.2 Polycarbonate

Conditions de moulage : température de moule de 20°C pour la température basse, de 40°C pour la température nominale et de 100°C pour la température haute, avec une vitesse d'injection de 3,8 cm/s dans les trois cas.

Résultats et discussion : les courbes de distribution des contraintes obtenues avec ces deux conditions de moulage sont présentées à la figure 4.2 (page 45). Les principaux résultats sont présentés au tableau 4.4 (page 44) : valeurs maximums obtenues en tension et en compression, distance du centre de l'échantillon à laquelle sont situés ces maximums et distance à laquelle la transition tension-compression s'effectue.

Pour les températures nominale et basse, le maximum en tension est situé près du coeur de l'échantillon, tandis que pour la température haute, ce maximum est plus éloigné du centre. Le maximum en compression est atteint près de la surface de l'échantillon pour les trois températures.

Pour la température nominale, les contraintes résiduelles sont 2,7 fois plus élevées en surface (compression) qu'au centre (tension), comparativement à la température basse, pour laquelle les contraintes résiduelles en surface ne sont que 1,4 fois plus élevées que celles au centre. Pour la température haute, les contraintes résiduelles sont sensiblement les mêmes à la surface et au centre.

Les trois courbes suivent une distribution parabolique.

Dans les trois cas, les profils de distribution des contraintes résiduelles correspondent à ceux présentés dans la littérature : les couches extérieures (surface) sont en compression et celles intérieures (milieu), en tension.

Tant en tension qu'en compression, les valeurs minimums de contraintes résiduelles sont obtenues avec les échantillons moulés à basse température. D'autres essais sont nécessaires pour déterminer si ces résultats montrent une tendance, en désaccord avec la théorie, ou s'ils sont plutôt le fait d'un choix de température de moule très bas.

4.2.3 Conclusion

Des deux polymères étudiés, le polypropylène est celui qui présente les contraintes résiduelles les plus élevées et ce, tant en tension qu'en compression.

Les résultats que nous obtenons pour une diminution de la température du moule ne correspondent pas à ceux présentés par Russel et Beaumont [14] et Siegmann *et al.* [20], qui ont montré que l'amplitude des contraintes résiduelles est inversement proportionnelle à la température du moule. Dans notre cas, nous obtenons tout le contraire : une diminution de la température du moule entraîne une diminution des contraintes résiduelles.

Nous pouvons peut-être expliquer cette divergence des résultats par le fait que les températures de moule basses auxquelles nous avons moulé les échantillons (15°C pour le polypropylène et 20°C pour le polycarbonate) sont les températures les plus basses possibles pour obtenir des échantillons complets. En deçà de ces températures, les échantillons sont incorrectement moulés. Ainsi, ces températures seraient trop basses pour obtenir des résultats compatibles avec ceux présentés dans la littérature. Néanmoins, les résultats que nous obtenons avec une température de moule basse sont intéressants. D'autres essais sont nécessaires pour déterminer s'il s'agit d'une tendance générale ou plutôt d'un cas isolé.

Les résultats concernant une augmentation de la température du moule correspondent à ceux que nous retrouvons dans la littérature. En effet, les essais menés par Russell et Beaumont [14] et Siegmann *et al.* [20] montrent qu'une augmentation de la température du moule entraîne une diminution des contraintes résiduelles, ce qui est précisément le cas ici. Ces résultats étaient prévisibles : à haute température, la relaxation des contraintes résiduelles s'effectue beaucoup plus facilement qu'à basse température, conduisant par le fait même à une diminution des contraintes résiduelles.

À la suite de ces résultats, une conclusion générale s'impose : une variation de la température du moule influence davantage le niveau des contraintes résiduelles situées à la surface de l'échantillon qu'au centre de celui-ci. Ainsi, dans le cas du polypropylène, les maximums en tension (centre) sont regroupés autour de 4,00 MPa, tandis que les maximums en compression (surface) s'échelonnent de 3,08 MPa à 8,95 MPa. Dans le cas du

polycarbonate, les maximums en tension sont situés autour de 2,00 MPa, comparativement aux maximums en compression, qui s'étagent de 1,34 MPa à 5,28 MPa.

D'un point de vue théorique, ces résultats n'ont rien d'étonnant. En effet, selon Russell et Beaumont [14], la matière au centre du moule se solidifie en se contractant, le niveau de contraction dépendant de la différence entre la température de la matière et celle du moule. Cette contraction a pour effet de développer des contraintes résiduelles en compression à la surface et en tension au centre. L'amplitude des contraintes résiduelles obtenues dépend de l'écart entre le niveau de contraction thermique en surface et celui au centre. Plus cet écart est prononcé, plus l'amplitude des contraintes résiduelles est importante.

Il est intéressant de souligner que Siegmann *et al.* [20] ont montré que le module en tension, considéré comme étant constant lors des calculs de contraintes résiduelles, est à toute fin pratique indépendant de la température de moule. Cette vérification a été faite en mesurant les propriétés en tension de plaques moulées à différentes températures.

4.3 INFLUENCE DE LA VITESSE D'INJECTION : COMPARAISON ENTRE LES VITESSES BASSE, NOMINALE ET HAUTE

Afin d'étudier l'effet de la vitesse d'injection sur la distribution des contraintes résiduelles à travers l'épaisseur des plaquettes de polypropylène et de polycarbonate, les plaquettes ont été moulées à trois vitesses différentes : une vitesse nominale, une vitesse basse et une vitesse élevée, la vitesse nominale servant d'étalon de comparaison aux deux autres. Ces vitesses sont présentées au tableau 4.2.

Tableau 4.2 - Vitesses d'injection (cm/s, ± 0,6 cm/s)

Vitesse	Polypropylène	Polycarbonate
basse	1,3	1,3
nominale	3,8	3,8
haute	7,6	7,6

Dans le but de mieux visualiser l'influence d'une variation de la vitesse d'injection sur la distribution des contraintes résiduelles, nous présentons plusieurs courbes sur chacun des graphiques suivants. Dans un premier temps, nous comparons entre elles les courbes des vitesses d'injection basse, nominale et haute obtenues avec le polypropylène (figure 4.3) et ensuite, les courbes des vitesses basse, nominale et haute (figure 4.4) obtenues avec le polycarbonate. Ces figures se retrouvent à la fin du chapitre, aux pages 47 et 49.

4.3.1 Polypropylène

Conditions de moulage : vitesse d'injection de 1,3 cm/s pour la vitesse basse, de 3,8 cm/s pour la vitesse nominale et de 7,6 cm/s pour la vitesse haute, avec une température de moule de 41°C pour les vitesses nominale et basse et de 40°C pour la vitesse haute.

Résultats et discussion : les courbes de distribution des contraintes obtenues avec ces trois conditions de moulage sont présentées à la figure 4.3 (page 47). Les principaux résultats sont présentés au tableau 4.5 (page 46) : valeurs maximums obtenues en tension et en compression, distance du centre de l'échantillon à laquelle sont situés ces maximums et distance à laquelle la transition tension-compression s'effectue.

Pour les trois vitesses, les contraintes résiduelles situées en surface sont en compression et celles situées au centre sont en tension.

Le maximum en tension est atteint au centre de l'échantillon dans le cas de la vitesse haute et près du centre pour les vitesses nominale et basse. La valeur maximum en compression est atteinte près de la surface de l'échantillon pour les trois vitesses.

Les courbes de distribution des contraintes résiduelles obtenues avec ces trois vitesses suivent un profil parabolique.

Les vitesses nominale et basse présentent toutes deux des contraintes résiduelles en surface (compression) environ 2,5 fois plus élevées qu'au centre (tension), comparativement à la vitesse haute, pour laquelle les contraintes résiduelles en surface sont 1,4 fois plus élevées que celles au centre.

4.3.2 Polycarbonate

Conditions de moulage : vitesse d'injection de 1,3 cm/s pour la vitesse basse, de 3,8 cm/s pour la vitesse nominale et de 7,6 cm/s pour la vitesse haute, avec une température de moule de 40°C dans les trois cas.

Résultats et discussion : les courbes de distributions des contraintes obtenues avec ces trois conditions de moulage sont présentées à la figure 4.4 (page 49). Les principaux résultats sont présentés au tableau 4.6 (page 48) : valeurs maximums obtenues en tension et en compression, distance du centre de l'échantillon à laquelle sont situés ces maximums et distance à laquelle la transition tension-compression s'effectue.

Dans les trois cas, les contraintes résiduelles situées en surface sont en compression et celles situées au centre sont en tension.

Le maximum en tension est atteint au centre ou près du centre de l'échantillon pour les vitesses nominale et haute et à mi-chemin entre la surface et le centre de l'échantillon

pour la vitesse basse. Le maximum en compression est situé près de la surface pour les trois vitesses.

Pour la vitesse nominale, les contraintes résiduelles situées en surface sont 2,7 fois plus importantes que celles situées au centre, tandis que dans le cas des vitesses basse et haute, les contraintes résiduelles en surface sont environ 1,4 fois plus importantes que celles au centre.

Les courbes des vitesses nominale et haute présentent un profil parabolique.

4.3.3 Conclusion

En tension comme en compression, les contraintes résiduelles du polypropylène sont plus élevées que celles du polycarbonate.

Tout comme une variation de la température du moule, une variation de la vitesse d'injection influence davantage le niveau des contraintes résiduelles à la surface de l'échantillon que le niveau des contraintes résiduelles au centre. Ainsi, dans le cas du polypropylène, les maximums en tension (centre) sont regroupés autour de 3,50 MPa, tandis que les maximums en compression (surface) s'échelonnent de 4,75 MPa à 8,95 MPa. Dans le cas du polycarbonate, les maximums en tension sont situés autour de 2,50 MPa, comparativement aux maximums en compression, qui s'étagent de 3,63 MPa à 5,28 MPa.

Ces résultats ont aussi été obtenus par Siegmann et al. [20].

Tant pour le polypropylène que pour le polycarbonate, les contraintes résiduelles obtenues sont distribuées de la manière suivante : des contraintes résiduelles en compression en surface et en tension au centre, ce qui diffère de ce que nous retrouvons dans la littérature. Bien que Pham *et al.* [12] et Siegmann *et al.* [20] présentent des résultats contradictoires, tous deux observent que les contraintes résiduelles en surface passent d'un état en compression à un état en tension à un moment ou à un autre, tout dépendant de la vitesse d'injection utilisée. Il est possible que la plage des vitesses d'injection choisie ici soit trop restreinte (1,3 cm/s à 7,6 cm/s) et ne permette pas adéquatement de corroborer les résultats obtenus par Pham ou Siegmann.

Les contraintes résiduelles en compression calculées avec le polycarbonate sont du même ordre de grandeur que celui obtenu par Pham *et al.* [12] avec le même matériau. Ainsi, dans les deux cas, les contraintes résiduelles se regroupent aux environs de 4,00 MPa.

L'effet de la vitesse d'injection sur la distribution et l'amplitude des contraintes résiduelles est assez complexe. Pham *et al.* [12] et Siegmann *et al.* [20] expliquent qu'en augmentant la vitesse d'injection, le gradient de température que subit le matériau est affecté par différentes vitesses de refroidissement ainsi que par l'augmentation de la chaleur due à la friction interne. De surcroît, une augmentation de la vitesse d'injection entraîne une augmentation de l'orientation moléculaire, phénomène qui joue un rôle important dans

l'anisotropie des propriétés mécaniques et physiques.

Selon Siegmann *et al.* [20], au fur et à mesure que la vitesse d'injection augmente, la valeur des contraintes résiduelles calculée, basée sur des propriétés uniformes, devient inadéquate. Pour des pièces moulées à haute vitesse, la valeur réelle des contraintes résiduelles devrait être plus élevée que celle calculée. Toujours d'après Siegmann *et al.*, l'erreur introduite pourrait ainsi s'élever jusqu'à 30%.

Tableau 4.3 - Influence de la température du moule : principaux résultats (polypropylène)

		Température basse (15°C)	**Température nominale (41°C)**	**Température haute (75°C)**
Tension	***valeur maximum (MPa)***	4,44	3,69	3,36
	distance du centre (mm)	0,00	0,25	0,13
Compression	***valeur maximum (MPa)***	3,08	8,95	6,41
	distance du centre (mm)	1,13	1,25	1,25
Transition tension-compression	***distance du centre (mm)***	0,67	0,85	0,80

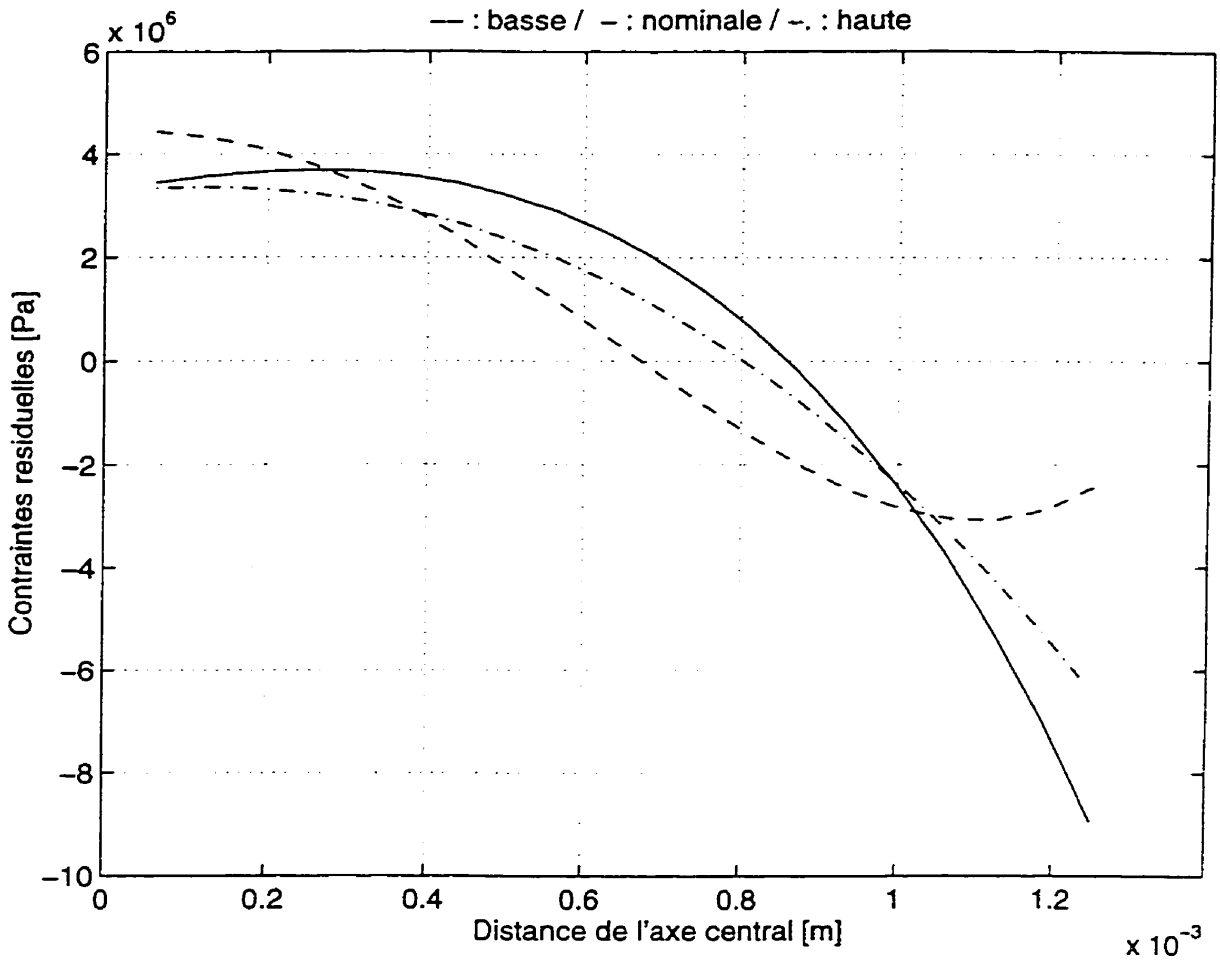


Figure 4.1 - Températures du moule : nominale, basse et haute (polypropylène)

Tableau 4.4 - Influence de la température du moule : principaux résultats (polycarbonate)

		Température basse (20°C)	**Température nominale (40°C)**	**Température haute (100°C)**
Tension	***valeur maximum (MPa)***	1,83	1,96	2,11
	distance du centre (mm)	0,28	0,36	0,39
Compression	***valeur maximum (MPa)***	1,34	5,28	2,31
	distance du centre (mm)	1,25	1,25	1,25
Transition tension-compression	***distance du centre (mm)***	1,00	0,94	1,02

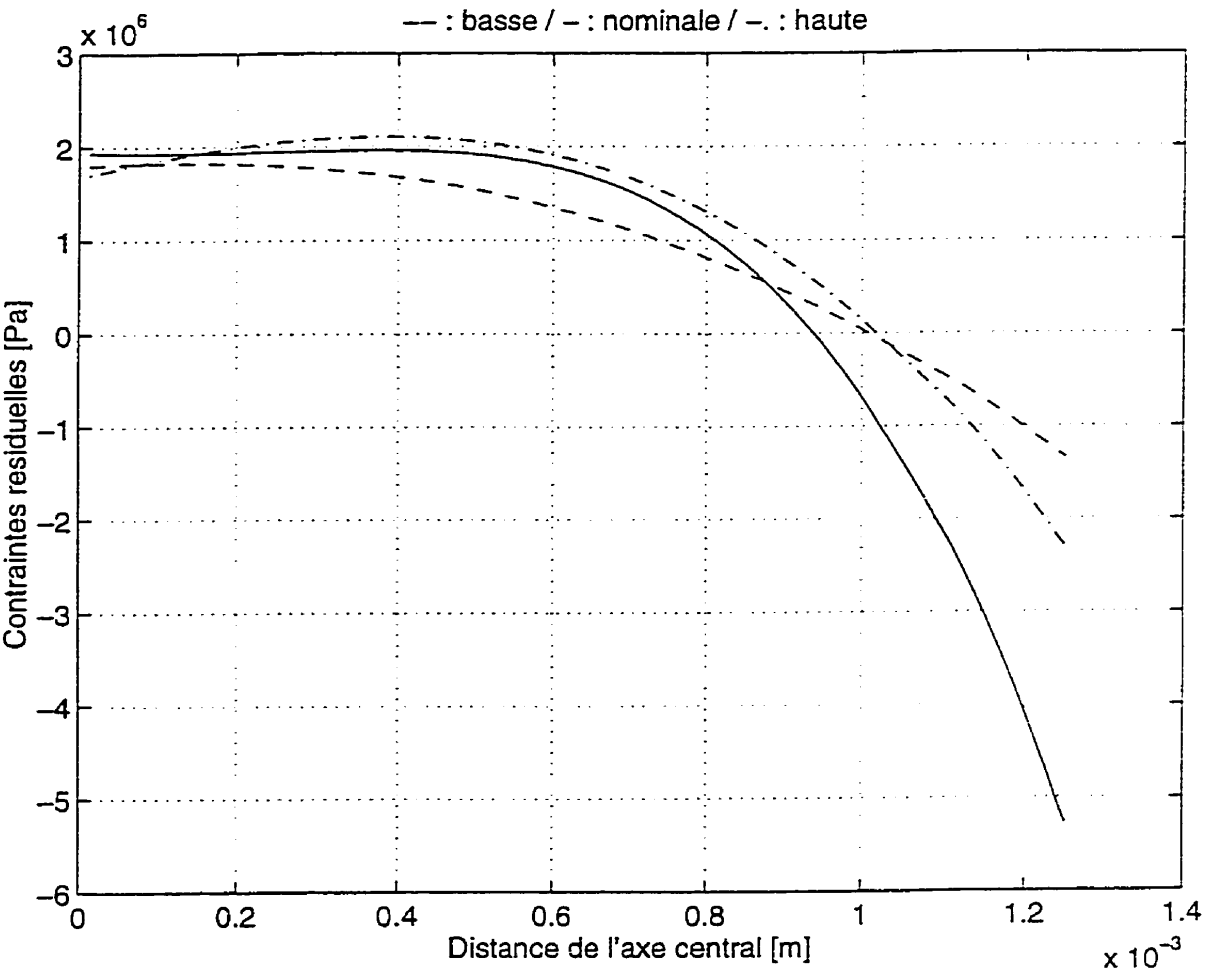


Figure 4.2 - Températures du moule : basse, nominale et haute (polycarbonate)

Tableau 4.5 - Influence de la vitesse d'injection : principaux résultats (polypropylène)

		Vitesse basse (1,3 cm/s)	**Vitesse nominale (3,8 cm/s)**	**Vitesse haute (7,6 cm/s)**
Tension	***valeur maximum (MPa)***	3,02	3,68	3,48
	distance du centre (mm)	0,25	0,25	0,06
Compression	***valeur maximum (MPa)***	7,42	8,95	4,75
	distance du centre (mm)	1,25	1,25	1,25
Transition tension-compression	***distance du centre (mm)***	0,85	0,85	0,76

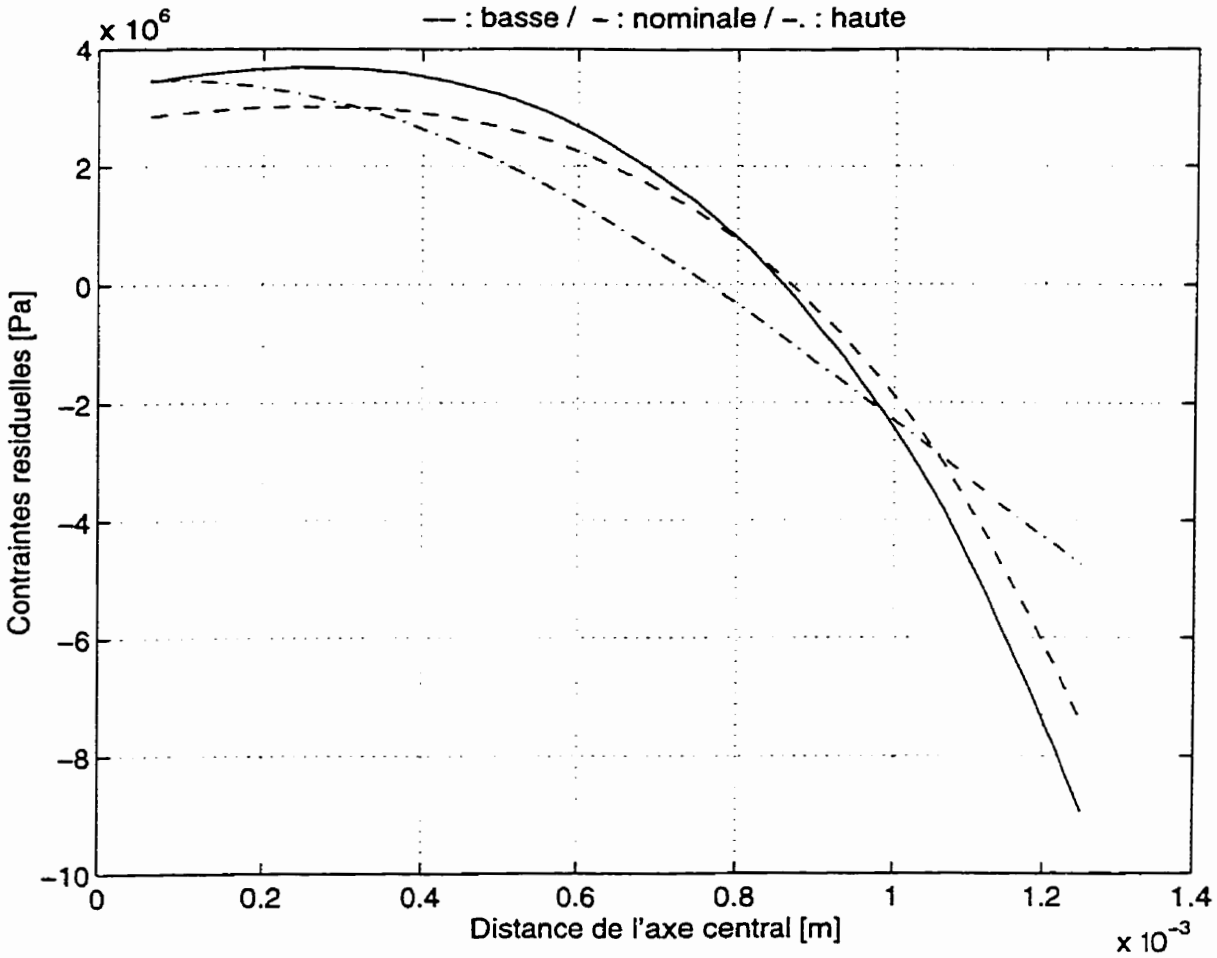


Figure 4.3 - Vitesses d'injection : nominale, basse et haute (polypropylène)

Tableau 4.6 - Influence de la vitesse d'injection : principaux résultats (polycarbonate)

		Vitesse basse (1,3 cm/s)	**Vitesse nominale (3,8 cm/s)**	**Vitesse haute (7,6 cm/s)**
Tension	***valeur maximum (MPa)***	2,87	1,96	2,76
	distance du centre (mm)	0,30	0,36	0,69
Compression	***valeur maximum (MPa)***	3,63	5,28	4,06
	distance du centre (mm)	1,25	1,25	1,25
Transition tension-compression	***distance du centre (mm)***	0,96	0,94	1,08

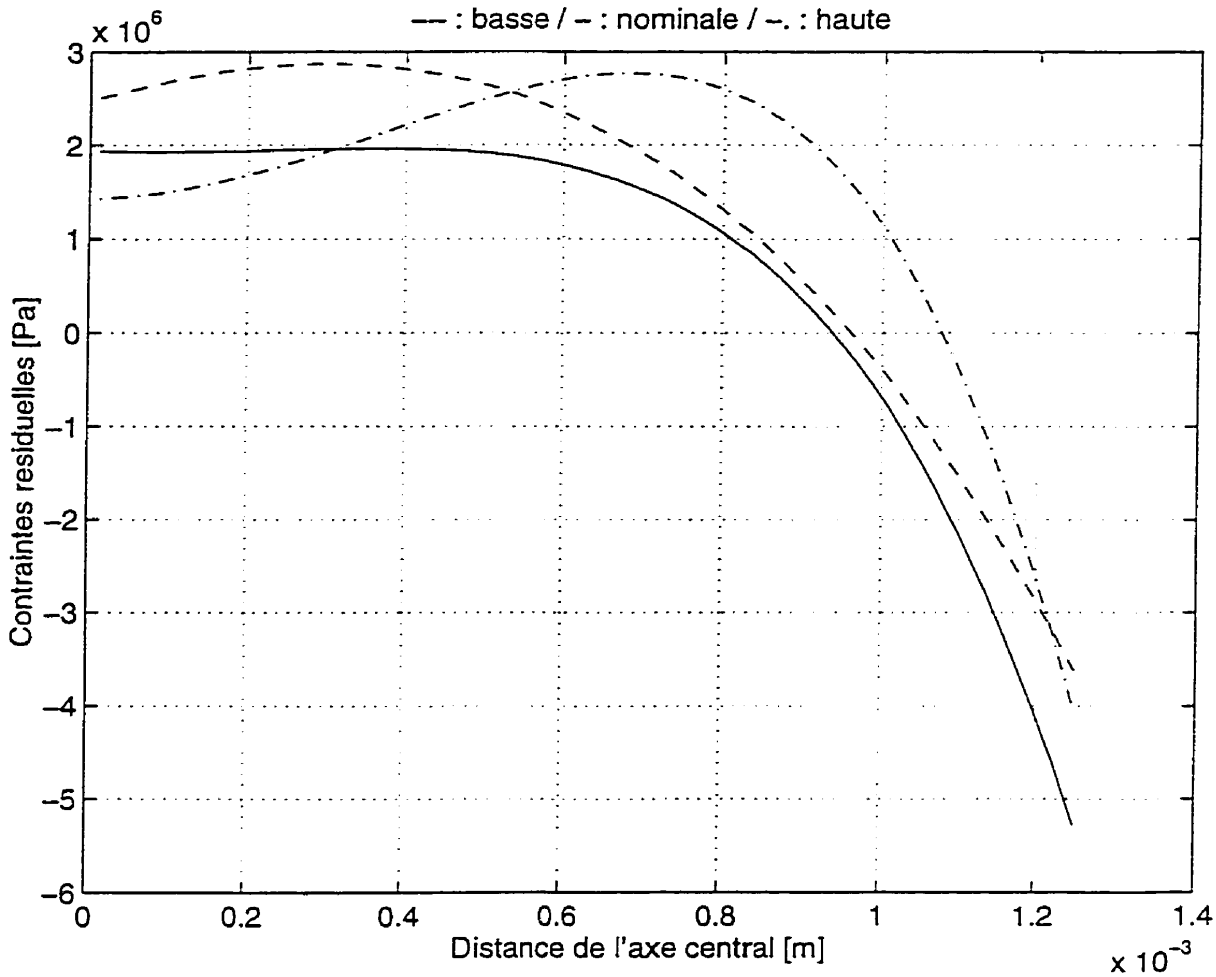


Figure 4.4 - Vitesses d'injection : basse, nominale et haute (polycarbonate)

4.4 INFLUENCE DE LA MESURE DU RAYON DE COURBURE SUR LES CONTRAINTES RÉSIDUELLES

Plusieurs facteurs peuvent influencer le calcul des contraintes résiduelles et par le fait même, modifier les résultats. Plus précisément, un manque d'uniformité durant la fabrication et la préparation des échantillons ainsi qu'un manque de précision lors de la mesure des échantillons sont à considérer.

Un manque d'uniformité lors du moulage et du fraisage des échantillons doit être pris en considération. Comme les échantillons sont moulés en série et de surcroît deux à la fois, l'incertitude reliée aux conditions de moulage est probablement négligeable. Par contre, l'usinage des échantillons laisse place à un grand manque d'uniformité. L'aspect de plusieurs échantillons après usinage (fraisage) en témoigne : polymère fondu, surface rugueuse, marques laissées par la fraiseuse, etc. Bien entendu, ces échantillons ont été écartés lors des calculs, mais il n'en demeure pas moins que l'usinage entraîne une certaine disparité entre les échantillons.

Des imprécisions peuvent survenir lors de la photographie des échantillons, plus particulièrement en ce qui concerne le polycarbonate. En effet, parce que le polycarbonate est transparent, l'image obtenue par photographie est moins clairement définie. Ce manque de précision au niveau de la photographie des échantillons se réflète lors de l'approximation du rayon de courbure : il devient plus difficile d'obtenir avec exactitude le rayon de courbure

correspondant à une image vague qu'à une image très claire. Afin d'évaluer l'influence d'une variation du rayon de courbure sur les contraintes résiduelles, nous avons procédé de la manière suivante. Pour la condition de moulage nominale, trois courbures ont été calculées, la première en utilisant les valeurs moyennes du rayon de courbure, la seconde les valeurs minimums et la dernière, les valeurs maximums. À partir de ces courbures, les contraintes résiduelles correspondantes ont été calculées. En examinant les trois courbes de contraintes résiduelles obtenues ainsi, l'influence du rayon de courbure peut être évaluée approximativement.

4.4.1 Polypropylène

Les valeurs des différents rayons de courbure sont présentées au tableau 4.7.

Tableau 4.7 - Rayons de courbure moyens, minimums et maximums

Épaisseur enlevée (mm)	**Rayon de courbure moyen (m)**	**Rayon de courbure minimum (m)**	**Rayon de courbure maximum (m)**
0,25	5,19	4,79	5,62
0,50	1,00	0,79	1,21
0,75	0,83	0,81	0,88
1,00	0,56	0,54	0,59
1,25	0,47	0,43	0,49
1,50	0,45	0,40	0,48

À partir de ces rayons de courbure, les courbures peuvent être calculées. Ces courbures sont présentées à la figure 4.5. Les contraintes résiduelles associées à ces courbures sont présentées à la figure 4.6.

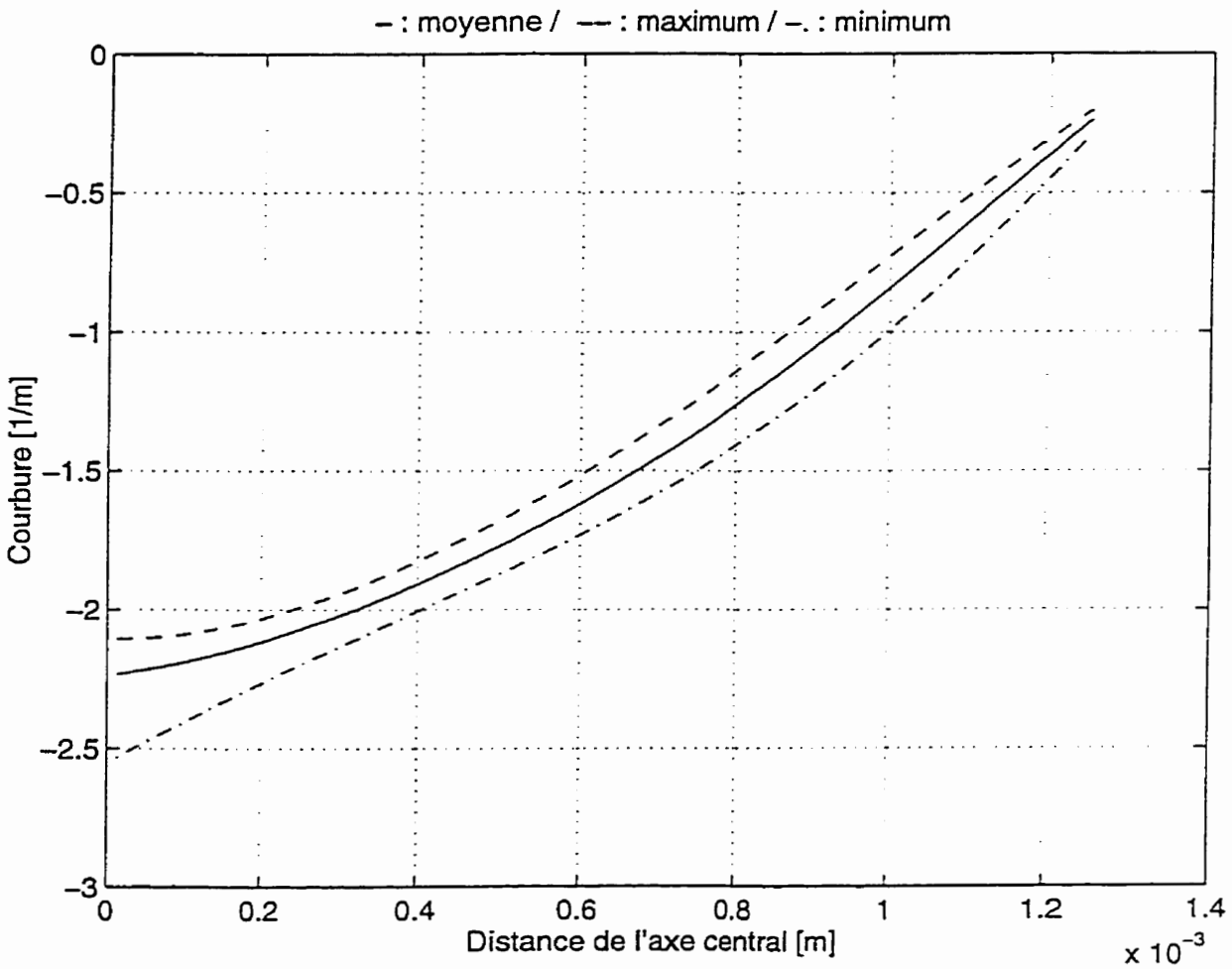


Figure 4.5 - Incertitude liée au calcul de la courbure

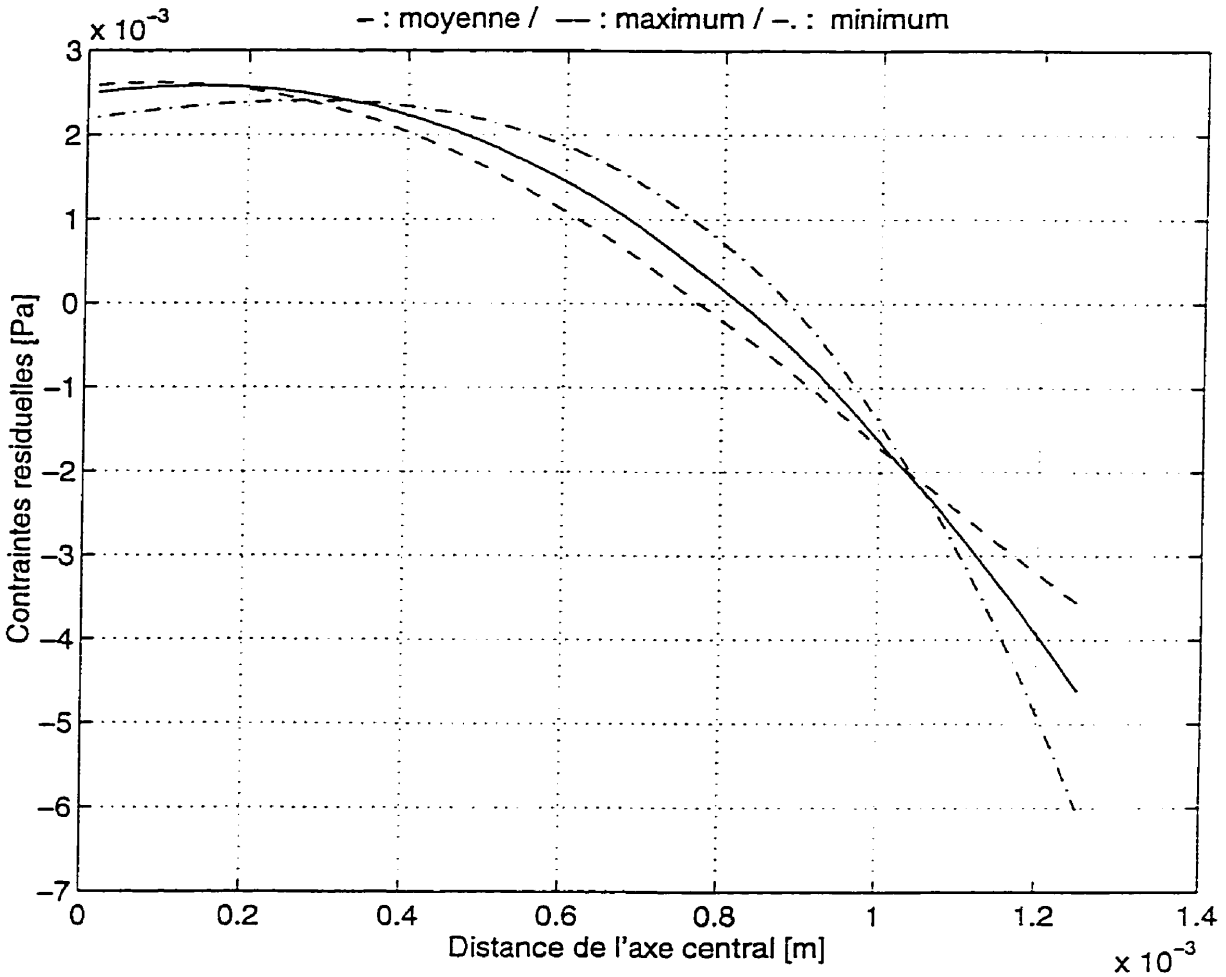


Figure 4.6 - Incertitude liée au calcul des contraintes résiduelles

L'incertitude rattachée à la mesure du rayon de courbure entraîne une variation d'environ 10% pour la courbure située au milieu de l'échantillon, mais a une influence minime sur la courbure située à la surface. En ce qui a trait au calcul des contraintes résiduelles, un écart allant de 10% au centre de l'échantillon à 45% en surface de l'échantillon est observé. Néanmoins, nous retrouvons la différence la plus importante à mi-chemin entre la surface et le coeur de l'échantillon : à environ 0,75 mm de la surface, une variation de près de 100% existe entre les courbes de contraintes résiduelles minimum et moyenne.

4.4.2 Polycarbonate

Les valeurs des différents rayons de courbure sont présentées au tableau 4.8.

Tableau 4.3 - Rayons de courbure moyens, minimums et maximums

Épaisseur enlevée (mm)	**Rayon de courbure moyen (m)**	**Rayon de courbure minimum (m)**	**Rayon de courbure maximum (m)**
0,25	4,74	4,11	5,57
0,50	2,10	1,57	2,67
0,75	1,36	1,16	1,50
1,00	1,22	0,82	1,54
1,25	0,86	0,74	1,05
1,50	0,68	0,62	0,70

À partir de ces rayons de courbure, les courbures peuvent être calculées. Ces courbures sont présentées à la figure 4.7. Les contraintes résiduelles associées à ces courbures sont présentées à la figure 4.8.

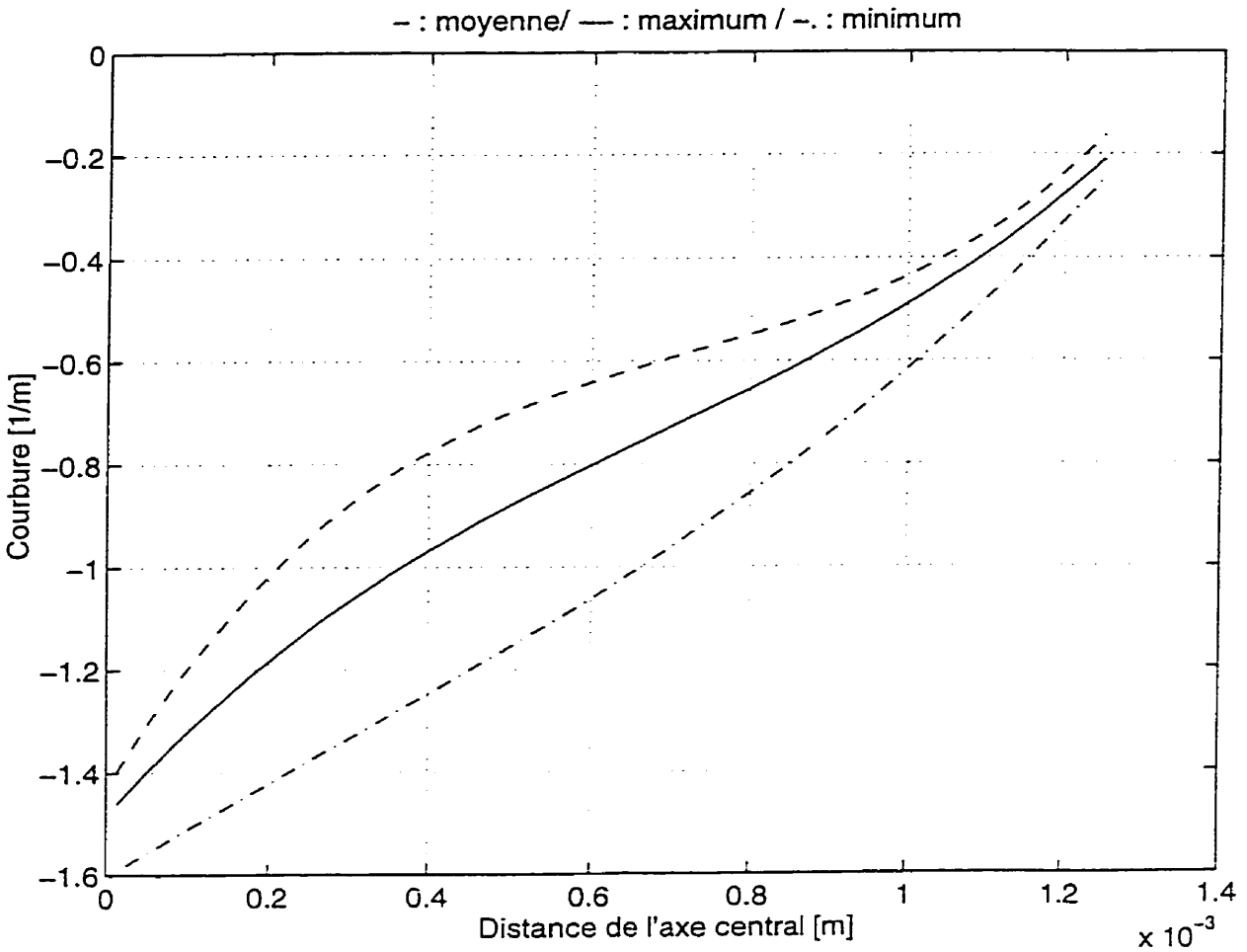


Figure 4.7 - Incertitude liée au calcul de la courbure

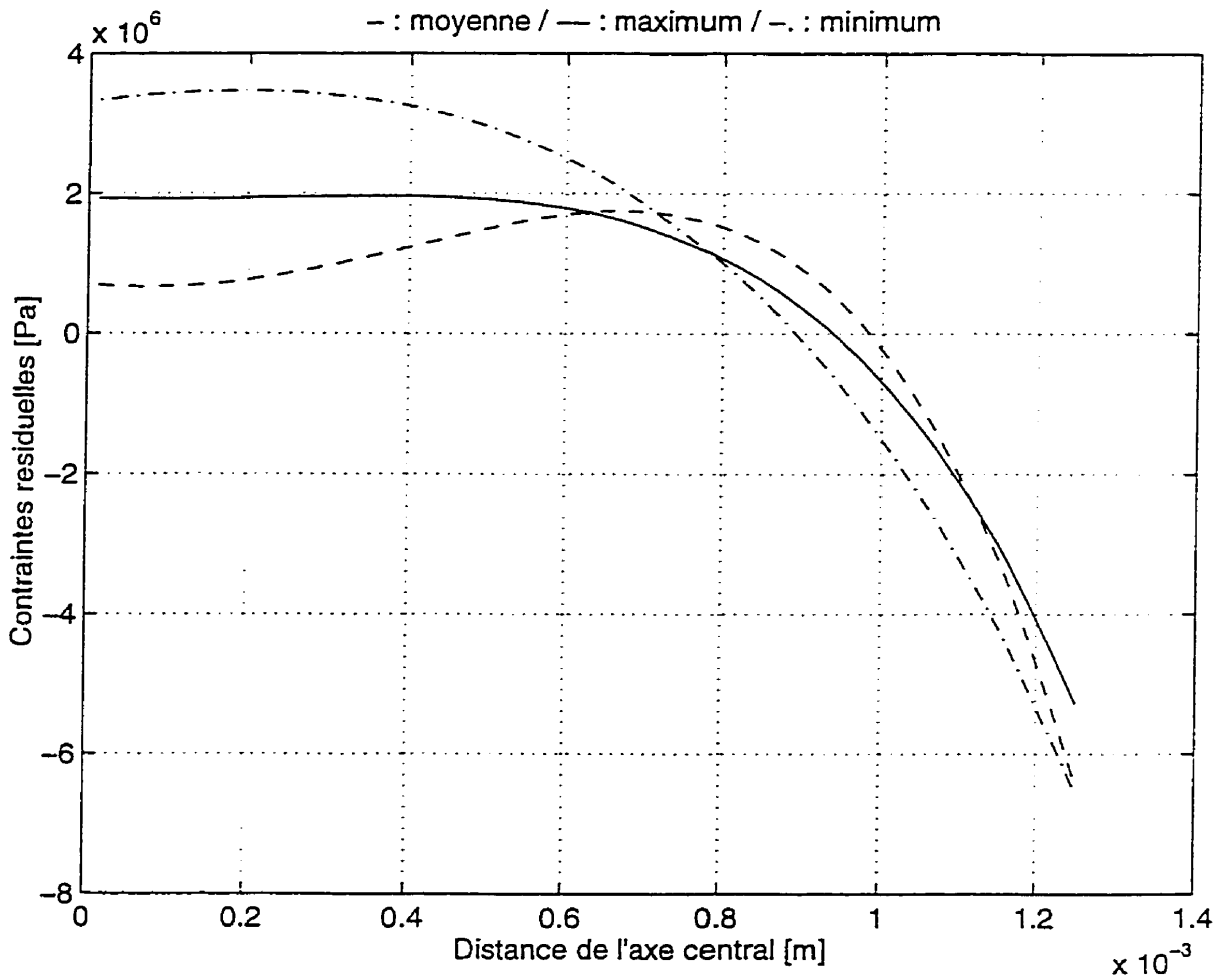


Figure 4.8 - Incertitude liée au calcul des contraintes résiduelles

L'incertitude rattachée à la mesure du rayon de courbure entraîne une variation d'environ 20% pour la courbure située près du milieu, mais a une influence minime sur la courbure située à la surface. En ce qui a trait au calcul des contraintes résiduelles, un écart allant de 75% au centre de l'échantillon à 20% en surface de l'échantillon est observé.

4.4.3 **Discussion**

L'incertitude rattachée à la mesure de la courbure est d'au plus 20 % ce qui, sans être négligeable, est néanmoins acceptable, compte tenu de la disparité entre les échantillons (section 4.4). Toutefois, cette incertitude sur la mesure de la courbure entraîne une incertitude élevée sur les calculs des contraintes résiduelles. Ainsi, un écart variant de 10% à 100% dans certains cas peut être observé entre les différentes courbes des contraintes résiduelles, d'où l'importance de mesurer les courbures des échantillons de façon uniforme. En ce sens, la méthode de mesure utilisée ici, soit le traitement par image des échantillons, est adéquate : comme il s'agit d'une méthode de mesure numérique, l'erreur due au procédé de mesure est constante d'un échantillon à l'autre, contrairement à une méthode de mesure manuelle, où la subjectivité et les erreurs dues aux manipulations entrent en ligne de compte.

Considérant ces résultats, les distributions de contraintes résiduelles obtenues en utilisant la méthode de Treuting et Read devraient être utilisées d'une manière qualitative plutôt que quantitative.

CHAPITRE 5

CONCLUSION

L'objectif de ce mémoire était d'évaluer l'influence des conditions de moulage sur la distribution et l'amplitude des contraintes résiduelles dans des échantillons de polypropylène et de polycarbonate. Les conditions de moulage étudiées étaient la température du moule et la vitesse d'injection.

Pour ce faire, la méthode d'enlèvement par couche, mise au point par Treuting et Read, a été utilisée. Les contraintes résiduelles étant calculées à partir des courbures des échantillons, nous avons développé une méthode numérique pour mesurer ces courbures : les échantillons sont tout d'abord photographiés, puis les courbures sont déterminées à l'aide d'un système de traitement par image, ce qui permet d'uniformiser le processus de mesure et de diminuer considérablement les erreurs dues aux manipulations.

Les résultats obtenus montrent qu'une augmentation et une diminution de la température du moule conduisent à une diminution des contraintes résiduelles. En ce qui concerne une variation de la vitesse d'injection, d'autres essais sont nécessaires afin d'être en mesure de dégager une tendance. Deux conclusions générales s'imposent : premièrement, des deux polymères étudiés, le polypropylène est celui qui présente les contraintes résiduelles les plus élevées et ce, tant à la surface des échantillons (compression) qu'au centre (tension) et deuxièmement, une variation de la température du moule ou de la vitesse d'injection

influence davantage le niveau des contraintes résiduelles situées à la surface des échantillons que le niveau des contraintes résiduelles au centre. Dans l'ensemble, ces résultats sont corroborés par ceux présentés dans la littérature.

Une évaluation de l'influence de l'incertitude lors de la mesure des courbures des échantillons montre que les calculs des contraintes résiduelles présentent une grande sensibilité à la mesure des courbures. Ainsi, l'incertitude rattachée à la mesure des courbures est d'au plus 20%, tandis que l'incertitude reliée aux calculs des contraintes résiduelles peut s'élever jusqu'à 100% dans certains cas. Considérant ces résultats, les distributions de contraintes résiduelles obtenues en utilisant la méthode de Treuting et Read devraient être utilisées d'une manière qualitative plutôt que quantitative.

Il pourrait être intéressant d'effectuer des essais supplémentaires, tout particulièrement en ce qui a trait à la condition de moulage avec une température de moule basse, afin de déterminer si les résultats obtenus dans le cadre de ce mémoire reflètent une tendance générale ou sont le fait d'un cas isolé. D'autres essais pourraient aussi être menés en utilisant une plage de vitesses d'injection plus étendue, ce qui permettrait une comparaison plus exacte entre les résultats présentés dans la littérature et ceux présentés ici.

RÉFÉRENCES

[1] BAKERDJIAN, Z. et KAMAL, M.R. (1977). Distribution of some physical properties in injection-molded thermoplastic parts. Polymer Engineering and Science, 17, 96-100.

[2] BARRETT, C.S. et PREDECKI, P. (1976). Stress measurement in polymeric materials by X-ray diffraction. Polymer Engineering and Science, 16, 602-608.

[3] BROUTMAN, L.J. et KRISHNAKUMAR, S.M. (1976). Impact strength of polymers: 1. The effect of thermal treatment and residual stress. PolymerEngineering and Science, 16, 74-81.

[4] COXON, L.D. et WHITE, J.R. (1980). Residual stresses and aging in injection molded polypropylene. Polymer Engineering and Science, 20, 230-236.

[5] HOARE, L. et HULL, D. (1977). The effect of orientation on the mechanical properties of injection molded polystyrene. Polymer Engineering and Science, 17, 204-212.

[6] ISAYEV, A.I. (1983). Orientation development in the injection molding of amorphous polymers. Polymer Engineering and Science, 23, 271-284.

[7] ISAYEV, A.I. (1987). Injection and compression moldings fundamentals. M. Dekker, New York, 227-328.

[8] ISAYEV, A.I. et CROUTHAMEL, D.L. (1984). Residual stress development in the injection molding of polymers. Polymers-Plastics Technology Engineering, 22, 177-232.

[9] KUBAT, J., PETERMANN, J. et RIGDAHL, M. (1975). Internal stresses in polyethylene as related to its structure. Material Science and Engineering, 19, 185-191.

[10] LEE, S., DE LA VEGA, J. et BOGUE, D.C. (1986). Residual stresses and birefringences in large, quenched samples. Journal of Applied Polymer Science, 31, 2791-2803.

[11] MANDELL, J.F., SMITH, K.L. et HUANG, D.D. (1981). Effects of residual stress and orientation on the fatigue of injection molded polysulfone. Polymer Engineering and Science, 21, 1173-1179.

[12] MITTAL, R.K. et RASHMI, V. (1986). A non-destructive technique of measuring residual stresses in circular rods of transparent polymers. Polymer Engineering and Science, 26, 310-317.

[13] PHAM, H.T., BOSNYAK, C.P. et SEHANOBISH, K. (1993). Residual stresses in injection molded polycarbonate rectangular bars. Polymer Engineering and Science, 33, 1634-1643.

[14] RENDLER, N.K. et VIGNESS, I. (1996). Hole-drilling strain-gage method of measuring residual stresses. Experimental Mechanics, 6, 577-586.

[15] RUSSELL, D.P. et BEAUMONT, P.W.R. (1980). Structure and properties of injection-moulded nylon-6. Journal of Materials Science, 15, 208-215.

[16] SAFFELL, J.R. et WINDLE, A.H. (1980). The influence of thermal history on internal stress distributions in sheets of PMMA and polycarbonate. Journal of Applied Polymer Science, 25, 1117-1129.

[17] SANDILANDS, G.J. et WHITE, J.R. (1980). Effect of injection pressure and crazing on internal stresses in injection-moulded polystyrene. Polymer, 21, 338-343.

[18] SIEGMANN, A., BUCHMAN, A. et KENIG, S. (1981). Comments on the layer removal method for measurements of residual stresses in plastics. Journal of Materials Science, 16, 3514-3516.

[19] SIEGMANN, A., BUCHMAN, A. et KENIG, S. (1981). Residual stresses in polymers II: Their effect on mechanical behavior. Polymer Engineering and Science, 21, 997-1002.

[20] SIEGMANN, A., BUCHMAN, A. et KENIG, S. (1982). Residual stresses in polymers I: The effect of thermal history. Polymer Engineering and Science, 22, 40-47.

[21] SIEGMANN, A., BUCHMAN, A. et KENIG, S. (1982). Residual stresses in polymers III: The influence of injection-molding process conditions. Polymer Engineering and Science, 22, 560-568.

[22] SIEGMANN, A., NARKIS, M. et ROSENZWEIG, N. (1979). Softening temperature of glassy polymers as affected by residual stresses. Polymer Engineering and Science, 19, 223- 225.

[23] SO, P. et BROUTMAN, L.J. (1976). Residual stresses in polymers and their effect on mechanical behavior. Polymer Engineering and Science, 16, 785-791.

[24] STRUIK, L.C.E. (1978). Orientation effects and cooling stresses in amorphous polymers. Polymer Engineering and Science, 18, 799-811.

[25] TADMOR, Z. (1974). Molecular orientation in injection molding. Journal of Applied Polymer Science, 18, 1753-1772.

[26] THAKKAR, B.S. et BROUTMAN, L.J. (1980). The influence of residual stresses and orientation on the properties of amorphous polymers. Polymer Engineering and Science, 20, 1214-1219.

[27] TREUTING, R.G. et READ, W.T. (1951). A mechanical determination of biaxial residual stress in sheet materials. Journal of Applied Physics, 22, 130-134.

[28] WALES, J.L.S., LEEUWEN, I.J. et VAN DER VIJGH, R. (1972). Some aspects of orientation in injection molded objects. Polymer Engineering and Science, 12, 358-363.

[29] WUST, C.J. et BOGUE, D.C. (1983). Stress optical behavior in polystyrene; residual stresses and birefringences in large, quenched samples. Journal of Applied Polymer Science, 28, 1931-1947.

ANNEXE I

CALCUL DU MODULE D'YOUNG

ET DU COEFFICIENT DE POISSON

Tableau I.1 - Polypropylène

	Module d'Young (GPa)	Coefficient de Poisson
échantillon # 1	1,33	0,41
échantillon # 2	1,43	0,38
échantillon # 3	1,38	------
moyenne	**1,38**	**0,40**

Tableau I.2 - Polycarbonate

	Module d'Young (GPa)	Coefficient de Poisson
échantillon # 1	2,55	0,40
échantillon # 2	2,39	0,33
échantillon # 3	2,48	0,39
moyenne	**2,47**	**0,38**

ANNEXE II

CONDITIONS DE MOULAGE DES ÉCHANTILLONS

1. Polypropylène

A) Condition de moulage : nominale

- température du moule : 41°C
- vitesse d'injection : 3,8 cm/s
- temps de refroidissement : 15 s
- température de la matière : 241 - 229 - 204 - 190°C
- temps de maintien : 15 s
- pression de maintien : 4,65 MPa

B) Condition de moulage : température du moule basse

- température du moule : 15°C
- vitesse d'injection : 3,8 cm/s
- temps de refroidissement : 15 s
- température de la matière : 241 - 229 - 204 - 190°C
- temps de maintien : 15 s
- pression de maintien : 4,65 MPa

C) **Condition de moulage : température du moule haute**

- température du moule : 71°C
- vitesse d'injection : 3,8 cm/s
- temps de refroidissement : 15 s
- température de la matière : 241 - 229 - 204 - 190°C
- temps de maintien : 15 s
- pression de maintien : 4,65 MPa

D) **Condition de moulage : vitesse d'injection basse**

- température du moule : 41°C
- vitesse d'injection : 1,3 cm/s
- temps de refroidissement : 15 s
- température de la matière : 241 - 229 - 204 - 190°C
- temps de maintien : 15 s
- pression de maintien : 4,65 MPa

E) **Condition de moulage : vitesse d'injection haute**

- température du moule : 40°C
- vitesse d'injection : 7,6 cm/s
- temps de refroidissement : 15 s
- température de la matière : 241 - 229 - 204 - 190°C
- temps de maintien : 15 s
- pression de maintien : 4,65 MPa

2. Polycarbonate

A) Condition de moulage : nominale

- température du moule : 40°C
- vitesse d'injection : 3,8 cm/s
- temps de refroidissement : 15 s
- température de la matière : 260 - 270 - 277 - 279°C
- temps de maintien : 15 s
- pression de maintien : 4,65 MPa

B) Condition de moulage : température du moule basse

- température du moule : 20°C
- vitesse d'injection : 3,8 cm/s
- temps de refroidissement : 15 s
- température de la matière : 260 - 270 - 277 - 279°C
- temps de maintien : 15 s
- pression de maintien : 4,65 MPa

C) Condition de moulage : température du moule haute

- température du moule : 100°C
- vitesse d'injection : 3,8 cm/s
- temps de refroidissement : 15 s
- température de la matière : 260 - 270 - 277 - 279°F
- temps de maintien : 15 s
- pression de maintien : 4,65 MPa

D) **Condition de moulage : vitesse d'injection basse**

- température du moule : 40°C
- vitesse d'injection : 1,3 cm/s
- temps de refroidissement : 15 s
- température de la matière : 260 - 270 - 277 - 279°C
- temps de maintien : 15 s
- pression de maintien : 4,65 MPa

E) **Condition de moulage : vitesse d'injection haute**

- température du moule : 40°C
- vitesse d'injection : 7,6 cm/s
- temps de refroidissement : 15 s
- température de la matière : 260 - 270 - 277 - 279°C
- temps de maintien : 15 s
- pression de maintien : 4,65 MPa

ANNEXE III

COURBURES DES ÉCHANTILLONS

1. Polypropylène

Tableau III.1.A - Condition de moulage : nominale

Épaisseur enlevée (mm)	Courbure échantillon # 1 (m)	Courbure échantillon # 2 (m)	Courbure échantillon # 3 (m)	Courbure échantillon # 4 (m)	Courbure échantillon # 5 (m)
0,25	5,58	5,12	4,79	5,62	4,83
0,50	1,21	0,79	1,00	0,81	1,20
0,75	0,82	0,82	0,83	0,81	0,89
1,00	0,55	0,57	0,59	0,54	0,57
1,25	0,47	0,47	0,47	0,49	0,43
1,50	0,46	0,47	0,40	0,48	0,46

Tableau III.1.B - Condition de moulage : température du moule basse

Épaisseur enlevée (mm)	Courbure échantillon # 1 (m)	Courbure échantillon # 2 (m)	Courbure échantillon # 3 (m)	Courbure échantillon # 4 (m)	Courbure échantillon # 5 (m)
0,25	4,13	4,94	6,34	4,68	4,89
0,50	1,52	1,62	1,75	1,76	1,52
0,75	0,82	0,84	0,86	0,84	0,84
1,00	0,54	0,54	0,57	0,56	0,55
1,25	0,47	0,48	0,47	0,48	0,47
1,50	0,47	0,49	0,49	0,43	0,46

Tableau III.1.C - Condition de moulage : température du moule haute

Épaisseur enlevée (mm)	Courbure échantillon # 1 (m)	Courbure échantillon # 2 (m)	Courbure échantillon # 3 (m)	Courbure échantillon # 4 (m)	Courbure échantillon # 5 (m)
0,25	6,29	4,65	4,81	4,50	7,15
0,50	1,27	1,28	1,27	1,27	1,25
0,75	0,83	0,81	0,83	0,87	----*
1,00	0,56	0,61	0,53	0,53	0,54
1,25	0,54	0,52	0,50	0,49	----*
1,50	0,41	0,44	0,48	0,44	0,45

* échantillon abîmé ou rayon de courbure infini

Tableau III.1.D - Condition de moulage : vitesse d'injection basse

Épaisseur enlevée (mm)	Courbure échantillon # 1 (m)	Courbure échantillon # 2 (m)	Courbure échantillon # 3 (m)	Courbure échantillon # 4 (m)	Courbure échantillon # 5 (m)
0,25	5,11	4,83	----*	----*	----*
0,50	1,21	1,62	0,84	0,76	0,96
0,75	0,83	0,87	0,88	0,89	0,87
1,00	0,56	0,56	0,62	----*	----*
1,25	0,52	0,54	0,56	0,56	0,55
1,50	0,45	0,47	0,50	0,52	0,42

* échantillon abîmé ou rayon de courbure infini

Tableau III.1.E - Condition de moulage : vitesse d'injection haute

Épaisseur enlevée (mm)	Courbure échantillon # 1 (m)	Courbure échantillon # 2 (m)	Courbure échantillon # 3 (m)	Courbure échantillon # 4 (m)	Courbure échantillon # 5 (m)
0,25	5,18	4,35	4,91	—*	—*
0,50	1,50	1,41	1,57	1,55	1,37
0,75	0,84	0,84	0,82	0,83	0,83
1,00	0,60	0,61	0,58	0,60	0,55
1,25	0,50	0,53	0,51	0,53	0,51
1,50	0,48	0,46	0,43	0,47	0,47

* échantillon abîmé ou rayon de courbure infini

2. **Polycarbonate**

Tableau III.2.A - Condition de moulage : nominale

Épaisseur enlevée (mm)	Courbure échantillon # 1 (m)	Courbure échantillon # 2 (m)	Courbure échantillon # 3 (m)	Courbure échantillon # 4 (m)	Courbure échantillon # 5 (m)
0,25	4,56	4,33	4,11	5,11	5,57
0,50	2,67	2,38	1,57	1,73	2,12
0,75	1,52	1,30	1,47	1,16	----*
1,00	1,33	0,82	0,87	1,51	1,54
1,25	1,05	0,92	0,80	0,79	0,74
1,50	0,69	0,62	0,69	0,70	0,69

* échantillon abîmé ou rayon de courbure infini

Tableau III.2.B - Condition de moulage : température du moule basse

Épaisseur enlevée (mm)	Courbure échantillon # 1 (m)	Courbure échantillon # 2 (m)	Courbure échantillon # 3 (m)	Courbure échantillon # 4 (m)	Courbure échantillon # 5 (m)
0,25	4,13	4,09	4,19	4,34	4,55
0,50	2,80	2,32	3,09	2,69	2,68
0,75	1,75	1,99	1,88	2,06	----*
1,00	1,68	1,71	1,56	1,65	1,24
1,25	1,43	1,07	0,85	1,70	1,41
1,50	1,08	0,99	0,87	0,95	1,61

* échantillon abîmé ou rayon de courbure infini

Tableau III.2.C - Condition de moulage : température du moule haute

Épaisseur enlevée (mm)	Courbure échantillon # 1 (m)	Courbure échantillon # 2 (m)	Courbure échantillon # 3 (m)	Courbure échantillon # 4 (m)	Courbure échantillon # 5 (m)
0,25	6,02	4,76	3,26	2,70	4,15
0,50	2,73	2,23	2,89	2,74	—*
0,75	1,60	1,68	1,53	2,07	2,02
1,00	2,29	2,21	1,50	1,41	1,28
1,25	1,10	1,65	1,45	1,60	1,80
1,50	1,43	1,49	1,46	1,60	1,49

* échantillon abîmé ou rayon de courbure infini

Tableau III.2.D - Condition de moulage : vitesse d'injection basse

Épaisseur enlevée (mm)	Courbure échantillon # 1 (m)	Courbure échantillon # 2 (m)	Courbure échantillon # 3 (m)	Courbure échantillon # 4 (m)	Courbure échantillon # 5 (m)
0,25	4,88	3,19	5,16	4,15	—*
0,50	1,95	1,36	2,20	1,26	1,64
0,75	1,55	1,62	1,55	1,27	1,94
1,00	1,20	1,47	1,41	1,28	1,21
1,25	1,06	1,00	1,00	1,08	0,90
1,50	1,38	0,88	1,34	0,65	1,30

* échantillon abîmé ou rayon de courbure infini

Tableau III.2.E - Condition de moulage : vitesse d'injection haute

Épaisseur enlevée (mm)	Courbure échantillon # 1 (m)	Courbure échantillon # 2 (m)	Courbure échantillon # 3 (m)	Courbure échantillon # 4 (m)	Courbure échantillon # 5 (m)
0,25	2,94	2,44	2,38	2,41	---*
0,50	1,67	1,35	1,47	1,51	1,09
0,75	1,53	1,40	1,16	0,99	1,39
1,00	1,10	1,19	1,18	0,87	1,14
1,25	0,94	1,05	0,74	0,62	---*
1,50	0,57	0,62	0,83	0,57	0,62

* échantillon abîmé ou rayon de courbure infini

ANNEXE IV

APPROXIMATION DES COURBURES

PAR UN POLYNÔME D'ORDRE TROIS

1. **Polypropylène**

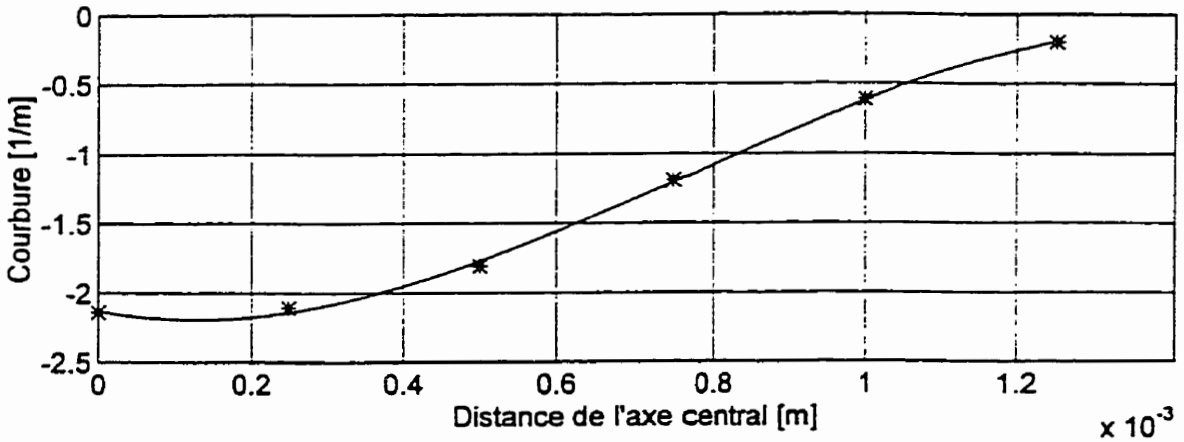


Figure IV.1.A - Condition de moulage : température du moule basse

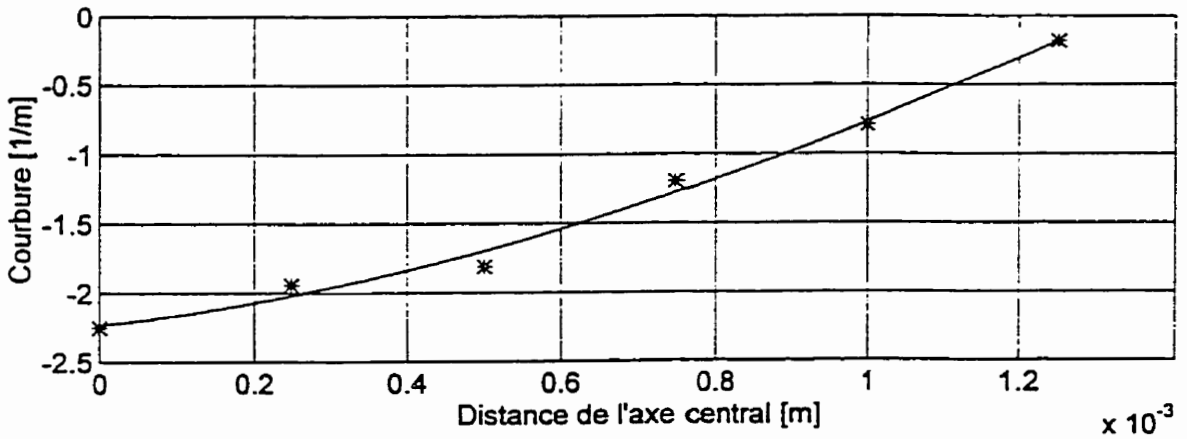


Figure IV.1.B - Condition de moulage : température du moule haute

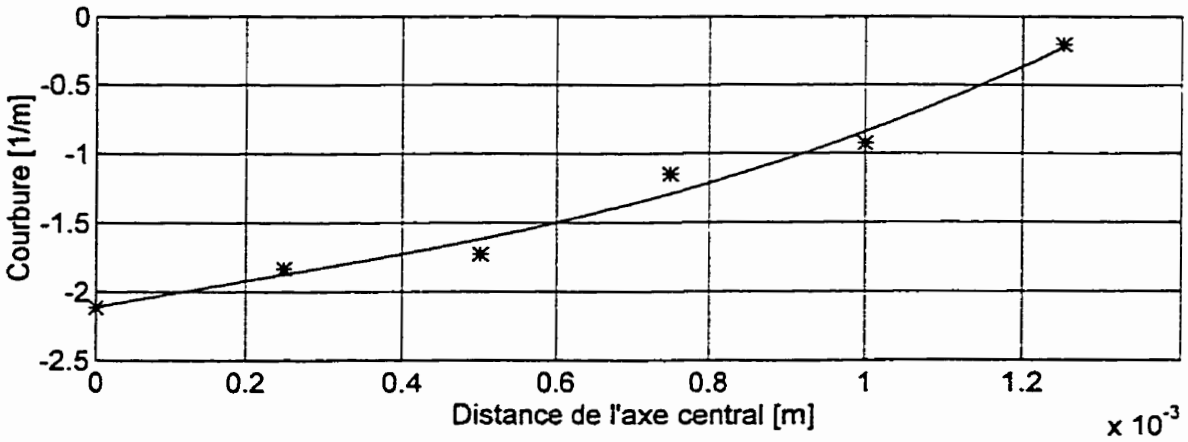


Figure IV.1.C - Condition de moulage : vitesse d'injection basse

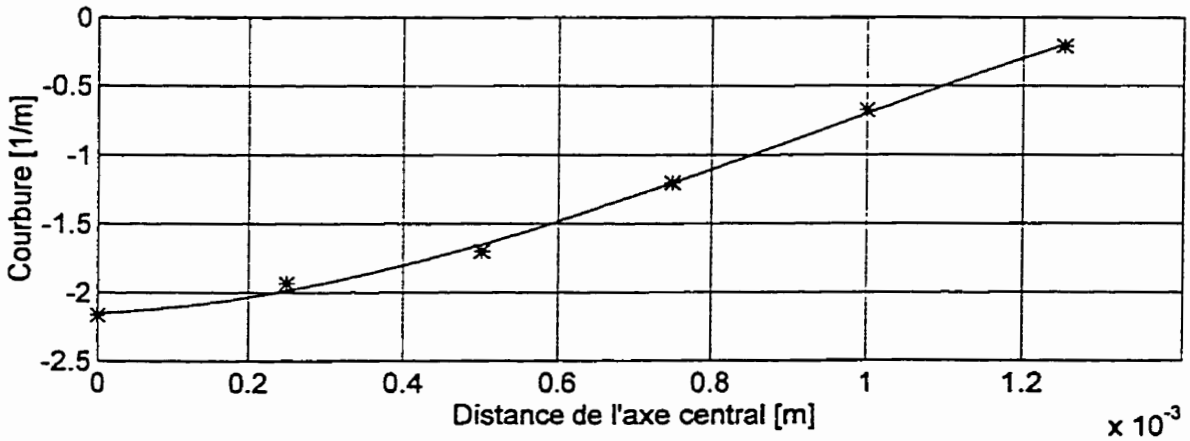


Figure IV.1.D - Condition de moulage : vitesse d'injection haute

2. **Polycarbonate**

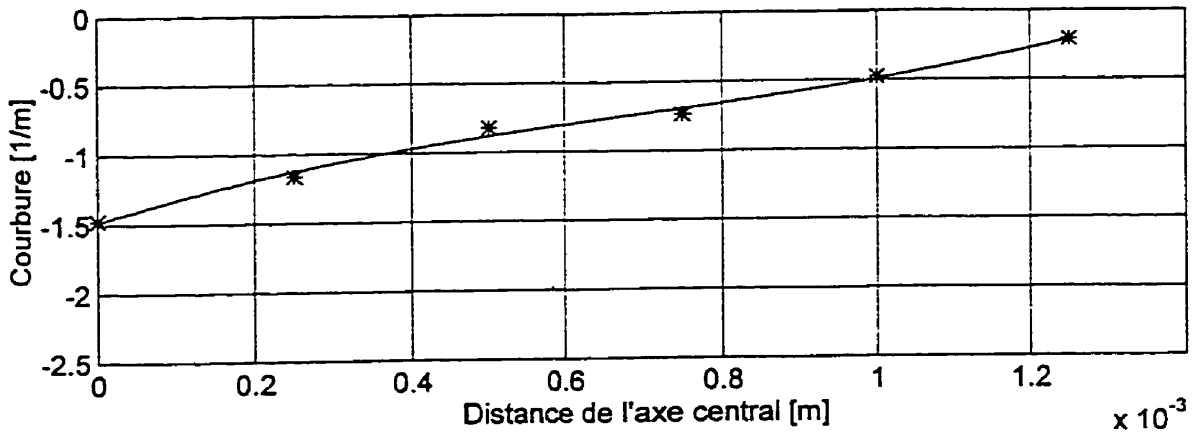


Figure IV.2.A - Condition de moulage : nominale

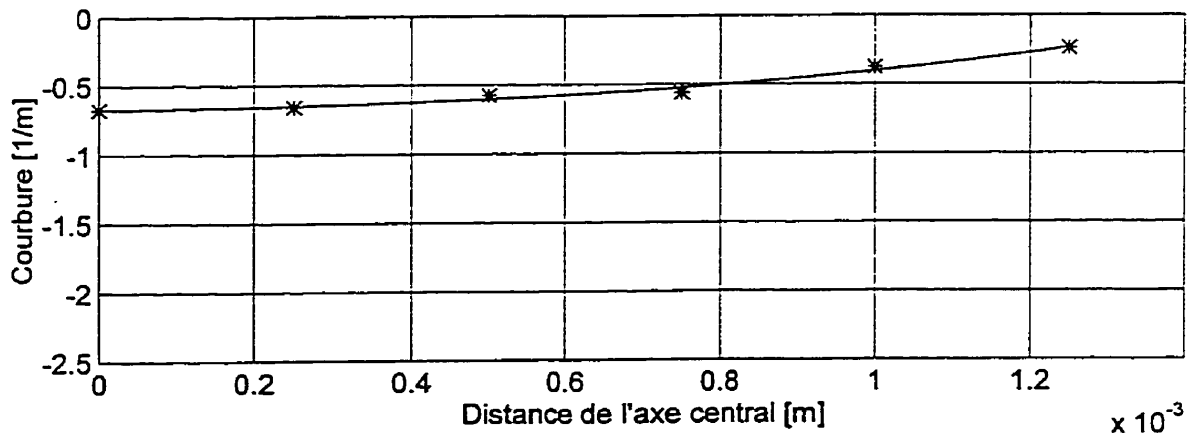


Figure IV.2.B - Condition de moulage : température du moule basse

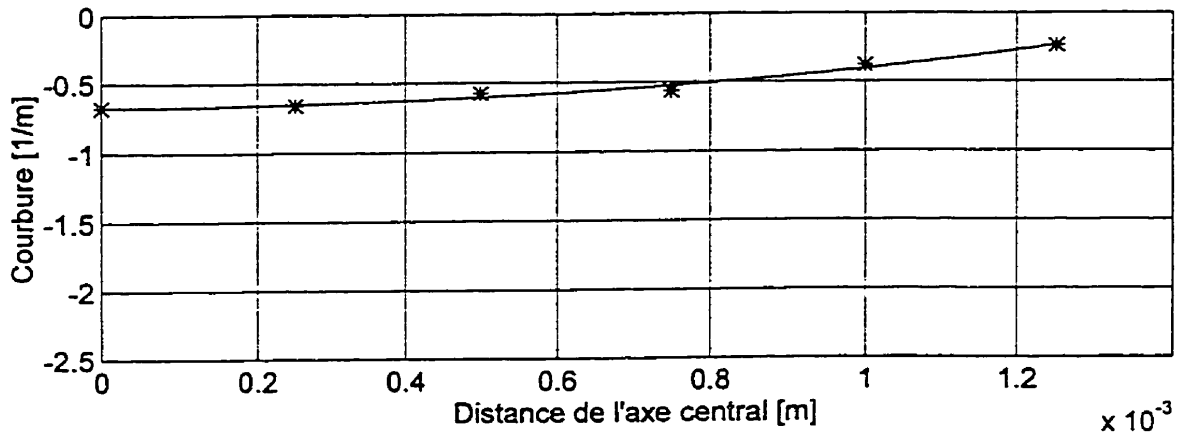


Figure IV.2.C - Condition de moulage : température du moule haute

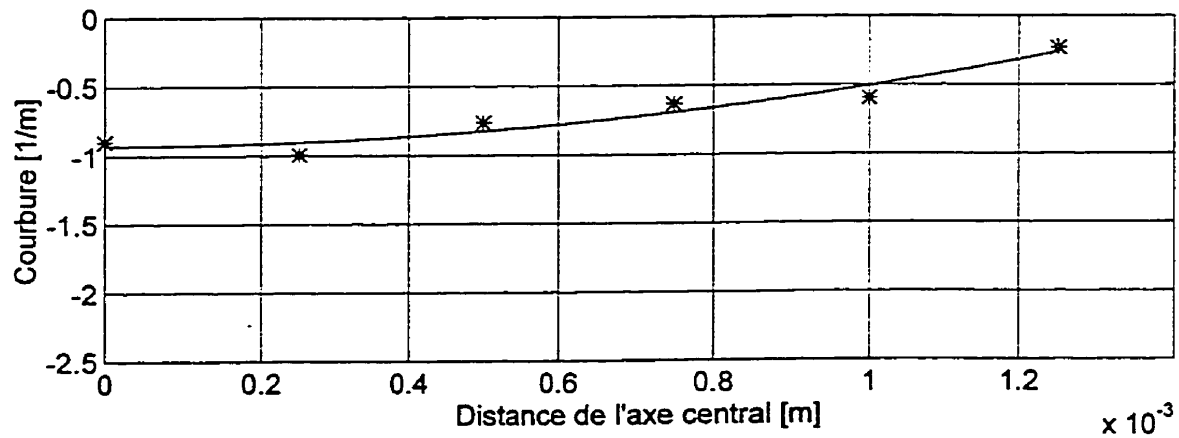


Figure IV.2.D - Condition de moulage : vitesse d'injection basse

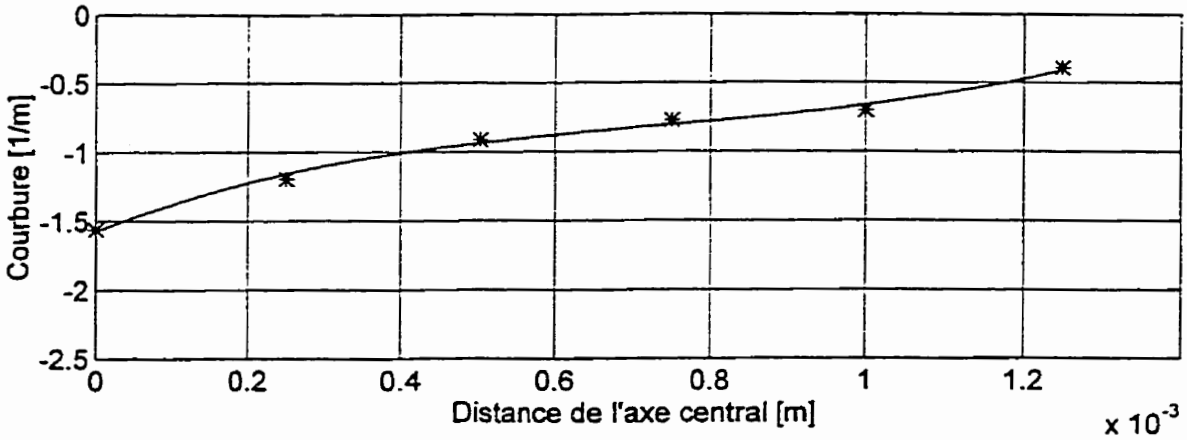
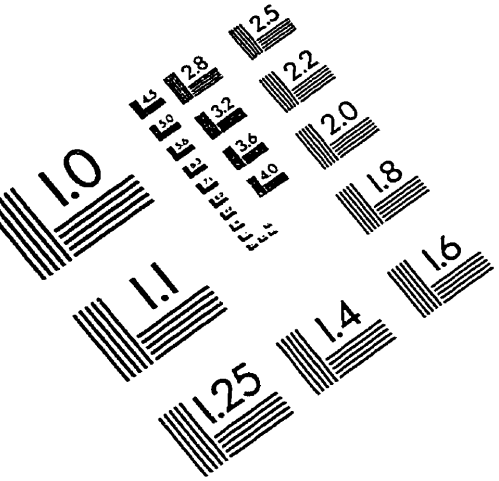
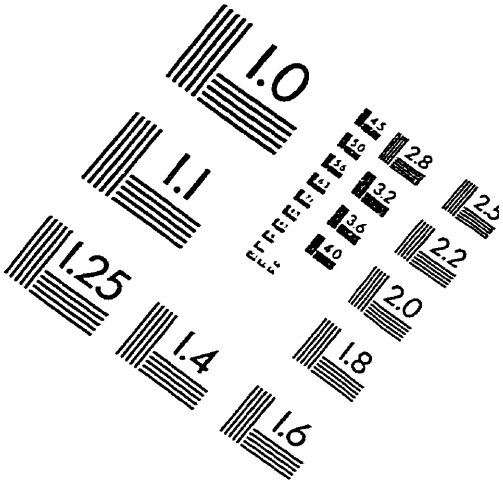
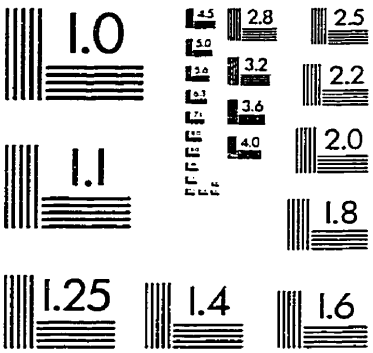


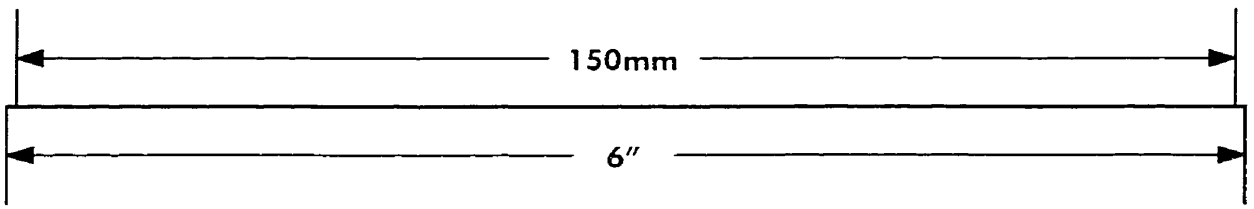
Figure IV.2.E - Condition de moulage : vitesse d'injection haute

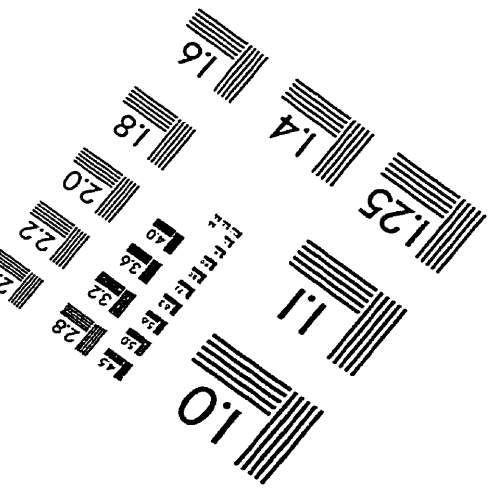
IMAGE EVALUATION TEST TARGET (QA-3)

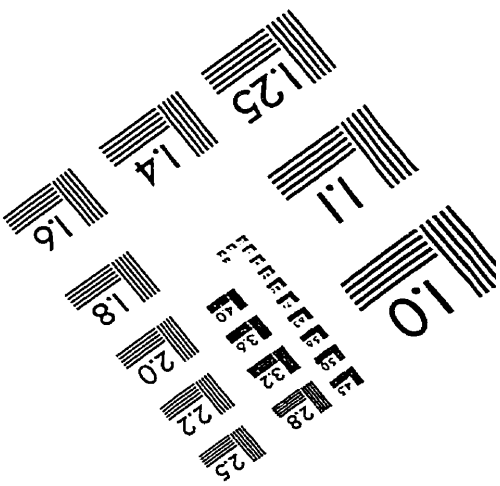












APPLIED IMAGE, Inc
1653 East Main Street
Rochester, NY 14609 USA
Phone: 716/482-0300
Fax: 716/288-5989

© 1993, Applied Image, Inc., All Rights Reserved