UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

DÉVELOPPEMENT D'UN OUTIL DE DESIGN POUR LES BUSES THERMIQUES DES MOULES À CANAUX CHAUDS

AHMED BOUDAOUARA
DÉPARTEMENT DE GÉNIE MÉCANIQUE
ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

MÉMOIRE PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION
DU DIPLÔME DE MAÎTRISE ÈS SCIENCES APPLIQUÉES
(GÉNIE MÉCANIQUE)
DÉCEMBRE 1999

© Ahmed Boudaouara, 1999.

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.

0-612-48838-1

Canada

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

Ce mémoire intitulé :

DÉVELOPPEMENT D'UN OUTIL DE DESIGN
POUR LES BUSES THERMIQUES DES
MOULES À CANAUX CHAUDS

présenté par : BOUDAOUARA Ahmed
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, D. Ing., membre et directeur de recherche
M. BOUTI Abdeslam, Ph. D., membre

DÉDICACE

Ce travail est dédié à mon père et à ma mère pour leur support, leur encouragement durant toute ma vie.

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier monsieur le professeur Bernard Sanschagrin et lui exprimer ma profonde reconnaissance de m'avoir accueilli au sein de son équipe et pour son appui continuel durant ce travail. Je lui exprime ma gratitude pour son soutien financier. surtout les connaissances qu'il m'a transmises vont être utiles durant toute ma carrière.

J'exprime aussi ma profonde reconnaissance à monsieur Abdeslam Bouti pour les nombreux conseils et discussions fructueuses tout au long de ce travail. De plus, je tiens à le remercier pour sa patience et tous ses efforts à l'accomplissement de ce travail.

Mes remerciements tout particulièrement sont finalement exprimés à l'équipe de développement des systèmes à canaux chauds de Husky pour leur contribution respective dans l'accomplissement de ce travail. Qu'il me soit permis de remercier tout particulièrement les membres du CRASP et les techniciens de laboratoire pour leur disponibilité et leurs conseils.

RÉSUMÉ

Ce travail est consacré à l'étude de la distribution de la température autour du seuil d'injection en utilisant la buse à obturation thermique. De façon à mieux comprendre le comportement thermique de la géométrie existante, il est nécessaire d'étudier l'effet des paramètres jugés influants sur la température en un point particulier de la buse. Ces paramètres sont les températures de réglages du moule et de la buse, la surface de contact entre la buse et l'insert et la position du cône renversé.

Dans l'ordre de ce travail de recherche, nous avons étudié expérimentalement l'effet du couple de serrage, de la rugosité et des tolérances de fabrication sur le profil thermique le long de la buse à obturation thermique. Comme il est plus pratique d'utiliser le banc d'essai lors de l'essai de profil thermique, nous avons réalisé une étude comparative entre le moule de plaques et le banc d'essai à l'aide de cette technique de profil thermique.

De plus, nous avons optimisé le procédé en moulant des plaques, en Nylon 6,6 chargé de 33 % de fibres de verre. L'utilisation d'un système d'acquisition de données nous a permis d'étudier l'effet des paramètres d'injection et de tracer la variation de la température aux positions où nous avons fixé des capteurs de température ou de pression. De cette façon, nous avons pu développer une stratégie pour déterminer l'influence de chaque paramètre sur la variation de la température autour du seuil d'injection et nous avons réussi à mettre en évidence l'effet des paramètres d'injection sur la variation de la température à chacune des positions.

Ensuite, nous avons élaboré un modèle d'éléments finis avec lequel nous avons réalisé des simulations de la distribution de la température autour du seuil d'injection. D'autre part, nous avons réalisé une analyse thermique pour déterminer la propriété la plus intéressante à considérer lors du procédé. Ceci permettra de relier les propriétés thermiques du polymère à injecter à la température d'un point singulier de la géométrie

de la buse. L'utilisation du résultat de l'analyse thermique et du modèle d'éléments finis serviront, par la suite comme outil de design, à l'optimisation de la géométrie de la buse appropriée au polymère à injecter.

ABSTRACT

This study deals with the temperature distribution around the gate area of the Thermal Sprue (TS 750) nozzle using a hot runner mold and a test rig. The thermal profile technique is used to compare the thermal behavior of the mold and the test rig. The roughness, dimensional tolerances and contact surface effect on the reverse taper temperature are also investigated by using the thermal profile technique.

A comparison is made between the hot runner mold and the test rig thermal behavior by using of finite element simulations and experimental results of the thermal profile technique. Effects of the design parameters, such as the contact surface (between the tip and the gate), the reverse taper position and the temperature setup, are investigated in this study. The FEM may be used for subsequent optimization of the TS or any other nozzle geometry.

A process optimization is also performed using Nylon 6,6 filled with 33 % of Fiber Glass. A data acquisition system is built to enable the recording of the pressure and the temperature signal variations during the injection molding cycle time. These sensors are properly selected and fixed at different locations around the gate area. The effect of the processing parameters, such as the mold and the nozzle temperature setup, the injection speed and the holding pressure, are investigated to determine the most influent parameters at each sensor location.

In order to establish a design guideline for the TS 750, thermal analysis are performed then the results are compared to the measured temperature at the reverse taper (during the process and on the bench without injecting any plastic into the mold) and the polymer properties.

The main advantage of this methodology is that it permits the elaboration of a design tool by exploring the thermal properties of the processed plastic, the processing parameters and the FEM simulations to predict the optimal design of the TS, which enable the sprue to break at the taper point with the shortest cycle time possible.

TABLE DES MATIÈRES

DÉDICACE iv

REMERCIEMENTS v

RÉSUMÉ vi

ABSTRACT viii

TABLE DES MATIÈRES x

LISTE DES FIGURES xv

LISTE DES TABLEAUX xxii

LISTE DES SIGLES xxv

INTRODUCTION 1

CHAPITRE 1 DESCRIPTION DU PROJET 2

1.1 Introduction 2

1.2 Objectifs 3

1.3 Méthodologie 3

1.1.1 Approche générale 4

1.1.2 Étapes suivies 4

CHAPITRE 2 REVUE DE LA LITTÉRATURE 6

2.1 Introduction 6

2.2 Moulage par injection 7

2.2.1 Presse à injection 7

2.2.2 Le cycle d'injection 7

2.3 Moule à canaux chauds 9

2.3.1 Système à canaux chauds 10

2.3.2 Avantages et inconvénients des canaux chauds 10

2.3.3 Buse d'injection 12

2.3.3.1 Injection à obturation thermique (seuil ouvert) 13

2.3.3.1.1 Paramètres de design 14

2.3.3.1.2 Autres facteurs 15

2.3.3.2 Injection à obturation mécanique (seuil fermé) 16

2.4 Le picot d'injection 16

2.5 Mise en forme des matériaux plastiques 17

2.5.1 État des matériaux plastiques 17

2.5.2 Comportement des matériaux plastiques 18

2.6 Polyamide 6,6 20

2.7 Analyse thermique 21

2.8 Les capteurs 24

2.8.1 Mesure de température par contact 25

2.8.2 Mesure de température à distance 26

2.8.3 Temps de réponse 27

2.8.4 Précision 28

2.9 Le transfert de chaleur dans les matériaux 29

2.9.1 Résistance de contact 29

2.10 Conclusions 30

CHAPITRE 3 PARTIE EXPÉRIMENTALE 31

3.1 Introduction 31

3.2 Matériaux utilisés 32

3.2.1 Analyses thermiques 33

3.3 Presse à injection 35

3.3.1 Conditionneur d'eau 35

3.4 Moule et banc d'essai 35

3.4.1 Moule de plaques 35

3.4.2 Banc d'essai 36

3.4.3 Type de buse utilisée 37

3.4.4 Contrôleurs du système à canaux chauds 38

3.5 Système d'acquisition de données 38

3.5.1 Choix des capteurs 39

3.5.1.1 Évaluation de la précision 40

3.5.1.2 Évaluation du temps de réponse 40

3.5.2 Montage expérimental 42

3.6 Profils de température 44

3.6.1 Appareillage 45

3.6.2 Approche expérimentale 45

3.6.2.1 Effet du couple de serrage 47

3.6.2.2 Effet de la rugosité et des tolérances de fabrication 48

3.6.2.3 Comparaison du profil thermique du banc d'essai à celui du moule 48

3.7 Paramètres de moulage 49

3.7.1 Paramètres à étudier 50

3.7.2 Moulage des plaques 51

3.8 Conclusions 52

CHAPITRE 4 RÉSULTATS ET DISCUSSIONS 53

4.1 Introduction 53

4.2 Choix des capteurs 54

4.2.1 Précision 54

4.2.2 Temps de réponse 54

4.3 Profils thermiques à sec 58

4.3.1 Effet du couple de serrage 59

4.3.2 Effet de la rugosité et des tolérances de fabrication 65

4.3.3 Effet de l'utilisation de différentes composantes 68

4.3.4 Comparaison entre le moule de plaques et le banc d'essai 71

4.4 Profils thermiques lors de l'injection 80

4.4.1 Effet de la température de la buse 82

4.4.2 Effet de la température du moule 84

4.4.3 Effet de la vitesse d'injection 85

4.4.4 Effet de la pression de maintien 87

4.4.5 Comparaison des différents effets 89

4.4.6 Comparaison des températures statiques et dynamiques 90

4.5 Résultats des analyses thermiques 91

4.6 Conclusions 93

CHAPITRE 5 ÉTUDE NUMÉRIQUE 95

5.1 Introduction 95

5.2 Simulations par la méthode des éléments finis 95

5.2.1 Comparaison des simulations aux résultats expérimentaux 98

5.2.1.1 Cas du banc d'essai 98

5.2.1.2 Cas du moule 111

5.2.1.3 Effet des paramètres géométriques 114

5.3 Conclusions 117

CONCLUSION 118

RÉFÉRENCES 121

ANNEXE 125

LISTE DES FIGURES

Figure 2.1 : Les parties principales d'une presse d'injection 7

Figure 2.2 : Les différentes étapes du déroulement du cycle d'injection..... 9

Figure 2.3 : Différentes composantes d'un système à canaux chauds, dont la moitié du haut montre le cas de la buse à obturation thermique et la moitié du bas montre le cas de la buse à obturation mécanique [3] 11

Figure 2.4 : Picot d'injection typique à chaque buse [3] 16

Figure 2.5 : Différences de température entre les couches dans une cavité..... 18

Figure 2.6 : Comportement des matériaux plastiques, cas du chauffage à gauche et cas du refroidissement à droite [1] 19

Figure 2.7 : Types de jonction de thermocouples [20]..... 26

Figure 2.8 : Pyromètre optique à gauche [21] et capteur infrarouge à droite et [22]..... 27

Figure 3.1: Une représentation schématique de l'analyseur DSC à compensation de puissance [12]..... 33

Figure 3.2 : Photo du moule (fourni par Husky) lors des essais de profil thermique 36

Figure 3.3 : Buse à obturation thermique avec les différentes composantes 37

Figure 3.4: Positions des capteurs servant à l'acquisition des données lors du procédé d'injection 39

Figure 3.5 : Dispositifs expérimentaux utilisés pour comparer le temps de réponse des capteurs de température 41

Figure 3.6 : Schéma du montage expérimental du système d'acquisition de données.... 44

Figure 3.7 : Montage expérimental du banc d'essai lors de la réalisation de l'essai du profil thermique 45

Figure 3.8 : Schéma du montage de l'essai du profil thermique 47

Figure 4.1: Comparaison des temps de réponse de T/C-K-1, T/C-K-2, T/C-J-3, T/C-J-4 et RTD plongés ensemble dans l'huile à 150 deg.C, après avoir être conditionnés à 29 deg.C 55

Figure 4.2 : Comparaison des temps de réponse de T/C-J-2 et T/C-K-2 plongés ensemble dans l'huile à 150 deg.C, après avoir être conditionnés à 29 deg.C 56

Figure 4.3 : Résultat de l'essai de temps de réponse de T/C-J-W, le thermocouple à rondelle, plongés dans l'huile à 100 deg.C après avoir été conditionné à 26 deg.C 58

Figure 4.4: Effet du couple de serrage sur le profil de température du banc d'essai (se référer au tableau 4.3 pour les conditions d'essai) 60

Figure 4.5: Effet du couple de serrage sur le profil de température au cône renversé en utilisant le banc d'essai avec la buse des semi-cristallins (se référer au tableau 4.3 pour les conditions d'essai) 62

Figure 4.6 : Schéma de chargement de la buse en cas d'un bouchon lors de l'injection 64

Figure 4.7 : Effet de la rugosité et des tolérances de fabrication sur le profil thermique en utilisant le moule de plaques avec la buse des semi-cristallins (se référer au tableau 4.3 pour les conditions d'essai) 67

Figure 4.8 : Erreur due à l'utilisation de différents thermocouples en utilisant le banc d'essai avec la buse des semi-cristallins (se référer au tableau 4.3 pour les conditions d'essai) 69

Figure 4.9 : Effet de l'utilisation de différentes composantes (thermocouple de contrôle de température et élément chauffant) en utilisant le moule des plaques avec la buse des semi-cristallins (se référer au tableau 4.3 pour les conditions d'essai) 70

Figure 4.10 : Comparaison du profil thermique du moule à celui du banc d'essai avec la buse des semi-cristallins (se référer au tableau 4.3 pour les conditions d'essai) 72

Figure 4.11 : Profil thermique obtenu avec le banc d'essai divisé en trois zones avec la buse des semi-cristallins (se référer au tableau 4.3 pour les conditions d'essai) 73

Figure 4.12 : Profil thermique obtenu avec le moule de plaques divisé en trois zones avec la buse des semi-cristallins (se référer au tableau 4.3 pour les conditions d'essai) 74

Figure 4.13 : Schéma des différentes composantes du banc d'essai avec la disposition des points de mesure 76

Figure 4.14 : Schéma des différentes composantes du moule avec la disposition des points de mesure 77

Figure 4.15 : Comparaison du profil thermique du moule monté sur la machine à celui du moule sur la table (se référer au tableau 4.3 pour les conditions d'essai) 80

Figure 4.16 : Variation de la température aux différentes positions des capteurs servant à l'acquisition de données 81

Figure 4.17 : Effet de la température de l'élément chauffant sur la température au cône renversé (T-06) (T_{moule} à 93 deg.C, $T_{distributeur}$ à 288 deg.C, la pression de maintien à 32 MPa et la vitesse d'injection à 25 mm/s) 82

Figure 4.18 : Effet de la température de l'élément chauffant sur la température au seuil d'injection (T-07) (T_{moule} à 103 deg.C, $T_{distributeur}$ à 288 deg.C, la pression de maintien à 42 MPa et la vitesse d'injection à 25 mm/s) 83

Figure 4.19 : Effet de la température du moule sur la température (T-07) au bout de la buse(T_{buse} à 260 deg.C, $T_{distributeur}$ à 288 deg.C, le pression de maintien à 32 MPa et la vitesse d'injection à 25 mm/s) 85

Figure 4.20 : Effet de la vitesse d'injection sur la température (T-07) au seuil d'injection (T_{moule} à 73 deg.C, T_{buse} à 227 deg.C, $T_{distributeur}$ à 288 deg.C et la pression de maintien à 32 MPa) 86

Figure 4.21 : Variation de la pression au centre de la cavité lors du cycle d'injection ... 87

Figure 4.22 : Effet de la pression de maintien sur la température (T-07) au seuil d'injection (T_{moule} à 93 deg.C, T_{buse} à 249 deg.C, $T_{distributeur}$ à 288 deg.C et la vitesse d'injection à 25 mm/s) 88

Figure 4.23: Résultat de l'essai de DSC en utilisant le Zytel 70G33L NC010 à un taux de 10 deg.C/mn 92

Figure 5.1 : Modèle avec les conditions aux limites utilisées lors des simulations, le modèle de convection est présenté en haut, alors que le modèle de conduction est celui présenté en bas 97

Figure 5.2: Comparaison du résultat de la simulation avec le modèle primaire au résultat expérimental obtenu avec le banc d'essai en réglant la température du moule à 93 deg.C, la température de la buse et celle du distributeur à 288 deg.C 99

Figure 5.3 : Comparaison des résultats des simulations (obtenus par chacun des deux modèles) au profil thermique expérimental obtenu avec le banc d'essai en réglant la température du moule à 93 deg.C, la température de la buse et celle du distributeur à 288 deg.C 102

Figure 5.4 : Simulation obtenue par les modèles avec la résistance de contact comparé au résultat expérimental du profil thermique obtenu avec le banc d'essai en réglant la température du moule à 93 deg.C, la température de la buse et celle du distributeur à 288 deg.C 103

Figure 5.5 : Positions des points de mesure de part et d'autre de la surface de contact entre la buse et le corps de la buse du banc d'essai 104

Figure 5.6 : Comparaison des résultats des simulations au profil thermique expérimental obtenu en utilisant le banc d'essai avec la buse modifiée.

Ceci en réglant la température du moule à 93 deg.C, la température de la buse et celle du distributeur à 288 deg.C 106

Figure 5.7 : Comparaison du résultat expérimental du profil thermique aux résultats numériques obtenus avec le banc d'essai en réglant la température du moule à 90 degC, la température de la buse et celle du distributeur à 190,5 deg.C pour l'Acétal (Delrin 100NC010) 108

Figure 5.8 : Comparaison du résultat expérimental du profil thermique aux résultats numériques obtenus avec le banc d'essai en réglant la température du moule à 93 deg.C, la température de la buse à 238 deg.C et celle du distributeur à 288 deg.C pour le Nylon chargé de fibres de verre (Zytel 70G33L NC010) 109

Figure 5.9 : Résultats des simulations avec le banc d'essai en utilisant la buse pour les amorphes. L'essai est réalisé à une température de moule de 82 deg.C, la buse et le distributeur étant maintenus à la même température de 299 deg.C 110

Figure 5.10 : Résultats des simulations dans le cas du moule en réglant la température du moule à 93 deg.C, la température de la cheminée d'injection, du distributeur et de la buse à 288 deg.C (la résistance de contact est ignorée dans ces modèles) 112

Figure 5.11: Résultats des simulations dans le cas du moule avec la buse modifiée en réglant la température du moule à 93 deg.C, la température de la

cheminée d'injection, du distributeur et de la buse à 288 deg.C (la résistance de contact est ignorée dans ces modèles) 113

Figure 5.12 : Comparaison des résultats des simulations obtenus avec le banc d'essai en réglant la température du moule à 93 deg.C, la température de la buse et celle du distributeur à 288 deg.C 115

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2.1 : Les principales méthodes d'analyse thermique [12] 22

Tableau 2.2 : Quelques applications du DTA et du DSC aux polymères [12] 23

Tableau 2.3 : Comparaison des propriétés des différents types de capteur de température 25

Tableau 3.1 : Caractéristiques du Zytel 70G33L NC010 32

Tableau 3.2 : Propriétés des matériaux utilisés 34

Tableau 3.3 : Description des capteurs de température choisis 42

Tableau 3.4: Positions des thermocouples (se référer à la figure 3.4 pour les positions) 43

Tableau 3.4 :Paramètres de moulage 49

Tableau 3.5 : Paramètres étudiés 51

Tableau 3.6 : Données du calcul du temps de cycle 50

Tableau 4.1 : Résultats des mesures de précision des capteurs 54

Tableau 4.2 : Résultats des temps de réponse des capteurs 56

Tableau 4.3 : Réglages de température des essais de profil thermique 59

Effet du couple de serrage sur le profil de température du banc d'essai (se référer au tableau 4.3 pour les conditions d'essai) 60

Tableau 4.4 : Température à différentes positions pour chaque couple de serrage 61

(se référer au tableau 4.3 pour les conditions d'essai) 61

Tableau 4.5 : Données sur les filets de la buse 65

Tableau 4.6 : Diamètre du trou de l'insert dont la surface est en contact avec le bout de la buse 66

Tableau 4.7 : Effet de la rugosité et des tolérances de fabrication sur la température 68

(se référer au tableau 4.3 pour les conditions d'essai) 68

Tableau 4 8 : L'effet du changement d'un jeu d'élément chauffant et de thermocouple 71

(se référer au tableau 4.3 pour les conditions d'essai) 71

Tableau 4.9 : Les résultats des essais de profil thermique à différentes positions 75

(se référer au tableau 4.3 pour les conditions d'essai) 75

Tableau 4.10 : Comparaison des paramètres des systèmes de refroidissement 78

Tableau 4.11 : Résultats de mesure de température à la surface de l'insert 78

(se référer au tableau 4.3 pour les conditions d'essai) 78

Tableau 4.12 : Relation entre le profil thermique du moule et le banc d'essai (se référer au tableau 4.3 pour les conditions d'essai) 79

Tableau 4.13 : Effet du réglage de la buse sur la température aux différentes positions 89

Tableau 4.14 : Résultat des paramètres du procédé optimale 90

Tableau 4.15 : Comparaison des températures statique et dynamique (voir tableau 4.14 pour les conditions d'essai, la température de la buse est 238 deg.C) 90

Tableau 4.16 : Résultats des essais de DSC 91

Tableau 4.17: Propriétés des matériaux versus la température au cône renversé à sec .. 93

Tableau 5.1: Températures de réglage des différents essais de profil thermique 98

Tableau 5.2: Paramètres de calcul de transfert de chaleur 101

Tableau 5.3 : Comparaison de résultats (réglage no 3, Table 5.1) 104

Tableau 5.4: Comparaison des résultats obtenus avec les différents modèles 105

Tableau 5.5: Comparaison des résultats de température (réglage no 4, Table 5.1) 105

Tableau 5.6: Comparaison des résultats obtenus dans le cas du moule 114

Tableau 5.7: Résultats des différents réglages dans le cas du banc d'essai 116

LISTE DES SIGLES

a	Diffusivité thermique du plastique
A	Aire de contact
Cp	Chaleur spécifique
d^*	Distance entre le centre du canal de refroidissement et le point d'injection au centre de la buse
d_c	Diamètre moyen de la surface de contact entre la buse et le corps de la buse
d_m	Diamètre nominal des filets
dt	Différence de temps
dT	Différentiel de température
D_i	Diamètre intérieur
D_o	Diamètre extérieur
E	Module d'élasticité
F	Force exercée sur la buse
Fi	Force initiale de serrage (minimale)
g	Accélération gravitationnelle
h	Coefficient de transfert de chaleur par convection
k	Conductivité thermique
K_B	Rigidité de la buse
K_{CB}	Rigidité du corps de la buse
K_{eff}	Conductivité thermique efficace
L_a	Longueur active des filets
q'	Flux de chaleur par unité de longueur

Q	Flux de chaleur
P_i	Pression d'injection
Pr	Nombre Prandtl
R_{ac}	Nombre de Rayleigh critique
R_{al}	Nombre de Rayleigh pour une longueur L
s	Épaisseur des plaques moulées
$t_{ref.}$	Temps de refroidissement
T	Température instantanée
T_{amb}	Température ambiante (de l'air)
T_b	Température de réglage de la buse
T_c	Température de cristallisation
T_f	Température de fusion
T_g	Température de transition vitreuse
T_i	Couple initial de serrage
T_i	Température de l'eau de refroidissement du moule à canaux chauds
$T_{liq.}$	Température du liquide
T_o	Température de réglage du distributeur
v	Vitesse d'écoulement
V	Volume
$\circ$	Angle des filets
α	Diffusivité Thermique
β	Expansion Thermique Volumétrique

ε_i	Coefficient d'émission (plaque du distributeur)
ε_o	Coefficient d'émission (distributeur)
μ_c	Coefficient de frottement entre la buse et le corps de la buse
μ	Coefficient de frottement entre les filets de la buse et du corps de la buse
ρ	Densité
σ	Constante de Boltzmann
θ_i	Température du polymère fondu
θ_{Mf}	Température du moule
θ_{dem}	Température de démoulage
ν	Viscosité Cinétique

INTRODUCTION

La conception de pièces en polymère technique fait de plus en plus appel à des méthodes complexes telles que la conception assistée par ordinateur, l'analyse par éléments finis et les calculs d'écoulement dans le moule. Bien que d'une utilité indéniable, ces méthodes ne tiennent pas compte de tous les facteurs fixés par le concepteur. De plus, non seulement les machines d'injection sont devenues complexes, mais aussi les moules pour produire des pièces de haute performance.

Les systèmes à canaux chauds ont aussi une réputation reconnue pour leur contribution à la qualité des produits. La qualité de la pièce repose non seulement sur le choix du système à canaux chauds approprié mais aussi sur le choix des buses d'injection. Dans un marché où la compétitivité est de plus en plus forte, les fabricants sont de plus en plus obligés à produire des systèmes à canaux chauds de haute qualité avec un minimum de perte de pression et des fluctuations de température, les plus faibles possible.

Ce travail est consacré à l'étude de l'effet des paramètres géométriques de la buse à obturation thermique et l'élaboration d'un outil permettant par la suite d'optimiser son design. Il est par conséquent réparti sur cinq chapitres. Une description du projet est présentée au premier chapitre. Le deuxième chapitre est réservé à une revue de la littérature. Ensuite, nous présentons la méthodologie expérimentale au troisième chapitre. Dans le chapitre quatre, nous nous attardons sur la présentation des résultats de l'étude expérimentale. Enfin, le chapitre cinq traite de l'étude numérique (de la modélisation et de la simulation par la méthode des éléments finis) afin de trouver le modèle qui servira par la suite à l'optimisation de la géométrie de la buse pour un réglage donné de température.

CHAPITRE 1

DESCRIPTION DU PROJET

1.1 Introduction

Dans la pratique, de nombreux concepteurs tendent, en se basant sur leur expérience des polymères amorphes, à employer les mêmes techniques pour développer de nouveaux outillages pour les semi-cristallins. Malheureusement ces méthodes ne fonctionnent pas toujours, surtout dans le cas des résines renforcées. Un seuil mal conçu peu à lui seul altérer les propriétés des pièces moulées avec un polymère technique semi-cristallin, même si tous les autres paramètres sont parfaits. Le défaut sera identifié par un certain nombre de problèmes surgies lors de l'injection des résines chargées ou aussi les résines non chargées. Toutefois, le concepteur devrait également être impliqué dès les premiers stades de conception, afin d'éviter les problèmes prévisibles. En fait, la seule méthode de vérifier un nouveau produit est de le tester en mesurant ses paramètres. La fiabilité des résultats obtenus repose sur la méthode utilisée pour réaliser les essais et la précision des équipements. Ces essais peuvent aussi être réalisés sur les produits des compétiteurs pour s'assurer d'offrir un meilleur produit fini.

La buse à obturation thermique, comme les autres types de buse, est une composante située au seuil d'injection d'un système à canaux chauds. En réalité, cette buse a été développée par la vieille méthode d'essais et erreurs. Quelques adaptations ont été apportées à cette buse, mais il reste à comprendre pourquoi ce design fonctionne dans certaines applications et s'il est optimal. Toutefois avant de se pencher sur les objectifs, les essais à effectuer et la méthode utilisée, il est nécessaire de saisir le contexte dans lequel ce projet a été réalisé. Ce projet étant d'un très grand intérêt industriel, toutes nouvelles informations sont protégées ce qui fait qu'il y a peu ou pas de publications à ce

sujet. Pour cette raison, nous avons convenu à une entente de confidentialité avec la compagnie "Husky Injection Molding Systems", une multinationale de réputation internationale dans la fabrication des presses, des moules et d'équipements d'injection. Cette entente limite la publication des résultats pour une période de cinq ans.

1.2 Objectifs

L'objectif de ce projet est de réaliser une étude pratique et une modélisation par éléments finis des transferts thermiques, entre les pièces chaudes et les pièces froides, afin de visualiser la distribution de la température autour du seuil d'injection. Ensuite, il s'agira d'étudier l'effet de certains paramètres géométriques sur le profil thermique de la buse à obturation thermique. Ceci permettra, par la suite, de développer un outil de design capable de prédire la géométrie optimale de la buse appropriée, en connaissant les propriétés du matériau à injecter.

1.3 Méthodologie

Une approche méthodique et simple est entreprise pour résoudre le problème. Il s'agit de faire une analyse thermique du matériau à injecter, afin de relier certaines propriétés thermiques aux résultats du profil thermique obtenu à sec le long de la buse, en utilisant un banc d'essai de moule à canaux chauds. Donc, il suffit de trouver une relation entre les propriétés thermiques du plastique et la température à un point singulier de la buse. Ceci en assurant la plus large fenêtre de fonctionnement lors du procédé d'injection en utilisant la buse à obturation thermique.

Toutefois, nous allons commencer par une revue de la littérature. Nous allons étudier les dispositifs expérimentaux que nous devons utiliser et la méthodologie à entreprendre afin de réaliser nos essais. De plus, avant de modéliser la distribution de la température

le long de la buse d'injection, nous allons identifier les différents facteurs pouvant l'affecter.

1.1.1 Approche générale

L'approche consiste à modéliser par la méthode des éléments finis la distribution de température autour du seuil d'injection et à faire varier les paramètres géométriques afin d'identifier ceux ayant le plus d'influence sur le profil thermique pour pouvoir, par la suite, optimiser la géométrie de la buse. La validation du modèle se fait en comparant les profils thermiques obtenus numériquement à ceux obtenus expérimentalement. Un outil de design de la buse peut être générer par la méthode des éléments fins en explorant les propriétés thermiques du matériau à injecter.

Pour simplifier l'étude, la résine, les matériaux du moule à canaux chauds, la position des canaux de refroidissement, la position de l'élément chauffant de la buse et du thermocouple de contrôle, le poids de la moulé, ainsi que l'épaisseur du moule sont maintenus constants.

1.1.2 Étapes suivies

Les différentes étapes à franchir pour accomplir cette étude sont décrites ci-dessous :

1. déterminer les propriétés thermiques du matériau utilisé pour mouler des plaques;
2. sélectionner les capteurs appropriés pour faire l'acquisition des données (température et pression) lors du moulage;
3. étudier l'effet du couple de serrage de la buse sur le profil de température en utilisant un banc d'essai;
4. comparer les profils thermiques obtenus à sec avec le moule de plaques à ceux obtenus avec le banc d'essai du moule à canaux chauds;

5. réaliser un système d'acquisition de données permettant de saisir les signaux provenant des capteurs de pression et de température au cours du procédé d'injection;
6. mouler des pièces afin d'optimiser les paramètres de moulage et d'étudier l'effet de certains paramètres sur le seuil d'injection. La température du moule, la température de la buse thermique, la vitesse d'injection et la pression de maintien sont les paramètres à faire varier afin d'obtenir une plus large fenêtre de fonctionnement pour un temps de cycle minimum. Les autres paramètres sont maintenus aux valeurs optimales ou aux valeurs recommandées par le fabricant. Le moulage se fait avec acquisition de données (température et pression) lues par des capteurs installés aux endroits jugés critiques afin de tracer les courbes correspondantes;
7. établir la relation entre le profil de température du procédé optimal et les propriétés thermiques du matériau injecté;
8. refaire les essais de profil thermique à sec en utilisant les paramètres optimaux du procédé;
9. utiliser les résultats des essais de profil thermique à sec pour valider le modèle d'éléments finis en utilisant les conditions frontières du procédé optimal.

Après la validation du modèle obtenue par la méthode des éléments finis, l'optimisation de la géométrie de la buse devient une opération facile en posant la fonction objectif et les contraintes appropriées. Ensuite, la buse avec la géométrie optimisée peut être fabriquée et la validation se fait en répétant les étapes de 6 à 9 dans le cas de la buse optimale. Mais, ces étapes d'optimisation sont laissées pour des travaux futurs.

CHAPITRE 2

REVUE DE LA LITTÉRATURE

2.1 Introduction

Dans le procédé de moulage par injection, des pièces extrêmement complexes pourront être fabriquées. Ceci dépend de la technique de fabrication utilisée. Aujourd'hui, on veut non seulement que ces pièces remplissent parfaitement leur fonction technique, ce qui va de soi, mais aussi leur donner une forme artistique. De plus, il faut toujours penser aux dépenses, aux moyens de travail, pour qu'ils soient les plus économiques possible.

Il est capital que le moulage des plastiques techniques semi-cristallins soit réalisé avec un équipement offrant la température d'outillage appropriée. La température doit être contrôlée plus strictement dans le cas de moulage par injection des thermoplastiques semi-cristallins que dans le cas des amorphes. Ceci demande une attention particulière lors de la phase préparatoire de conception, afin d'éviter des problèmes à des stades avancés de production.

Dans ce chapitre, nous allons commencer par décrire le procédé de moulage par injection, les moules à canaux chauds, les buses à obturation thermique, ainsi que les picots d'injection. Nous parlons aussi de la mise en forme des matériaux plastiques et des analyses thermiques. Ensuite, nous présentons quelques techniques de mesure de température. Finalement, la dernière section est réservée pour montrer certains problèmes de modélisation du transfert de chaleur.

2.2 Moulage par injection

2.2.1 Presse à injection

La presse d'injection comprend une unité de plastification, qui transforme les granulés solides en polymère fondue pour l'injecter ensuite dans le moule, et une unité de fermeture, à laquelle le moule est fixé. La figure 2.1 illustre les parties principales d'une presse à injection. Dans le cas des thermoplastiques, le moule est régulé généralement à une température voisine de la température ambiante, afin de figer la matière plastique le plus vite possible.

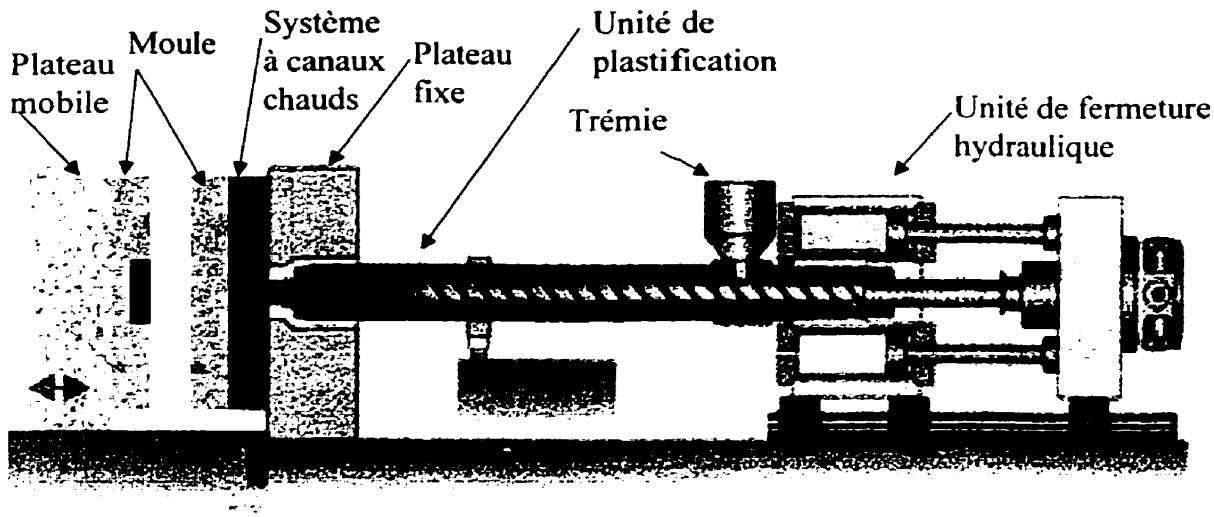


Figure 2.1 : Les parties principales d'une presse d'injection

2.2.2 Le cycle d'injection

Le cycle d'injection peut durer de quelques secondes à plusieurs minutes, selon le volume et l'épaisseur de la pièce. Le temps de cycle [1] est étroitement relié à la

viscosité. Plus la viscosité est élevée, plus faible est la vitesse d'injection et plus long est le temps de cycle. Mais baisser la viscosité en élevant la température du moule est contre productif, car le temps de refroidissement va être plus lent. Pour obtenir le temps de cycle le plus court possible, il faut opérer la machine à pression maximale avec une température du moule et polymère minimale, mais ceci n'est pas toujours facile à réaliser. De plus, opérer la machine au maximum de sa capacité nécessite plus d'énergie et réduit sa durée de vie. En effet, il y a des logiciels pour faire des simulations du cycle d'injection afin de trouver le meilleur réglage de la machine.

Il est important de connaître les séquences d'injection des pièces moulées. La figure 2.2 illustre le déroulement du cycle d'injection :

- À l'ouverture du moule, le polymère fondu contenu dans l'unité de plastification avance quand la vis recule en tournant afin de permettre l'accumulation d'une quantité suffisante de matière en tête.
- À la fermeture du moule, la vis avance pour injecter le polymère. C'est la phase de remplissage;
- Une fois la cavité remplie, une pression de maintien s'établit sur le polymère fondu pour le compacter jusqu'à figeage de la matière dans le moule. C'est la phase compactage maintien;
- L'unité de plastification recommence à plastifier la dose du prochain cycle, pendant ce temps le refroidissement continue dans le moule jusqu'à l'ouverture du moule, la pièce est ensuite éjectée et achève son refroidissement à l'air libre.

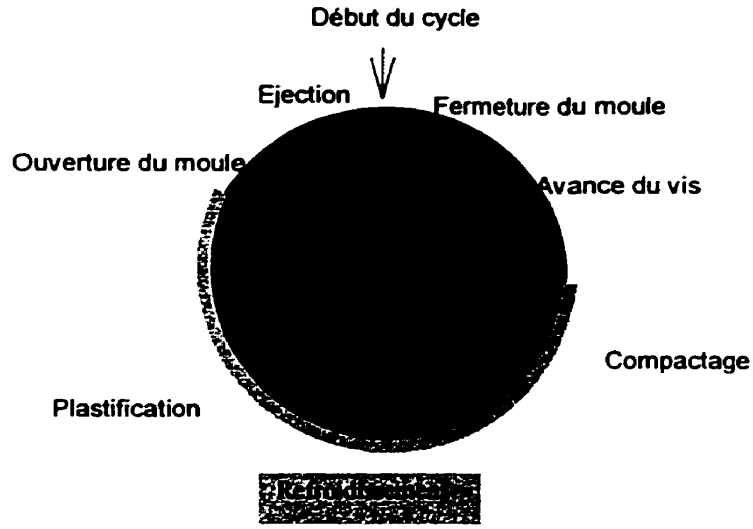


Figure 2.2 : Les différentes étapes du déroulement du cycle d'injection

2.3 Moule à canaux chauds

Quand un moule contient un bloc distributeur chauffé, il est considéré comme un moule à canaux chauds. Le distributeur amène la matière fondue depuis la buse de la presse jusqu'au(x) point(s) d'injection. Le bloc distributeur est chauffé de façon à obtenir un profil de température uniforme le long des canaux. Pour cette raison, il est isolé du reste du moule par des isolants ou des poches d'air afin de minimiser les pertes de chaleur. Le polymère se rend ainsi aux points d'injection, sans perte de pression due à des baisses de température et à des pertes de chaleur.

2.3.1 Système à canaux chauds

Le système à canaux chauds est la partie chaude du moule à canaux chauds. Il est constitué d'une cheminée d'injection qui se connecte directement à la buse de la machine, d'un distributeur et d'un ou de plusieurs buses guidant le polymère fondu jusqu'à la cavité. Ceux-ci servent à distribuer et maintenir le polymère à la température désirée jusqu'au(x) point(s) d'injection. Dans le distributeur, la température du polymère doit être le plus uniforme possible. Car toute diminution de température provoque des effets indésirables comme l'augmentation [2] de la pression dans le(s) cavité(s).

L'écoulement sous pression du polymère génère de la chaleur par cisaillement, mais le système à canaux chauds est souvent équipé d'éléments chauffants, pour compenser les pertes de chaleur, et de thermocouples pour contrôler sa température. La figure 2.3 illustre les différentes composantes d'un système à canaux chauds.

2.3.2 Avantages et inconvénients des canaux chauds

L'utilisation des canaux chauds offre plus d'avantages que d'inconvénients. Les principaux avantages des canaux chauds sont :

- économie d'énergie et de matière plastique, du fait que la carotte d'injection et les canaux sont éliminés;
- réduction du temps de cycle, car il y a moins de composantes à refroidir;
- obtention d'un meilleur fini de surface au(x) point(s) d'injection;
- habilité au bon contrôle de la température du plastique fondu au cours du remplissage du moule. Ceci facilite l'utilisation des matériaux plastiques à haute performance; ainsi que l'utilisation des additifs.

Les inconvénients des canaux chauds sont le changement de couleur et surtout leur prix élevé.

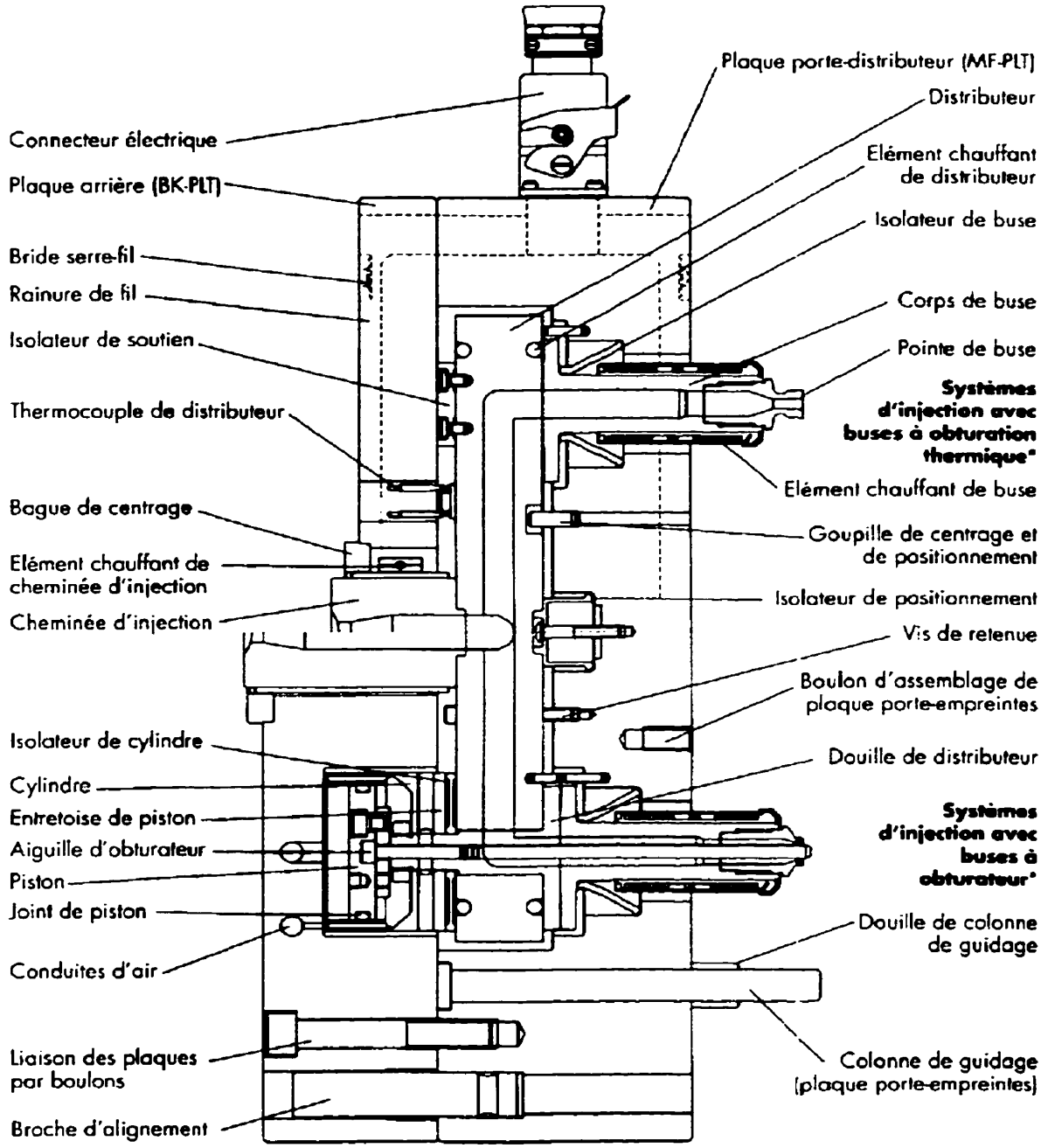


Figure 2.3 : Différentes composantes d'un système à canaux chauds, dont la moitié du haut montre le cas de la buse à obturation thermique et la moitié du bas montre le cas de la buse à obturation mécanique [3]

2.3.3 Buse d'injection

La buse d'injection fait partie du système à canaux chauds. Elle est située au point d'injection de la pièce. Le choix de la buse d'injection dépend surtout de l'application en question. Les critères de sélection de buse les plus importants, pour une application donnée, se résument aux quatre points suivants :

- l'emplacement et le picot d'injection acceptable, il est important de spécifier le picot d'injection acceptable;
- la matière et les additifs, certaines buses sont conçues pour des matériaux cristallins, d'autres pour des amorphes, les additifs doivent aussi être pris en considération s'il y a lieu;
- le poids de la pièce et le débit de matière désiré, les dimensions de la pièce, la viscosité et le débit d'injection;
- les impératifs de changement de couleur.

Le chauffage des buses ou des canaux peut être interne ou externe. Le chauffage externe constitue la meilleure solution, la moins coûteuse. De plus, la buse chauffée extérieurement retient la chaleur du distributeur. C'est pourquoi, il doit être fabriqué de matériaux très conducteurs. L'avantage de ces buses n'est pas seulement la conductivité de la chaleur au polymère, mais aussi la diminution de surchauffe causée par dissipation visqueuse dans le polymère lors de l'écoulement. C'est pour cette raison et pour leur facilité de remplacement qu'elles sont préférées dans le cas des polymères chargés. Par contre, les systèmes de chauffage interne ont une section annulaire. Ils sont plus coûteux et entraînent des pertes de pression à cause des taux de cisaillement élevés le long des canaux [4] mais, ils amènent un fondu plus homogène au point d'injection. Ainsi, différents types et séries de buses sont conçues pour répondre aux exigences des produits finis.

Par ailleurs, il est important de noter que la faible conductivité du H13 et des aciers rapides [5] rend le contrôle de la température au seuil d'injection très facile.

Principalement, il existe deux techniques d'injection. Il y a l'injection à seuil ouvert et l'injection à seuil fermé. Le choix de la technique appropriée dépend de plusieurs facteurs comme le matériau à injecter et le picot d'injection désiré.

2.3.3.1 Injection à obturation thermique (seuil ouvert)

Dans ce cas, le seuil est ouvert à l'écoulement sous pression du polymère fondu jusqu'à la fin du cycle d'injection (maintien). Quand le seuil fige, la pièce est prête à être éjectée. La coexistence des deux phases, liquide et solide, au seuil d'injection, permet la séparation de la pièce lors de son éjection. L'obturation de la buse, dans ce cas, est dite thermique et laisse une petite carotte de forme conique sur la pièce (voir la buse de la partie supérieure de la figure 2.3). Le refroidissement du plastique au seuil d'injection [1] crée un bouchon assez solide qui empêche l'écoulement du plastique sous pression contenu dans les canaux du distributeur. Si le seuil n'est pas bien refroidi le plastique s'écoulera lors de l'ouverture du moule pour l'éjection de la pièce. Le grand défi dans le design d'une buse à obturation thermique est de trouver la géométrie permettant de former un bouchon assurant l'obturation et facile à pousser dans la cavité au cours du prochain cycle. Idéalement, il se forme un petit bouchon qui sera cisaillé et liquéfié en se mélangeant avec la matière au cours du prochain cycle. Il est aussi important que le diamètre et la hauteur de ce bouchon ne soient pas plus grands que l'épaisseur de la pièce. Ainsi, l'obturation se fait via une bonne synchronisation entre la pression et la température. Si cet équilibre est perturbé pour une raison ou une autre (arrêt de la machine ou autre) des problèmes non désirables vont surgir (*drooling, striging and cold slug*). Par ailleurs, la diminution du diamètre de l'orifice de la buse provoque des pertes de pression et un taux de cisaillement élevé. Ceci a pour effet de monter la chaleur du polymère et risque de le dégrader.

Parmi les problèmes majeurs de ce type d'injection on retrouve le contrôle de température au point d'injection et les propriétés mécaniques de la pièce moulée autour du seuil d'injection. Par contre, ce type d'injection est économique à produire et est simple à utiliser. La température, la pression et le temps jouent un rôle très important quant à la performance des buses à seuil ouvert. Par contre, ces paramètres sont moins important dans le cas des seuils fermés.

2.3.3.1.1 Paramètres de design

Dans le cas des buses à seuil ouvert, il y a plusieurs paramètres qui affectent la faisabilité et la qualité des pièces obtenues par cette technique. Les paramètres identifiés comme les plus importants sont les suivants :

- la masse de la moulée : dans le cas des grandes pièces, l'ouverture du seuil doit être plus large afin de réduire la pression d'injection et d'éviter le gel prématuré du seuil;
- l'épaisseur de la moulée : un seuil assez large est nécessaire dans le cas des pièces épaisses assurant l'écoulement du plastique pendant la période de maintien en pression pour compenser le retrait;
- la résine : un seuil assez large et court est recommandé pour une résine visqueuse;
- la distance entre canal de refroidissement et la surface de contact (buse moule) : si les canaux de refroidissement sont assez proche du seuil, un gel prématuré du seuil peut se produire, mais des canaux de refroidissement assez loin du seuil provoquent l'écoulement du plastique à la fin du cycle d'injection (*drooling*);
- le temps du cycle : une large ouverture est recommandée pour minimiser les pertes de pression et pour éviter la dégradation causée par le cisaillement excessif;
- le matériau utilisé pour fabriquer la cavité (ou l'insert utilisé), ainsi que le matériau de la buse;
- la surface de contact de la buse avec le moule ou l'insert (le diamètre et la hauteur);

- la position du seuil d'injection (le cône renversé) par rapport à la surface de contact : si le cône renversé est proche de la surface de contact, il y a possibilité de formation d'un bouchon;
- la distance entre l'élément chauffant et le seuil d'injection : si l'élément chauffant est très loin du seuil, il peut y avoir la formation d'un bouchon. Par contre, si l'élément chauffant est très proche du seuil l'obturation thermique n'est pas assurée. Par ailleurs, l'augmentation de la surface de contact entre la buse et le moule ne sera pas la solution optimale;
- l'angle du cône renversé : un faible angle assure un écoulement laminaire, ce qui est préférable;
- la position de l'étranglement thermique (*heat choke*).

2.3.3.1.2 Autres facteurs

Avec l'utilisation d'une torpille chauffée ou non, une mince couche de plastique en contact avec la torpille reste liquide. Ceci facilite l'écoulement au prochain cycle d'injection et permet d'éviter plusieurs problèmes, comme le "drooling" à cause de l'augmentation du cisaillement au seuil et la formation d'un bouchon à cause de la pointe chaude de la torpille métallique (conductrice, donc reste chaude). Ceci permet aussi d'avoir une plus large fenêtre de fonctionnement à cause du meilleur contrôle de température.

La position du thermocouple qui contrôle la température de la buse est aussi un paramètre très important. En fait, le contrôle de la température est très difficile au seuil d'injection. Il est recommandé de placer le thermocouple le plus pré possible du seuil où le gradient de température le plus élevé peut se produire. La qualité de pièce et l'apparence du picot d'injection sont reliées à l'efficacité du contrôle de température dans cette région, où le cisaillement maximal se produit.

De plus, il y a l'exposition de la pièce à une surface chaude de la buse qui peut influencer les propriétés de la pièce dans cette région.

2.3.3.2 Injection à obturation mécanique (seuil fermé)

L'obturation de la buse se fait mécaniquement à l'aide d'une tige actionnée par un vérin fermant ainsi le canal d'injection. Donc, l'écoulement est arrêté mécaniquement. Ce type d'injection est utilisé pour une qualité d'aspect parfaite au point d'injection. Par ailleurs, l'utilisation de cette technique d'obturation est obligatoire dans certains applications[6]. C'est le cas de la buse représentée à la partie inférieure de la figure 2.3.

2.4 Le picot d'injection

Sur la pièce éjectée, à la fin de l'injection et du refroidissement, il peut y avoir une marque visible ou invisible. Ceci dépend du type et de la forme de la buse, ainsi que des conditions d'opération de la machine. Il est alors très important de déterminer le picot désiré à l'avance, pour pouvoir choisir la buse convenable. La figure 2.4 illustre des picots d'injection typiques résultant de l'utilisation de différentes buses. À droite de cette figure, on peut observer le picot dans le cas de la buse à obturation thermique (TS).

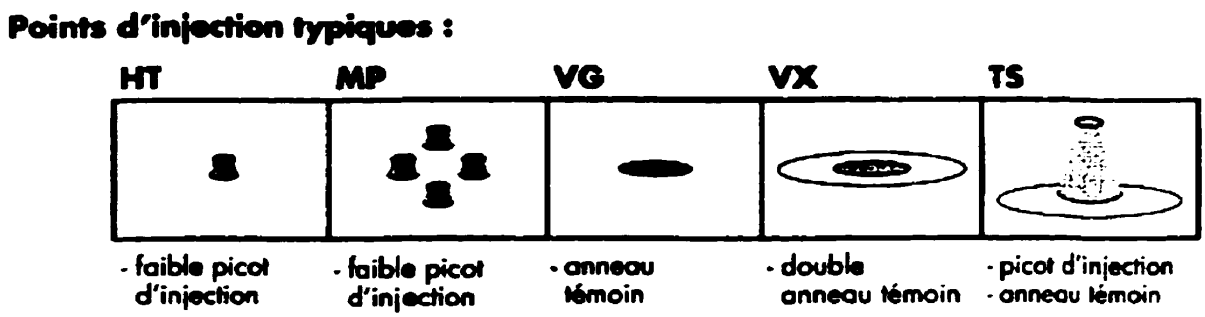


Figure 2.4 : Picot d'injection typique à chaque buse [3]

Dans le cas de la buse thermique, une carotte courte et conique, qui laisse une petite marque sur la pièce, est toujours désirable. La longueur de cette carotte est déterminée par la position du cône renversé. Avec un seuil d'injection assez long, la séparation peut se produire n'importe où le long de la carotte, mais le plus souvent ceci se produit du côté la plus chaud du seuil en laissant une marque sur la pièce moulée.

2.5 Mise en forme des matériaux plastiques

Le moule est considéré comme un échangeur de chaleur dans lequel le plastique passe d'un état à l'autre. Tout d'abord, il reçoit de la chaleur pour fondre et s'écouler dans l'outillage pour se rendre jusqu'à la cavité. Ensuite, il faut que cette chaleur soit dégagée pour solidifier le plastique et éjecter la(es) pièce(s).

2.5.1 État des matériaux plastiques

L'état liquide est caractérisé à la fois par la présence de l'ordre de ses éléments constitutifs à courte distance et l'absence de cet ordre à grande distance. Une substance ayant ce comportement est dite amorphe. Alors que, l'état vitreux est caractérisé par l'absence d'ordre à grande distance et par l'immobilité de ses éléments constitutifs. L'état vitreux est une forme thermodynamique instable de la matière qui se transformerait si les conditions cinétiques et thermodynamiques le permettaient. Lorsque l'énergie thermique est faible par rapport à l'énergie de cohésion, la matière s'organise dans un arrangement compact qui diminue au maximum son énergie potentielle pour se transformer en état solide.

À l'état liquide tous les plastiques sont amorphes. Ils cristallisent graduellement, en les refroidissant. En fait, la cristallisation à besoin de temps pour que les germes se forment et que la structure cristalline croisse. Si le refroidissement est efficace, le matériau n'aura pas le temps de cristalliser et par conséquent il restera amorphe. Par contre, dans la

région la plus éloignée des canaux de refroidissement (comme le centre de la pièce où il est difficile d'extraire la chaleur à cause des propriétés isolantes du plastique) le plastique cristallise. Donc, près des parois du moule le matériau [7] est amorphe mais au centre il cristallise (voir figure 2.5).

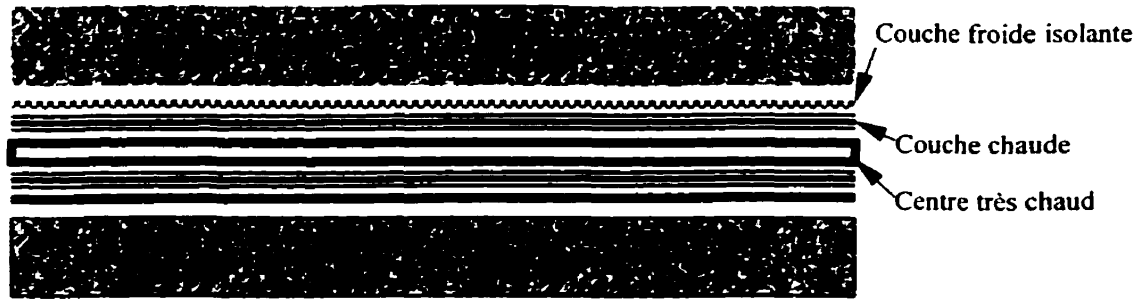


Figure 2.5 : Différences de température entre les couches dans une cavité

2.5.2 Comportement des matériaux plastiques

La température des matériaux plastiques amorphes [1] est presque proportionnelle à la quantité de chaleur ajoutée. Alors que dans le cas des cristallins comme le PE et le Nylon, une quantité de chaleur est nécessaire pour fondre les cristaux sans que la température soit augmentée. Ainsi, la température atteindra un plateau durant lequel une chaleur latente est ajoutée, mais la température reste constante. Une fois les cristaux fondus, la température continue à augmenter en fonction de la quantité de chaleur fournie, comme dans le cas des amorphes (voir le graphe simplifié à gauche de la figure 2.6).

D'autre part, durant le refroidissement le plastique dégage de la chaleur pendant que la température reste constante lors de la cristallisation. Ainsi, la cristallisation nécessite plus de temps pour permettre aux cristaux de grandir. Une chaleur latente est impliquée

dans l'immobilisation des molécules. Par conséquent, les thermoplastiques semi-cristallins vont avoir comme un retard de sensibilité à la chaleur, ce qui allonge le temps de refroidissement (voir le graphe simplifié à droite de la figure 2.6). C'est seulement à la fin de la cristallisation que la température du plastique diminue en fonction de la chaleur extraite. Ainsi, les matériaux cristallins nécessitent plus de chaleur pour fondre que les amorphes et il faut leur extraire plus de chaleur pour les refroidir. Contrairement aux matériaux cristallins, les amorphes comme le PS, le PVC, etc. leur température augmente proportionnellement à la quantité de chaleur ajoutée et diminue proportionnellement à la quantité de chaleur extraite.

Par conséquent, avec un système de refroidissement efficace, les cristaux n'auront pas le temps de grandir ou même de se former, dans certain cas [8].

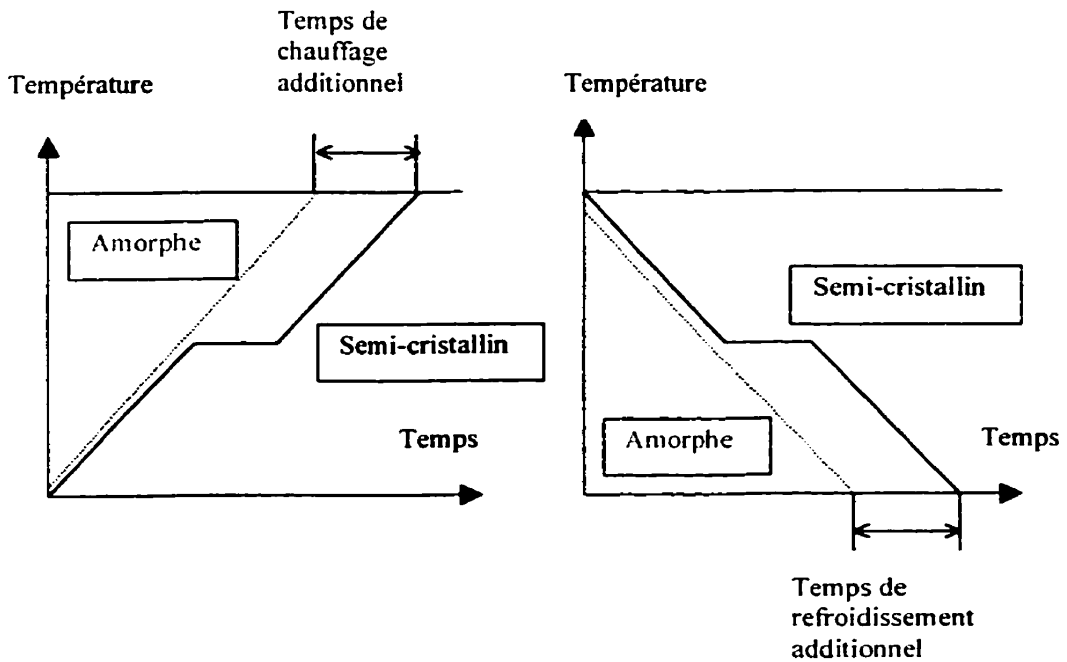


Figure 2.6 : Comportement des matériaux plastiques, cas du chauffage à gauche et cas du refroidissement à droite [1]

Les thermoplastiques semi-cristallins se rétractent durant la transition entre l'état fondu et solide. Ce retrait, pouvant atteindre 14 % du volume selon la résine, doit être compensé durant le temps de maintien en pression, par l'ajout de matière fondue dans la cavité du moule. Ceci ne peut se produire que si le point d'injection est assez large pour assurer la présence d'une zone centrale où le polymère demeure à l'état fluide au cours de la phase de maintien.

2.6 Polyamide 6,6

Le polyamide est obtenu par la réaction de polycondensation de la diamine d'hexaméthylène et de l'acide adriatique. Ce matériau inventé par Carothers en 1938 est utilisé dans la fabrication des fibres synthétiques comme plastique. Le polyamide est un matériau semi-cristallin et il est plus hygroscopique que les autres polymères. Il absorbe l'humidité présente dans l'atmosphère. Il atteint l'équilibre [9] en absorbant 2.5 % d'eau à 50 % RH et 8.5 % d'eau à 100 % RH. Cette humidité peut nuire à la qualité des pièces moulées engendrant de nombreux types d'effets indésirables de mise en œuvre (mauvais état de surface ou perte de propriétés mécaniques). Il est caractérisé par sa bonne tenue en température et aux agents chimiques. Il a une grande facilité de mise en œuvre.

Les plastiques sont des très mauvais conducteurs, entre 20 et 30 fois moins que les aciers. De plus, les amorphes sont souvent plus isolants que les cristallins. Ainsi, plus la conductivité est faible, plus le temps nécessaire pour extraire de la chaleur est long. L'ajout de charges conductrices au polymère améliore sa conductivité thermique.

En effet, le Nylon peut être chargé jusqu'à 50 % de fibres de verre en masse. Cependant, les différents grades de Nylon renforcé de fibres de verre sont souvent utilisés dans des applications nécessitant un module d'élasticité assez élevé et une résistance allant jusqu'à 207 MPa. Ce matériau assure aussi une bonne stabilité dimensionnelle, une dureté, une résistance chimique et thermique qui sont assez élevées.

La température de transition vitreuse [10] du Nylon 6,6 est 50 deg.C. Sa température de fusion est 265 deg.C. L'énergie de fusion du polymère 100 % cristallin est estimée à 195 J/g. Par ailleurs, le HDT du Nylon 6,6 chargé de 33 % de fibres de verre [11] est 245 deg.C sous une charge de 1.82 MPa et 260 deg.C sous une charge de 0.46 MPa.

2.7 Analyse thermique

La définition de l'analyse thermique [12] tel qu'adoptée par l'ICTAC (International Confederation for Thermal Analysis and Calorimetry) se résume à un groupement de techniques qui mesurent la variation d'une propriété d'un échantillon en fonction du temps ou de la température, pendant que la température de l'échantillon, contenue dans une atmosphère, est programmée.

Ces techniques peuvent être divisées en cinq classes majeures : la DSC (Differential Scanning Calorimetry), la DTA (Differential Thermal Analysis), la DMA (Dynamic Mechanical Analysis), la TGA (Thermogravity Analysis) et la TMA (Thermomechanical Analysis). Les principales méthodes d'analyse thermique sont présentées dans le tableau 2.1. Les analyses sont divisées en deux catégories : la première catégorie consiste à suivre la variation de la température où la chaleur d'un échantillon soumis à un programme de variation de la température. La seconde catégorie vise à suivre les propriétés mécaniques du matériau en fonction de la variation de la température. L'application de ces analyses sert principalement à déterminer les propriétés illustrées dans ce tableau.

Tableau 2.1 : Les principales méthodes d'analyse thermique [12]

Propriété	Technique	Acronyme
Masse	Thermogravimétrie	TGA, TG
Masse Apparente	Thermomagnétométrie	TM
Volatiles	Détection des gaz Analyse des gaz Désorption thermique	EGD EGA
Decca Radioactive	Analyse thermique des émanations	ETA
Température	Analyse thermique différentielle	DTA
Flux de Chaleur	Calorimétrie différentielle à balayage	DSC
Dimensions	Thermodilatomètre	TD
Propriétés Mécaniques	Analyse thermomécanique dynamique Analyse mécanique	TMA DMA, DMTA
Propriétés Acoustiques	Thermosonimétrie (émission) Thermoacoustimétrie (vélocité)	TS
Propriétés Électriques	Thermoélectrométrie (résistance) (voltage) (courent) (diélectrique)	DETA, DEA
Propriétés Optiques	Thermooptométrie (spectroscopie) Thermoluminescence(émission) Thermomicroscopie (structure) Analyse thermique des particules	TPA

Le choix de la technique appropriée à prendre pour caractériser le matériau en question dépend de l'application et de la propriété recherchée. Le DSC et le DTA, comme nous pourrons l'observer au tableau 2.2, sont les plus utilisés pour déterminer les propriétés thermiques, alors que le DMA, DTA et le TGA servent à caractériser les propriétés mécaniques.

Tableau 2.2 : Quelques applications du DTA et du DSC aux polymères [12]

Plage de fusion	Relaxation
Taux de cristallisation et réaction	détermination de la pureté
Degré de crystallinité	Contrôle de qualité
Phénomène transition vitreuse	Diagramme de phase
Capacité thermique	Emmagasinage d'énergie
Enthalpie de transition	Évaluation Hazards
Identification du Fingerprints	Transition de mesophase
Stabilité thermique et à l'oxydation	Nucléation des cristaux
Analyse des copolymères et des renforts	Catalyses
Phénomène de nucléation	Conductivité thermique

Par ailleurs, il existe d'autres essais comme le HDT (Heat Deflection Temperature, voir figure A1 de l'annexe) qui est très utilisé dans la littérature des polymères commerciales [13], le Martens et la température Vicat (*Vicat Softening Temperature*, voir figure A2 de l'annexe) qui sont largement utilisés dans l'industrie. Les deux premiers tests entraînent la déformation par flexion d'un échantillon. Alors que le Vicat caractérise l'enfoncement d'un pénétrateur dans l'échantillon. En fait, ces essais impliquent le chargement d'un échantillon chauffé graduellement à partir de la température ambiante tout en mesurant sa déformation. La température à laquelle un niveau de déformation est atteint est définie comme la résistance à cours terme du matériau en question. Par ailleurs, il est important de savoir que ces essais [14] ne donnent pas assez d'informations sur la température d'opération du matériau sous charge. Ils doivent être utilisés comme référence et non comme un critère de design. Par ailleurs, le HDT est une indication du module du matériau à haute température. Il peut servir à comparer la performance de différents matériaux. La valeur obtenue du HDT n'a pas de signification physique. En fait, la raison fondamentale de la non répétitivité des résultats de l'essai du HDT est que le matériau cristallise au cours de l'essai. Étant donné que la procédure de l'essai [15] ne peut pas évaluer la fonction complexe de la déformation qui dépend de la température, de la contrainte et du temps.

Les matériaux semi-cristallins sont composés de deux phases, une phase amorphe est une phase cristalline. Plus le polymère est cristallin, plus la fraction moléculaire de la phase amorphe faible. Par conséquent, le changement de Cp à T_g de la phase amorphe, dans un échantillon pris pour faire l'essai de DSC, devient faible. De plus, si le matériau est fortement cristallin et chargé de fibre de verre, par exemple, l'analyseur DSC n'a pas le sensibilité nécessaire pour détecter la température de transition vitreuse. En générale, la température de transition vitreuse [16] augmente avec l'augmentation de la fraction moléculaire de la phase cristalline.

Pour les polymères amorphes et à très faible taux de cristallinité, la température de HDT est très proche de la température de transition vitreuse (T_g). Alors que pour les polymères fortement cristallins, le HDT est loin de T_g et proche de la température de fusion T_f [17]. L'un des effets très marquant dans l'augmentation du HDT est l'existence des fibres. L'addition de fibres de verre aux polymères [18] a plus d'effet sur l'augmentation du HDT dans le cas des cristallins que dans le cas des amorphes. Mais dans les deux cas, la rigidité est augmentée. De plus, il n'est pas surprenant de trouver que le HDT est plus élevé quand les contraintes appliquées sont parallèlement à l'orientation des fibres; que lorsqu'elles sont appliquées perpendiculairement. Le HDT augmente [19] avec la concentration des fibres courtes, mais cet effet s'arrête à un niveau de 10 à 20 % de fibres.

2.8 Les capteurs

La température peut être mesurée par différents types de capteurs. Les capteurs les plus utilisés sont : les thermocouples, les sondes (ou résistance) au platine (RTD ou les thermistances), les capteurs infrarouges, les capteurs bimétalliques et les capteurs à changement d'état ou par dilatation d'un liquide. Les trois premiers types sont les plus

utilisés. Le tableau 2.3 illustre les caractéristiques des différents types de capteurs de température.

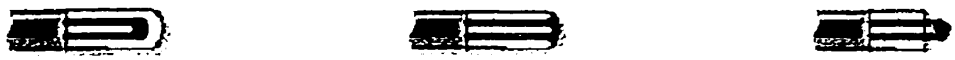
Tableau 2.3 : Comparaison des propriétés des différents types de capteur de température

Critères	Thermocouples	RTDs	Thermistances	Capteur Infrarouge
Plage de Température	Très large - 230 deg C à + 2300 deg C	Large - 200 deg C à + 650 deg C	Moyenne - 37 deg C à + 260 deg C	Très large - 65 deg C à + 3000 deg C
Linéarité	Mauvaise	Bonne	Faible	Faible
Sensibilité de la Pointe	Excellente	Mauvaise	Bonne	Pas de contact
Sensibilité	Faible	Moyenne	Très haute	-
Temps de Réponse	Vite	Moyen	Moyen à Vite	Très Vite
Répétitivité	Moyenne	Excellente	Bonne	Bonne
Qualité/Prix	Faible	Élevé	Bas	Très élevé
Interchangeabilité	Bonne	Excellente	Médiocre	-

2.8.1 Mesure de température par contact

Parmi les capteurs de mesure de température par contact, il y a les thermocouples qui fonctionnent selon le principe de différence de potentiel qui se manifeste entre la jonction froide et la jonction chaude. Il existe différents types de thermocouple, dont le type J et le type K qui sont les plus utilisés. De plus, les thermocouples peuvent être gainés ou non gainé. La jonction chaude peut être exposée, isolée et non isolée (ou reliée à la masse). Le premier type de jonction assure le temps de réponse le plus court en captant le plus de bruits, à l'opposé du deuxième type qui donne le temps de réponse le

plus long en éliminant les bruits. Alors que, le troisième type de jonction assure un meilleur temps de réponse que le deuxième type et il est recommandé pour des applications à faibles bruits. La figure 2.7 illustre ces trois types de jonction.



a) Isolée b) Non isolée c) Exposée

Figure 2.7 : Types de jonction de thermocouples [20]

Les thermocouples permettent une lecture ponctuelle de la température, alors que les sondes au platine (RTD) lisent la température moyenne de la surface de la sonde. Comparés aux thermocouples, les thermistances et les RTD partagent une limitation importante. Pour fonctionner, ils doivent être alimentés par un courant. Ce courant provoque un autoéchauffement induisant une erreur considérable dans le cas des petits capteurs utilisés, quand un temps de réponse court est recherché. Par contre, ce phénomène ne se produit pas avec les thermocouples. De plus, ces derniers ne nécessitent aucune alimentation.

2.8.2 Mesure de température à distance

Les capteurs infrarouges mesurent la quantité d'irradiation émise par une surface à une température supérieure à zéro degré Kelvin. La mesure de la température se fait sans contact et à temps réel (de l'ordre de 10 millisecondes). La précision de ces capteurs est limitée en une plage de température, plus la température s'éloigne de la plage de précision du capteur plus l'erreur de lecture augmente. Par conséquent, le choix du capteur est fonction de la température à lire. De plus, avant de mesurer la température d'une surface, il faut évaluer son emissivité. L'encombrement de ces capteurs par rapport aux autres capteurs, comme les thermocouples et les sondes RTD, limite parfois leur

utilisation. La figure 2.8 illustre un capteur infrarouge. Ce capteur peut être monté sur la buse de la machine d'injection pour mesurer la température du polymère au cours du procédé.

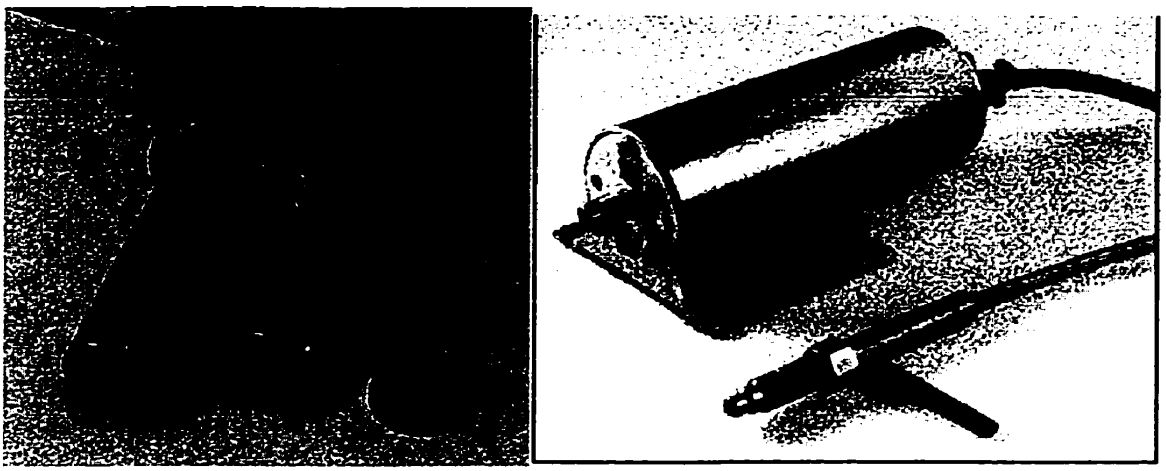


Figure 2.8 : Pyromètre optique à gauche [21] et capteur infrarouge à droite et [22]

2.8.3 Temps de réponse

Lorsqu'on place un instrument de mesure dans un milieu, il lui faut un certain temps pour qu'il atteigne l'équilibre thermique avec son environnement. Ce laps de temps, dépendant du type d'appareil utilisé, est appelé temps de réponse.

Le flux de chaleur est fonction du volume, de la densité, de la chaleur spécifique de l'instrument de mesure et du différentiel de température, comme l'indique l'équation 2.1. Il est aussi fonction de l'aire de contact, du coefficient de transfert de chaleur, de la différence de température et du temps, comme l'indique l'équation 2.2. Cependant, le milieu joue un rôle par le biais du coefficient de transfert de chaleur. En égalisant ces deux équations et en isolant la différence de temps (dt), on obtient la relation décrivant

le temps de réponse donnée par l'équation 2.3. Par conséquent, pour un même type d'élément de mesure dans le même fluide, le rapport ($h/\rho\ Cp$) est constant. Donc, le rapport (V/A) influence le temps de réponse. Pour un capteur de forme sphérique, le rapport ($V/A = R/3$). Alors, quand le rayon diminue, le temps de réponse diminue trois fois moins. Ainsi, on déduit l'influence de la géométrie sur le temps de réponse du senseur.

$$Q = Cp\ \rho\ V\ dT \qquad (2.1)$$

$$Q = h\ A\ (T_{liq.} - T)\ dt \qquad (2.2)$$

$$dt = Cp\ \rho\ V\ dT / h\ A\ (T_{liq.} - T) \qquad (2.3)$$

Un thermocouple à jonction exposée [20] de diamètre inférieur à 3.0 mm a un temps de réponse trois fois plus rapide qu'un thermocouple à jonction isolée et deux fois plus rapide qu'un thermocouple à jonction non-isolée. De plus, les écarts sont plus larges pour des diamètres supérieurs à 3.0 mm. Ainsi, plus le diamètre est grand, plus l'écart augmente. En effet, la constante de temps de réponse d'un thermocouple à jonction non-isolée de diamètre 1.6 mm est de 0.4 s, lorsque celui-ci se déplace dans l'air, sous conditions normales (pression atmosphérique et température ambiante), à une vitesse de 2.0 m/s; alors qu'une constante de temps de 0.2 s est obtenue lorsqu'il est plongé dans l'eau. Ceci montre l'effet du milieu sur le temps de réponse d'un thermocouple, puisque le temps de réponse est fonction de la constante de temps. Par ailleurs, la constante de temps d'un thermocouple à jonction non-isolée de diamètre 0.25 mm soumise à l'air, en se déplaçant à une vitesse de 2.0 m/s sous les conditions normales est de 0.2 s.

2.8.4 Précision

Chaque capteur à sa propre précision. Dans le cas des thermocouples, des sondes RTD et des thermistances, la précision dépend de la pureté des matériaux utilisés lors de la fabrication de ces derniers. Alors que la répétitivité ne dépend pas de la valeur lue, mais

dépend du lecteur utilisé. Par exemple, les thermocouples standards fabriqués par Omega Inc. assurent une précision de ± 2.2 deg.C quand ils sont utilisés pour mesurer des températures inférieures à 300 deg.C et 0.75 % de la valeur mesurée pour des températures supérieures à 330 deg.C. Par ailleurs, l'utilisation de thermocouples spéciaux assure une précision deux fois plus élevée. Dans le cas des sondes RTD, plus la température à mesurer augmente, plus la précision diminue. De plus, les sondes RTD de type A sont deux fois plus précises que les sondes de type B. En effet, la précision d'une sonde RTD de type B, fabriquée par Omega Inc. et de ± 0.3 deg.C à 0.0 deg.C comparée à ± 1.8 deg.C à 300 deg.C.

2.9 Le transfert de chaleur dans les matériaux

Le transfert thermique entre deux corps s'exerce selon trois mécanismes différents. On distingue les trois modes suivants: la conduction, la convection et le rayonnement. Souvent la transmission de chaleur se produit de façon combiné. Mais dans la pratique, un mode prédomine et les deux autres sont négligés, ceci en posant les hypothèses simplificatrices nécessaires.

2.9.1 Résistance de contact

Lorsque les surfaces de deux solides sont mises en contact, leurs seuls points de contact sont les crêtes les plus hautes de leur topographie. Ainsi, le transfert de chaleur à l'interface entre deux solides en contact se fait principalement par conduction à travers les crêtes, par conduction à travers les gaz et par radiation. Dans les conditions normales, la radiation est négligeable. Alors, la surface de contact contrôle le transfert de chaleur par conduction à travers les crêtes. La surface réelle de contact dépend de la rugosité des surfaces, de la pression appliquée sur les solides et de la dureté des crêtes [23] et [24]. Cette dernière influence l'épaisseur et la nature du gaz emprisonné dans les creux. Pour les solides rugueux ayant une conductivité excédant celle du fluide à l'interface, la

résistance de contact peut être appréciable. Alors que, pour les mauvais conducteurs ou dans le cas d'un faible flux de chaleur la résistance de contact est souvent négligeable. La résistance thermique de contact peut être réduite en augmentant la surface des crêtes. Celle-ci peut augmenter par l'augmentation de la pression de contact ou en réduisant la rugosité des surfaces en contact. Des modèles de calcul de la résistance de contact dans des conditions bien précises sont proposés par Yovanovich [25], ainsi que Madhusudana et Fletcher [26].

2.10 Conclusions

Il ressort de cette étude qu'il y a plusieurs avantages quant à l'utilisation des systèmes à canaux chauds. Mais, il est important de savoir les utiliser de façon optimale, afin d'obtenir des pièces de qualité. Il s'agit donc, de faire le bon choix de la buse à utiliser pour le matériau à injecter.

Quant à l'analyse thermique il est important de bien viser les propriétés les plus importantes à déterminer. Ensuite, il faut décider de la pertinence des essais à entreprendre afin d'obtenir les propriétés désirées.

Finalement, au cours de la recherche sur les capteurs nous avons appris que les sondes RTD ont une meilleure précision à basses températures que les autres capteurs. Les thermistances linéaires ont une résolution élevée. Mais, les thermistances non linéaires sont moins pratiques à cause de cette caractéristique de non-linéarité. Par contre, les thermocouples sont très intéressants pour leur robustesse et leur grande maniabilité dans toutes sortes de milieu.

CHAPITRE 3

PARTIE EXPÉRIMENTALE

3.1 Introduction

Le but de cette étude est de comprendre la complexité du système existant et d'utiliser ce savoir pour l'optimiser et établir un outil de design. Mais ceci n'est possible qu'en réalisant des essais sur plusieurs matériaux afin de généraliser les résultats. Ceci demande beaucoup de travail, de temps et de moyens avant d'arriver à un résultat. Par conséquent, nous nous sommes limités à trois matériaux, dont un sera utilisé pour mouler des plaques.

L'objectif de ce chapitre est de décrire la procédure expérimentale adoptée pour mener ce travail de recherche. Toutefois avant de se pencher sur les essais effectués et la méthode utilisée, il est nécessaire de saisir le contexte dans lequel la procédure expérimentale a évolué.

Dans la première partie de ce chapitre, nous décrivons le matériau des plaques que nous allons mouler ainsi que les équipements utilisés et leurs caractéristiques. Par la suite, après avoir décrit la méthodologie expérimentale adoptée et la philosophie qui s'y rattache, on présente l'effet des paramètres clés de ce travail. Ainsi, nous décrivons les différents essais à réaliser en utilisant la méthode des profils thermiques à sec pour analyser quelques problèmes. Finalement à la dernière partie, nous nous attardons sur la méthodologie à suivre pour optimiser le procédé et étudier l'effet de certains paramètres d'injection sur la qualité des pièces moulées.

Il est évident que la réussite de ce travail dépend de la précision des mesures lors de l'étude expérimentale. Par conséquent, il faut bien choisir les équipements à utiliser pour réaliser ces essais.

3.2 Matériaux utilisés

Pour simplifier l'étude, le polyamide 66 renforcé de fibres de verre est le matériau utilisé. Ce matériau de marque commerciale Zytel 70G33L NC010, fourni sous forme de granulé par la compagnie Du Pont (DU PONT Canada Inc.), contient 33 % de fibres de verre en masse. La longueur et le diamètre de ces fibres sont de l'ordre de 0.5 mm et 12 µm respectivement. Les principales caractéristiques de ce matériau telles que données par le fabriquant sont présentées dans le tableau 3.1:

Tableau 3.1 : Caractéristiques du Zytel 70G33L NC010

	Propriété	Norme ASTM	Unités	PA66 + 33%FV DAM
Divers	Masse volumique	D792	Kg/m³	1380
	Absorption d'eau Immersion 24hr (23)	D570	%	0.7
	Absorption d'eau à la saturation	D570	%	5.4
Thermiques	Point de fusion	D3418	deg.C	262
	Coefficient de dilatation thermique linéaire	D696	10^{-4} /K	0.23
	Conductivité thermique		W/m K	0.21
	Chaleur spécifique		J/kg.K	2125
Électriques	Résistivité volumique	D257	Ohm cm	10^{15}
	Constante diélectrique @ 1000 Hz @ 10^6 Hz	D150		4.5 3.7
	Facteur de dissipation à @ 10^6 Hz	D150		0.02

3.2.1 Analyses thermiques

L'évaluation de la température de fusion, la température de transition vitreuse et le pic de cristallisation du Zytel 70G33L NC010, selon la méthode ASTM E 1269, sont déterminés à l'aide d'un analyseur thermique DSC (modèle Pyris-1) dont la sensibilité est 0.01 deg.C. Nous référons à la figure 3.1 pour la représentation schématique de cet instrument.

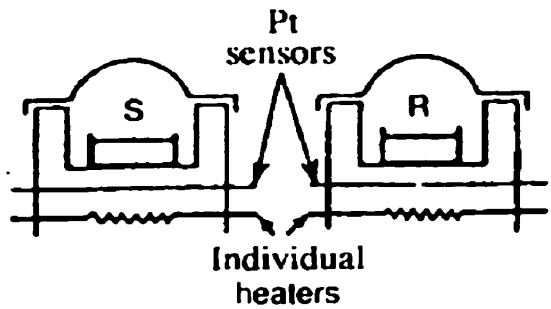


Figure 3.1: Une représentation schématique de l'analyseur DSC à compensation de puissance [12]

Dans un premier temps les deux capsules vides sont placées dans les deux chambres afin de réaliser un essai permettant de tracer la ligne de base. La pression d'azote étant maintenu à 20 psi durant l'essai. Ensuite, un échantillon ayant une masse de 9.1 mg est chargé dans l'une des capsule pour reprendre l'essai. Le programme d'essai est le suivant:

1. maintien pendant 3 mn à 22 deg.C (isotherme);
2. balayage en température de 22 deg.C à 280 deg.C à un taux de chauffage de 10 deg.C/mn;
3. maintien pendant 3 mn à 280 deg.C (isotherme);
4. balayage en température de 280 deg.C à 30 deg.C à un taux de refroidissement de 10 deg.C/mn.

Il est évident qu'à la fin de l'essai, la ligne de base est soustraite de la courbe de réponse de l'échantillon pour obtenir le résultat final. De plus, en sachant que la température de transition dépend de la direction et du taux de refroidissement (ou de chauffage), un autre essai est réalisé à un taux de 30 deg.C/mn.

En parallèle, un autre essai est réalisé à l'IRDI (Industrial Research and Developpement Institute) à un taux de 10 deg.C/mn pour une plage plus large (de 0 à 300 deg.C) à l'aide d'un analyseur DSC 2920.

Par ailleurs, le point de ramollissement a été aussi déterminé à l'IRDI à l'aide d'un analyseur DMA impliquant la déformation d'un échantillon fixé en porte-à-faux en le chauffant à taux constant de la température ambiante à la température de fusion.

D'un autre côté, nous présentons dans le tableau 3.2 les valeurs des propriétés fournies par les fabriquants des matériaux qui vont être utilisés dans ce travail. On remarque dans ce tableau que la température de ramollissement n'est pas donnée pour les semi-cristallins.

Tableau 3.2 : Propriétés des matériaux utilisés

Matériau / Propriété	Méthode	Zytel 70G33L NC010	Delrin 100NC010	Lexan 141R
Température de fusion [deg.C]	D3418	262	175	293 – 316
HDT @ 0.5 MPa (66 psi) [deg.C] HDT @ 1.8 MPa (264 psi) [deg.C]	D648 D648	260 249	169 125	137.8 132.2
Température de ramollissement Vicat [deg.C]	D1525 Rate B	-	-	154.5
Température du moule [deg.C]	-	65.5 - 121	80 - 100	71 – 93
Température de la buse [deg.C]	-	260 - 315	190.5	288 – 310

3.3 Presse à injection

La presse à injection utilisée pour compléter cette étude, est une presse BATTENFELD de type BA-C 750/300 CNC ayant un système de contrôle de type SCL 5/04, fabriqué par ALLEN & BRADLEY. La capacité de dosage de cette presse à injection est de 177 cm^3 et sa force de fermeture est de 80 tonnes. La vis de plastification est une vis dont le rapport L/D = 8 avec un rapport de compression de 2, uniformément réparti sur toute sa longueur.

3.3.1 Conditionneur d'eau

Le conditionneur d'eau utilisé pour maintenir la température du moule et du système à canaux chauds à la valeur désirée est de type STREL-TRONIC. Ce dernier permet de contrôler la température de l'eau en circulation avec une précision de ± 1.0 deg.C.

3.4 Moule et banc d'essai

3.4.1 Moule de plaques

Le moule d'essai utilisé pour injecter des plaques est muni d'un système à canaux chauds. La cavité de ce moule est un insert de forme rectangulaire (250 x 40) mm. La profondeur de cette cavité est 2 mm (d'autres inserts de différentes profondeurs peuvent être utilisés pour d'autres applications). L'alimentation en polymère fondu de l'empreinte du moule se fait par une buse à obturation thermique de type TS 750. Ce moule, montré à la figure 3.2, servira à réaliser des profils thermiques statiques à sec et dynamiques lors de l'injection des plaques.

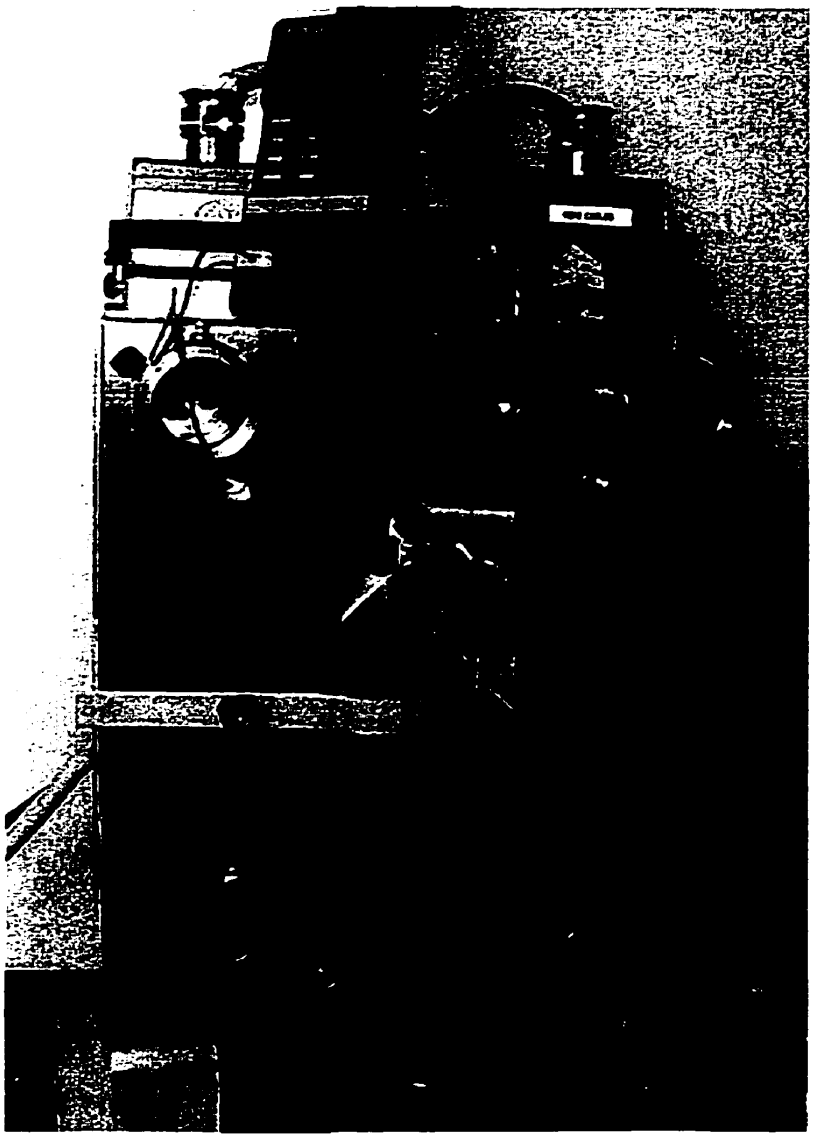


Figure 3.2 : Photo du moule (fourni par Husky) lors des essais de profil thermique

3.4.2 Banc d'essai

Le banc d'essai (Test Rig) est un modèle simplifié du moule à canaux chauds. Il sert à réaliser des profils de température. Il est utilisé à sec seulement, sans matière plastique. Il est conçu dans le but d'utiliser ses résultats de profils thermiques lors du développement de nouveaux produits.

3.4.3 Type de buse utilisée

Les buses à obturation thermique (THERMAL SPRUE) utilisées dans cette étude (TS 750 numéro de référence 150335, 150336) sont fournies par la compagnie Husky Inc. Ces buses sont en acier durci H13, ce qui leur donne un bon revêtement quand on injecte des résines chargées de fibres de verre qui sont abrasives. En comparaison aux autres styles d'injection, la buse thermique a un libre écoulement avec un diamètre de seuil assez large. La figure 3.3 illustre la buse avec les différentes composantes qui l'entourent.

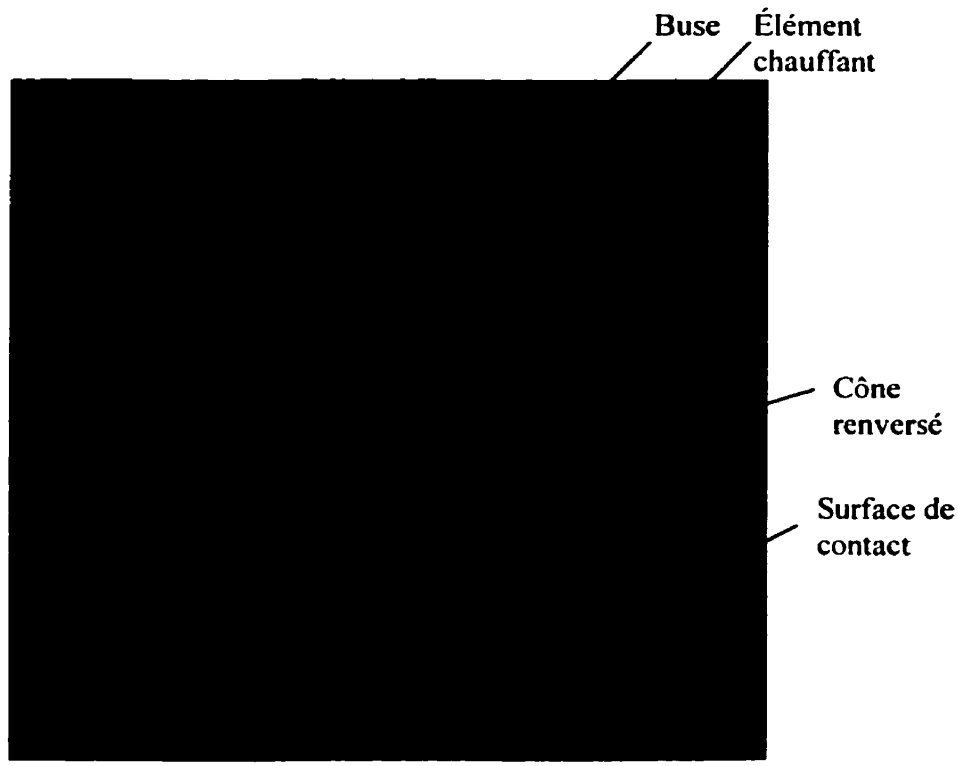


Figure 3.3 : Buse à obturation thermique avec les différentes composantes

3.4.4 Contrôleurs du système à canaux chauds

Lors de la réalisation des profils thermiques deux contrôleurs sont utilisés, l'un contrôle la température du moule et l'autre contrôle la température du système à canaux chauds. Le conditionneur cité précédemment est utilisé pour maintenir la température du moule et des plaques du système à canaux chauds. Le contrôle de la température du distributeur, de la buse et de la cheminée d'injection est assuré par un contrôleur Gammaflux E903C(8), model 932 et 943. Ce contrôleur (fournie par Husky) assure respectivement une précision de 4 % et 8 % de la valeur affichée de courant et de la tension. De plus, étant calibré à une température de 250 deg.C, ce contrôleur assure une précision de 0.5 % sur la différence entre la température de réglage et le point de calibrage.

3.5 Système d'acquisition de données

Le dispositif expérimental est constitué d'un capteur de pression/température et de six thermocouples. Le capteur de pression/température est monté sur l'insert au milieu de la cavité en face du seuil d'injection. Les thermocouples sont montés à différents endroits autour du seuil d'injection comme le montre la figure 3.4. Un ordinateur portatif reçoit les signaux provenant des cartes d'acquisition, les transforme, les affiche et les enregistre dans un fichier, afin d'être analysés.

Au moment du remplissage de la cavité, un signal provenant du contrôleur de la presse d'injection, active le système d'acquisition pour enregistrer la pression et le désactive en même temps que le moule s'ouvre, ce processus se reproduit à chaque cycle d'injection. Au début de l'essai de moulage, nous moulons 70 plaques pour que l'équilibre thermique soit établi. Ensuite pour chaque essai, nous réglons les paramètres de moulage et nous moulons au moins 10 plaques avant d'activer le système acquisition pour enregistrer les données de trois cycles consécutifs.

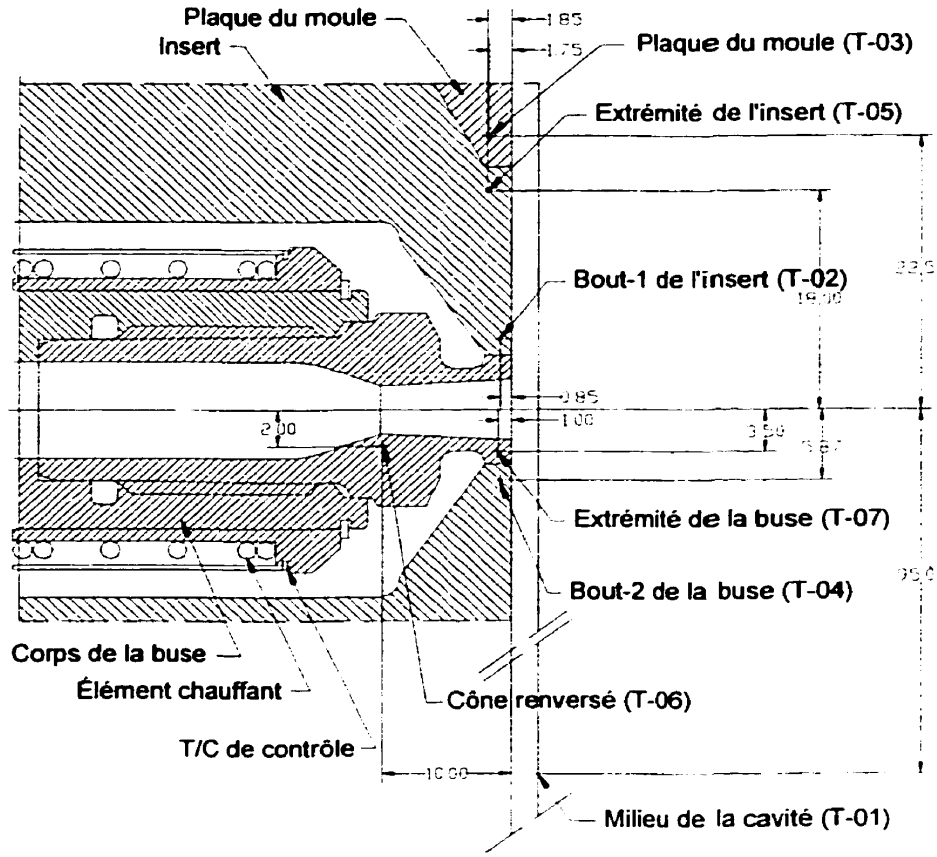


Figure 3.4: Positions des capteurs servant à l'acquisition des données lors du procédé d'injection

3.5.1 Choix des capteurs

Le but principal de cette étape est de choisir les capteurs appropriés. Ces capteurs seront reliés à un système d'acquisition et installés autour du seuil d'injection pour suivre la pression ou la température de certains points considérés critiques. Pour les capteurs de pression/température, le choix est limité. Des travaux récents faits dans le laboratoire de Husky recommandent l'utilisation d'un capteur de pression/température Kistler 6190A5, fabriqué par la compagnie Kistler, pour la cavité. Ce capteur de pression/température est constitué d'un capteur de pression piézo-électrique et de deux thermocouples type K.

Mais pour le choix des capteurs de température, nous allons réaliser les vérifications nécessaires, puisque la précision et la rapidité sont les critères recherchés. Étant donné que le temps de cycle est de l'ordre de quelques secondes et que le temps de remplissage de la cavité ne dépasse pas une seconde (dans le cas de la plaque que nous voulons moulée), donc un capteur dont le temps de réponse est supérieur à une seconde ne sera pas capable de détecter ce qui se passe au cours du remplissage. Par conséquent, nous nous sommes basés sur la littérature pour faire une présélection des capteurs appropriés en comparant les différentes propriétés présentées dans le tableau 2.3 du chapitre 2. Ensuite, nous avons soumis ces capteurs à des essais avant de prendre la décision finale concernant les capteurs à utiliser lors des essais de moulage avec acquisition des données.

3.5.1.1 Évaluation de la précision

L'évaluation de la précision des divers capteurs est réalisée en comparant leur lecture à la température de l'eau glacé et ensuite de l'eau distillée bouillante, sachant que la température de l'eau glacé est égale à zéro degré et celle de l'eau bouillante est égale à 100 deg.C. Par conséquent, chaque capteur est plongé successivement dans un bain contenant un mélange d'eau et de glace, et ensuite dans un autre bain d'eau bouillante. Cinq lectures sont prises dans chaque bain. Un lecteur de température model HH21 est utilisé pour lire la température atteinte par chaque capteur.

3.5.1.2 Évaluation du temps de réponse

Les essais de temps de réponse sont réalisés dans un bain d'huile (Éthylène Glycol) thermostaté dont la température peut être réglée. L'huile est choisie ici non seulement pour sa température d'ébullition plus élevée que celle de l'eau, mais aussi pour son faible coefficient de transfert de chaleur qui est proche de celui du plastique. Ainsi, puisque le temps réponse dépend du milieu, les différents capteurs auront un temps de réponse plus

long, ce qui facilite la comparaison par la suite. Le contrôle de la température du bain se fait par un circuit intérieur composé d'une sonde de température, d'un élément chauffant, d'un serpentin de refroidissement et d'une pompe. Le rôle de la pompe est de faire circuler le fluide dans le bain pour que sa température soit la plus uniforme possible.

Les thermocouples T/C-K-1, T/C-K-2, T/C-J-3 et T/C-J-4 ainsi que la sonde RTD sont conditionnés à la température ambiante avant d'être plongés ensemble dans le bain décrit précédemment après avoir réglé sa température à 150 deg.C. Les capteurs sont reliés à un système d'acquisition permettant la lecture, l'affichage et l'enregistrement dans un fichier de la température lue par chaque thermocouple. La procédure d'essai est répétée cinq fois, comme il est recommandé. La figure 3.5 illustre le bain d'huile et le système d'acquisition et les thermocouples lors de l'essai.

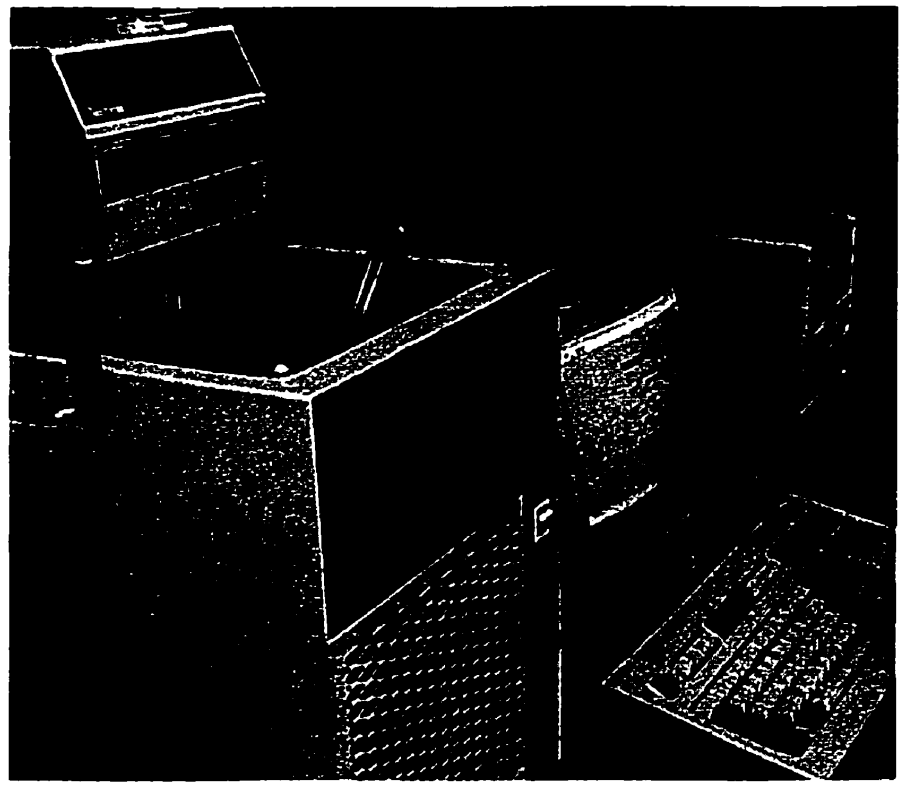


Figure 3.5 : Dispositifs expérimentaux utilisés pour comparer le temps de réponse des capteurs de température

Le même essai est ensuite repris avec cinq thermocouples dont deux T/C-K-2 et trois T/C-J-2 afin de comparer leur temps de réponse. Finalement, un dernier essai est réalisé avec le thermocouple à rondelle T/C-J-W. Exceptionnellement, cet essai a été répété seulement deux fois et le bain a été réglé à 100 deg.C, plus de renseignements sur ces capteurs sont présentés dans le tableau 3.3.

La constante de temps qui servira à déterminer le temps de réponse sera définie comme étant 63.2 % de la variation maximale de température.

Tableau 3.3 : Description des capteurs de température choisis

Capteur (abréviation utilisées)	Type	Dia. [mm]	Référence	Fabriquant
(T/C-K-1)	K	0.25	KMTSS-010G-6	Omega
(T/C-K-2)	K	0.50	KMTSS-020G-6	Omega
(T/C-J-2)	J	0.50	-	Husky
(T/C-J-3)	J	1.00	535037	Husky
(T/C-J-4)	J	1.60	533243	Husky
(T/C-J-W)	J	19.00	534184	Husky
(RTD)	-	1.6x1.0	F3107	Omega

3.5.2 Montage expérimental

Le système d'acquisition I/OTech DaqBook 200 16 bit (fourni par Husky) contient trois cartes; une carte DBK19, à laquelle sont reliés les six thermocouples, et deux cartes DBK17 dont une est utilisée pour le capteur de pression/température. Nous référons au tableau 3.4 pour plus de spécifications sur ces capteurs, le type et l'emplacement correspondant (montré à la figure 3.4) de chaque capteur.

Tableau 3.4: Positions des thermocouples (se référer à la figure 3.4 pour les positions)

Position	Référence	Type de thermocouple
Milieu de la cavité	T-01	Senseur types KISTLER p-T
Bout-1 de l'insert	T-02	KMTSS-020G-6
Plaque du moule	T-03	KMTSS-020G-6
Bout-2 de l'insert	T-04	KMTSS-020G-6
Extrémité de l'insert	T-05	KMTSS-020G-6
Cône renversé	T-06	KMTSS-020G-6
Extrémité de la buse	T-07	KMTSS-020G-6

Dans la suite de ce travail, nous allons souvent utiliser les références des positions plutôt que leur nom. Par conséquent, nous référons à ce tableau.

Le logiciel LabView, installé dans l'ordinateur portatif (Compaq Armada 4131), sert à l'acquisition des données à l'aide d'un programme réalisé à cet effet. Le schéma électrique du montage est présenté à la figure 3.6.

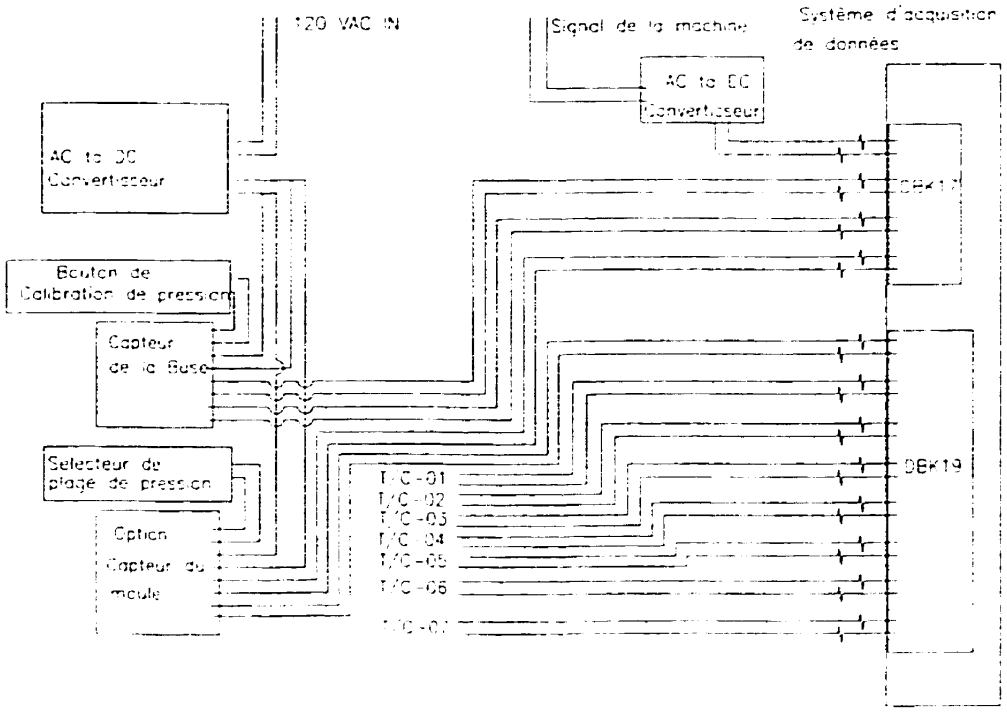


Figure 3.6 : Schéma du montage expérimental du système d'acquisition de données

3.6 Profils de température

Les profils de température sont les graphes de la température en fonction de la position. Il s'agit de lire la température le long de la buse en utilisant le moule d'essai ou le banc d'essai. Cette technique est utilisée pour réaliser les différents essais.

3.6.1 Appareillage

Le montage expérimental est constitué du moule de plaques ou du banc d'essai, du contrôleur de la température du système à canaux chauds, du conditionneur d'eau pour le refroidissement, d'un vernier, d'un lecteur de température et d'un thermocouple de type K. Une clef dynamométrique est utilisée pour serrer la buse au couple désiré. La figure 3.7 illustre la photo de ces différentes composantes.

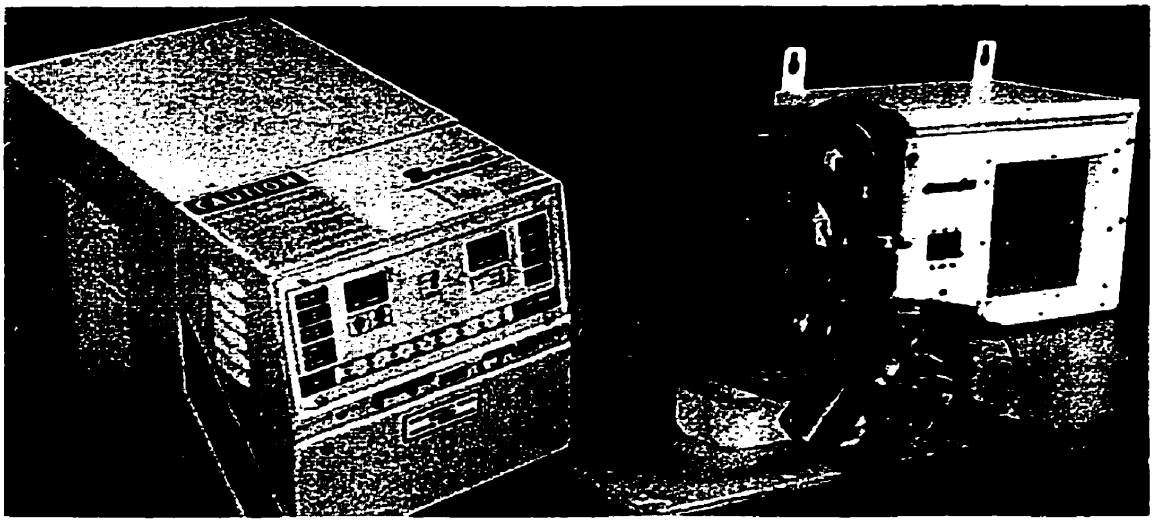


Figure 3.7 : Montage expérimental du banc d'essai lors de la réalisation de l'essai du profil thermique

3.6.2 Approche expérimentale

La procédure expérimentale standard de l'essai de profil thermique consiste à suivre ces différentes étapes:

1. fixer la buse en la serrant au couple correspondant avec une clé dynamométrique;

2. monter le vernier sur le moule de plaques (ou le banc d'essai) auquel il faut ensuite attacher un thermocouple comme le montre la figure 3.8;
3. s'assurer que le thermocouple peut couvrir la longueur de la buse, au moyen du vernier, de la position 0.0 mm (à la surface de contact entre la buse et le corps de la buse) à la position 36.0 mm (au bout du seuil);
4. régler la température du moule et la température du système à canaux chauds (la température du distributeur et de la buse dans le cas du banc d'essai, auxquelles s'ajoute la température de la cheminée d'injection dans le cas du moule) et ensuite alimenter le contrôleur de température;
5. attendre que l'équilibre thermique soit atteint (le régime permanent est considéré être atteint si les variations de température ne dépassent pas ± 0.1 deg,C, le thermocouple étant positionné à 2.0 mm de la surface de contact entre la buse et corps de la buse);
6. lire la température minimale et la température maximale atteintes durant une période de 3 mn à chaque position. Les lectures de température sont prises à des intervalles de 2.0 mm, à l'exception de la position initiale et la position finale, qui se trouvent aux extrémités de la buse, les lectures sont prises à 0.2 mm et 35.8 mm respectivement. Lire la température aux extrémités de la buse peut engendrer des erreurs. L'erreur de mesure du côté de la surface de contact entre la buse et l'insert (position 36.0 mm) est causée par l'échange thermique entre la surface du capteur et le milieu fluide dans lequel il se trouve, alors qu'à l'autre extrémité l'erreur provient du mauvais contact du thermocouple avec la surface au plan de joint de la buse avec le corps de la buse.

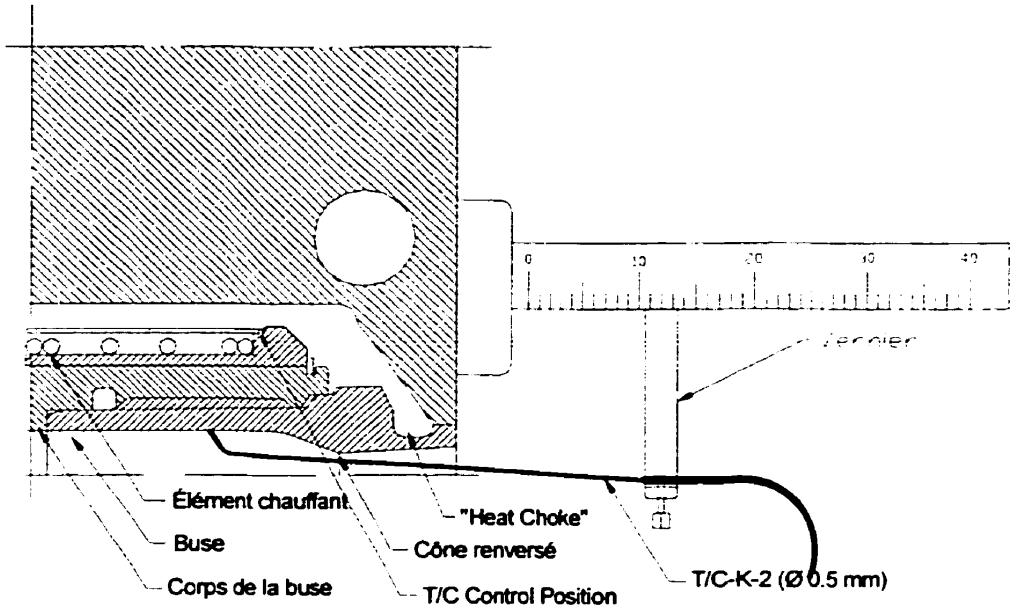


Figure 3.8 : Schéma du montage de l'essai du profil thermique

Les lectures de température, au cours de ces essais, sont prises à l'aide d'un lecteur (model HH21) assurant un précision de ● 0.1 deg.C. d'un thermocouple de type K (KMTSS-020G-2) fabriqué par Omega Inc. Le vernier qui sert à déplacer le thermocouple à une précision de ± 0.2 mm.

3.6.2.1 Effet du couple de serrage

Pour évaluer l'effet du couple de serrage sur le profil thermique, la buse a été serrée à différentes valeurs de couple, en utilisant une clé dynamométrique. Les couples de serrage choisis pour compléter cette étude sont : 6.8, 13.5, 27.1, 40.7, 54.3, 67.8 et 81.4 N.m (5, 10, 20, 30, 40, 50 et 60 lb.pi). Les profiles thermiques sont réalisés en

utilisant le banc d'essai, décrit précédemment. La procédure d'essai présentée précédemment est respectée. De plus, la buse est serrée en balayant la gamme de valeur préfixée du couple plus faible au couple plus élevé. La température du moule est réglée à 93 deg.C, alors que la température de la buse et du distributeur sont maintenues à 288 deg.C.

3.6.2.2 Effet de la rugosité et des tolérances de fabrication

La technique de profil thermique est aussi utilisée pour étudier l'effet de la rugosité et des tolérances de fabrication. Les essais sont réalisés avec le moule de plaques en utilisant trois inserts différents. Les deux premiers inserts sont de même rugosité et de dimensions différentes, alors que la troisième est de même dimension que la deuxième, mais de rugosité différente. La même buse, serrée à un couple de 54.3 N.m (40 lb.pi), est conservée durant ces essais. De plus, une vérification concernant l'utilisation de différentes composantes, comme l'élément chauffant et le thermocouple de contrôle attaché à celui-ci, est aussi réalisée. La procédure standard est poursuivie durant cette étude. Tous ces essais sont réalisés avec une température réglée de moule à 93 deg.C, alors que la buse, le distributeur et la cheminée d'injection sont maintenues à une température de 288 deg.C.

3.6.2.3 Comparaison du profil thermique du banc d'essai à celui du moule

La comparaison entre le comportement thermique du moule de plaques et le banc d'essai est aussi réalisée à l'aide de la technique du profil thermique. La procédure standard décrite ci-dessus est poursuivie. Des vérifications dimensionnelles du diamètre de l'insert du moule et celle du banc d'essai sont accomplies à l'aide d'un microscope optique, afin de s'assurer qu'ils sont de mêmes dimensions. De plus, la même buse, le même élément chauffant et le même thermocouple sont utilisés avec le moule et le banc d'essai.

3.7 Paramètres de moulage

Typiquement lors du procédé d'injection, la viscosité [27] du Nylon fondu doit être autour de 1.10^5 Pa.s à un taux de cisaillement de 100 s^{-1}. Il est aussi recommander que la température du baril soit entre (280 et 290) deg.C et finalement, la température du moule est souvent ajustée entre (70 et 90) deg.C pour le nylon 6,6.

Pour assurer un moulage de qualité, les directives telles que suggérées par le fournisseur sont respectées. En effet, les granules sont séchés dans un four à 80 deg.C pendant les 48 heures précédant le moulage. Les paramètres de moulage sont résumés dans le tableau 3.4. Ce sont les paramètres suggérés par le fournisseur.

Tableau 3.4 :Paramètres de moulage

Propriétés		Valeurs Recommandées
Pression d'injection [MPa]		35 – 140
Température [deg.C]	Moule	65 – 120
	Fusion	287 – 305
	Avant (Front)	271 – 277
	Centre (Middle)	277 – 282
	Arrière (Rear)	288 – 299
	Buse	282 – 293
Séchage	Température [deg.C]	80
	Temps [h]	2:00-4:00
Humidité Maximum suggérée [%]		0.20
No Flow Température [deg.C]		242.9
Éjection Température [deg.C]		220

3.7.1 Paramètres à étudier

Ce travail se limite à étudier les effets de la température de réglage de la buse, de la température du moule, de la vitesse d'injection et finalement de la pression de maintien.

Ainsi avant de se pencher sur la procédure, nous avons estimé le temps du cycle à l'aide de l'équation 3.1. En utilisant les données du tableau 3.5, le temps du cycle obtenu est de 9.5 secondes.

$$t_{ref} = \frac{s^2}{a\pi^2} \ln\left(\frac{4}{\pi}\left(\frac{\theta_i - \theta_M}{\theta_{dem} - \theta_M}\right)\right) \qquad (3.1)$$

Tableau 3.5 : Données du calcul du temps de cycle

[illegible]	[illegible]	[illegible]	θ_i [deg C]	θ_M [deg C]	θ_{dem} [deg C]
40 % du temps du cycle	2	71.6 E-9	288	93	220

La procédure poursuivie lors de ces essais est très simple et méthodique. Premièrement, une optimisation du procédé est réalisée. Ensuite, un balayage de température de la buse est réalisé pour chaque combinaison de paramètres (température du moule, vitesse d'injection et pression de maintien). Les autres paramètres obtenus de l'optimisation (comme le temps de 14 secondes obtenu pour le cycle) sont gardés constants durant les essais. En effet, des plaques sont injectées à chaque réglage et des vérifications sont réalisées pour quelques essais. Le tableau 3.6 illustre les différentes valeurs des paramètres choisis.

Tableau 3.6 : Paramètres étudiés

Propriétés		Numéro de l'essai	Valeurs
Vitesse d'injection [mm/sec]		T-vi-01	15
		T-vi –02	25
		T-vi –03	40
Pression de maintien [MPa]		T-pi-01	16
		T-pi –02	32
		T-pi –03	42
Température [deg.C]	Moule	T-mo-01	73
		T-mo-02	93
		T-mo-03	103
	Buse	T-no-01	221
		T-no-02	227
		T-no-03	238
		T-no-04	249
		T-no-05	260
		T-no-06	271
		T-no-07	288
		T-no-08	304
		T-no-09	316
		T-no-10	338
		T-no-11	354

Par ailleurs, la caractérisation des pièces est basée sur la vérification des points suivants :

1. il ne faut pas avoir des marques visibles de dégradation sur les pièces;
2. il ne faut pas avoir des tâches blanches (*cold slug*);
3. la hauteur de la petite carotte d'injection doit être supérieure ou égale à 8 mm.

3.7.2 Moulage des plaques

La méthodologie expérimentale adoptée a pour objectif principal d'établir une relation entre les profils thermiques à sec et les profils thermiques obtenus lors du moulage à un

cycle optimum. L'optimisation du cycle consiste à mouler des pièces de qualité acceptable, selon les critères cités précédemment, à un temps minimal.

3.8 Conclusions

Trois aspects principaux ont été abordés dans ce chapitre, soit l'analyse thermique, les profils thermiques à sec et finalement le moulage des plaques avec acquisition de données. Quant à l'analyse thermique, l'essai du DSC semble prometteur. En effet, celui-ci nous permet de déterminer la température de transition vitreuse (T_g), la température de cristallisation (T_c) et la température de fusion (T_f). Dans le cas des semi-cristallins, il est évident que la température de fusion est très importante. Il faut sûrement que la température au cône renversé lors du moulage de ces matériaux soit inférieure ou égale à cette température afin de pouvoir extraire la chaleur latente de cristallisation pour permettre au matériau de se solidifier. Alors que dans le cas des amorphes, c'est T_g qui est importante. Il semble aussi que la température au cône renversé, dans le cas des amorphes, doit être autour de cette température(Tg). Par conséquent, il faut identifier les températures les plus proches de T_g et T_f. Il s'agit de HDT pour les semi-cristallins et la température Vicat pour les amorphes. Il y a aussi la température de figeage qui peut être intéressante à identifier. Quant aux essais de profil thermique, il s'agit de suivre la méthode avec soin, afin de pouvoir estimer l'effet des paramètres étudiés lors de l'analyse des résultats.

Finalement, avant de réaliser les essais de moulage il est important de faire le choix judicieux des capteurs et de bien préparer le système d'acquisition. Il est important de faire les calibrations nécessaires et de tester les équipements afin de s'assurer de la fiabilité des résultats.

CHAPITRE 4

RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

4.1 Introduction

Ce chapitre présente les résultats obtenus lors de l'expérimentation pour le choix des capteurs, pour étudier l'effet de certains paramètres sur le profil thermique (comme, l'effet du couple de serrage, l'effet de la rugosité et des tolérances de fabrication) et mettre en évidence la différence entre le moule et le banc d'essai. Il s'agit aussi de comparer les propriétés thermiques d'un matériau donné aux résultats de la température obtenue au cône renversé au cours du procédé et à sec avec le réglage de température correspondant.

Ainsi, l'étude expérimentale est divisée en quatre parties. La première partie consiste à choisir les senseurs appropriés afin d'achever les essais du moulage avec acquisition de données. Dans la deuxième partie, nous présentons les résultats des différents essais de profils thermiques. La troisième partie consiste à instrumenter le moule par des capteurs de pression et de température et les relier à un système d'acquisition de données, afin de suivre l'évolution de ces paramètres au cours du cycle d'injection. Ainsi, nous présentons les résultats de l'effet des paramètres d'injection sur la variation de la température autour du seuil d'injection. Finalement dans la quatrième partie, nous faisons une analyse thermique du Nylon 6,6 chargé de 33 % de fibres de verre dans le but d'établir un lien entre les propriétés thermiques avec la température au cône renversé obtenue lors des essai de profil thermique.

4.2 Choix des capteurs

4.2.1 Précision

En ce qui a trait à la précision des capteurs, nous avons trouvé que tous les capteurs respectent la plage de précision annoncée par le fabricant, soit ± 2.2 deg.C. Nous référons au tableau 4.1 pour les résultats de ces essais. Il faut noter l'existence de deux capteurs (T/C) dans le cas du thermocouple à rondelle, ce qui implique l'existence de deux valeurs dans la colonne de T/C-J-W.

Tableau 4.1 : Résultats des mesures de précision des capteurs

Capteur	T/C-K-1	T/C-K-2	T/C-J-2	T/C-J-3	T/C-J-4	T/C-J-W
Erreur à 0 deg. C	0.0	-0.2	+0.2	0.1	0.2	0.4 et 2.2
Erreur à 100 deg. C	0.6	0.0	-0.6	0.0	0.1	0.9 et 1.4

4.2.2 Temps de réponse

Quant au temps de réponse des différents capteurs, nous observons à la figure 4.1 que les thermocouples n'atteignent pas la température du bain à la même vitesse. Toutefois, les thermocouples T/C-K-1 et T/C-K-2 ont un temps de réponse inférieur à une seconde. Alors que le temps de réponse de T/C-K-1 est presque deux fois moins élevé que celui de T/C-K-2 (voir tableau 4.2). Ceci s'accorde bien avec la théorie annoncée précédemment. Le diamètre du thermocouple T/C-K-1 étant deux fois plus petit que celui du thermocouple T/C-K-2, alors son temps de réponse est deux fois plus rapide. Malgré sa rapidité en temps de réponse, le thermocouple T/C-K-1 ne sera pas le premier choix pour être fixé autour du seuil d'injection. Ce thermocouple est très délicat à manipuler à cause de son faible diamètre de 0.25 mm. De plus, il est techniquement

impossible de percer des trous aussi petits pour positionner ce thermocouple afin de faire l'acquisition de données lors de l'injection.

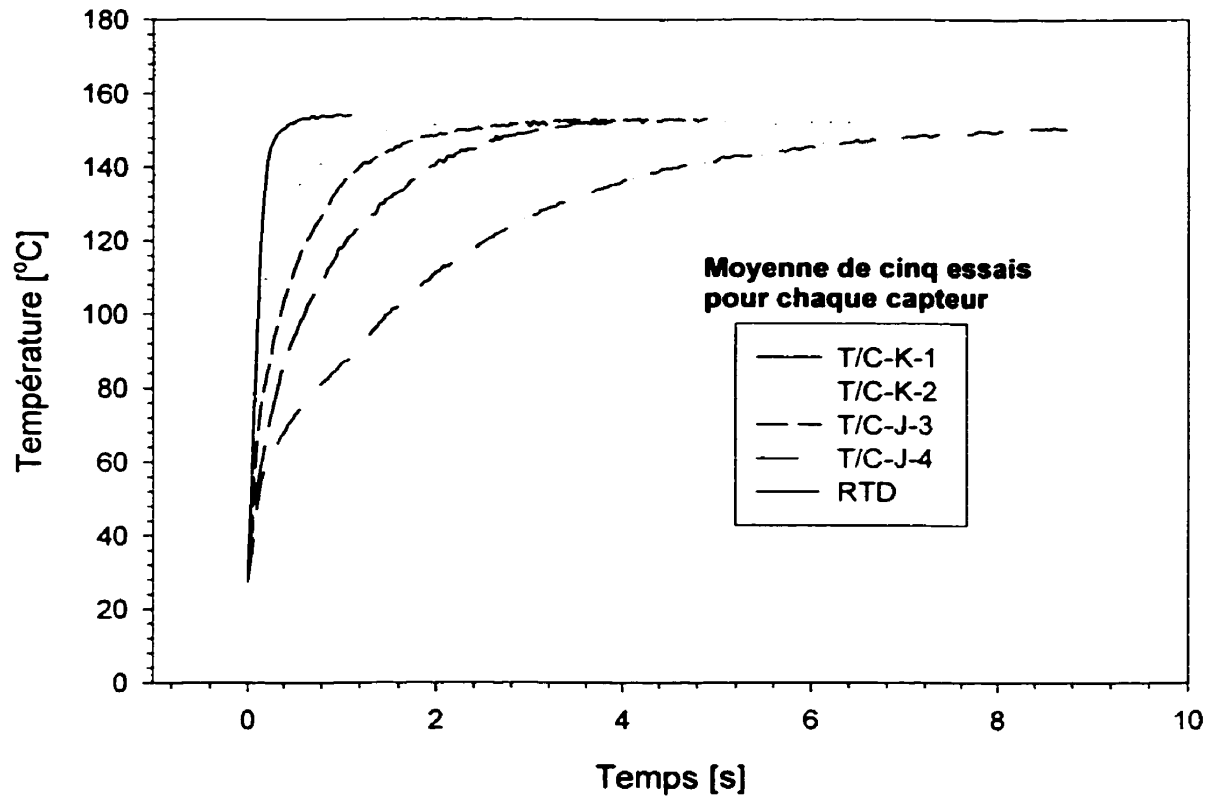


Figure 4.1: Comparaison des temps de réponse de T/C-K-1, T/C-K-2, T/C-J-3, T/C-J-4 et RTD plongés ensemble dans l'huile à 150 deg.C, après avoir être conditionnés à 29 deg.C

Pourtant, les dimensions de la sonde RTD inférieures à celles de T/C-J-4, cette sonde a un temps de réponse une fois et demie plus élevées. De plus, cette sonde est plus délicate que le thermocouple et nécessite d'être alimentée.

Tableau 4.2 : Résultats des temps de réponse des capteurs

Capteur	T/C-K-1	T/C-K-2	T/C-J-2	T/C-J-3	T/C-J-4	T/C-J-W	RTD
Temps de réponse [s]	0.4	0.91	0.92	2.6	8.2	46	3.9

En observant la figure 4.2, nous voyons que T/C-K-2 et T/C-J-2 ont le même temps de réponse. Ceci montre que le temps de réponse ne dépend pas du type de thermocouple. De plus, le temps de réponse est faiblement affecté par le type de jonction pour un diamètre inférieur à 0.5 mm, ce qui s'accorde avec la littérature [20].

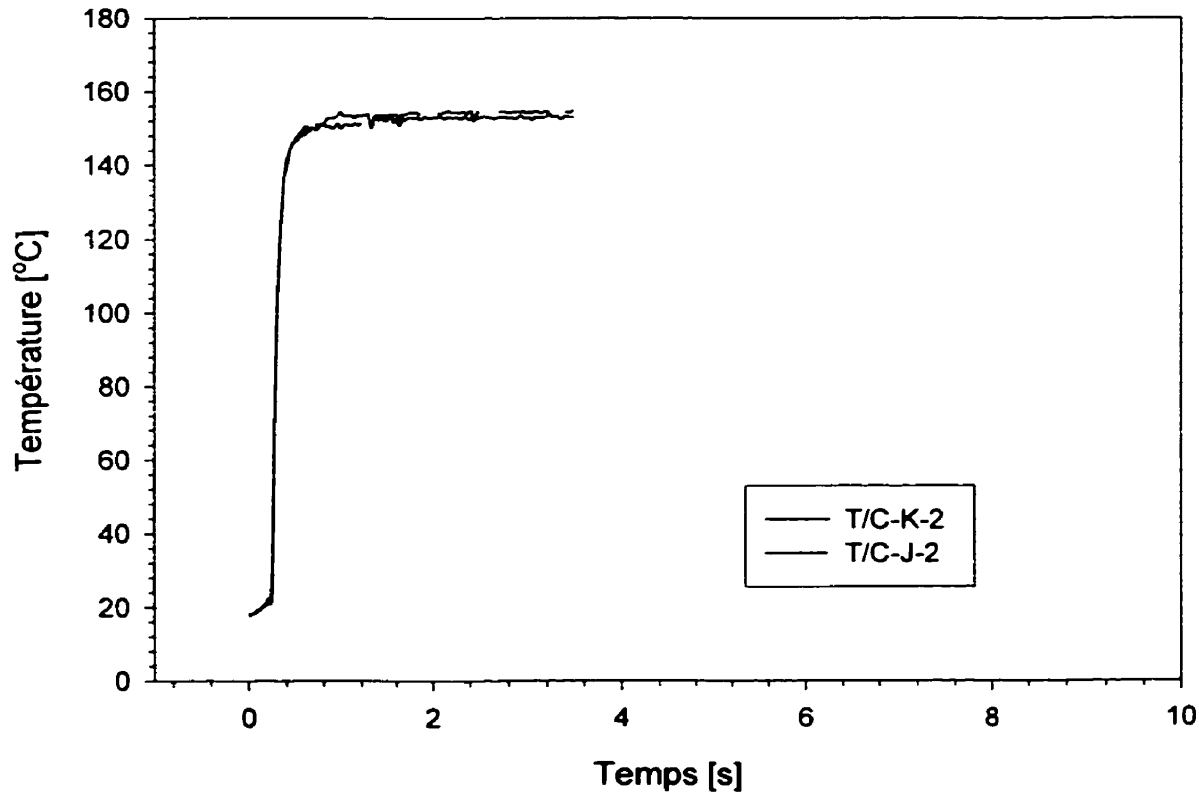


Figure 4.2 : Comparaison des temps de réponse de T/C-J-2 et T/C-K-2 plongés ensemble dans l'huile à 150 deg.C, après avoir été conditionnés à 29 deg.C

Il est important d'ajouter une remarque concernant les thermocouples de type K. Ces thermocouples sont utilisés à des températures plus élevées (-200 à 1250 deg.C), en comparaison aux thermocouples de type J (0 à 750 deg.C). D'autre part, il est recommandé de ne pas dépasser certaine température en utilisant des thermocouples de petit diamètre, soit 260 deg.C pour le type J et 400 deg.C pour type K dans le cas d'un thermocouple ayant un diamètre de 0.5 mm. En effet, l'utilisation de ces thermocouples à des températures supérieures à celles recommandées réduit leur durée de vie et les rend vulnérable à l'instabilité de calibration. L'hystérésis thermoélectrique est l'une des causes de cette instabilité [20].

Par ailleurs, le thermocouple T/C-J-W, monté sur le distributeur pour contrôler sa température, a un temps de réponse très long comparé à celui de T/C-J-3 servant à contrôler la température de la buse (voir figure 4.3). Un thermocouple ayant un temps de réponse plus court est préférable pour un contrôle homogène de température.

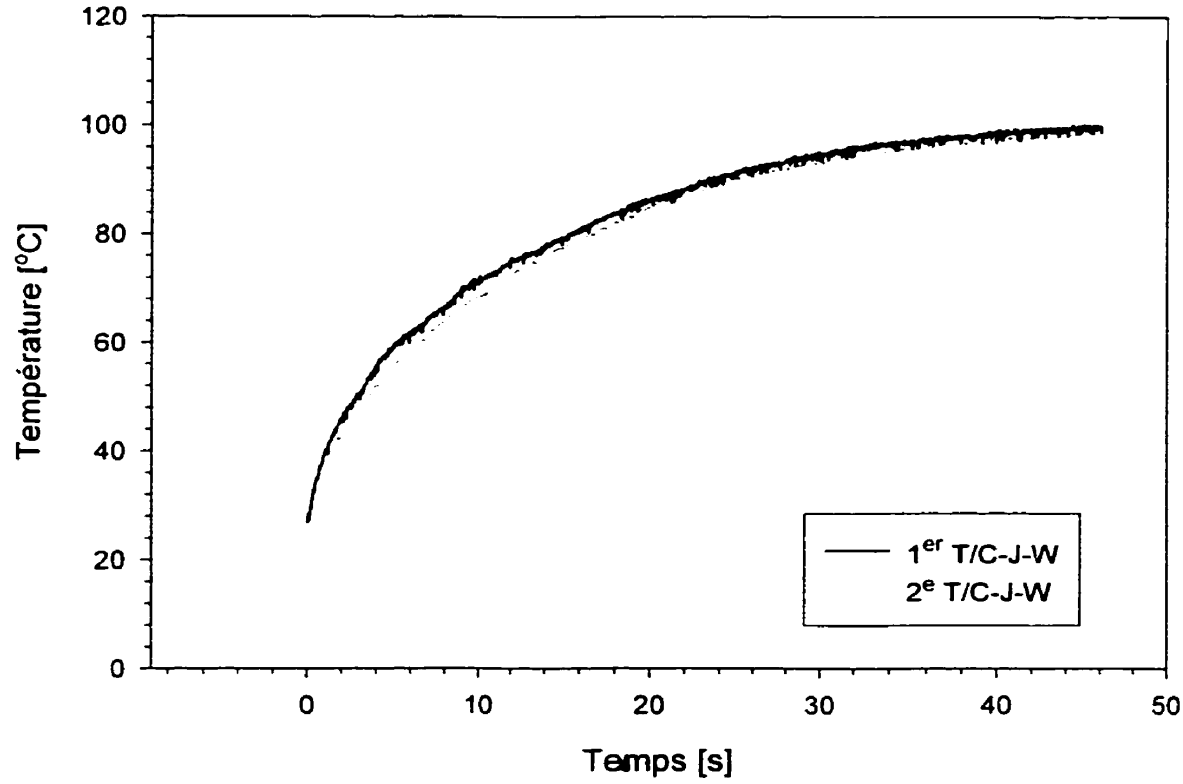


Figure 4.3 : Résultat de l'essai de temps de réponse de T/C-J-W, le thermocouple à rondelle, plongés dans l'huile à 100 deg.C après avoir été conditionné à 26 deg.C

4.3 Profils thermiques à sec

La technique du profil thermique est un outil nouveau et très intéressant, c'est pourquoi nous l'avons utilisé dans cette étude. Elle nous a permis de mettre en évidence l'effet de plusieurs paramètres. En particulier, l'effet du couple de serrage, de la rugosité et des tolérances de fabrication sur la distribution de température le long de la buse. La différence entre le comportement thermique du moule et celui du banc d'essai est aussi

mis en évidence à l'aide de cette technique. Cependant, tous ces essais sont réalisés en gardant les mêmes réglages présentés dans le tableau 4.3.

Tableau 4.3 : Réglages de température des essais de profil thermique

[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	93	288	288	288
[illegible]	93	inapplicable	288	288

4.3.1 Effet du couple de serrage

En comparant les profils thermiques à différents couples de serrage nous constatons que les courbes ne collent pas parfaitement les unes aux autres, comme nous pouvons l'observer sur le graphique présenté en haut de la figure 4.4 et l'agrandissement du centre de cette figure présenté en bas. Il est clair que, les courbes sont moins proches au centre qu'aux extrémités de la buse. Ce-ci ne peut être dû qu'au contact entre la buse et le corps de la buse. En effet, plus le couple de serrage augmente, plus la surface de contact entre les filets augmente. Par conséquent, le transfert thermique s'améliore et la résistance de contact diminue.

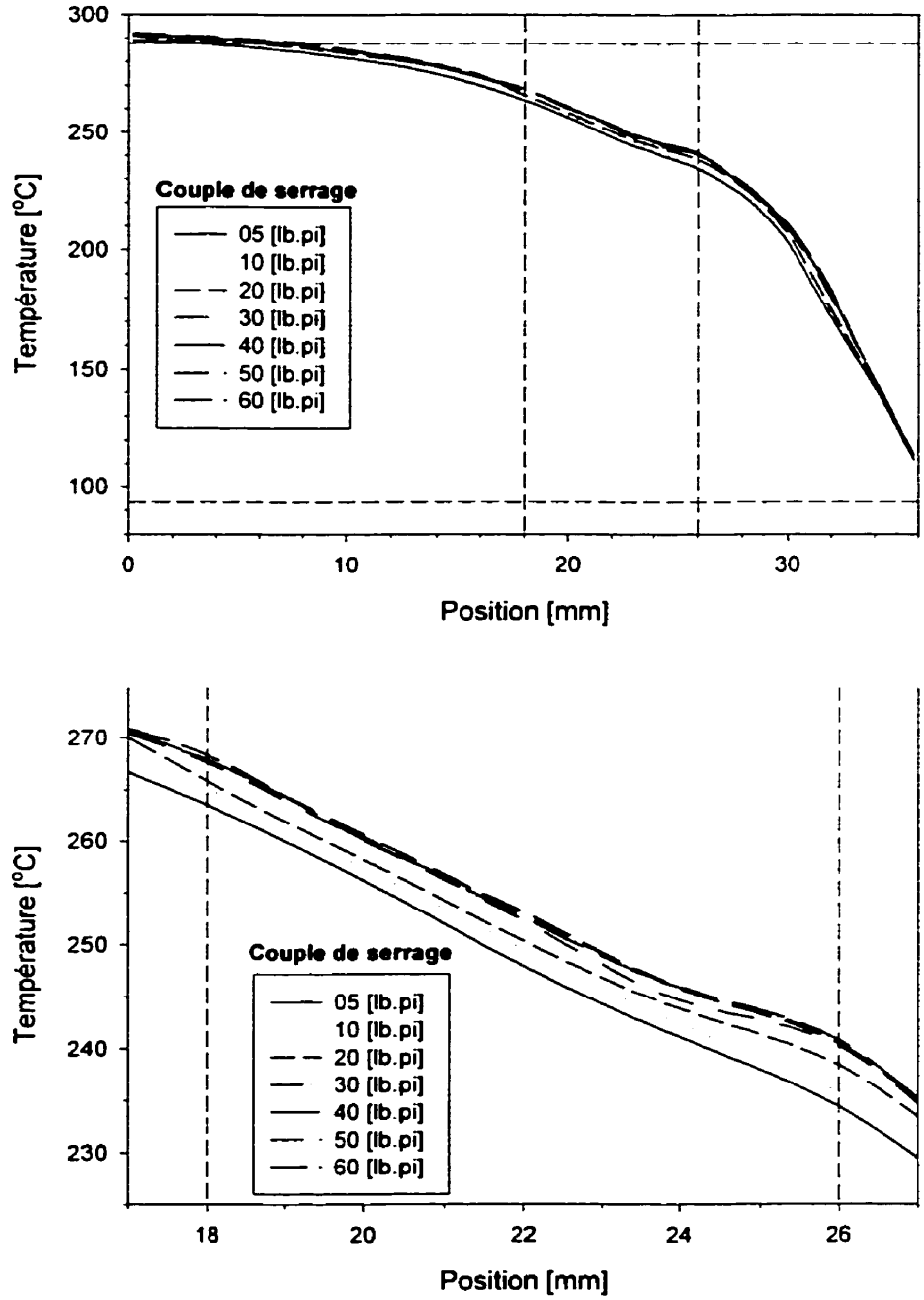


Figure 4.4: Effet du couple de serrage sur le profil de température du banc d'essai (se référer au tableau 4.3 pour les conditions d'essai)

Dans le tableau 4.4, nous présentons la température obtenue à quatre positions pour chaque couple de serrage, soit les deux extrémités de la buse la position la plus proche du thermocouple de contrôle, et celle du cône renversé. En observant ce tableau, nous pouvons constater que l'effet du couple de serrage n'est plus significatif après 40.7 N.m (30 lb.pi). Les profils thermiques tracés pour les couples de serrage entre 40.7 N.m et 81.5 N.m sont superposés, comme nous pouvons l'observer sur le graphique en bas de la figure 4.4. De plus, un couple de serrage très élevé peut causer des déformations plastiques permanentes sur les filets.

Tableau 4.4 : Température à différentes positions pour chaque couple de serrage (se référer au tableau 4.3 pour les conditions d'essai)

Position [mm]		35.8	26.0	18.0	0.2
Couple N.m (lb.pi)	6.8 (5)	111.4	234.4	263.5	288.7
	13.5 (10)	112.3	235.8	265.2	289.7
	27.1 (20)	112.4	238.2	265.8	291.0
	40.7 (30)	113.1	240.3	267.6	291.2
	54.3 (40)	113.2	241.0	267.9	291.5
	67.8 (50)	113.1	240.6	267.8	291.9
	81.4 (60)	113.3	240.4	268.3	291.5

Afin de mieux visualiser ceci, nous avons tracé à la figure 4.5 la variation de la température en fonction du couple de serrage à la position du cône renversé. Sur cette figure, nous pouvons constater que la température atteint un plateau après un certain couple. Par ailleurs, le traçage de deux droites passant par la plupart des points de mesure nous permet de déterminer le point d'intersection de ces deux droites. Ce point correspond au couple de serrage minimal nécessaire, pour assurer un transfert de chaleur optimale. Par conséquent, le couple de serrage qui permet d'assurer un transfert de chaleur optimal est de 39.5 N.m (29 lb.pi).

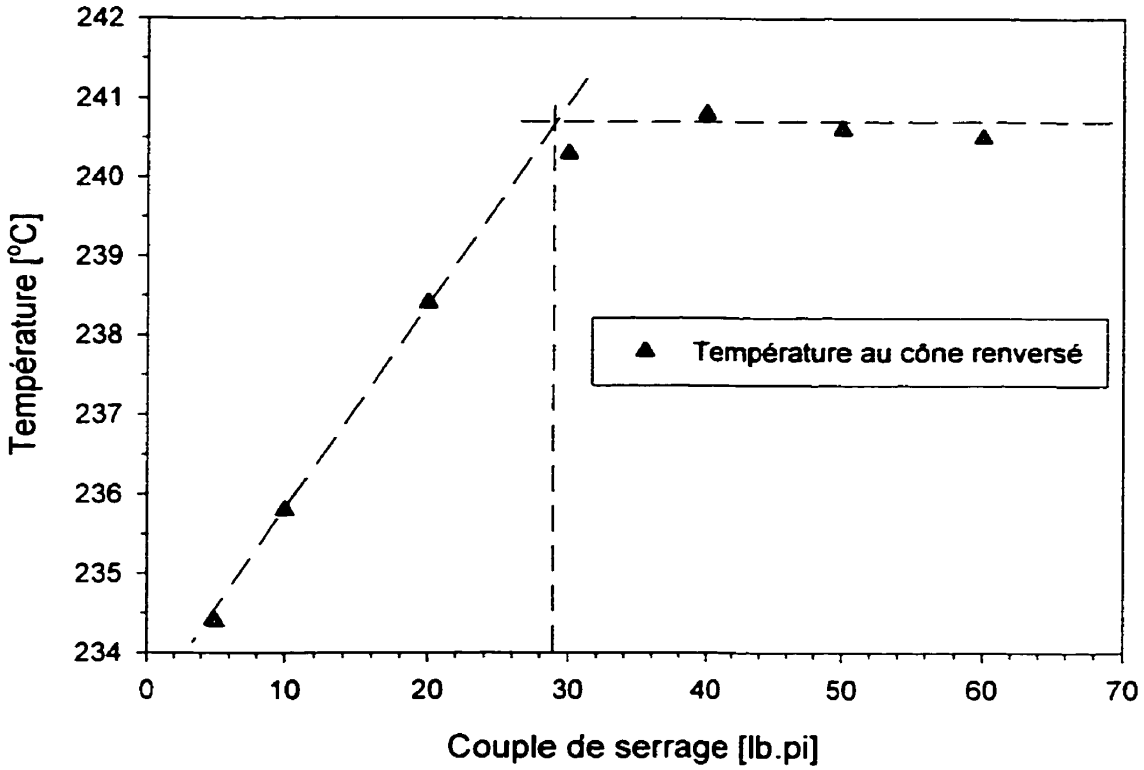


Figure 4.5: Effet du couple de serrage sur le profil de température au cône renversé en utilisant le banc d'essai avec la buse des semi-cristallins (se référer au tableau 4.3 pour les conditions d'essai)

Il est évident que lors du procédé, il faut assurer non seulement un transfert thermique optimal mais aussi une bonne étanchéité. En effet, lorsqu'un bouchon bloque la buse, lors du procédé, la pression de maintien (P_i) peut atteindre 210 MPa (l'équivalent de 30.000 psi). Dans ce cas, il ne faut pas que le polymère fondu puisse s'infiltrer à travers les filets. Par conséquent, nous avons calculé la force (F) exercée sur la buse quand il est bouché avec l'équation 4.1 :

$$P_i = \frac{4F}{\Pi D^2} \qquad (4.1)$$

La rigidité donnée par l'équation 4.2, dépend de la section, du module d'élasticité et la longueur. Mais, étant donné que la buse et le corps de la buse sont fabriqués du même matériau (H13), ils ont donc le même module d'élasticité ($E_B = E_{CB}$). De plus, la longueur déformée est la même pour les deux pièces ($L_B = L_{CB}$). Par conséquent, si nous considérons que la section déformée (aussi bien pour la buse que le corps de la buse ($A_B = A_{CB}$) est la même. Alors ces deux pièces ont la même rigidité.

$$K = \frac{AE}{L} \tag{4.2}$$

Le serrage de la buse contre le corps de la buse cause un allongement d'une partie du corps de la buse et une compression de la buse. Ces déformations élastiques sont égales comme l'indique l'équation 4.3.

$$\Delta\delta = \frac{F_B}{K_B} = \frac{F_{CB}}{K_{CB}} \tag{4.3}$$

La force exercée résultante, (F) donnée par l'équation 4.4, est la somme de ces forces (puisque les deux parties impliquées agissent comme deux ressorts en parallèle). Mais ces deux pièces ont la même rigidité ($K_B = K_{CB}$), alors les forces de réaction exercées sur ces deux pièces sont égales ($F_B = F_{CB}$), comme le montre la figure 4.6.

$$F = F_B + F_{CB} = 2F_i \tag{4.4}$$

$$Fi = F/2 \tag{4.5}$$

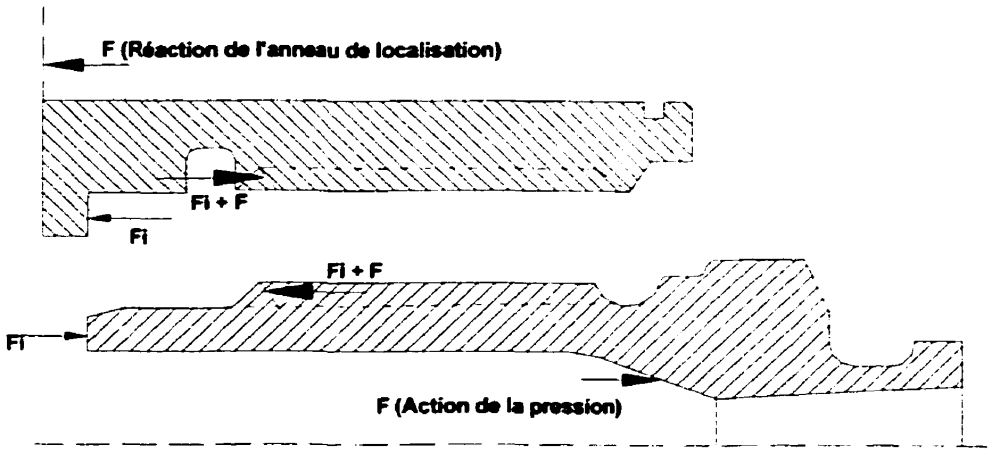


Figure 4.6 : Schéma de chargement de la buse en cas d'un bouchon lors de l'injection

Par conséquent, pour estimer le couple initial de serrage [28], nous utilisons l'équation 4.6. Ce couple est considéré comme le couple minimal permettant d'assurer un contact permanent (bonne étanchéité) durant l'injection des plaques :

$$T_i = \frac{F_i dm}{2}\left(\frac{L_a + \mu \Pi d_m \sec\alpha}{\Pi d_m - L_a \mu \sec\alpha}\right) + \frac{F_i \mu_c d_c}{2} \qquad (4.6)$$

Les dilatations thermiques sont négligées dans le calcul de la force initiale (F_i) de serrage, puisque les deux pièces sont presque à la même température lorsque le régime permanent s'établit. Le couple minimal de serrage nécessaire pour assurer l'étanchéité est estimé à 15.4 N.m (11.4 lb.pi), en utilisant les données du tableau 4.5.

Tableau 4.5 : Données sur les filets de la buse

13	10.5	1.5	0.15	0.15	60

Comparé au couple de serrage assurant un transfert de chaleur optimale, le couple de serrage minimum nécessaire pour avoir une bonne étanchéité est 2.6 fois plus faible. Par conséquent, le couple de serrage ne doit pas être inférieur à 39.5 N.m (29 lb.pi).

4.3.2 Effet de la rugosité et des tolérances de fabrication

Partant du fait que lors de l'essai du profil thermique avec le réglage décrit au chapitre 3, la température moyenne mesurée sur la surface de la buse est 125 deg.C et celle mesurée sur la surface de l'insert est 95 deg.C (voir le tableau 4.3 pour les températures de réglage), alors la dilatation thermique de la buse est plus élevée que celle de l'insert. Ainsi donc, une pression de contact s'établit entre la buse et le corps de la buse. Cette pression dépend des tolérances de fabrication (en prenant tous les autres paramètres constants).

En observant le tableau 4.6, il est important de remarquer que les trous des inserts no 02 et 03 sont non seulement de même dimension mais aussi en dehors des tolérances de fabrication, ce qui n'est pas le cas de l'insert no 01. Par ailleurs, en observant au microscope les surfaces de ces inserts, on s'aperçoit que les trous des deux premiers inserts sont de même état de surface, alors que la surface du troisième insert est plus rugueuse que celle de ces derniers (notons que le fabriquant indique sur le dessin de ces pièces une rugosité de la surface du trou de 0.8μm). Puisque ces surfaces sont seulement de 2 mm de hauteur, il nous a été difficile de mesurer leur rugosité.

Tableau 4.6 : Diamètre du trou de l'insert dont la surface est en contact avec le bout de la buse

[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	9.005 + 0.005	9.004
[illegible]	9.005 + 0.005	9.017
[illegible]	9.005 + 0.005	9.017

Il ressort de ces essais deux résultats très importants. Premièrement, l'utilisation d'insert de même rugosité et diamètres différents affecte le profil thermique. Ceci ne peut être associé qu'à la pression de contact établie entre la buse et l'insert en prenant tous les autres paramètres constants. Alors, plus les tolérances de fabrication augmentent, plus la pression de contact diminue (ce qui augmente la résistance de contact et diminue l'efficacité du système de refroidissement). Deuxièmement, le profil thermique est affecté par l'utilisation d'inserts de mêmes dimensions et de rugosité différente. Le même phénomène se produit, plus la rugosité augmente, plus la pression de contact diminue. Nous référons à la figure 4.7 pour voir les résultats de l'effet de ces paramètres sur le profil thermique.

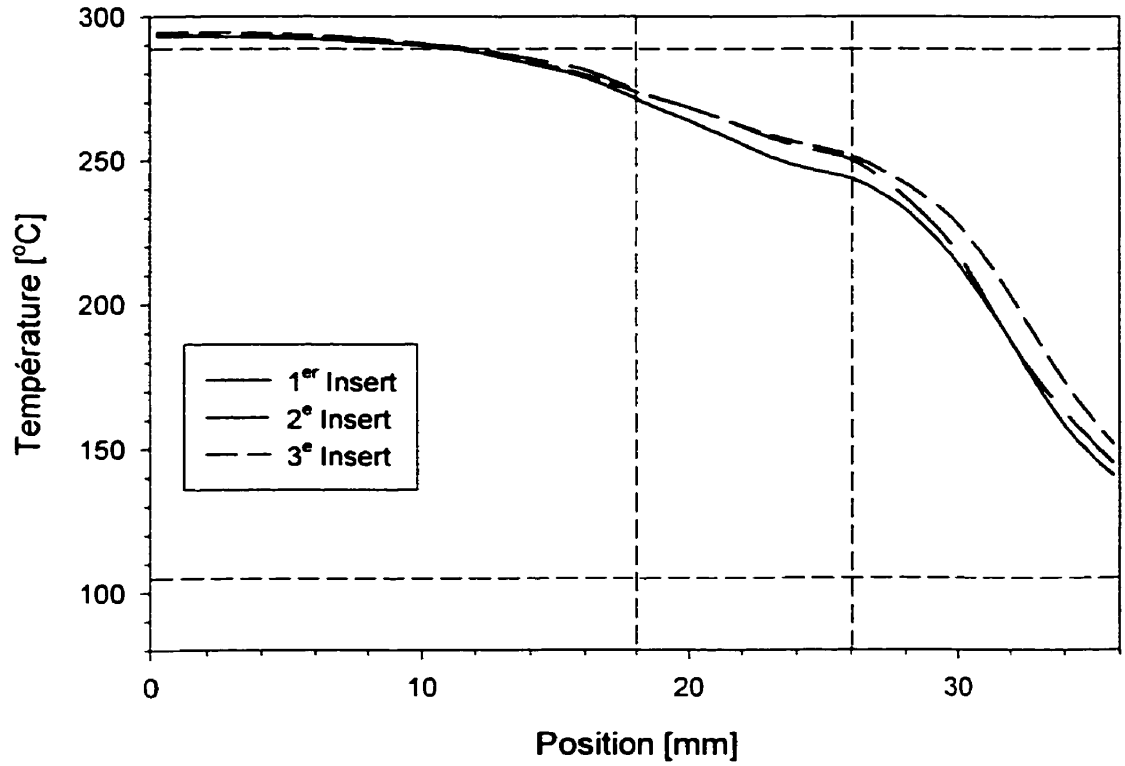


Figure 4.7 : Effet de la rugosité et des tolérances de fabrication sur le profil thermique en utilisant le moule de plaques avec la buse des semi-cristallins (se référer au tableau 4.3 pour les conditions d'essai)

Dans le tableau 4.7 nous avons présenté les températures mesurées en quatre positions pour chaque insert. Comme nous pouvons voir dans ce tableau, au cône renversé une différence de 7.8 deg.C est engendrée par l'effet combiné de tolérance et de rugosité, alors qu'à la position 0.2 mm la différence est négligeable. Cette différence peut nuire au procédé en réduisant la fenêtre de fonctionnement.

Tableau 4.7 : Effet de la rugosité et des tolérances de fabrication sur la température (se référer au tableau 4.3 pour les conditions d'essai)

	293.0	293.4	294.4
	271.3	274.1	273.6
	243.7	250.1	251.5
	140.4	144.7	151.3

4.3.3 Effet de l'utilisation de différentes composantes

La question d'interchangeabilité des composantes, comme l'élément chauffant, le thermocouple de contrôle ou le thermocouple servant à lire la température à chaque position afin de tracer le profil thermique, a été soulevée lors de cette étude. En effet, les courbes de l'essai de profil thermique réalisé avec deux thermocouples de lecture différents ne coïncident pas parfaitement, comme nous pouvons le constater à la figure 4.8. La différence maximale enregistré lors de cet essai en utilisant le banc d'essai (en réglant la température du moule à 93 deg.C et la température de la buse ainsi que celle du distributeur à 288 deg.C) est 3.4 deg.C. Ceci ne peut être associé qu'à la précision des thermocouples.

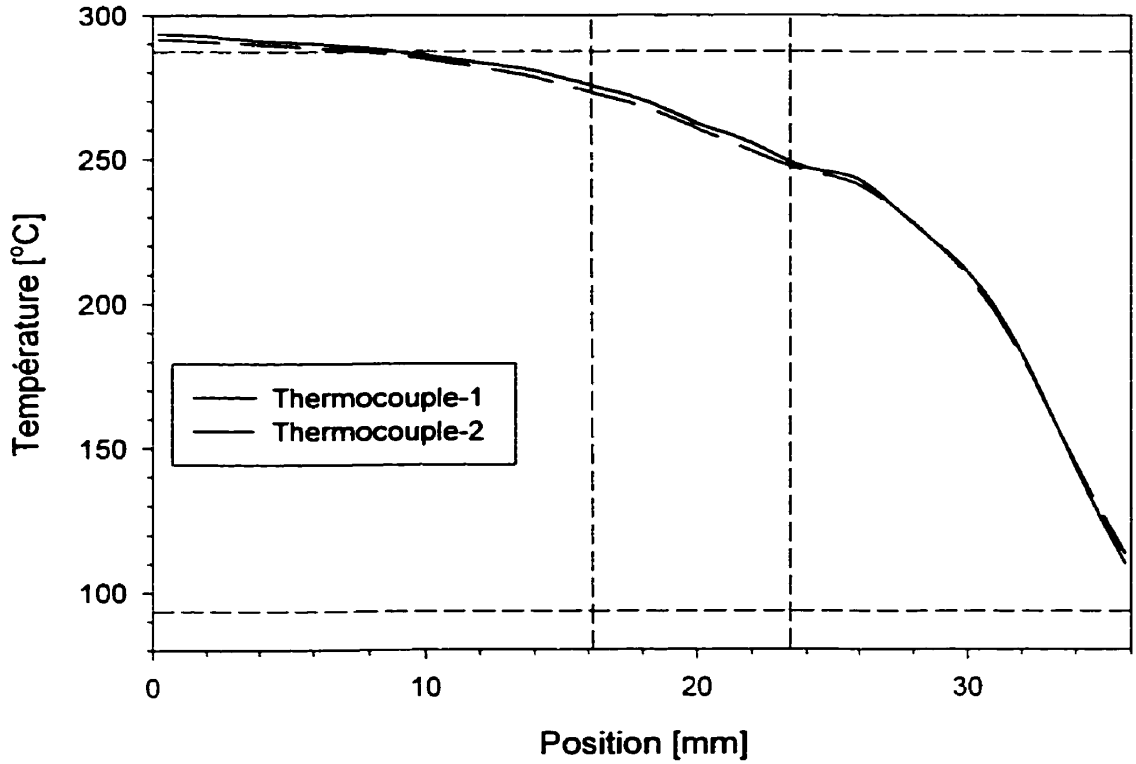


Figure 4.8 : Erreur due à l'utilisation de différents thermocouples en utilisant le banc d'essai avec la buse des semi-cristallins (se référer au tableau 4.3 pour les conditions d'essai)

Quant aux essais réalisés avec le moule de plaques réglé aux mêmes températures de réglage, mais en changeant l'élément chauffant de la buse ainsi que le thermocouple de contrôle, nous n'obtenons pas des résultats identiques. En effet, nous constatons une légère différence comme nous pouvons l'observer à la figure 4.9.

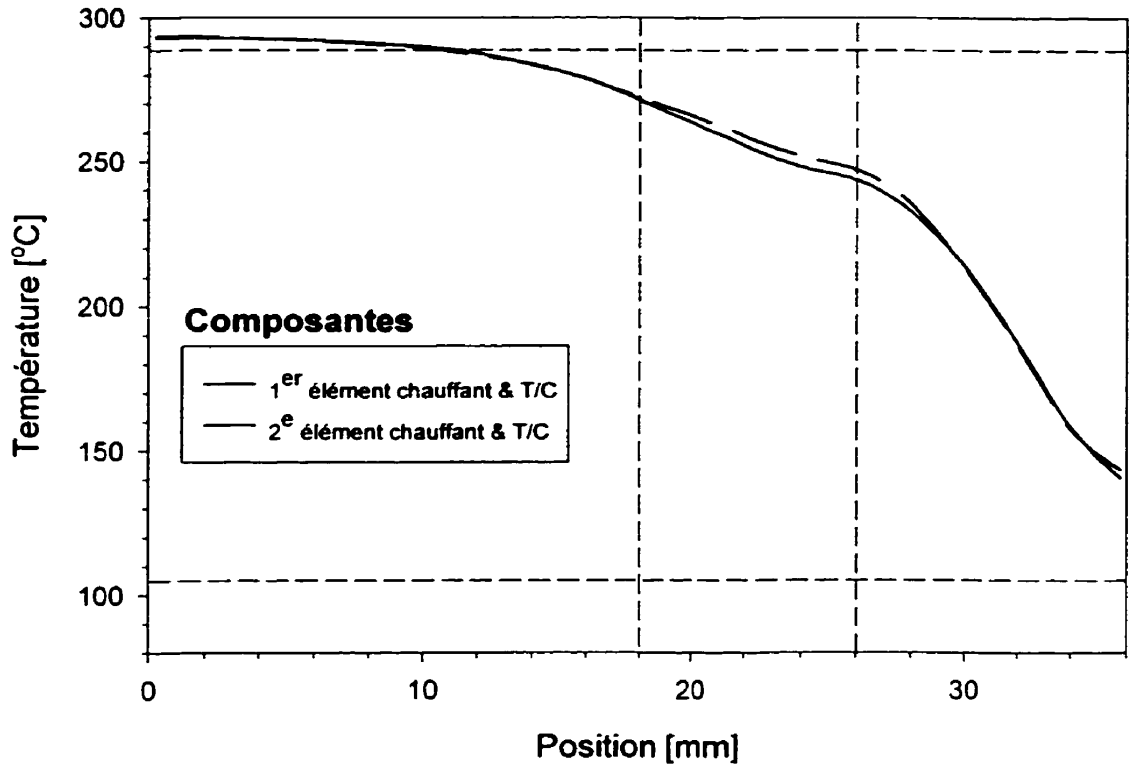


Figure 4.9 : Effet de l'utilisation de différentes composantes (thermocouple de contrôle de température et élément chauffant) en utilisant le moule des plaques avec la buse des semi-cristallins (se référer au tableau 4.3 pour les conditions d'essai)

Cependant, dans le tableau 4.8 nous résumons les résultats de ces essais. Dans de tels cas, nous constatons un écart maximal inférieur à 3.5 deg.C. Comme cette différence (inférieur à 1.5 %) n'est pas très grande en soit, nous pouvons la négliger sans l'ignorer pour autant.

Tableau 4 8 : L'effet du changement d'un jeu d'élément chauffant et de thermocouple (se référer au tableau 4.3 pour les conditions d'essai)

	293.0	293.6
	271.3	272.0
	243.7	247.1
	140.4	143.2

4.3.4 Comparaison entre le moule de plaques et le banc d'essai

Il est toujours plus facile de réaliser des essais de profile thermique avec le banc d'essai qu'avec le moule de plaques. Mais, avant d'utiliser les résultats du profil thermique obtenus avec le banc d'essai lors d'un processus de conception de nouvelles composantes dans un moule, il faut savoir si ces deux systèmes ont le même comportement thermique pour un réglage de température donné compte tenu des différences physiques possibles de ces deux systèmes.

Les résultats des essais du profil thermique avec le moule et le banc d'essai sont représentés à la figure 4.10. L'observation de cette figure marque une particularité. Elle nous donne un aperçu de la variation de la température avec la géométrie de la buse. Ainsi, les lignes verticales nous renseignent sur la correspondance des positions 18.0 mm et 26 mm avec la géométrie. De plus, nous pouvons observer, sur ce même graphique, que les courbes ne se superposent pas. Le profil thermique obtenu avec le banc d'essai est toujours en dessous de celui du moule. En effet, les deux courbes sont presque collées le long du contact de la buse avec le corps de la buse, mais plus on se rapproche du contact de la buse avec l'insert du moule plus la différence entre les courbes augmente.

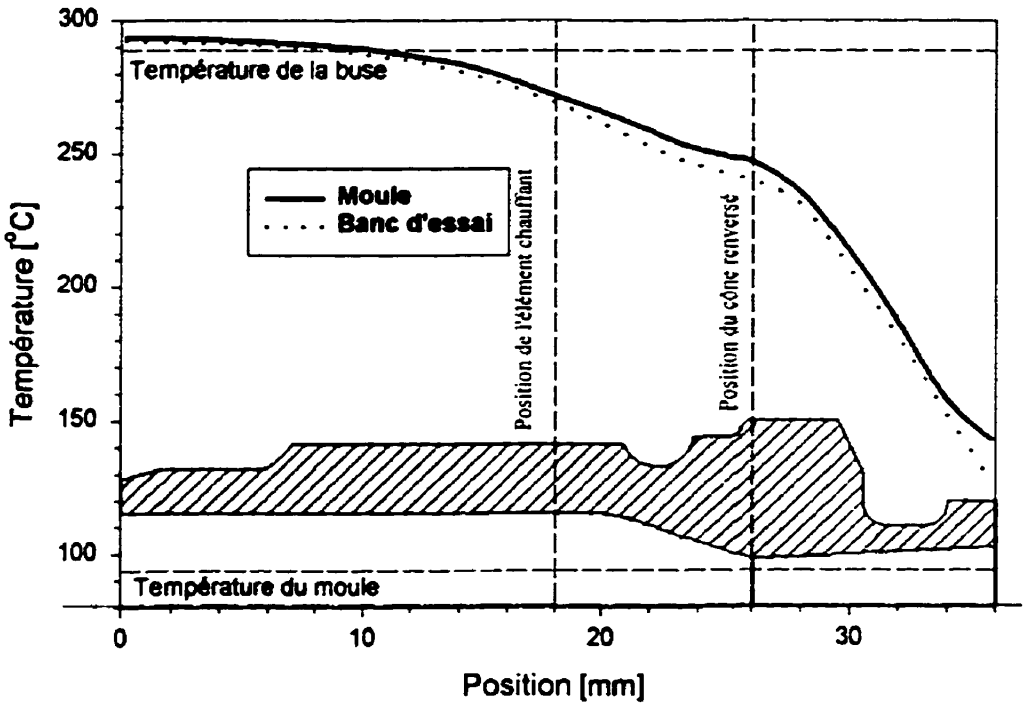


Figure 4.10 : Comparaison du profil thermique du moule à celui du banc d'essai avec la buse des semi-cristallins (se référer au tableau 4.3 pour les conditions d'essai)

Par ailleurs, l'observation de ces courbes nous révèle l'existence de deux changements de pente. Le premier commence avant la position du thermocouple de contrôle de la température de la buse alors que le deuxième commence après la position du cône renversé. Ceci nous a permis de diviser la courbe en trois zones. Il s'agit d'un changement de pente en passant d'une zone à l'autre. Ainsi donc, nous avons tracé les droites passant par la plupart des points de mesure à la figure 4.11 dans le cas du banc d'essai et à la figure 4.12 dans le cas du moule. De cette façon, nous avons pu délimiter les zones par des droites horizontales passant par les points d'intersection de ces droites.

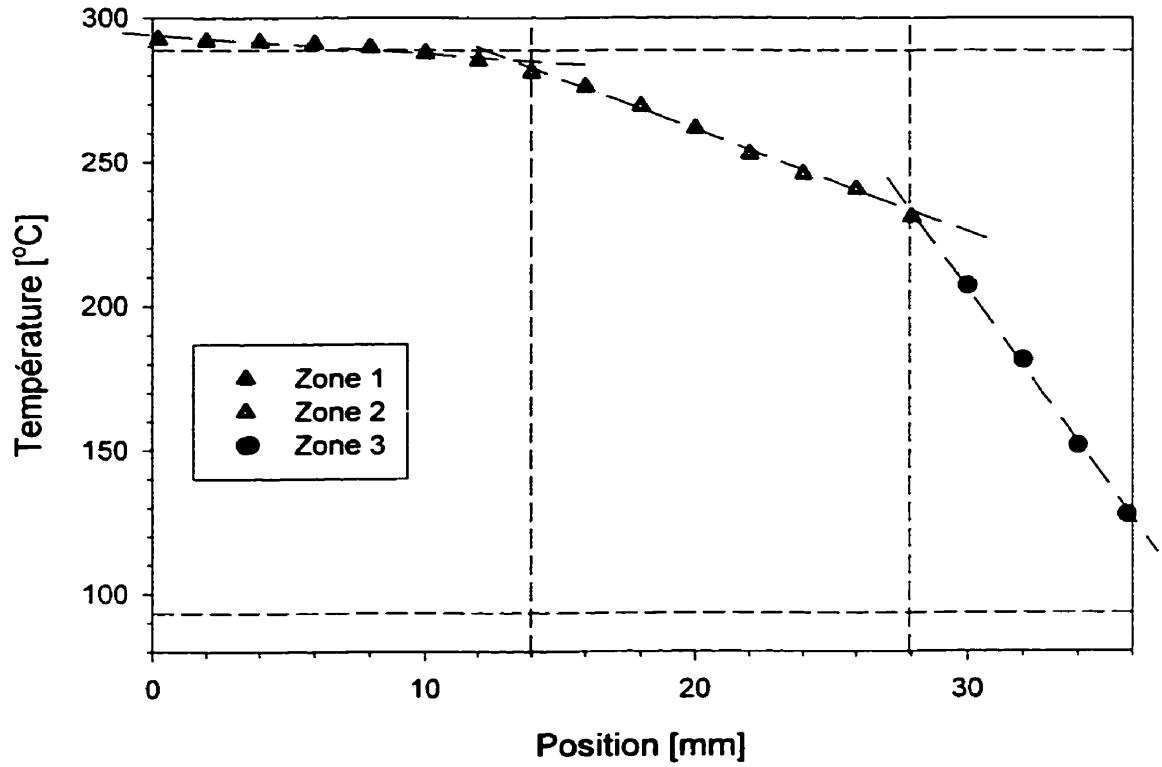


Figure 4.11 : Profil thermique obtenu avec le banc d'essai divisé en trois zones avec la buse des semi-cristallins (se référer au tableau 4.3 pour les conditions d'essai)

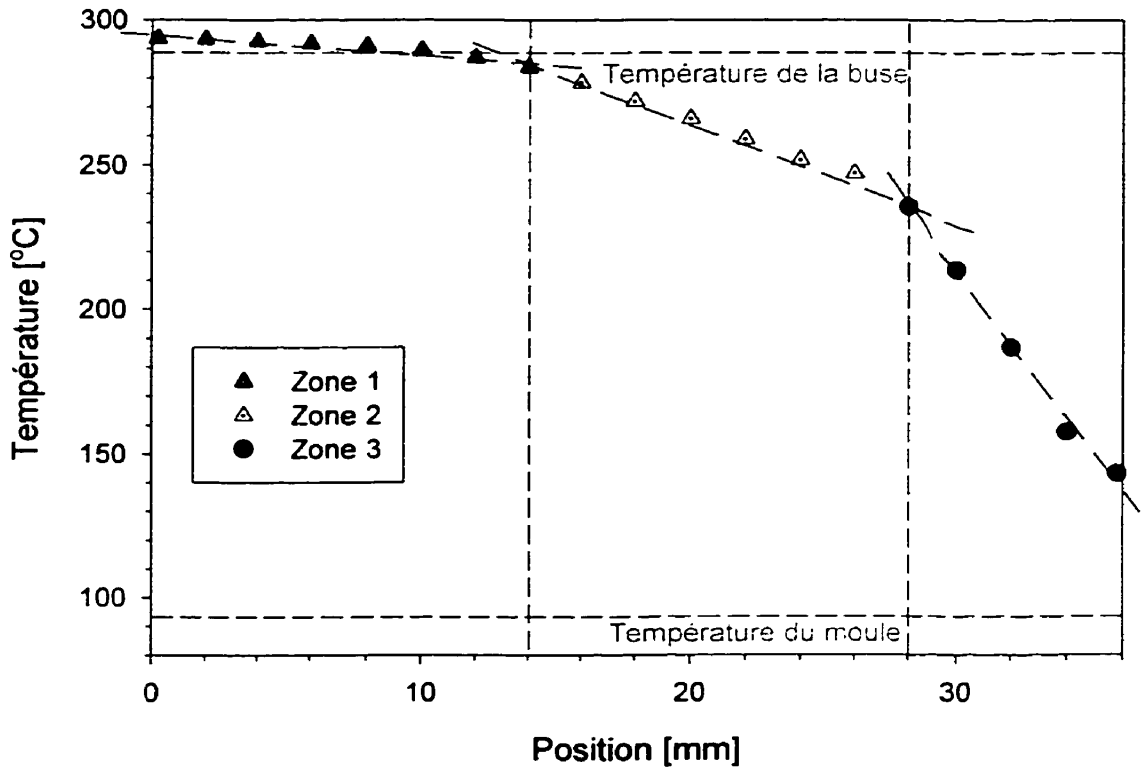


Figure 4.12 : Profil thermique obtenu avec le moule de plaques divisé en trois zones avec la buse des semi-cristallins (se référer au tableau 4.3 pour les conditions d'essai)

Dans le tableau 4.9 nous présentons les températures obtenues avec le moule et le banc d'essai en quatre positions différentes ainsi que la déviation standard à chaque position. En observant ce tableau, nous constatons que la déviation standard augmente en s'approchant du côté du contact de la buse avec l'insert du moule. Ceci est sûrement causé du fait que la pente la plus importante est dans cette zone. Alors, la température

est plus affectée par une faible variation de la position que dans les autres zones ce qui donne une déviation standard plus élevée.

Tableau 4.9 : Les résultats des essais de profil thermique à différentes positions (se référer au tableau 4.3 pour les conditions d'essai)

Position [mm]	Moule		Banc d'essai	
	Temp. moy. [deg.C]	Déviation Std	Temp. moy. [deg.C]	Déviation Std
[illegible]	293.6	0.16	292.5	0.15
[illegible]	272.0	0.26	269.3	0.29
[illegible]	247.1	0.70	240.4	0.45
[illegible]	143.2	2.00	127.6	2.30

En ce qui a trait aux différences entre le moule de plaques et le banc d'essai, nous avons identifié que le système de refroidissement du banc d'essai est plus efficace que celui du moule. Nous pouvons facilement voir cette différence en comparant la figures 4.13 du banc d'essai à la figure 4.14 du moule. Outre la différence entre les deux systèmes de refroidissement, on note aussi une différence de la forme de l'élément chauffant du distributeur du banc d'essai par rapport à celui du moule ainsi que la position du thermocouple qui contrôle la température de chaque distributeur (le thermocouple du moule est à 13 mm plus loin de l'axe passant par le centre de la buse que celui du banc d'essai). Du plus, la plaque arrière du système à canaux chauds du moule est refroidie, alors que celle du banc d'essai ne l'est pas. D'autre part, le distributeur du moule (avec son thermocouple de contrôle) est entouré par une poche d'air fermée, alors que celle entourant le distributeur du banc d'essai est ouverte à l'air ambiant.

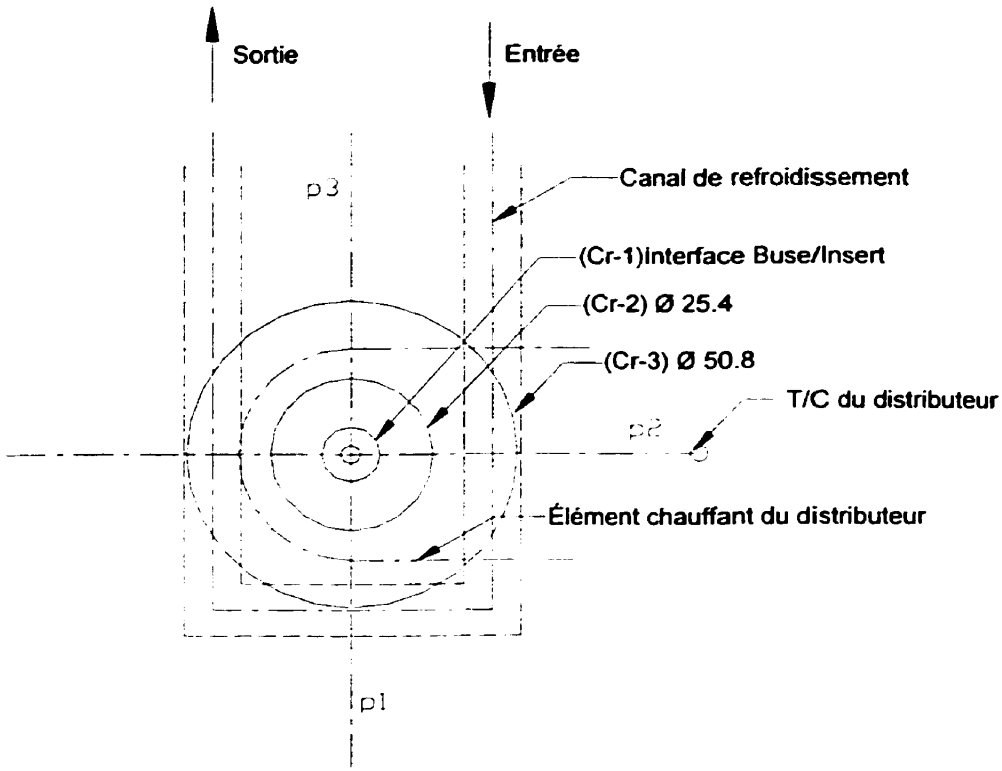


Figure 4.13 : Schéma des différentes composantes du banc d'essai avec la disposition des points de mesure

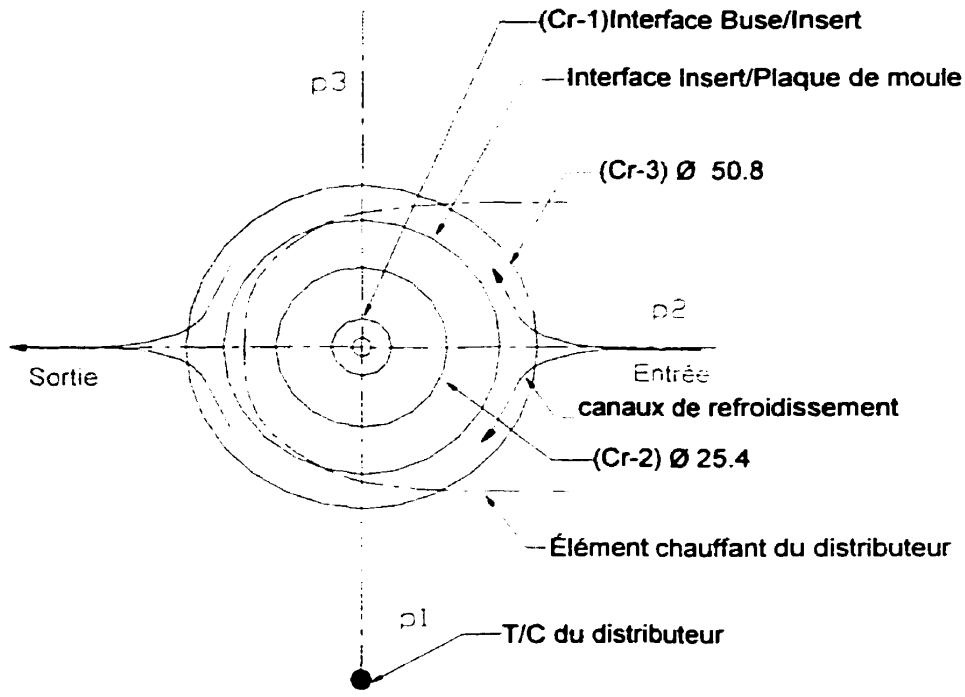


Figure 4.14 : Schéma des différentes composantes du moule avec la disposition des points de mesure

Par ailleurs en faisant une comparaison entre les deux systèmes de refroidissement, nous constatons certaines différences dont les résultats sont présentés dans le tableau 4.10. Les systèmes ont presque le même diamètre hydraulique, mais la distance du centre du canal de refroidissement au point d'injection est plus élevée dans le cas du moule. De plus, ces deux systèmes ne seront pas refroidis à la même vitesse du fait que le débit du liquide refroidissement fourni par le conditionneur est même, alors que la section de

l'insert du moule est presque trois fois plus élevée que celle du banc d'essai. Le débit est le produit de la vitesse par section, dont la normale est parallèle à la direction vitesse.

Tableau 4.10 : Comparaison des paramètres des systèmes de refroidissement

Moule	2(89.55)	8.98	30.8	v
Banc d'essai	59.86	8.73	22.9 – 27.0	3 x v

D'autre part, des mesures de température à différentes positions (voir figures 4.13 et 4.14 pour les points de mesure) à la surface de l'insert ont montré que la température proche de la surface de contact de la buse avec l'insert dans le cas du banc d'essai est plus froide que celle dans le cas du moule. Nous référons au tableau 4.11 pour les résultats de cet essai.

Tableau 4.11 : Résultats de mesure de température à la surface de l'insert
(se référer au tableau 4.3 pour les conditions d'essai)

	Moule	Banc d'essai
	122.5	111.5
	120.3	111.5
	123.0	114.0
	81.5	73.0
	79.0	76.5
	84.0	83.0
	79.6	73.5
	79.0	75.0
	81.0	81.5

Par ailleurs, nous avons essayé d'établir une relation entre le profil thermique du moule et du banc d'essai. Il s'agit de retracer le profil thermique du banc d'essai en ayant celui du moule.

En définissant un ratio comme le rapport de la différence entre la température de la buse et celle du moule par la différence entre la température de la buse et la température lue à un point donné, nous calculons ce ratio dans le cas du moule et du banc d'essai. Ensuite, nous déterminons le facteur de correction qui est le rapport des ratios (voir tableau 4.12). Ce résultat est intéressant et peut nous amener à établir des tables de correspondance ou un modèle de conversion en réalisant plusieurs essais sous différentes conditions.

Tableau 4.12 : Relation entre le profil thermique du moule et le banc d'essai (se référer au tableau 4.3 pour les conditions d'essai)

Position [mm]		18.0	26.0	35.8
Ratio	Moule	11.67	4.40	1.32
	Banc d'essai	10.42	4.06	1.22
Facteur de correction		1.12	1.08	1.08

Finalement, nous avons réalisé un essai de profil thermique avec le moule de plaques monté sur la machine. De cette façon, nous avons pu comparer le résultat de cet essai avec celui obtenu avec le moule sur la table. Il ressort de cet essai que, le résultat du profil thermique du moule n'est pas affecté en installant le moule sur la machine au lieu de le mettre sur la table. La figure 4.15 montre bien que les courbes, du profil thermique obtenues avec le moule installé sur la machine et le moule sur la table, sont superposées.

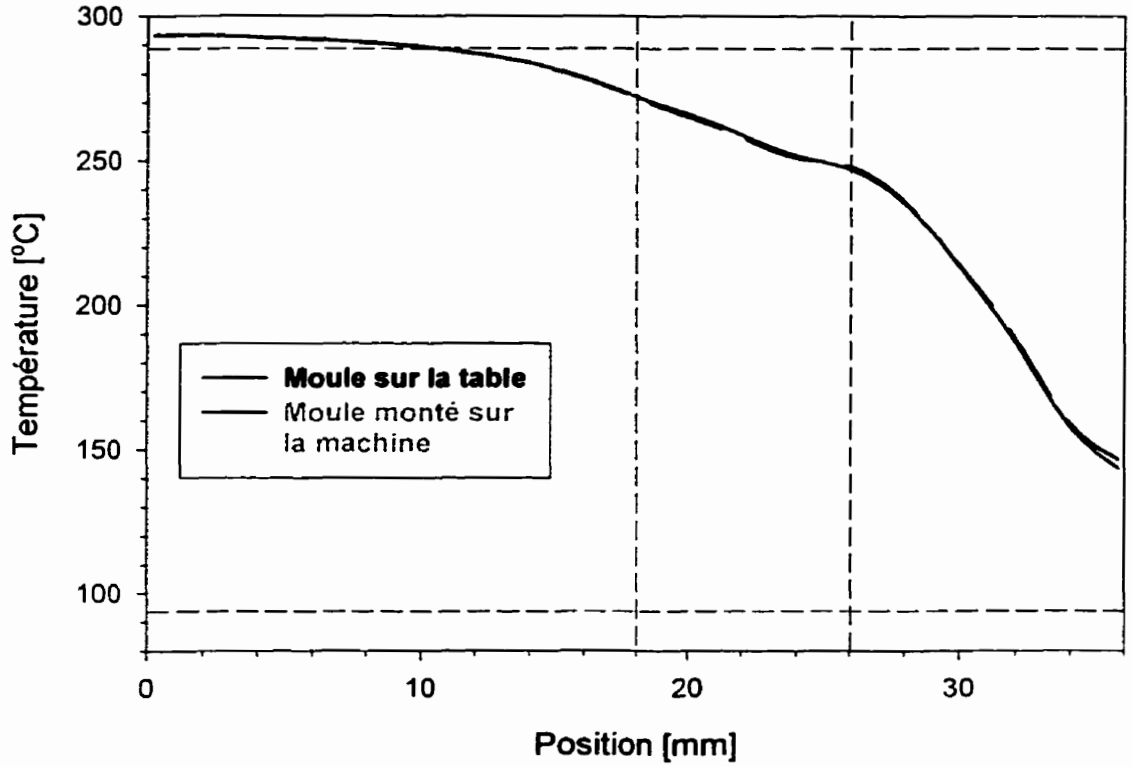


Figure 4.15 : Comparaison du profil thermique du moule monté sur la machine à celui du moule sur la table (se référer au tableau 4.3 pour les conditions d'essai)

4.4 Profils thermiques lors de l'injection

Dans ce paragraphe, on propose de présenter les résultats obtenus lors des essais d'injection avec acquisition de données. La figure 4.16 donne un aperçu de la forme du signal de température et son amplitude pour chaque position de thermocouple. Il apparaît de façon évidente que nous obtenions un signal répétitif à chaque position. De plus, on

observe que le pic de température ne se produit pas au même instant à toutes les positions, mais avec un retard à certaines d'entre elles. Finalement, il apparaît que la température est la même de part et d'autre des bouts de l'insert (T-02 et T-04) près de la surface de contact avec la buse.

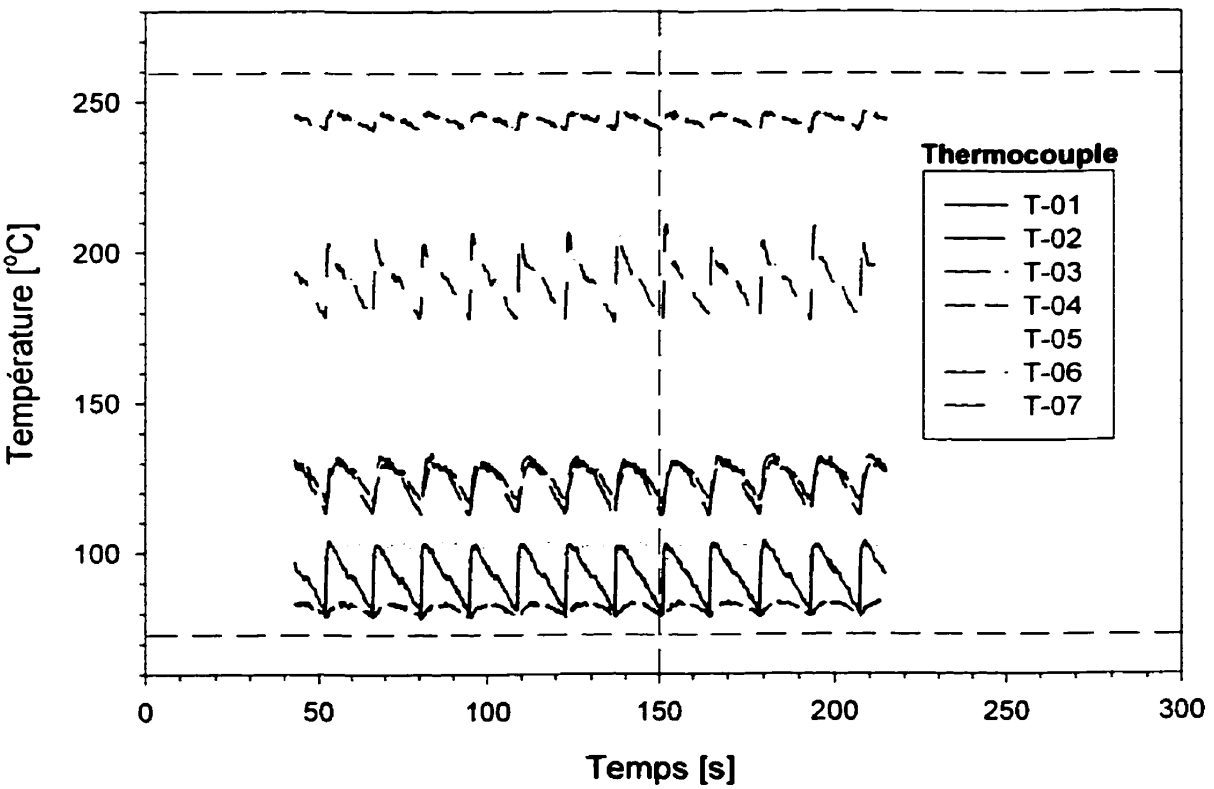


Figure 4.16 : Variation de la température aux différentes positions des capteurs servant à l'acquisition de données

4.4.1 Effet de la température de la buse

Il ressort des résultats de ces essais que la qualité des plaques moulées est fortement influencée par la température au cône renversé. En effet, une augmentation de 22 deg.C de la température de réglage de la buse déplace la courbe de 17 deg.C. Comme nous pouvons l'observer à la figure 4.17, le signal de température ne subit aucune déformation. Ainsi, la courbe est simplement déplacée en conservant sa forme et son amplitude.

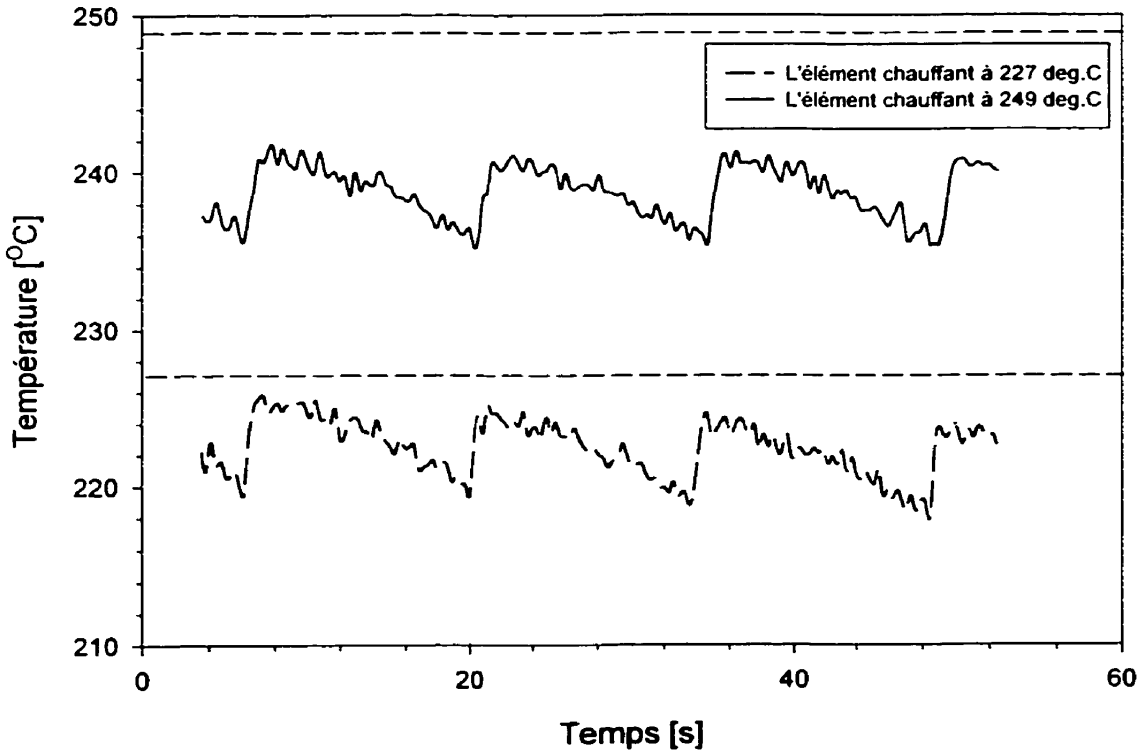


Figure 4.17 : Effet de la température de l'élément chauffant sur la température au cône renversé (T-06) (T_{moule} à 93 deg.C, $T_{distributeur}$ à 288 deg.C, la pression de maintien à 32 MPa et la vitesse d'injection à 25 mm/s)

Par contre, la température de réglage de la buse a peu d'effet sur la température au point d'injection. Cependant, la température à cette position est plutôt affectée par le cisaillement du polymère. Nous pouvons observer cet effet à la figure 4.18, comment le signal de température est non seulement déplacé, mais aussi allongé. En effet, on obtient une amplitude de signal de 34 deg.C en réglant la température de la buse à 260 deg.C comparativement à une amplitude de 22 deg.C quand la température de la buse est réglée à 288 deg.C.

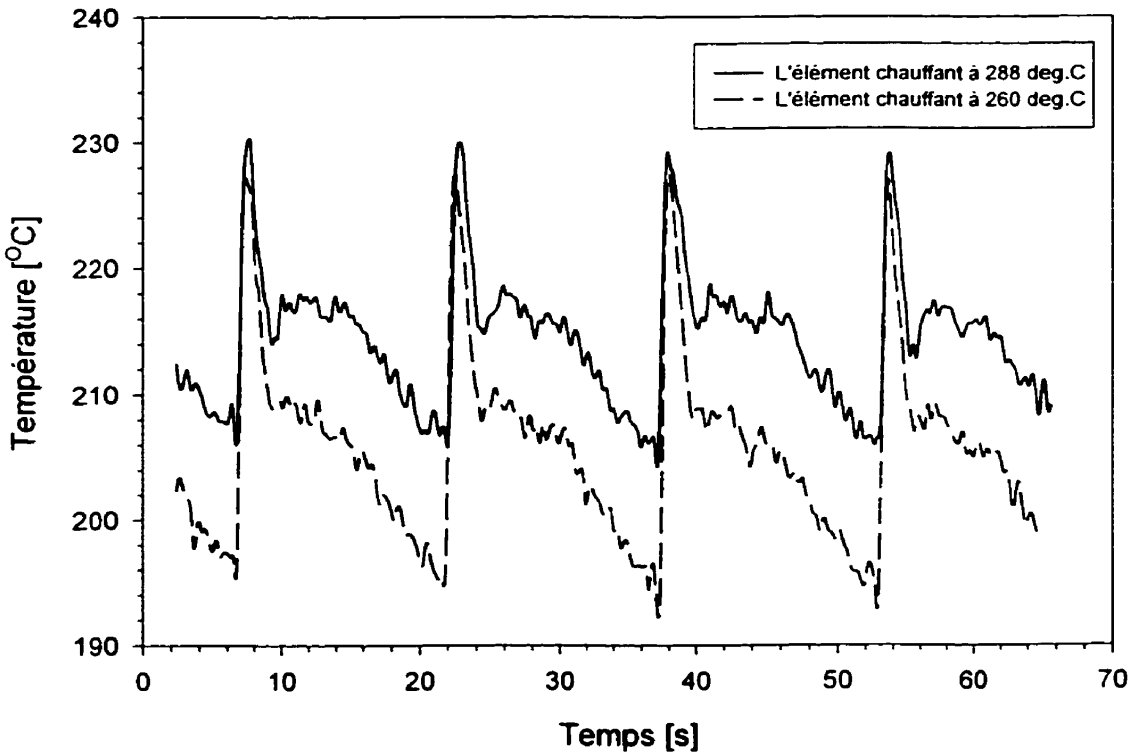


Figure 4.18 : Effet de la température de l'élément chauffant sur la température au seuil d'injection (T-07) (T_{moule} à 103 deg.C, $T_{distributeur}$ à 288 deg.C, la pression de maintien à 42 MPa et la vitesse d'injection à 25 mm/s)

4.4.2 Effet de la température du moule

La température aux différentes positions de l'insert est principalement affectée par la température de réglage du moule. En effet, l'augmentation de la température du moule de 20 deg.C engendre une augmentation moyenne de 15 deg.C aux positions T-02 et T-04, 18 deg.C à la position T-05, 16 deg.C au milieu de la cavité à la position T-01 et 10 deg.C à la position t-07 du bout de la buse. La figure 4.19 donne un aperçu sur l'effet à la position T-07 dû à une augmentation de 20 deg,C de la température du moule. Comme nous pouvons l'observer sur cette figure, le signal au bout de la buse en plus d'être déplacé, il est aussi est aussi déformé (l'amplitude du signal obtenu à une température de moule de 93 deg.C est plus élevée que celle du signal obtenu à une température de moule de 73 deg.C).

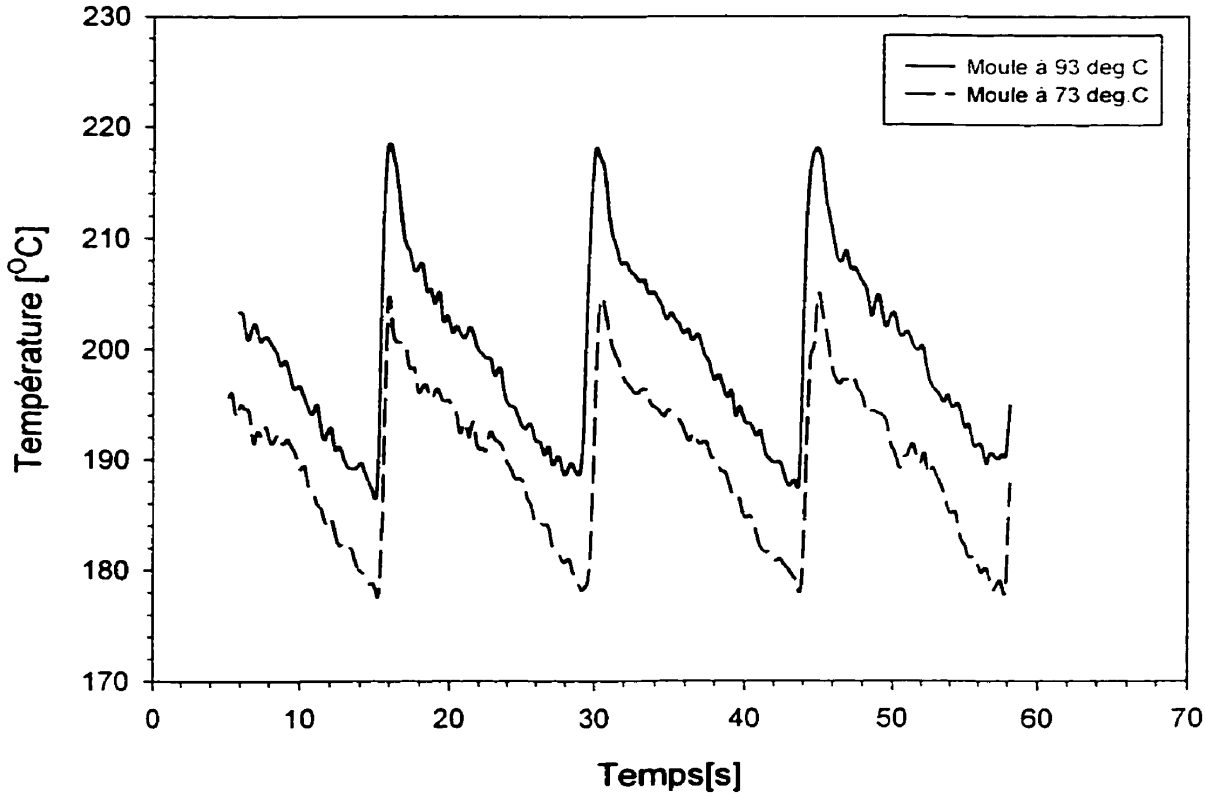


Figure 4.19 : Effet de la température du moule sur la température (T-07) au bout de la buse(T_{buse} à 260 deg.C, $T_{distributeur}$ à 288 deg.C, le pression de maintien à 32 MPa et la vitesse d'injection à 25 mm/s)

4.4.3 Effet de la vitesse d'injection

Au cours de ces essais, on se rend compte que l'effet de la vitesse d'injection est très faible en comparaison à l'effet de la variation de la température de réglage de la buse. Ainsi, la température aux différentes positions des thermocouples est affectée de la même façon par la vitesse d'injection. Cependant, une augmentation de la vitesse d'injection provoque une faible augmentation uniforme aux différentes positions des

thermocouples. Par ailleurs, l'ouverture du moule est inévitable à des vitesses d'injection supérieures à 40 mm/s (se référer à la figure 4.20 pour l'effet de la vitesse d'injection). Nous pouvons voir sur cette figure que l'augmentation de la vitesse d'injection allonge la courbe (à cause de l'augmentation du cisaillement) et raccourcit le temps de cycle.

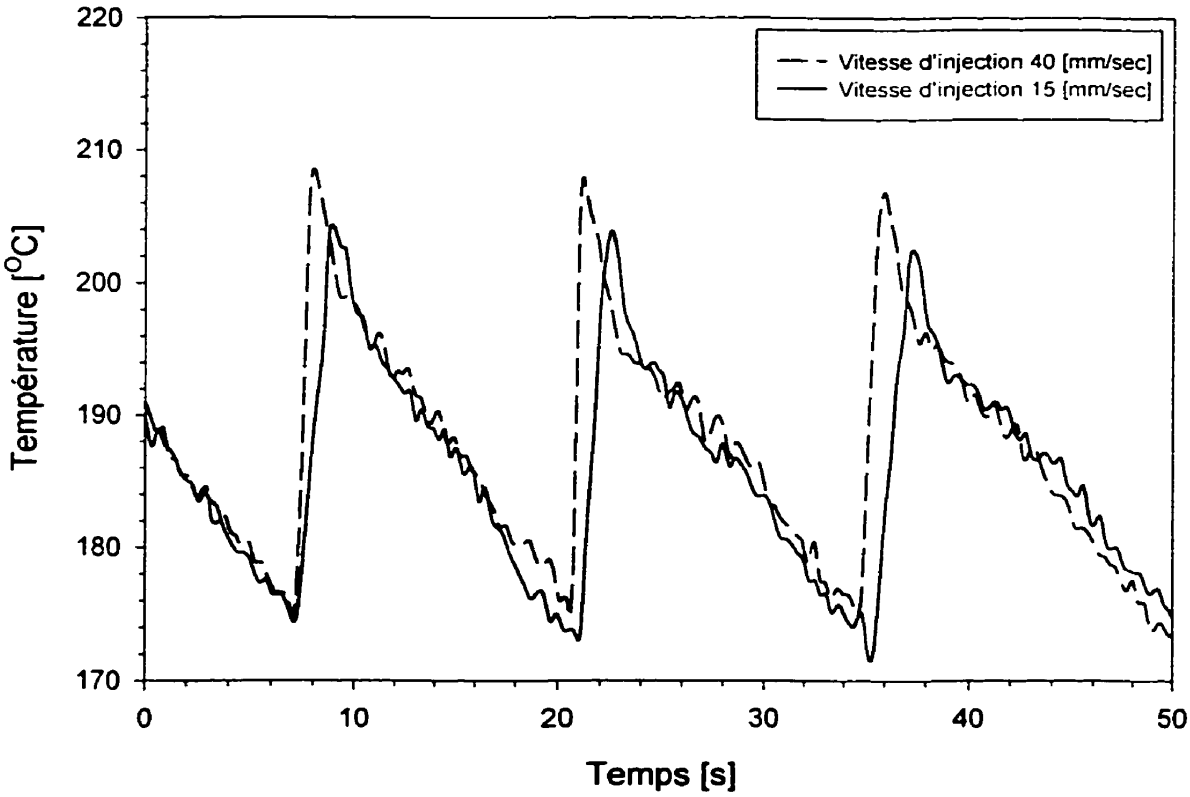


Figure 4.20 : Effet de la vitesse d'injection sur la température (T-07) au seuil d'injection (T_{moule} à 73 deg.C, T_{buse} à 227 deg.C, $T_{distributeur}$ à 288 deg.C et la pression de maintien à 32 MPa)

4.4.4 Effet de la pression de maintien

Puisque nous n'avons pas installé un capteur de pression sur la buse de machine pour suivre la chute de pression à travers le système à canaux, étant donné que ceci ne fait pas partie des objectifs de ce travail, alors nous allons nous arrêter par présenter les résultats obtenus de la pression au milieu de la cavité, à la figure 4.21.

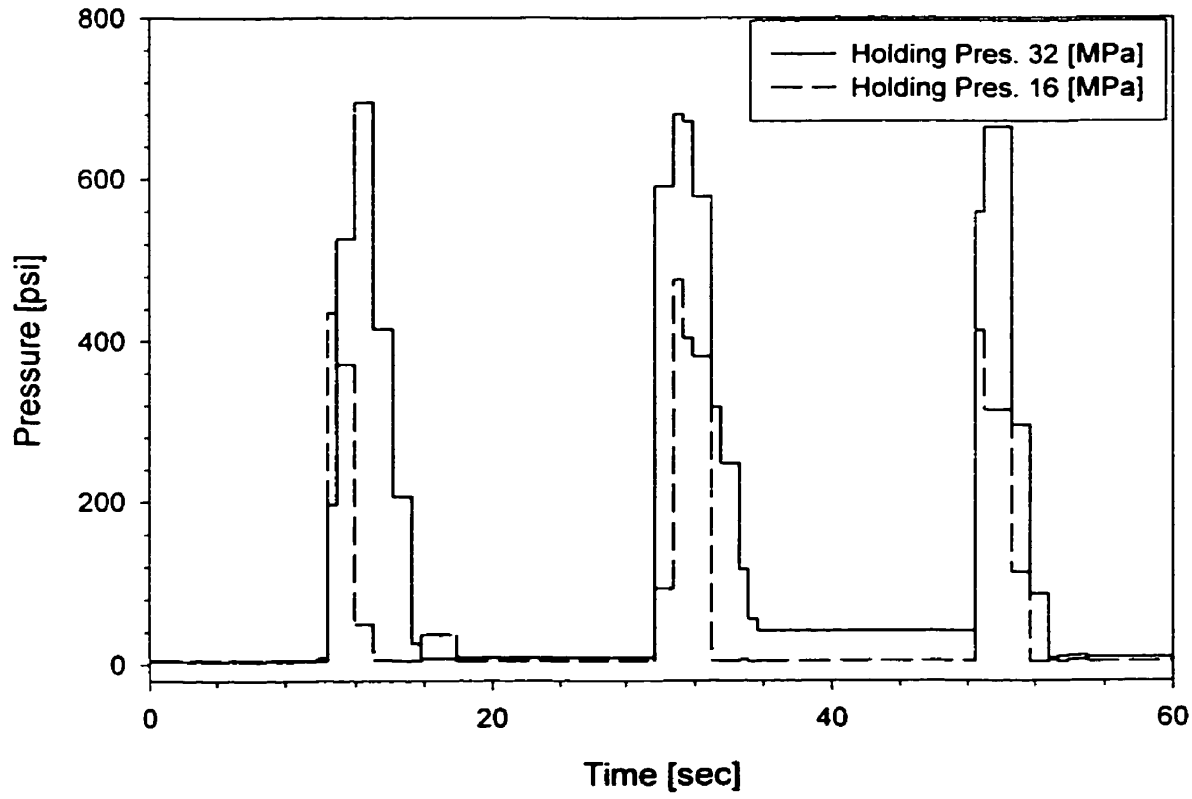


Figure 4.21 : Variation de la pression au centre de la cavité lors du cycle d'injection

La variation de la pression de maintien ne semble pas affectée la température aux différentes positions des thermocouples. En effet à la figure 4.22, nous n'observons pas une différence significative de la température (T-07) au seuil d'injection quand nous doublant la pression de maintien. Par ailleurs, le poids et les dimensions des pièces moulées doivent sûrement être affectées. Mais nous n'avons fait aucune mesure à ce sujet.

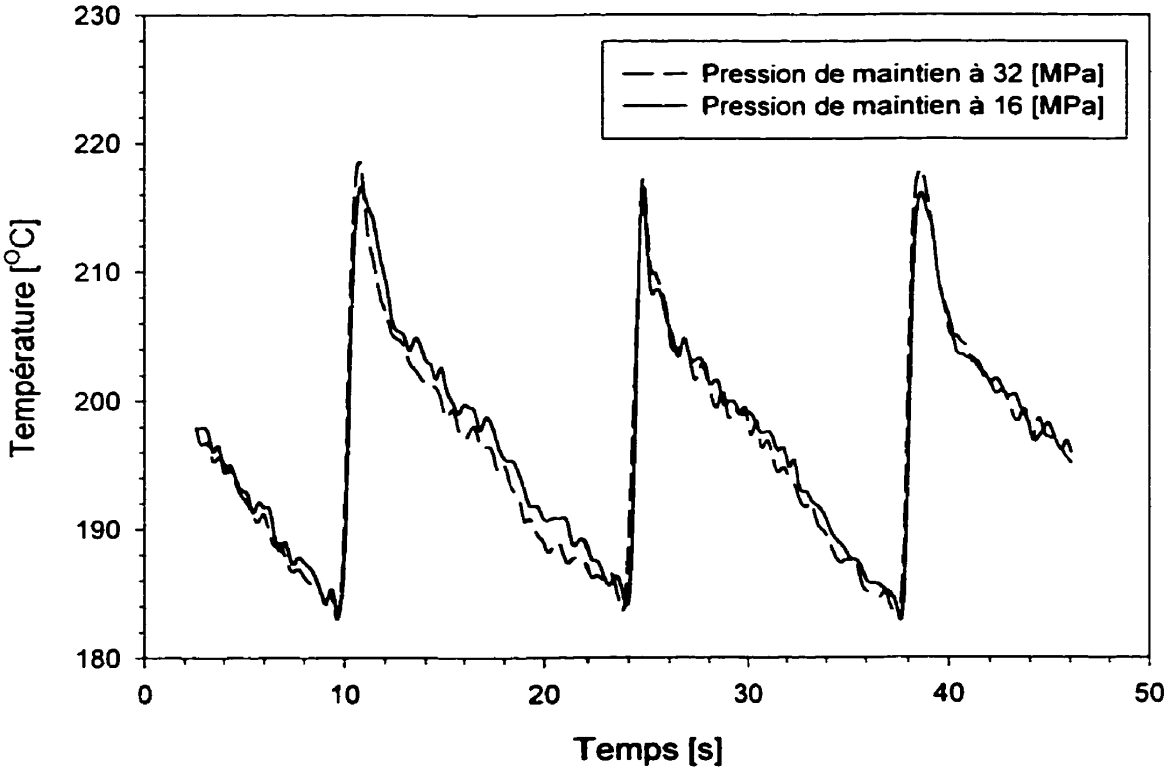


Figure 4.22 : Effet de la pression de maintien sur la température (T-07) au seuil d'injection (T_{moule} à 93 deg.C, T_{buse} à 249 deg.C, $T_{distributeur}$ à 288 deg.C et la vitesse d'injection à 25 mm/s)

4.4.5 Comparaison des différents effets

Pour mettre en évidence l'effet de la température de réglage de la buse et du moule sur la température aux différentes positions, nous avons calculé le pourcentage d'élévation de la température à chacune de ces positions provoqué par une augmentation de la température de réglage (voir tableau 4.13). Ainsi, on se rend compte que l'effet sur l'augmentation de la température du cône renversé est plus que deux fois plus élevé en comparaison à celle au bout de la buse. Alors que l'effet de la température de réglage du moule sur la température du cône renversé est très faible.

Tableau 4.13 : Effet du réglage de la buse sur la température aux différentes positions

Position	[illegible]	[illegible]
[illegible]	3	80
[illegible]	3	80
[illegible]	6	90
[illegible]	10	75
[illegible]	35	50
[illegible]	75	16

La comparaison des plaques moulées en appliquant les critères cités dans le chapitre 3 nous amène à conclure que les meilleures plaques moulées sont obtenues aux conditions présentées dans le tableau 4.14. Les autres paramètres obtenus précédemment lors du procédé sont maintenus constants.

Tableau 4.14 : Résultat des paramètres du procédé optimal

	25 [mm/sec]
	32 [MPa]
	93
	288
	238-260

4.4.6 Comparaison des températures statiques et dynamiques

Dans le tableau 4.15 nous présentons les résultats de la température obtenus à sec et lors du procédé optimal (pour le réglage indiqué au tableau 4.14, la température de la buse est 238 deg.C) au bout de la buse et au cône renversé. Comme nous pouvons l'observer sur ce tableau, la température obtenue au cône renversé avec le moule est plus élevée qu'avec le banc d'essai. De plus, cette température est encore plus élevée lors du procédé. Ceci est aussi vrai dans le cas de la température du bout de la buse, mais pas avec les mêmes proportions. Par conséquent, nous pouvons dire que les résultats du profil thermique à sec ne sont pas très concluent. L'existence du polymère fondu lors procédé augmente la température du cône renversé.

Tableau 4.15 : Comparaison des températures statique et dynamique (voir tableau 4.14 pour les conditions d'essai, la température de la buse est 238 deg.C)

	Banc d'essai [deg.C]	**Moule** [deg.C]	
	113.2	156.8	180 – 207
	206.1	214.0	233 – 241

4.5 Résultats des analyses thermiques

Il ressort de cet essai de DSC, que nous présentons à la figure 4.23, que la transition vitreuse se produit à une température de 48.6 deg.C, alors que les pics de fusion et de cristallisation sont obtenus respectivement à 260.5 deg.C et 228.1 deg.C. Ceci concorde avec la valeur de la température de fusion du Zytel donnée par le fournisseur, soit 260 deg.C.

D'autre part, l'essai du DSC fait à l'IRDI donne des résultats légèrement différents. En effet, ils observent la transition vitreuse à 49.4 deg.C, le pic de fusion à 261.5 deg.C et finalement de cristallisation à 233.0 deg.C. Alors que lors de l'essai du DMA, la température de ramollissement est observée à 237.0 deg.C.

La température de fusion obtenue au taux de chauffage de 30 deg.C/mn est plus élevée que celle obtenue au taux de chauffage de 10 deg.C/mn. Le contraire se produit avec la température de cristallisation (voir Tableau 4.16). Ce résultat s'accorde bien avec la littérature.

Tableau 4.16 : Résultats des essais de DSC

Taux [deg.C/mn]	10	30
Début de fusion [deg.C]	250.1	249.0
Pic de fusion [deg.C]	260.5	261.6
Fin de fusion [deg.C]	263.7	267.7
Chaleur latente fusion [J/g]	49.5	50.7
Début de cristallisation [deg.C]	223.8	225.2
Pic de cristallisation [deg.C]	228.1	218.9
Fin de cristallisation [deg.C]	232.3	211.9
Chaleur latente de cristallisation [J/g]	-44.0	-40.2

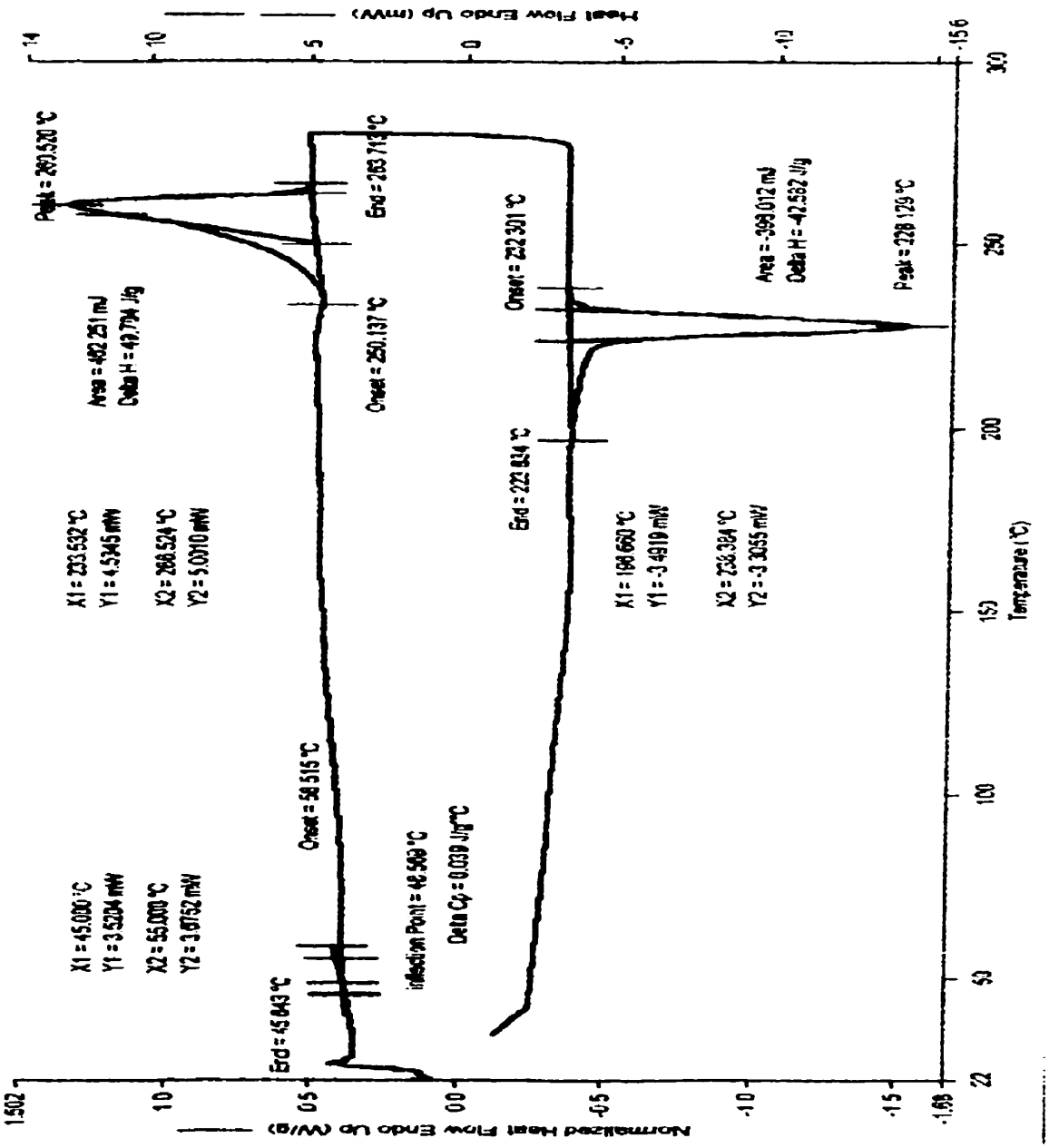


Figure 4.23: Résultat de l'essai de DSC en utilisant le Zytel 70G33L NC010 à un taux de 10 deg.C/mn

Dans le tableau 4.17, nous résumons les résultats des différents essais de profil thermique obtenus sur le banc d'essai avec les propriétés (comme elles sont données par les fabricants [29] et [30]) de chacun des matériaux choisis. À la lumière de ces résultats, nous pouvons conclure que dans le cas du Zytel et du Delrin, la température au cône renversé est très proche de la température de figeage. Alors que dans le cas du Lexan, la température au cône renversé est située entre la température Vicat et la température de figeage.

Tableau 4.17: Propriétés des matériaux versus la température au cône renversé à sec

Matériau	Température du moule (buse) [deg.C]	Température HDT @ 0.5 MPa [deg.C]	Température de ramollissement [deg.C]	Température de figeage [deg.C]	Température du cône reversé [deg.C]
Zytel 70G33L NC010	93.0 (288)	260.0	237 – 247.6	242.9	240.0
Delrin 100 NC010	90.0 (190.5)	169.0	-	160 – 170	169.8
Lexan 141R	82.2 (299.0)	137.8	154.5	195.0	181.9

4.6 Conclusions

À partir de ces résultats, nous pouvons conclure qu'un couple de serrage minimum est requis, dans le cas de la buse à obturation thermique, pour assurer une bonne étanchéité avec un transfert de chaleur optimal.

À l'issue de cette étude nous avons pu trouver que dans le cas de moulage du Zytel, lorsque la température au cône renversé est proche de la température de figeage, nous

obtenons des plaques de bonne qualité. Ce résultat est très intéressant, il reste donc à le vérifier avec d'autres matériaux de la même famille.

Cette étude nous a permis une meilleure compréhension de la variation de la température au cours du cycle. De plus, nous avons pu mettre en évidence l'importance de l'effet de la température de réglage de la buse sur la température au cône renversé. D'autre part, la température à l'extrémité de la buse est principalement affectée par la température de réglage du moule.

Par ailleurs, il résulte de cette étude que lorsque la température au cône renversé est proche de la température de figeage nous obtenons des plaques de bonne qualité (répond aux critères cités au paragraphe 3.7.1). Ce résultat est très important si on réussit à trouver que d'autres matériaux de la même famille se comportent de la même façon.

Par ailleurs, d'autres composantes du système à canaux chauds peuvent être étudiées en suivant le même cheminement.

CHAPITRE 5

ÉTUDE NUMÉRIQUE

5.1 Introduction

La conception de nouvelles composantes au sein d'un système à canaux chauds n'est pas souvent une étape facile. En effet, le concepteur doit faire intervenir de façon judicieuse ses connaissances et son expérience dans un processus itératif, où plusieurs prototypes sont fabriqués afin d'arriver au fonctionnement désiré de la composante, à savoir si le résultat obtenu est la solution optimale. Cette ancienne approche, dite "par essais et erreur", implique des coûts et nécessite des temps de conception considérables qui peuvent étouffer la survie du projet même. La simulation par la méthode des éléments finis est l'un des outils les plus puissants qui permet non seulement l'accélération des processus de design mais aussi l'optimisation de la solution finale.

L'objectif de ce chapitre est de proposer une démarche facile et rapide permettant d'accélérer le processus de design. Il s'agit d'obtenir le modèle auquel lorsqu'on applique les conditions aux limites, on obtient des résultats assez proches des résultats expérimentaux. Par conséquent, nous construisons un modèle pour le banc d'essai avec lequel nous faisons plusieurs simulations par éléments finis. Ensuite, nous validons la méthode en appliquant la même procédure dans le cas du moule.

5.2 Simulations par la méthode des éléments finis

Le choix judicieux du volume de contrôle est l'une des étapes les plus importantes dans la résolution de ce problème. Par conséquent, des essais préliminaires ont été réalisés

afin d'aboutir à la solution finale du choix du volume de contrôle. La façon la plus simple que nous avons trouvée consiste à tracer le volume de contrôle passant aux endroits où les conditions aux limités sont les données du problème (comme les températures de réglage). Ainsi, nous avons tracé un volume de contrôle qui passe par le centre des canaux de refroidissement (où nous disposons de la température de réglage). Quant au flux de chaleur développé par l'élément chauffant, il est appliqué au modèle en respectant les recommandations du fabricant (concernant sa façon d'enrouler le filament plus dense aux bords de l'élément chauffant plutôt qu'au centre ce qui permet une distribution uniforme de la température).

Par ailleurs, nous avons réalisé différents modèles, afin d'effectuer les analyses de ce problème. Dans un premier temps, nous avons un modèle en considérant que le cousin d'air existant entre les parties chaudes (distributeur, élément chauffant et corps de buse) et les parties froides (les plaques) agit comme du vide. Ensuite, nous avons estimé un coefficient équivalent de convection et une conductivité équivalente du coussin d'air en tenant compte de la convection et du rayonnement existants entre les parties chaudes et les différentes plaques. Un modèle est construit pour chaque cas. Dans le premier modèle, nous considérons la convection, avec le coefficient de film équivalent. Alors que dans le deuxième, nous avons considéré ce coussin d'air comme un matériau conducteur ayant la conductivité thermique estimée équivalente. La figure 5.1 donne un aperçu de ces deux modèles, ainsi que les conditions aux limites. Finalement, nous avons introduit une résistance de contact dans chacun de ces deux modèles.

En utilisant l'axisymétrie de la région à modéliser, nous avons réalisé des modèles 2 D. Nous avons utilisé un élément harmonique 2 D à quatre nœuds pour le maillage, la température étant le degré de liberté à chaque nœud. De plus, nous avons maintenu le régime permanent au cours de toutes les simulations.

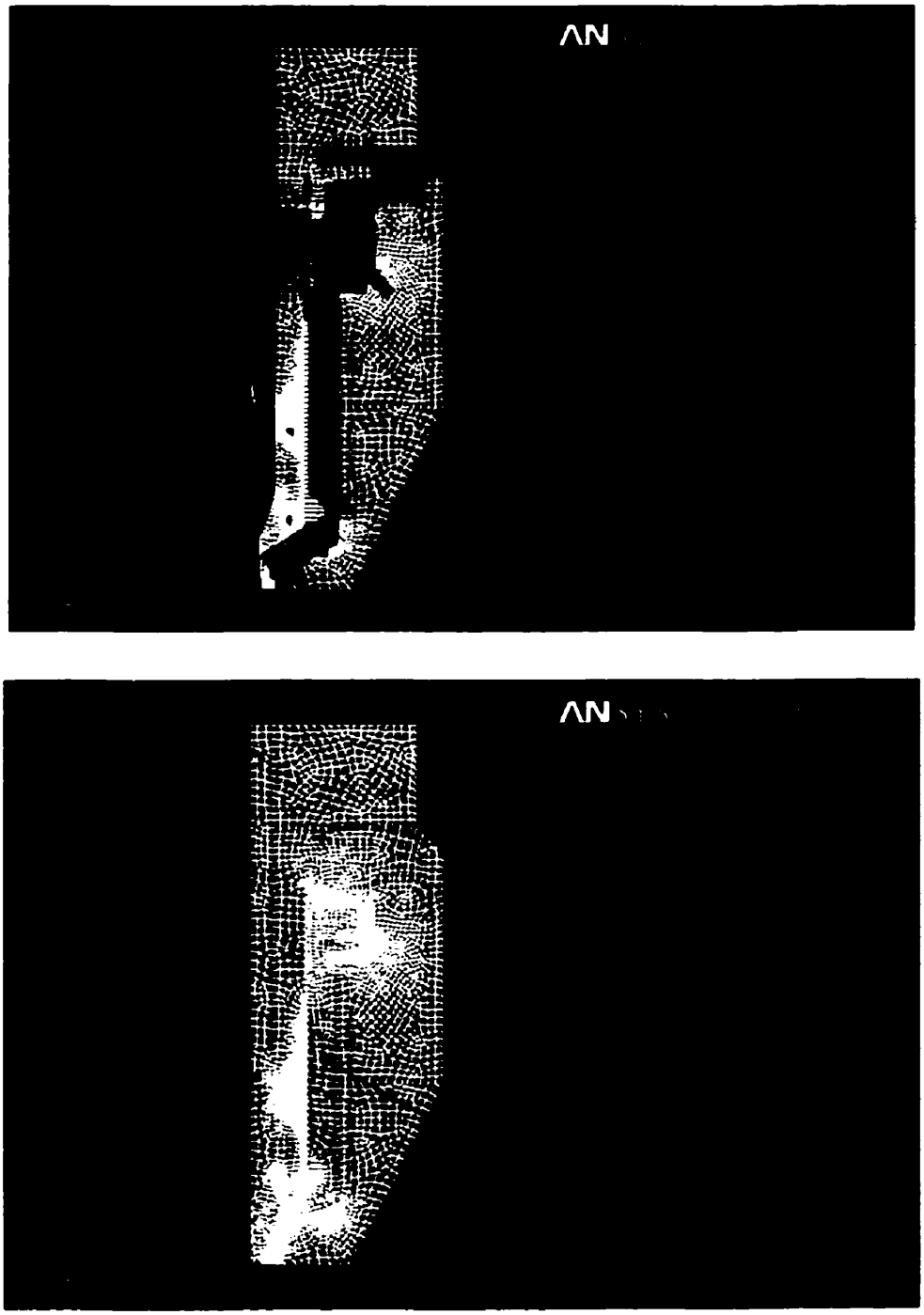


Figure 5.1 : Modèle avec les conditions aux limites utilisées lors des simulations, le modèle de convection est présenté en haut, alors que le modèle de conduction est celui présenté en bas

5.2.1 Comparaison des simulations aux résultats expérimentaux

Puisque notre objectif est d'obtenir des résultats avec le banc d'essai qui seront par la suite utilisés dans les étapes de conception ou dans le développement de nouveaux systèmes à canaux chauds, nous allons commencer par une série d'essais en utilisant le banc d'essai et ensuite nous ferons quelques analyses avec le moule. On se réfère au tableau 5.1 pour la liste des essais qui vont être réalisés au cours de cette étude numérique.

Tableau 5.1 : Températures de réglage des différents essais de profil thermique

BANC D'ESSAI						
Numéro de l'essai	Buse (TS)	Matériau	Température [deg.C]			
			Cheminée d'injection	Distributeur	Buse	Moule
1		Delrin 100NC010	-	190.5	190.5	90
2	Standard pour cristalline	Zytel 70G33L NC010	-	288	238	93
3			-	288	288	93
4	Buse modifiée		-	288	288	93
5	Standard pour Amorphes	Lexan 141	-	299	299	82
MOULE						
Numéro de l'essai	Buse (TS)	Matériau	Température [deg.C]			
			Cheminée d'injection	Distributeur	Buse	Moule
6	Standard pour cristalline	Zytel 70G33L NC010	288	288	288	93
7	Buse modifiée		288	288	288	93

5.2.1.1 Cas du banc d'essai

Les résultats de l'analyse avec le modèle primaire, dans lequel nous avons ignoré les pertes de chaleur par convection et par radiation, ne sont pas concluant. De larges écarts

sont obtenus entre les résultats expérimentaux et les résultats numériques. La figure 5.2 illustre la différence entre ces résultats.

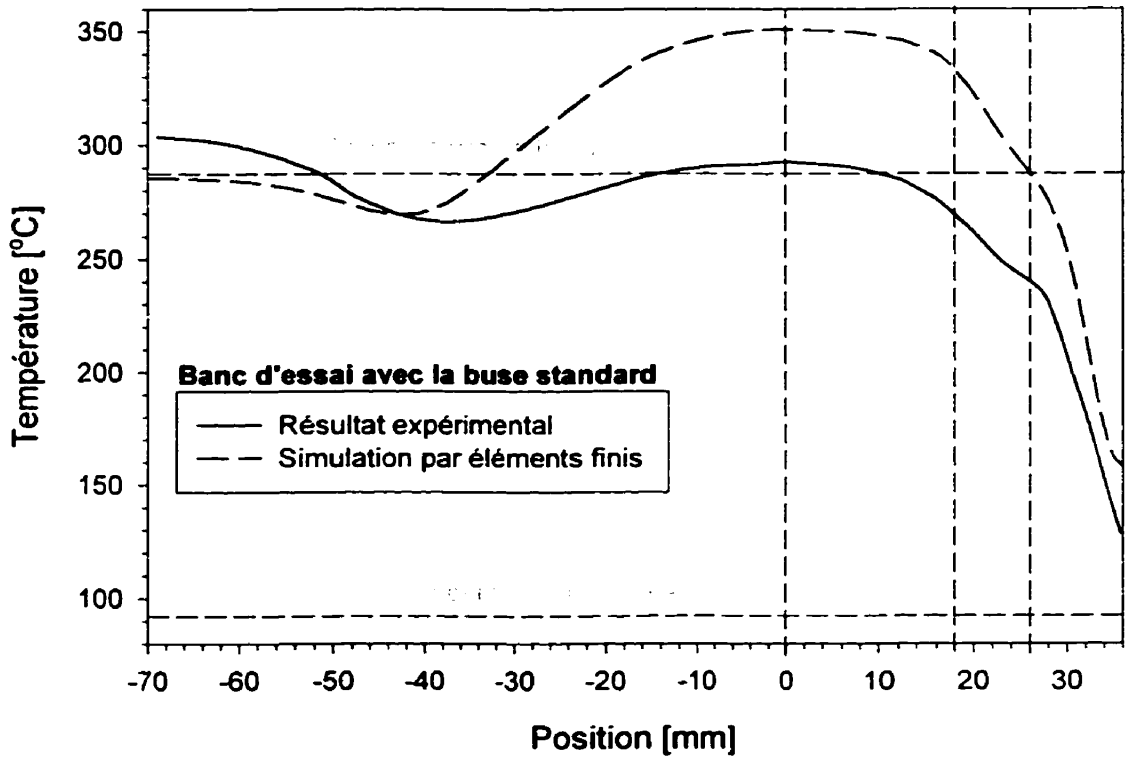


Figure 5.2: Comparaison du résultat de la simulation avec le modèle primaire au résultat expérimental obtenu avec le banc d'essai en réglant la température du moule à 93 deg.C, la température de la buse et celle du distributeur à 288 deg.C

L'observation des résultats de cette simulation confirme l'importance des pertes de chaleur par convection et par radiation. Par conséquent, nous avons estimé les pertes de

chaleur par convection et par radiation. La quantité d'énergie nette [31] transférée par radiation entre deux surfaces face à face est donnée par l'équation 5.1.

$$q' = \frac{2\pi D_i \sigma (T_i^4 - T_b^4)}{\frac{1}{\varepsilon_i} + \frac{1-\varepsilon_o}{\varepsilon_o}(D_o / D_i)^4} \qquad (5.1)$$

La convection naturelle dans un espace annulaire entre deux longs cylindres [31] crée deux boucles symétriques par rapport à l'axe vertical du milieu des deux cylindres. La quantité de chaleur par unité de longueur [32] est obtenue par la résolution des équations 5.2 à 5.6.

$$q' = \frac{2\pi K_{eff}}{\ln(D_o - D_i)} \qquad (5.2)$$

$$\frac{K_{eff}}{k} = 0.386\left(\frac{\Pr}{0.861 + \Pr}\right)^{1/4} (R_{ac}^{*})^{1/4} \qquad (5.3)$$

$$R_{ac}^{*} = \frac{\ln(D_o - D_i)^4}{L^3 (D_i^{-3/5} + D_o^{-3/5})} R_{al} \qquad (5.4)$$

$$L = (D_o - D_i)/2 \qquad (5.5)$$

$$R_{al} = g\beta \frac{(T_i - T_b)}{\nu\alpha} L^3 \qquad (5.6)$$

Après compilation des valeurs fixées dans le tableau 5.2, nous trouvons que la quantité de chaleur par unité de longueur, perdue par radiation est égale à 31 W/m, alors que celle perdue par convection est égale à 84 W/m. Nous pouvons remarquer que la

puissance perdue par radiation est presque le tiers de celle perdue par convection. La puissance totale perdue par l'élément chauffant (le long du corps de la buse) est estimée à 8 W. Ainsi, nous avons déterminé une conductivité équivalente et un coefficient équivalent de convection.

Tableau 5.2 : Paramètres de calcul de transfert de chaleur

[illegible]	5.673e-8 W/m^2K^4
[illegible]	0.1
[illegible]	0.6
[illegible]	93 deg.C
[illegible]	288.0 deg.C
[illegible]	288.0 deg.C
[illegible]	27 deg.C
[illegible]	0.6866
[illegible]	2.22e-3 K^{-1}
[illegible]	47.2e-6 m^2/s
[illegible]	37.3 W/m.K
[illegible]	32.39e-6 m^2/s
[illegible]	9.81 m/s^2

En introduisant la valeur correspondante à chaque modèle, nous avons obtenu de cette manière les résultats présentés à la figure 5.3. Comme nous pouvons l'observer, les résultats de ces deux modèles sont très concluants. On obtient des résultats avec une erreur inférieure à 4 % le long de la buse (de 0 à 30 mm). Par contre, l'écart est plus élevé le long de la zone entre – 70 et 0 mm. Puisque nous nous intéressons surtout à la première zone, nous nous satisfaisons des résultats de ces deux modèles.

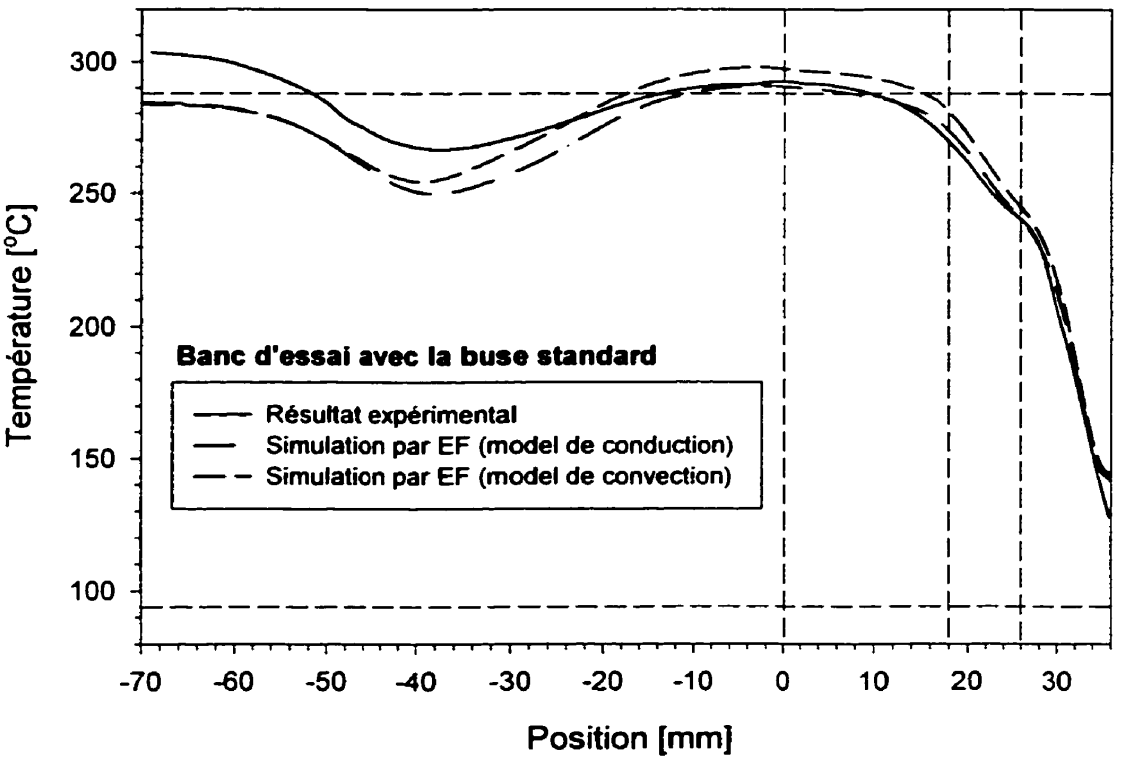


Figure 5.3 : Comparaison des résultats des simulations (obtenus par chacun des deux modèles) au profil thermique expérimental obtenu avec le banc d'essai en réglant la température du moule à 93 deg.C, la température de la buse et celle du distributeur à 288 deg.C

Comme nous l'avons mentionné au deuxième chapitre, l'existence d'une résistance de contact affecte le profil thermique. Par conséquent, nous avons introduit une résistance de contact dans chacun des deux modèles et ainsi nous avons obtenu les résultats présentés à la figure 5.4.

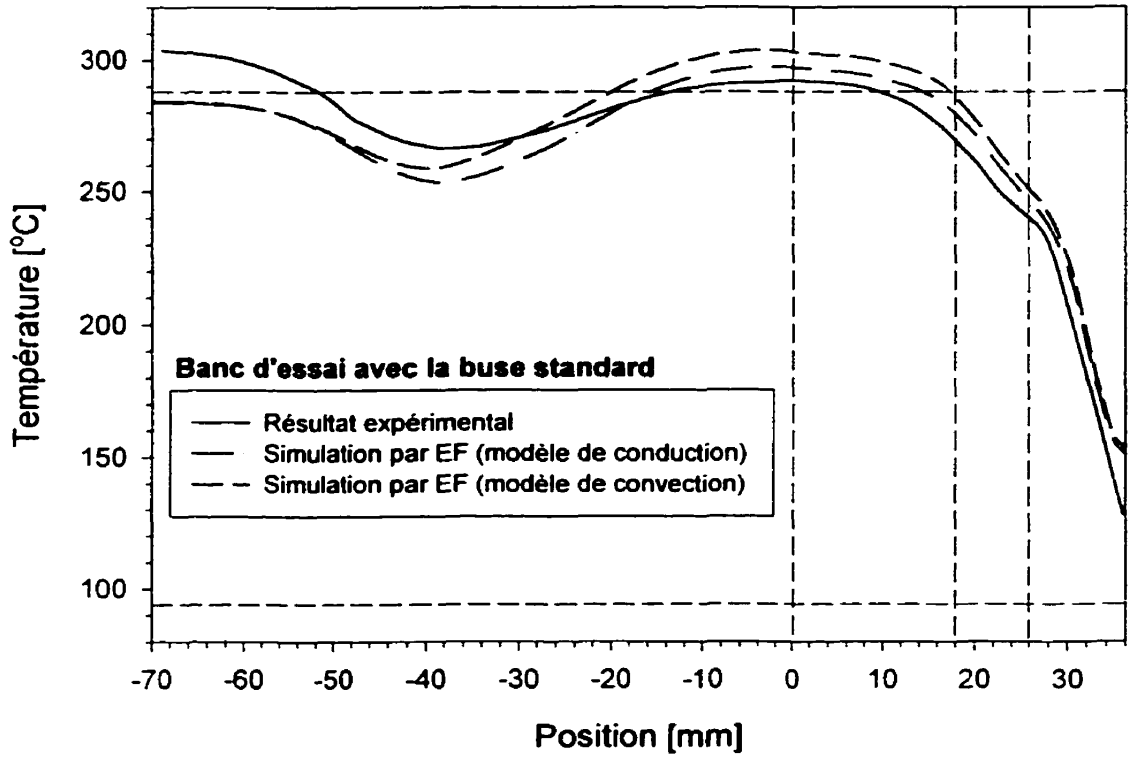


Figure 5.4 : Simulation obtenue par les modèles avec la résistance de contact comparé au résultat expérimental du profil thermique obtenu avec le banc d'essai en réglant la température du moule à 93 deg.C, la température de la buse et celle du distributeur à 288 deg.C

Il ressort de cet essai que l'introduction d'une résistance de contact dans le modèle n'a pas amélioré les résultats, au contraire, il les a éloignés des résultats expérimentaux. Ceci vient du fait que dans un tel cas, nous pouvons probablement considérer que le contact est parfait, au lieu de compliquer le modèle.

Tableau 5.3 : Comparaison de résultats (réglage no 3, Table 5.1)

Position	Buse	Insert
Valeurs expérimentales	139.5 – 143.8	115.8 – 117.0
Simulation (conduction) [deg.C]	137.6	116.5
Simulation (convection) [deg.C]	138.4	117.1

D'un autre coté, deux trous ont été percés afin de mesurer la température en deux points de part et d'autres de la surface de contact entre la buse et l'insert (voir figure 5.5 pour les positions de mesures). Les résultats de ces mesures sont présentés dans le tableau 5.3 avec ceux obtenus des modèles sans résistance de contact. L'observation de ces résultats nous confirme que les deux modèles, sans résistance de contact, sont assez précis.

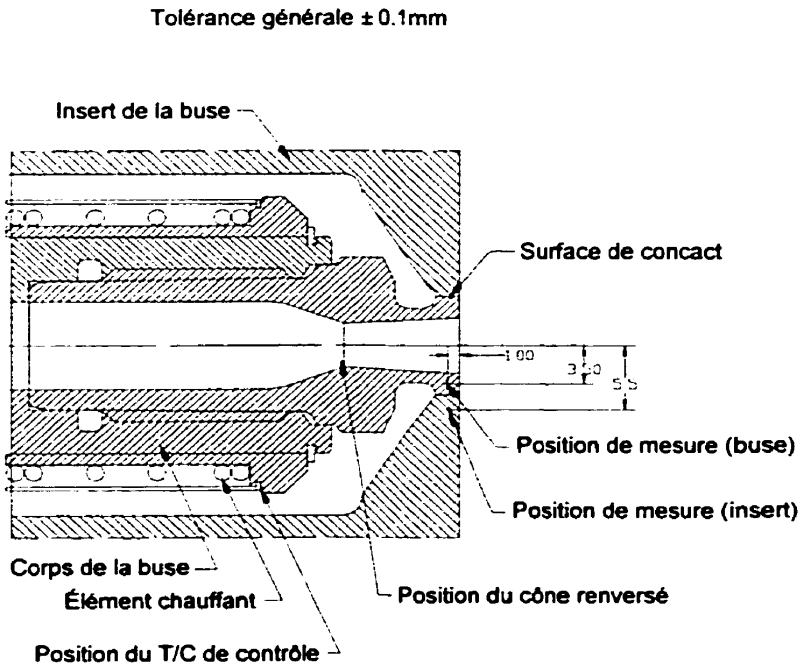


Figure 5.5 : Positions des points de mesure de part et d'autre de la surface de contact entre la buse et le corps de la buse du banc d'essai

Pour résumer, nous avons rassemblé les résultats des différents modèles à cinq positions dans le tableau 5.4. Il s'agit de la température à la position du thermocouple qui sert à contrôler la température de l'élément chauffant de la buse et des quatre positions le long de la buse utilisées précédemment.

Tableau 5.4 : Comparaison des résultats obtenus avec les différents modèles

	Position [mm]	T/C	0.2	18.0	26.0	35.8
	Résultats expérimentaux	288.0	292.5	269.3	240.0	127.6
Simulation	Pertes de chaleur ignorées	342.2	350.8	332.1	287.9	157.5
	Conduction de l'air (sans résistance de contact)	280.0	290.6	273.1	239.8	141.5
	Convection de l'air (sans résistance de contact)	288.1	297.3	280.2	244.6	143.3
	Conduction de l'air (Avec résistance de contact)	287.2	297.2	279.3	246.6	151.0
	Convection l'air (Avec résistance de contact)	294.8	303.3	285.9	250.9	153.0

L'observation de ce tableau permet d'acquérir une bonne confiance dans les résultats des simulations avec les deux modèles de conduction et de convection sans résistance de contact. Par ailleurs, il faut noter l'existence d'une légère erreur de chacun des deux modèles. Il reste donc, à l'étape suivante, de soumettre les deux modèles à d'autres réglages de température.

Tableau 5.5 : Comparaison des résultats de température (réglage no 4, Table 5.1)

	Position [mm]	T/C	0.2	18.0	26.0	35.8
	Résultats expérimentaux	288.0	291.9	270.6	241.9	133.5
Simulation	Conduction de l'air (sans résistance de contact)	283.7	293.2	277.9	247.5	155.7
	Convection de l'air (sans résistance de contact)	291.7	299.7	285.1	252.7	158.2

Les modèles répondent avec une bonne précision avec la buse modifiée. Nous pouvons observer à la figure 5.6 que le modèle de conduction est plus proche de la courbe expérimentale, mais le modèle de conduction donne une meilleure précision au niveau de la position du thermocouple de contrôle, comme nous pouvons l'observer dans le tableau 5.5 montré précédemment.

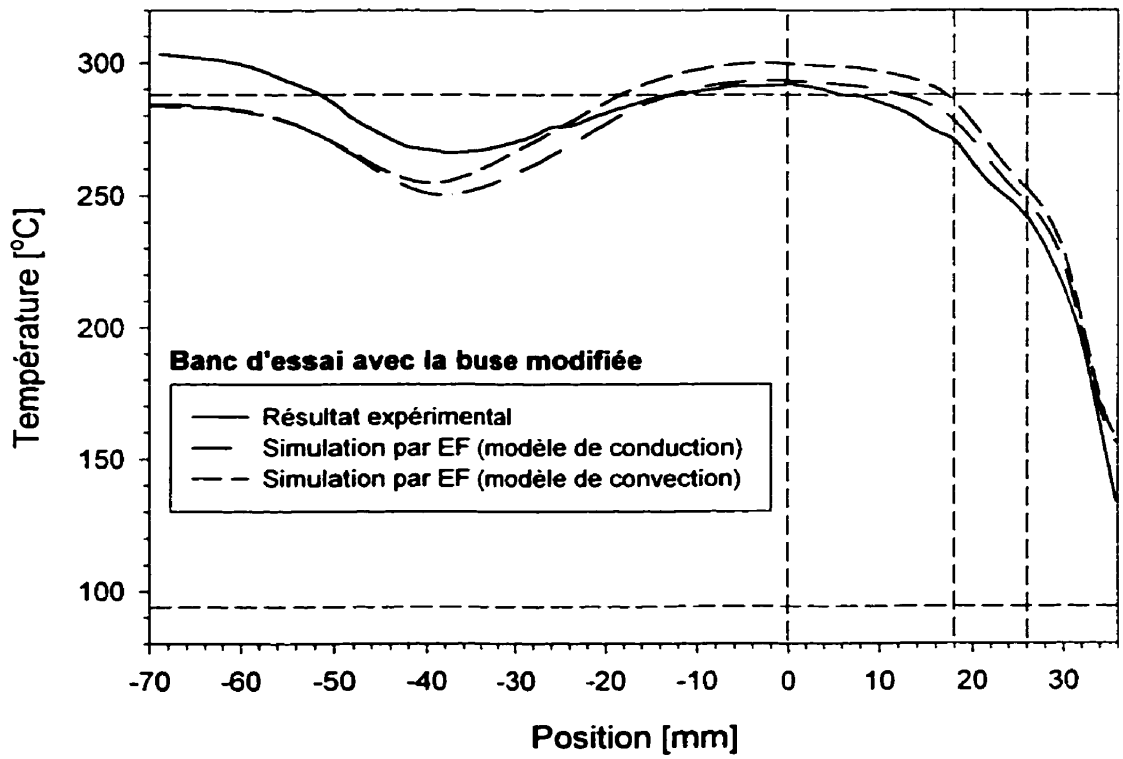


Figure 5.6 : Comparaison des résultats des simulations au profil thermique expérimental obtenu en utilisant le banc d'essai avec la buse modifiée. Ceci en réglant la température du moule à 93 deg.C, la température de la buse et celle du distributeur à 288 deg.C

Dans le cas du réglage pour l'acétal, les courbes obtenues des simulations avec les deux modèles suivent très bien la courbe expérimentale du profil thermique le long de la buse, comme nous pouvons le voir à la figure 5.7. Mais, il y a toujours un écart entre les résultats numériques et les valeurs expérimentales de l'extrémité de la buse (position 0 mm) jusqu'au distributeur (position – 70 mm). En effet, il est important de clarifier l'origine de cet écart. Cet écart provient des hypothèses posées sur les conditions aux limites du côté du distributeur, en négligeant le flux de chaleur provenant des éléments chauffants du distributeur. De plus, l'écart que nous observons toujours de l'autre extrémité de la buse (à la position 36 mm) provient de l'application d'une température constante le long de l'insert, alors qu'en réalité la température est plus basse en s'approchant de cette position, étant donné que la face de l'insert et soumise à l'air ambiant.

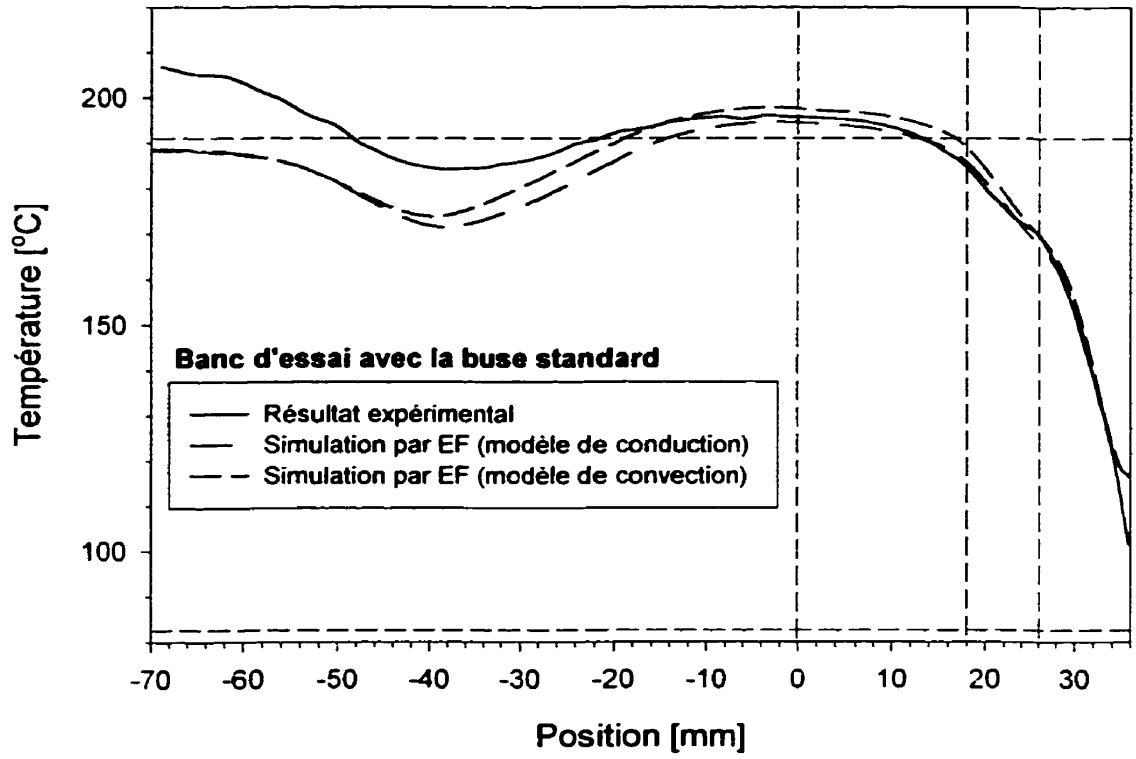


Figure 5.7 : Comparaison du résultat expérimental du profil thermique aux résultats numériques obtenus avec le banc d'essai en réglant la température du moule à 90 degC, la température de la buse et celle du distributeur à 190,5 deg.C pour l'Acétal (Delrin 100NC010)

Par ailleurs, suite à l'optimisation du procédé d'injection avec le Nylon 6,6 chargé de 33 % de fibre de verre, nous avons réalisé une simulation avec les températures de réglage obtenues. Comme nous pouvons observer à la figure 5.8, les deux modèles répondent toujours de la même façon avec une précision inférieure à 1 % à la position du cône renversé. Ainsi, les modèles montrent encore une fois la bonne concordance entre

les résultats numériques et les résultats expérimentaux du profil thermique. Il sera donc intéressant de vérifier la réponse de ces deux modèles avec la buse des amorphes ayant une géométrie différente de celle de la buse pour les semi-cristallins.

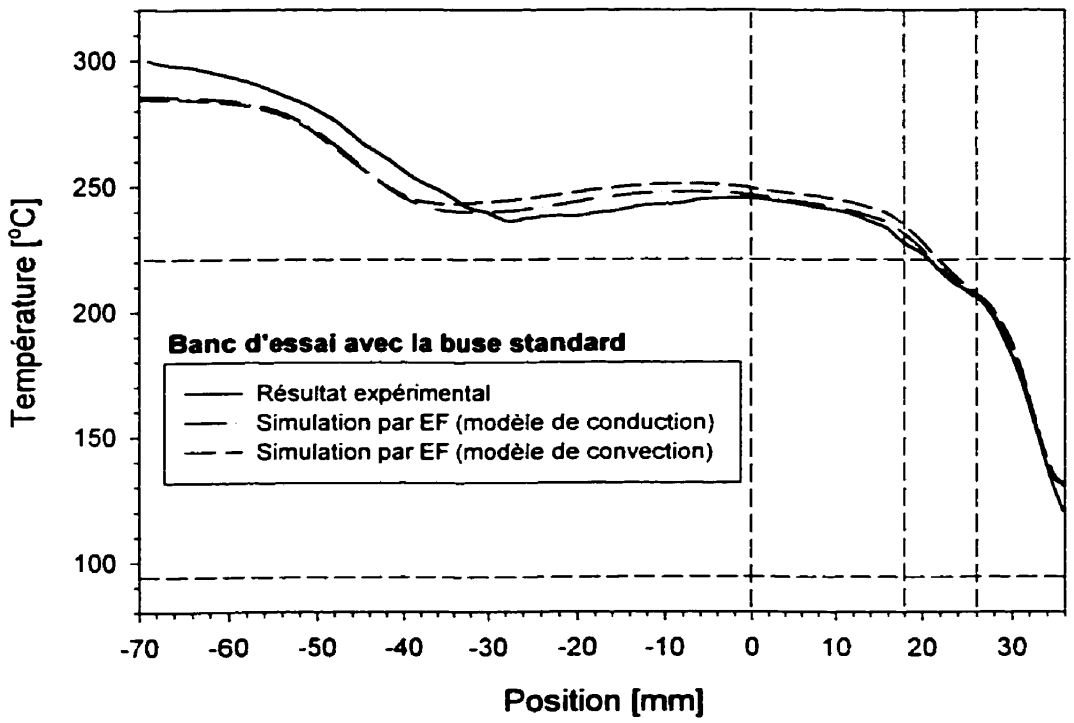


Figure 5.8 : Comparaison du résultat expérimental du profil thermique aux résultats numériques obtenus avec le banc d'essai en réglant la température du moule à 93 deg.C, la température de la buse à 238 deg.C et celle du distributeur à 288 deg.C pour le Nylon chargé de fibres de verre (Zytel 70G33L NC010)

En observant la figure 5.9, nous remarquons un certain écart entre les résultats des simulations et ceux obtenus expérimentalement. Cela vient probablement de l'erreur de lecture de la puissance fournie par l'élément chauffant de la buse. Sauf que la valeur de la température au cône renversé (à la position 31 mm) est obtenue avec une précision de l'ordre de 5 %. Il faut ajouter que nous avons réalisé cet essai avec un insert ayant une surface de contact de 2 mm de hauteur, alors que la surface du bout de cette buse est 3 mm de hauteur. Par conséquent, nous suggérons de reprendre cet essai avant de tirer des conclusions concernant la fiabilité des modèles.

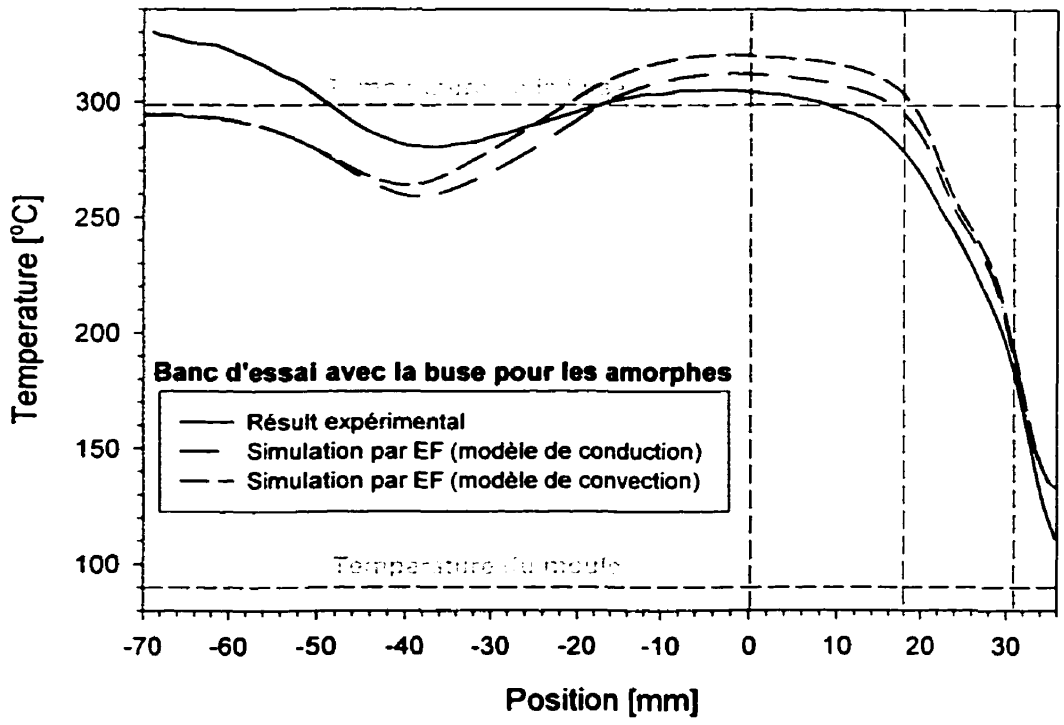


Figure 5.9 : Résultats des simulations avec le banc d'essai en utilisant la buse pour les amorphes. L'essai est réalisé à une température de moule de 82 deg.C, la buse et le distributeur étant maintenus à la même température de 299 deg.C

Il reste maintenant à traiter le cas du moule, à savoir si la même procédure que nous avons appliquée dans le cas du banc d'essai fonctionnera encore avec précision dans le cas du moule.

5.2.1.2 Cas du moule

Dans le cas du moule, les modèles sont ajustés en tenant compte de certaines différences existant entre le moule et le banc d'essai, au niveau du système de refroidissement. Ainsi, nous avons réalisé une simulation avec la buse standard et ensuite une simulation avec le buse modifiée. Quant à la simulation avec la buse standard pour les semi-cristallins, nous avons obtenu des résultats très concluants, comme nous pouvons l'observer à la figure 5.10. Les modèles donnent des résultats assez précises. En effet, nous obtenons une précision générale inférieure à 4 % avec les différents modèles, en comparant le résultat numérique du profil thermique aux résultats expérimentaux. De plus, les résultats correspondent non seulement du côté de la buse, mais aussi du côté du distributeur. Ainsi donc, nous allons vérifier l'effet de réduire la surface de contact entre la buse et l'insert.

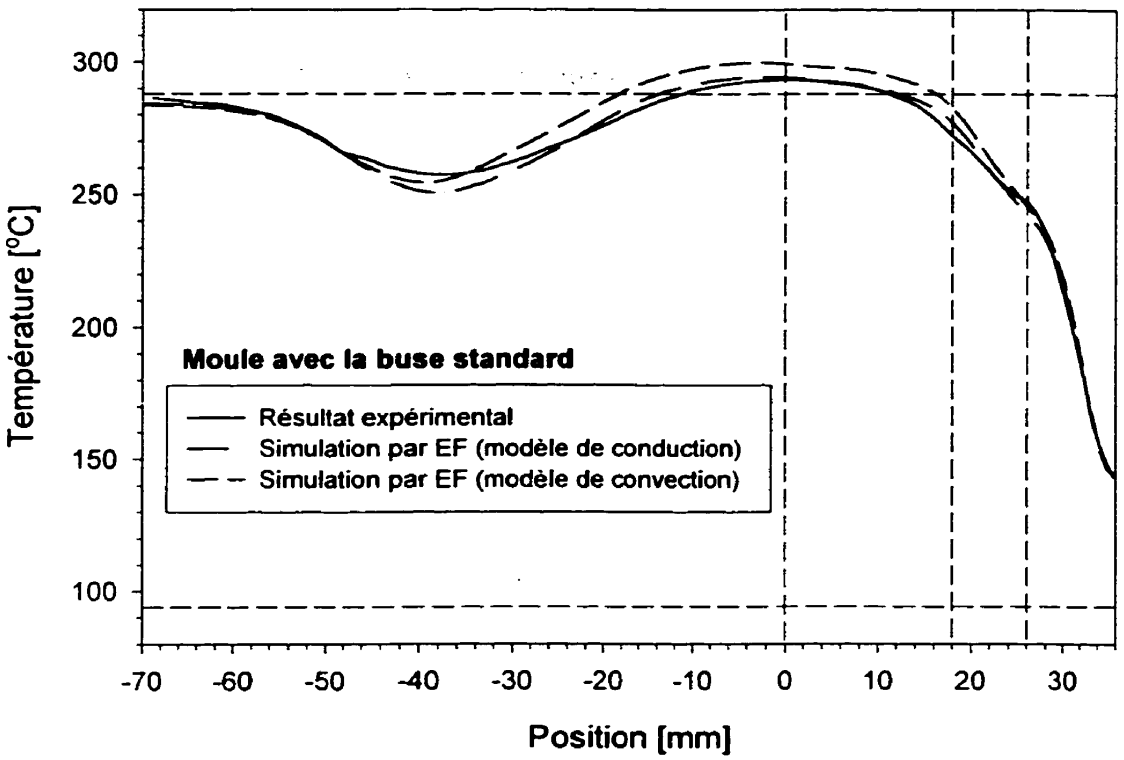


Figure 5.10 : Résultats des simulations dans le cas du moule en réglant la température du moule à 93 deg.C, la température de la cheminée d'injection, du distributeur et de la buse à 288 deg.C (la résistance de contact est ignorée dans ces modèles)

En observant les résultats obtenus avec de la buse modifiée, nous notons une légère erreur semblable à celle trouvée précédemment dans le cas de banc d'essai. Il est important de remarquer que lors des simulations (montrées à la figure 5.11) dans le cas de cette buse, comparé au cas de la buse standard, nous obtenons un écart plus élevé de

la courbe obtenue avec le modèle de conduction par rapport aux courbes expérimentales. Ceci nous réconforte dans le sens de la stabilité du modèle de convection.

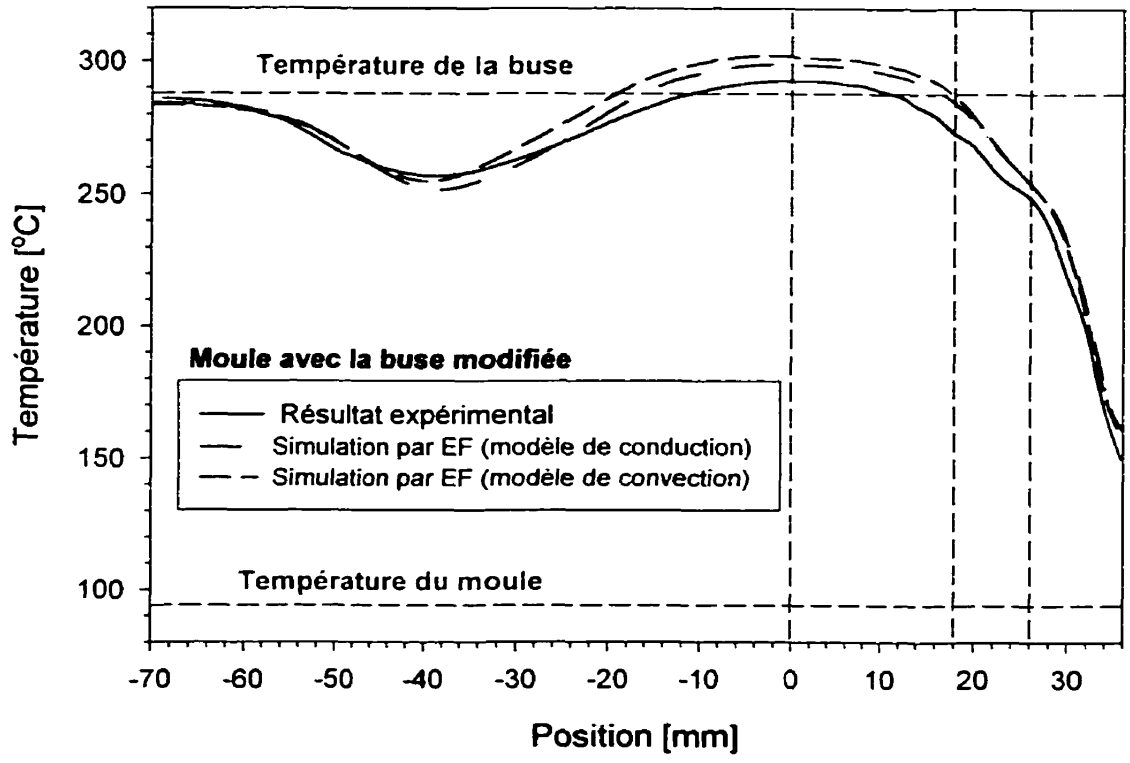


Figure 5.11: Résultats des simulations dans le cas du moule avec la buse modifiée en réglant la température du moule à 93 deg.C, la température de la cheminée d'injection, du distributeur et de la buse à 288 deg.C (la résistance de contact est ignorée dans ces modèles)

Avant de conclure sur les réponses de ces deux modèles nous avons rassemblé les résultats en cinq différents points dans le tableau 5.6, afin de comparer leurs réponses.

Tableau 5.6 : Comparaison des résultats obtenus dans le cas du moule

Position [mm]			T/C	0.2	18.0	26.0	35.8
Buse standard	Résultats expérimentaux		288.0	293.6	272.0	247.1	143.2
	Simulation	Conduction	283.2	294.0	276.8	242.8	143.4
		Convection	289.9	299.2	282.1	245.9	144.6
Buse modifiée	Résultats expérimentaux		288.0	292.2	272.8	248.8	149.8
	Simulation	Conduction	290.2	298.9	284.7	254.5	160.6
		Convection	293.6	301.6	287.1	254.3	159.5

L'observation de ce tableau montre encore une fois que le modèle de convection donne une bonne précision aussi bien à la position du cône renversé qu'à la position du thermocouple de contrôle.

5.2.1.3 Effet des paramètres géométriques

Comme nous pouvons le constater, au cours de cette série de simulation, en plus de valider le modèle, nous avons varié certains paramètres géométriques. Il ressort de ces essais que l'effet de la diminution de la surface de contact entre la buse et l'insert est très faible sur la température au cône renversé. Alors que la position du cône renversé est très déterminant quant à sa température comme nous pouvons le constater en observant la figure 10.12. En effet, la température est distribuée par zones, le long de la buse.

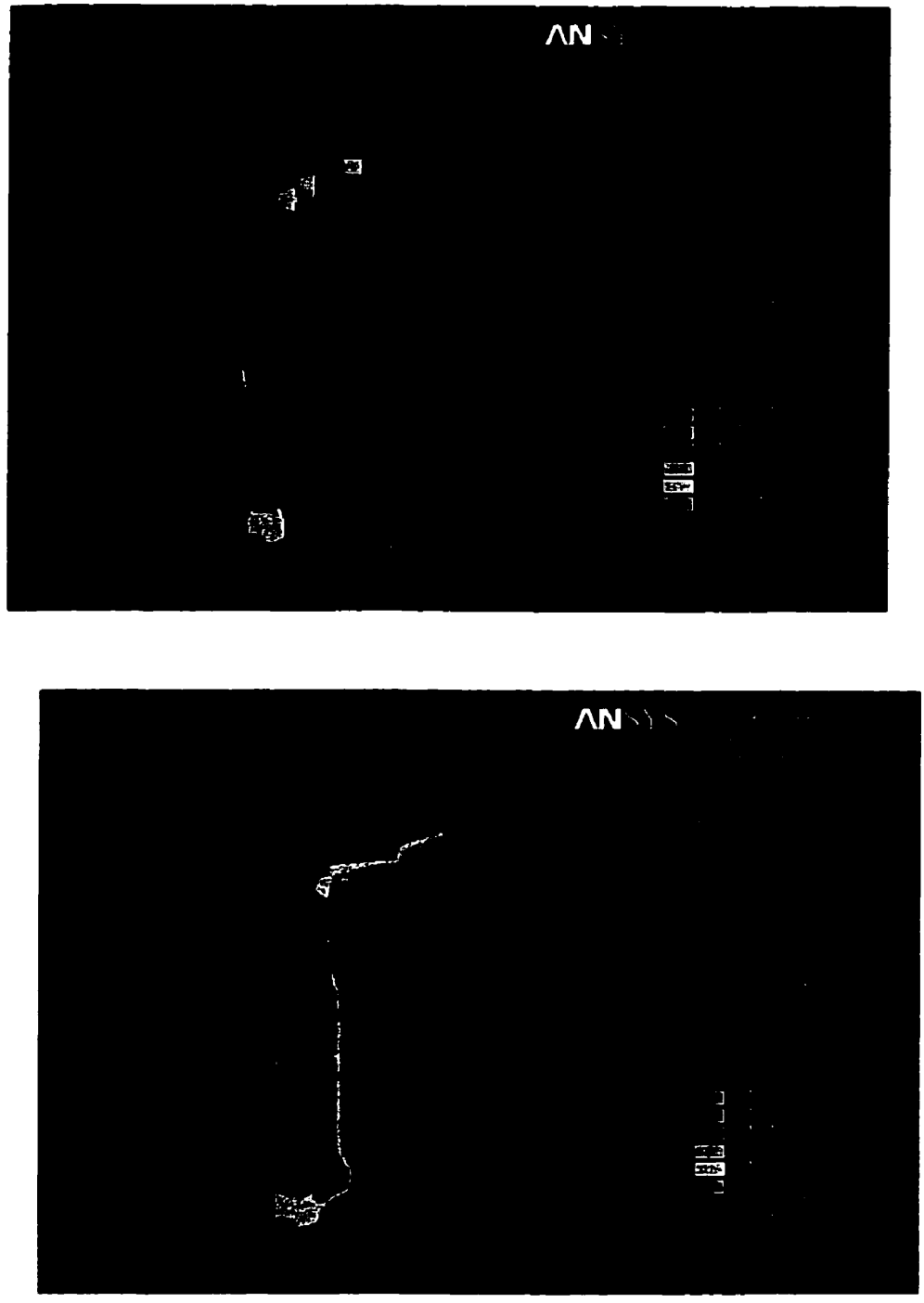


Figure 5.12 : Comparaison des résultats des simulations obtenus avec le banc d'essai en réglant la température du moule à 93 deg.C, la température de la buse et celle du distributeur à 288 deg.C

Par ailleurs, l'observation du tableau 5.7 montre bien l'influence de la position du cône renversé sur la température à ce point. Ceci en comparant le résultat du premier à celui du quatrième réglage. De plus, l'effet de la température de réglage de la buse sur la température du cône renversé peut aussi être mis en évidence en comparant les résultats du deuxième et du troisième réglage.

Tableau 5.7 : Résultats des différents réglages dans le cas du banc d'essai

	Position [mm]	T/C	0.2	18.0	26.0	35.8
Résultat expérimentale (réglage no 1)		190.5	195.7	184.6	169.8	101.5
Simulation	Modèle de conduction [deg.C]	189.0	194.5	185.6	167.8	115.6
	Modèle de convection [deg.C]	192.8	197.5	188.8	169.8	116.3
Résultat expérimentale (réglage no 2)		238.8	245.4	227.3	206.3	120.1
Simulation	Modèle de conduction [deg.C]	235.8	246.3	231.1	205.2	130.0
	Modèle de convection [deg.C]	240.0	249.1	234.2	207.2	130.8
Résultat expérimentale (réglage no 3)		288.0	292.5	269.3	240.0	127.6
Simulation	Modèle de conduction [deg.C]	280.0	290.6	273.1	239.8	141.5
	Modèle de convection [deg.C]	288.1	297.3	280.2	244.6	143.3
Résultat expérimentale (réglage no 4)		288.0	291.9	270.6	241.9	133.5
Simulation	Modèle de conduction [deg.C]	283.7	293.2	277.9	247.5	155.7
	Modèle de convection [deg.C]	291.7	299.7	285.1	252.7	158.2
	Position [mm]	T/C	0.2	18.0	31.0	35.8
Résultat expérimentale (réglage no 5)		299.0	304.3	278.2	181.9	111.0
Simulation	Modèle de conduction [deg.C]	300.0	312.1	304.9	190.6	133.3
	Modèle de convection [deg.C]	310.2	319.9	303.5	192.9	133.8

5.3 Conclusions

Tout d'abord, il important de noter que nous avons réussi à réaliser un modèle très simple, auquel il suffit d'appliquer les charges afin d'obtenir des résultats assez précis. Ainsi donc, nous retenons le modèle de convection étant donné que ce modèle donne des résultats aussi bien précis à la position du cône renversé qu'à la position du thermocouple contrôlant la température de la buse. Par conséquent, ce modèle sera un excellent choix pour optimiser le design de la buse. Il suffit d'appliquer la puissance nécessaire sur l'élément chauffant afin d'obtenir la température désirée à la position du thermocouple de contrôle ainsi qu'à la position du cône renversé.

D'ailleurs, il ressort de ces résultats que, comme avec le banc d'essai, avec le moule le profil thermique est correctement simulé par la méthode des éléments finis. Malgré, le manque de précision du côté du distributeur dans le cas du banc d'essai, nous avons toujours obtenu une précision acceptable à la position du cône renversé.

Ces résultats concordent bien avec ce que nous avons constaté lors des essais de moulage. La température au cône renversé est fortement influencée par la température de réglage de la buse. Par ailleurs, il reste à vérifier l'effet de la position du cône renversé qui semble très influente lors des simulations.

CONCLUSION

Cette étude a permis de répondre à plusieurs questions concernant le design des buses à obturation thermique. L'absence d'information dans la littérature à ce sujet nous a poussé à développer une procédure expérimentale originale. Cette méthodologie permet une meilleure compréhension de la géométrie sur le comportement thermique de la buse. Afin de valider cette procédure nous avons étudié trois matériaux, dont un avec lequel nous avons moulé des plaques.

Premièrement, nous avons pu montrer qu'à partir de 40.7 Nm, le couple de serrage n'a plus d'effet sur le profil thermique. En plus de maintenir un transfert de chaleur optimale, ce couple assure une bonne étanchéité. Par ailleurs, nous avons pu montrer que l'augmentation de la rugosité et des tolérances de fabrication augmente la résistance de contact réduisant ainsi le transfert de chaleur. Par conséquent, l'efficacité du système sera diminuée par la réduction de la largeur de la fenêtre de fonctionnement.

Par ailleurs, nous avons trouvé que le banc d'essai permet d'obtenir une idée sur l'allure générale du profil thermique que nous pouvons obtenir avec le moule avec une précision qui dépend de l'écart entre les températures de réglage (T_{buse}, T_{moule}). Plus l'écart est grand plus la précision est faible. Par ailleurs, les résultats obtenus par la technique de profil thermique sont très prometteurs. Les effets d'autres paramètres géométriques comme la position de l'étranglement thermique (Heat choke) et du T/C de contrôle sur le profil thermique peuvent être étudiés à l'aide de cette technique.

Les résultats de l'étude numérique sont très satisfaisants. Nous avons pu construire un modèle très simple et facile à utiliser. De plus, les simulations avec ce modèle nous ont permis une meilleure compréhension de la distribution de la température le long de la buse. Dans une prochaine étape, il suffira d'appliquer les conditions nécessaires sur la

température de la buse et la température du thermocouple de contrôle de la température de la buse pour optimiser la géométrie de la buse.

Ainsi nous recommandons fortement de continuer ce travail en considérant les points suivants :

- réviser l'usage du thermocouple à rondelle T/C-J-W surtout lors de l'injection des matériaux thermosensibles afin d'éviter leur dégradation avec un contrôle précis de température;
- utiliser un thermocouple plus fin pour contrôler la température de la buse (T/C-J-2 ou T/C-K-2 au lieu de T/C-J-3);
- respecter les tolérances de fabrication;
- prendre les précautions nécessaires afin ne pas endommager les surfaces fonctionnelles de contact (dont la fonction est d'assurer un excellent transfert thermique);
- nous recommandons de concevoir un autre banc d'essai que reflète plus fidèlement le comportement de cette catégorie de moule (ayant un système de canaux chauds fermé, un système de refroidissement annulaire pour la buse...);
- faire des simulations dynamiques en remplaçant l'air dans les canaux d'écoulement par le matériau plastique à injecter. Ceci permettra de comparer les résultats numériques avec les résultats expérimentaux. Ainsi, le modèle numérique final sera l'outil de design, une fois valider;
- la deuxième carte DBK 17 peut être utilisée pour un capteur de pression monté sur la buse de la machine dans des travaux futurs. Ceci permettra en utilisant le capteur installé dans la cavité en face du seuil d'injection de faire l'acquisition simultanée des deux pressions et d'analyser l'effet des différents paramètres sur la chute de pression dans le système à canaux chauds. De plus la carte DBK 19 permet la connexion de 14 thermocouples en même temps. Par conséquent, d'autres thermocouples peuvent être installés pour plus de points de lecture.

- reprendre cette méthodologie en reprenant des essais réalisés avec le Zytel avec le Nylon 6, le PBT et le Valox afin d'obtenir le modèle final de l'outil de design en établissant la relation entre la température au cône renversé et le HDT, la température de figeage ou la température Vicat;
- utiliser le module d'optimisation de Ansys pour optimiser la géométrie de la buse.

RÉFÉRENCES

1. Ress, Herbert. (1995). Mold Engineering. Hanser/Gardner Publications, Inc. New York, 133, 511.

2. Carsten Buchadt, Jan Hellesskov Jensen and Carsten L. Lauridsen. (1999). Experimental Examination of Temperature Variation in a hot runner System. 55th Annual technical Conference of the society of plastics Engineers in Toronto, Journal of reinforced Plastics and composites Vol. 18, No 01, 44-54.

3. Husky Injection Molding Systems Ltd. (01/97). Manuel Technique: Canaux Chauds. Bolton, Ontario: la Cie,.pagination multiple. Catalogue industriel.

4. Gerd, Pötsch, and Walter, Michaeli. (1995). Injection Molding, an Introduction. Hanser/Gardner Publication, Inc., 94.

5. J. Li and H.Hagelstien. (3/1997). Wear-Resistant Hot Runner Systems for Engineering Plastics: Resistance to Abrasive Fillers and Aggressive Additives. Translated from Kunststoffe plast europe, 87, 332-336.

6. K. Gauler. (3/1997). Wear-Resistant Hot Runner Systems with Valve Gates. Translated from Kunststoffe plast europe, 87, 338-340.

7. Catoen, B. (1992). Effect of Injection Time, melt temperature and Gate Configuration on Performance of Industrial Containers. Research study, Mold Division, Husky Injection Molding Systems. Buffalo, NY.

8. Phillis, P. J., Campbell, R. A. (1991). The crystallization Behavior of Polypropylene at Elevated Pressure. Antec 91 Conference Proceeding, Society of plastics Engineers, Inc., 896-899.

9. Dupont. (1999). Design Guide Module ll Zytel/Minlon : nylon resin engineering thermoplastic resin. The Co., Trade catalogue.

10. Turi, E. A. (1997). Thermal Characterisation of Polymeric Materials. Volume 2. 2nd Ed. Academic Press, Inc., San Diego.

11. Melvin I. Kohan, Mic Associates. 19 Polyamides (PA). (1987). Engineered Materials HandBook, Engineering Plastics. Vol. 2. ASM International, Metals Park, Ohio. 126.

12. Turi, E. A. (1997). Thermal Characterisation of Polymeric Materials. Volume 1, 2nd Ed. Academic Press, Inc., San Diego, 5, 8, 77, 78.

13. Bicerano, Jozef. (1993). Prediction of the Polymer Properties. Marcel Dekker, Inc. New York, 129.

14. Osswald, Tim A and Menges Georg. (1996). Materials Science of Polymers for Engineers. Hanser Publishers, New York, 78, 314.

15. L. Mascia, (1982). Thermoplastics Material Engineering. Applied Science Publishers LTD, 154.

16. W. J. Sichina. (1999). Measurement of Tg by DSC. Pad Review- Newltter, Vol. 27 No 1, 9-13.

17. W. J. Hall, R. L. Kruse, R. A. Mendelson, and Q. trementozi. (1983). ACS Symp. Ser., 229, 49.

18. Charrier, Jean-Michel, (1991). Polymeric Materials and Processing: Plastics, Elastomer and Composites. Carl Hanser Verlag, New York, 303-307.

19. Nielsen, Lawrence E. (1994). Mechanical Properties of Polymers and Composites. Marcel Dekker, Inc., 184-186, 337-342, 487.

20. Omega. (1998). The Temperature Handbook Volume 29, Omega Engineering Inc. Various paging, Z 34, Z 43-Z 44, Z167-Z 168. Trade Catalogue.

21. http://www.omega.com/products/os4121.html.

22. http://www.omega.com/products/os39.

23. Snaith B., P. W. O'Callaghan, and S. D. Probert. (1984). Interstitial Materials for Controlling Thermal Conductance across Pressed Metallic Contacts. Appl. Energy, 16, 175;

24. S. Song, and M. M. Yonanovich. (1987). Explicit Relative Contact Pressure Expression: Dependence Upon Surface Roughness Parameters And Vickers Microhardness Coefficients. AIAA 25th Aerospace Sciences Meeting, January 12-15

25. M. M. Yovanovich, (1986). Recent developments in Thermal Contact, Gap and Joints Conductance Theories and Experiments, in C. L. Tien, V. P. Carey, and J. K. Ferrel, Eds, Heat transfer. Vol. 1, Hemi sphere, New York, 1986, 35-45.

26. C. V. Madhusudana and L. S. Fletcher. (1986). Contact Heat Transfer- The Last Decade, AIAA J., 24, 510.

27. Olabisi, Olagoke. (1997). Handbook of Thermoplastics. Marcel Dekker Inc., 658-659.

28. DROUIN Gilbert and al. (1986). Éléments de machines. École Polytechnique de Montréal. deuxième édition, 172.

29. Michael J. Howard. (1980). DeskTop Data Bank. Edition 5 Book B. The International Plastics Selector Inc., San Diego, B272.

30. http://ashchem.com/Gpdata/5958.htm, page 2 of 3.

31. RAITHBY G. D. and HOLLANDS K. G. T. (1975). A general method of obtaining appropriate solutions to laminar and turbulent problems. in IRVINE T. F. and HARTNETT J. P., Eds. Advances in heat transfer. Vol. 11. Academic Press. New York, 265–315.

32. FRANK P. INCROPER and DAVID P. DeWITT. (1996). Fundamentals of heat and mass transfer. Fourth edition. John Wiley & sons Inc., 512, 563, 815.

ANNEXE

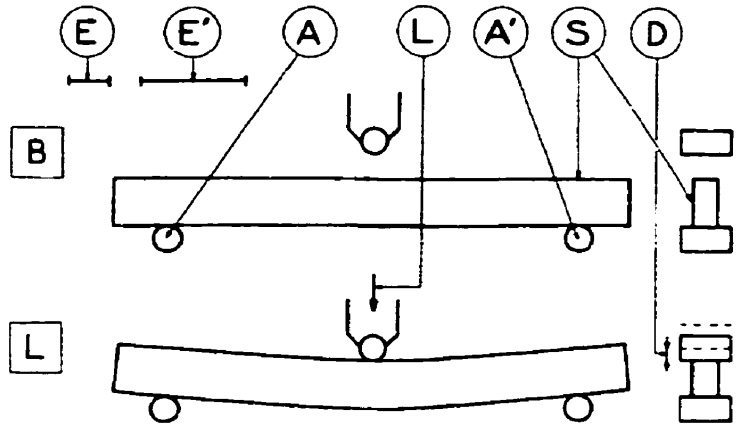


Figure A1: A schematic representation of a Heat Deflection Temperature test. [B] Before loading; [A] Under load; (À) Supports; (L) Applied load; (S) Test specimen; (D) Deflection; (E) 1 cm scale; (É) 0.1 in scale [18]

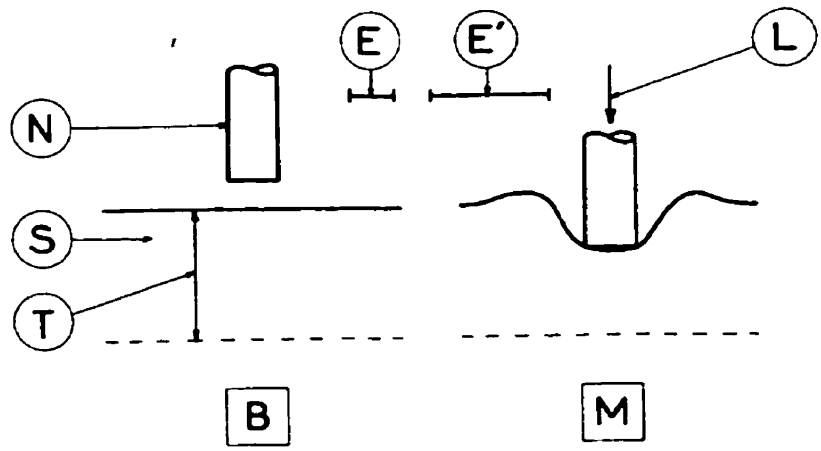


Figure A2: A schematic representation of a Vicat Softening Point test. [B] Before loading; [M] maximum penetration; (N) Needle indentor; (T) Minimum thickness; (L) Applied load; (E) 1 mm scale; (É) 0.1 in scale [18]