

NOTE TO USERS

This reproduction is the best copy available.

UMI[®]

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

DÉVELOPPEMENT D'UNE TECHNIQUE DE MESURE DU RETRAIT EN
MOULAGE PAR INJECTION

JOEL POMERLEAU

DÉPARTEMENT DE GÉNIE MÉCANIQUE
ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

MÉMOIRE PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION
DU DIPLOME DE MAÎTRISE ÈS SCIENCES APPLIQUÉES
(GÉNIE MÉCANIQUE)
NOVEMBRE 2004



Library and
Archives Canada

Bibliothèque et
Archives Canada

Published Heritage
Branch

Direction du
Patrimoine de l'édition

395 Wellington Street
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

395, rue Wellington
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

Your file Votre référence

ISBN: 0-494-01381-8

Our file Notre référence

ISBN: 0-494-01381-8

NOTICE:

The author has granted a non-exclusive license allowing Library and Archives Canada to reproduce, publish, archive, preserve, conserve, communicate to the public by telecommunication or on the Internet, loan, distribute and sell theses worldwide, for commercial or non-commercial purposes, in microform, paper, electronic and/or any other formats.

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

AVIS:

L'auteur a accordé une licence non exclusive permettant à la Bibliothèque et Archives Canada de reproduire, publier, archiver, sauvegarder, conserver, transmettre au public par télécommunication ou par l'Internet, prêter, distribuer et vendre des thèses partout dans le monde, à des fins commerciales ou autres, sur support microforme, papier, électronique et/ou autres formats.

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

In compliance with the Canadian Privacy Act some supporting forms may have been removed from this thesis.

Conformément à la loi canadienne sur la protection de la vie privée, quelques formulaires secondaires ont été enlevés de cette thèse.

While these forms may be included in the document page count, their removal does not represent any loss of content from the thesis.

Bien que ces formulaires aient inclus dans la pagination, il n'y aura aucun contenu manquant.

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL
ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

Ce mémoire intitulé:

DÉVELOPPEMENT D'UNE TECHNIQUE DE MESURE DU RETRAIT EN
MOULAGE PAR INJECTION

présenté par: POMERLEAU Joël

en vue de l'obtention du diplôme de: Maîtrise ès sciences appliquées

a été dûment acceptée par le jury d'examen constitué de:

M. MAYER René, Ph.D., président

M. SANSCHAGRIN Bernard, D. Ing., membre et directeur de recherche

M. DERDOURI Abdessalem, Ph.D., membre

REMERCIEMENTS

Je voudrais d'abord remercier professeur Bernard Sanschagrin, pour son enthousiasme, sa direction et sa forte implication dans le projet. Ses idées et conseils toujours constructifs furent énormément appréciés.

Aussi, je tiens à exprimer ma reconnaissance envers les divers intervenants de l'École Polytechnique de Montréal qui ont aidé à la réalisation de cette étude. Merci au personnel du CRASP, particulièrement à Jacques Beausoleil pour ses conseils pratiques sur le moulage par injection. Merci aux gens du département de mécanique, particulièrement François Ménard pour son support avec le profilographe et l'électroérosion. Merci aussi à Gérald Lafortune pour l'aide lors de l'impartition des pièces.

Je remercie également mes collègues étudiants. Chun Fang Zhang pour son aide précieuse pendant la conduite des essais, Marie-Josée Landry pour le profilographe et Reza Saberian pour son aide avec la machine à mesurer tridimensionnelle et les discussions enrichissantes sur la métrologie.

Finalement, merci à Ève pour son écoute et sa précieuse contribution lors de la rédaction de ce mémoire. Merci également à mes parents pour les encouragements à la poursuite d'études supérieures.

RÉSUMÉ

Cette étude expérimentale a pour objet la mesure locale du retrait en moulage par injection. Le moulage par injection est un procédé où une résine polymère est introduite sous pression dans une cavité. Le retrait est le concept permettant d'apprécier les différences dimensionnelles entre un moule et une pièce fabriquée.

Une analyse de sensibilité est présentée afin de comprendre et de quantifier les sources d'incertitudes associées à la mesure du retrait. Une méthodologie de mesure avec un profilographe est également élaborée. Le défaut de rectitude des repères est identifié comme principale source d'incertitude. Plusieurs méthodes de marquage sont explorées et la plus performante à cet égard est l'usinage par enlèvement de copeaux à commande numérique. Cette méthode a été utilisée pour marquer un moule d'objet type d'un ensemble de repères en forme de grille. La forme des rainures constituant les repères est également discutée. L'objet type est une plaque de 4 X 11 X 0,3 cm. La partie centrale du moule est modulable en épaisseur et en configuration afin d'obtenir des géométries de pièce avec des zones de retrait contraint selon une direction.

Le retrait au moulage d'un polypropylène est étudié sous trois aspects. Le premier aspect est l'effet de la position sur les retraits dans le sens de l'écoulement et dans le sens transverse ou effet local. Une géométrie de plaque à épaisseur constante est utilisée. Le second aspect est l'effet des paramètres de moulage (pression de maintien et vitesse d'injection). Ces effets sont trouvés à l'aide d'un plan statistique. Finalement, le troisième aspect est l'effet du moule où trois géométries sont comparées: la plaque à épaisseur constante, une plaque avec une partie plus mince contrainte en retrait symétriquement et une plaque avec une zone contrainte de façon asymétrique. Les effets dominants trouvés sont l'anisotropie du retrait, la géométrie du moule employé, la distribution des retraits et finalement, l'effet des paramètres d'injection.

ABSTRACT

This experimental study concerns local injection molding shrinkage measurements. Injection molding is a process where a polymer resin is injected under pressure in a closed cavity. Shrinkage is the concept dealing with differences in dimension between an injected part and its mold.

A sensitivity analysis is presented to understand and estimate uncertainties associated with shrinkage measurement. Also, a measuring methodology is elaborated using a profilograph. The main source of uncertainty identified is mark straightness tolerance. Some marking technologies were tried; NC machining was identified as the most performing method regarding straightness. This marking technology was used to produce a grid in a test mold. The shape of the groove is also discussed. The molded part is a plate of size 4 X 11 X 0,3 cm. The central part of the plate is variable in thickness and configuration to have one direction restrained shrinkage area.

Injection molding shrinkage of a polypropylene is studied under three aspects. First, the effects of the position on parallel to flow and cross flow shrinkage are observed. A constant thickness plate is used and local shrinkages are measured. Second, the effects of some molding parameters (holding pressure and injection velocity) are found using a statistical design of experiment. Finally, the third aspect studied is the geometry of the mold. Three geometries are compared in term of shrinkage: The constant thickness plate, a plate with a thinner, symmetrically restrained shrinkage area and a plate with asymmetrically restrained shrinkage. The prevailing observed effects are shrinkage anisotropy, mold geometry, local distribution and finally parameters effects.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS.....	IV
RÉSUMÉ.....	V
ABSTRACT.....	VI
TABLE DES MATIÈRES.....	VII
LISTE DES TABLEAUX.....	X
LISTE DES FIGURES.....	XII
LISTE DES ABBRÉVIATIONS.....	XIX
LISTE DES ANNEXES.....	XX
1 INTRODUCTION.....	1
1.1 Le moulage par injection.....	1
1.1.1 Le processus.....	1
1.1.2 Les matériaux.....	5
1.1.3 La qualité	6
1.1.4 CAE en moulage par injection.....	7
1.2 Le retrait au moulage	9
1.2.1 Phénomène et concepts	9
1.2.2 Mesure du retrait	11
1.2.3 Effet connu des paramètres de mise en forme	12
2 CONCEPTION DU MOULE D'OBJET TYPE	15
2.1 Objectif	15
2.1.1 Contexte et Contraintes.....	15
2.2 Conception	17
2.2.1 Choix de géométrie d'objet type.....	17
2.2.2 Conception d'une nouvelle partie fixe.....	18
2.2.3 Conception des inserts	21
2.2.4 Essais en service	24
3 MÉTHODES ET ANALYSE DE SENSIBILITÉ.....	25

3.1	Introduction	25
3.1.1	Problématique	25
3.1.2	Objectif	27
3.2	Le profilographe.....	27
3.2.1	Description du système	27
3.2.2	Caractéristiques métrologiques	28
3.2.3	Réglages de base et traitement des profils	30
3.3	Analyse de sensibilité	32
3.3.1	Diagramme de cause à effet.....	32
3.3.2	Mesure.....	33
3.3.3	Pièce.....	35
3.3.4	Marquage	39
3.3.5	Moulage	41
3.4	Budget d'incertitude.....	42
3.5	Marquage, Rectitude et parallélisme.....	44
3.5.1	Méthodologie	44
3.5.2	Usinage par enlèvement de copeaux conventionnel	51
3.5.3	Usinage par électroérosion.....	51
3.5.4	Usinage laser et par attaque chimique	53
3.5.5	Usinage par enlèvement de copeaux à commande numérique	53
3.5.6	Synthèse des essais de marquage et analyse	54
3.6	Validation expérimentale	61
3.7	Fabrication des repères.....	65
3.8	Procédure de mesure	67
3.9	Conclusion	68
4	RÉSULTATS ET ANALYSE.....	70
4.1	Effet de la position sur les retraits.....	70
4.1.1	Méthodologie	70
4.1.2	Statistiques de base	73
4.1.3	Présentation graphique des résultats	74

4.1.4	Corrélations entre les valeurs de retraits	75
4.1.5	Analyse ANOVA	78
4.1.6	Effets principaux	79
4.1.7	Analyse des résidus	82
4.2	Effet des paramètres de moulage sur les retraits	83
4.2.1	Méthodologie	83
4.2.2	Planification statistique d'expérience	83
4.2.3	Corrélations entre variables dépendantes	84
4.2.4	Synthèse des effets	87
4.3	Effet de la géométrie du moule sur les retraits	89
4.3.1	Méthodologie	89
4.3.2	Retraits dans le sens de l'écoulement	91
4.3.3	Retraits dans le sens transverse	93
5	CONCLUSION	96
6	RÉFÉRENCES	101

LISTE DES TABLEAUX

TABLEAU 1-1 : PRODUCTION AMÉRICAINE DE POLYMÈRES EN 2003. (AMERICAN PLASTICS COUNCIL 2004).....	5
TABLEAU 1-2 : ÉTUDES EXPÉRIMENTALES SUR LE RETRAIT.....	13
TABLEAU 1-3 : SYNTHÈSE DES EFFETS DE CERTAINS PARAMÈTRES DE MOULAGE SUR LE RETRAIT, – INDIQUE QUE L’AUTEUR N’ATTRIBUE PAS D’EFFET SIGNIFICATIF DU PARAMÈTRE SUR LE RETRAIT. LES NOMBRES (1), (2) ET (3) MONTRENT L’IMPORTANCE RELATIVE DE CHAQUE PARAMÈTRE LORSQUE MENTIONNÉ PAR L’AUTEUR.....	14
TABLEAU 2-1 : PRINCIPALES SPÉCIFICATIONS DE LA PRESSE SE50S.....	17
TABLEAU 3-1: SPÉCIFICATIONS DU PROFILOGRAPHE. (MITUTOYO AMERICA CORPORATION US4235- 525).....	29
TABLEAU 3-2: BUDGET D’INCERTITUDE.	42
TABLEAU 3-3: DESCRIPTION DES GÉOMÉTRIES DE DENTS POUR LE MARQUAGE PAR ÉLECTROÉROSION.	52
TABLEAU 3-4: RÉSULTATS DE LA MESURE DU DÉFAUT DE PARALLÉLISME.	56
TABLEAU 3-5: INDICE DES COÛTS RELATIFS POUR CHAQUE MÉTHODE DE FABRICATION DES REPÈRES.	60
TABLEAU 3-6 : ÉCARTS ENTRE LA DIMENSION NOMINALE ET LA DISTANCE MESURÉE POUR L’INSERT GAUCHE DE LA PARTIE FIXE. LES ÉCARTS SIGNIFICATIFS SONT SURLIGNÉES EN PÂLE LES ÉCARTS IMPORTANTS SONT EN FONCÉ. LES DIFFÉRENCES SONT EN μM	66
TABLEAU 4-1: PALIERS DE VITESSE D’INJECTION.	71
TABLEAU 4-2: STATISTIQUES DESCRIPTIVES RÉSULTANTS DE LA MESURE COMPLÈTE DE 2 PIÈCES. UNE DES PIÈCES EST MESURÉE DES DEUX CÔTÉS.	73
TABLEAU 4-3: CORRÉLATION ENTRE LES VALEURS DE RETRAIT DANS LE SENS DE L’ÉCOULEMENT (RETRAIT=) ET DANS LE SENS TRANSVERSE (RETRAIT+) POUR DES MESURES À DIFFÉRENTES POSITIONS.	75
TABLEAU 4-4 : CORRÉLATION EN NÉGLIGEANT LES POINTS SURLIGNÉS.	76
TABLEAU 4-5: ANALYSE DE LA VARIANCE POUR LES VARIABLES RETRAIT= ET RETRAIT+.	78

TABLEAU 4-6: ANALYSE DE LA VARIANCE POUR LES VARIABLES RETRAIT= ET RETRAIT+ EN OMETTANT LES LIGNES A A H.....	79
TABLEAU 4-7: VARIABLES DU PLAN D'ESSAI.....	83
TABLEAU 4-8: CORRÉLATION ENTRE LES VALEURS DE RETRAIT= ET LES VALEURS DE RETRAIT+ POUR DIFFÉRENTS PARAMÈTRES D'INJECTION.....	84
TABLEAU 4-9: CORRÉLATIONS PAR POSITION ET PAR TYPE DE RETRAITS.....	85
TABLEAU 4-10: SYNTHÈSE DES EFFETS TROUVÉS AVEC LE PLAN D'ESSAI 2 ³	87
TABLEAU B - 1: EFFETS ESTIMÉS POUR LE RETRAIT EN C3 DANS LE SENS DE L'ÉCOULEMENT.	112
TABLEAU B - 2: TABLEAU D'ANALYSE DE LA VARIANCE EN C3 POUR LE RETRAIT DANS LE SENS DE L'ÉCOULEMENT.	114
TABLEAU B - 3: RÉSULTATS DU TEST DE BOX-COX.	114
TABLEAU B - 4: EFFETS ESTIMÉS POUR LE RETRAIT EN C3 DANS LE SENS TRANSVERSE.....	117
TABLEAU B - 5: TABLEAU D'ANALYSE DE LA VARIANCE EN C3 POUR LE RETRAIT DANS LE SENS TRANSVERSE.	119
TABLEAU B - 6: EFFETS ESTIMÉS POUR LE RETRAIT EN I3 DANS LE SENS DE L'ÉCOULEMENT.....	121
TABLEAU B - 7: TABLEAU D'ANALYSE DE LA VARIANCE EN I3 POUR LE RETRAIT DANS LE SENS DE L'ÉCOULEMENT.	123
TABLEAU B - 8: EFFETS ESTIMÉS POUR LE RETRAIT EN I3 DANS LE SENS TRANSVERSE.	125
TABLEAU B - 9: TABLEAU D'ANALYSE DE LA VARIANCE EN I3 POUR LE RETRAIT DANS LE SENS TRANSVERSE.	127
TABLEAU B - 10: EFFETS ESTIMÉS POUR LE RETRAIT EN O3 DANS LE SENS DE L'ÉCOULEMENT.....	129
TABLEAU B - 11: TABLEAU D'ANALYSE DE LA VARIANCE EN O3 POUR LE RETRAIT DANS LE SENS DE L'ÉCOULEMENT.	131
TABLEAU B - 12: EFFETS ESTIMÉS POUR LE RETRAIT EN O3 DANS LE SENS TRANSVERSE.....	133
TABLEAU B - 13: TABLEAU D'ANALYSE DE LA VARIANCE EN O3 POUR LE RETRAIT DANS LE SENS TRANSVERSE.	135

LISTE DES FIGURES

FIGURE 1-1 :	SCHÉMA MONTRANT UNE PRESSE À INJECTER ET SES PRINCIPALES COMPOSANTES. (PENN PLASTICS INC.)	2
FIGURE 1-2 :	SCHÉMA SIMPLIFIÉ D'UN MOULE POUR L'INJECTION ET SES PRINCIPALES COMPOSANTES. (PENN PLASTICS INC.)	3
FIGURE 1-3 :	DIAGRAMME P-V-T D'UN POLYSTYRÈNE ET ÉVOLUTION LORS DU MOULAGE PAR INJECTION. DÉBUT DE L'INJECTION (A), MONTÉE EN PRESSION (B), PRESSION MAXIMALE À LA FIN DU REMPLISSAGE (C), PERMUTATION EN MODE DE MAINTIEN EN PRESSION (D), BAISSÉ DE PRESSION SOUDAINE DUE À LA FIN DU REMPLISSAGE (E), BAISSÉ DE LA PRESSION MOYENNE DANS LA CAVITÉ ET APPORT SUPPLÉMENTAIRE DE MATIÈRE (F), SOLIDIFICATION DU SEUI D'INJECTION (G), VOLUME DE LA PIÈCE ÉGAL À CELUI DU MOULE (H), REFROIDISSEMENT ET DÉCOLLEMENT DE LA PAROI DE LA PIÈCE (I), REFROIDISSEMENT ISOBARE (J), SOLIDIFICATION PRESQUE COMPLÈTE (K), ÉJECTION DE PIÈCE (L) ET ÉTAT FINAL DE LA MATIÈRE (M). (TANGRAM TECHNOLOGY LTD. 2004)	9
FIGURE 2-1 :	GÉOMÉTRIE CHOISIE POUR L'OBJET TYPE.	18
FIGURE 2-2:	PLAN MONTRANT LES ITEMS MESURÉS AVEC LA MMT POUR LA PARTIE FIXE.	19
FIGURE 2-3:	PLAN MONTRANT LES ITEMS MESURÉS AVEC LA MMT POUR LA PARTIE MOBILE.	20
FIGURE 2-4:	TROIS GÉOMÉTRIES DE PIÈCES POSSIBLES. (1) ÉPAISSEUR CONSTANTE, (2) ÉPAISSEUR VARIABLE, RETRAIT CONTRAINT ASYMÉTRIQUEMENT, ET (3) ÉPAISSEUR VARIABLE, RETRAIT CONTRAINT SYMÉTRIQUEMENT.	23
FIGURE 3-1:	GRAPHIQUE DE L'INCERTITUDE SUR LE RETRAIT, $U(R)$, EN FONCTION DE LA DISTANCE DANS LE MOULE POUR DIFFÉRENTES INCERTITUDES SUR LA POSITION D'UN REPÈRE $U(X)$	26
FIGURE 3-2:	PHOTO DE L'APPAREIL SV-C4000H4 DANS L'ENVIRONNEMENT DE TRAVAIL CONTRÔLÉ.	28
FIGURE 3-3:	TÊTE DE MESURE DU PROFILOGRAPHE EN POSITION HORIZONTALE. EN POINTILLÉ, LA POSITION HAUTE EST MONTRÉE. LES DIRECTIONS DE DÉPLACEMENT DE LA TÊTE DE MESURE SONT ÉGALEMENT MONTRÉES.	28

FIGURE 3-4:	NUAGE DE POINTS OBTENU AVEC LE PROFILOGRAPHE REPRÉSENTANT LE PROFIL D'UNE RAINURE EN ARC DE CERCLE (A) ET SUBSTITUTION D'UN ÉLÉMENT GÉOMÉTRIQUE IDÉALE (CERCLE) PAR LA MÉTHODE DES MOINDRES CARRÉS (B).....	31
FIGURE 3-5:	DIAGRAMME D'ISHIKAWA OU DE CAUSE À EFFET.....	32
FIGURE 3-6:	NUAGE DE POINTS ET DIFFÉRENTES MÉTHODES DE SUBSTITUTION : MÉTHODE DU SOMMET (A), DU POINT D'INFLEXION (B), DES CÔTÉS (C) ET DU CERCLE (D). LE CRITÈRE D'ASSOCIATION EST TOUJOURS LES MOINDRES CARRÉS ET LES DOMAINES SPÉCIFIÉS SONT MONTRÉS PAR LES CROIX.....	34
FIGURE 3-7:	COMPARAISON DE TROIS TYPES DE SUBSTITUTION.	35
FIGURE 3-8 :	SCHÉMA MONTRANT L'EFFET DU GAUCHISSEMENT SUR LA MESURE DU RETRAIT.....	36
FIGURE 3-9:	ERREUR DE TYPE COSINUS CAUSÉE PAR LE DÉALIGNEMENT DE LA PIÈCE AUTOUR DE Z.....	37
FIGURE 3-10:	ESSAI DE FIDÉLITÉ AYANT POUR OBJECTIF DE VÉRIFIER L'EFFET DU NOMBRE DE PASSAGE SUR LA MESURE DE DISTANCE ENTRE DES REPÈRES DES DIFFÉRENTES GÉOMÉTRIES. VOIR SECTION 3.5.3 POUR LES DÉTAILS SUR LES GÉOMÉTRIES DE REPÈRES.	38
FIGURE 3-11:	ERREUR DE CORRESPONDANCE CAUSÉE PAR LES DÉFAUTS DE RECTITUDE (A) ET DE PARALLÉLISME (B) DANS LES DEUX CAS, $D_{PIÈCE} \neq D_{MOULE}$ MÊME SI LE RETRAIT EST NUL.....	40
FIGURE 3-12:	MESURE DE LA DISTANCE ENTRE DES REPÈRES USINÉS PAR ÉLECTROÉROSION. LES BARRES D'ERREUR ONT UNE LONGUEUR ÉGALE À DEUX FOIS LA PLUS GRANDE ERREUR TYPE SUR CHAQUE MOYENNE DE TROIS MESURES AU MÊME ENDROIT. $U(D_{MOY}) = K * U(D_{MOY}) = 2 * (\Sigma_{MAX} / 3^{1/2})$	40
FIGURE 3-13:	DIAGRAMME DE PARETO MONTRANT L'ÉVALUATION DES SOURCES D'INCERTITUDE. CELLES-CI SONT MONTRÉES EN ORDRE DÉCROISSANT.	43
FIGURE 3-14 :	PHOTO DE L'INSERT TEST AVEC LES MARQUES USINÉES PAR DIFFÉRENTS PROCÉDÉS.....	44
FIGURE 3-15:	SCHÉMA REPRÉSENTANT L'INSTALLATION DE LA PIÈCE POUR MESURE DE RECTITUDE.....	46
FIGURE 3-16:	SCHÉMA MONTRANT LA MÉTHODE EMPLOYÉE POUR L'ALIGNEMENT DE LA PIÈCE.....	49

FIGURE 3-17:	EXEMPLE DE TRAITEMENTS DES POINTS POUR ÉVALUER LES DÉFAUTS DE RECTITUDE ET DE PARALLÉLISME.	50
FIGURE 3-18:	DESSIN DE LA PARTIE DE L'ÉLECTRODE DÉCOUPÉE PAR ÉLECTROÉROSION FIL (VUE DE COUPE).	52
FIGURE 3-19:	ESSAI DE FIDÉLITÉ DE MESURE DE REPÈRES SUR PIÈCES DE POLYPROPYLENE (PP). LES REPÈRES SONT PRODUITS PAR ÉLECTROÉROSION, ILS SONT DE GÉOMÉTRIES ET PROFONDEURS DIVERSES.	54
FIGURE 3-20:	NUAGE DE POINTS ET SUBSTITUTION D'UNE MARQUE PRODUITE PAR LA GÉOMÉTRIE D'ÉLECTRODE C.	55
FIGURE 3-21:	RÉSULTATS DES ESSAIS DE FIDÉLITÉ POUR DIFFÉRENTS PROCÉDÉS D'USINAGE.	56
FIGURE 3-22:	RÉSULTATS DES MESURES DU DÉFAUT DE RECTITUDE POUR DIFFÉRENTS PROCÉDÉS D'USINAGE	57
FIGURE 3-23 :	EXEMPLES DE POINTS RECUEILLIS LORS DU PALPAGE DE MARQUES PRODUITES LASER (A) ET (B) PAR ATTAQUE CHIMIQUE (C) ET (D). LA SINGULARITÉ ENCECLÉE EN TRAIT POINTILLÉE EST CAUSÉE PAR UN PROFIL TROP ABRUPT, IL Y A PROBABLEMENT CONTACT ENTRE LE STYLET ET L'ARÊTE DE LA RAINURE.....	58
FIGURE 3-24 :	HISTOGRAMME DES FRÉQUENCES POUR L'USINAGE CN.	59
FIGURE 3-25 :	POSITIONS OÙ LE RETRAIT EST MESURÉ LORS DES ESSAIS PRÉLIMINAIRES.	62
FIGURE 3-26 :	RÉSULTATS DES ESSAIS PRÉLIMINAIRES DE MESURE DU RETRAIT POUR DEUX MATIÈRES, LE POLYPROPYLENE (PP) ET LE POLYSTYRENE (PS). PAR EXEMPLE, PS-3 D=12 POUR UNE PLAQUE DE POLYSTYRENE À LA POSITION 3 OÙ LA DISTANCE ENTRE LES REPÈRES EST 12 MM.	62
FIGURE 3-27 :	GRAPHIQUE D'INCERTITUDE SUR LE RETRAIT EN FONCTION DE LA DISTANCE ENTRE LES REPÈRES. LES POINTS REPRÉSENTENT LES RÉSULTATS DES ESSAIS PRÉLIMINAIRES DE RETRAIT AU MOULAGE POUR DEUX MATIÈRES : UN POLYPROPYLENE ET UN POLYSTYRENE . CHAQUE INCERTITUDE EST L'ÉTENDUE DES VALEURS DE RETRAIT DIVISÉE PAR 6 (CE QUI CORRESPOND À UN ÉCART TYPE) POUR CHAQUE POSITION MESURÉE.	64
FIGURE 3-28 :	PHOTO D'UN INSERT UNE FOIS MARQUÉ. IL EST DIVISÉ EN 85 RÉGIONS DE A1 À Q5.	65

FIGURE 4-1:	REPRÉSENTATION 3D DES RETRAITS EN FONCTION DE LA POSITION. EN (A), RETRAIT DANS LE SENS DE L'ÉCOULEMENT ET EN (B), RETRAIT DANS LE SENS TRANSVERSE.	74
FIGURE 4-2:	GRAPHIQUE MONTRANT LA CORRÉLATION ENTRE LES VARIABLES DE RETRAIT= ET DE RETRAIT+ POUR DES MESURES À DIFFÉRENTES POSITIONS.	76
FIGURE 4-3:	CORRÉLATIONS REPRÉSENTÉES GRAPHIQUEMENT SI ON ENLÈVE LES POINTS EN CERCLE PLEINS.	77
FIGURE 4-4:	EFFETS PRINCIPAUX DE LA VARIABLE PIÈCE.....	80
FIGURE 4-5 :	EFFETS PRINCIPAUX DE LA VARIABLE LIGNE.....	80
FIGURE 4-6:	EFFETS PRINCIPAUX DE LA VARIABLE CÔTÉ.	81
FIGURE 4-7:	EFFETS PRINCIPAUX DE LA VARIABLE COLONNE.	81
FIGURE 4-8:	GRAPHIQUES DES RÉSIDUS EN FONCTION DES VALEURS PRÉDITES POUR LA VARIABLE RETRAIT= (A) ET POUR LA VARIABLE RETRAIT+ (B). GRAPHIQUE DES VALEURS PRÉDITES EN FONCTION DES VALEURS OBSERVÉES POUR LE RETRAIT= (C) ET POUR LE RETRAIT+ (D).....	82
FIGURE 4-9:	GRAPHIQUE MONTRANT LA CORRÉLATION ENTRE LES VALEURS DE RETRAIT= ET LES VALEURS DE RETRAIT+ POUR DIFFÉRENTS ENSEMBLES DE PARAMÈTRES D'INJECTION.	84
FIGURE 4-10 :	REPRÉSENTATION GRAPHIQUE DES CORRÉLATIONS DÉTAILLÉES. PAR EXEMPLE, EN (I), LES COUPLES	86
FIGURE 4-11:	RETRAIT DANS LE SENS DE L'ÉCOULEMENT (RETRAIT=) POUR TROIS GÉOMÉTRIES DE PIÈCES MESURÉES DES DEUX CÔTÉS À LA COLONNE 3 (NOTÉS PF ET PM EN FAISANT RÉFÉRENCE AU CÔTÉ ORIENTÉ VERS LA PARTIE FIXE ET VERS LA PARTIE MOBILE).	91
FIGURE 4-12:	SCHÉMA MONTRANT LE POMPAGE PRÉFÉRENTIEL DE MATIÈRE CAUSÉ PAR LA DYNAMIQUE DE SOLIDIFICATION DE LA PIÈCE.....	92
FIGURE 4-13:	RETRAIT DANS LE SENS TRANSVERSE POUR TROIS GÉOMÉTRIES DE PIÈCES. PRISE DE MESURE DES DEUX CÔTÉS DES PIÈCES POUR LA LIGNE C.....	93
FIGURE 4-14:	RETRAIT DANS LE SENS TRANSVERSE POUR TROIS GÉOMÉTRIES DE PIÈCES. PRISE DE MESURE DES DEUX CÔTÉS DES PIÈCES POUR LA LIGNE I.....	93

FIGURE 4-15:	RETRAIT DANS LE SENS TRANSVERSE POUR TROIS GÉOMÉTRIES DE PIÈCES. PRISE DE MESURE DES DEUX CÔTÉS DES PIÈCES POUR LA LIGNE O.	94
FIGURE A - 1:	PLAN DE LA NOUVELLE PARTIE FIXE 1/3.....	104
FIGURE A - 2:	PLAN DE LA NOUVELLE PARTIE FIXE 2/3.....	104
FIGURE A - 3:	PLAN DE LA NOUVELLE PARTIE FIXE 3/3.....	105
FIGURE A - 4:	PLAN DE L'INSERT CENTRAL DE LA NOUVELLE PARTIE FIXE.	105
FIGURE A - 5:	PLAN DES COMPOSANTES DE LA NOUVELLE PARTIE FIXE ACHETÉES CHEZ DME.	106
FIGURE A - 6:	INSERT PLEIN (GAUCHE) POUR LA NOUVELLE PARTIE FIXE.	106
FIGURE A - 7:	INSERT PLEIN (DROITE) POUR LA NOUVELLE PARTIE FIXE.	107
FIGURE A - 8:	PLAN DE BASE POUR LA FABRICATION DES INSERTS.	108
FIGURE A - 9:	PLAN DES INSERTS 1/4.....	108
FIGURE A - 10:	PLAN DES INSERTS 2/4.....	109
FIGURE A - 11:	PLAN DES INSERTS 3/4.....	109
FIGURE A - 12:	PLAN DES INSERTS 4/4.....	110
FIGURE A - 13:	PLAN DES BLOCS AMOVIBLES POUR CRÉER DES ZONES DE RETRAIT CONTRAINT.....	110
FIGURE A - 14:	PLAN DU JEU DE CALE POUR LES BLOCS AMOVIBLES.	111
FIGURE B - 1:	DIAGRAMME DE PARETO POUR LE RETRAIT EN C3 DANS LE SENS DE L'ÉCOULEMENT.	112
FIGURE B - 2:	EFFETS PRINCIPAUX DE LA VITESSE D'INJECTION EN C3 POUR LE RETRAIT DANS LE SENS DE L'ÉCOULEMENT.....	113
FIGURE B - 3:	EFFETS PRINCIPAUX DE LA PRESSION DE MAINTIEN EN C3 POUR LE RETRAIT DANS LE SENS DE L'ÉCOULEMENT.....	113
FIGURE B - 4:	SURFACE DE RÉPONSE MONTRANT LE RETRAIT DANS LE SENS DE L'ÉCOULEMENT EN FONCTION DE LA PRESSION DE MAINTIEN ET DE LA VITESSE D'INJECTION POUR LA POSITION C3.....	115
FIGURE B - 5:	VALEURS PRÉDITES EN FONCTION DES VALEURS OBSERVÉES POUR LE RETRAIT DANS LE SENS DE L'ÉCOULEMENT EN POSITION C3.	116

FIGURE B - 6:	RÉSIDUS EN FONCTION DES VALEURS PRÉDITES POUR LE RETRAIT DANS LE SENS DE L'ÉCOULEMENT EN POSITION C3.	116
FIGURE B - 7:	DIAGRAMME DE PARETO POUR LE RETRAIT EN C3 DANS LE SENS TRANSVERSE.	117
FIGURE B - 8:	EFFETS PRINCIPAUX DE LA VITESSE D'INJECTION EN C3 POUR LE RETRAIT DANS LE SENS TRANSVERSE.	118
FIGURE B - 9:	EFFETS PRINCIPAUX DE LA PRESSION DE MAINTIEN EN C3 POUR LE RETRAIT DANS LE SENS TRANSVERSE.	118
FIGURE B - 10:	SURFACE DE RÉPONSE MONTRANT LE RETRAIT DANS LE SENS TRANSVERSE EN FONCTION DE LA PRESSION DE MAINTIEN ET DE LA VITESSE D'INJECTION POUR LA POSITION C3.	119
FIGURE B - 11:	VALEURS PRÉDITES EN FONCTION DES VALEURS OBSERVÉES POUR LE RETRAIT DANS LE SENS TRANSVERSE EN POSITION C3.	120
FIGURE B - 12:	RÉSIDUS EN FONCTION DES VALEURS PRÉDITES POUR LE RETRAIT DANS LE SENS TRANSVERSE EN POSITION C3.	120
FIGURE B - 13:	DIAGRAMME DE PARETO POUR LE RETRAIT EN I3 DANS LE SENS DE L'ÉCOULEMENT.	121
FIGURE B - 14:	EFFETS PRINCIPAUX DE LA VITESSE D'INJECTION EN I3 POUR LE RETRAIT DANS LE SENS DE L'ÉCOULEMENT.	122
FIGURE B - 15:	EFFETS PRINCIPAUX DE LA PRESSION DE MAINTIEN EN I3 POUR LE RETRAIT DANS LE SENS DE L'ÉCOULEMENT.	122
FIGURE B - 16:	SURFACE DE RÉPONSE MONTRANT LE RETRAIT DANS LE SENS DE L'ÉCOULEMENT EN FONCTION DE LA PRESSION DE MAINTIEN ET DE LA VITESSE D'INJECTION POUR LA POSITION I3.	123
FIGURE B - 17:	VALEURS PRÉDITES EN FONCTION DES VALEURS OBSERVÉES POUR LE RETRAIT DANS LE SENS DE L'ÉCOULEMENT EN POSITION I3.	124
FIGURE B - 18:	RÉSIDUS EN FONCTION DES VALEURS PRÉDITES POUR LE RETRAIT DANS LE SENS DE L'ÉCOULEMENT EN POSITION I3.	124
FIGURE B - 19:	DIAGRAMME DE PARETO POUR LE RETRAIT EN I3 DANS LE SENS TRANSVERSE.	125
FIGURE B - 20:	EFFETS PRINCIPAUX DE LA VITESSE D'INJECTION EN I3 POUR LE RETRAIT DANS LE SENS TRANSVERSE.	126
FIGURE B - 21:	EFFETS PRINCIPAUX DE LA PRESSION DE MAINTIEN EN I3 POUR LE RETRAIT DANS LE SENS TRANSVERS.	126

FIGURE B - 22: SURFACE DE RÉPONSE MONTRANT LE RETRAIT DANS LE SENS TRANSVERSE EN FONCTION DE LA PRESSION DE MAINTIEN ET DE LA VITESSE D'INJECTION POUR LA POSITION I3	127
FIGURE B - 23: VALEURS PRÉDITES EN FONCTION DES VALEURS OBSERVÉES POUR LE RETRAIT DANS LE SENS TRANSVERSE EN POSITION I3.....	128
FIGURE B - 24: RÉSIDUS EN FONCTION DES VALEURS PRÉDITES POUR LE RETRAIT DANS LE SENS TRANSVERSE EN POSITION I3.....	128
FIGURE B - 25: DIAGRAMME DE PARETO POUR LE RETRAIT EN O3 DANS LE SENS DE L'ÉCOULEMENT.....	129
FIGURE B - 26: EFFETS PRINCIPAUX DE LA VITESSE D'INJECTION EN O3 POUR LE RETRAIT DANS LE SENS DE L'ÉCOULEMENT.....	130
FIGURE B - 27: EFFETS PRINCIPAUX DE LA PRESSION DE MAINTIEN EN O3 POUR LE RETRAIT DANS LE SENS DE L'ÉCOULEMENT.....	130
FIGURE B - 28: SURFACE DE RÉPONSE MONTRANT LE RETRAIT DANS LE SENS DE L'ÉCOULEMENT EN FONCTION DE LA PRESSION DE MAINTIEN ET DE LA VITESSE D'INJECTION POUR LA POSITION O3.....	131
FIGURE B - 29: VALEURS PRÉDITES EN FONCTION DES VALEURS OBSERVÉES POUR LE RETRAIT DANS LE SENS DE L'ÉCOULEMENT EN POSITION O3.....	132
FIGURE B - 30: RÉSIDUS EN FONCTION DES VALEURS PRÉDITES POUR LE RETRAIT DANS LE SENS DE L'ÉCOULEMENT EN POSITION O3.....	132
FIGURE B - 31: DIAGRAMME DE PARETO POUR LE RETRAIT EN O3 DANS LE SENS TRANSVERSE.....	133
FIGURE B - 32: EFFETS PRINCIPAUX DE LA VITESSE D'INJECTION EN O3 POUR LE RETRAIT DANS LE SENS TRANSVERSE.....	134
FIGURE B - 33: EFFETS PRINCIPAUX DE LA PRESSION DE MAINTIEN EN O3 POUR LE RETRAIT DANS LE SENS DE TRANSVERSE.....	134
FIGURE B - 34: SURFACE DE RÉPONSE MONTRANT LE RETRAIT DANS LE SENS TRANSVERSE EN FONCTION DE LA PRESSION DE MAINTIEN ET DE LA VITESSE D'INJECTION POUR LA POSITION O3.....	135
FIGURE B - 35: VALEURS PRÉDITES EN FONCTION DES VALEURS OBSERVÉES POUR LE RETRAIT DANS LE SENS TRANSVERSE EN POSITION O3.....	136
FIGURE B - 36: RÉSIDUS EN FONCTION DES VALEURS PRÉDITES POUR LE RETRAIT DANS LE SENS TRANSVERSE EN POSITION O3.....	136

LISTE DES ABBRÉVIATIONS

ABS	<i>Acrylonitrile-Butadiene-Styrene</i>
ASTM	<i>American Society for Testing of Materials</i>
CAO	Conception Assistée par Ordinateur
CIM	<i>Ceramic Injection Molding</i>
CN	Commande Numérique
CRASP	Centre de Recherche Appliquées sur les Polymères
EDM	<i>Electrical Discharge Machining</i>
HIPS	<i>High Impact Polystyrene</i>
HDPE	<i>High Density Polyethylene</i>
IAO	Injection Assistée par Ordinateur
LDPE	<i>Low Density Polyethylene</i>
LLDPE	<i>Linear Low Density Polyethylene</i>
MDI	<i>Diphenylmethane diisocyanate</i>
MI / MFI	<i>Melt Index / Melt Flow Index</i>
MIM	<i>Metal Injection Molding</i>
MMT	Machine à Mesurer Tridimensionnelle
P-v-T	Pression - volume spécifique - Température
PA/PAfv	Polyamide/ fibre de verre
PBT	<i>Poly(butylene terephthalate)</i>
PC/ABS	Alliage de PC et ABS
PPS	Polysulfonate
PS	Polystyrène
PP/PPc/PPfv	Polypropylène / chargé / fibre de verre
PPO/PPOc/PPOc-fv	<i>Poly(phenylene oxide)</i> / chargé / chargé et fibre de verre
PVC	<i>Poly(vinyl chloride)</i>
RIM	<i>Reaction Injection Molding</i>
SAN	<i>Styrene Acrylonitrile</i>
TDI	<i>Toluene diisocyanate</i>

LISTE DES ANNEXES

A	Plans	104
A.1	Nouvelle partie fixe.....	104
A.2	Inserts	108
B	Analyses statistiques locales	112
B.1	Retraits en position C3 dans le sens de l'écoulement	112
B.1.1	Effets estimés et diagramme de Pareto	112
B.1.2	Analyse de la variance	114
B.1.3	Surface de réponse	115
B.1.4	Analyse des résidus	116
B.2	Retraits en position C3 dans le sens transverse.....	117
B.2.1	Effets estimés et diagramme de Pareto	117
B.2.2	Analyse de la variance	119
B.2.3	Surface de réponse	119
B.2.4	Analyse des résidus	120
B.3	Retraits en position I3 dans le sens de l'écoulement	121
B.3.1	Effets estimés et diagramme de Pareto	121
B.3.2	Analyse de la variance	123
B.3.3	Surface de réponse	123
B.3.4	Analyse des résidus.....	124
B.4	Retraits en position I3 dans le sens transverse.....	125
B.4.1	Effets estimés et diagramme de Pareto	125
B.4.2	Analyse de la variance	127
B.4.3	Surface de réponse	127
B.4.4	Analyse des résidus	128
B.5	Retraits en position O3 dans le sens de l'écoulement.....	129
B.5.1	Effets estimés et diagramme de Pareto	129
B.5.2	Analyse de la variance	131
B.5.3	Surface de réponse	131

B.5.4	Analyse des résidus	132
B.6	Retraits en position O3 dans le sens transverse	133
B.6.1	Effets estimés et diagramme de Pareto	133
B.6.2	Analyse de la variance	135
B.6.3	Surface de réponse	135
B.6.4	Analyse des résidus	136

1 INTRODUCTION

1.1 *Le moulage par injection*

Le moulage par injection est un processus de fabrication où un matériau est mis en forme en étant introduit sous pression dans un moule. Une fois la matière solidifiée, du moins partiellement, le moule est ouvert et la pièce est éjectée. Le moulage par injection est un procédé de mise en forme finie ou quasi finie «near net shape process». C'est-à-dire que la plupart du temps, les pièces moulées ne nécessitent pas d'autres opérations (usinage, soudage, polissage, etc.)

Au Québec, en 2004, on retrouve 204 entreprises dont les activités principales sont reliées au moulage par injection (**Centre de Recherche Industrielle du Québec**). Parmi celles-ci, 120 sont mouleurs, 72 oeuvrent en fabrication de moules et 12 en distribution d'équipement. De plus, quantités d'entreprises possèdent des presses à injecter pour fabriquer des pièces sans que ce soit l'une de leurs activités principales. Aux États-unis seulement, en 2003, 3290 presses à injection ont été livrées à une valeur moyenne de 209 270 \$US par machine (**Society of the Plastics Industries Inc 2004**). Le tiers du volume de polymère produit est moulé par injection. Le moulage par injection est donc le procédé le plus important de l'industrie de la plasturgie. Les autres principaux procédés sont l'injection soufflage, le thermoformage, le moulage par transfert de résine, le moulage par compression, le moulage réactif (RIM) et l'extrusion.

1.1.1 Le processus

Pour fabriquer des pièces par injection, on a premièrement besoin d'une presse. Les presses sont principalement classifiées selon leur force de fermeture. Grossièrement, leur tonnage varie de 5 à 9600 tonnes métriques, donc 50 à 96 000 kN respectivement pour la plus petite presse BOY-12 et la plus grande presse MIR HMPC (**Plastiques &**

Élastomères 2004). On exclut ici les systèmes de micro moulage. Les tonnages les plus élevés permettent de fabriquer des pièces avec de grandes surfaces projetées, par exemple, des pièces de carrosserie de véhicules. Cependant, la majorité du parc machine est constitué de presses entre 30 et 600 tonnes de force de fermeture. Une presse est habituellement composée de deux parties : l'unité de fermeture/outillage et l'unité de plastification/injection, voir Figure 1-1. En plus de la presse, le processus nécessite un moule, la plupart du temps fait d'un matériau métallique. Normalement, un moule est composé de deux parties, l'une solidaire au plateau mobile de la presse et l'autre solidaire au plateau fixe de la presse. Un schéma de moule est montré à la Figure 1-2.

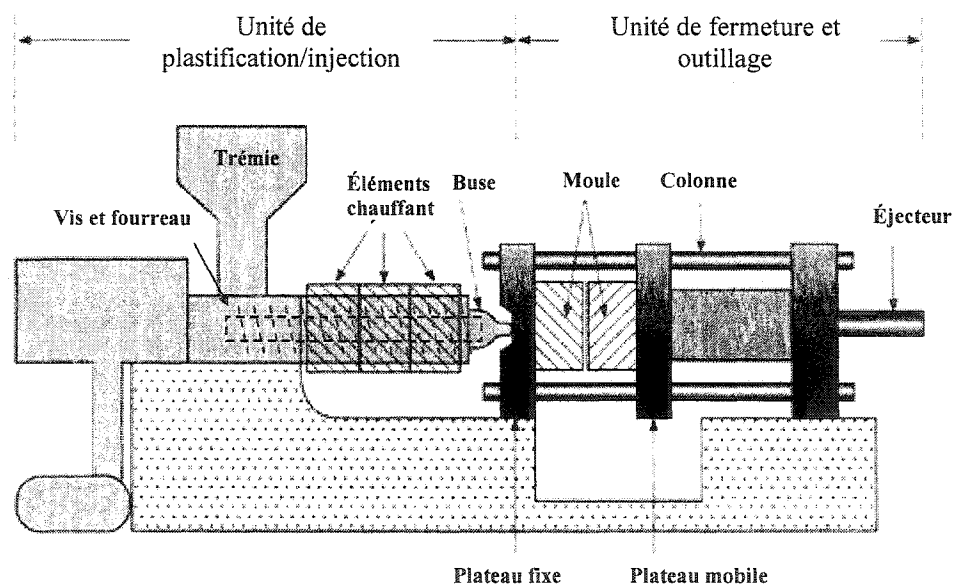


Figure 1-1 : Schéma montrant une presse à injecter et ses principales composantes. (Penn Plastics Inc.)

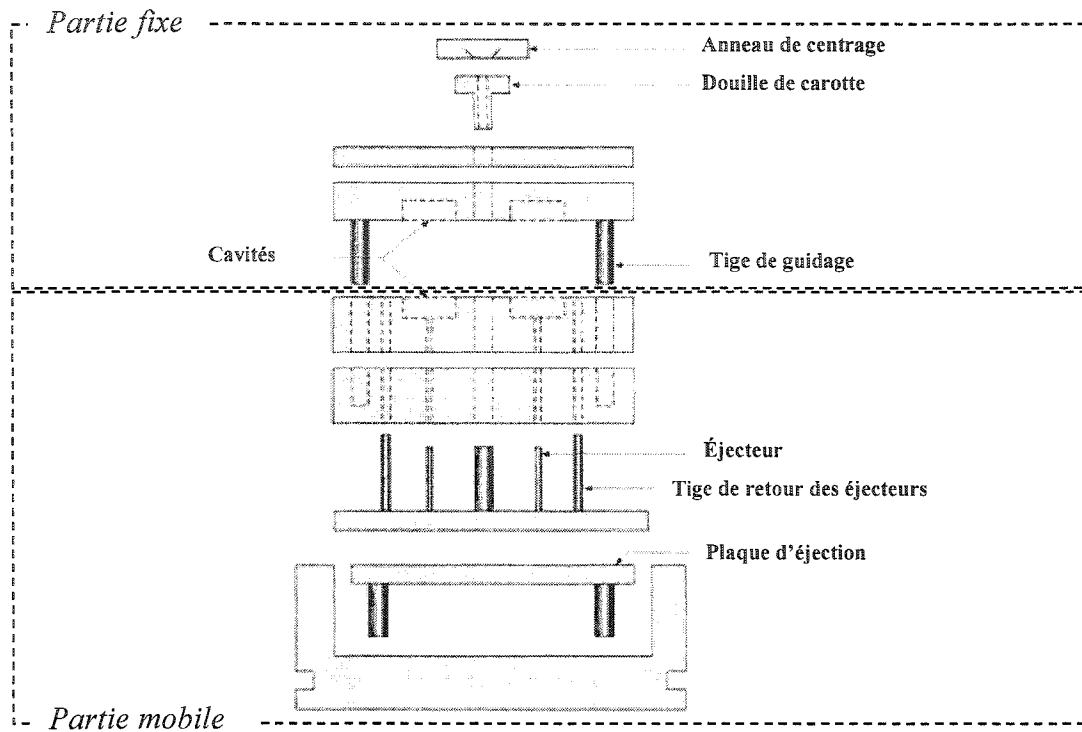
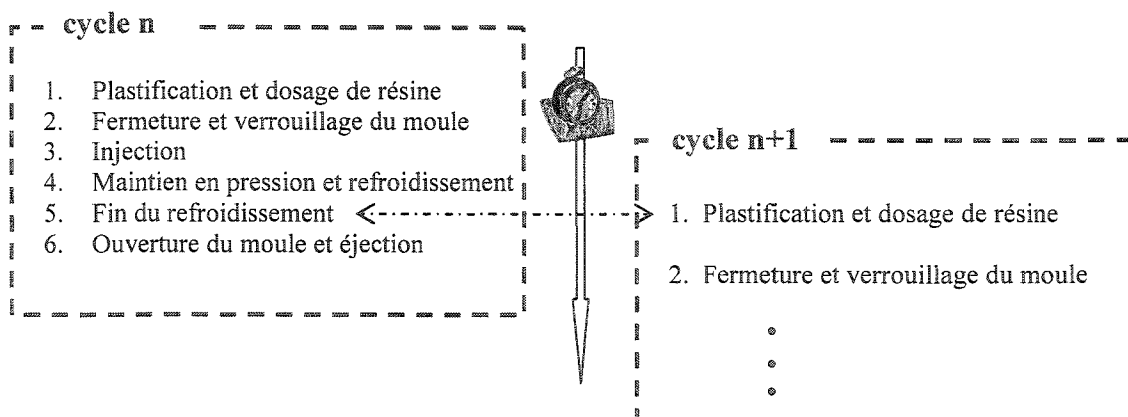


Figure 1-2 : Schéma simplifié d'un moule pour l'injection et ses principales composantes. (Penn Plastics Inc.)

Dans le cas classique du moulage par injection des polymères, la matière est introduite sous forme liquide dans le moule. Un cycle d'injection comprend normalement 6 étapes :



Lors de la plastification de la résine, la vis tourne dans le fourreau avec une légère contre pression. Ainsi, la matière avance dans le fourreau et, simultanément, la vis recule. Le cisaillement et l'apport de chaleur par les bandes chauffantes augmentent la température de la résine aux environs de 20-30°C au dessus de sa température de fusion. La plastification a cours jusqu'à ce qu'un coussin de matière suffisant en volume soit situé en tête de vis (dosage de résine). La fermeture du moule consiste en l'approche du plateau mobile à grande vitesse mais faible pression jusqu'à ce que les deux parties du moule soient presque en contact. Le verrouillage est l'étape où le moule est scellé par une force suffisante. Une fois le moule verrouillé, la vis avance sans tourner dans le fourreau tel un piston pour provoquer l'écoulement de la matière dans le moule. C'est l'étape d'injection qui dure habituellement près d'une seconde, selon la consigne. Lorsque le moule est rempli, la presse passe en phase de maintien en pression pendant que la pièce se solidifie. La phase de maintien permet non seulement d'empêcher la matière de ressortir du moule après l'injection mais aussi d'introduire une faible quantité de matière pour compenser le changement de volume spécifique de la matière avec la température. En effet, lors de leur solidification, les polymères subissent parfois des changements morphologiques importants (cristallisation). Aussi, les polymères ont des coefficients d'expansion thermique typiquement d'un ordre de grandeur plus élevé qu'un acier. Sans période de maintien en pression, et apport supplémentaire de matière, les dimensions et les formes des pièces seraient très différentes de celles du moule. Lorsque le temps de maintien est terminé, la vis se remet à plastifier la matière pour le prochain cycle. Durant ce temps, le refroidissement de la pièce continue jusqu'au déverrouillage et à l'ouverture à grande vitesse du moule et éjection de la pièce. L'éjection est exécutée par les éjecteurs (tiges mobiles) ou une plaque de dévêtissage avec une force suffisante.

L'optimisation du temps de cycle est une des préoccupations majeures des mouleurs et concepteurs de moule. En effet, sur des pièces fabriquées à haut volume, une augmentation du temps de cycle de quelques secondes peut faire une différence substantielle sur la rentabilité de production d'une pièce.

1.1.2 Les matériaux

Le moulage par injection utilise les polymères comme matières à mouler. Le polymère ou résine est habituellement acheté sous forme de granules de quelques millimètres de diamètre. Bien que le moulage par injection des métaux (MIM ou thixomoulage) et des céramiques (CIM) existent, ces procédés sont relativement marginaux pour l'instant. La production américaine de polymère est présentée au Tableau 1-1. La plupart des thermoplastiques sont moulables par injection. Cependant, des grades spécifiques plus fluides sont normalement utilisés pour ce procédé. La fluidité d'une résine est indiquée industriellement par le MI ou MFI : «Melt Index» ou «Melt Flow Index» (Griff 2003). Cet indice en g/10min est une quantité trouvée expérimentalement par un appareil nommé «melt indexer». Grossièrement, cet appareil est constitué d'un tube capillaire de dimensions normalisées dans lequel du polymère fondu est forcé de s'écouler par un piston entraîné par le poids d'une masse. Le débit massique de polymère écoulé est trouvé en g/10min. La température et la masse à employer sont données pour chaque résine par la norme ASTM D1238. Le MI est un indice de la moulabilité d'une résine mais ne constitue pas une caractéristique physique très pertinente. La viscosité des polymères est en effet fonction de la température et du taux de cisaillement.

Tableau 1-1 : Production américaine de polymères en 2003. (American Plastics Council 2004)

Resin	Production (1)		
	2003	2002	% Chg 03/02
Epoxy (2)	578	655	-11.8
Ureia and Melamine (3)	3,174	3,219	-1.4
Phenolic (3)	4,442	4,438	0.1
Total Thermosets	8,194	8,312	-1.4
LDPE (2)(3)	7,894	8,040	-2.9
LLDPE (2)(3)	11,137	11,529	-1.7
HDPE (2)(3)	15,709	15,969	-1.6
PP (2)(3)	17,665	16,956	4.2
ABS (2)(4)	1,262	1,315	-4.0
SAN (2)(4)	121	130	-6.9
Other Styrenics (2)(4)	1,596	1,602	-0.4
PS (2)(3)	6,393	6,669	-4.1
Nylon (2)(4)	1,279	1,274	0.4
PVC (3)	14,702	15,297	-3.9
Thermoplastic Polyester (2)(4)	7,587	7,247	4.7
Total Thermoplastics	85,255	85,828	-0.7
Subtotal	93,449	94,140	-0.7
Engineering Resins (3)(5)	2,612	2,734	-4.5
All Other (6)	10,913	10,612	2.8
Total Engineering & Other	13,525	13,346	1.3
GRAND TOTAL	106,974	107,486	-0.5

(1) En millions de lbs sur une base sèche

(2) Inclus importations

(3) Inclus le Canada

(4) Inclus le Canada et le Mexique

(5) Inclus POM, fluoropolymères, polyamide-imide, PC, polyester thermoplastique, polyimide, PPO, PPS, polyetherimide et cristaux liquides

(6) Inclus Polyuréthanes (TDI, MDI et polyols), polyesters insaturés et autres

1.1.3 La qualité

La qualité du moulage d'une pièce comprend trois volets (Min 2003) :

1. *Les dimensions et formes de la pièce*
2. *L'apparence*
3. *Les propriétés mécaniques*

Pour contrôler les dimensions et les formes d'une pièce injectée, la première variable à considérer est la géométrie du moule. En effet, il est peu probable que les défauts des pièces soient moindres que ceux de la matrice. D'autre part, les paramètres d'injection sont des variables qui peuvent devenir aussi, sinon plus importantes que la géométrie du moule. Parmi les paramètres d'injection, on retrouve : la vitesse d'injection (V_{inj}), la pression de maintien (P_m), la température du fluide injecté (T_{inj}) et la pression dans la cavité (P_c). Remarquons que toutes ces variables interagissent entre elles et que leur effet est fonction de la géométrie du moule, de la matière injectée et de la dynamique de refroidissement de la pièce. De plus, l'injection est un processus fortement transitoire. En fait, les défauts de forme et dimensionnels, peuvent surtout être attribuables aux phénomènes de retrait et de gauchissement. Les problèmes qui peuvent être rencontrés sont des difficultés d'assemblage et des déficiences fonctionnelles. Les exigences dimensionnelles peuvent par exemple être critiques lors du moulage de produits optiques (Wimberger-Friedl 1995) ou mécaniques de précision comme des engrenages de classe élevée (Smith et al. [2000?]) ou des connecteurs électroniques (Xia et al. 1997). Mentionnons également l'intégration de micro composantes (10 μm) moulées par injection (Mcfarland et al. 2004).

L'apparence de la pièce est également fonction des paramètres énoncés précédemment mais aussi de l'état de surface du moule. Les moules sont donc souvent polis ou texturés. Aussi, la pigmentation offre de multiples possibilités de coloration de la résine. Au niveau du moulage, mentionnons qu'une trop faible pression de maintien

cause des retassures (gondolement) en surface, surtout lorsqu'il y a des changements de section. Aussi, une vitesse d'injection trop élevée peut causer des effets de surface indésirables. La qualité au niveau de l'apparence est évaluée plus subjectivement mais ne doit pas moins être considérée.

Les propriétés mécaniques sont également fonctions des paramètres d'injection et de la conception du moule. Les contraintes résiduelles d'origine thermique par exemple, changent le comportement mécanique, surtout la résistance à l'impact. Aussi, les lignes de soudure causées par la rencontre de fronts d'écoulement dans les géométries complexes peuvent influencer la résistance d'une pièce injectée.

1.1.4 CAE en moulage par injection

Il existe plusieurs outils permettant de simuler le processus d'injection par ordinateur (IAO). Ces outils permettent d'acquérir certaines informations utiles au concepteur. Par exemple, la position des lignes de soudure, le retrait, le gauchissement, le temps de cycle et les pressions et vitesses locales. Il est aussi possible de choisir judicieusement la position des points d'injection, des canaux de refroidissement et de juger la moulabilité d'une configuration. (Marinero 2003)

Traditionnellement, les logiciels utilisent une approche 2,5D. Cette approche consiste en la création d'un modèle de plan milieu qui peut être généré à partir d'un modèle CAO en 3D. Ce modèle dégénéré est ensuite décomposé en éléments 1D ou 2D auxquels sont attribués un rayon hydraulique ou une épaisseur (Kim et al. 2004). Des couches sont superposées dans le sens de l'épaisseur. Les bilans de masse, d'énergie et de quantité de mouvement sont résolus par éléments finis et la méthode des différences finies est utilisée pour faire le lien entre les couches et trouver l'évolution dans le temps. Cette approche néglige habituellement l'inertie du fluide (comportement purement visqueux) et la composante z de la vitesse au front d'écoulement. Les transferts de

chaleur par convection dans cette direction sont négligés tout comme la conduction dans le plan.

Le problème principal du 2,5D est lorsque l'écoulement possède une composante en z : lors du passage de changements de sections abruptes, au front d'écoulement (écoulement fontaine) ou dans des géométries complexes. Des problèmes sont également présents lorsqu'il y a rencontre de fronts d'écoulement ou changements abruptes de direction. **(Kim et al. 2004)**

Certains logiciels font maintenant des simulations 3D mais sont limités en résolution. Pour obtenir le même niveau de résolution qu'en 2,5D sur tout le domaine, les temps de calculs et espace mémoire sont excessifs. Par contre, en utilisant de nouveaux algorithmes et la méthode des volumes finis, des simulations en 3D de remplissage de moules complexes sont possibles sur ordinateur personnel. **(Kim et al. 2004)** Aussi, aucun logiciel ne tient compte de la déformation du moule sous pression qui serait en partie la cause des différences importantes observées entre les simulations et les mesures de retrait volumétrique **(Delaunay et al. 2000)**.

Cependant, les diagrammes P-v-T montrent l'évolution du volume spécifique à l'équilibre. Il a été montré que les polymères se comportent différemment due à divers aspects du moulage par injection.

- Les taux de refroidissement beaucoup plus importants
- Zones de retraits contraints selon une ou plusieurs directions
- Effets de l'écoulement

En effet, il a été montré que les polymères se comportent différemment pour des taux de refroidissement élevés. De plus, dans un moule, il existe souvent des zones où la matière ne peut pas se rétracter librement. Les effets de l'écoulement (retrait anisotrope) ne sont pas plus expliqués dans les diagrammes P-v-T. Des études morphologiques de produits injectés montrent la présence d'une couche de matière solidifiée sous cisaillement. Cette solidification sous contrainte expliquerait possiblement les importantes différences de retrait mesurées dans le sens de l'écoulement et dans le sens transverse (perpendiculairement à l'écoulement). À cause des phénomènes mentionnés ci-haut, le retrait n'est pas le même selon les trois directions.

Selon une direction arbitraire, on définit le retrait par l'équation (1). Le retrait volumique est défini par l'équation (2).

$$R = \frac{l_m - l_p}{l_m} \quad (1)$$

$$R_v = \frac{V_m - V_p}{V_m} \quad (2)$$

Où l_m est une dimension dans le moule et l_p la dimension correspondante sur la pièce et où V_m est un volume de moule et V_p un volume de pièce.

Les retraits selon trois directions orthogonales sont reliés au retrait volumique R_v par l'équation (2).

$$R_v = 1 - (1 - R_x) \cdot (1 - R_y) \cdot (1 - R_z) \quad (3)$$

Régnier et al. (Régnier et al. 1993) utilisent une définition corrigée pour l'expansion thermique du moule entre la température d'utilisation et la température lors de la mesure, voir équation (3).

$$R = \frac{l_m (1 + \alpha(\theta_m - \theta_a)) - l_p}{l_m (1 + \alpha(\theta_m - \theta_a))} \quad (4)$$

Où α est le coefficient d'expansion thermique du moule, θ_m et θ_a sont respectivement la température du moule lors du moulage et la température ambiante (température de mesure). Cette définition s'approche peut-être plus de la physique du phénomène. Cependant, la valeur absolue du retrait n'existe pas vraiment, on mesure en fait toujours un retrait moyen. À l'extrême, chaque chaîne de polymère subit son propre retrait en changeant de volume occupé ou de conformation. Comme on considère plutôt des différences de retrait, la correction est peu utile.

Certains auteurs (Delbarre et al. 1991) proposent plutôt de ne considérer que les changements relatifs de retrait en fonction des changements relatifs de paramètres. Ceci équivaut à utiliser des valeurs normalisées au lieu de valeurs absolues.

1.2.2 Mesure du retrait

Des essais de mesure de retrait ont été conduits par différentes méthodes et pour diverses géométries. On a aussi procédé à des essais de mesure de retrait dans le sens de l'écoulement et dans le sens transverse. Des mesures dites locales sont effectuées

lorsque des dimensions courtes par rapport à la taille de la pièce sont mesurées. L'intérêt de mesurer le retrait localement est de comprendre pourquoi certaines zones montrent des retraits anormalement différents du retrait moyen. Il est possible de créer de petites entités en usinant des marques dans les moules qui sont reproduites à la surface des pièces moulées. Le Tableau 1-2 montre les méthodes employées par différents auteurs pour mesurer le retrait au moulage. On remarque que les géométries sont généralement soit très simples (plaques, barres et disques) soit complexes (cellulaires, boîtiers). On voit aussi que les méthodes de mesures et l'incertitude associée sont assez variables. Aussi, les incertitudes ne sont pas évaluées de la même façon dans tous les cas.

1.2.3 Effet connu des paramètres de mise en forme

Le Tableau 1-3 montre l'effet de certains paramètres de mise en forme sur le retrait. Il semble y avoir consensus quant à l'effet de la pression de maintien (P_m) sur le retrait. La pression de maintien serait même le paramètre le plus influent. Par contre, l'effet des autres paramètres et variables, la vitesse d'injection (V_{inj}), la température d'injection (T_{inj}), la pression dans la cavité ($P_{cavité}$), la température du moule (T_{moule}) et la distance au seuil (D_{seuil}) n'est pas aussi nets. La confusion est évidente pour la vitesse d'injection (V_{inj}) : 4 auteurs affirment qu'elle n'a pas d'effet significatif alors que 3 affirment le contraire et 6 ne se prononcent pas sur cet effet. Une forte anisotropie est constatée par certains auteurs (Jansen et al. 1998), (Xia et al. 1997) bien qu'ils n'affirment pas que la vitesse d'injection ait un effet. Ces résultats sont à première vue contradictoires puisque l'anisotropie est causée par l'orientation moléculaire induite par le cisaillement, donc par l'écoulement.

Tableau 1-2 : Études expérimentales sur le retrait.

<i>Auteur</i>	<i>Géométrie du moule</i>	<i>Mesure locale</i>	<i>Sys. de mesure</i>	<i>Notes sur incertitude</i>
(Régnier et al. 1993)	Plaque	√	Caméra CCD Plateau motorisé	$\sigma = 2,75 \mu\text{m}$ sur l_p
(Delbarre et al. 1991)	Spirale Éprouvette ISO1		n.d.	n.d.
(Jansen et al. 1998)	Plaque	√	Microscope	$\sigma = 15 \mu\text{m}$ sur l_p
(Liao et al. 2004)	Couvert de cellulaire	√ *	Scanner Cyclone PolyCAD PolyWorks	$\sigma \approx 7 \mu\text{m}$ sur l_p
(Min 2003)	Boîtier	√	MMT	n.d.
(Xia et al. 1997)	Base de relais multicavité (8)		MMT	$\sigma = 10 \mu\text{m}$
(Chang et al. 2001)	Barre		Micromètre digital	Précision 25,4 μm
(Schift et al. 2000)	Disque Compact	√	Microscope électronique Leica LION LV1 Extracteur d'arrête	Précision 0,1 μm
(Mamat et al. 1995)	Plaque	√	Projecteur de profil	Résolution 12,5 μm
(Chang et al. 2002)	Barre		MMT	Précision 0,3 μm
(Gipson et al. 1999)	Plaques ép. variable	√	Caméra vidéo MMT	0,0002 cm/cm
(Kumazawa 1994)	Plaques ép. variable		MMT	n.d.
(Pierick et al. 1991)		√	MMT	$\sigma = 2 \mu\text{m}$ sur l_p
(Delaunay et al. 2000)	Plaque R constraint partiellement	√	n.d.	$\sigma = 0,05\%$ sur retrait

* √ Indique que le retrait a été mesuré en divers endroits sur la pièce mais non systématiquement.

Tableau 1-3 : Synthèse des effets de certains paramètres de moulage sur le retrait, – indique que l’auteur n’attribue pas d’effet significatif du paramètre sur le retrait. Les nombres (1), (2) et (3) montrent l’importance relative de chaque paramètre lorsque mentionné par l’auteur.

<i>Auteur</i>	<i>Matière</i>	<i>Effet sur le retrait d’une augmentation du paramètre</i>					
		P_m	V_{inj}	T_{inj}	$P_{cavité}$	T_{moule}	D_{seuil}
(Régnier et al. 1993)	PA	↓	↑				
(Delbarre et al. 1991)	PP, PPc, PPfv	↓		↓			↑
(Jansen et al. 1998)	PBT, PBTfv, PC, PS, HDPE	↓	-	-		-	
(Liao et al. 2004)	PC/ABS	↓	-			significatif	
(Min 2003)	HIPS	significatif	significatif				
(Xia et al. 1997)	PAfv	↓				↑	
(Chang et al. 2001)	PS, ABS, HDPE	(3)		(2)		(1)	
(Schift et al. 2000)	PC						↑
(Mamat et al. 1995)	PP, PPc	↓	↑	↓		↑	
(Chang et al. 2002)	PS	↓(3)		↓(2)		↓(1)	
(Gipson et al. 1999)	8 grades de PP		-	↓	↓	↑	
(Kumazawa 1994)	PC/ABS	Seul significatif					
(Pierick et al. 1991)	PPOc, PPOc-fv	(1)	-	Effet loin du seuil seulement	Le mieux corrélé	-	

Certains auteurs notent également l’effet d’autres variables. Par exemple, Xia et al. constate l’effet de la position de l’empreinte sur le retrait dans un moule multi-cavité. Delaunay et al. montre que la déformation du moule sous pression influence significativement les valeurs mesurées de retrait au moulage dans le sens de l’épaisseur. Cet effet expliquerait en partie, selon Delaunay, pourquoi les résultats de retraits volumiques calculés par un logiciel de simulation (Mold Flow) diffèrent des résultats expérimentaux. Les retraits dans le plan seraient par contre peu affectés par les déformations du moule utilisé.

2 CONCEPTION DU MOULE D'OBJET TYPE

2.1 Objectif

On a vu que les pièces utilisées pour les mesures de retrait sont soit des géométries très simples (plaques, barres), soit complexes (cellulaires, boîtiers). Les pièces simples n'ont pas de zones contraintes en retrait, la pièce est donc libre de se déplacer dans le moule pendant la solidification. Par contre, ceci n'est jamais le cas pour des pièces réelles. Aussi, pour les géométries simples, l'écoulement dans le moule est assez régulier puisqu'il n'y a pas de changements de section, ni changements de direction. Il n'y a pas non plus d'écoulements complexes autour d'obstacles (trous, nervures ou autres). On a voulu concevoir un objet-type intermédiaire qui permettrait, d'investiguer non seulement l'effet des paramètres de moulage mais aussi de simuler certains phénomènes dus à la géométrie du moule tels que le retrait contraint. On a aussi voulu avoir un moule modulable, c'est-à-dire un moule permettant de fabriquer un ensemble de pièces. La géométrie des pièces différerait légèrement en épaisseur ou en configuration.

De plus, nous voulions être capable de mesurer le retrait d'une manière locale, donc obtenir un champ de retrait sur toute la pièce. Pour ce faire, nous devons prévoir une méthode de marquage pour créer des entités, probablement de petite taille, à la surface du moule et donc des pièces. Un système de mesure compatible avec la méthode de marquage devait également être trouvé.

2.1.1 Contexte et Contraintes

Le Centre de Recherche Appliquée sur les Polymères (CRASP) possède un certain nombre de laboratoires et d'équipements de transformation des matières

plastiques, dont une presse électrique Sumitomo SE50S, un moule à injection et une quantité d'inserts.

Le moule du CRASP possède deux cavités rectangulaires où sont placés les inserts pour fabriquer des plaques, des échantillons pour essais de traction, des échantillons pour essais d'impact et autres. Les cavités sont situées dans la partie mobile du moule afin que les pièces puissent être éjectées. Dans la partie fixe, il n'y a pas de cavité. La partie fixe est donc essentiellement une plaque contenant la moitié des canaux d'alimentation. Les géométries possibles sont limitées par le fait que la partie fixe ne peut recevoir d'inserts pour former un véritable couple noyau/cavité nécessaire pour créer des pièces n'étant pas obligatoirement planes d'un côté. L'alimentation du moule se fait par le centre. Il est généralement déconseillé de faire travailler uniquement la moitié d'un moule. Il serait donc préférable de pouvoir mouler deux pièces en même temps afin que le moule soit équilibré, la pression est alors mieux répartie sur tout le plan de joint.

La presse limite également la conception du moule. Les paramètres les plus importants à considérer pour la presse sont la force de fermeture maximale et la capacité d'injection de matière. La force de fermeture disponible limite la surface projetée maximale de la pièce sur le plan d'ouverture du moule. Pour rendre le démoulage possible et facile, la pièce ne peut pas être orientée de n'importe quelle manière dans le moule. La capacité d'injection doit aussi être suffisante afin de fournir assez de matière pour toute la pièce. Néanmoins, les pièces injectées sont habituellement de faible épaisseur mais de grande surface. Pour cette raison, la capacité d'injection est potentiellement moins critique que la force de fermeture de la presse.

D'autres paramètres doivent aussi être pris en considération tels que la pression maximale d'injection, la force maximale d'éjection, la distance entre les colonnes, l'espace disponible pour le moule entre les plateaux. Les principales spécifications pour la presse SE50S sont montrées au Tableau 2-1.

Tableau 2-1 : Principales spécifications de la presse SE50S.

Force de fermeture	50 tonf (500 kN)
Distance entre les colonnes	310 X 310 mm
Espace pour le moule	Min. 160 mm
	Max. 350 mm
Force d'éjection max	2.2 kN
Pression d'injection max.*	130 MPa
Capacité d'injection*	84 cm³

*Pour la vis de 32 mm

2.2 Conception

2.2.1 Choix de géométrie d'objet type

Le choix de la géométrie de la pièce est celle d'une plaque à épaisseur constante avec une partie centrale d'épaisseur et de configuration variable. Certaines géométries possibles sont montrées à la Figure 2-1. La partie centrale a comme fonction de créer une zone de retrait contraint selon la direction du remplissage. Le retrait demeure libre dans les deux autres directions. Pour cette partie, un bloc mobile et un jeu de cales de diverses épaisseurs devaient être prévus. Afin d'avoir un moule équilibré, deux pièces devaient être fabriquées en même temps. Il a été décidé de prendre avantage de cette contrainte en utilisant deux types de seuil d'injection : un seuil en film et un seuil conventionnel. Le seuil d'injection est l'endroit par où le moule se remplit. Une fois le seuil solidifié, aucune matière supplémentaire ne peut être introduite dans le moule. Le seuil film permet d'avoir un écoulement unidirectionnel pour toute la pièce si on néglige les effets des parois. Le seuil conventionnel devrait donner un écoulement dans les deux directions, il est plus représentatif des seuils utilisés industriellement en moulage par injection.

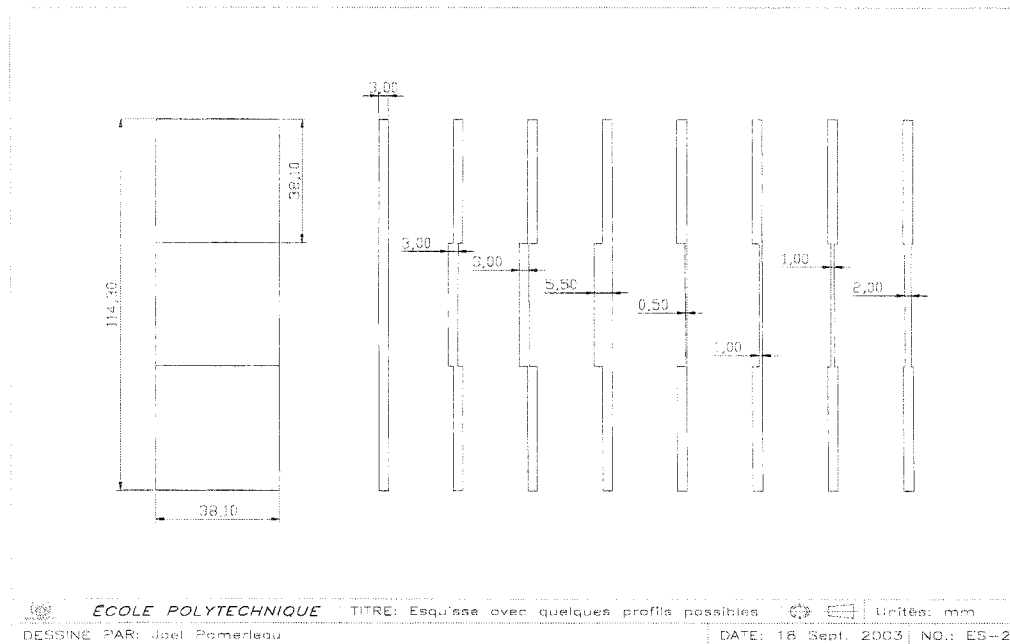


Figure 2-1 : Géométrie choisie pour l'objet type.

2.2.2 Conception d'une nouvelle partie fixe

Comme mentionné précédemment, la partie fixe du moule du CRASP ne pouvait accueillir d'inserts, ce qui était nécessaire pour créer les géométries voulues. Après discussions avec différents intervenants, il a été choisi de fabriquer une nouvelle partie fixe pour le moule. L'usinage d'importantes cavités dans la partie fixe existante risquait de libérer des contraintes et peut-être la déformer. En effet, cette pièce est comprimée à chaque cycle d'injection par une force importante et le jeu entre les tiges de guidage et leurs douilles est réputé assez faible, environ $12\text{ }\mu\text{m}$. Pour fabriquer une nouvelle partie fixe, les deux parties existantes du moule ont été mesurées à l'aide de la machine à mesurer tridimensionnelle (MMT) LK G90C 8.7.6 . Cet appareil a une précision, spécifiée par le fabricant, d'environ $4,5\text{ }\mu\text{m}$ pour chacun des trois axes et une résolution de $0,1\text{ }\mu\text{m}$ (Quality Digest Online [1998?]).

Les items mesurés sont montrés à la Figure 2-2 pour la partie fixe et à la Figure 2-3 pour la partie mobile. Les deux parties furent mesurées subséquemment. L'objectif

spécifique de la mesure par MMT était de connaître le diamètre des tiges de guidage et leur jeu moyen avec les trous de guidage. Leur position relative ainsi que la position relative de certains éléments par rapport aux tiges étaient aussi importantes à connaître. Pour cette raison, le système de référence a été défini par rapport aux tiges et aux trous. Pour créer le système de référence, trois points ont d'abord été palpés sur le marbre, près des pièces, pour former le plan primaire. Ensuite, le centre de deux tiges (trous) a été trouvé puis enregistré afin de créer le plan secondaire. Le centre d'une des tiges (trous) est ensuite rappelé pour la création du plan tertiaire. Le système de référence créé a ensuite subi une translation de 50,8 mm selon z afin d'être à la surface du plan de contact. Les systèmes de référence résultants, centrés sur la tige ou le trou #1, sont montrés à la Figure 2-2 et à la Figure 2-3. Les pièces ont ensuite été remesurées après une rotation de 90° et en positionnant cette fois le système de référence sur la tige et le trou #3. La cohérence des mesures fut vérifiée.

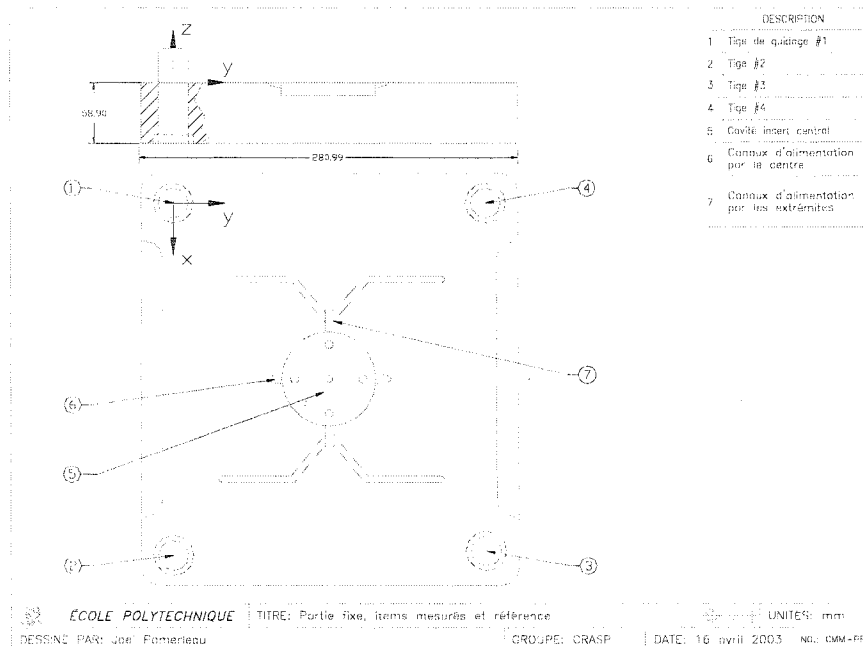


Figure 2-2: Plan montrant les items mesurés avec la MMT pour la partie fixe.

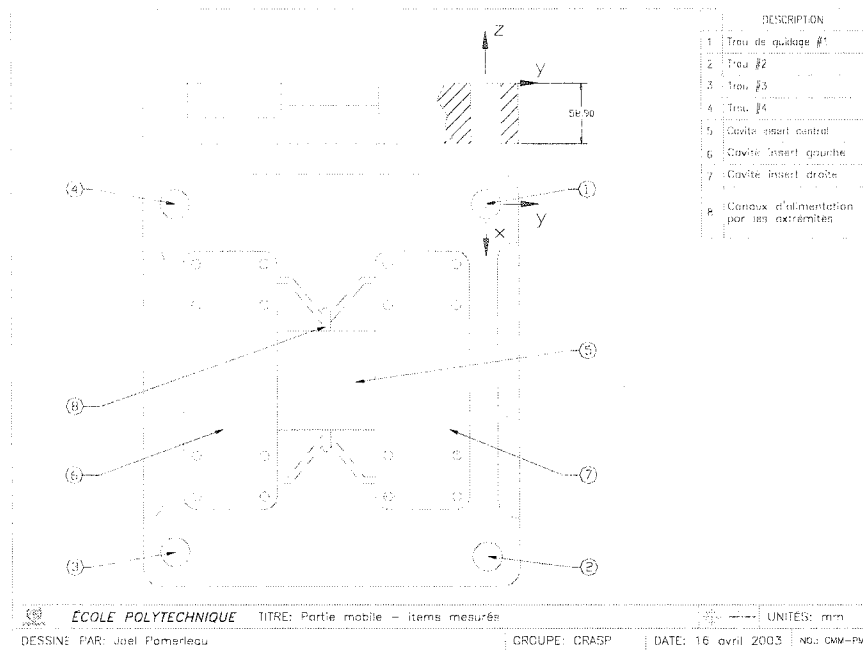


Figure 2-3: Plan montrant les items mesurés avec la MMT pour la partie mobile.

Chaque tige et chaque trou ont été mesurés deux fois. La moyenne du diamètre des quatre tiges est de 22,189 mm et le diamètre moyen des quatre trous est de 22,227 mm. Ainsi, le jeu diamétral moyen est de 38 μm , ce qui était légèrement plus qu'attendu. L'usure des tiges et des trous étant probablement en cause. L'inspection par MMT a aussi permis de constater qu'une des tiges de guidage (#3) et sa contrepartie sont décentrées de 3,175 mm selon l'axe x. Ce qui n'était pas nécessairement visible à l'œil nu. Cette mesure a sans doute comme fonction d'éviter l'assemblage du moule à l'envers.

Les trous pour l'insertion des tiges de guidage dans la nouvelle partie fixe ont donc été positionnés selon les mesures prises par MMT. La nouvelle partie fixe est essentiellement une réplique de l'ancienne excepté l'ajout de deux cavités rectangulaires. Comme mentionné précédemment, ces cavités serviront à accueillir les inserts de la partie fixe. Le système de refroidissement a également été modifié afin d'être connecté directement dans les inserts. Deux inserts pleins ont aussi été conçus. Les plans furent exécutés avec le logiciel de dessin AutoCAD-v2000 et sont montrés à l'Annexe A-1. Ils

sont numérotés de PFN-1 à PFN-7. Des composantes de moule normalisées ont également été achetées chez DME Inc, équipementier en moulage. Ces composantes sont l'anneau de centrage, les tiges de guidage, la bague d'alimentation et un goujon de guidage. Les plans de ces composantes sont aussi montrés à l'Annexe A-1. Le diamètre nominal des tiges de guidage achetées est légèrement supérieur ($10\text{ }\mu\text{m}$) au diamètre moyen mesuré pour les anciennes. Le jeu diamétral moyen devrait alors devenir $28\text{ }\mu\text{m}$.

Le matériau spécifié pour la partie fixe est un acier P-20. Une fois fabriquée et reçue, la nouvelle partie fixe a directement été montée dans la presse à injecter. Son bon fonctionnement en service a été constaté en moulant quelques pièces.

2.2.3 Conception des inserts

Durant la phase de fabrication de la nouvelle partie fixe, les inserts ont été conçus en détails. Pour la conception des inserts, nous devons premièrement trouver les dimensions finales des pièces désirées. Nous voulions maximiser leur surface tout en s'assurant que celles-ci soient injectables (donc qu'elles rencontrent les contraintes mentionnées en 2.1.1).

Pour une épaisseur moyenne de $2,3\text{ mm}$, la force de verrouillage nécessaire pour conserver l'étanchéité est trouvées de façon empirique. Elle est de $0,031\text{--}0,047\text{ kN}$ par mm^2 de surface projetée (**Sanschagrin, Notes De Cours - MEC8903**). Comme la surface projetée est approximativement de $11\text{ }100\text{ mm}^2$, la force de verrouillage requise est de 344 kN à 521 kN . La force de fermeture est environ égale à la force de verrouillage multipliée par un facteur de 1,1 (**Sanschagrin, Notes De Cours - MEC8903**). Ainsi, la presse doit être capable d'exercer une force de fermeture maximale d'au moins 378 kN à 573 kN . On a vu au Tableau 2-1, que la presse a une force maximale de fermeture de 500 kN , ce qui devrait être suffisant. On remarque

cependant qu'on ne pourrait probablement pas augmenter beaucoup plus la surface projetée sans risquer d'avoir ouverture du moule en fin d'injection.

Au niveau de la capacité d'injection de la presse, le volume maximal des pièces et des canaux d'alimentation est de $58\,900\text{ mm}^3$ alors que la capacité d'injection maximale est de $84\,000\text{ mm}^3$. La capacité d'injection de la presse sera sans aucun doute suffisante, elle sera utilisée à près de 71%. On note que le volume de la pièce est presque entre 30% et 70% de la capacité d'injection maximale, ce qui correspond à la proportion recommandée pour les pièces de précision. (**Sanschagrin, Notes De Cours - MEC8903**). La géométrie des pièces telles que conçues semble donc rencontrer les contraintes dues à la presse utilisée.

Les plans des quatre inserts ont aussi été produits à l'aide d'AutoCAD-v2000 et sont montrés à l'Annexe A-2. Ils sont notés INS-1 à INS-9. Chaque insert est fixé en position dans sa plaque (partie fixe ou mobile) par quatre boulons. Aussi, chaque insert comprend un bloc mobile qui, à l'aide d'un jeu de cales permettant d'obtenir différentes épaisseurs et configurations. C'est à l'aide de ces blocs que des zones contraintes en retrait sont générées au centre de la pièce. Les blocs sont maintenus en place par deux vis derrière l'insert. Les inserts et les blocs sont en acier H-13, alors que les cales sont en cuivre afin d'essayer de compenser thermiquement pour l'interface entre les deux composantes. Les cales sont d'épaisseur 0,50; 1,00; 1,50; 2,00 et 2,50 mm.

Les cavités pour les pièces sont complètement dans les inserts de la partie mobile, ce détail permet de s'assurer que la pièce demeurera dans le moule après son ouverture. Aussi, afin que la pièce soit plus facilement éjectée, on a ajouté une surface d'environ 0,8 X 1,0 cm pour que l'éjecteur du bas soit en contact avec la pièce. Ainsi, la pièce ne sera pas seulement éjectée au niveau du seuil. De plus, des trous ont du être prévus pour les éjecteurs dans les inserts de la partie mobile. Les inserts comprennent également des canaux de refroidissement situés au centre des pièces.

Le seuil film est sur presque toute la largeur de la pièce, sa profondeur est de 0,75 mm et sa longueur de 1,12 mm. Juste avant le seuil, un canal de distribution est prévu pour que la matière soit distribuée uniformément avant de franchir le seuil, c'est-à-dire qu'elle arrive dans la pièce avec environ la même perte de charge. Les dimensions du seuil latéral sont fixées à 1 x 1 mm avec une longueur moyenne de 0,90 mm. Nous aimerions préférablement que les deux pièces se remplissent à peu près en même temps. Pour cette raison, le seuil latéral est probablement légèrement sous dimensionné. Il sera possible de l'agrandir si cela est jugé nécessaire après des essais de moulage.

Les inserts de la partie fixe ont été construits à partir des inserts pleins déjà fabriqués lors de l'usinage de la nouvelle partie fixe. Les inserts de la partie mobile ont par contre du être usinés à partir du début. Trois des quelques dizaines de pièces possibles sont montrées à la Figure 2-4, ces géométries seulement seront utilisées.

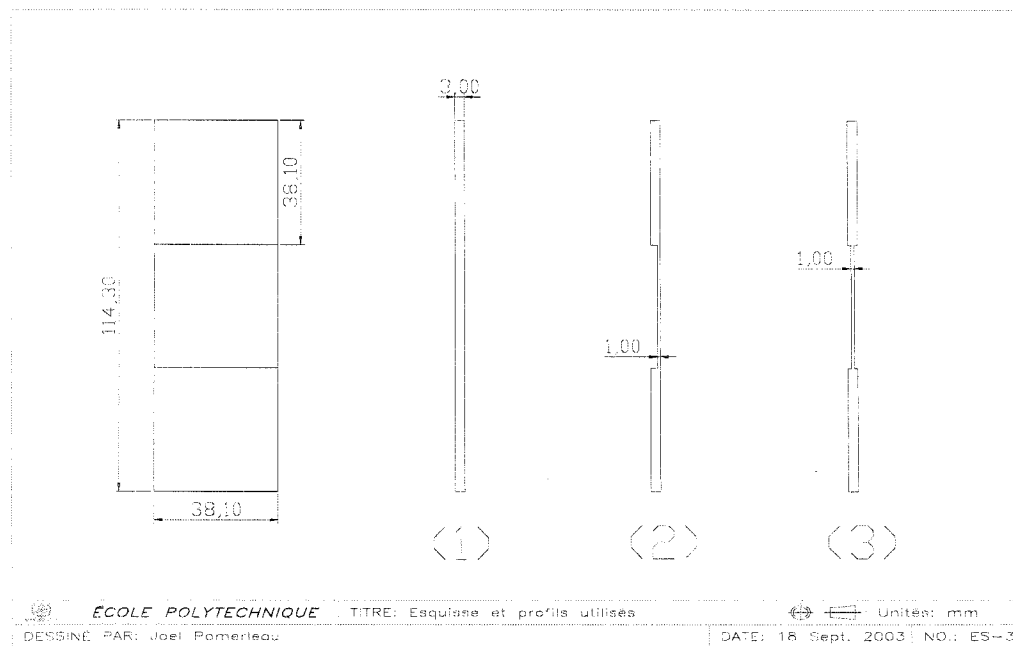


Figure 2-4: Trois géométries de pièces possibles. (1) Épaisseur constante, (2) Épaisseur variable, retrait contraint asymétriquement, et (3) Épaisseur variable, retrait contraint symétriquement.

2.2.4 Essais en service

Lors de la réception des inserts, on a dû procéder à quelques retouches. En effet, lors de l'assemblage des inserts, on a constaté qu'un de ceux-ci était trop épais. Ce problème empêchait l'application de la pression sur l'autre couple d'inserts lors de la fermeture du moule. Il y avait donc bavure excessive du moule. Une inspection avec la MMT a confirmé que cet insert avait 150 μm de trop en épaisseur. Ce dernier a donc dû être rectifié jusqu'à l'épaisseur désirée. Par la même occasion, on a fait certains dégagements facilitant l'assemblage qui semblaient avoir été oubliés par l'usineur. Heureusement, les défauts étaient mineurs et les corrections ont été apportées rapidement.

Lors du second essai de moulage, on a remarqué que le seuil latéral était vraiment trop sous dimensionné par rapport au seuil film. L'insert avec le seuil film se remplissait presque complètement avant que l'insert avec le seuil latéral ne commence à se remplir. L'erreur, cette fois du concepteur, a été corrigée : le seuil latéral a été agrandi lors du marquage des pièces. Les nouvelles dimensions du seuil sont de 1,60 X 1,60 mm pour environ la même longueur moyenne. Avec le seuil latéral agrandi, les deux pièces se remplissent maintenant presque simultanément. Le remplissage de l'insert avec le seuil en film se fait par contre encore un peu plus rapidement que pour l'insert avec le seuil latéral.

3 MÉTHODES ET ANALYSE DE SENSIBILITÉ

3.1 Introduction

3.1.1 Problématique

Le retrait au moulage a été défini précédemment comme étant la différence entre une distance dans le moule et sur la pièce divisée par la distance dans le moule, équation (1). Pour les thermoplastiques, le retrait varie habituellement entre 0 et 0,04 soit (0 et 4%). Normalement, le concepteur de moule assume le retrait constant à une valeur nominale dépendant de la matière utilisée. La problématique de la mesure du retrait est simple et s'énonce comme suit : plus on désire avoir une mesure dite locale du retrait, plus les différences entre les dimensions du moule et de la pièce sont faibles, donc difficilement mesurables.

Si on réduit le retrait à une seule dimension, il est défini par l'équation (1) où x_{1m} est la position du premier repère définissant une distance dans le moule, l_m . Si l'on applique la loi de propagation de l'incertitude à cette définition, l'incertitude sur le retrait est donnée en (2). Après quelques simplifications, on trouve l'expression de l'incertitude sur le retrait en (3).

$$R = \frac{l_m - l_p}{l_m} = \frac{(x_{2m} - x_{1m}) - (x_{2p} - x_{1p})}{(x_{2m} - x_{1m})} \quad (1)$$

$$u^2(R) = \sum_j \sum_i \left[\frac{\partial R}{\partial x_{ij}} u(x_{ij}) \right]^2 \quad (2)$$

Comme $u(x_{1m}) = u(x_{2m}) = u(x_{2p}) = u(x_{1p})$,

$$u(R) = \frac{2}{l_m} * u(x) \quad \text{si } l_m \approx l_p \quad (3)$$

On remarque que l'incertitude sur le retrait est proportionnelle à l'incertitude sur la position d'un repère et inversement proportionnel à la longueur dans le moule. La relation (3) est montrée graphiquement à la Figure 3-1 pour différents $u(x)$.

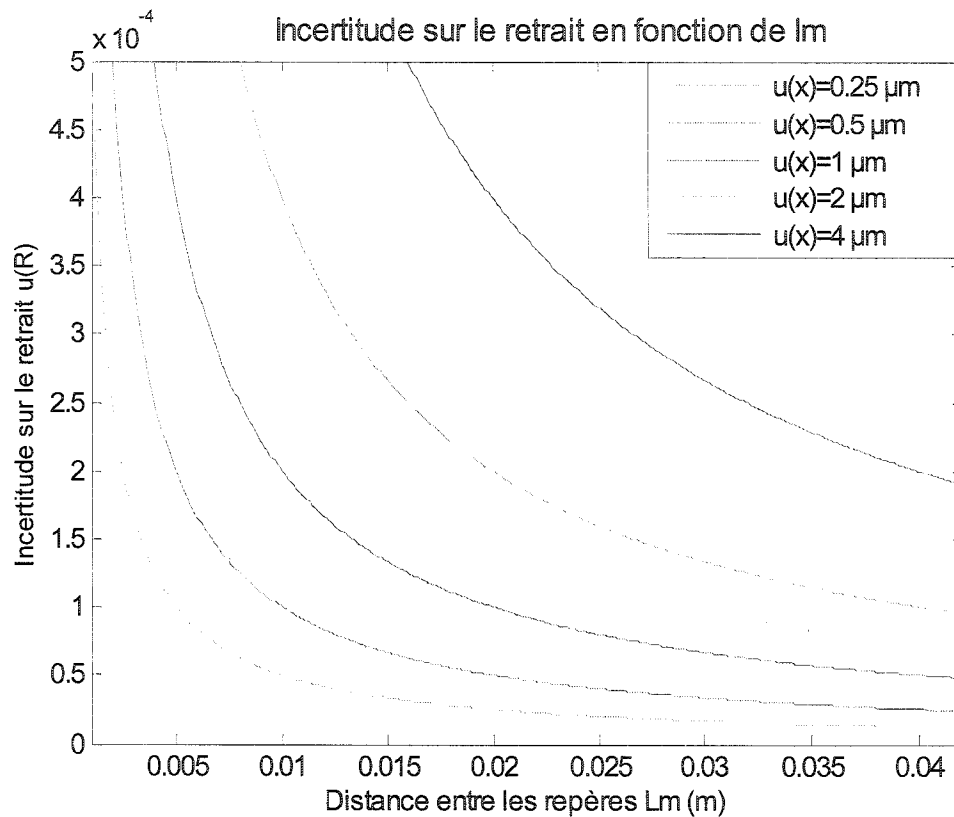


Figure 3-1: Graphique de l'incertitude sur le retrait, $u(R)$, en fonction de la distance dans le moule pour différentes incertitudes sur la position d'un repère $u(x)$.

Ainsi, pour mesurer le retrait d'une manière locale (courte distance entre les repères) et avoir une incertitude associée au résultat acceptable, il est essentiel de diminuer l'incertitude de mesure sur la position d'un repère $u(x)$. D'autre part, pour choisir adéquatement la distance entre les repères, il faut estimer le mieux possible $u(x)$ et se fixer une valeur d'incertitude cible sur le retrait.

3.1.2 Objectif

L'objectif de ce chapitre est donc de présenter les travaux effectués afin de mettre au point une méthodologie de mesure du retrait fiable, c'est-à-dire avec un $u(R)$ associé le plus faible possible. L'appareil utilisé pour les mesures est un profilographe. Quelques essais furent également réalisés par microscopie optique et avec un projecteur de profil. Le profilographe s'étant vite présenté comme le système de mesure le plus performant, les autres essais ne seront pas abordés.

Le profilographe sera d'abord brièvement décrit. Ensuite, une analyse de sensibilité sera effectuée afin d'explorer et de mieux comprendre le processus de mesure du retrait. À partir des résultats de cette analyse, on verra que le défaut de rectitude constitue la source la plus importante d'incertitude sur la mesure du retrait au moulage. Finalement, les résultats de la recherche du procédé de fabrication le plus performant pour le marquage du moule seront présentés. À partir de ces résultats, le choix final du procédé, la distance entre les repères ainsi que la procédure de mesure mise en place seront présentés.

3.2 Le profilographe

3.2.1 Description du système

L'appareil SV-C4000H4, voir Figure 3-2, fait partie de la génération SV-C3000/4000 de la famille des analyseurs de surface de Mitutoyo. L'appareil SV-C4000H4 a deux fonctions principales : il peut être utilisé comme profilographe ou comme rugosimètre. L'appareil possède donc deux têtes de mesure distinctes : l'une pour l'obtention de profils et l'autre pour mesurer l'état de surface (R_a , R_z , etc.). La tête de mesure pour l'obtention de profils est montrée à la Figure 3-3. Un profil est un nuage de points représentant la forme d'une pièce dans une direction donnée. Pour l'obtention

des profils et leur traitement, le système utilise le logiciel FORMPAK-1000. L'appareil est situé au C-124, dans un environnement de classe 10 000 à $20,0 \pm 0,1^\circ\text{C}$ et $40 \pm 5\%\text{Hr}$

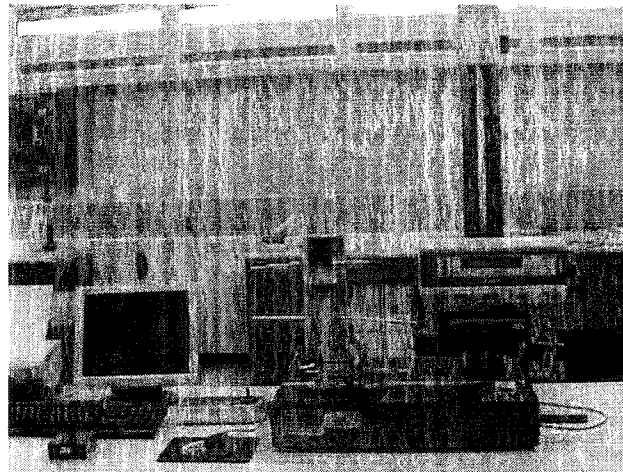


Figure 3-2: Photo de l'appareil SV-C4000H4 dans l'environnement de travail contrôlé.

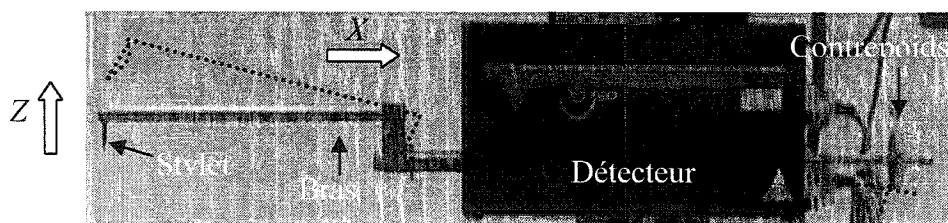


Figure 3-3: Tête de mesure du profilographe en position horizontale. En pointillé, la position haute est montrée. Les directions de déplacement de la tête de mesure sont également montrées.

3.2.2 Caractéristiques métrologiques

Les caractéristiques métrologiques du fabricant sont montrées au Tableau 3-1. On remarque principalement les résolutions de $0,05 \mu\text{m}$ et les précisions qui sont aux environs de $1 \mu\text{m}$. On note également les étendues de mesure qui sont respectivement de 100 mm et de 50 mm selon l'axe X et l'axe Z. Une autre caractéristique importante est la

force de contact entre l'échantillon et le stylet qui est de 30 mN ce qui est équivalent au poids exercé par une masse de 3g.

Tableau 3-1: Spécifications du profilographe. (Mitutoyo America Corporation US4235-525)

<i>Caractéristiques</i>		<i>Axe</i>	<i>Valeur</i>
Étendue de mesure		X	100 mm
		Z	50 mm
Rectitude		-	0,8 $\mu\text{m}/100\text{ mm}$
Précision		X	$\pm (0,8 + 2L/100) \mu\text{m}^1$
		Z	$\pm (0,8 + 10,5H/25) \mu\text{m}^2$
Résolution		X	0,00005mm
		Z	0,00005mm
Orientation du stylet		-	Haut/ Bas
Sens d'entraînement		-	Horizontal
Force de mesure		-	30 mN (3gF)
Angle de profil maximum		-	77° en montant
		-	87° en descendant ³
Inclinaison de l'unité d'entraînement		-	$\pm 45^\circ$
Vitesse du stylet	Traçage	-	0,02 à 2 mm/s
	Retraçage	-	5 mm/s
	Positionnement	-	0,1 à 5 mm/s

¹ L est la longueur mesurée en mm

² H est la hauteur mesurée (à l'intérieur de 25 mm)

³ Dépend de l'état de surface

Le système est partiellement automatisé, c'est-à-dire que les déplacements de la tête de mesure (X et Z) sont motorisés et peuvent être entrés numériquement à l'aide de l'interface logiciel. Par contre les déplacements de la pièce sont effectués manuellement, soit en déplaçant directement la pièce ou par les vis micrométriques des différentes tables et supports disponibles. Ainsi, les déplacements en Y, qui sont en fait des déplacements de pièces, sont beaucoup moins contrôlables que les déplacements en X et en Z. Les déplacements de la pièce sont en fait limités par la résolution des échelles des vis micrométriques (25,4 μm).

3.2.3 Réglages de base et traitement des profils

Le système doit être étalonné en quatre étapes: l'ajustement du gain en Z, la compensation de rectitude, la compensation symétrique et la mesure du rayon du stylet. L'étalonnage sert principalement à connaître les valeurs de compensation qui corrigeront en partie les erreurs de mesure causées par l'assemblage des composantes du système. D'autre part, l'étalonnage sert à vérifier l'intégrité des composantes de l'appareil et la qualité de la mesure des étalons. Par exemple, si la mesure du rayon du stylet donne une valeur acceptable mais anormalement élevée, l'utilisateur averti ira sans aucun doute vérifier au microscope si la pointe du stylet est propre et intacte. Ainsi, l'étalonnage sert à la fois à acquérir les valeurs de compensation mais aussi à surveiller le comportement de l'appareil. Pour plus de détails sur l'étalonnage du profilographe se référer aux manuels d'utilisation du fabricant (**Mitutoyo 99MBB10A5**) ou au guide d'utilisation du profilographe/rugosimètre (**Pomerleau, J. et Landry, M. J.**).

Malgré le fait que le système soit partiellement automatisé, l'acquisition de profil est relativement lente. On remarque dans les caractéristiques métrologiques que la vitesse de mesure varie de 0,02 à 2 mm/s. Ces vitesses donnent respectivement des temps de mesure de 5000 et 50 secondes pour balayer toute l'étendue de mesure en X (100 mm). La vitesse de mesure doit être choisie en fonction de la forme mesurée, de l'état de surface et du matériau constituant la pièce mesurée. Les risques principaux d'utiliser des vitesses trop élevées sont de faire accrocher le stylet et de l'abîmer ou d'endommager l'échantillon en plus d'avoir des mesures faussées. La fréquence d'échantillonnage, c'est-à-dire le nombre de points par mm, doit également être réglé afin d'obtenir un nuage de points représentatif du profil mesuré.

Une fois le nuage de points obtenu, le logiciel FORMPAK-1000 permet d'obtenir une quantité importante d'informations. Un exemple de nuage de points est montré à la Figure 3-4 (a). L'utilisateur peut alors y substituer des éléments

géométriques (droites, cercles, ellipses et autres) tout en choisissant la méthode de substitution désirée, par exemple les moindres carrés. La substitution d'un élément géométrique est montrée à la Figure 3-4 (b). Le mode de saisie des points doit aussi être sélectionné adéquatement afin que l'élément géométrique associé soit représentatif. Enfin, les possibilités du logiciel sont multiples et leur énumération serait peu pertinente ici.

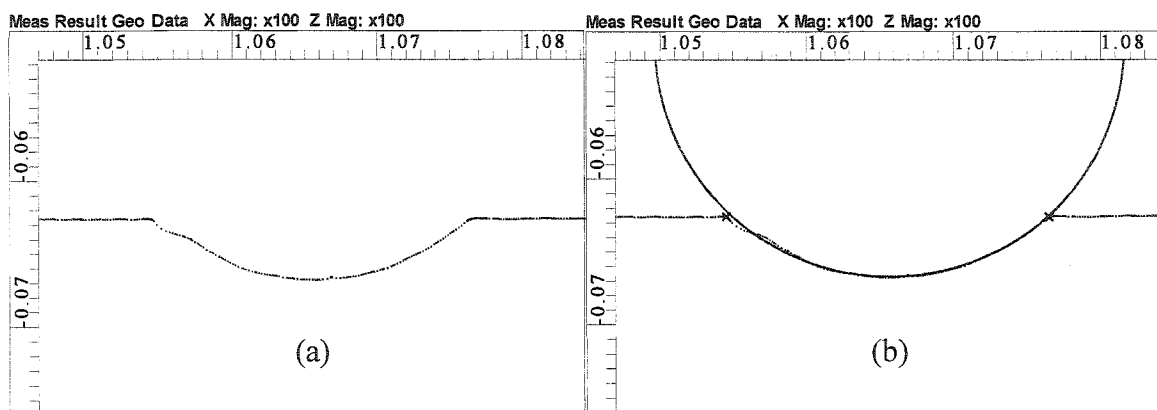


Figure 3-4: Nuage de points obtenu avec le profilographe représentant le profil d'une rainure en arc de cercle (a) et substitution d'un élément géométrique idéale (cercle) par la méthode des moindres carrés (b).

3.3 Analyse de sensibilité

L'analyse de sensibilité a pour objectif de comprendre l'effet des méthodes utilisées et de certaines variables sur la mesure de retrait. L'analyse de sensibilité consiste ici en l'élaboration d'un diagramme de cause à effet. L'effet de certaines causes sera ensuite analysé et estimé si possible.

3.3.1 Diagramme de cause à effet

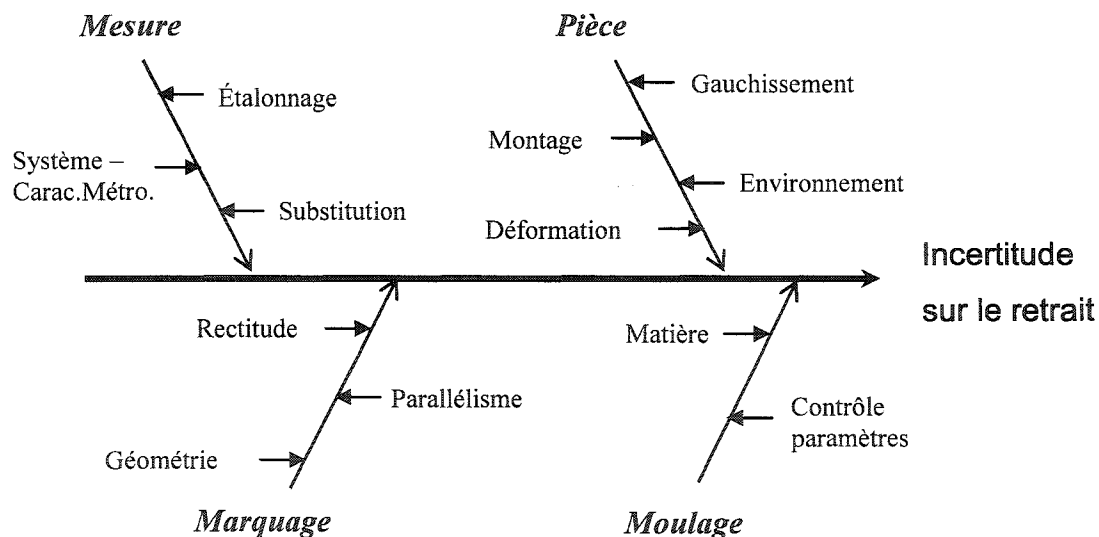


Figure 3-5: Diagramme d'Ishikawa ou de cause à effet.

Le diagramme d'Ishikawa est un outil du domaine de la qualité qui permet de classer les causes probables d'un problème selon cinq grandes catégories, traditionnellement appelés les 5M : Matière, Main d'œuvre, Matériel, Méthodes et Milieu. La fonction principale d'un tel exercice est de poser adéquatement un problème. Il est utilisé ici dans une version un peu différente mais sa fonction demeure la même, voir Figure 3-5. Les causes d'incertitude y sont classées en quatre catégories: Mesure, Pièce, Marquage et Moulage. Il faut aussi être conscient que les causes interagissent entre elles. Par exemple, l'environnement n'affecte pas dans une même proportion toutes les matières.

3.3.2 Mesure

Le processus d'étalonnage utilise des grandeurs matérialisées (étalons) imparfaits, ce qui cause évidemment de l'incertitude sur les positions indiquées par l'appareil de mesure. Éventuellement, il serait possible de vérifier l'effet de l'étalonnage puisque le système de mesure permet de changer a posteriori les valeurs de compensation. Par contre, les effets de l'étalonnage sur les mesures sont inclus dans les caractéristiques métrologiques fournies par le fabricant du profilographe. C'est pourquoi, nous considérerons ici que l'étalonnage est effectué correctement à chaque fois et que, par conséquent, son effet est nul.

Les caractéristiques métrologiques du système de mesure ne sont pas une cause proprement dite d'incertitude mais permettent d'évaluer la part de l'incertitude totale attribuable à l'appareil. Les caractéristiques principales ont été énoncées à la section 2.2. Rappelons tout de même que les résolutions (X,Z) du système sont de $0,05 \mu\text{m}$ et que les précisions (X,Z) sont d'environ $\pm 1 \mu\text{m}$. Si on assume que le fabricant a utilisé un facteur de couverture (k) de 3, c'est-à-dire que, l'incertitude augmentée, $U(d) = 2 = k \cdot u(d)$, on trouve l'incertitude sur d, $u(d)$, égale à $0,67 \mu\text{m}$. Ce calcul est nécessaire afin de pouvoir comparer sur une même base, soit l'incertitude simple sur la distance mesurée, $u(d)$, les diverses incertitudes entre elles.

La méthode de substitution a un effet très important sur la qualité de mesure de la position d'un repère. La méthode de substitution comprend le choix de l'élément géométrique idéal et le critère d'association de cet élément au nuage de points. Un élément géométrique idéal est, par exemple : une droite, un cercle, une ellipse, etc. Le critère d'association peut être les moindres carrés, la méthode minimax ou autre. Aussi, le terme méthode de substitution fait référence à la façon dont les points sont

sélectionnés, c'est-à-dire qu'il est possible de choisir les points manuellement (un par un) ou par un domaine spécifié en x et/ou y.

En fait, la méthode de substitution constitue le moyen de définir les repères à partir du nuage de points. Les repères peuvent être définis de diverses façons, par exemple, à la Figure 3-6, on les définit par le sommet, par le point d'inflexion, par la rencontre des droites formant les côtés du repère et par un cercle des moindres carrés, etc. Les points sont choisis par domaines spécifiés en x. Les limites sont choisies manuellement et sont montrées par les croix.

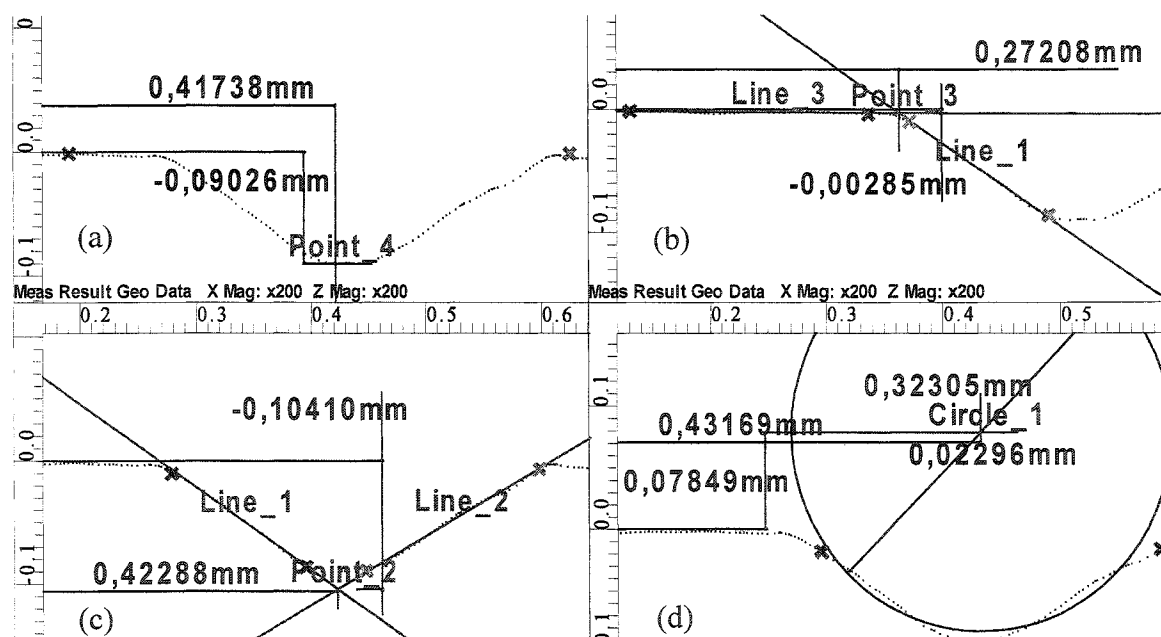


Figure 3-6: Nuage de points et différentes méthodes de substitution : méthode du sommet (a), du point d'inflexion (b), des côtés (c) et du cercle (d). Le critère d'association est toujours les moindres carrés et les domaines spécifiés sont montrés par les croix.

Un essai d'exploration conduit sur une pièce ayant des formes de repères peu constantes a montré que la méthode du sommet est peu fiable mais que les méthodes du point d'inflexion et des côtés étaient équivalentes, voir Figure 3-7. Il semble que l'utilisation d'un grand nombre de points soit préférable à l'utilisation d'un seul point, ce qui était attendu. De plus, on peut avoir certaines inquiétudes quant à la qualité du palpage du sommet d'un repère, surtout si celui-ci est très aigu. Cet aspect du problème

sera couvert plus loin. L'effet de la substitution est difficilement distinguable des autres sources d'incertitude. On peut cependant apprécier l'effet de l'utilisation d'une méthode par rapport à une autre.

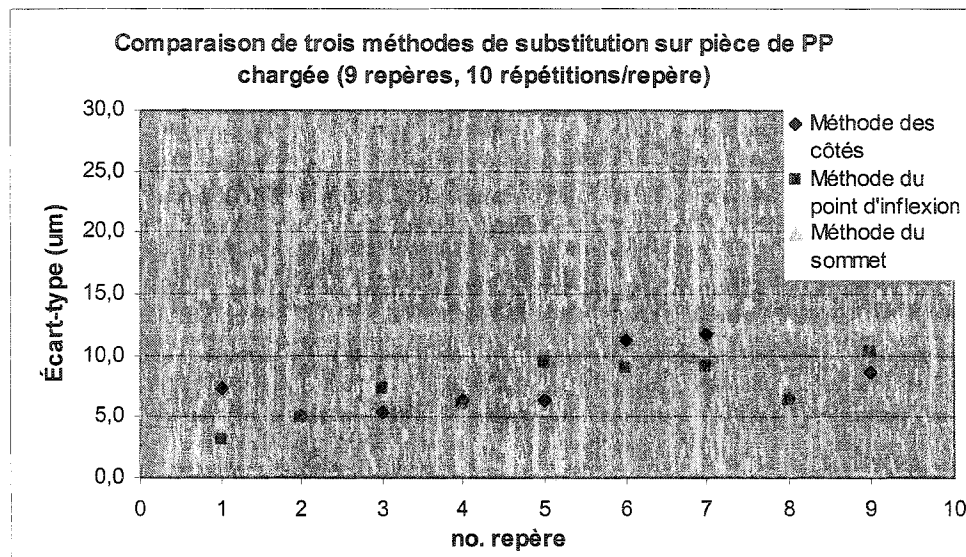


Figure 3-7: Comparaison de trois types de substitution.

3.3.3 Pièce

Les pièces moulées par injection peuvent parfois gauchir substantiellement. Ce phénomène est causé par les contraintes résiduelles dans la pièce après la mise en forme. Le gauchissement affecte premièrement la prise de mesure. En effet, une pièce gauchie est plus difficilement fixée au marbre sans la déformer. D'autre part, la mesure d'une pièce gauchie implique que l'on considère les trois dimensions du déplacement des repères ainsi que la courbure du profil entre les repères. Une solution au problème de la courbure entre les repères consiste à prendre des mesures locales donc, sur de courtes distances. Ainsi, celle-ci peut être négligée, voir Figure 3-8. La tridimensionnalité du retrait et du gauchissement est un problème majeur puisqu'on mesure des profils 2D. On émet ici l'hypothèse que l'on mesure le retrait dans une seule dimension, soit la direction du passage du stylet. Par contre, l'effet du Δz , voir Figure 3-8 devra être surveillé de

près. Le problème du Δz est qu'il est causé à la fois par le gauchissement et par les différences de retrait selon l'épaisseur. Afin d'estimer grossièrement l'effet du gauchissement, admettons une distance entre les repères d de 1 cm, un retrait nul et un gauchissement $\Delta z = 125 \mu\text{m}$. Ainsi, la distance mesurée est $\Delta x = (10\,000^2 - 125^2)^{1/2} = 9999,2 \mu\text{m}$. La différence entre la mesure Δx et la distance d entre les repères est donc égale à $0,8 \mu\text{m}$. Des lignes directrices pour gérer le Δz , seront énoncées plus tard lorsque la distance entre les repères sera établie et que quelques pièces auront été mesurées. L'effet du gauchissement pourra alors mieux être évalué.

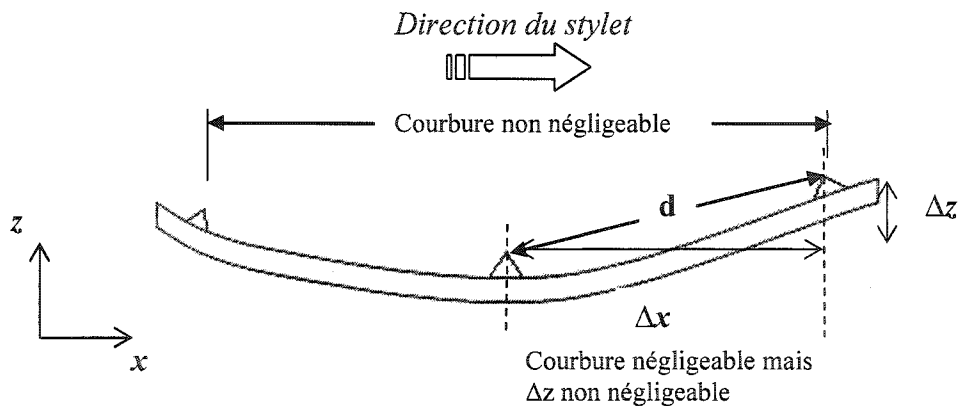


Figure 3-8 : Schéma montrant l'effet du gauchissement sur la mesure du retrait.

Le montage de l'échantillon a aussi un effet sur la mesure du retrait. Par exemple, un alignement imparfait autour de z cause une erreur de type cosinus, voir Figure 3-9. À l'aide de l'une des vis de rotation du plateau, la pièce est alignée dans le sens du déplacement du stylet à près de $0,06^\circ$. Si on assume que le déplacement du plateau est d'équerre avec l'axe de mesure, on peut dire que notre pièce est désalignée de $0,06^\circ$ au maximum. En effet, le marbre possède une butée réputée perpendiculaire à l'axe de mesure de l'appareil. L'erreur de type cosinus est fonction de la distance mesurée. Si, par exemple, on mesure une grandeur d de 1 cm, on fait une erreur entre la mesure m et d d'au plus $d \cdot (\cos(0,06) - 1) = 5 \cdot 10^{-9} \text{ m}$. On remarque encore une fois que si l'on fait une mesure locale, un d plus faible, les erreurs de type cosinus diminuent.

Cependant, il est important de se rappeler que l'on a posé l'axe de déplacement du plateau comme étant d'équerre avec l'axe de mesure.

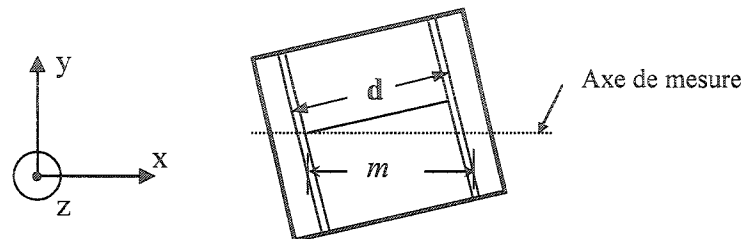


Figure 3-9: Erreur de type cosinus causée par le désalignement de la pièce autour de z.

La mesure du profil étant du type contact, il est possible qu'il y ait déformation significative de l'échantillon lors de la mesure. En effet, les pièces sont relativement peu rigides (E de l'ordre de quelques GPa) et le rayon du stylet est assez faible ($25\mu\text{m}$). Ainsi, il pourrait y avoir un affaissement élastique considérable ou carrément une déformation plastique de l'échantillon lors de la mesure. Par contre, rappelons que la force de contact entre le stylet et l'échantillon est de 30 mN ce qui est tout de même relativement faible. Les éléments importants à considérer sont la géométrie et le matériau du repère palpé. En effet, un repère avec un angle très aigu est plus susceptible de faire accrocher le stylet et un matériau très souple se déformera plus facilement au passage de ce dernier. Une façon de vérifier s'il y a déformation, est de conduire un essai de fidélité et de vérifier l'évolution de la mesure en fonction du nombre de passage au même endroit. La Figure 3-10 montre les résultats d'un tel essai pour 6 géométries de repère. Les formes et dimensions de ces repères sont explicitées à la section 3.5.3. On ne remarque pas d'effet d'endommagement des repères puisque les mesures semblent stables.

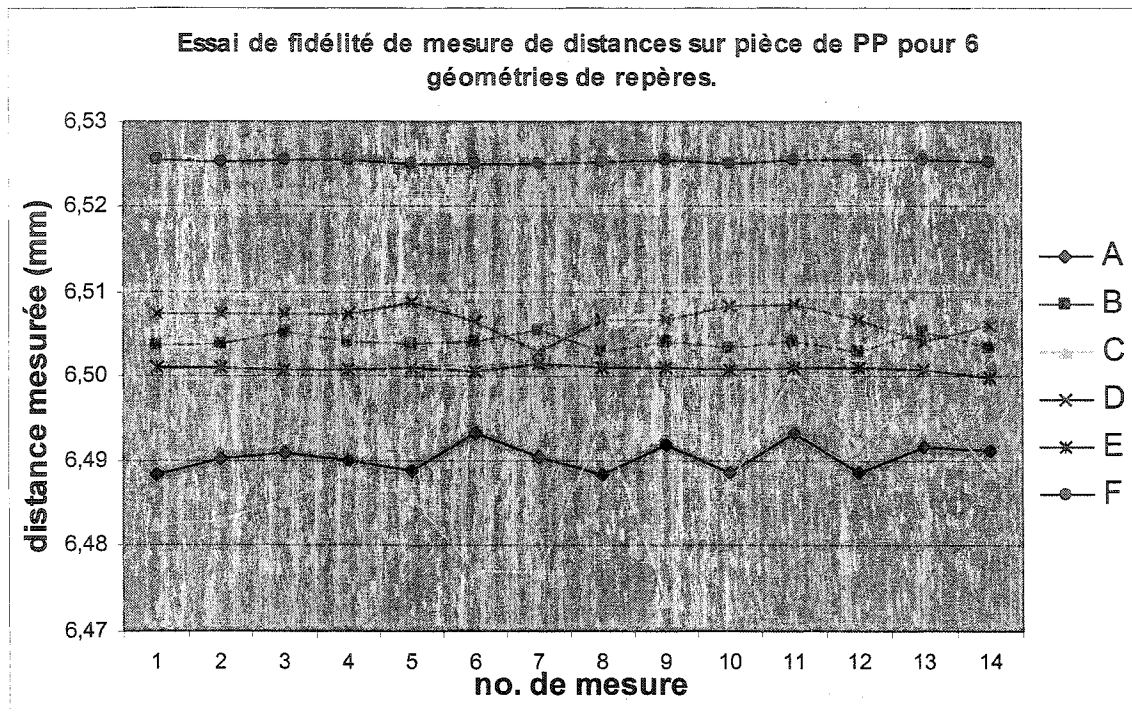


Figure 3-10: Essai de fidélité ayant pour objectif de vérifier l'effet du nombre de passage sur la mesure de distance entre des repères des différentes géométries. Voir section 3.5.3 pour les détails sur les géométries de repères.

L'environnement cause des changements dimensionnels surtout pour les pièces. Ces changements sont certainement une source d'incertitude sur la valeur du retrait. Les coefficients d'expansion thermique sont respectivement d'environ 10^{-6} m/(m*°C) pour un acier et de 80 m/(m*°C) pour un polypropylène. Néanmoins, comme les mesures sont effectuées dans un environnement contrôlé à $\pm 0,1^\circ\text{C}$ et $\pm 5\%\text{Hr}$, l'effet de la température est minime (environ $0,08\ \mu\text{m}$ pour une distance de 1cm pour un polypropylène). L'effet de l'humidité est plus incertain compte tenu du manque de données sur les changements dimensionnels en fonction de l'humidité relative. Nous négligerons l'effet de la température et de l'humidité sur la mesure du retrait. On devra par contre laisser les pièces dans l'environnement de mesure un minimum de 24 heures afin d'obtenir un certain équilibre.

3.3.4 Marquage

Le marquage consiste en l'usinage d'entités de petites tailles dans le moule. La réplique de ces entités sur les pièces puis la mesure de leur position relative constitue la mesure du retrait. Les repères doivent rencontrer certaines exigences. Premièrement, ils doivent être compatibles avec la méthode de mesure : c'est-à-dire qu'ils doivent être détectables et leur position doit pouvoir être évaluée. Deuxièmement, les repères doivent être facilement moulables donc être robustes aux paramètres de mise en œuvre et à la matière choisie. Troisièmement, ceux-ci ne doivent pas être grossiers afin de ne pas trop perturber le système étudié, c'est-à-dire que la finesse des repères est aussi importante. Cependant, l'effet de la présence des repères est difficilement quantifiable et ne sera pas abordé. Tôt dans le projet, il a été convenu que les repères allaient être définis par des rainures. La géométrie des rainures, c'est-à-dire leur forme et leur profondeur, doit répondre aux exigences énoncées précédemment. Remarquons que la géométrie de la rainure est fortement liée à la méthode de substitution. La géométrie de la rainure devra préférentiellement être simple afin de faciliter la substitution d'éléments géométriques idéaux. Par exemple, on voit mal comment associer des droites, un arc de cercle ou autre élément à une forme de fond de rainure tout à fait quelconque.

La méthode de fabrication des repères joue également un rôle prépondérant dans la mesure du retrait. La déviation des formes réelles des repères par rapport à leur forme idéale rend difficile la comparaison entre les distances dans le moule et les distances sur les pièces. En fait, il est impossible d'associer exactement deux distances, celle du moule et celle de la pièce. Ce problème de correspondance peut devenir préoccupant si les formes dévient d'une manière importante. Avec des repères linéaires, donc en 2D, le problème de correspondance peut être causé par le défaut de rectitude et le défaut de parallélisme. Le schéma de la Figure 3-11 illustre le problème de correspondance causé par ces deux types de défauts.

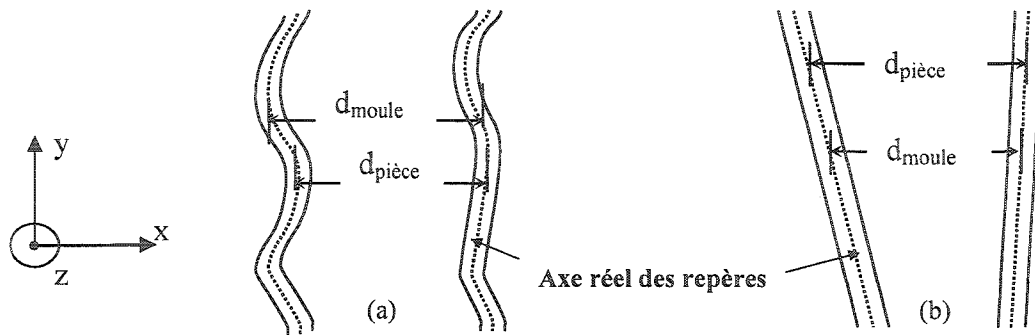


Figure 3-11: Erreur de correspondance causée par les défauts de rectitude (a) et de parallélisme (b) dans les deux cas, $d_{pièce} \neq d_{moule}$ même si le retrait est nul.

Un essai a donc eu lieu afin d'évaluer si le problème de correspondance est potentiellement significatif. L'essai consiste à déplacer le moule selon y, et à mesurer la distance entre deux repères. Si les défauts de rectitude et de parallélisme se révèlent peu importants, on devrait obtenir des valeurs de distance à peu près constantes tout le long de y. Le résultat de cet essai est montré à la Figure 3-12. On remarque que la distance varie dans un intervalle d'environ $7,5 \mu\text{m}$, ce qui est très considérable. Si on assume les mesures distribuées selon une loi normale, l'étendue de $7,5 \mu\text{m}$ est égale à 6σ . L'incertitude type sur une seule mesure serait donc $u(d) = \sigma/n^{1/2} = \sigma = 1,25 \mu\text{m}$.

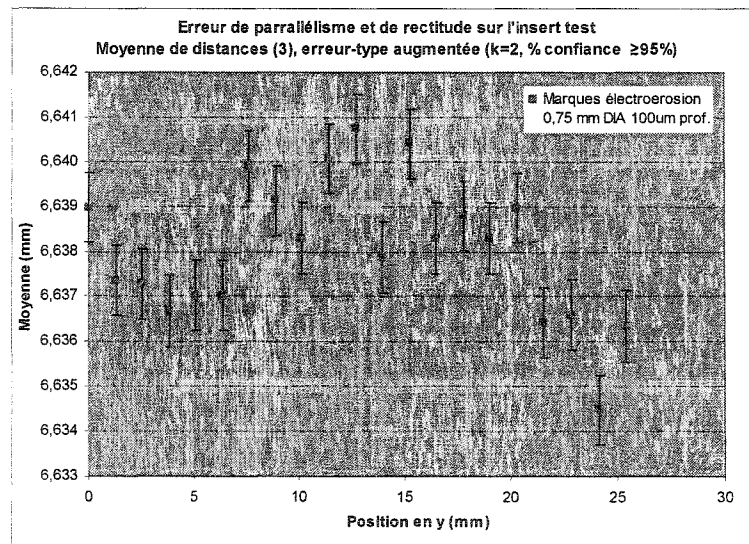


Figure 3-12: Mesure de la distance entre des repères usinés par électroérosion. Les barres d'erreur ont une longueur égale à deux fois la plus grande erreur type sur chaque moyenne de trois mesures au même endroit. $U(d_{moy}) = k \cdot u(d_{moy}) = 2 \cdot (\sigma_{max}/3^{1/2})$

3.3.5 Moulage

Le procédé de moulage constitue la dernière catégorie de causes d'incertitudes sur la mesure du retrait. La matière et/ou le grade utilisé influence très certainement la mesure du retrait. Évidemment, le type de matière agit sur la valeur du retrait mais aussi sur sa mesure. Par exemple, le remplissage des repères ne s'effectuera probablement pas aussi bien pour un polyéthylène à haut poids moléculaire que pour un polyamide pour des conditions relatives semblables. Aussi, les paramètres de moulage ont un effet similaire : une température de moule élevée facilite le remplissage de détails fins, donc la réplique des repères sur les pièces, favorisant un signal de mesure de qualité. Par contre, en choisissant une géométrie de repère adéquate, l'effet de la matière et des paramètres sur l'incertitude de mesure devrait être faible. Finalement, le contrôle sur les paramètres d'injection a un effet car d'un moulage à l'autre, les conditions peuvent varier sensiblement. Idéalement, le retrait serait le même d'une pièce à l'autre pour un ensemble de paramètres donnés.

3.4 Budget d'incertitude

Le Tableau 3-2 présente la synthèse des approximations des causes d'incertitude sur la mesure du retrait au moulage. C'est en fait ce que l'on nomme un budget d'incertitude. Une incertitude de type A est calculée de manière statistique alors qu'une incertitude de type B n'est pas le fruit d'une méthode statistique de calculs. (Perruchet et Priel, Estimer L'Incertain: Mesures, Essais2000)

Tableau 3-2: Budget d'incertitude.

Causes	Effets (µm)	Types	Base de calcul	Méthode d'évaluation	Notes
Précision	0,66	B	1 cm	Fich. manuf.	$U(d) = k \cdot u(d)$ ou $k=3$ et $U(d) = 2 \mu m$
Résolution	0,07	B	-	Fich. manuf.	$u^2(d) = u^2(x_1) + u^2(x_2)$ et $u(x) = 0,05 \mu m$
Substitution	-	A	-	Essai de fidélité	Fonction de la géométrie Effet relatif seulement.
Montage	0,005	B	$d = 1 \text{ cm}$	Expérimental	Hyp. : déplacement perpendiculaire à l'axe de mesure
Gauchissement	0,8	B	$d = 1 \text{ cm}$ $\Delta z = 125 \mu m$	Approximative	Fonction de la distance et de Δz .
Thermique	0,08	B	1 cm	Approximative.	Proportionnel à la distance
Rectitude et parallélisme	1,25	B	-	Expérimental	Fonction du procédé et de la distance en y.

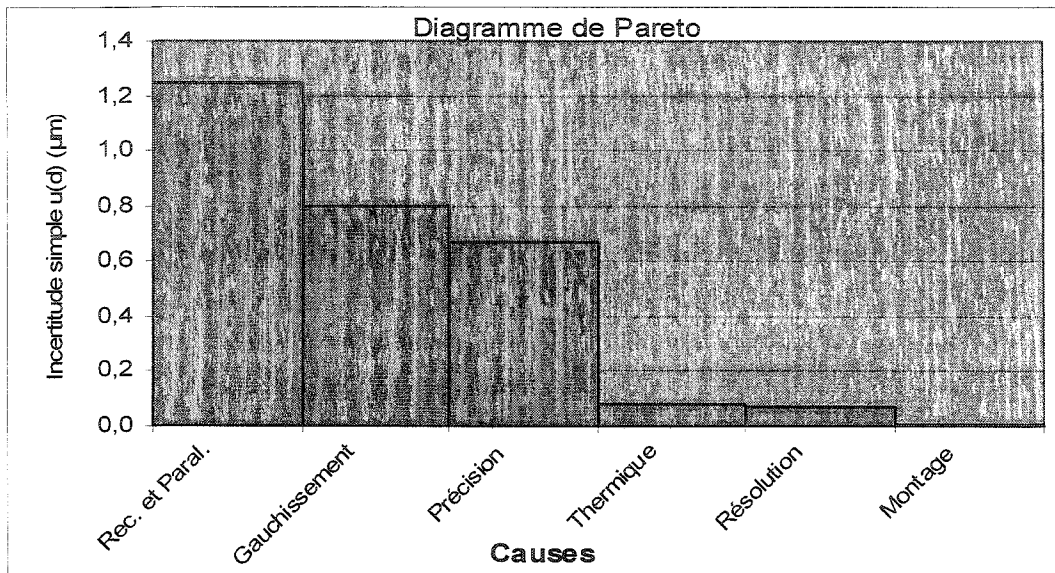


Figure 3-13: Diagramme de Pareto montrant l'évaluation des sources d'incertitude. Celles-ci sont montrées en ordre décroissant.

La Figure 3-13 illustre graphiquement l'importance relative des différentes sources d'incertitude quantifiées lors de l'analyse de sensibilité. On constate premièrement qu'il y a trois sources d'incertitude principales : les défauts de rectitude et de parallélisme, le gauchissement des pièces et la précision de l'appareil de mesure. La précision de l'appareil de mesure ne pouvant être améliorée facilement, on passe aux autres sources d'incertitude. Le gauchissement a été évalué très grossièrement mais demeure toutefois une source potentiellement très significative. Son importance sera mieux évaluée lorsque des pièces seront moulées et l'on verra s'il est nécessaire d'utiliser l'information en z disponible sur la position des repères. Finalement, il est possible d'agir sur la source majeure d'incertitude, soit les défauts de rectitude et de parallélisme, en choisissant la méthode d'usinage la plus performante à cet égard. La recherche de cette méthode est l'objet de la section qui suit.

3.5 Marquage, Rectitude et parallélisme

3.5.1 Méthodologie

Comme il a été mentionné précédemment, la forme des repères a été fixée comme étant celle d'une rainure. Cependant, les détails des lignes (forme, profondeur et procédé d'usinage) devaient être explorés. À cette fin, on disposait d'un insert pour mouler des plaques de dimensions 150 x 70 x 3 mm. On fera désormais référence à cet insert comme étant l'insert test.

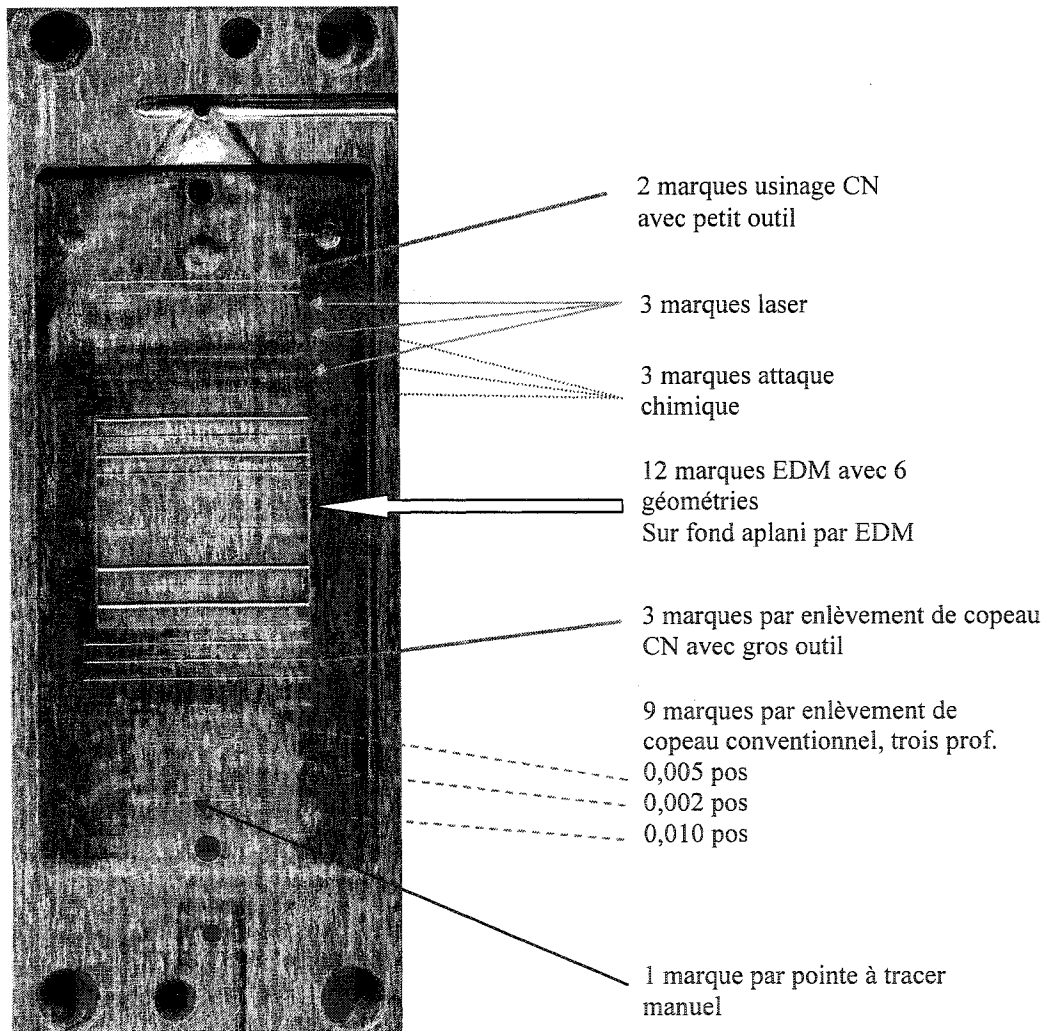


Figure 3-14 : Photo de l'insert test avec les marques usinées par différents procédés.

Une rainure fut premièrement gravée manuellement dans l'insert test à l'aide d'une pointe à tracer. Cette méthode de marquage s'est vite avérée inutilisable avec le profilographe comme instrument de mesure. La rainure était de forme quelconque et un élément géométrique ne pouvait y être substitué adéquatement. D'abord, l'insert test fut marqué en usinage par enlèvement de copeau conventionnel à différentes profondeurs avec une géométrie de fond en forme de V à 90°. Ensuite, pour la profondeur qui semblait la meilleure, des marques de différentes géométries furent usinées par électroérosion. Par la suite, des essais furent tentés avec les procédés d'usinage par attaque chimique (*Etching*) et par laser. Finalement, des marques furent réalisées en usinage par enlèvement de copeau avec commande numérique (CN) pour deux types d'outils. L'insert test est montré à la Figure 3-14.

Toutes les marques faites dans l'insert test furent mesurées avec le profilographe dans le but de quantifier les défauts de rectitude et de parallélisme. Aussi, un étalon cylindrique réputé droit a été mesuré afin de valider la procédure de mesure de rectitude avec le profilographe. Le cylindre en question est l'étalon qui sert normalement à mesurer le rayon du stylet lors de l'étalonnage du profilographe. On l'a utilisé cette fois comme étalon de rectitude. Il est cependant important de remarquer qu'on ne connaît pas le défaut de rectitude de l'étalon mais on prendra la valeur mesurée comme limite de détection du défaut de rectitude par notre méthodologie. Le défaut de rectitude mesuré pour l'étalon est de 0,5 μm sur une longueur de 25,4 mm.

Les mesures de rectitude sont exécutées en plaçant la pièce (l'insert test) sur un plateau possédant des vis de déplacements orthogonaux (selon x_1 et y_1) d'une étendue de 25,4 mm et des vis de rotation autour de x_1 et y_1 . Les vis de déplacement sont graduées au 25 μm . Le plateau repose sur le marbre du profilographe, voir Figure 3-15.

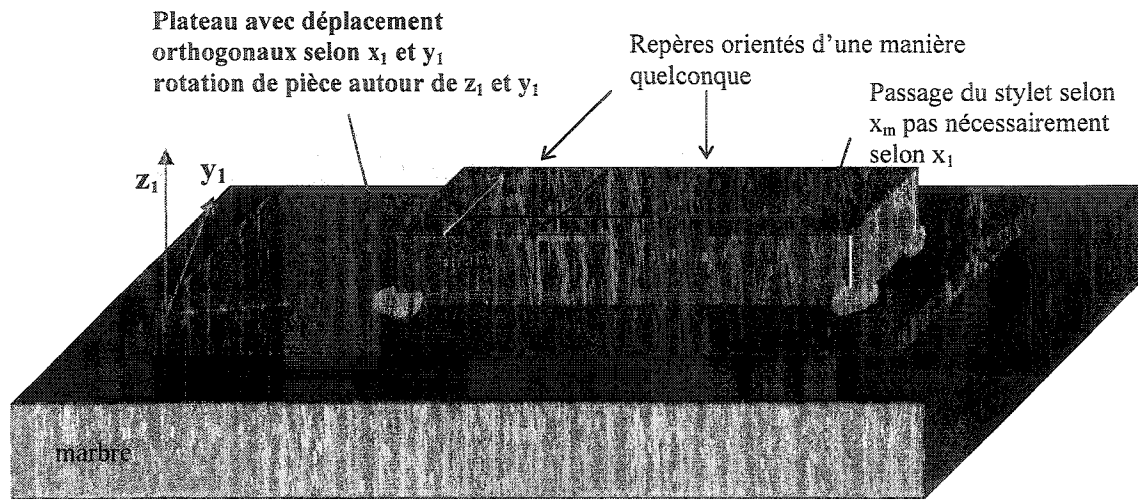


Figure 3-15: Schéma représentant l'installation de la pièce pour mesure de rectitude.

La pièce est d'abord alignée grossièrement selon l'axe de déplacement y_1 de la vis. Cette étape est effectuée en prenant la position selon x_m du centre de la première rainure aux positions $y_1 = 0,00$ et $y_1 = 25,40$ mm. La pièce est alignée physiquement à l'aide de la vis de rotation autour de y_1 du plateau, jusqu'à ce qu'on obtienne une différence entre les axes réels en x_m de moins de $25\mu\text{m}$. Un schéma montre l'étape d'alignement de la pièce à la Figure 3-16. On remarque le fait que le premier repère n'est pas aligné orthogonalement avec l'axe machine mais plutôt avec l'axe du déplacement du plateau y_1 . De plus l'alignement est imparfait puisqu'on a pris que deux points extrêmes.

Les positions des axes réels en x_m de toutes les rainures pour un même procédé sont alors mesurées à tous les 1,26 mm en y_1 pour un total de 20 mesures. Afin de mesurer efficacement, des programmes de mesure et de calculs semi-automatiques sont mis en place avec FORMPAK-1000. Ces programmes consistent grossièrement en une série de mesures à vitesse de palpage minimale (0,02 mm/s) entrecoupées de déplacements à grande vitesse du stylet entre les rainures. Après l'acquisition du nuage de points, le logiciel choisit la commande de calcul voulue et positionne la fenêtre sur les points d'intérêts (par exemple, la première rainure). L'utilisateur n'a qu'à sélectionner

une série de points qu'il juge adéquat et le logiciel se déplace à la prochaine zone d'intérêt (la seconde rainure) et ainsi de suite jusqu'à la fin des calculs entrés dans le programme.

Une fois tous les profils obtenus et les couples (x_m, y_1) extraits des nuages de points par les calculs, on trace ces points dans un plan cartésien pour toutes les rainures. Les coordonnées y_1 de l'axe réel sont placées en abscisse du plan cartésien et les coordonnées x_m de l'axe réel, en ordonné du plan. On obtient la droite de régression au sens des moindres carrés pour chaque série de données. Le défaut de parallélisme est évalué d'une manière assez simpliste à partir des pentes des droites de régression et de l'incertitude qui leur est associée. L'incertitude sur la pente d'une droite de régression est donnée par l'équation (4). Un exemple d'évaluation de défaut de parallélisme est présenté à la Figure 3-17 pour des marques produites par usinage à commande numérique (CN). Après calcul des incertitudes, les pentes des marques 1, 2 et 3 sont respectivement de $0,00248 \pm 0,00053$; $0,00246 \pm 0,00051$; $0,00256 \pm 0,00052$. On conclue donc que le défaut de parallélisme n'est pas significatif.

$$u(m) = \sqrt{\frac{1}{n-2} \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}} \quad (5)$$

Où m est la pente d'une régression au sens des moindres carrés.

L'évaluation des défauts de rectitude nécessite une opération supplémentaire. À partir des pentes des droites de régression, on effectue une dernière rotation (cette fois virtuelle) de la pièce afin d'évaluer le défaut de rectitude. La rotation est effectuée à l'aide d'une matrice de rotation avec la pente de la droite de régression au sens des moindres carrés. Chaque rainure est tournée indépendamment, puis elles sont

superposées dans le plan cartésien. Le défaut de rectitude est défini par la largeur de la zone entre deux droites passant par les points mini et maxi. Ces droites doivent être parallèles à la droite des moindres carrés. Un exemple d'évaluation de rectitude pour des marques produites en usinage par enlèvement de copeaux à commande numérique (CN) est présenté à la Figure 3-17. Les rectitudes trouvées sont de 4,9; 3,7 et 4,4 μm respectivement pour les marques 1, 2 et 3. Tous les graphiques et opérations sont produits avec Excel.

On remarque ici que l'étape d'alignement aurait pu être omise pour évaluer les défauts de rectitude et de parallélisme. On aurait alors procédé seulement à un alignement virtuelle de la pièce. Cependant, pour que le programme de mesure fonctionne bien, il faut que les profils mesurés soient très semblables. En redressant physiquement la pièce avant de lancer les mesures, on s'assure que les programmes sont viables.

Des essais de fidélité furent également conduits afin d'apprécier la qualité du repérage de chaque géométrie de marque. L'essai de fidélité consistait à prendre des mesures répétées au même endroit sans déplacement de pièce et d'estimer la variabilité des mesures.

Orientation des axes lors de l'alignement et effet de la rotation sur les profils mesurés

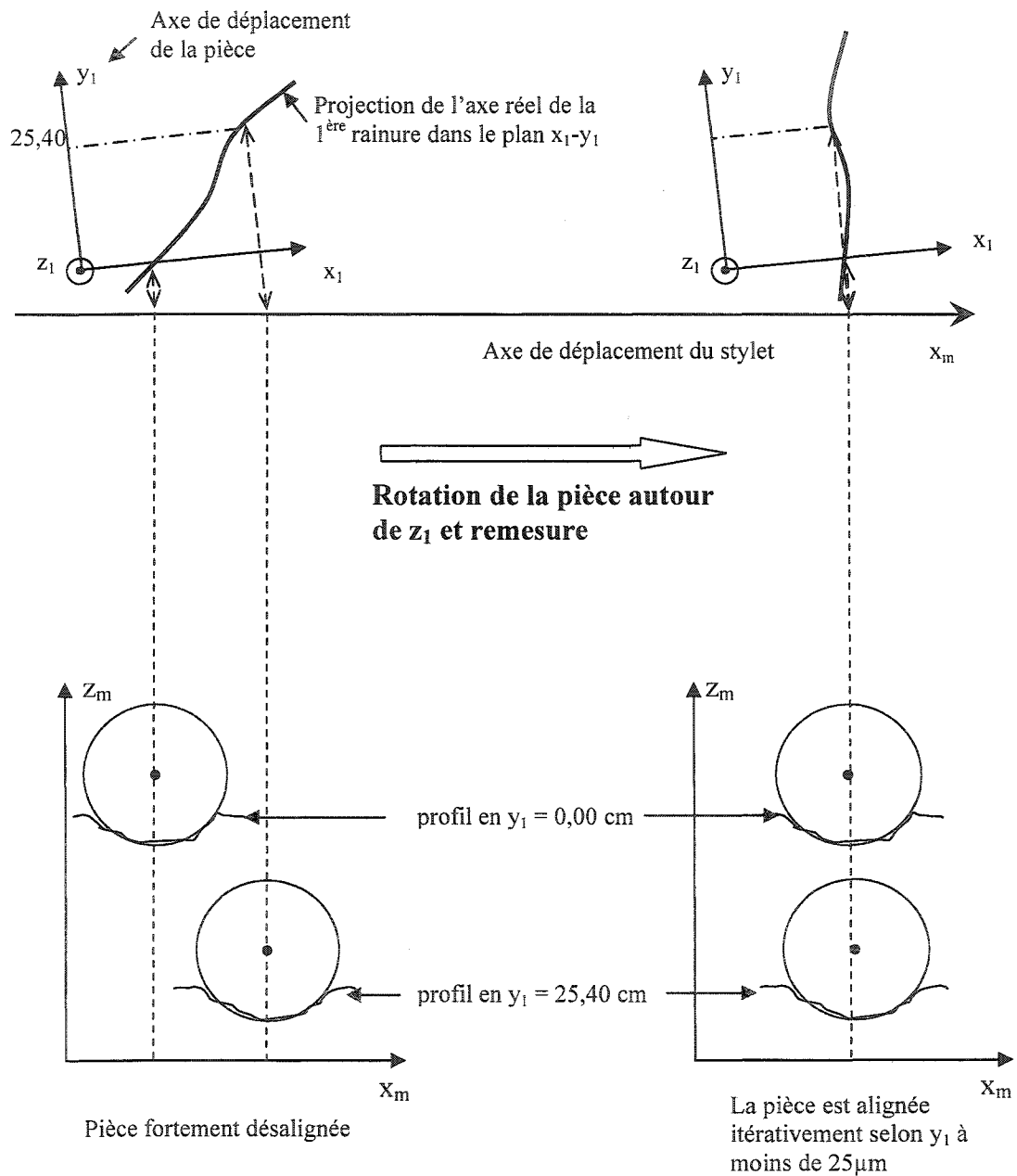
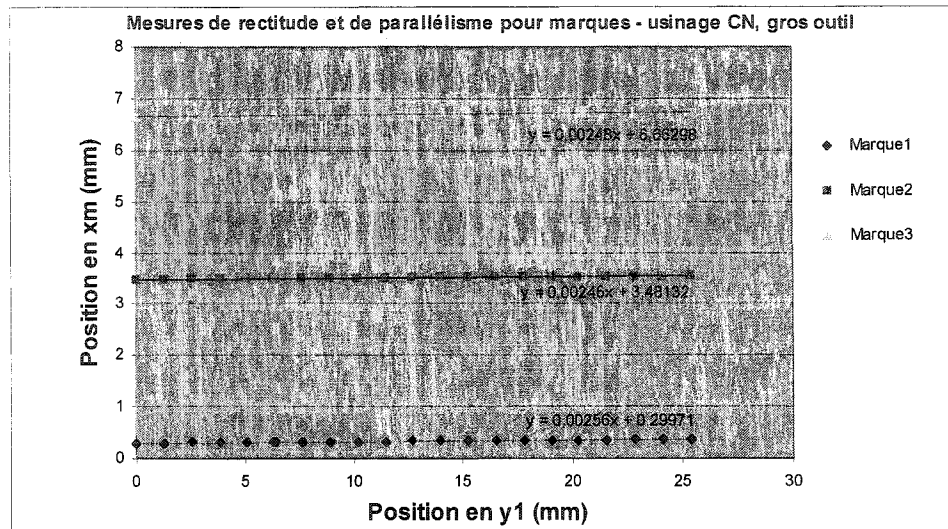


Figure 3-16: Schéma montrant la méthode employée pour l'alignement de la pièce.

- 1) On rapporte les couples (x_m, y_1) avec x_m en abscisse et y_1 en ordonnée dans un plan cartésien



- 2) Évaluation du défaut de parallélisme par les pentes des droites des moindres carrés et leur incertitude associée
- 3) On applique les matrices de rotation. Chaque marque possède sa matrice dont l'angle provient de la régression en 2).
- 4) Le défaut de rectitude trouvé par la zone entre les droites (-----) passant par les points mini et maxi. Les droites sont parallèles à l'axe x^*

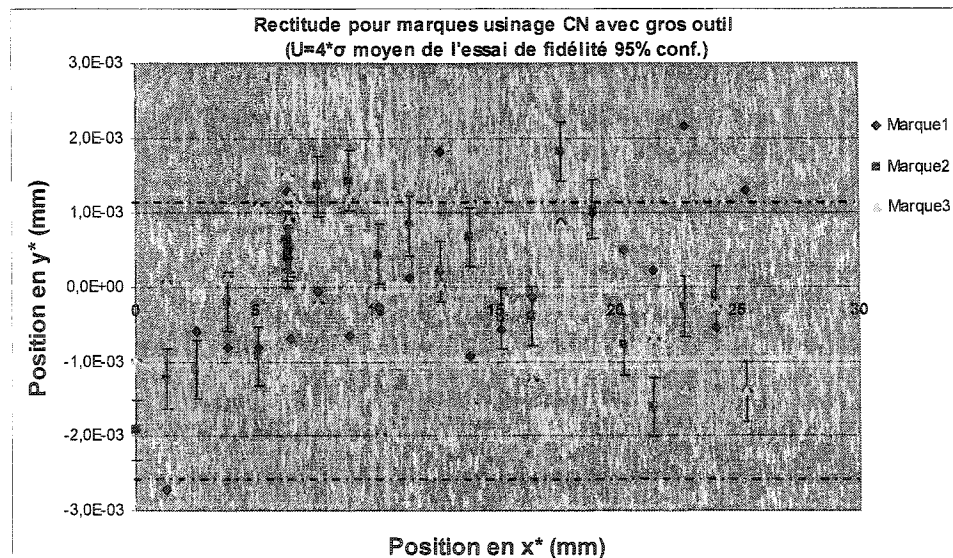


Figure 3-17: Exemple de traitements des points pour évaluer les défauts de rectitude et de parallélisme.

3.5.2 Usinage par enlèvement de copeaux conventionnel

Des rainures ont été tracées en usinage par enlèvement de copeau conventionnel à l'aide d'un outil carré, incliné à 45° . Ces rainures avaient donc la forme d'un V à angle droit. Un total de neuf rainures a été usiné à trois profondeurs différentes : 50, 125 et 250 μm . Des plaques de polypropylène (PP) et de polystyrène (PS) furent moulées puis le moule et les plaques furent mesurés. Il est alors apparu clair que les marques de 50 μm n'étaient pas remplies complètement et uniformément d'un endroit à l'autre, surtout lorsque les plaques étaient moulées en PS. En effet, les marques sur la pièce avaient parfois une hauteur de moins de 5 μm ce qui représente 10% de la profondeur de la rainure dans le moule. Les marques plus profondes semblaient s'être mieux remplies. Cependant les marques les plus profondes (250 μm) montraient des retassures beaucoup plus importantes que les marques de 125 μm . Suite à cet essai, il a été décidé de faire les marques à une profondeur d'environ 100 μm .

3.5.3 Usinage par électroérosion

La profondeur des marques étant fixée, on a voulu savoir si la géométrie de la rainure avait un effet sur son remplissage et sur la qualité de la mesure. Aussi, on a voulu voir si l'utilisation d'un autre procédé de fabrication donnerait de meilleurs résultats que l'usinage par enlèvement de copeaux conventionnel. La technique d'usinage par électroérosion (EDM) a été utilisée. Premièrement, une électrode de cuivre fut fabriquée par usinage conventionnel et fut rectifiée. Avec la face rectifiée, l'insert test a été aplani sur une aire de 38 x 38 mm. Cette étape était nécessaire puisqu'une inspection au marbre avec un comparateur a révélé une courbure dans l'insert-test de l'ordre de 50 μm . Cette courbure due à un polissage manuel, n'affectait pas la fabrication par usinage conventionnel mais rendait difficile l'électroérosion simultanée de plusieurs rainures. L'aplanissement était donc nécessaire afin de donner à l'insert test une face bien plane pour l'enfonçage. Ensuite, l'électrode a été réusinée par

électroérosion au fil. On y a découpé une série de paires de dents de diverses géométries qui agiront ni plus ni moins comme des micro électrodes, voir Tableau 3-3. Le dessin de l'électrode est montré à la Figure 3-18. Une fois fabriquée, cette électrode a été utilisée afin d'usiner les rainures dans l'insert test. La profondeur d'enfonçage était de 100 μm . Ainsi, seul le bout des dents de l'électrode est venu marquer l'insert test. La fabrication de l'électrode et le marquage de l'insert test ont eu lieu chez Élimétal, de la région de Montréal. Subséquemment, l'électrode fut redécoupée au fil à l'École Polytechnique de Montréal. Un programme de quatre passes de fil a été effectué pour obtenir un bon fini de surface. Les résultats pour les marques dans l'insert test et de l'électrode seule sont présentés à la section 3.5.6 .

Tableau 3-3: Description des géométries de dents pour le marquage par électroérosion.

<i>Dent</i>	<i>Géométrie</i>	<i>Remarques</i>
A	V à 90° 100 μm prof.	Même géométrie qu'en usinage conventionnel
B	V à 150° 100 μm prof.	Un angle obtus pourrait être plus facilement mesurable avec le profilographe. Le remplissage devrait être facilité
C	45° avec un côté droit 100 μm prof.	On cherchera à mesurer son point d'inflexion. Le stylet du profilographe ne peut passer que dans une direction
D	V à 90° 50 μm prof.	Le remplissage déficient avec les marques peu profondes faites par usinage conventionnel sera peut être amélioré.
E	Demi cercle de 0,381 mm, 100 μm prof.	Une rainure en arc de cercle offrira moins de résistance au passage du stylet.
F	Demi cercle de 0,759 mm, 100 μm prof.	-

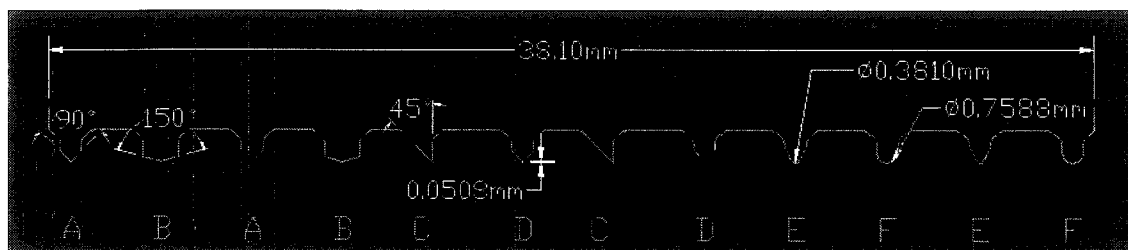


Figure 3-18: Dessin de la partie de l'électrode découpée par électroérosion fil (vue de coupe).

3.5.4 Usinage laser et par attaque chimique

L'usinage par attaque chimique et par laser sont grandement utilisés pour le texturage de moule. Un appel d'offre a été réalisé et remporté par Mold-Tech, une entreprise spécialisée en texturage de la région de Windsor, Ont. Le devis consistant à usiner deux ensembles de trois marques équidistantes, un ensemble par technologie. La distance entre deux marques d'une même nature est d'environ 6 mm et les marques sont profondes de 100µm. Il avait été mentionné que le défaut de rectitude des marques est la variable critique dans notre étude. Les résultats sont montrés à la section 3.5.6 pour ces deux procédés.

3.5.5 Usinage par enlèvement de copeaux à commande numérique

Des marques ont été faites en usinage par enlèvement de copeaux à commande numérique (CN) dans l'insert test au LRFV (Laboratoire de Recherche en Fabrication Virtuelle) de l'École Polytechnique de Montréal. La machine-outil utilisée est de type 5 axes de la compagnie Mitsui Seiki modèle VL30-5X. Cette machine est dotée de moteurs linéaires ce qui devrait permettre un meilleur contrôle de la position de l'outil. Les marques ont été usinées à une vitesse de 5000 tr/min avec deux outils différents. Le premier outil, relativement imposant, est une fraise d'environ 1 cm de diamètre avec rayon au coin de 0,76 mm. Lors de l'usinage, l'outil était incliné à 45° ce qui produit une rainure en forme d'arc de cercle de 0,76 mm. La profondeur de la rainure est de 100µm. Le second outil utilisé, beaucoup plus fin que le précédent, est une fraise avec un bout hémisphérique de 0,76 mm de diamètre. Lors de l'usinage, cet outil était perpendiculaire à la surface de l'insert test. Deux outils furent utilisés puisqu'on a émis certaine réserve quant à l'utilisation de petits outils (vibrations et flexions). Cependant, un gros outil travaillant à 45° est beaucoup plus encombrant. Cette option pourrait même être impossible dans une cavité profonde. Les résultats sont montrés pour les deux outils à la section 3.5.6.

3.5.6 Synthèse des essais de marquage et analyse

La Figure 3-19 montre les résultats des essais de fidélité pour les différentes géométries de repères produits par électroérosion présentées précédemment à la Figure 3-18.

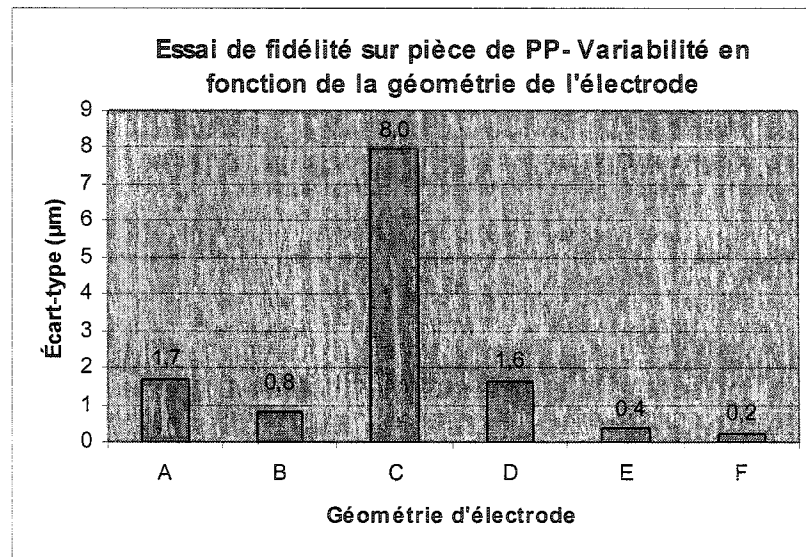


Figure 3-19: Essai de fidélité de mesure de repères sur pièces de polypropylène (PP). Les repères sont produits par électroérosion, ils sont de géométries et profondeurs diverses.

On remarque d'abord que la géométrie C présente une variabilité d'un ordre de grandeur supérieur aux autres géométries. Un exemple de nuage de points palpés sur le moule pour la géométrie C est présenté à la Figure 3-20. On constate que la rainure n'approche pas une géométrie simple, donc facilement substituable par des éléments géométriques (droites, arc de cercle, etc.). Ce phénomène est probablement dû à l'usure prématurée de la micro électrode C lors de l'enfonçage. La méthode de substitution employée est celle du point d'inflexion et est montrée également à la Figure 3-20. Cependant, la pente de la droite définissant le côté de la rainure est très sensible à la saisie des points et c'est ce qui cause la variabilité dans les coordonnées du point d'inflexion. On remarque également que les mesures des repères en forme d'arc de

cercle, E et F, sont les moins variables et que leurs écart-types sont de l'ordre de 0,2-0,4 microns. Ce résultat a guidé le choix des types d'outil utilisés pour l'usinage CN.

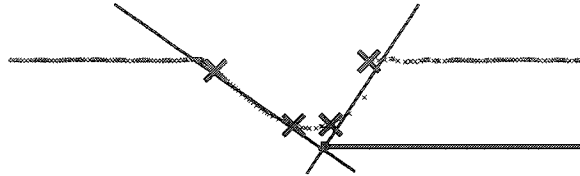


Figure 3-20: Nuage de points et substitution d'une marque produite par la géométrie d'électrode C.

Le Tableau 3-4, la Figure 3-21 et la Figure 3-22 montrent les résultats comparatifs pour les défauts de parallélisme, les essais de fidélité et le défaut de rectitude de tous les procédés utilisés. Les résultats pour les marques faites en usinage par enlèvement de copeau conventionnel et à commande numérique sont notés respectivement usinage conv. et usinage CN. On remarque que pour les marques faites par électroérosion, seules les géométries E et F (rainures en arc de cercle) furent mesurées. En effet, ces géométries avaient données les meilleurs résultats lors d'un essai de fidélité, Figure 3-19. Ceci indique que pour le procédé d'électroérosion, ce type de repère est plus facilement répliqué et mesuré par le profilographe.

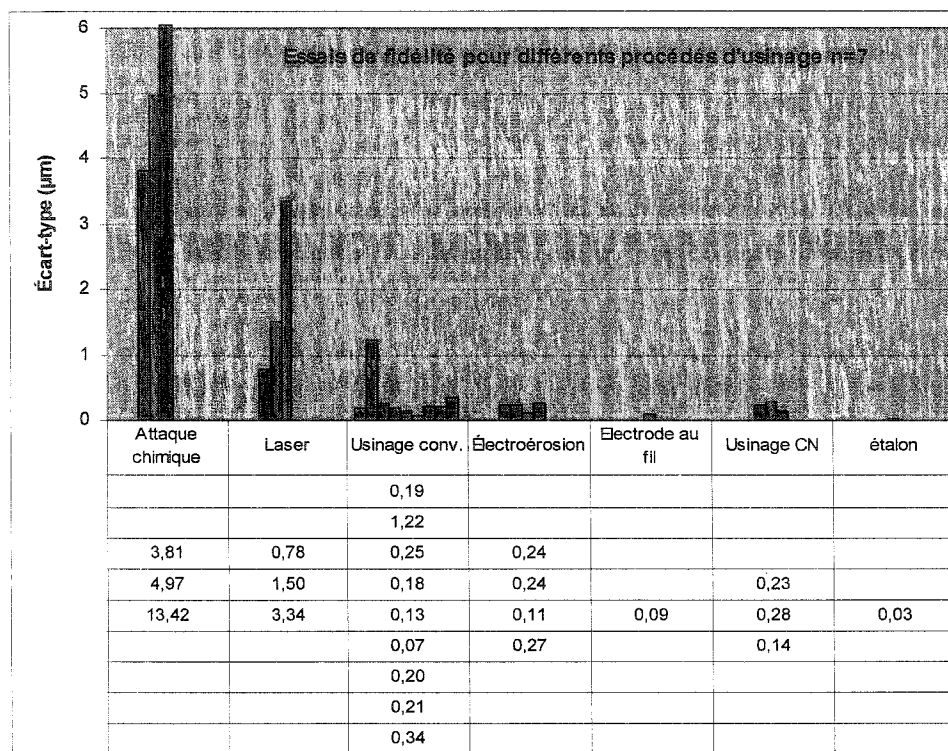


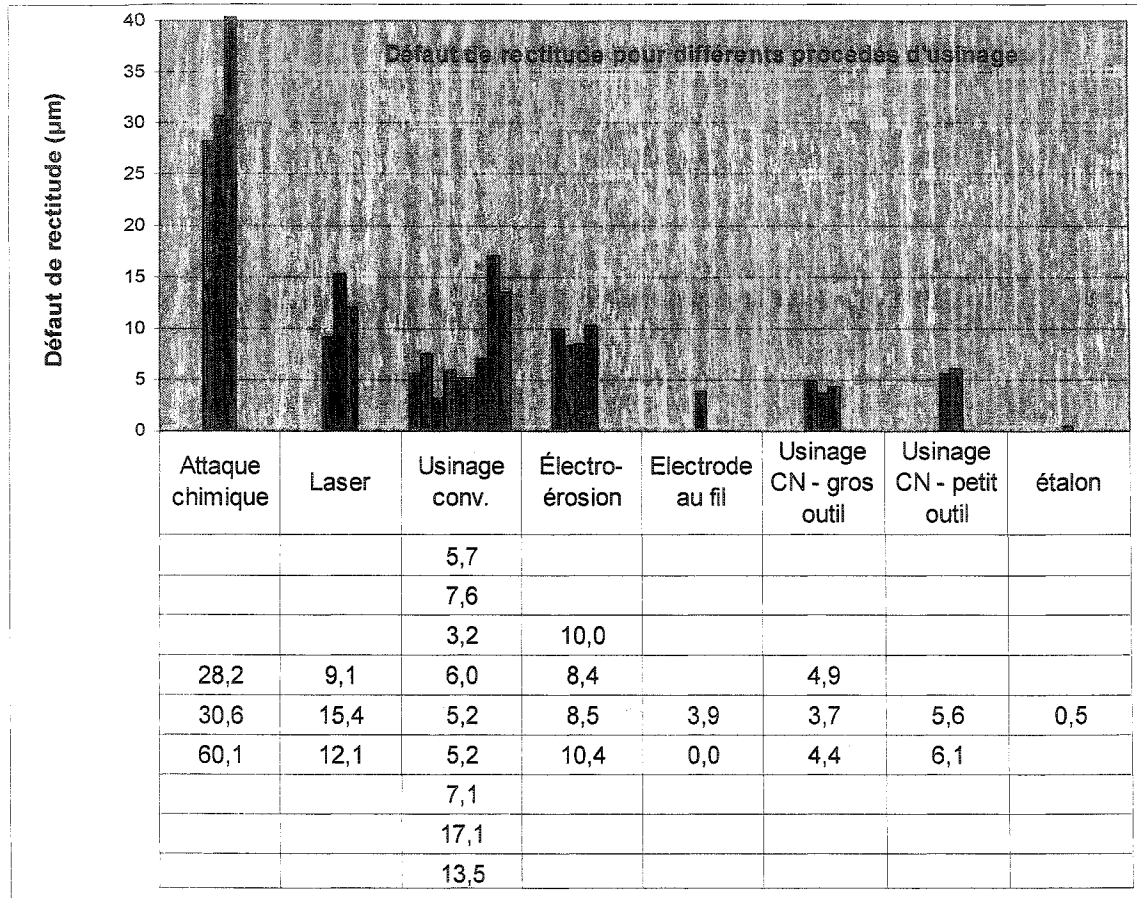
Figure 3-21: Résultats des essais de fidélité pour différents procédés d'usinage.

Tableau 3-4: Résultats de la mesure du défaut de parallélisme.

	Mesure du défaut de parallélisme				
	Pente et incertitude marque1	Pente et incertitude marque2	Pente et incertitude marque3	Pente et incertitude marque4	Défaut de paral.
Attaque chimique	0,00018 ± 0,00022	0,00018 ± 0,00025	0,00056 ± 0,00042		N.S.*
Laser	0,00146 ± 0,00031	0,00127 ± 0,00028	0,00123 ± 0,00027		N.S.
Électroérosion	0,0023 ± 0,0010	0,0023 ± 0,0010	0,0023 ± 0,0010	0,0023 ± 0,0010	N.S.
Usin. conv. 0,010 prof.**	0,0075 ± 0,0031	0,0066 ± 0,0035	0,0059 ± 0,0041		N.S.
Usin. conv. 0,005 prof.**	0,0048 ± 0,0024	0,0051 ± 0,0023	0,0049 ± 0,0024		N.S.
Usin. conv. 0,002 prof.**	0,0175 ± 0,0073	0,0180 ± 0,0081	0,0178 ± 0,0077		N.S.
Usin. CN gros outil	0,00248 ± 0,00053	0,00246 ± 0,00051	0,00256 ± 0,00052		N.S.
Usin. CN petit outil	0,00172 ± 0,00042	0,00178 ± 0,00043			N.S.

* Non Significatif

** La longueur est ici de 0,5 cm comparativement à 2,54 cm pour les autres méthodes.



* La longueur est ici de 0,5 cm comparativement à 2,54 cm pour les autres méthodes.

Figure 3-22: Résultats des mesures du défaut de rectitude pour différents procédés d'usinage

Le premier constat est que, pour tous les procédés d'usinage mesurés, le défaut de parallélisme ne semble jamais significatif. En effet l'incertitude sur la pente de régression est très importante face aux différences de pente. Si on traçait les pentes avec leurs incertitudes pour chaque procédé, on verrait que les incertitudes se chevauchent dans tous les cas. Pour cette raison, le défaut de parallélisme est convenu négligeable.

Au niveau des essais de fidélité, on remarque d'abord les procédés de laser et d'attaque chimique n'ont pas bien faits. En effet, l'écart-type pour ces deux procédés est au moins un ordre de grandeur supérieur aux autres procédés. Ceci est probablement du

au fait que les profils de ces marques sont fortement irréguliers et s'éloignent de géométries idéales, voir Figure 3-23. Ces profils sont donc difficilement substituables.

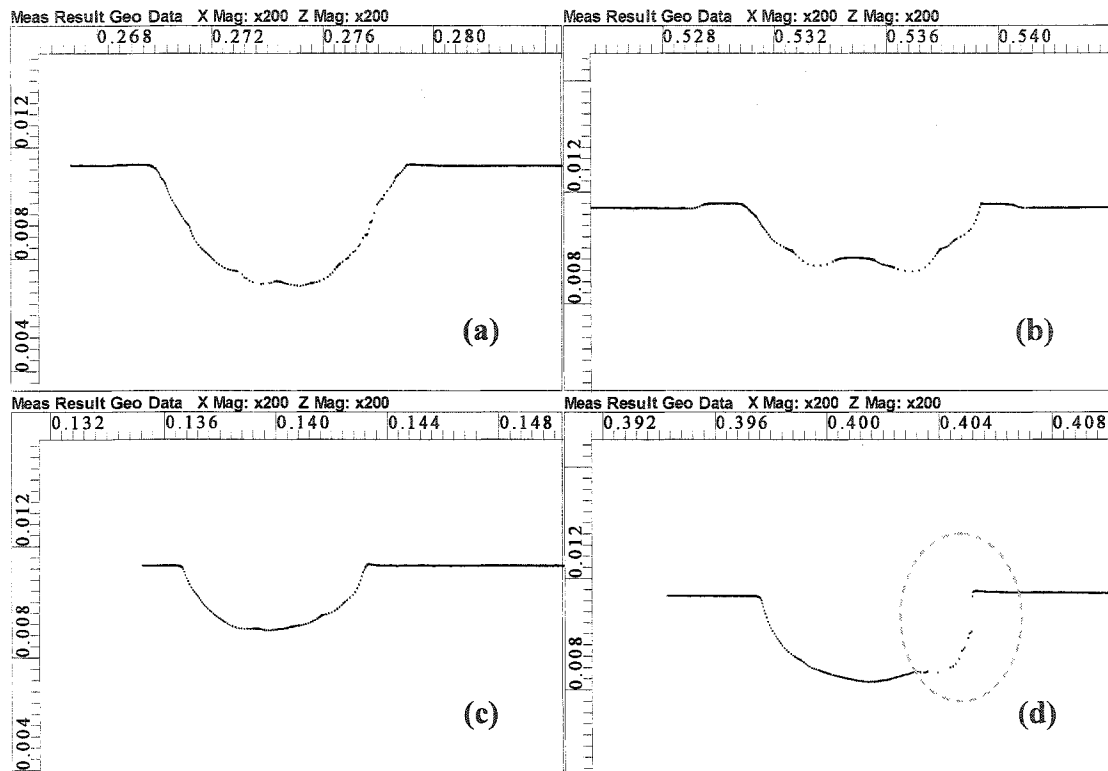


Figure 3-23 : Exemples de points recueillis lors du palpage de marques produites laser (a) et (b) par attaque chimique (c) et (d). La singularité encerclée en trait pointillée est causée par un profil trop abrupte, il y a probablement contact entre le stylet et l'arête de la rainure.

On remarque également que la mesure de l'étalon a donné la variabilité la plus faible, $0,03 \mu\text{m}$, ce qui est comparable à la résolution du profilographe ($0,05 \mu\text{m}$). Le procédé qui a donné les marques mesurées avec le moins de variabilité est l'usinage par électroérosion mais l'usinage conventionnel et l'usinage CN ont donné des résultats tout à fait comparables. En effet, la comparaison de variabilité doit être faite avec prudence car l'échantillonnage est somme toute assez faible ($n=7$). L'électrode découpée au fil à l'École Polytechnique de Montréal a aussi été mesurée avec peu de variabilité mais l'insert test n'a pas été marqué avec cette électrode. Après enfonçage, le résultat aurait probablement été comparable aux autres marques faites par électroérosion.

Au niveau de la rectitude, l'usinage CN a été le procédé le plus performant avec des défauts moyens de $4,3\text{ }\mu\text{m}$ pour le gros outil et $5,8\text{ }\mu\text{m}$ pour le petit outil. Ensuite vient l'usinage conventionnel avec des défauts moyens de $7,8\text{ }\mu\text{m}$ et l'électroérosion avec $9,4\text{ }\mu\text{m}$. Par contre, rappelons que les marques faites par usinage conventionnel sont beaucoup plus courtes que les autres, donc que le défaut de rectitude y est possiblement inférieur. Une longueur de seulement 20 mm est mesurée tandis que 100 mm sont mesurés pour les autres procédés. L'usinage par laser et par attaque chimique n'ont pas mieux performé au niveau de la rectitude, respectivement 12 et $75\text{ }\mu\text{m}$. La mesure de l'étalon montre que la méthodologie employée est adéquate, en effet le défaut de rectitude de l'étalon a été évalué à $0,46\text{ }\mu\text{m}$. Un histogramme de fréquence d'occurrence des points mesurés est montré à la Figure 3-24. On remarque que ceux-ci sont distribués normalement autour de la droite des moindres carrés après rotation (moyenne). Cette information sera utile lors de l'évaluation de $u(x)$ qui servira à trouver la distance entre les repères à la prochaine section. Aussi, on remarque que dans le cas de l'usinage CN, la valeur moyenne du défaut de rectitude est exactement vingt fois supérieure à l'écart-type trouvé lors de l'essai de fidélité. On constate donc que c'est le défaut de rectitude qui domine sur le processus de mesure comme source d'incertitude.

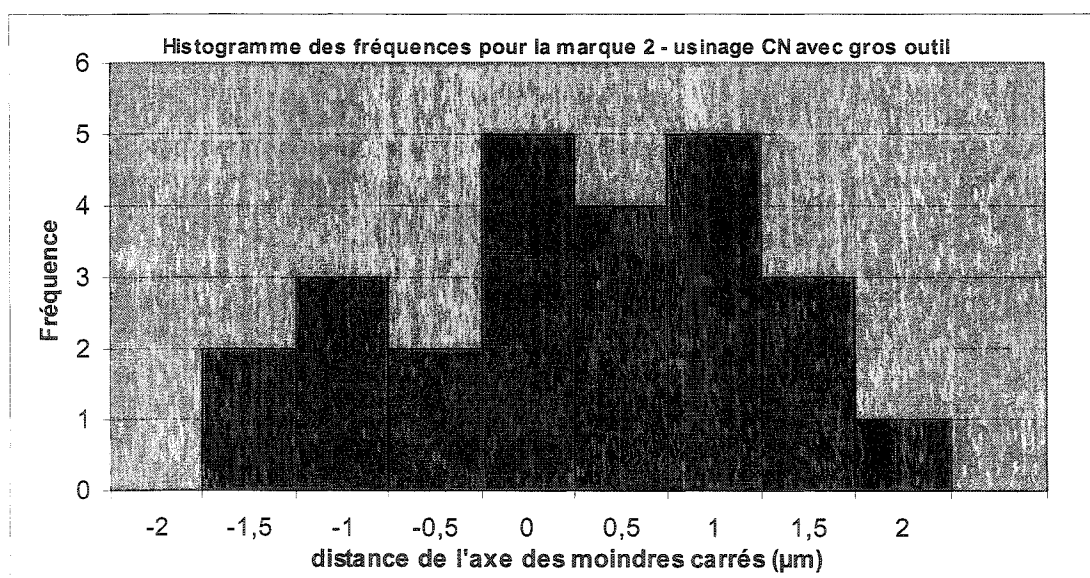


Figure 3-24 : Histogramme des fréquences pour l'usinage CN.

Le Tableau 3-5 montre brièvement les coûts relatifs pour chaque procédé de marquage employé. Ces indices sont assez subjectifs et les coûts peuvent varier énormément en fonction de la géométrie du moule. Cependant, il est intéressant de comparer les procédés à cet égard puisque les travaux effectués sont tout de même assez semblables.

Tableau 3-5: Indice des coûts relatifs pour chaque méthode de fabrication des repères.

	Procédé d'usinage				
	<i>Conventionnel</i>	<i>CN</i>	<i>Électroérosion</i>	<i>Laser</i>	<i>Att. chimique</i>
Coûts relatifs	\$	\$\$\$	\$\$\$\$	\$\$	\$\$
Notes	Très rapide ≠ Formes complexes	Très rapide Machine coûteuse	Lent Potentiellement plus performant		

3.6 Validation expérimentale

Si la seule source d'incertitude était le défaut de rectitude, l'incertitude sur x , la position d'un repère, dépendrait du nombre de mesure et serait donné par la relation (5), l'erreur type sur la moyenne. Si on prend une seule mesure, on devrait avoir une incertitude $u(x)$ d'environ $1\text{ }\mu\text{m}$.

$$u(x) = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} = \frac{\text{def. rect.}}{6\sqrt{n}} \quad (5)$$

Si on retourne à la Figure 3-1, on constate que l'on pourrait théoriquement placer les repères à moins de 5 mm seulement les uns des autres et avoir une incertitude sur le retrait, $u(R)$, de moins de 0,0005. Ce qui serait très performant. Cependant, l'incertitude sur le retrait est probablement sous-estimée puisque seul le défaut de rectitude est considéré.

Il est donc apparu nécessaire de passer à de véritables essais de mesures de retrait au moulage avec l'insert test. Des plaques de deux matières différentes, un polystyrène (PS) et un polypropylène (PP), furent moulés. Ces matières ont été choisies parce qu'elles diffèrent en structure : le PS est amorphe et le PP est semi-cristallin. De plus elles ont des valeurs de retrait nominales assez différentes, le PS a moins de 1% et le PP environ 2% de retrait au moulage. Les moules et les plaques ont ensuite été mesurées en quelques positions pour diverses distances entre les repères, voir Figure 3-25. Cinq mesures rapprochées, à chaque 1,25 mm en y , ont été prises par essai. Les essais furent répétés trois fois. Les résultats détaillés sont montrés à la Figure 3-26.

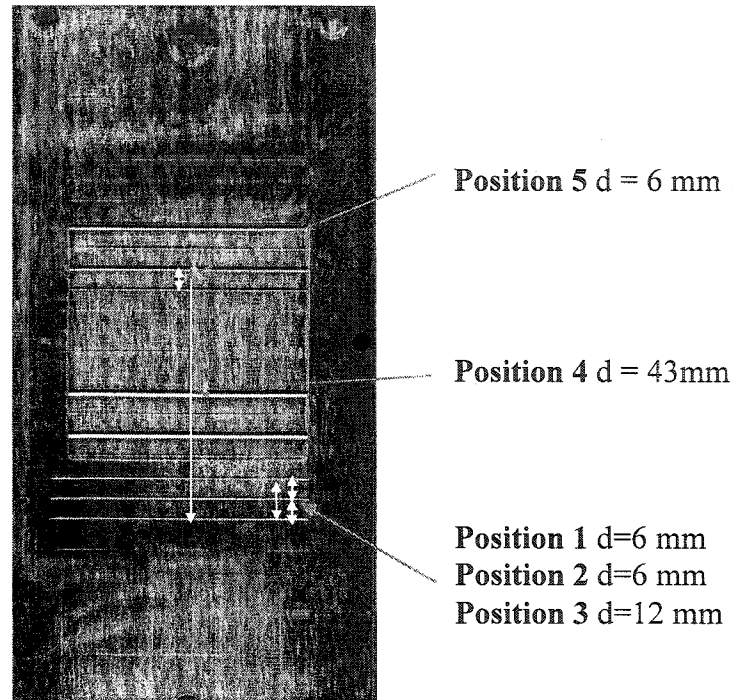


Figure 3-25 : Positions où le retrait est mesuré lors des essais préliminaires.

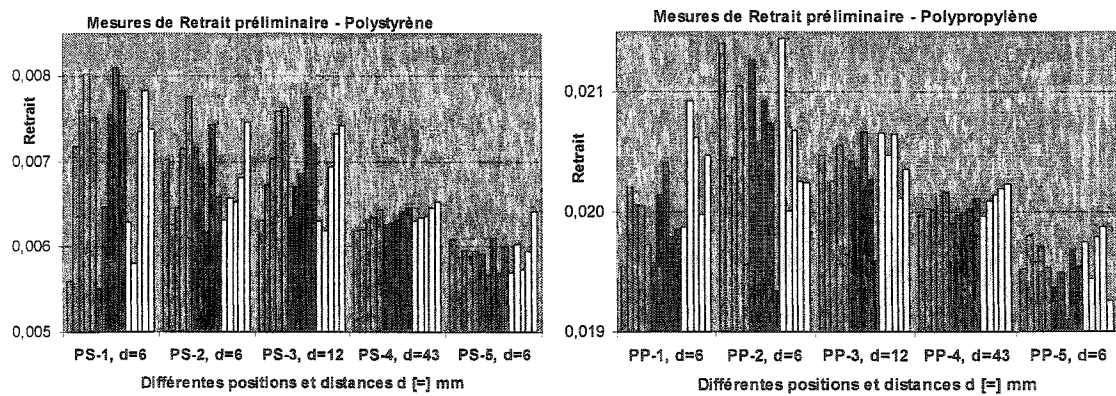


Figure 3-26 : Résultats des essais préliminaires de mesure du retrait pour deux matières, le polypropylène (PP) et le polystyrène (PS). Par exemple, PS-3 $d=12$ pour une plaque de polystyrène à la position 3 où la distance entre les repères est 12 mm.

On remarque à la figure Figure 3-26 que la variabilité des mesures en position 5 semble moindre pour les deux polymères que pour les positions 1 et 2 et cela malgré le fait que la distance entre les repères est la même. La position 5 est située sur l'axe de symétrie de la pièce et est plus près du seuil d'injection tandis que les positions 1 et 2 sont décentrées par rapport à l'axe de symétrie et sont plus loin du seuil. Pour ces raisons, il est possible que le retrait y soit plus homogène qu'en position 5. Les repères en 5 sont usinés par électroérosion alors que qu'en 1 et 2 ils sont fabriqués par enlèvement de copeaux CN. Cependant ces deux procédés de marquage semblaient aussi performants au niveau de la rectitude.

Si on considère que l'étendue des mesures pour chaque position et chaque distance mesurée est égale à 6σ et que l'incertitude sur le retrait $u(R) = \sigma$, on obtient cinq valeurs d'incertitude pour trois distances entre les repères (6, 12 et 43 mm). En rapportant ces points dans le graphe de $u(R)$ en fonction de l_m , voir Figure 3-27, on est en mesure d'estimer, en situation réelle, l'incertitude sur la position d'un repère, $u(x)$. On l'estime ici à environ $1\mu\text{m}$. On remarque que c'est la même valeur qui fut estimée en ne considérant que le défaut de rectitude. Ainsi, les mesures préliminaires de retrait nous ont permis de vérifier notre hypothèse selon laquelle le défaut de rectitude constitue la principale source d'incertitude sur la mesure du retrait au moulage. Et cela, malgré la recherche du meilleur procédé d'usinage.

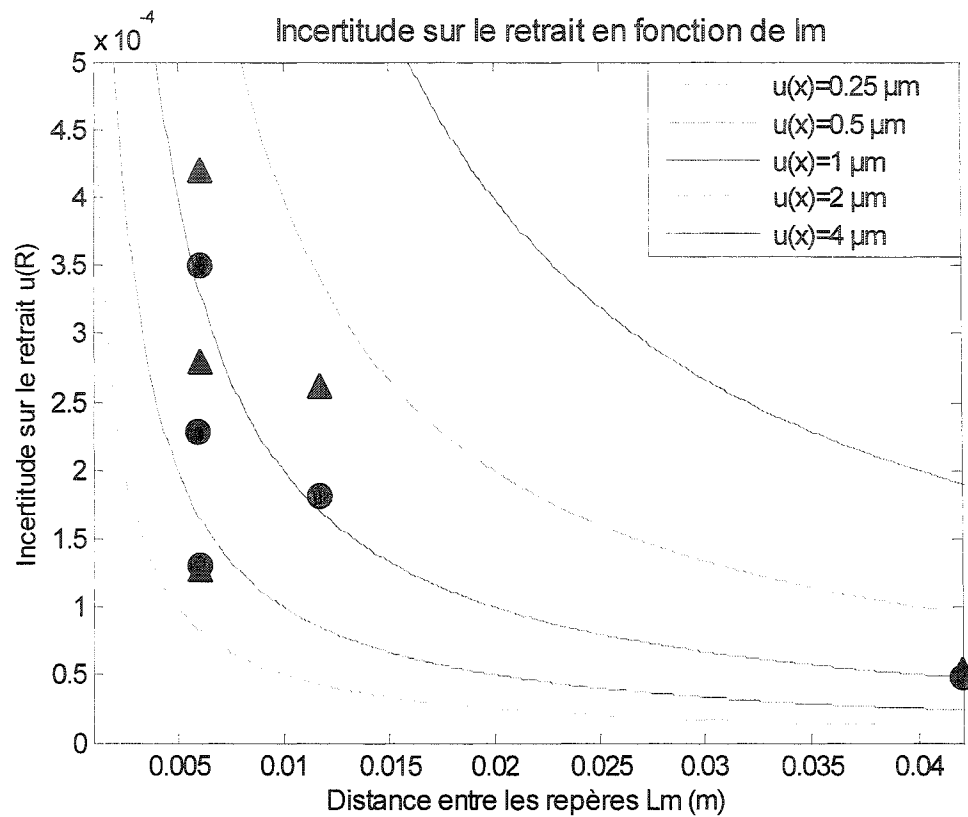


Figure 3-27 : Graphique d'incertitude sur le retrait en fonction de la distance entre les repères. Les points représentent les résultats des essais préliminaires de retrait au moulage pour deux matières : un polypropylène ● et un polystyrène ▲ . Chaque incertitude est l'étendue des valeurs de retrait divisée par 6 (ce qui correspond à un écart type) pour chaque position mesurée.

De plus, on remarque que le type de matière choisit, faible retrait nominal (PS) ou fort retrait nominal (PP), n'influence pas l'incertitude sur le retrait. En fait, c'est l'hypothèse qui avait été fait implicitement à la section 3.1.1 : $l_m \approx l_p$. La validation expérimentale vient donc confirmer cette hypothèse.

3.7 Fabrication des repères

Finalement, l'usinage par enlèvement de copeaux à commande numérique est la technique choisie pour la fabrication des repères dans les moules parce que c'est par cette méthode que le défaut de rectitude semble le mieux contrôlé. Le petit outil à tête hémisphérique est utilisé parce que le gros outil est trop encombrant et risque d'abîmer les parois du moule lors de son parcours. Pour des considérations pratiques et pour demeurer conservateur, on fixe la distance constante entre les repères à 6,35 mm. Cette distance devrait donner une incertitude $u(R)$ moyenne d'environ 0,0003. Il a été convenu d'arranger les repères de façon orthogonale, on obtiendra alors une grille sur les pièces moulées. De plus, afin d'éviter les effets de bords telles que les retassures, aucune marque ne sera placée à moins de 3,1 mm des côtés des pièces. Ainsi, les inserts sont désormais divisés en 85 régions identifiées de A1 à Q5, voir Figure 3-28.

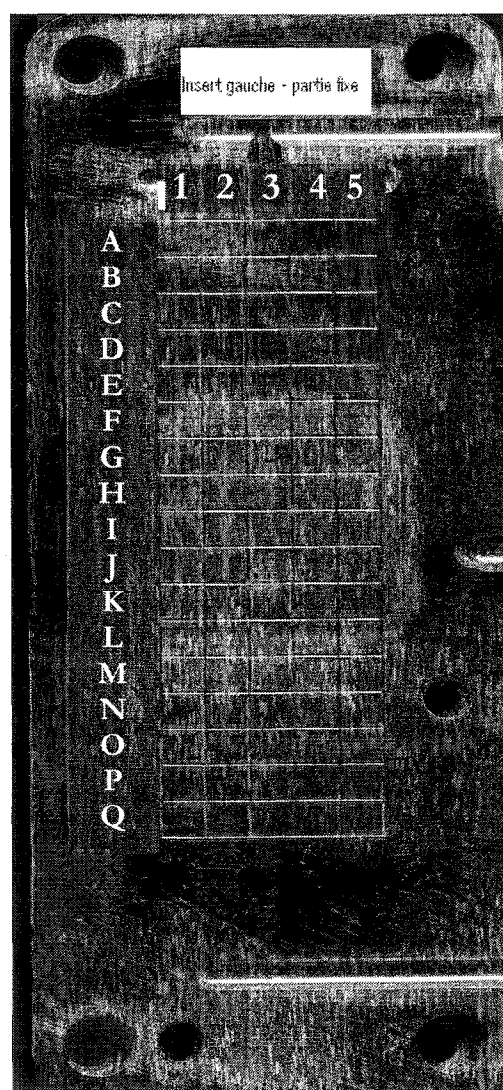


Figure 3-28 : Photo d'un insert une fois marqué. Il est divisé en 85 régions de A1 à Q5.

Une fois les quatre inserts marqués, l'insert gauche de la partie fixe a été mesuré (trois mesures par région dans le sens de la longueur et trois dans le sens de la largeur) sauf pour les régions P1 à P5 et Q1 à Q5 qui furent mesurées seulement dans le sens de la largeur. Ces régions étant hors de l'étendue de mesure du profilographe dans le sens de la longueur, les résultats sont présentées au Tableau 3-6. Sachant que le défaut de rectitude devrait être d'environ 6 μm , l'incertitude sur la position d'un repère est de $u(x) = 6/6 = 1 \mu\text{m}$ puisqu'on l'assume distribué normalement. Sur une distance, l'incertitude $u(d) = (2*(1)^2)^{1/2} = 1,4 \mu\text{m}$. Si on augmente $u(d)$ par un facteur de sécurité $k = 2$, on devrait trouver $d = 6\,350 \pm 2,8 \mu\text{m}$ avec un pourcentage de confiance de 95%. Les résultats déviant légèrement de cette tolérance sont surlignés en pâle et ceux déviant fortement sont en foncé. On remarque que presque toutes les déviations importantes sont situées dans le bloc mobile au centre de l'insert.

Tableau 3-6 : Écarts entre la dimension nominale et la distance mesurée pour l'insert gauche de la partie fixe. Les écarts significatifs sont surlignés en pâle les écarts importants sont en foncé. Les différences sont en μm .

	Colonne									
	1		2		3		4		5	
Ligne	Long.	Larg.	Long.	Larg.	Long.	Larg.	Long.	Larg.	Long.	Larg.
A	-1,7	-1,5	-0,8	-0,5	-0,6	-0,9	1,4	-1,9	0,7	-0,5
B	-1,3	-0,1	-1,7	-1,4	-0,5	-0,5	-2,3	-1,9	-0,8	0,1
C	-0,3	-0,8	-0,8	-1,8	-1,8	-0,3	-0,6	-1,2	-0,8	-1,4
D	1,5	-0,7	-0,9	-1,7	0,2	-0,3	-0,9	-2,0	-0,5	-0,2
E	-1,5	-1,3	1,4	-1,2	0,6	-0,5	2,1	-1,9	-0,6	-0,3
G		2,0		0,4	1,3	3,3	4,1	1,6	1,4	2,4
H		2,5	0,7	0,3	3,2	0,4	-1,0	0,8	-3,0	2,5
I	3,1		2,6	0,4	0,3	-0,7	-0,3	-1,4	-4,0	4,0
J	-0,1	2,9	-0,6	-0,2	0,5	-1,1		0,4		-1,3
K	-2,4	0,9	-1,5	0,4		-0,4		-2,8		-1,3
M	-0,6	-1,3	1,6	-1,2	-2,0	-0,8	1,2	-1,3	-1,0	0,4
N	-0,3	-0,2	-1,1	-1,3	0,1	-1,5	-0,5	-0,9	-0,3	0,6
O	2,8	-1,4	1,9	-1,1	2,6	-1,5	0,3	-0,6	1,6	0,3
P		-1,7		-0,9		-1,1		-1,7		1,2
Q		-1,3		0,1		-1,6		-1,4		

3.8 Procédure de mesure

Afin de mesurer de façon efficace, des programmes de mesures seront mis en place avec des déplacements rapides au-dessus des régions sans les toucher. Seuls les repères seront palpés. La vitesse de palpage est très faible, 0,04 mm/s, mais pas minimale (0,02 mm/s) afin de mesurer dans un laps de temps décent. Le pas de mesure est fixé à un point à tous les 20 μm dans le but d'obtenir un nuage de points représentatif du repère. La série de calcul sera incluse dans le programme en mode semi-automatique.

La pièce est fixée avec de la plasticine sur deux plateaux mobiles empilés. Celui reposant sur le marbre est massif et dispose d'une butée qui le rend d'équerre avec l'axe de mesure du profilographe (ce plateau n'a été disponible qu'en fin de projet). Les déplacements de pièces sont effectués avec les vis micrométriques de ce plateau. L'autre plateau sert lors de l'alignement des pièces puisque seul celui-ci possède des vis de déplacement angulaire. La pièce est donc préalablement alignée autour de y et autour de z avec le second plateau. La procédure d'alignement autour de z a été décrite à la section 3.5.1. C'est évidemment un alignement imparfait mais suffisant (voir analyse de sensibilité en 3.3.3).

Des pièces moulées avec les inserts marqués ont parfois montrées des gauchissements importants. Jusqu'à 330 μm ont été mesurés comme Δz . Cependant, ces gauchissements ont seulement lieu aux pourtours des pièces. Ainsi, lorsqu'on mesurera un Δy supérieur à 100 μm , on tiendra compte de ce dernier et la distance sera donnée par $(\Delta z^2 + \Delta x^2)^{1/2}$ plutôt que par Δx seul. La limite est fixée à 125 μm puisque cette valeur correspond à une erreur de 0,8 μm sur la mesure d'une distance de 6,350 mm, ce qui n'est pas négligeable par rapport à l'incertitude $u(x)$ de 1 μm due aux défauts de rectitude. Aussi, mentionnons que les valeurs de retrait seront calculées à partir de la valeur nominale de distance dans le moule, soit 6,350 mm.

3.9 Conclusion

Finalement, rappelons la problématique de la mesure locale du retrait au moulage : plus la distance entre les repères est courte, plus l'incertitude sur le retrait est grande. Une analyse de sensibilité a été effectuée dans le but de trouver, d'analyser et de classer les sources probables d'incertitude sur les valeurs de retrait obtenues. Cette analyse a montré que les sources principales sont les défauts de rectitude et de parallélisme ainsi que le gauchissement des pièces.

Des essais de méthodes de marquage furent réalisés dans un insert test. Ces essais ont permis de trouver la géométrie (profondeur et forme) la plus adéquate pour créer les repères sur les pièces moulées. La géométrie choisie est celle d'une rainure en forme d'arc de cercle de 0,75 mm de diamètre, profonde de 100 μm . Aussi, ces essais ont permis de trouver un procédé donnant des rainures ayant des défauts de rectitude les plus faibles (environ 6 μm). Le procédé utilisé est l'usinage CN avec un outil à tête hémisphérique de 0,75 mm de diamètre. Le défaut de parallélisme s'est avéré non significatif pour tous les procédés essayés.

Des pièces de polypropylène PP et de polystyrène PS ont été moulées et le retrait mesuré en divers endroits. Les résultats ont montré que, en situation réelle, l'incertitude sur un repère $u(x)$ est d'environ 1 μm . Cette valeur correspond très bien avec la part d'incertitude attribuable au défaut de rectitude des marques. Cette part est évaluée par le défaut de rectitude divisé par six, donc aussi 1 μm , si on ne prend qu'une seule mesure. Ceci tend à confirmer l'hypothèse selon laquelle le défaut de rectitude constitue la principale source d'incertitude de mesure du retrait au moulage.

Les inserts ont été marqués par la méthode décrite plus haut. Une procédure de mesure a été élaborée. Comme des gauchissements importants (Δz) ont parfois été observés aux pourtours des pièces plastiques, il faut corriger la dimension mesurée.

C'est-à-dire que la distance totale entre les repères doit être considérée et non seulement la distance projetée (Δz). Le profilographe, qui est utilisé pour effectuer les mesures, a aussi été brièvement décrit en début de chapitre.

4 RÉSULTATS ET ANALYSE

4.1 Effet de la position sur les retraits

4.1.1 Méthodologie

Premièrement, les inserts ont été montés dans le moule avec la nouvelle partie fixe. La configuration des blocs mobiles est celle pour obtenir des pièces à épaisseur constante géométrie (1) de la Figure 2-4. Un bouchon a été apposé du côté de la pièce avec le seuil conventionnel afin de ne mouler que des pièces avec un seuil large (film gate). L'espace de moulage a été approximé en faisant varier la vitesse d'injection V_{inj} et la pression de maintien P_m . La température d'injection était tenue constante à la valeur recommandée pour le PP soit 200°C. La température du moule n'était pas vraiment contrôlée mais plutôt surveillée avec une sonde après les séquences de moulage. Le temps de maintien a été fixé largement supérieur au temps nécessaire à la solidification.

Les premiers essais ont révélés que la vitesse d'injection pouvait se situer dans un domaine entre 10 et 100 mm/s et donner des pièces acceptables. Cependant, pour certaines vitesses d'injection, la vitesse en fin de course de la vis a dû être ajustée pour éviter l'apparition de bavures. Les paliers de vitesse sont montrés au Tableau 4-1. Par exemple, pour la vitesse d'injection de 100 mm/s, le premier palier se termine à 4 mm. Un second palier d'injection à vitesse moins élevée était nécessaire afin d'éviter une surpression en fin de course causant une ouverture partielle du moule (*flash*). Ainsi, du jalon 1 à 2, donc de la position 4 mm à 2 mm, la vitesse de consigne était de 10 mm/s. Il s'agit en fait d'une zone de décélération de la vis. Les positions de la vis ont été ajustées afin d'obtenir un remplissage à la vitesse de consigne pour toute la pièce tout en laissant un coussin de matière minimum de 0,5 mm à la fin du cycle d'injection et en évitant la surpression.

Tableau 4-1: Paliers de vitesse d'injection.

Jalons	0	1	2	0	1	2	0	1	2
Position (mm)	36	0,5	0,5	36	3	1	36	4	2
V _{inj} (mm/s)	10	10		55	10		100	10	
P _{max} (MPa)	35,0			58,0			57,1		

On remarque que pour les trois vitesses de consigne, la pression hydraulique maximale atteinte est de 58 MPa. La pression de maintien est habituellement choisie pour avoir 50 à 80 % de la pression maximale. On a donc choisi de faire varier la pression de maintien entre 15 et 45 MPa. Des essais subséquents aux trois vitesses et à ces pressions de maintien ont donnés des pièces semblables. On remarque également que pour les vitesses de 55 et 100 mm/s, la pression maximale atteinte durant l'injection est assez similaire, respectivement elle est de 58,0 et 57,1 MPa. À première vue, il apparaît étonnant que la pression maximale soit légèrement inférieure pour l'injection rapide. Cependant, ce phénomène peut probablement être expliqué par le comportement non-Newtonien (rhéofluidifiant) des polymères à l'état fondu. C'est-à-dire que la viscosité diminue avec le taux de cisaillement. De plus, l'échauffement visqueux contribue probablement au phénomène. La résine s'échauffant par frottement interne cause une chute de viscosité. Rappelons la règle empirique selon laquelle une augmentation de 10°C de la résine cause une réduction de la moitié de la viscosité d'un polymère.

Une fois le domaine de pression de maintien et de vitesse d'injection établi, on a voulu voir si les retraits au moulage varient avec la position sur la pièce. Les retraits mesurés ici sont le retrait dans le sens de l'écoulement et le retrait dans le sens transverse. Des pièces de polypropylène à section constante ont donc été moulées aux paramètres suivants :

$P_m = 30 \text{ MPa}$
 $V_{inj} = 55 \text{ mm/s}$
 $T_{inj} = 200^\circ\text{C}$
 $T_{moule} = 37 \pm 2.5^\circ\text{C}$
 Mode : semi-automatique
 Matériau = PP HIVAL 2420NA (MI=20g/min) de GP

Les profils de la pression en fonction de la position de la vis étaient vérifiés visuellement pour chaque moulage. Ceux-ci se superposent lorsqu'une certaine stabilité est atteinte par le système. Les pièces étaient également pesées pour vérifier la stabilité d'un moulage à l'autre. Deux pièces furent mesurées avec le profilographe. Une de ces pièces a été mesurée des deux côtés. La procédure utilisée pour la mesure est décrite au chapitre précédent à la section 3.8. Les pièces furent mesurées plus de 48h après le moulage.

Les régions A1 à O5 ont été palpées dans les deux directions, voir figure 3.28. Ainsi 130 valeurs de retrait par côté de pièce ont été obtenues. Celles-ci étant réparties en 65 valeurs de retrait dans le sens de l'écoulement (inscrit retrait=) et 65 valeurs de retrait dans le sens transverse (inscrit retrait+). Les résultats statistiques et les représentations 3D sont obtenus à l'aide du logiciel Statistica. Le gauchissement a été évalué à l'aide des coordonnées en z des repères. Comme, il était souvent supérieur à la limite de 100 μm fixée précédemment, les valeurs de retrait ont été corrigées comme mentionné à la section 3.3.3. Précisons que les régions affectées par le gauchissement sont les pourtours des pièces uniquement.

4.1.2 Statistiques de base

Les statistiques descriptives obtenues dans cette section, pour deux pièces dont une mesurée des deux côtés, sont montrées Tableau 4-2. La moyenne, l'écart-type, l'erreur-type ainsi que les limites d'intervalles pour un pourcentage de confiance de 95% des retraits obtenus dans les deux directions y sont présentés. Les valeurs sont montrées sans unités.

Tableau 4-2: Statistiques descriptives résultants de la mesure complète de 2 pièces. Une des pièces est mesurée des deux côtés.

Effect	Descriptive Statistics (DonnePreIXY.sta)											
	Level of Factor	N	Retrait = Mean	Retrait = Std.Dev.	Retrait = Std.Err	Retrait = -95,00%	Retrait = +95,00%	Retrait + Mean	Retrait + Std.Dev.	Retrait + Std.Err	Retrait + -95,00%	Retrait + +95,00%
Total		194	0,02003	0,00072	0,00005	0,01992	0,02013	0,02935	0,00145	0,00010	0,02914	0,02955
Piece	1	65	0,01991	0,00075	0,00009	0,01972	0,02009	0,02920	0,00156	0,00019	0,02882	0,02959
Piece	2	129	0,02009	0,00070	0,00006	0,01996	0,02021	0,02942	0,00140	0,00012	0,02918	0,02966
Ligne	A	14	0,02082	0,00102	0,00027	0,02023	0,02141	0,02847	0,00255	0,00068	0,02700	0,02994
Ligne	B	15	0,02012	0,00062	0,00016	0,01978	0,02046	0,02988	0,00185	0,00048	0,02885	0,03090
Ligne	C	15	0,01968	0,00038	0,00010	0,01947	0,01989	0,03028	0,00127	0,00033	0,02958	0,03098
Ligne	D	15	0,01958	0,00057	0,00015	0,01926	0,01989	0,03033	0,00119	0,00031	0,02968	0,03099
Ligne	E	15	0,01978	0,00061	0,00016	0,01944	0,02012	0,03012	0,00115	0,00030	0,02949	0,03076
Ligne	G	15	0,02036	0,00071	0,00018	0,01996	0,02075	0,02897	0,00114	0,00029	0,02834	0,02960
Ligne	H	15	0,02048	0,00058	0,00015	0,02016	0,02080	0,02896	0,00111	0,00029	0,02835	0,02958
Ligne	I	15	0,02031	0,00055	0,00014	0,02001	0,02062	0,02916	0,00135	0,00035	0,02841	0,02990
Ligne	J	15	0,01983	0,00068	0,00018	0,01946	0,02021	0,02906	0,00118	0,00031	0,02840	0,02971
Ligne	K	15	0,01960	0,00086	0,00022	0,01913	0,02008	0,02917	0,00133	0,00034	0,02844	0,02991
Ligne	M	15	0,01958	0,00038	0,00010	0,01937	0,01979	0,02951	0,00107	0,00028	0,02891	0,03010
Ligne	N	15	0,02000	0,00053	0,00014	0,01970	0,02029	0,02901	0,00087	0,00023	0,02853	0,02949
Ligne	O	15	0,02025	0,00048	0,00012	0,01998	0,02051	0,02854	0,00098	0,00025	0,02800	0,02909
Cote	1	130	0,01986	0,00073	0,00006	0,01974	0,01999	0,02924	0,00158	0,00014	0,02897	0,02952
Cote	2	64	0,02036	0,00058	0,00007	0,02021	0,02050	0,02956	0,00115	0,00014	0,02928	0,02985
Colonne	1	39	0,01994	0,00073	0,00012	0,01971	0,02018	0,03074	0,00097	0,00015	0,03043	0,03105
Colonne	2	39	0,01999	0,00062	0,00010	0,01979	0,02019	0,02877	0,00087	0,00014	0,02848	0,02905
Colonne	3	38	0,02006	0,00083	0,00013	0,01979	0,02034	0,02817	0,00097	0,00016	0,02786	0,02849
Colonne	4	39	0,02002	0,00068	0,00011	0,01980	0,02024	0,02844	0,00098	0,00016	0,02812	0,02876
Colonne	5	39	0,02011	0,00077	0,00012	0,01986	0,02036	0,03059	0,00101	0,00016	0,03026	0,03092

On remarque dans le Tableau 4-2: que les retraits dans le sens de l'écoulement et dans le sens transverse diffèrent très significativement. La moyenne globale des retraits= est de $0,0200 \pm 0,0007$ alors que la moyenne des retraits+ est de $0,0294 \pm 0,0015$. Ainsi, le retrait dans le sens transverse est près de 50% plus élevé que le retrait dans le sens de l'écoulement.

4.1.3 Présentation graphique des résultats

La Figure 4-1 (a) et (b) montre la distribution spatiale des valeurs de retrait. Les surfaces sont générées par une spline. On remarque d'abord que les retraits ne sont pas distribués de la même manière. Le retrait dans le sens de l'écoulement (retrait=) semble relativement constant alors que le retrait dans le sens transverse, retrait+, prend une forme quadratique. Pour le retrait+, les colonnes 1 et 5 ont des valeurs plus élevées qu'au centre (colonne 3). La région près du seuil, ligne A, B et C, exhibe des valeurs de retrait= légèrement supérieures alors que l'effet inverse est constatée pour le retrait +.

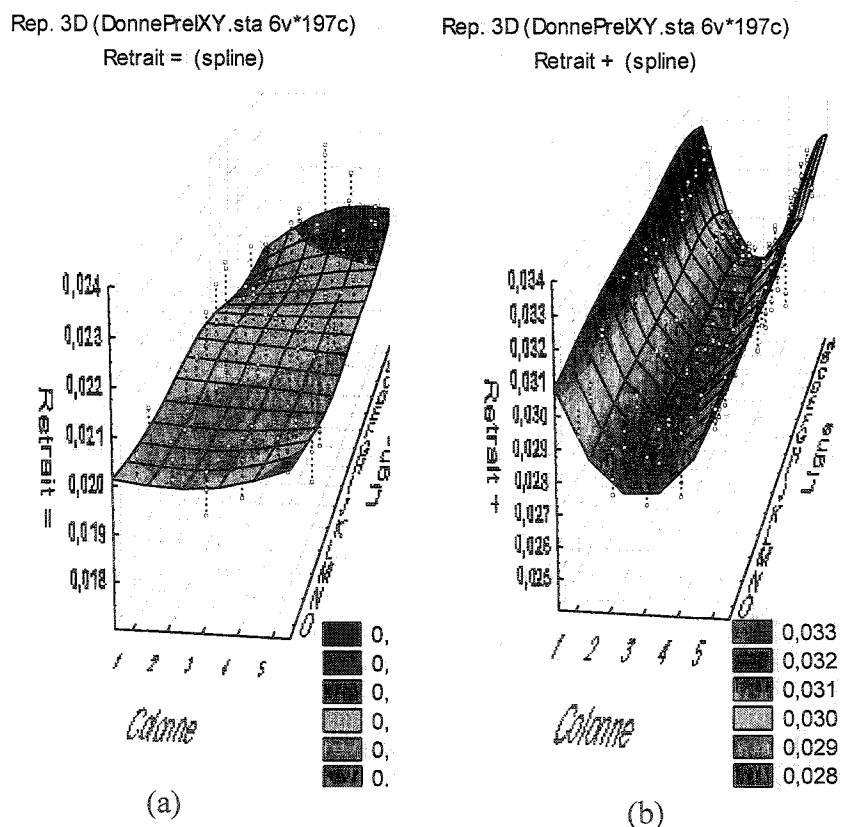


Figure 4-1: Représentation 3D des retraits en fonction de la position. En (a), retrait dans le sens de l'écoulement et en (b), retrait dans le sens transverse.

4.1.4 Corrélations entre les valeurs de retraits

Il est aussi intéressant de se questionner quant à la corrélation entre les valeurs de retrait₌ et de retrait₊. Ce que l'on cherche à savoir ici est si des valeurs élevées de retrait local dans le sens de l'écoulement sont couplées à des valeurs faibles de retrait local dans le sens transverse. Le retrait étant un phénomène avant tout volumique, on s'attend à avoir une corrélation négative. C'est ce qui est obtenu à un seuil de probabilité p^1 bien inférieur à 5%, voir Tableau 4-3. La valeur du coefficient de corrélation obtenue est de -0,21, ce qui indique par contre que la corrélation est faible. Les couples de valeurs de retrait sont montrés graphiquement à la Figure 4-2. Sur le graphique, on remarque que la corrélation est fortement influencée par quelques points. Ils ont été représentés par des cercles pleins et leur provenance a été vérifiée. Ils proviennent tous de la ligne A où il y a de fortes fluctuations du retrait.

Tableau 4-3: Corrélation entre les valeurs de retrait dans le sens de l'écoulement (retrait₌) et dans le sens transverse (retrait₊) pour des mesures à différentes positions.

Variable	Correlations (DonnePrelXY.sta) Marked correlations are significant at $p < ,050$ N=194 (Casewise deletion of missing data)	
	Retrait =	Retrait +
Retrait =	1,0000	-,2062
	p= ---	p=,004
Retrait +	-,2062	1,0000
	p=,004	p= ---

¹ La valeur de p représente la probabilité de rejeter faussement l'hypothèse d'une corrélation nulle.

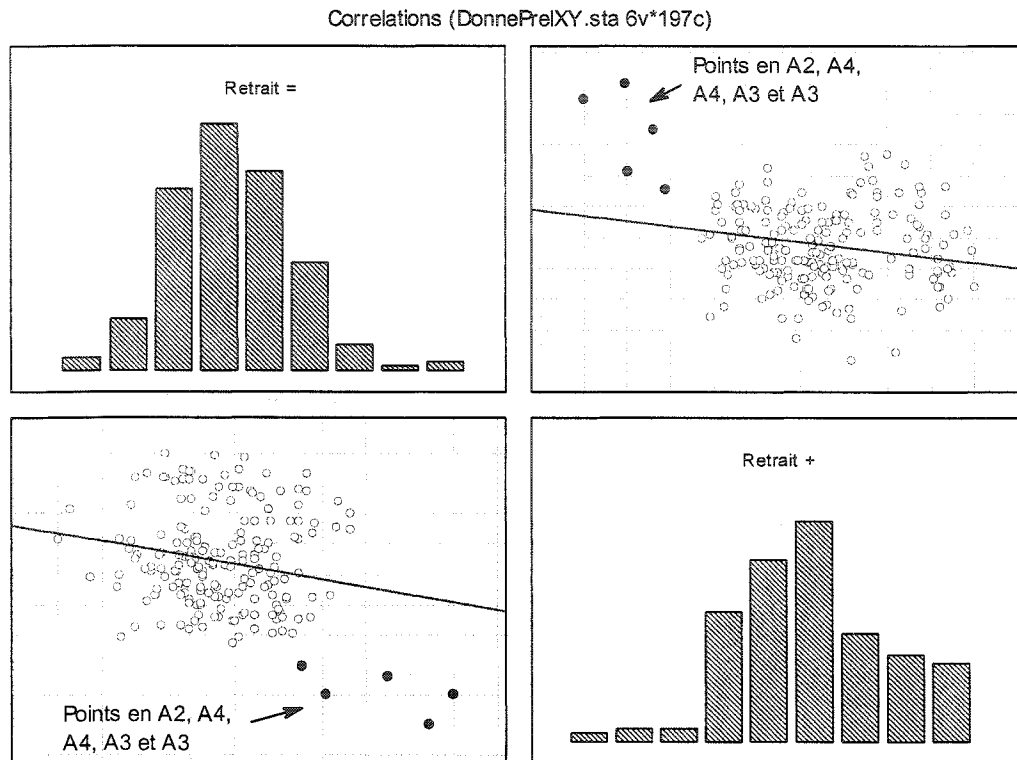


Figure 4-2: Graphique montrant la corrélation entre les variables de retrait= et de retrait+ pour des mesures à différentes positions.

Si on élimine les points représentés par des cercles pleins, la corrélation n'est plus significative, voir Figure 4-3. Le seuil de probabilité p prend alors la valeur de 0,68, voir Tableau 4-4. Ainsi, excepté pour les endroits où il y a de fortes fluctuations du retrait, les retraits= et les retraits+ ne semblent pas corrélés.

Tableau 4-4 : Corrélation en négligeant les points surlignés.

Correlations (DonnePreIXY.sta) Marked correlations are significant at $p < ,05$ N=189 (Casewise deletion of missing data)		
Variable	Retrait =	Retrait +
Retrait =	1,0000	-,0303
	$p= ---$	$p=,679$
Retrait +	-,0303	1,0000
	$p=,679$	$p= ---$

Correlations (DonnePreIXY.sta 6v*197c)

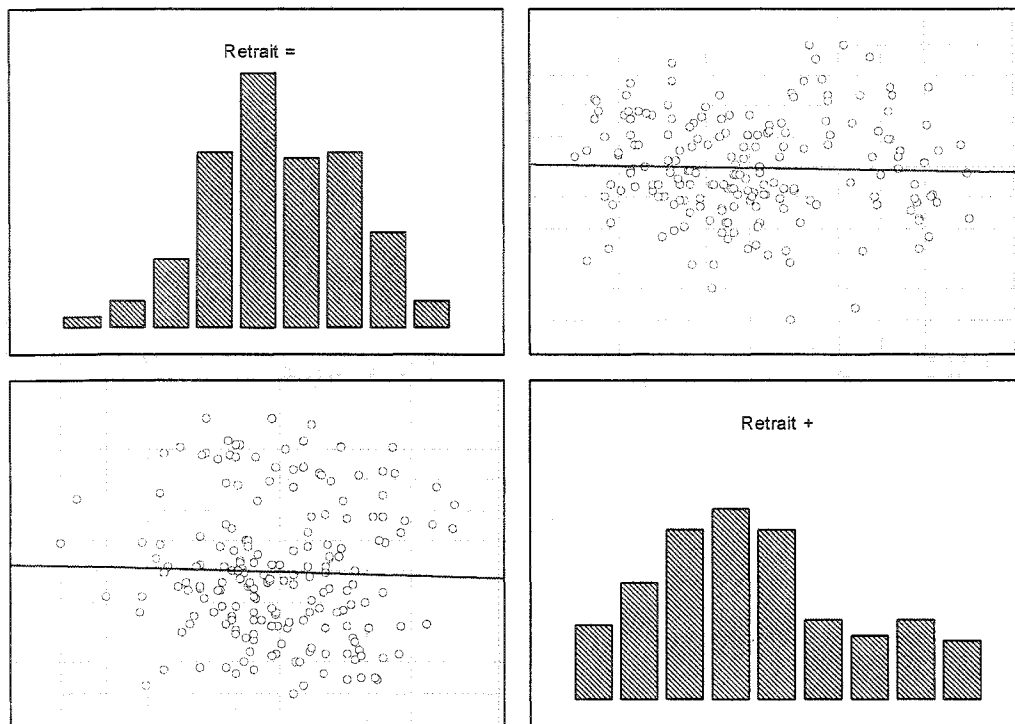


Figure 4-3: Corrélations représentées graphiquement si on enlève les points en cercle pleins.

4.1.5 Analyse ANOVA

L'analyse ANOVA sert à montrer si les variables indépendantes : Pièce, Ligne, Côté et Colonne ont un effet significatif sur la variabilité de chacun des retraits. Les résultats de cet analyse, montrés au Tableau 4-5, indiquent que la variable Pièce n'a pas d'impact significatif sur les retraits. Par contre, la variable Côté semble avoir un effet pour le retrait dans le sens de l'écoulement. Rappelons que le seuil n'est pas positionné au centre de la pièce mais est désaxé par rapport au plan de symétrie. Aussi, il est fort probable que les deux côtés du moule n'ait pas été exactement à la même température et que la dissipation de chaleur ne soit pas équivalente pour les deux côtés du moule. Ces raisons, d'origines thermiques, expliquent possiblement l'effet significatif de la variable Côté sur le retrait dans le sens de l'écoulement. La variable Ligne a un effet à peu près aussi probable sur les deux retraits. Par contre, l'ANOVA montre que la variable Colonne n'a pas du tout d'effet sur le retrait⁻ mais a un effet très fort sur le retrait⁺. Ces affirmations peuvent être visualisées sur les représentations 3D montrées précédemment à la Figure 4-1.

Tableau 4-5: Analyse de la variance pour les variables retrait⁻ et retrait⁺.

Univariate Results for Each DV (DonnePrelXY.sta)									
Sigma-restricted parameterization									
Effective hypothesis decomposition									
Effect	Degr. of Freedom	Retrait = SS	Retrait = MS	Retrait = F	Retrait = p	Retrait + SS	Retrait + MS	Retrait + F	Retrait + p
Intercept	1	0,05228	0,05228	150618	0,00000	0,11117	0,11117	197421	0,00000
Pièce	1	0,00000	0,00000	1	0,39656	0,00000	0,00000	0	0,56726
Ligne	12	0,00003	0,00000	7	0,00000	0,00007	0,00001	11	0,00000
Côté	1	0,00001	0,00001	28	0,00000	0,00000	0,00000	4	0,06098
Colonne	4	0,00000	0,00000	1	0,69916	0,00024	0,00006	104	0,00000
Error	175	0,00006	0,00000			0,00010	0,00000		
Total	193	0,00010				0,00041			

Si on omet la ligne A où il semble y avoir des changements brusques dus à la proximité du seuil d'injection et qu'on procède à une analyse de la variance, les mêmes variables ont un effet significatif. L'analyse ANOVA sur ces lignes est présentée au Tableau 4-6.

Tableau 4-6: Analyse de la variance pour les variables retrait= et retrait+ en omettant les lignes A à H.

Univariate Results for Each DV (DonnePrelXY.sta) Sigma-restricted parameterization Effective hypothesis decomposition, (Ligne A exclue)									
	Degr. of Freedom	Retrait = SS	Retrait = MS	Retrait = F	Retrait = p	Retrait + SS	Retrait + MS	Retrait + F	Retrait + p
Intercept	1	0,04841	0,04841	178524	0,00000	0,10382	0,10382	250854	0,00000
Piece	1	0,00000	0,00000	1	0,36382	0,00000	0,00000	2	0,18788
Ligne	11	0,00002	0,00000	6	0,00000	0,00006	0,00001	13	0,00000
Cote	1	0,00001	0,00001	46	0,00000	0,00000	0,00000	1	0,24037
Colonne	4	0,00000	0,00000	0	0,82445	0,00018	0,00005	111	0,00000
Error	162	0,00004	0,00000			0,00007	0,00000		
Total	179	0,00008				0,00031			

4.1.6 Effets principaux

On note aux figures 4.4 à 4.7, les effets principaux pour les différentes variables indépendantes. On remarque que la pièce n'a pas vraiment d'effets sur les valeurs de retraits. De plus, on constate que les valeurs de retraits varient en fonction de la ligne surtout dans les premières (celles près du seuil) et surtout qu'il y a un changement brusque au niveau du bloc mobile, c'est-à-dire de la ligne E à la ligne G. La variable Côté a aussi une influence plus forte sur un des deux retraits comme mentionné précédemment. Pour la variable Colonne, on remarque une certaine symétrie, les valeurs de retrait+ sont plus élevées sur les bords des pièces qu'au centre. Par contre le retrait= ne semble pas affecté par la variable Colonne.

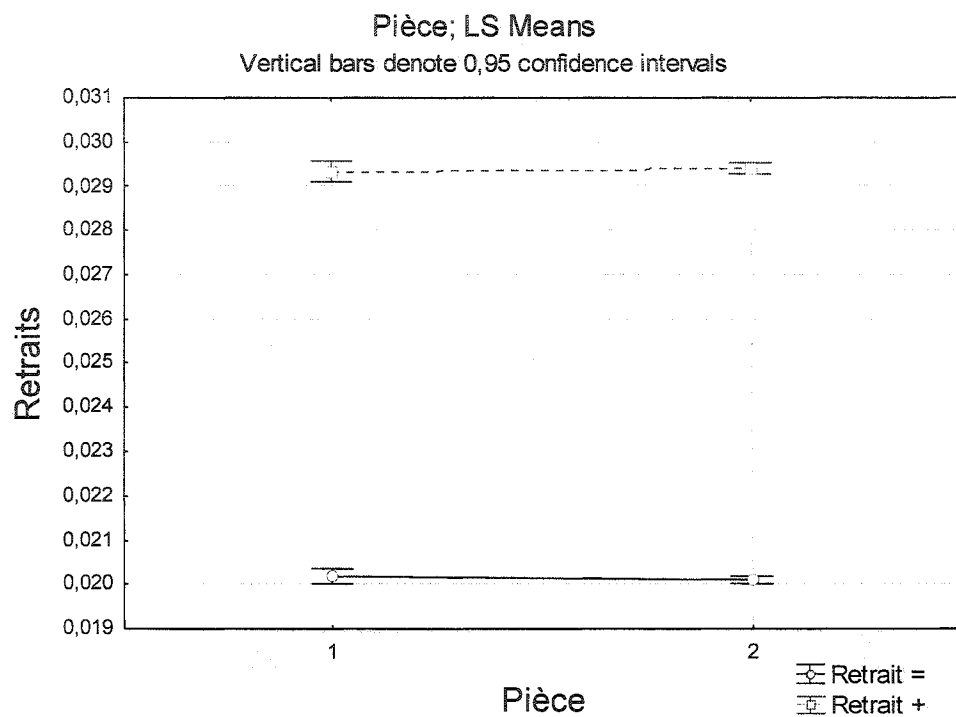


Figure 4-4: Effets principaux de la variable Pièce.

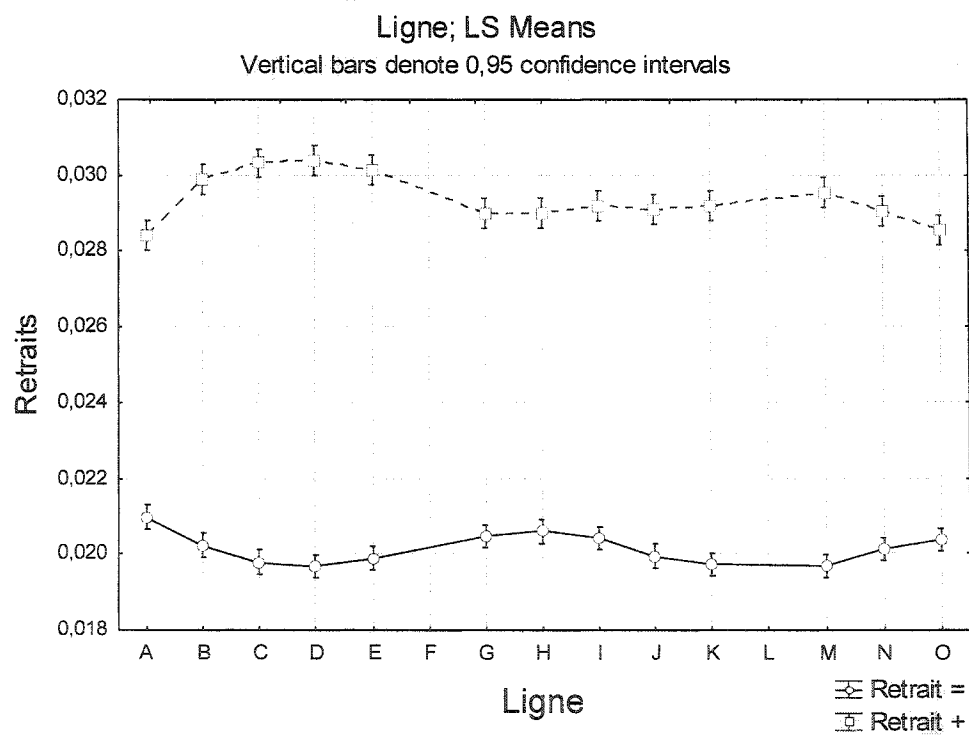


Figure 4-5 : Effets principaux de la variable Ligne.

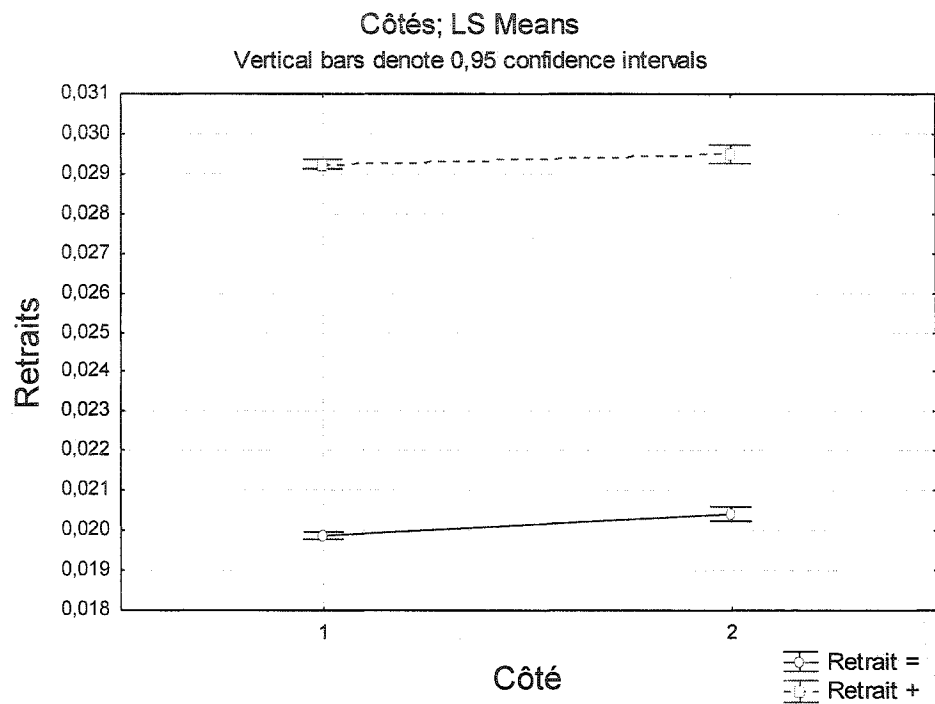


Figure 4-6: Effets principaux de la variable Côté.

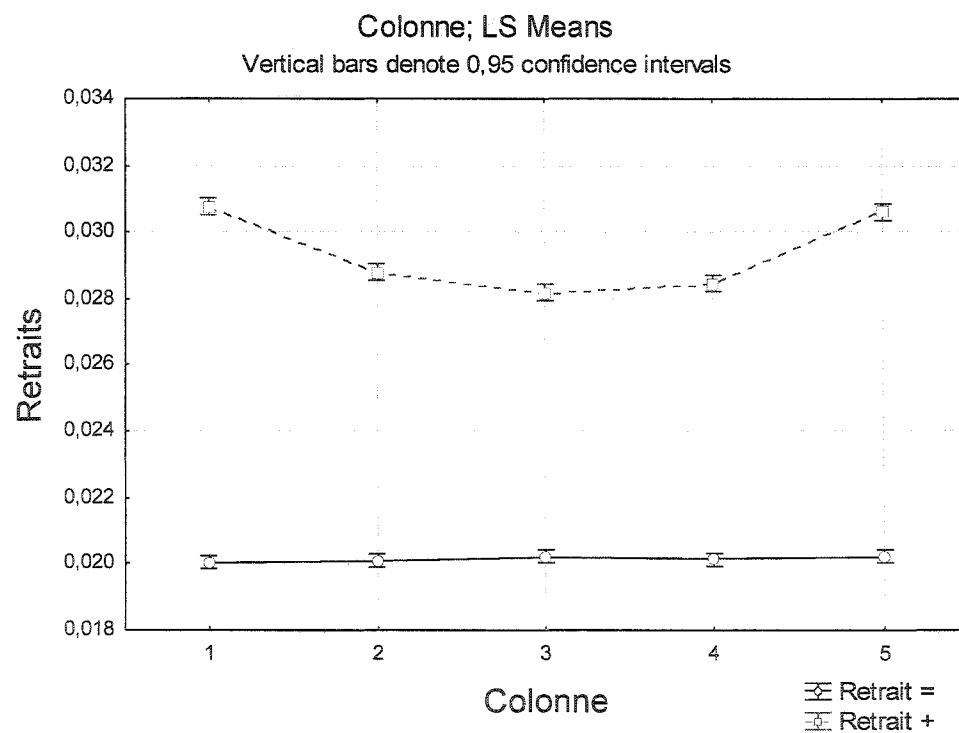


Figure 4-7: Effets principaux de la variable Colonne.

4.1.7 Analyse des résidus

Les graphiques des résidus en fonction des valeurs prédites ainsi que ceux des valeurs prédites en fonction des valeurs observées ne montrent pas d'anomalies importantes, voir Figure 4-8. Il ne semble donc pas y avoir de données aberrantes qui auraient faussées les effets principaux montrées à la section 4.1.6.

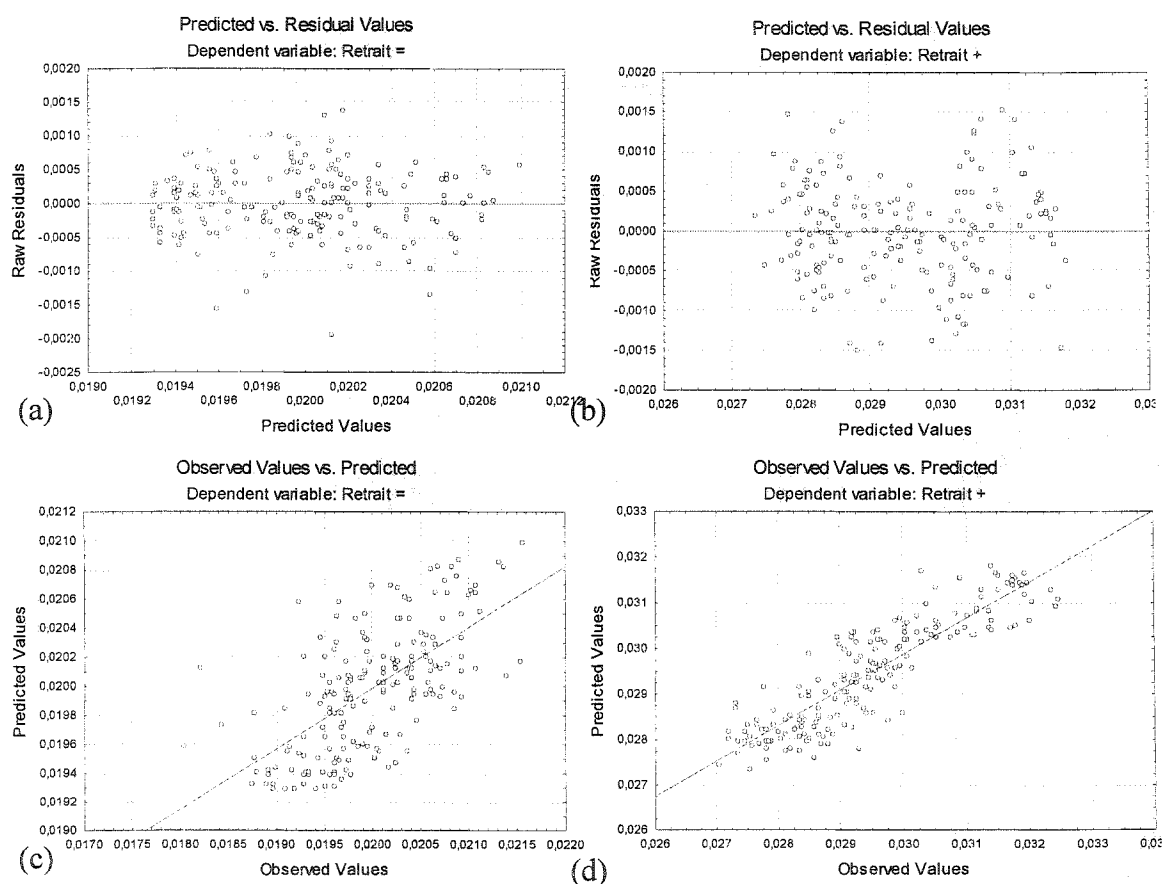


Figure 4-8: Graphiques des résidus en fonction des valeurs prédites pour la variable retrait= (a) et pour la variable retrait+ (b). Graphique des valeurs prédites en fonction des valeurs observées pour le retrait= (c) et pour le retrait+ (d).

4.2 Effet des paramètres de moulage sur les retraits

4.2.1 Méthodologie

La méthode expérimentale employée est décrite à la section 3.8. La seule modification est que les pièces ont été mesurées en partie seulement. C'est-à-dire qu'une colonne a été mesurée dans le sens de l'écoulement seulement et que trois lignes ont été mesurées uniquement dans le sens transverse. La colonne mesurée est celle du centre (3) et les lignes mesurées sont C, I et O. Nous comparerons donc les résultats des retraits+ et des retraits= en C3, I3 et O3. Le choix de ces régions repose à la fois sur les mesures des écarts de distance avec le nominal présenté à la section 3.7 et sur la Figure 4-1 qui montre que ces régions sont représentatives de l'ensemble de la pièce. De plus, ces régions ont montrées très peu de gauchissement lors des essais décrites à la section 4.1.

4.2.2 Planification statistique d'expérience

Un plan factoriel complet pour deux facteurs (P_m et V_{inj}) variant selon trois modalités a été réalisé. Ce type de plan a été choisi parce que le nombre de facteur est bas et que le niveau de connaissance du système est assez élevé. Les essais au centre ont été répétés ($n = 5$) afin d'estimer l'erreur expérimentale. Ainsi, 13 essais ont été effectués pour 9 conditions de moulage différentes. Les variables du plan d'essai sont montrées au Tableau 4-7.

Tableau 4-7: Variables du plan d'essai.

Variable	Type	Modalités	Codage
Pression de maintien P_m	Indépendante	15;30;45 MPa	-1; 0; 1
Vitesse d'injection V_{inj}	Indépendante	10;55;100 mm/s	-1; 0; 1
Retrait=	Dépendante	-	-
Retrait+	Dépendante	-	-

Les moulages furent effectués dans un ordre aléatoire, généré par Statistica et les mesures réalisées dans un ordre quelconque. Chaque ensemble est traité et analysé individuellement à l'aide du logiciel Statistica.

4.2.3 Corrélations entre variables dépendantes

Tableau 4-8: Corrélation entre les valeurs de retrait= et les valeurs de retrait+ pour différents paramètres d'injection.

Variable	Correlations (DonneDOE3.sta) Marked correlations are significant at $p < ,05000$ N=39 (Casewise deletion of missing data)	
	Retrait =	Retrait +
Retrait =	1,00	0,60
Retrait +	0,60	1,00

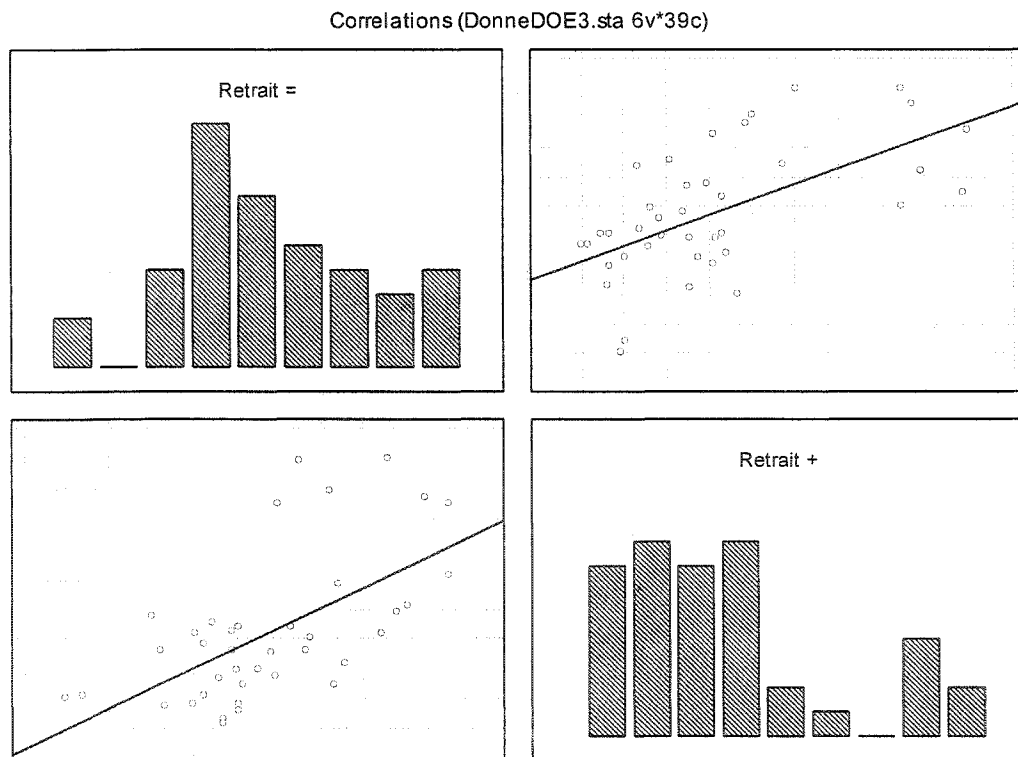


Figure 4-9: Graphique montrant la corrélation entre les valeurs de retrait= et les valeurs de retrait+ pour différents ensembles de paramètres d'injection.

Le Tableau 4-8 montre que lorsqu'on fait varier les paramètres de mise en œuvre, les retraits dans le sens de l'écoulement et dans le sens transverse varient dans le même sens. Ils sont corrélés positivement avec un coefficient de 0,60. Les couples de retraits sont montrés graphiquement à la Figure 4-9. On remarque bien que les valeurs de retrait= élevées sont couplées à des valeurs de retrait+ également élevées. Le coefficient de corrélation assez élevé indique que les paramètres ont un effet dans le même sens sur les deux retraits mais que ce dernier n'est pas nécessairement le même.

Si on examine les corrélations plus en détail au Tableau 4-9, on remarque que les coefficients de corrélation sont plus élevés lorsqu'on compare les variables de réponse pour une même région et/ou une même direction. Les réponses semblent donc être cohérentes. Par exemple, si pour un ensemble de paramètres donnés, on a obtenu un retrait= élevé en position C, en position I ou O, on a également obtenu des valeurs de retraits+ élevés.

On remarque aussi que d'une région à l'autre, les retraits dans la même direction sont encore mieux corrélés que les retraits+ et retraits= entre eux pour une position donnée. Ceci nous permet de croire que l'effet des paramètres est consistant d'un endroit à l'autre pour une même direction de retrait. L'effet des paramètres semble un peu moins consistant au niveau des directions des retraits.

Tableau 4-9: Corrélations par position et par type de retraits.

Variable	Correlations (DonneDOE4.sta) Marked correlations are significant at $p < ,05000$ N=13 (Casewise deletion of missing data)					
	Retrait = C3	Retrait + C3	Retrait = I3	Retrait + I3	Retrait = O3	Retrait + O3
Retrait = C3	1,00	0,79	0,92	0,81	0,92	0,58
Retrait + C3	0,79	1,00	0,78	0,95	0,91	0,90
Retrait = I3	0,92	0,78	1,00	0,70	0,85	0,50
Retrait + I3	0,81	0,95	0,70	1,00	0,90	0,92
Retrait = O3	0,92	0,91	0,85	0,90	1,00	0,76
Retrait + O3	0,58	0,90	0,50	0,92	0,76	1,00

Correlations (DonneDOE4.sta 11v*13c)

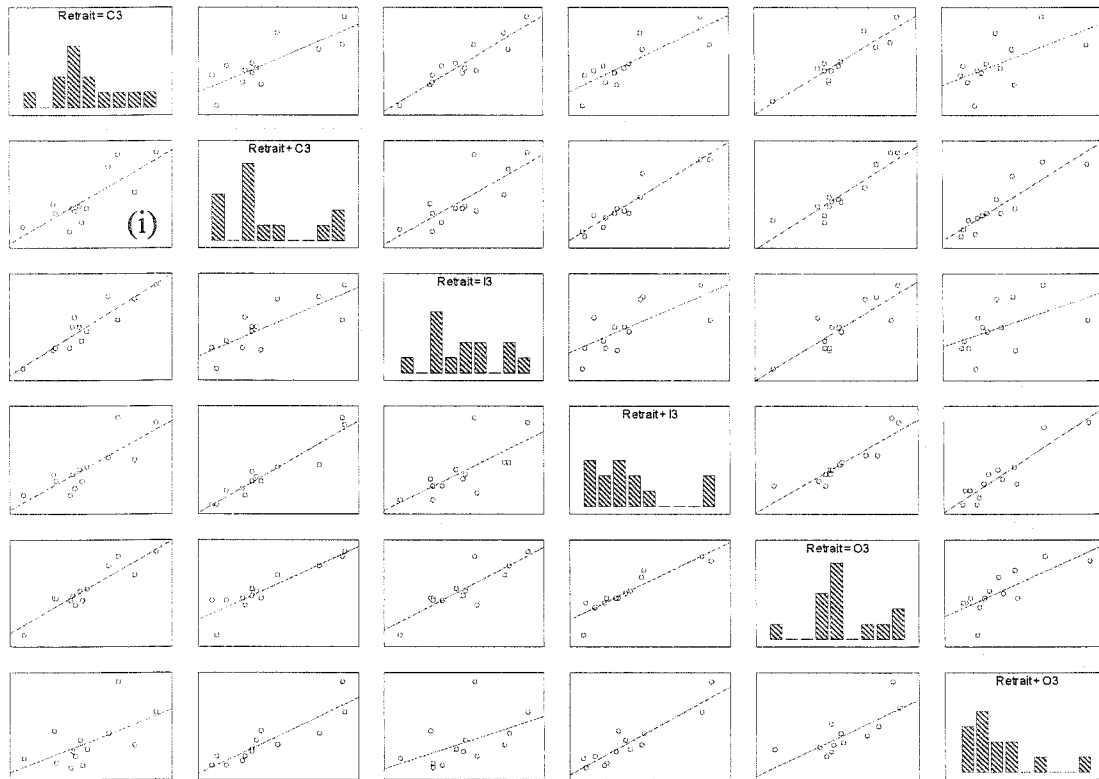


Figure 4-10 : Représentation graphique des corrélations détaillées. Par exemple, en (i), les couples (retrait= en C3 ; retrait+ en C3) sont tracés.

4.2.4 Synthèse des effets

Tableau 4-10: Synthèse des effets trouvés avec le plan d'essai 2³.

Position	Variables dépendantes	Effets significatifs ($p \leq 0,05$)	P	Effets estimés	Notes
C3	Retrait =	P_m	0,00177	-0,00160	
		V_{inj}	0,00376	0,00131	
		$P_m * V_{inj}^2$	0,03064	0,00075	Rejeté par hérédité, p élevé
	Retrait +	P_m	0,00001	-0,00672	
		P_m^2	0,01244	-0,00087	
		V_{inj}^2	0,04249	-0,00059	Rejeté, p élevé
		$P_m * V_{inj}^2$	0,02029	0,00102	Rejeté par hérédité
I3	Retrait =	P_m	0,00440	-0,00177	
		V_{inj}	0,01658	0,00121	
	Retrait +	P_m	0,00111	-0,00496	
		$P_m * V_{inj}^2$	0,02414	0,00222	Rejeté par hérédité
O3	Retrait =	P_m	0,00045	-0,0025	
		V_{inj}	0,01478	0,00097	
	Retrait +	P_m	0,0011	-0,00449	
		V_{inj}^2	0,0240	-0,00148	Rejeté par hérédité

Le modèle employé pour les régressions est quadratique :

$$Y = \beta_0 + \beta_1(X_1) + \beta_2(X_2) + \beta_3(X_1)^2 + \beta_4(X_2)^2 + \beta_5(X_1 * X_2) + \beta_6(X_1^2 * X_2) + \beta_7(X_1 * X_2^2) + \beta_8(X_1^2 * X_2^2)$$

Une régression a été effectuée pour chaque retrait (= et +) et cela pour toutes les positions mesurées (C3, I3 et O3). Les résultats de chaque régression, les diagrammes de Pareto, surfaces de réponse et analyse des résidus sont présentés à l'Annexe B.

Tous les effets significatifs (β_i) à un seuil de probabilité de 5% sont présentés au Tableau 4-10 excepté pour l'effet principal (β_0). Afin de simplifier l'analyse, certains effets sont rejetés lorsque p est près du seuil de signification qui est fixé de manière arbitraire. Le principe d'hérédité est dans certains cas évoqué pour rejeter des effets. Ce principe veut que les effets d'interactions soient supportés par des effets de base forts.

Le paramètre ayant le plus d'effet sur les retraits est sans aucun doute la pression de maintien. En effet, P_m a un effet significatif sur les deux retraits, aux trois positions, et cela à des seuils de signification toujours inférieurs à 1% la pression de maintien a donc un effet très probable. L'effet de P_m est toujours négatif c'est-à-dire qu'une augmentation de la pression de maintien fait diminuer le retrait. Cependant, on constate aussi que les effets de P_m sont relativement peu importants, -0,0020 en moyenne dans le sens de l'écoulement et -0,0054 en moyenne dans le sens transverse. En comparant ces valeurs aux effets principaux moyens (β_0) qui sont respectivement de 0,0205 et 0,0298 dans le sens de l'écoulement et dans le sens transverse, on remarque que les effets relatifs moyens de la pression de maintien sont de 10% dans le sens de l'écoulement et de 18% dans le sens transverse.

La vitesse d'injection semble avoir un effet significatif, du point de vue statistique, sur le retrait dans le sens de l'écoulement. Les effets, calculés pour les régressions sur le retrait dans cette direction sont positifs. Ainsi, une augmentation de la vitesse se traduirait par une augmentation du retrait. L'effet calculé est assez constant d'une position à l'autre : 0,0013 ; 0,0012 et 0,00097 en C3, I3 et O3 respectivement. On remarque que l'effet de la vitesse d'injection est à peu près la moitié de celle de la pression de maintien sur les retraits dans le sens de l'écoulement.

Néanmoins l'effet de la vitesse d'injection sur le retrait+ est plus confus. Le terme linéaire de vitesse n'a jamais eu d'effet significatif et on remarque que le terme d'interaction entre la pression de maintien et la vitesse d'injection quadratique est significatif en C3 et I3. En O3, seul le terme de vitesse quadratique est significatif. Par contre, on rejette ces effets par le principe d'hérédité. Si à la fois la V_{inj} et le terme d'interaction linéaire $P_m * V_{inj}$ n'ont pas eu d'effets significatifs, il est peu probable que les effets des termes $P_m V_{inj}^2$ et V_{inj}^2 soient réels. On remarque également que les valeurs de p pour ces termes sont très près du seuil de 5%.

4.3 Effet de la géométrie du moule sur les retraits

4.3.1 Méthodologie

Dans cette section, trois géométries de pièces sont comparées. La première géométrie est celle à section constante utilisée jusqu'ici. Elle est notée pièce *Ep. constante*. La seconde géométrie est montrée en (2) à la Figure 2-4. Cette géométrie comprend une partie à épaisseur plus faible mais où le retrait est contraint dans le sens de l'écoulement d'un seul côté. Cette pièce est notée *Ep.var. Asym*. Enfin, la troisième pièce, montrée en (3) à la Figure 2-4, comprend aussi une section à épaisseur plus faible mais contrainte des deux côtés. Cette troisième pièce est notée *Ep.var Sym*. Les pièces sont moulées aux mêmes paramètres qu'à la section 4.1 du présent chapitre. Ce sont en fait les paramètres centraux du plan factoriel de la section 4.2. Ces paramètres de mise en oeuvre sont :

$P_m = 30 \text{ MPa}$
 $V_{inj} = 55 \text{ mm/s}$
 $T_{inj} = 200^\circ\text{C}$
 $T_{moule} = 37 \pm 2.5^\circ\text{C}$
 Mode : semi-automatique
 Matériau = PP HIVAL 2420NA (IF=20g/min) de GP

Les pièces sont mesurées partiellement selon la procédure décrite à la section 3.8. Elles sont mesurées à la fois du côté de la partie mobile et du côté de la partie fixe afin de vérifier si le comportement du retrait est le même du côté contraint ou non-contraint en retrait. De plus, comme les pièces sont mesurées partiellement en leur pourtour, un gauchissement considérable a parfois été observé, on a donc du le considérer comme à la section 4.1.

4.3.2 Retraits dans le sens de l'écoulement

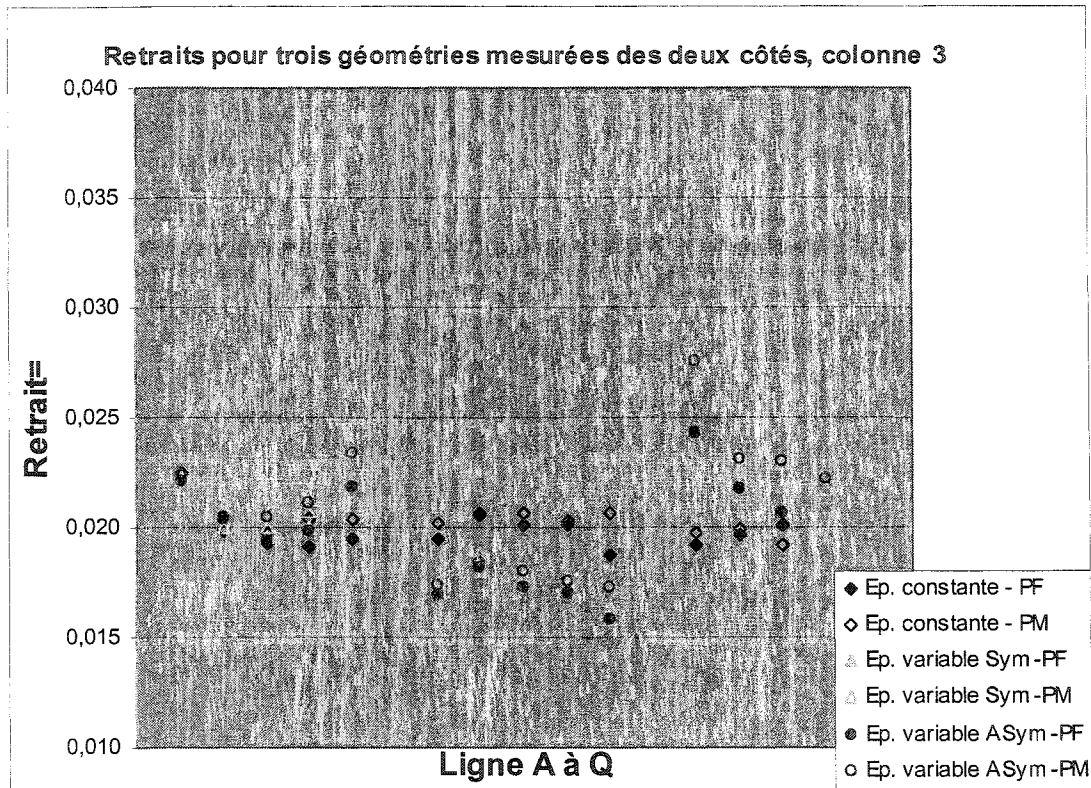


Figure 4-11: Retrait dans le sens de l'écoulement (retrait=) pour trois géométries de pièces mesurées des deux côtés à la colonne 3 (notés PF et PM en faisant référence au côté orienté vers la Partie Fixe et vers la Partie Mobile).

La Figure 4-11 montre que la géométrie du moule a certainement un impact sur le retrait dans le sens de la longueur. Pour les pièces à épaisseur variable, les retraits dans les parties centrales plus minces sont nettement inférieurs aux retraits dans les sections plus épaisses situées aux extrémités. On peut raisonnablement croire que la section centrale s'est solidifiée beaucoup plus rapidement que les autres sections. Ainsi, cette matière se solidifie presque complètement pendant que la pression de maintien est appliquée (avant que le seuil ne fige). Une fois la section centrale solidifiée, la pression de maintien n'est plus transmise à la dernière section qui se rétracte encore, d'où les retraits supérieurs observés.

Certaines singularités sont observées aux abords de la section centrale. Ces singularités sont probablement causées par des mouvements de matière pendant la solidification. Le fait que, aux points E et F, les retraits de la pièce *Ep. Variable Asym – PM* soient plus élevés que pour *Ep. Variable Asym – PF* renforce cette hypothèse. En effet, la section mince est située du côté de la partie mobile du moule, donc, lorsque cette section se solidifie, la matière du côté *PM* est, en quelque sorte pompée par la section mince, voir Figure 4-12. Des retraits plus élevés sont alors observés en cet endroit. Ceci expliquerait en partie les retraits plus faibles observés pour la section mince

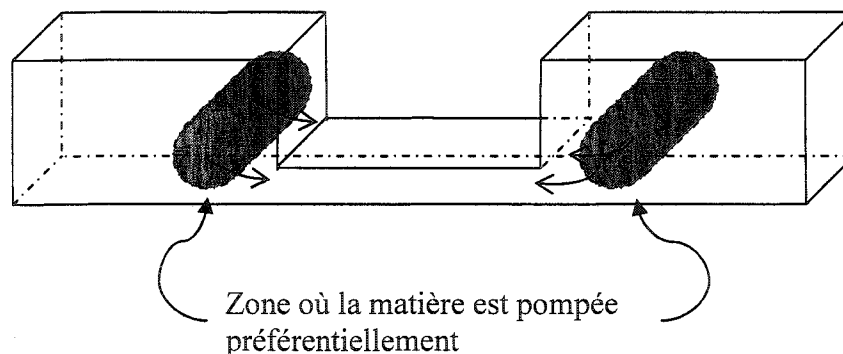


Figure 4-12: Schéma montrant le pompage préférentiel de matière causé par la dynamique de solidification de la pièce.

Les retraits dans la dernière section semblent également supérieurs à ceux de la pièce à épaisseur constante et ce, même si l'épaisseur y est identique. Ce phénomène est expliqué par le fait que la pression de maintien a moins d'effet sur cette section lorsqu'il y a présence d'une section mince qui se solidifie très rapidement. La section mince empêche l'application efficace de la pression de maintien. Cet effet est bien connu des concepteurs de moule. Autant que possible, le seuil d'injection doit toujours être placé dans la section la plus épaisse des pièces.

4.3.3 Retraits dans le sens transverse

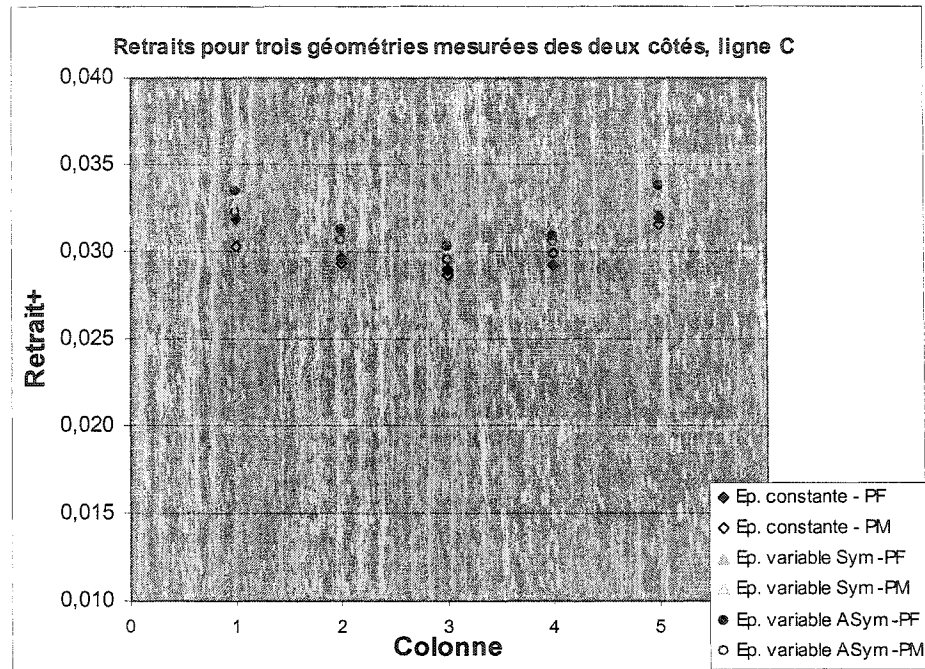


Figure 4-13: Retrait dans le sens transverse pour trois géométries de pièces.
Prise de mesure des deux côtés des pièces pour la ligne C.

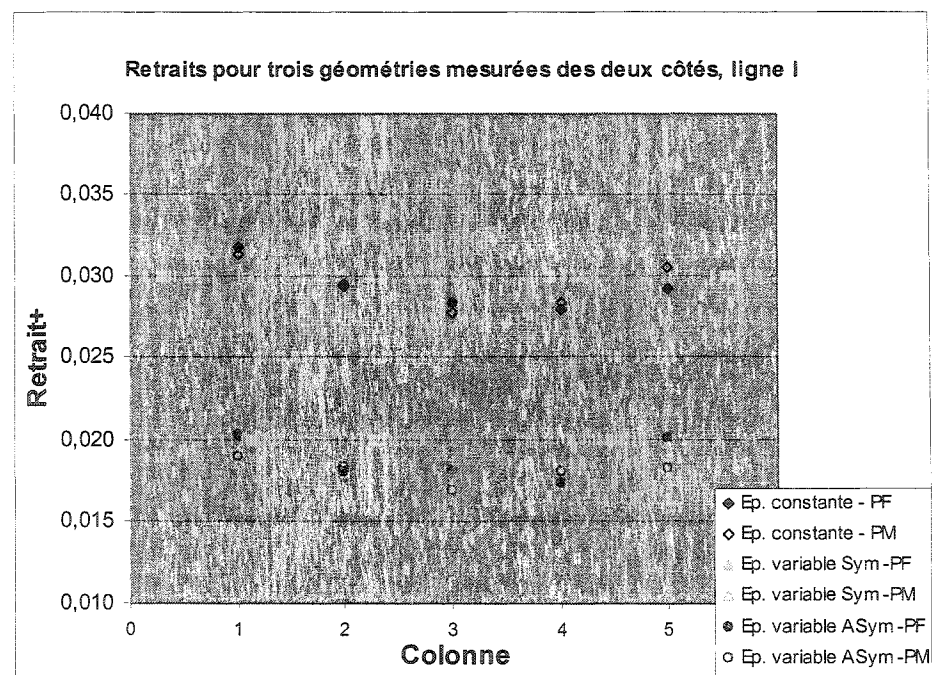


Figure 4-14: Retrait dans le sens transverse pour trois géométries de pièces.
Prise de mesure des deux côtés des pièces pour la ligne I.

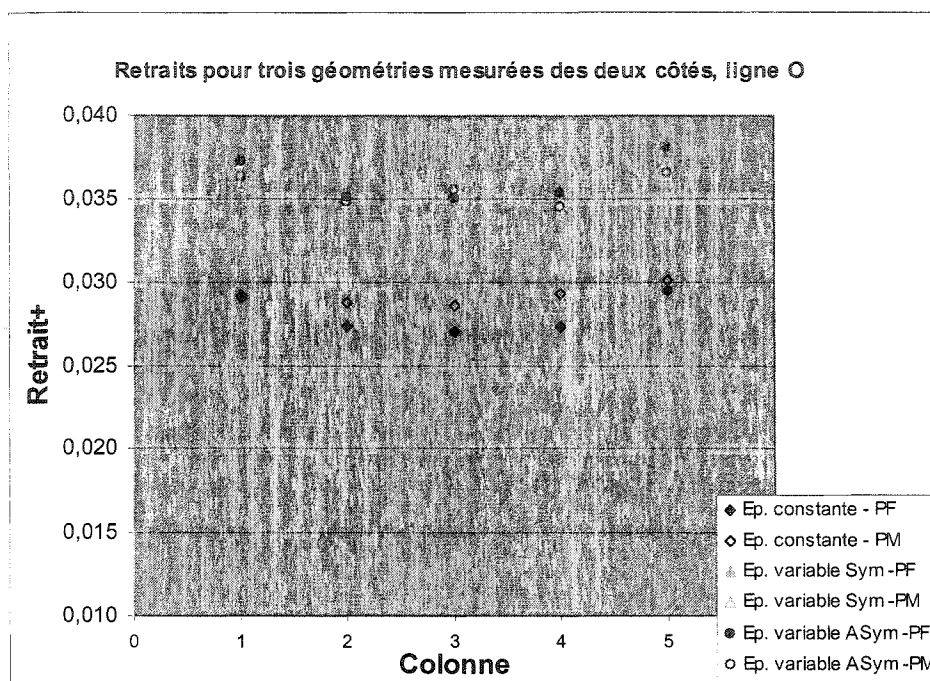


Figure 4-15: Retrait dans le sens transverse pour trois géométries de pièces.
Prise de mesure des deux côtés des pièces pour la ligne O.

Dans le sens transverse, il ne semble pas y avoir de différence significative entre les diverses géométries de pièces pour la ligne C, voir Figure 4-13. Par contre, pour la section centrale (la ligne I), on assiste à une importante chute de la valeur du retrait, voir Figure 4-14. Rappelons que pour le retrait dans le sens de l'écoulement, il y avait également eu une chute du retrait dans la section centrale quoique d'une importance relative moindre. Il est très intéressant de constater que dans la section centrale, les retraits₌ et les retraits₊ prennent des valeurs très semblables, autour de 0,018 dans les deux cas. Les retraits₊ pour la ligne O sont par contre beaucoup plus importants pour les géométries à épaisseur variable (environ 0,035) comparativement à la géométrie à épaisseur constante (environ 0,028). On note une différence relative de 25%. Ceci est expliqué, comme pour le retrait₌, par un maintien déficient causé par le refroidissement rapide de la section centrale.

L'effet du retrait contraint par le moule n'a pas vraiment été observé, la pièce *Ep. Variable Asym – PM* n'a pas montré de différences significatives selon qu'elle ait été mesurée du côté contraint ou du côté libre pour le retrait dans le sens de l'écoulement. Dans le sens transverse, le retrait n'était jamais contraint.

Finalement, on constate que la géométrie du moule joue un rôle excessivement important sur les retraits. On a vu que l'effet local semble vraiment plus important pour les géométries à épaisseur variable comparativement à la géométrie à épaisseur constante. Un comportement quasi isotrope a été observé pour la section centrale, plus mince, des pièces à épaisseur variable. On remarque également que la dynamique thermique joue un rôle prépondérant sur les retraits à deux niveaux. Premièrement, les zones se solidifiant en premier peuvent empêcher l'application efficace du maintien dans d'autres zones causant des retraits plus élevés dans ces dernières. Deuxièmement, les mouvements de matière causés par la dynamique de solidification créent des singularités locales au niveau du retrait.

5 CONCLUSION

Ce projet avait pour objectif d'étudier expérimentalement le phénomène de retrait en moulage par injection. Rappelons que le moulage par injection consiste en l'introduction sous pression d'une résine polymère fondue dans une matrice. Les dimensions et les formes finales d'une pièce moulée sont fortement tributaires du phénomène de retrait. Les différences de retrait d'un endroit à l'autre sur une pièce causent aussi des contraintes résiduelles et le gauchissement des pièces. Le retrait au moulage par injection ne peut être mesuré directement. On mesure en fait une dimension sur la pièce et on la compare avec une dimension nominale ou mesurée dans le moule.

Afin d'analyser l'effet du retrait au moulage contraint, un objet type a été conçu. L'objet type est une plaque de 3,81x11,43x0,30 cm avec une partie centrale à épaisseur et configuration variable permettant d'obtenir des zones de retrait contraint. Pour mouler par injection l'objet type, il fallait d'abord avoir une partie fixe pouvant être couplée au moule du CRASP. Une nouvelle partie fixe a été fabriquée avec des cavités pouvant recevoir des inserts. Ensuite, les inserts pour le moule ont été conçus et fabriqués. La partie à épaisseur et configuration variable est produite par des blocs mobiles et un jeu de cales de différentes épaisseurs. Quatre inserts ont été fabriqués afin de pouvoir mouler deux pièces en même temps. Une des pièces a un seuil en film sur toute sa largeur et l'autre, un seuil latéral conventionnel. Le seuil en film permet d'avoir un remplissage unidirectionnel.

Les inserts ont été reçus et quelques retouches ont dû être effectuées. Le bon fonctionnement du moule a été vérifié par des essais de moulage sur la presse du CRASP. La dernière étape de la fabrication des inserts était l'usinage des repères pour la mesure du retrait. La géométrie et la méthode sont déterminées lors de l'analyse de sensibilité. La problématique de la mesure locale du retrait exposée au chapitre 3 montre comment l'incertitude sur le retrait est fonction de la distance entre les repères et de

l'incertitude sur la position de ceux-ci. L'incertitude sur le retrait est également fonction de l'amplitude du retrait mais d'une façon négligeable. Les résultats expérimentaux de la section 3.6 montrent que l'incertitude sur le retrait local du PS ($R \approx 0.7 \%$) est équivalente à l'incertitude sur le retrait du PP ($R \approx 2 \%$).

L'appareil utilisé pour les mesures de retrait est un profilographe Mitutoyo SV-C4000H4, situé dans un environnement de classe 10 000 contrôlé en température et en humidité. Un tel environnement pour des pièces plastiques est justifié du fait de leur coefficient d'expansion thermique élevé et leur propriété hygroscopique.

L'analyse de sensibilité a permis d'expliquer et d'estimer certaines sources d'incertitude de mesure. Les diverses sources mentionnées sont organisées dans un diagramme de cause à effet (diagramme d'Ishikawa). Les effets estimés sont comptabilisés dans un budget d'incertitude et un diagramme de Pareto. L'analyse de sensibilité a montré que le défaut de rectitude et de parallélisme est la source principale d'incertitude sur le retrait. Vient ensuite le gauchissement de la pièce moulée, cependant cette source ne peut qu'être estimée très grossièrement.

Afin de mesurer le retrait d'une manière locale, divers procédés de fabrication furent essayés pour la production de repères dans un insert test. L'objectif général poursuivi par ces essais était de trouver une méthode de fabrication permettant des mesures de retraits au moulage avec une incertitude associée la plus faible possible. Spécifiquement, les défauts de rectitude et de parallélisme ont été quantifiés. De plus, la recherche d'une géométrie de repères facilement reproductible et compatible avec le processus de mesure avec le profilographe a été effectuée. Un étalon a été mesuré et quatre méthodes de fabrication des repères ont été testées. Dans certains cas, des variantes de ces méthodes furent employées. Les défauts de rectitude mesurés sont de $0,5 \mu\text{m}$ pour l'étalon et de $4,9 \mu\text{m}$ pour l'usinage par enlèvement de copeaux à commande numérique. Ce procédé ayant produit des repères avec des défauts de

rectitude les moins élevés. Les défauts de parallélisme se sont avérés non significatifs pour tous les procédés.

Ainsi, c'est l'usinage par enlèvement de copeau à commande numérique qui a été choisi pour la fabrication des repères dans les inserts. La profondeur des repères est de $100\text{ }\mu\text{m}$ et la géométrie est une rainure en forme d'arc de cercle de $0,76\text{ mm}$ de diamètre. Les repères sont disposés en forme de grille afin de pouvoir procéder à des mesures de retraits orthogonalement. Le grillage reproduit sur les pièces permet de diviser leur surface en 85 régions notées A1 jusqu'à Q5. Des mesures ont par contre montré que les repères usinés sur les blocs amovibles semblent de moindre qualité que pour le reste des inserts. L'incertitude sur la position d'un repère $u(x)$ est estimée à près de $1\text{ }\mu\text{m}$, ce qui donne une incertitude sur le retrait d'environ 0,0003 en unité de retrait.

Trois aspects du retrait du polypropylène ont été explorés pour la pièce avec le seuil en film seulement. Premièrement, l'effet de la position sur la pièce, donc l'effet local, a été investigué pour le retrait dans le sens de l'écoulement et dans le sens transverse. Les régions A1 à O5 ont été mesurées pour une géométrie de plaque à épaisseur constante. Une très forte anisotropie a été constatée, environ 50% de différence entre les moyennes des deux retraits. On a aussi remarqué que la ligne et la colonne n'ont pas du tout le même type d'effet sur chacun des retraits. Le résultat le plus surprenant est la courbure du retrait dans le sens transverse en fonction de la colonne. Un résultat en partie comparable avait déjà été obtenu par Régnier et Trotignon (**Régnier et al. 1993**). Une autre constatation surprenante est que, bien que le retrait au moulage soit un phénomène volumique, les retraits dans le sens de l'écoulement et dans le sens transverse ne semblent pas corrélés. D'autre part, la signification statistique des effets locaux, ou effets de position, fut examinée à l'aide d'une analyse de la variance (ANOVA). Cette analyse montre que la ligne ou le côté mesuré sur la pièce ont des effets significatifs sur les retraits. Par contre, la colonne n'a eu d'effet significatif sur le retrait dans le sens de l'écoulement alors que son effet est très fort sur le retrait transverse.

Deuxièmement, les effets de deux paramètres de moulage, la pression de maintien (P_m) et la vitesse d'injection (V_{inj}) ont été analysés à l'aide d'un plan factoriel 2^3 avec des essais répétés au centre. Trois régions furent mesurées dans les deux directions, soit les régions C3, I3 et O3. La géométrie de la pièce est toujours celle d'une plaque à épaisseur constante. L'analyse statistique a montré que cette fois, les retraits dans le sens de l'écoulement et dans le sens transverse sont fortement corrélés ensemble. La corrélation est positive, c'est-à-dire que pour un ensemble donné de variables (position, P_m et V_{inj}) les valeurs de retrait+ élevées sont couplées à des valeurs de retrait= qui sont également élevées. L'analyse statistique a aussi montré que la pression de maintien était le facteur affectant le plus les variables de retraits et que cet effet est négatif. L'effet de la vitesse d'injection semble par contre plus complexe, il est très significatif et positif pour le retrait dans le sens de l'écoulement pour les trois régions. Par contre la vitesse n'a jamais eu d'effet significatif sur les retraits dans le sens transverse. Néanmoins, on a remarqué que l'effet des paramètres d'injection étudiés n'est pas très fort comparativement à l'anisotropie observée. L'effet le plus important, celui de P_m , est respectivement de 10% et de 18% des retraits moyens dans le sens de l'écoulement et dans le sens transverse.

Le troisième et dernier aspect étudié est l'effet de la géométrie du moule. Trois géométries furent mesurées cette fois des deux côtés. La géométrie à épaisseur constante ainsi que deux géométries contraintes en retrait, l'une symétriquement et l'autre contrainte en retrait d'un seul côté, donc asymétriquement. Pour les deux géométries contraintes en retrait, la section centrale avait une épaisseur de 1 mm. Les résultats montrent l'importance de la variation d'épaisseur sur la dynamique de solidification et, possiblement, l'effet des mouvements de fluide pendant la solidification. Les changements de géométrie ont provoqués de très fortes variations de retrait. La géométrie du moule apparaît donc potentiellement produire des effets aussi importants que l'anisotropie du retrait. L'effet du moule (retrait contraint ou non) n'a pu être observé indépendamment de l'effet du changement d'épaisseur.

Finalement, les études à poursuivre sur le retrait sont la mesure de l'effet des deux paramètres étudiés, P_m et V_{inj} pour les géométries avec retrait contraint et changement d'épaisseur. D'autres paramètres pourraient également être étudiés à l'aide de ce moule. Il serait aussi important de comprendre pourquoi l'anisotropie est si forte alors que la vitesse d'injection semble relativement peu influente. L'étude de la solidification de la couche cisailée apporterait possiblement des réponses à cet égard. Il serait aussi important de mesurer précisément le retrait dans le sens de l'épaisseur sur ces pièces, possiblement avec une MMT. Alors, on pourrait savoir si les retraits en surface sont corrélés avec les retraits dans le sens de l'épaisseur. Par contre, pour mesurer le retrait selon le plan de joint du moule, il faudrait trouver une manière de contourner les problèmes d'ouverture et de déformation du moule rapportés par plusieurs auteurs. (Delaunay et al. 2000; Chen et al. 2003). Aussi, pour savoir si la géométrie du moule (retrait contraint ou non) est importante, il faudrait avoir un moule de pièce à épaisseur constante avec des zones de retrait contraint (en forme de U par exemple).

Au niveau de la mesure avec le profilographe des retraits dans le plan, la source d'incertitude la plus importante demeure le défaut de rectitude des repères. Une solution pourrait être de procéder par électroérosion mais d'améliorer l'électrode en utilisant non plus le découpage au fil mais plutôt des tiges de précision. Ces tiges réputées très droites ($0,5 \mu m$ de tolérance) et avec un excellent état de surface ($0,05 \mu m$) sont utilisées pour fabriquer des calibres de précision. Évidemment, le montage de ces tiges et leur utilisation comme électrode seraient assez complexes. L'utilisation d'inserts en silicium avec des marques usinées par attaque chimique et ensuite plaqués électrolytiquement serait aussi une avenue possiblement très performante. L'avantage du silicium est que lorsqu'il est attaqué chimiquement, l'enlèvement de matière s'effectue selon les plans atomiques. Cette technique est déjà utilisée pour la fabrication des moules pour disques compacts. (Schift et al. 2000)

6 RÉFÉRENCES

- Anonyme 2004. "Presses à injecter: un marché en mutation". *Plastiques et élastomères magazine*. 56:5. 25-35.
- AMERICAN PLASTICS COUNCIL. 2004. APC Year-End Statistics for 2003: Production, Sales and Captive Use, 2003 vs 2002. http://www.americanplasticscouncil.org/s_apc/docs/1100/1014.pdf (Page consultée le 15 Septembre 2004)
- CENTRE DE RECHERCHE INDUSTRIELLE DU QUÉBEC. Banque d'information industrielle. <http://www.icriq.com> (Page consultée le 15 Septembre 2004)
- CHANG, T.C., FAISON III, E. 2001. "Shrinkage behavior and optimization of injection molded parts studied by the Taguchi method". *Polymer Engineering and Science*. 41:5. 703-710.
- CHANG, T.C., GADIYAR, A.U. 2002. "Prediction of Anisotropic Shrinkage Behavior of Plastic Injection Molded Parts by Experimental Design Approach". Boston, MA, USA : Publ by Soc of Plastics Engineers, Brookfield, CT, USA. P. 633-637.
- CHEN, S.-C., LIAW, W.-L., SU, P.-L., CHUNG, M.-H. 2003. "Investigation of Mold Plate Separation in Thin-wall Injection Molding". *Advances in Polymer Technology*. 22:4. 306-319.
- DELAUNAY, D., LE BOT, P., FULCHIRON, R., LUYE, J.F., RÉGNIER, G. 2000. "Nature of contact between polymer and mold in injection molding. Part II: influence of mold deflection on pressure history and shrinkage". *Polymer Engineering and Science*. 40:7. 1692-1700.
- DELBARRE, P., PABIOT, J., RIETSCH, F., DAURELLE, J.-F., LAMBLIN, V. 1991. "Experimental study of processing conditions on shrinkage and on warpage of injected parts". *49th Annual Technical Conference -ANTEC '91, May 5-9 1991*. Montreal, Que, Can : Publ by Soc of Plastics Engineers, Brookfield, CT, USA. 37, P. 301-304.
- GIPSON, P.M., GRELLÉ, P.F., SALAMON, B.A. 1999. "The effects of process conditions, nominal wall thickness, and flow length on the shrinkage characteristics of injection molded polypropylene". *Journal of injection molding technology*. 3:3 . 117-125.
- GRIFF, A.L. 2003. Melt Index Mysteries Unmasked. <http://www.griffex.com/Griff-meltindex.pdf> (Page consultée le 15 Septembre 2004)
- JANSEN, K.M.B., VAN DIJK, D.J., HUSSELMAN, M.H. 1998. "Effect of processing conditions on shrinkage in injection molding". *Polymer Engineering and Science*. 38:5. 838-846.

- KIM, S.-W., TURNG, L.-S. 2004. "Developments of three-dimensional computer-aided engineering simulation for injection moulding". *Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering*. 12:3. 151-173.
- KUMAZAWA, H. 1994. "Prediction of anisotropic shrinkage of an injection molded part". *Proceedings of the 52nd Annual Technical Conference ANTEC 94. Part 1 (of 3), May 1-5 1994*. San Francisco, CA, USA : Publ by Soc of Plastics Engineers, Brookfield, CT, USA. P. 817-821.
- LIAO, S.J., CHANG, D.Y., CHEN, H.J., TSOU, L.S., HO, J.R., YAU, H.T. et al. 2004. "Optimal process conditions of shrinkage and warpage of thin-wall parts". *Polymer Engineering and Science*. 44:5. 917-928.
- MAMAT, A., TROCHU, F., SANSCHAGRIN, B. 1995. "Analysis of shrinkage by dual kriging for filled and unfilled polypropylene molded parts". *Polymer Engineering and Science*. 35:19. 1511-1520.
- MARINARO, J. 2003. "Simulation d'injection: état des lieux". *Caoutchoucs et Plastiques*. 813. 32-36.
- MCFARLAND, A.W., COLTON, J.S. 2004. "Production and analysis of injection molded micro-optic components". *Polymer Engineering and Science*. 44:3. 564-579.
- MIN, B.H. 2003. "A study on quality monitoring of injection-molded parts". *Journal of Materials Processing Technology*. 136:1-3. 1-6.
- MITUTOYO AMERICA CORPORATION. "Formtracer SV-C3000/4000 : Two-Role Performance". Anon. US4235-525 : Japan : 8.
- MITUTOYO AMERICA CORPORATION Formpak: Contour Analysis Program, Operation Guide, User's Manual 99MBB10A5
- PENN PLASTICS INC. <http://www.pennplastics.com/faq.htm> (Page consultée le 15 Septembre 2004)
- PERRUCHET, C., PRIEL, M. 2000. *Estimer l'incertitude: mesures, essais*. Paris : AFNOR 119p.
- PIERICK, D., NOLLER, R. 1991. "Effect of processing conditions on shrinkage". *49th Annual Technical Conference -ANTEC '91, May 5-9 1991*. Montreal, Que, Can : Publ by Soc of Plastics Engineers, Brookfield, CT, USA. 37, P. 252-258.
- POMERLEAU, J., LANDRY, M.J. "à paraître". "Guide d'utilisation du profilographe/rugosimètre". Anon. 40.
- QUALITY DIGEST ONLINE. [1998?]. 1998 CMM Buyer's Guide. <http://www.qualitydigest.com/pdfs/cmm98.pdf> (Page consultée le 15 Septembre 2004)
- RÉGNIER, G., TROTIGNON, J.P. 1993. "Local orthotropic shrinkage determination in injected moulded polymer plates". *Polymer Testing*. 12:5. 383-392.

SANSCHAGRIN, B. *Notes de cours - MEC8903.*

SCHIFT, H., DAVID, C., GOBRECHT, J., D'AMORE, A., SIMONETA, D., KAISER, W. et al. 2000. "Quantitative analysis of the molding of nanostructures". *Journal of Vacuum Science and Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures: 44th International Conference on Electron, Ion, and Photon Beam Technology and Nanofabrication, May 30-Jun 2 2000*. 18:6. 3564-3568.

SMITH, Z., ULRICH, A. [2000?]. Exploiting the potential of plastics gears.
<http://www.polymerplace.com/articles/TYPICAL%20DESIGN%20CHECKLIST.htm>
 m (Page consultée le 15 Septembre 2004)

SOCIETY OF THE PLASTICS INDUSTRIES INC. 2004. Comittee on equipment statistics, annual and quaterly report.
<http://www.plasticsdatasource.org/equipment.htm> (Page consultée le 15 Septembre 2004)

TANGRAM TECHNOLOGY LTD. 2004. Shrinkage in plastics processing.
http://www.tangram.co.uk/TI-Polymer-Shrinkage_in_plastics.html (Page consultée le 15 Septembre 2004)

WIMBERGER-FRIEDL, R. 1995. "Assessment of orientation, stress and density distributions in injection-molded amorphous polymers by optical techniques". *Progress in Polymer Science (Oxford)*. 20:3. 369-401.

XIA, Z., MALLICK, P.K. 1997. "Control of dimensional variability in injection molded plastic parts". *Proceedings of the 1997 55th Annual Technical Conference, ANTEC. Part 1 (of 3), Apr 27-May 2 1997*. Toronto, Can : Soc of Plastics Engineers, Brookfield, CT, USA. 1, P. 472-479.

ANNEXES

A Plans

A.1 Nouvelle partie fixe

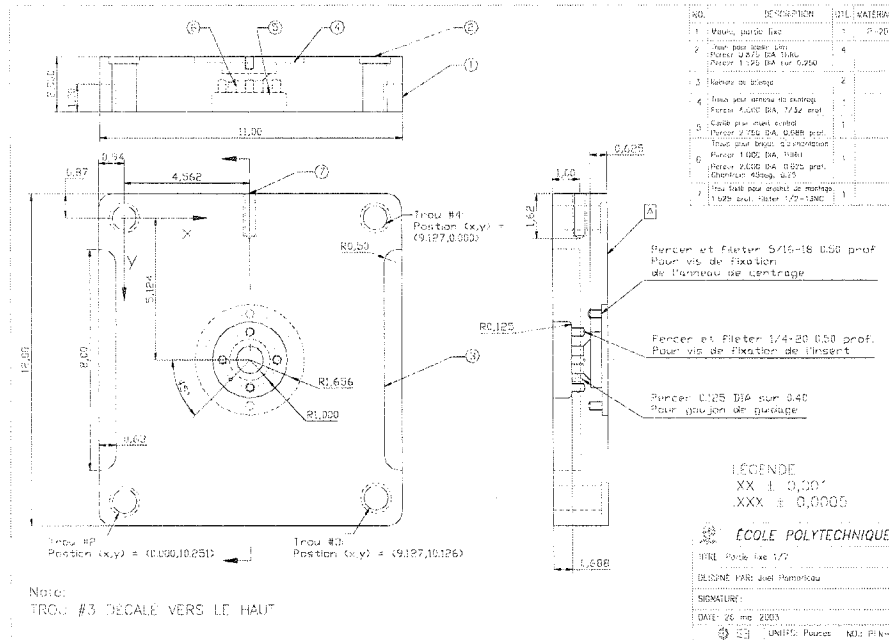


Figure A - 1: Plan de la nouvelle partie fixe 1/3.

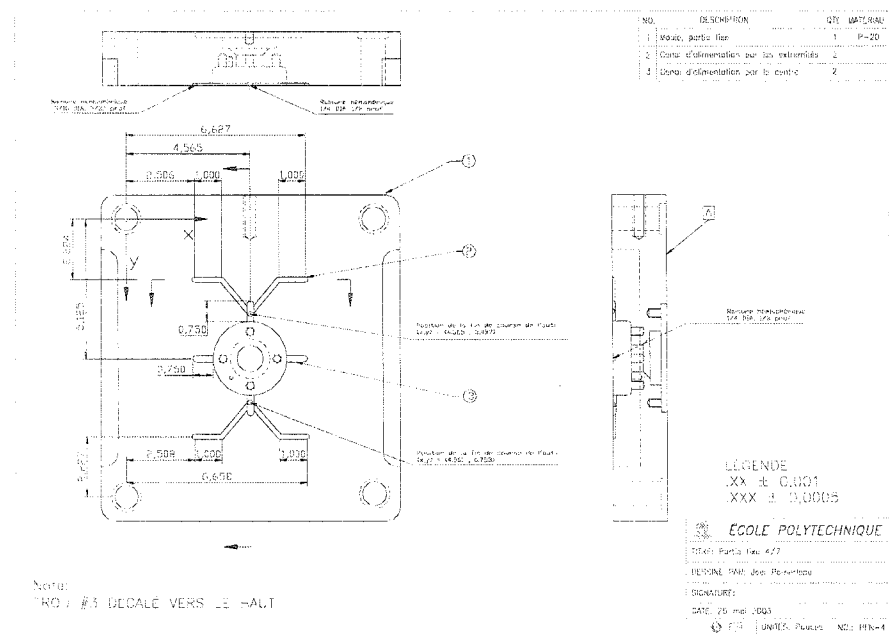


Figure A - 2: Plan de la nouvelle partie fixe 2/3.

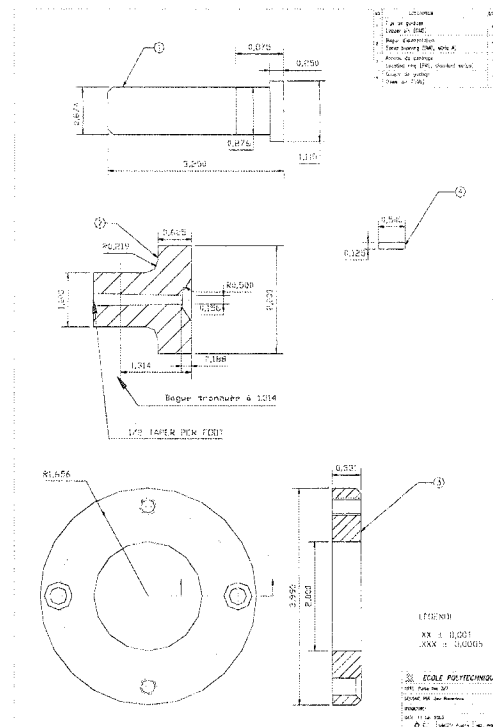


Figure A - 5: Plan des composantes de la nouvelle partie fixe achetées chez DME.

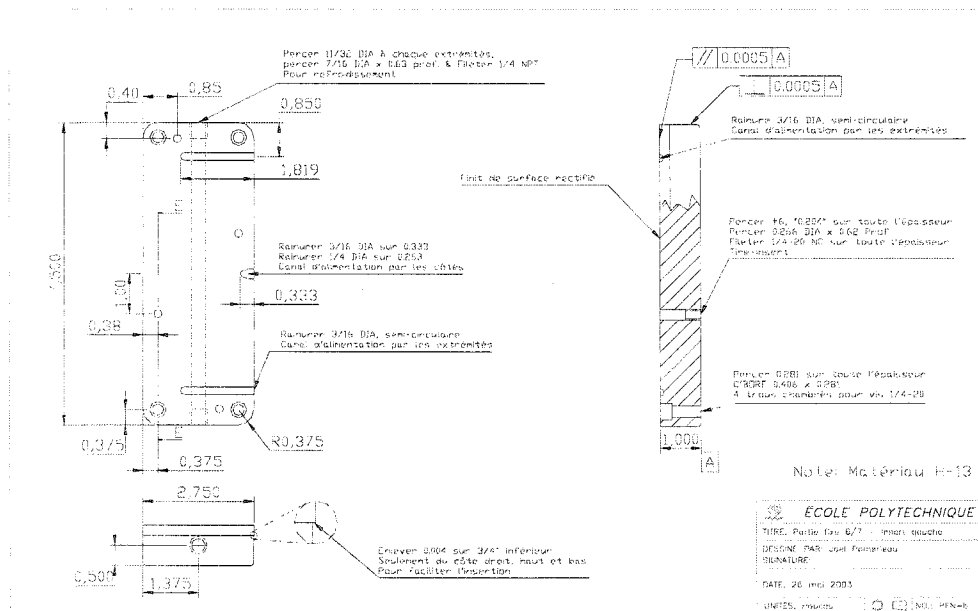


Figure A - 6: Insert plein (gauche) pour la nouvelle partie fixe.

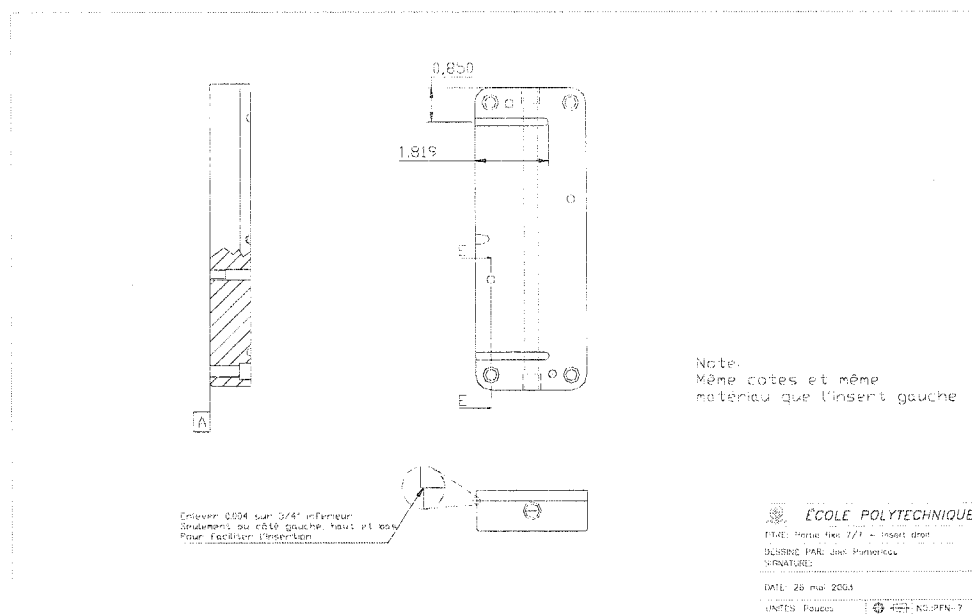


Figure A - 7: Insert plein (droite) pour la nouvelle partie fixe.

A.2 Inserts

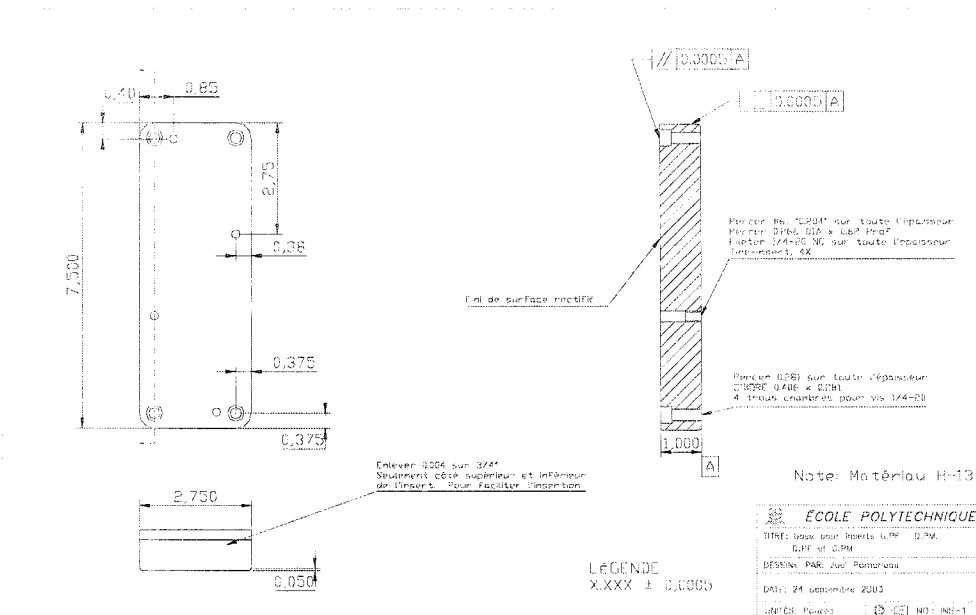


Figure A - 8: Plan de base pour la fabrication des inserts.

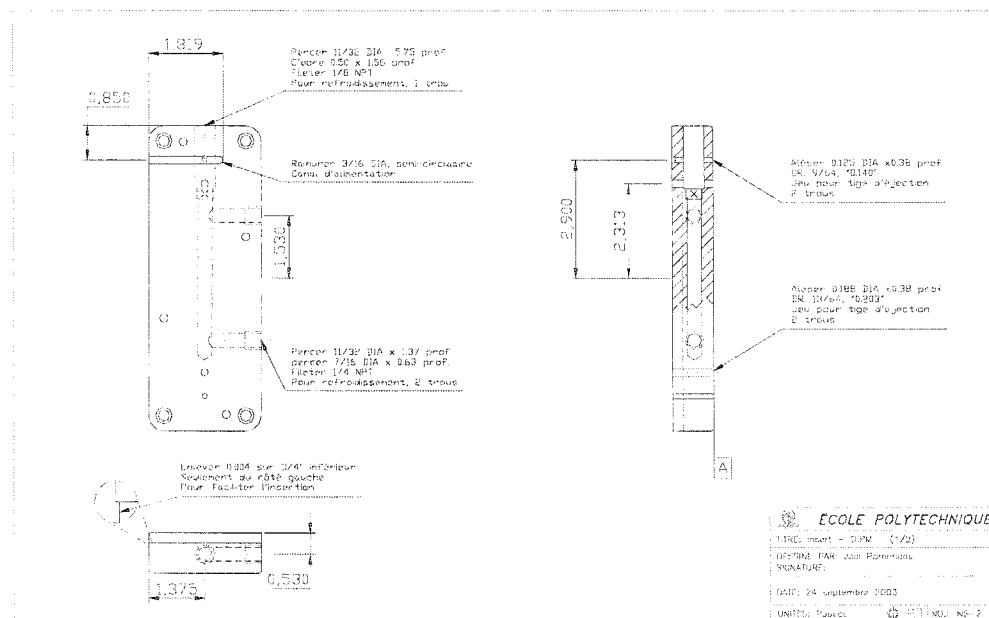


Figure A - 9: Plan des inserts 1/4.

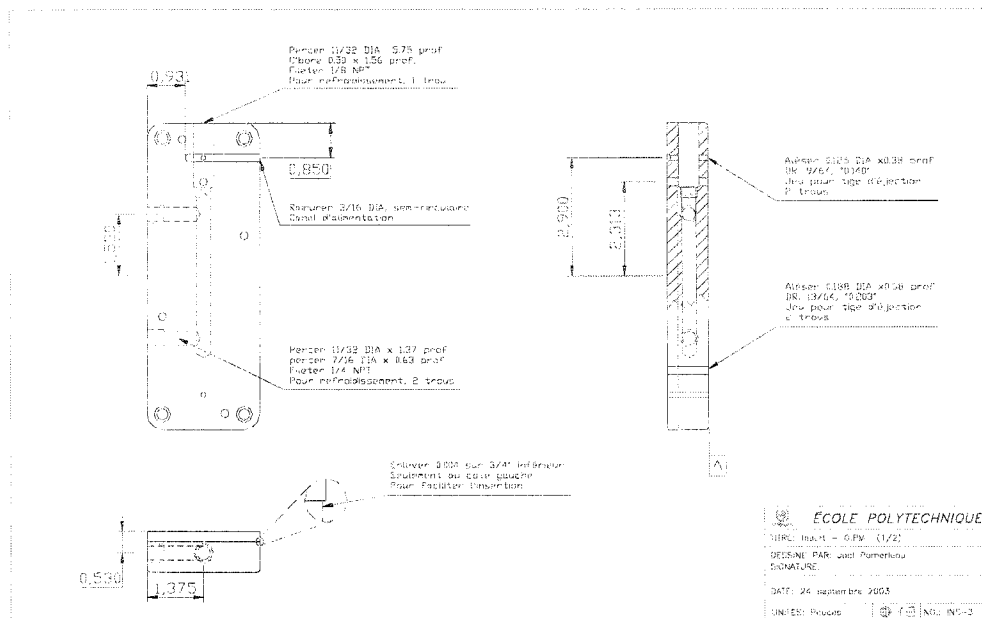


Figure A - 10: Plan des inserts 2/4.

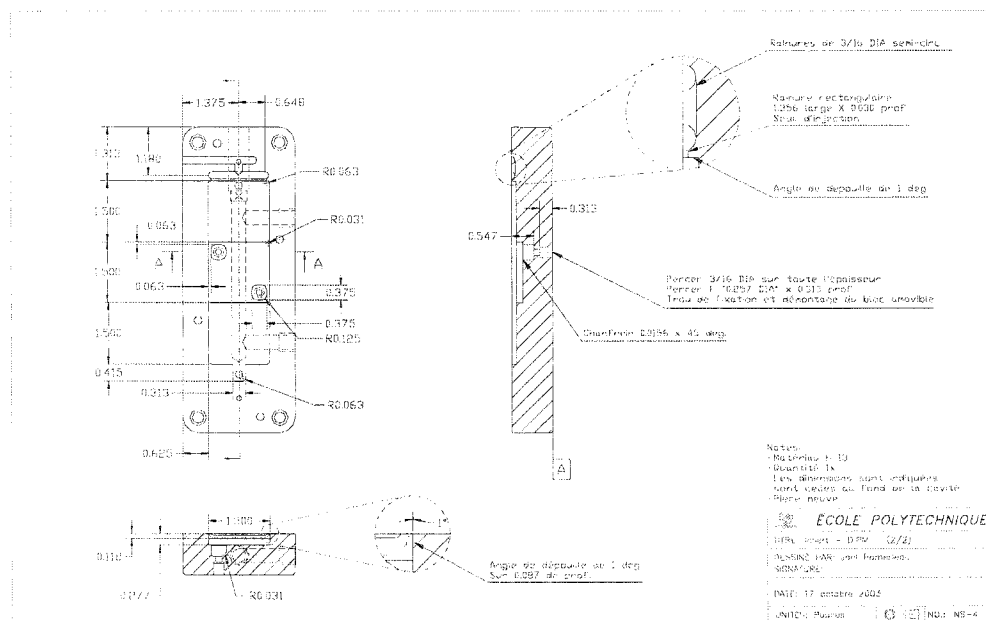
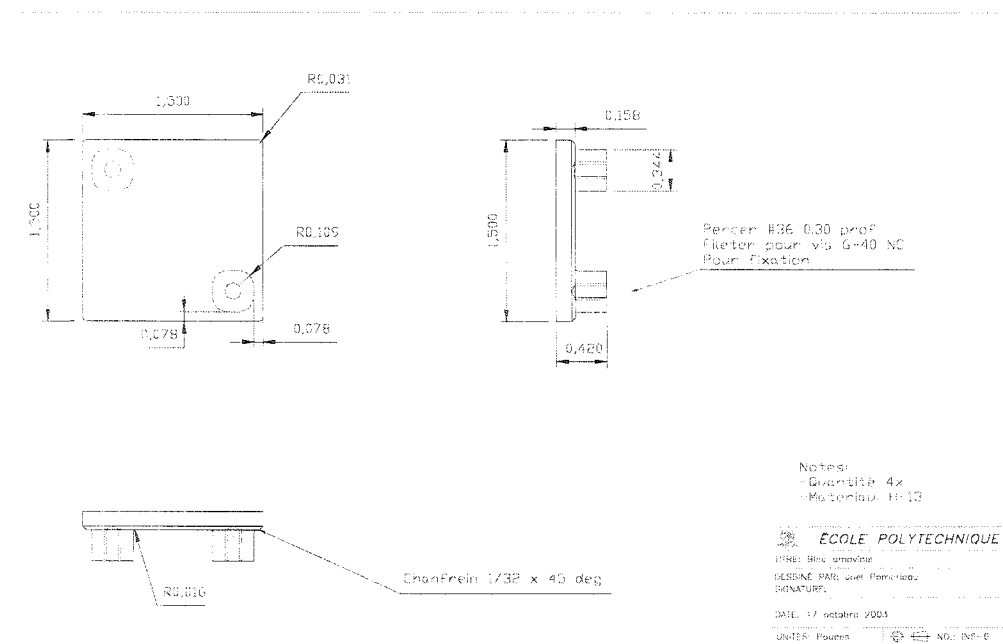
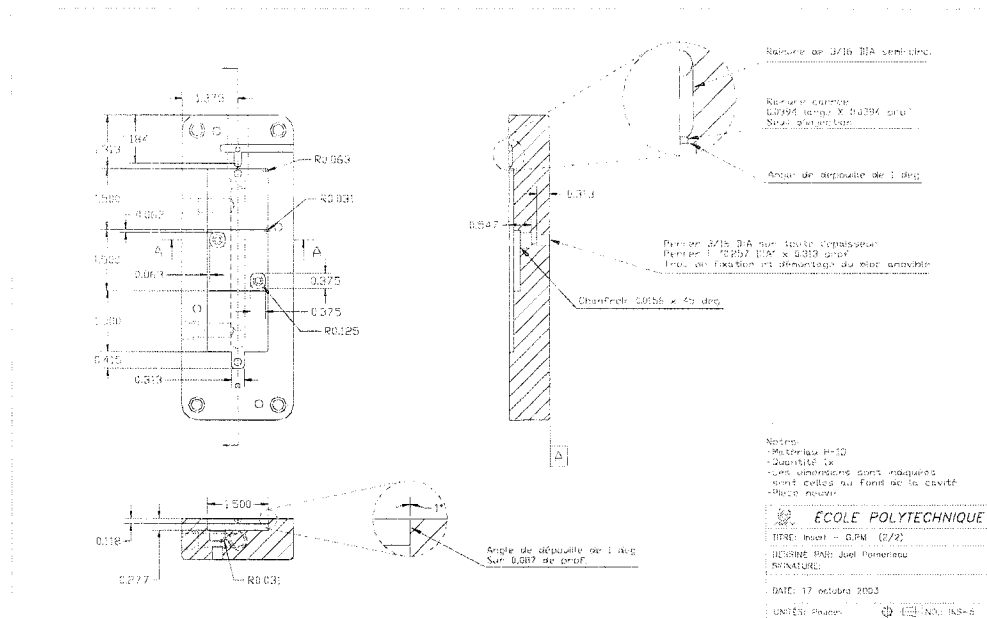


Figure A - 11: Plan des inserts 3/4.



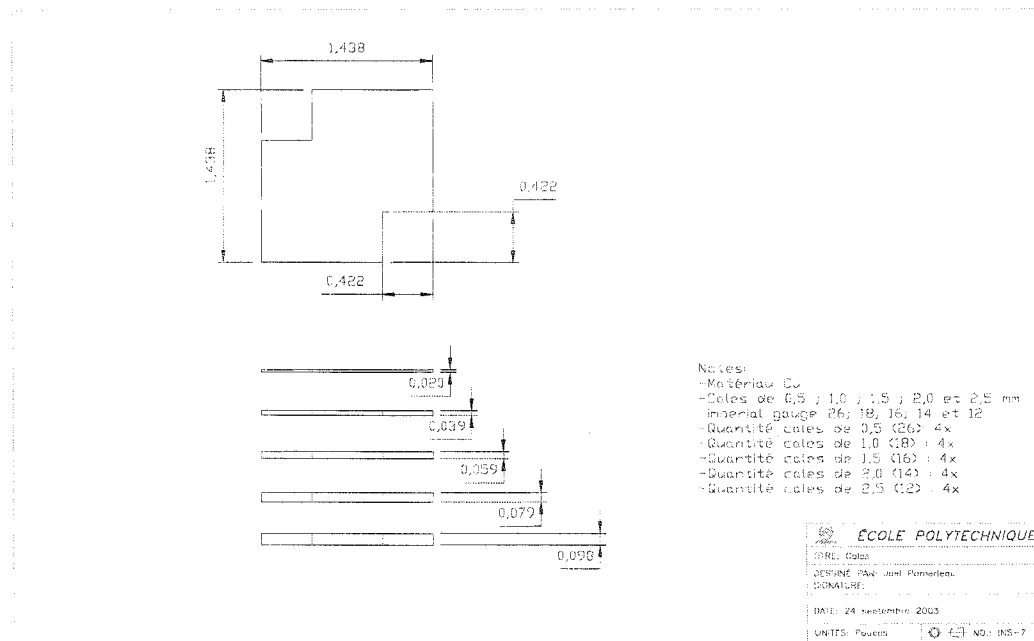


Figure A - 14: Plan du jeu de cale pour les blocs amovibles.

B Analyses statistiques locales

B.1 Retraits en position C3 dans le sens de l'écoulement

B.1.1 Effets estimés et diagramme de Pareto

Tableau B - 1: Effets estimés pour le retrait en C3 dans le sens de l'écoulement.

Effect Estimates; Var.:Retrait =; R-sqr=.96625; Adj.:.89874 (DonneDOE3) 2 3-level factors, 1 Blocks, 13 Runs; MS Pure Error=.0000001 DV: Retrait =										
Factor	Effect	Std.Err. Pure Err	t(4)	p	-95.% Cnf.Limt	+95.% Cnf.Limt	Coeff.	Std.Err. Coeff.	-95.% Cnf.Limt	+95.% Cnf.Limt
Mean/Interc.	0.02012	0.00008	239.104	0.00000	0.01988	0.02035	0.02012	0.00008	0.01988	0.02035
(1)Pm (MPa)(L)	-0.00160	0.00022	-7.411	0.00177	-0.00220	-0.00100	-0.00080	0.00011	-0.00110	-0.00050
Pm (MPa)(Q)	-0.00013	0.00017	-0.771	0.48388	-0.00060	0.00034	-0.00007	0.00008	-0.00030	0.00017
(2)Vinj (mm/s)(L)	0.00131	0.00022	6.052	0.00376	0.00071	0.00191	0.00065	0.00011	0.00035	0.00095
Vinj (mm/s)(Q)	-0.00009	0.00017	-0.535	0.62115	-0.00056	0.00038	-0.00005	0.00008	-0.00028	0.00019
1L by 2L	0.00010	0.00026	0.378	0.72451	-0.00063	0.00083	0.00005	0.00013	-0.00032	0.00042
1L by 2Q	0.00075	0.00023	3.275	0.03064	0.00011	0.00139	0.00037	0.00011	0.00006	0.00069
1Q by 2L	0.00043	0.00023	1.878	0.13363	-0.00021	0.00107	0.00022	0.00011	-0.00010	0.00053
1Q by 2Q	-0.00027	0.00016	-1.702	0.16393	-0.00071	0.00017	-0.00014	0.00008	-0.00036	0.00009

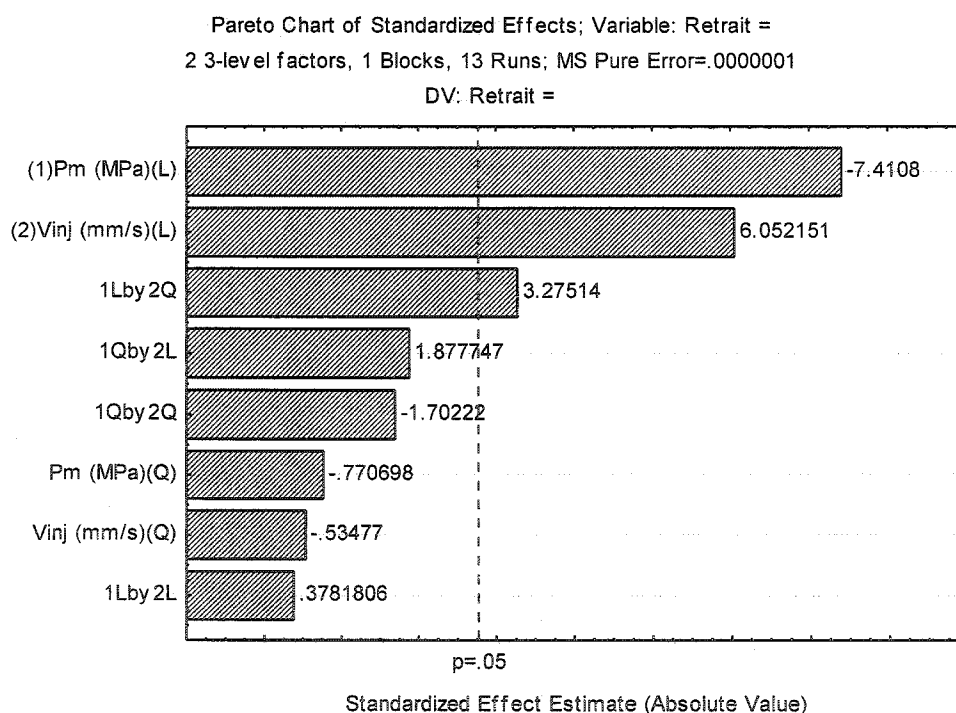


Figure B - 1: Diagramme de Pareto pour le retrait en C3 dans le sens de l'écoulement.

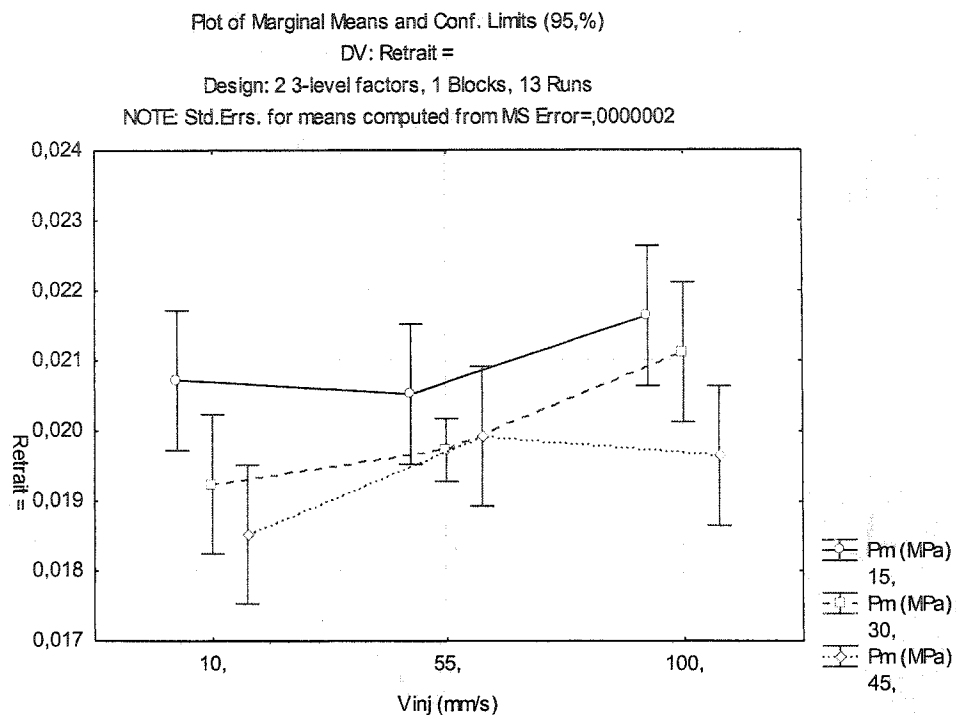


Figure B - 2: Effets principaux de la vitesse d'injection en C3 pour le retrait dans le sens de l'écoulement.

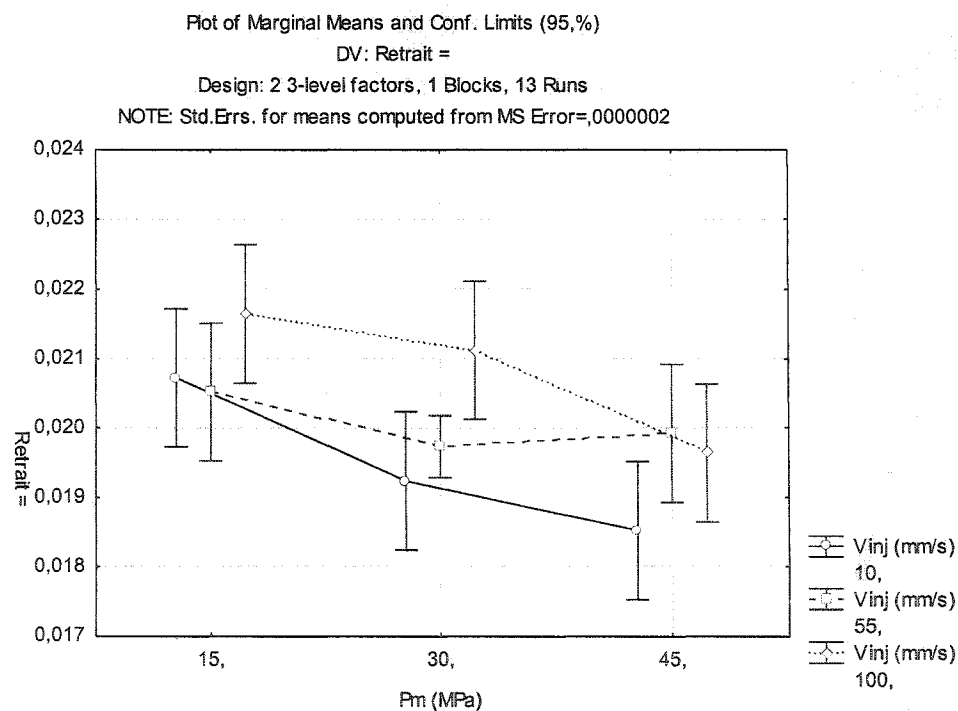


Figure B - 3: Effets principaux de la pression de maintien en C3 pour le retrait dans le sens de l'écoulement.

B.1.2 Analyse de la variance

L'analyse ANOVA montre que le modèle quadratique est bien ajusté puisque $R=0,97$. L'ANOVA montre également que les termes d'interactions ont peu d'effet sur les variations du retrait dans le sens de l'écoulement.

Tableau B - 2: Tableau d'analyse de la variance en C3 pour le retrait dans le sens de l'écoulement.

ANOVA; Var.:Retrait =; R-sqr=.96625; Adj:.89874 (DonneDOE3) 2 3-level factors, 1 Blocks, 13 Runs; MS Pure Error=.0000001 DV: Retrait =					
Factor	SS	df	MS	F	p
(1)Pm (MPa) L+Q	0.000004	2	0.000002	27.75694	0.004517
(2)Vinj (mm/s) L+Q	0.000003	2	0.000001	18.45725	0.009558
1*2	0.000001	4	0.000000	4.32326	0.092610
Pure Error	0.000000	4	0.000000		
Total SS	0.000008	12			

Normalement, lorsque la variable de réponse est un ratio, il est probable que la variance ne soit pas constante sur tout le domaine de la variable de réponse. Ainsi, il est nécessaire d'effectuer un test dit de Box-Cox afin de vérifier s'il est nécessaire d'effectuer une transformation de la variable de réponse. Le test révèle que la transformation n'est pas nécessaire ici.

Tableau B - 3: Résultats du test de Box-Cox.

Final Statistics, B-C Trans. of Variable: Retrait = (DonneDOE3) 2 3-level factors, 1 Blocks, 13 Runs; MS Pure Error=.0000001 DV: Retrait =				
	Lambda	SSE(I)	Chi²(1)	p
Final Statistics	1.999990	0.000000	0.416413	0.518737

B.1.3 Surface de réponse

La surface de réponse montre comment les paramètres V_{inj} et P_m agissent sur la variable de réponse. On remarque également que le retrait dans le sens de l'écoulement varie d'environ de $\pm 10\%$ autour de la valeur moyenne qui est de 0,0201.

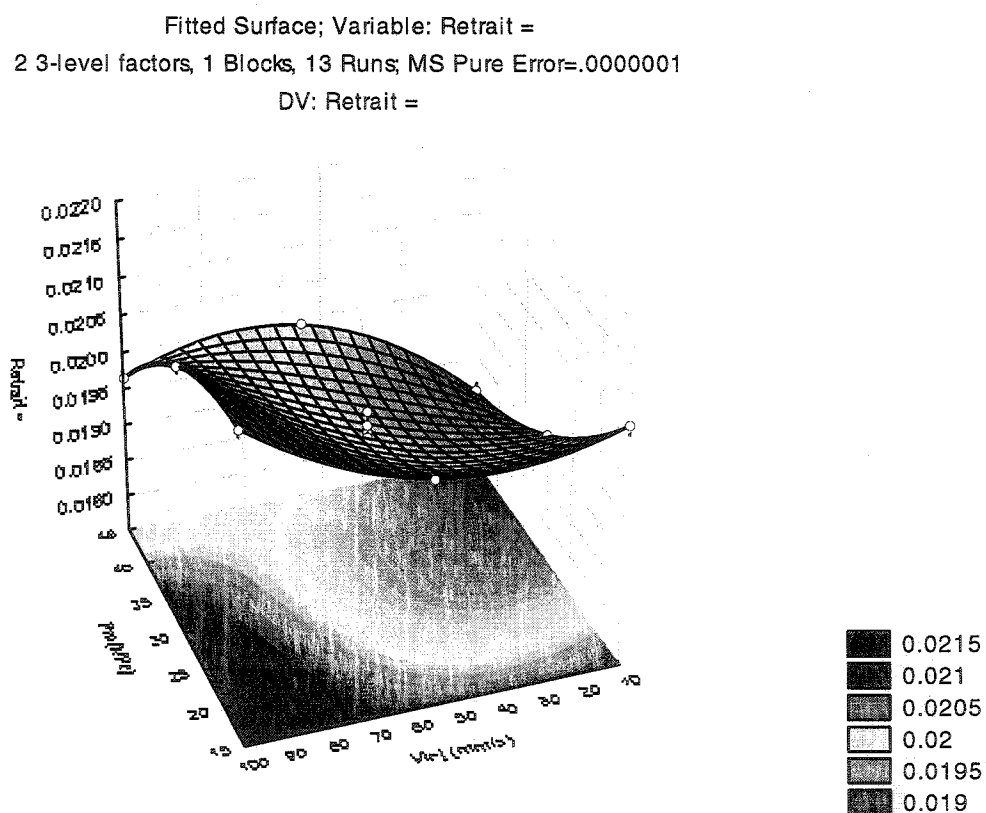


Figure B - 4: Surface de réponse montrant le retrait dans le sens de l'écoulement en fonction de la pression de maintien et de la vitesse d'injection pour la position C3

B.1.4 Analyse des résidus

L'analyse des résidus montre que le polynôme passe par les points extrêmes et par la moyenne des points au centre.

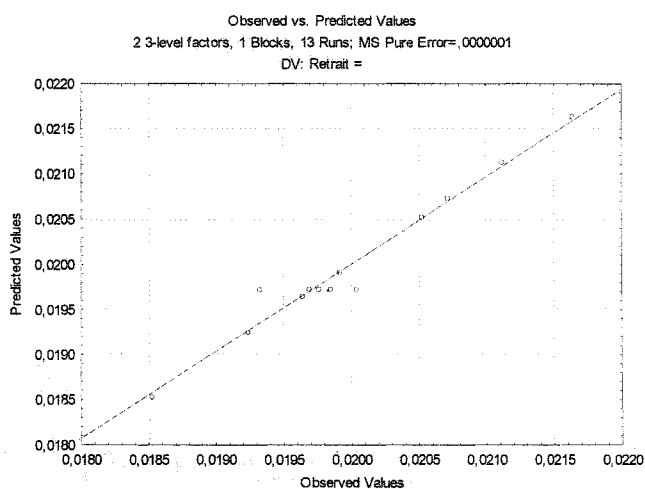


Figure B - 5: Valeurs prédites en fonction des valeurs observées pour le retrait dans le sens de l'écoulement en position C3.

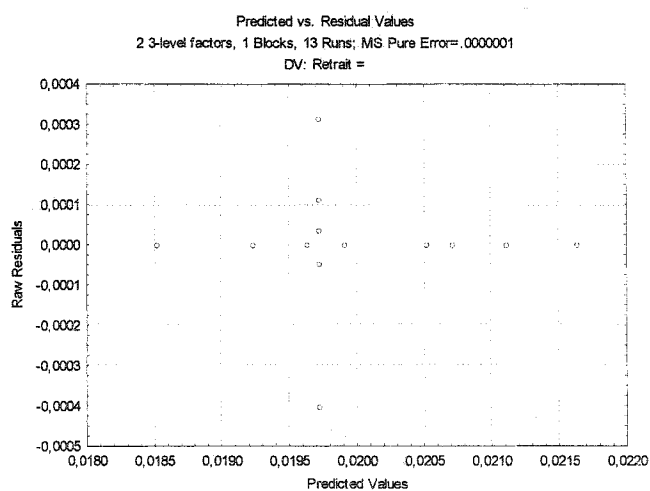


Figure B - 6: Résidus en fonction des valeurs prédites pour le retrait dans le sens de l'écoulement en position C3.

B.2 Retraits en position C3 dans le sens transverse

B.2.1 Effets estimés et diagramme de Pareto

Tableau B - 4: Effets estimés pour le retrait en C3 dans le sens transverse.

Factor	Effect Estimates; Var.:Retrait +; R-sqr=.99485; Adj. 98454 (DonneDOE3) 2 3-level factors, 1 Blocks, 13 Runs; MS Pure Error=.0000001 DV: Retrait +									
	Effect	Std.Err. Pure Err	t(4)	p	-95.% Cnf.Limt	+95.% Cnf.Limt	Coeff.	Std.Err. Coeff.	-95.% Cnf.Limt	+95.% Cnf.Limt
Mean/Interc.	0.03066	0.00010	305.165	0.00000	0.03038	0.03093	0.03066	0.00010	0.03038	0.03093
(1)Pm (MPa)(L)	-0.00672	0.00026	-26.068	0.00001	-0.00744	-0.00600	-0.00336	0.00013	-0.00372	-0.00300
Pm (MPa)(Q)	-0.00087	0.00020	-4.321	0.01244	-0.00144	-0.00031	-0.00044	0.00010	-0.00072	-0.00016
(2)Vinj (mm/s)(L)	0.00024	0.00026	0.931	0.40455	-0.00048	0.00096	0.00012	0.00013	-0.00024	0.00048
Vinj (mm/s)(Q)	-0.00059	0.00020	-2.938	0.04249	-0.00116	-0.00003	-0.00030	0.00010	-0.00058	-0.00002
1L by 2L	-0.00020	0.00032	-0.633	0.56084	-0.00108	0.00068	-0.00010	0.00016	-0.00054	0.00034
1L by 2Q	0.00102	0.00027	3.730	0.02029	0.00026	0.00178	0.00051	0.00014	0.00013	0.00089
1Q by 2L	0.00054	0.00027	1.975	0.11949	-0.00022	0.00130	0.00027	0.00014	-0.00011	0.00065
1Q by 2Q	-0.00038	0.00019	-2.010	0.11485	-0.00091	0.00015	-0.00019	0.00010	-0.00045	0.00007

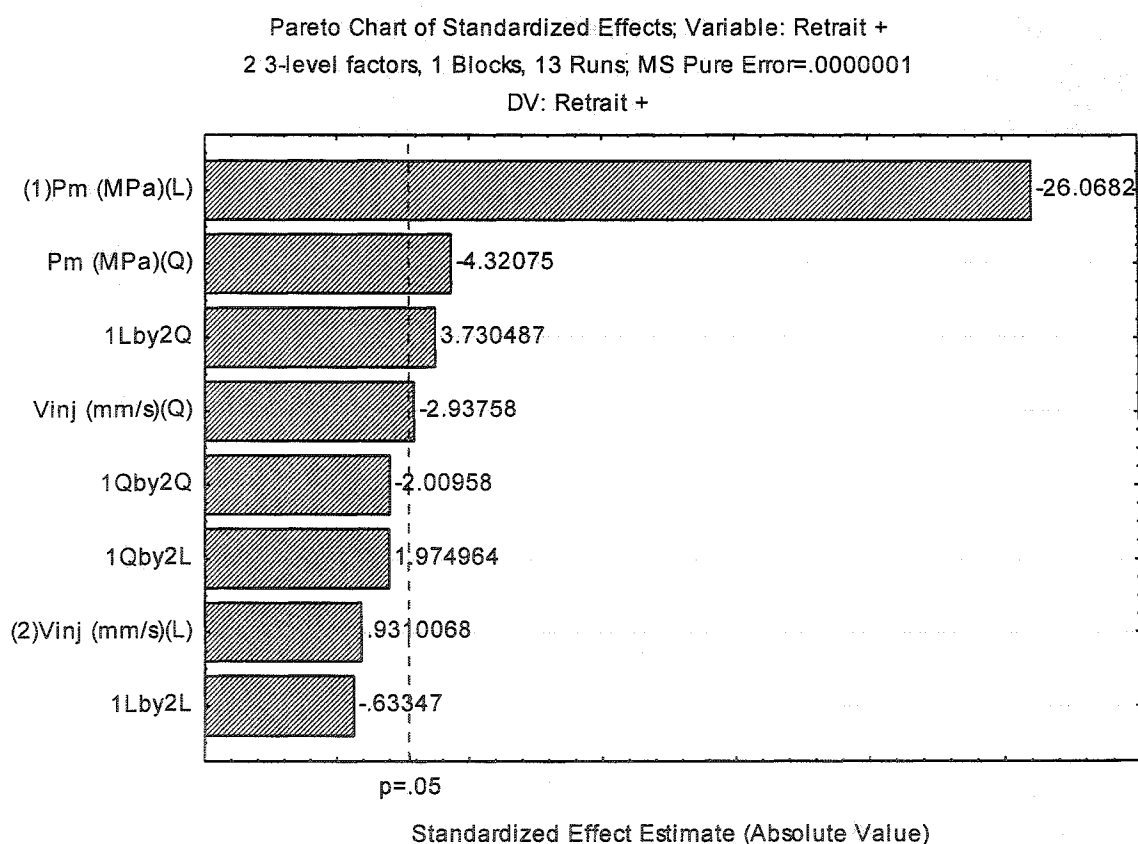


Figure B - 7: Diagramme de Pareto pour le retrait en C3 dans le sens transverse.

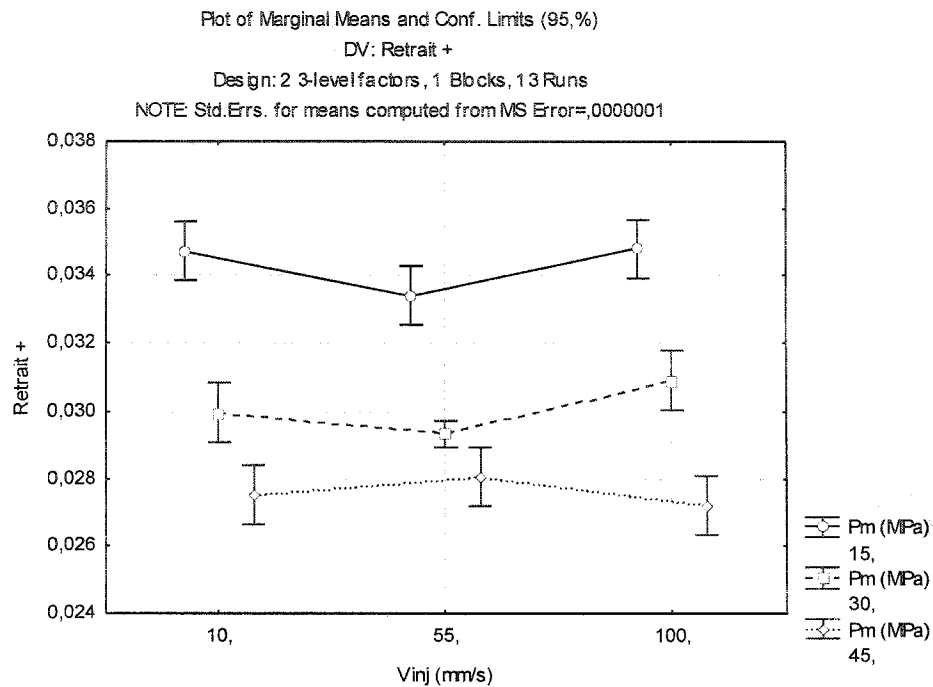


Figure B - 8: Effets principaux de la vitesse d'injection en C3 pour le retrait dans le sens transverse.

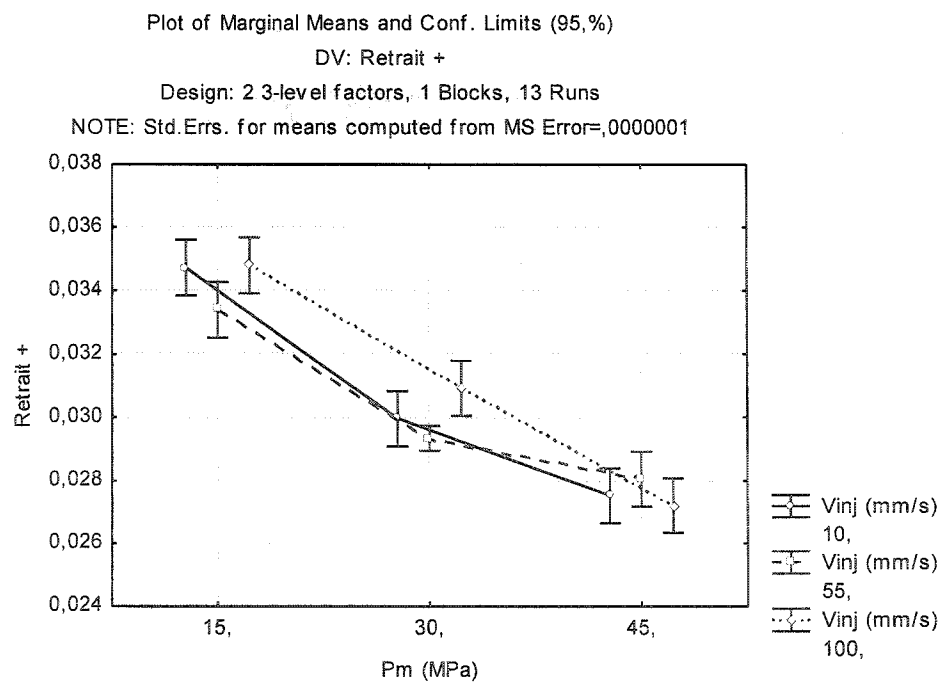


Figure B - 9: Effets principaux de la pression de maintien en C3 pour le retrait dans le sens transverse.

B.2.2 Analyse de la variance

Tableau B - 5: Tableau d'analyse de la variance en C3 pour le retrait dans le sens transverse.

ANOVA; Var.:Retrait +; R-sqr=.99485; Adj:.98454 (DonneDOE3) 2 3-level factors, 1 Blocks, 13 Runs; MS Pure Error=.0000001 DV: Retrait +					
Factor	SS	df	MS	F	p
(1)Pm (MPa) L+Q	0.000070	2	0.000035	349.1097	0.000032
(2)Vinj (mm/s) L+Q	0.000001	2	0.000000	4.7481	0.087841
1*2	0.000002	4	0.000001	5.5642	0.062553
Pure Error	0.000000	4	0.000000		
Total SS	0.000077	12			

B.2.3 Surface de réponse

Fitted Surface; Variable: Retrait +
2 3-level factors, 1 Blocks, 13 Runs; MS Pure Error=.0000001
DV: Retrait +

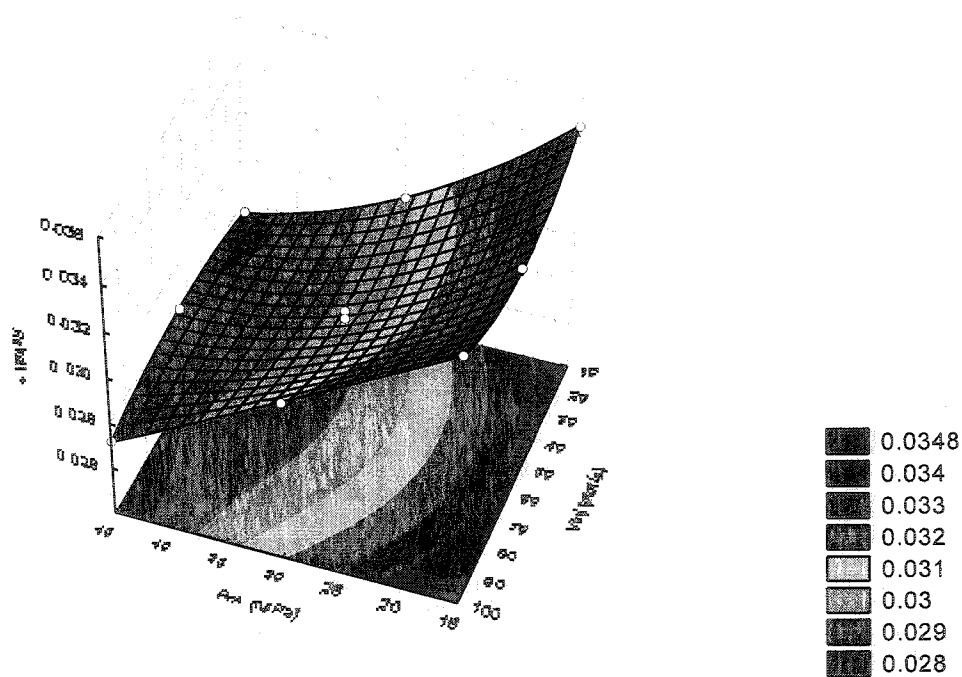


Figure B - 10: Surface de réponse montrant le retrait dans le sens transverse en fonction de la pression de maintien et de la vitesse d'injection pour la position C3.

B.2.4 Analyse des résidus

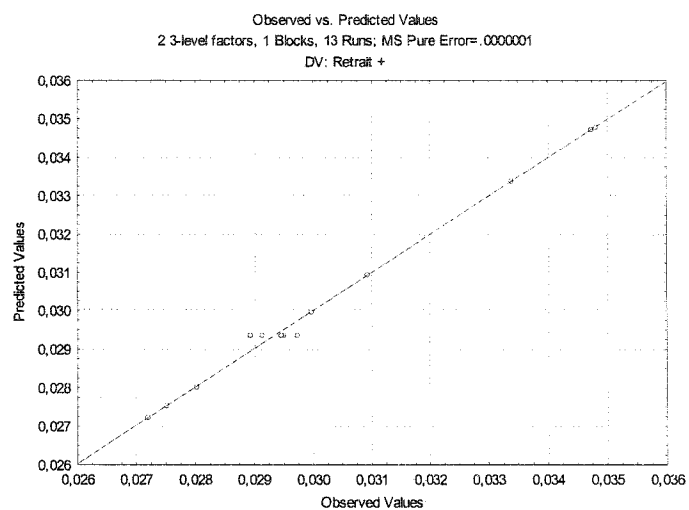


Figure B - 11: Valeurs prédites en fonction des valeurs observées pour le retrait dans le sens transverse en position C3.

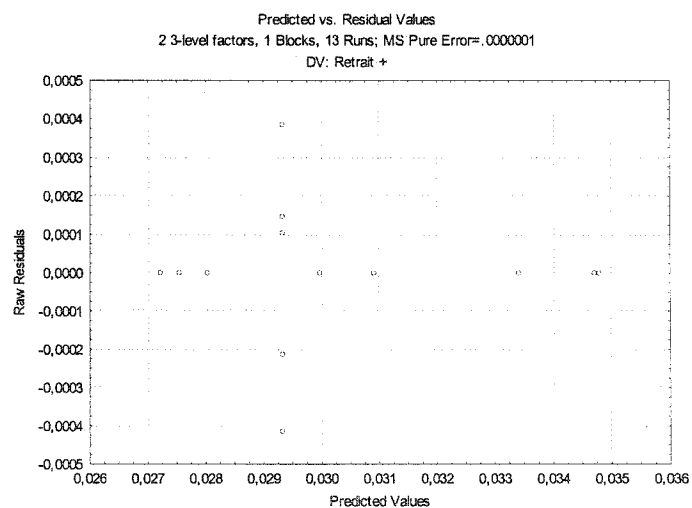


Figure B - 12: Résidus en fonction des valeurs prédites pour le retrait dans le sens transverse en position C3.

B.3 Retraits en position I3 dans le sens de l'écoulement

B.3.1 Effets estimés et diagramme de Pareto

Tableau B - 6: Effets estimés pour le retrait en I3 dans le sens de l'écoulement.

Factor	Effect Estimates; Var.:Retrait =; R-sqr=.93003; Adj.:.79008 (DonneDOEI) 2 3-level factors, 1 Blocks, 13 Runs; MS Pure Error=.0000001 DV: Retrait =									
	Effect	Std.Err. Pure Err	t(4)	p	-95.% Cnf.Limt	+95.% Cnf.Limt	Coeff.	Std.Err. Coeff.	-95.% Cnf.Limt	+95.% Cnf.Limt
Mean/Interc.	0.02082	0.00012	174.674	0.00000	0.02049	0.02115	0.02082	0.00012	0.02049	0.02115
(1)Pm (MPa)(L)	-0.00177	0.00031	-5.798	0.00440	-0.00262	-0.00092	-0.00089	0.00015	-0.00131	-0.00046
Pm (MPa)(Q)	-0.00000	0.00024	-0.017	0.98751	-0.00067	0.00066	-0.00000	0.00012	-0.00034	0.00033
(2)Vinj (mm/s)(L)	0.00121	0.00031	3.967	0.01658	0.00036	0.00206	0.00061	0.00015	0.00018	0.00103
Vinj (mm/s)(Q)	0.00020	0.00024	0.816	0.46028	-0.00047	0.00086	0.00010	0.00012	-0.00024	0.00043
1L by 2L	-0.00022	0.00037	-0.587	0.58855	-0.00126	0.00082	-0.00011	0.00019	-0.00063	0.00041
1L by 2Q	0.00019	0.00032	0.586	0.58954	-0.00071	0.00109	0.00009	0.00016	-0.00036	0.00055
1Q by 2L	0.00035	0.00032	1.079	0.34135	-0.00055	0.00125	0.00018	0.00016	-0.00028	0.00063
1Q by 2Q	-0.00029	0.00023	-1.290	0.26649	-0.00092	0.00034	-0.00015	0.00011	-0.00046	0.00017

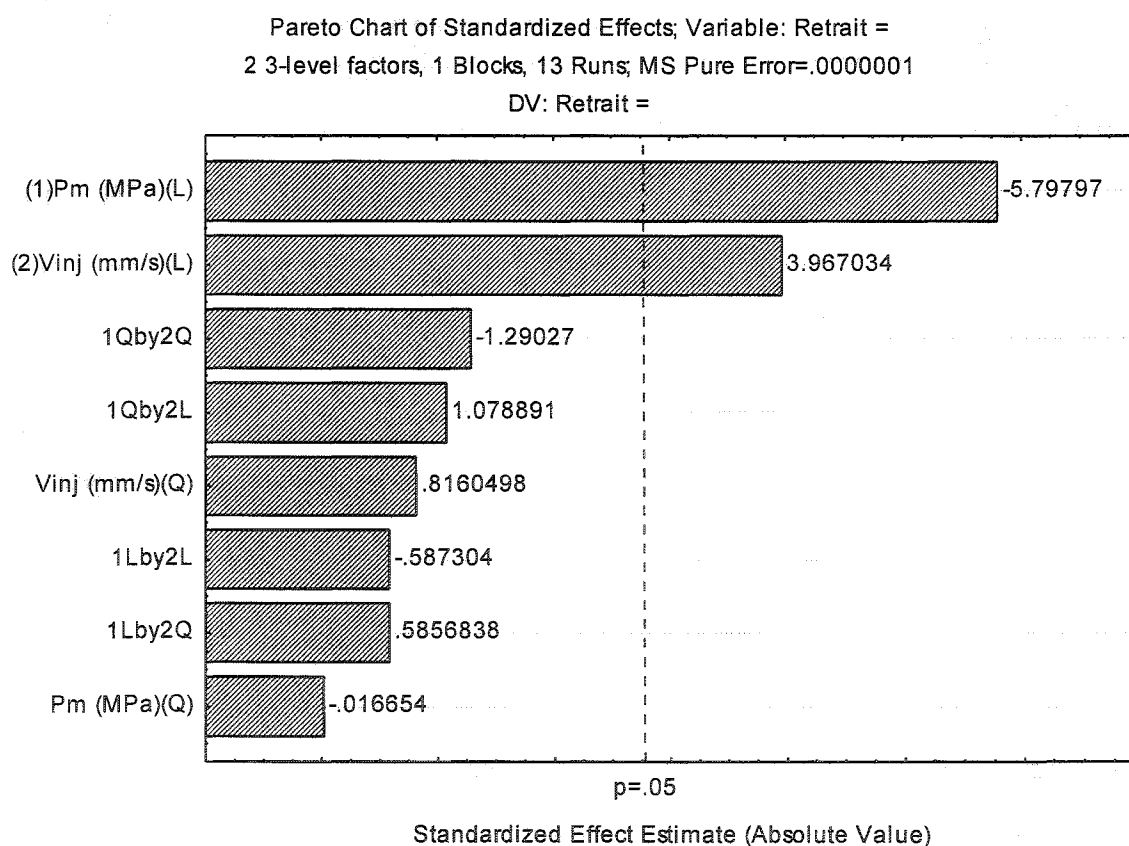


Figure B - 13: Diagramme de Pareto pour le retrait en I3 dans le sens de l'écoulement.

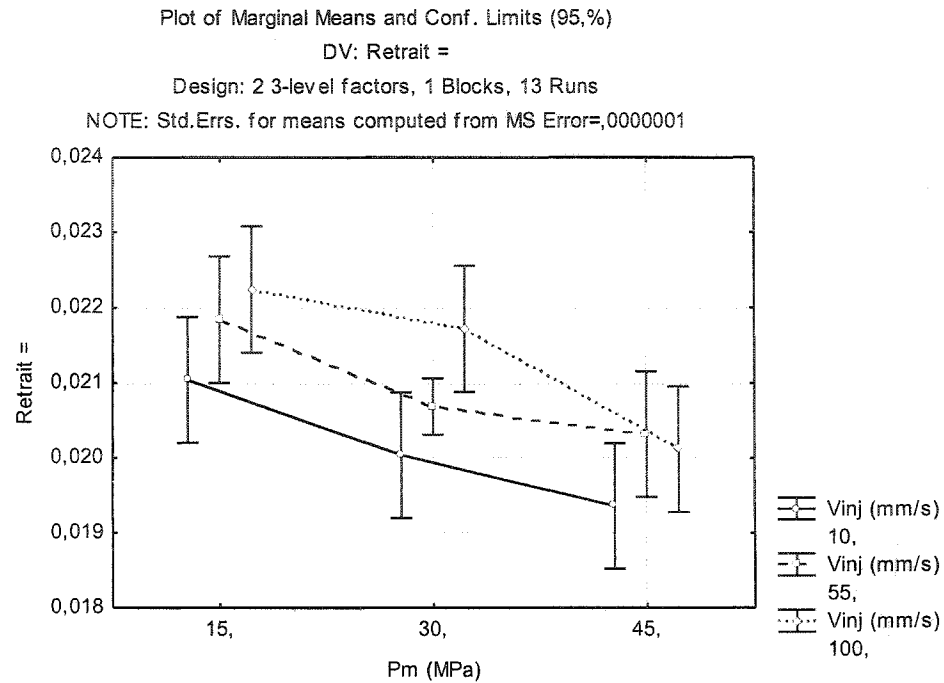


Figure B - 14: Effets principaux de la vitesse d'injection en I3 pour le retrait dans le sens de l'écoulement.

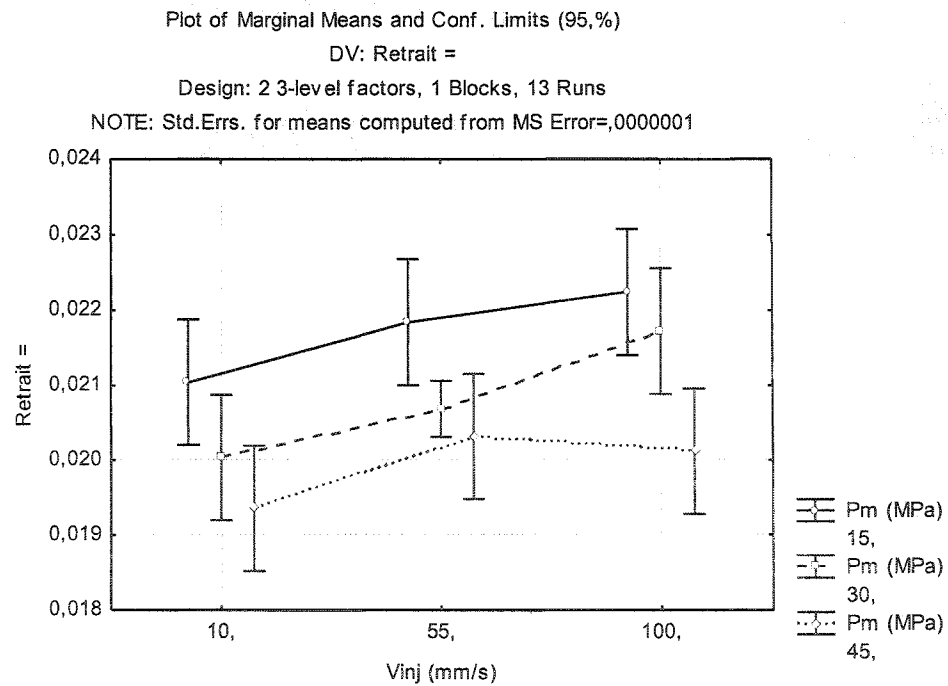


Figure B - 15: Effets principaux de la pression de maintien en I3 pour le retrait dans le sens de l'écoulement.

B.3.2 Analyse de la variance

Tableau B - 7: Tableau d'analyse de la variance en I3 pour le retrait dans le sens de l'écoulement.

ANOVA; Var.:Retrait =; R-sqr=.93003; Adj.:79008 (DonneDOEI) 2 3-level factors, 1 Blocks, 13 Runs; MS Pure Error=.0000001 DV: Retrait =					
Factor	SS	df	MS	F	p
(1)Pm (MPa)(L)	0.000005	1	0.000005	33.61650	0.004400
Pm (MPa)(Q)	0.000000	1	0.000000	0.00028	0.987510
(2)Vinj (mm/s)(L)	0.000002	1	0.000002	15.73736	0.016580
Vinj (mm/s)(Q)	0.000000	1	0.000000	0.66594	0.460279
1L by 2L	0.000000	1	0.000000	0.34493	0.588551
1L by 2Q	0.000000	1	0.000000	0.34303	0.589540
1Q by 2L	0.000000	1	0.000000	1.16401	0.341352
1Q by 2Q	0.000000	1	0.000000	1.66479	0.266493
Pure Error	0.000001	4	0.000000		
Total SS	0.000008	12			

B.3.3 Surface de réponse

Fitted Surface; Variable: Retrait =
2 3-level factors, 1 Blocks, 13 Runs; MS Pure Error=.0000001
DV: Retrait =

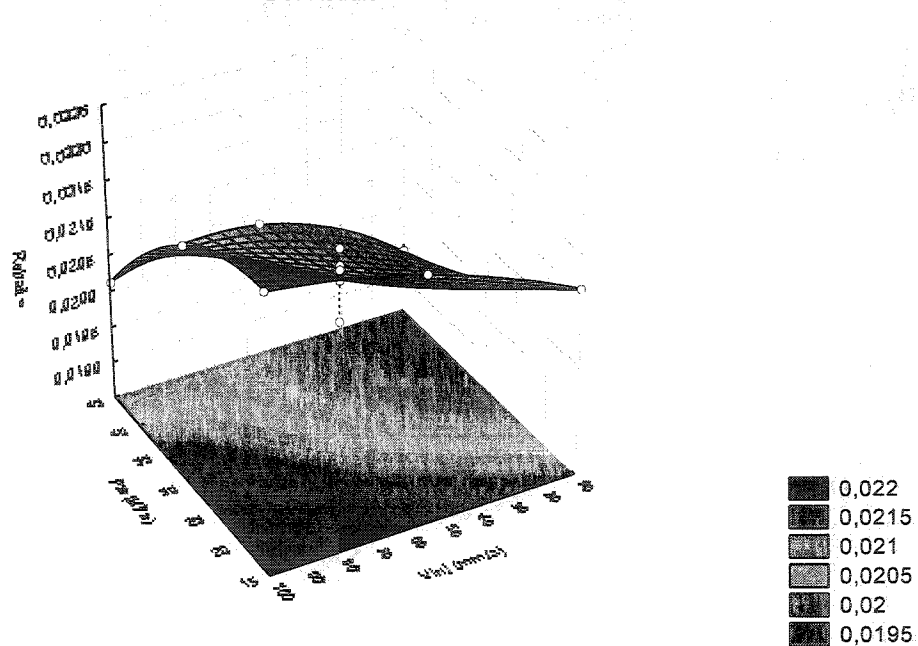


Figure B - 16: Surface de réponse montrant le retrait dans le sens de l'écoulement en fonction de la pression de maintien et de la vitesse d'injection pour la position I3

B.3.4 Analyse des résidus

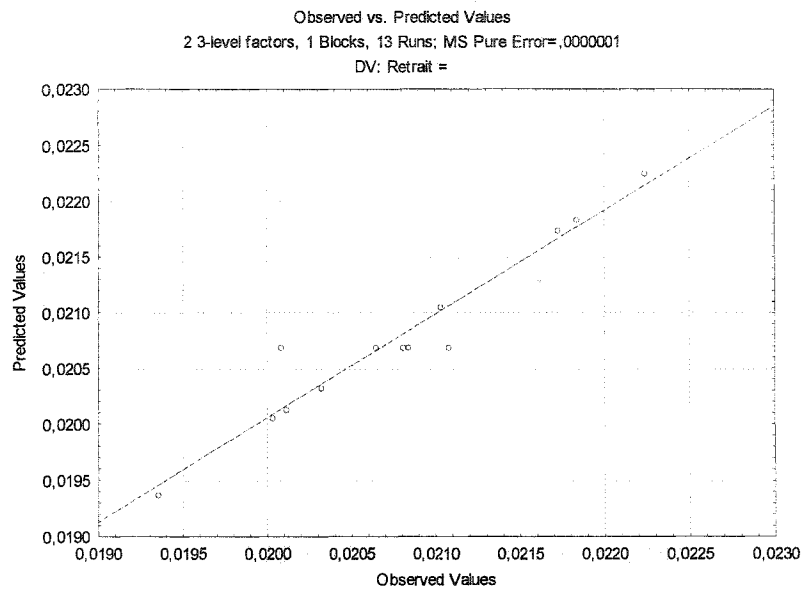


Figure B - 17: Valeurs prédites en fonction des valeurs observées pour le retrait dans le sens de l'écoulement en position I3.

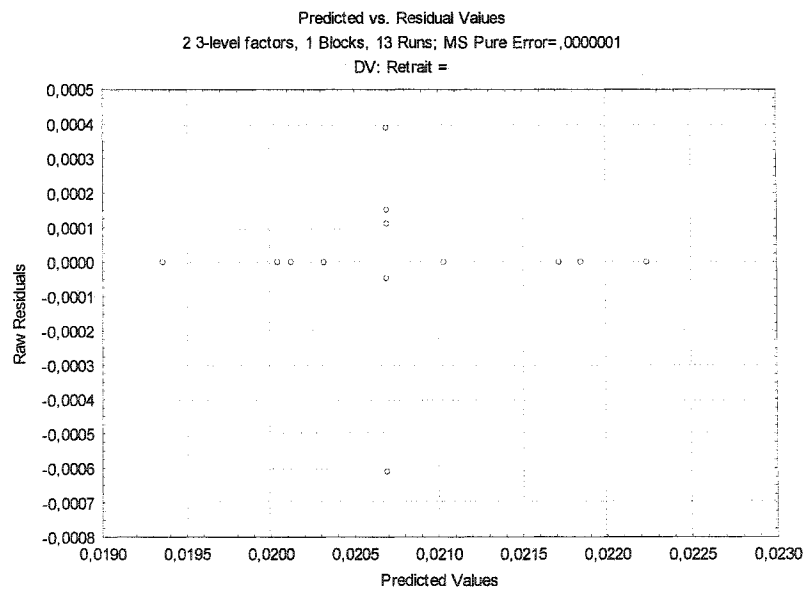


Figure B - 18: Résidus en fonction des valeurs prédites pour le retrait dans le sens de l'écoulement en position I3.

B.4 Retraits en position I3 dans le sens transverse

B.4.1 Effets estimés et diagramme de Pareto

Tableau B - 8: Effets estimés pour le retrait en I3 dans le sens transverse.

Factor	Effect Estimates; Var.:Retrait +; R-sqr=.9598; Adj.:.87939 (DonneDOEI) 2 3-level factors, 1 Blocks, 13 Runs; MS Pure Error=.0000005 DV: Retrait +									
	Effect	Std.Err. Pure Err	t(4)	p	-95.% Cnf.Limt	+95.% Cnf.Limt	Coeff.	Std.Err. Coeff.	-95.% Cnf.Limt	+95.% Cnf.Limt
Mean/Interc.	0.02978	0.00023	129.022	0.00000	0.02913	0.03042	0.02978	0.00023	0.02913	0.03042
(1)Pm (MPa)(L)	-0.00496	0.00059	-8.375	0.00111	-0.00660	-0.00332	-0.00248	0.00030	-0.00330	-0.00166
Pm (MPa)(Q)	-0.00075	0.00047	-1.623	0.17997	-0.00205	0.00054	-0.00038	0.00023	-0.00102	0.00027
(2)Vinj (mm/s)(L)	0.00027	0.00059	0.450	0.67583	-0.00138	0.00191	0.00013	0.00030	-0.00069	0.00096
Vinj (mm/s)(Q)	-0.00099	0.00047	-2.139	0.09922	-0.00229	0.00030	-0.00050	0.00023	-0.00114	0.00015
1L by 2L	0.00024	0.00073	0.331	0.75733	-0.00177	0.00225	0.00012	0.00036	-0.00089	0.00113
1L by 2Q	0.00222	0.00063	3.534	0.02414	0.00048	0.00396	0.00111	0.00031	0.00024	0.00198
1Q by 2L	0.00070	0.00063	1.114	0.32755	-0.00104	0.00244	0.00035	0.00031	-0.00052	0.00122
1Q by 2Q	0.00019	0.00044	0.431	0.68901	-0.00102	0.00140	0.00009	0.00022	-0.00051	0.00070

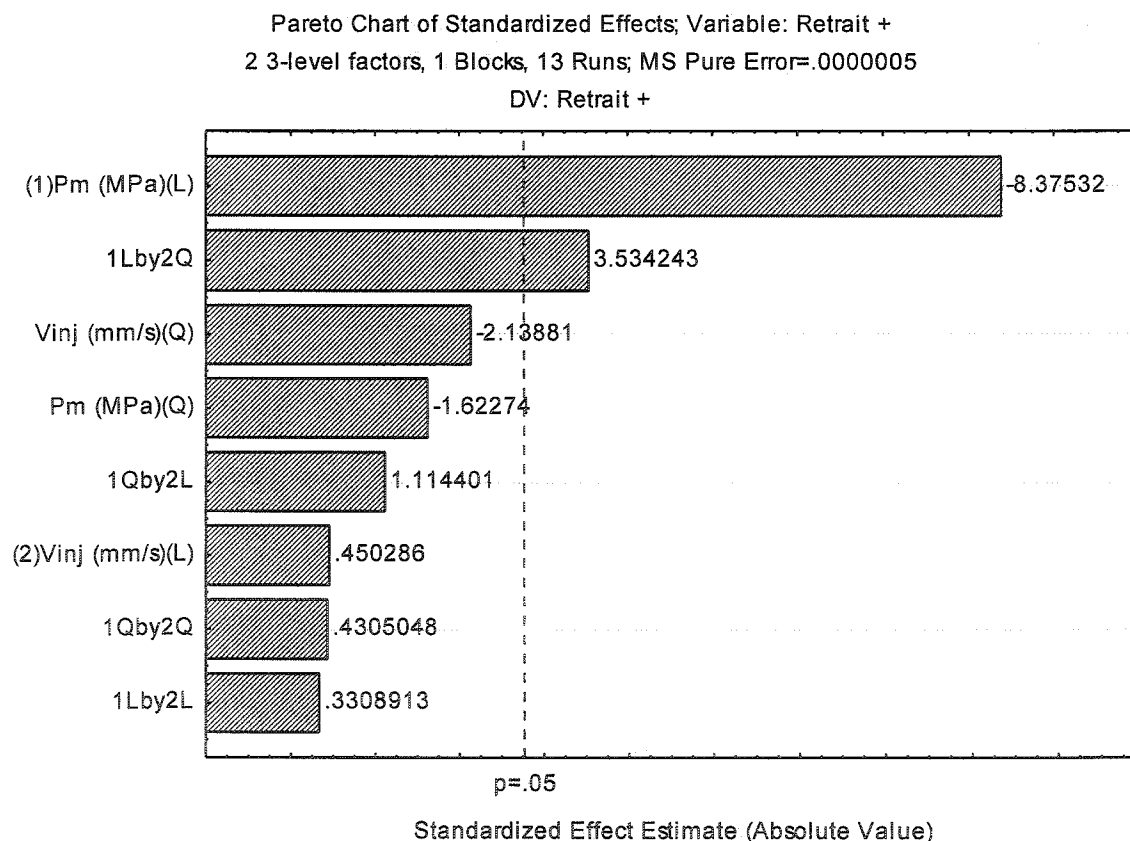


Figure B - 19: Diagramme de Pareto pour le retrait en I3 dans le sens transverse.

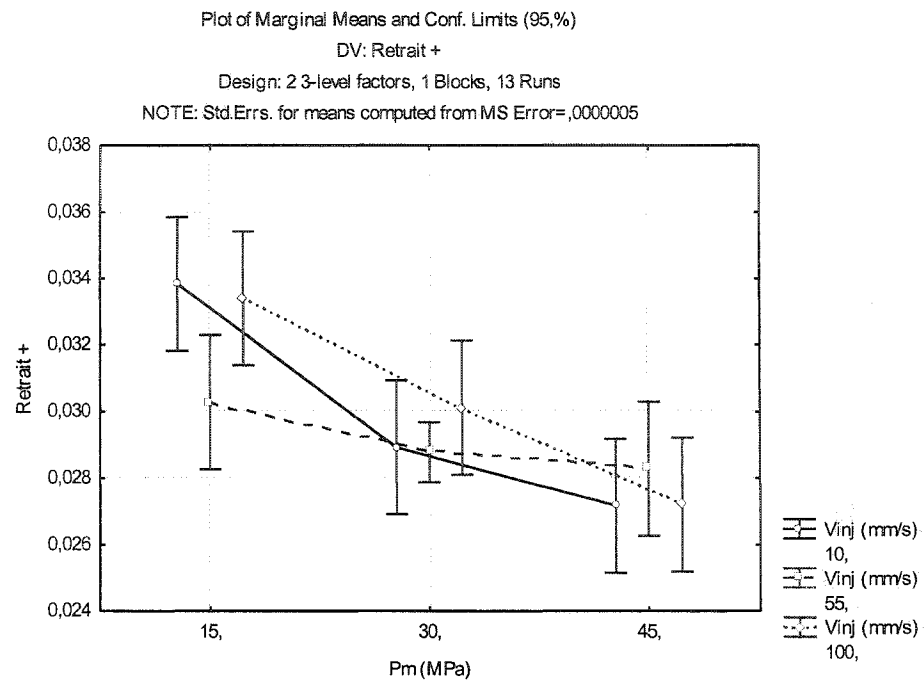


Figure B - 20: Effets principaux de la vitesse d'injection en I3 pour le retrait dans le sens transverse.

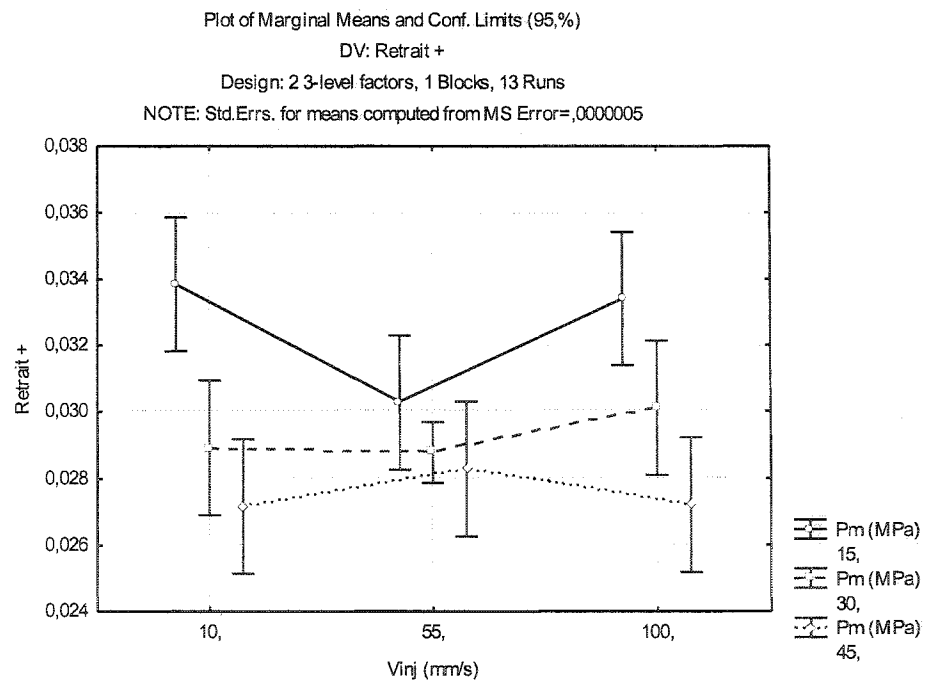


Figure B - 21: Effets principaux de la pression de maintien en I3 pour le retrait dans le sens transvers.

B.4.2 Analyse de la variance

Tableau B - 9: Tableau d'analyse de la variance en I3 pour le retrait dans le sens transverse.

ANOVA; Var.:Retrait +; R-sqr=.9598; Adj.:.87939 (DonneDOEI) 2 3-level factors, 1 Blocks, 13 Runs; MS Pure Error=.0000005 DV: Retrait +					
Factor	SS	df	MS	F	p
(1)Pm (MPa)(L)	0.000037	1	0.000037	70.14599	0.001112
Pm (MPa)(Q)	0.000001	1	0.000001	2.63329	0.179965
(2)Vinj (mm/s)(L)	0.000000	1	0.000000	0.20276	0.675831
Vinj (mm/s)(Q)	0.000002	1	0.000002	4.57451	0.099220
1L by 2L	0.000000	1	0.000000	0.10949	0.757334
1L by 2Q	0.000007	1	0.000007	12.49088	0.024138
1Q by 2L	0.000001	1	0.000001	1.24189	0.327547
1Q by 2Q	0.000000	1	0.000000	0.18533	0.689010
Pure Error	0.000002	4	0.000001		
Total SS	0.000052	12			

B.4.3 Surface de réponse

Fitted Surface; Variable: Retrait +
2 3-level factors, 1 Blocks, 13 Runs; MS Pure Error=.0000005
DV: Retrait +

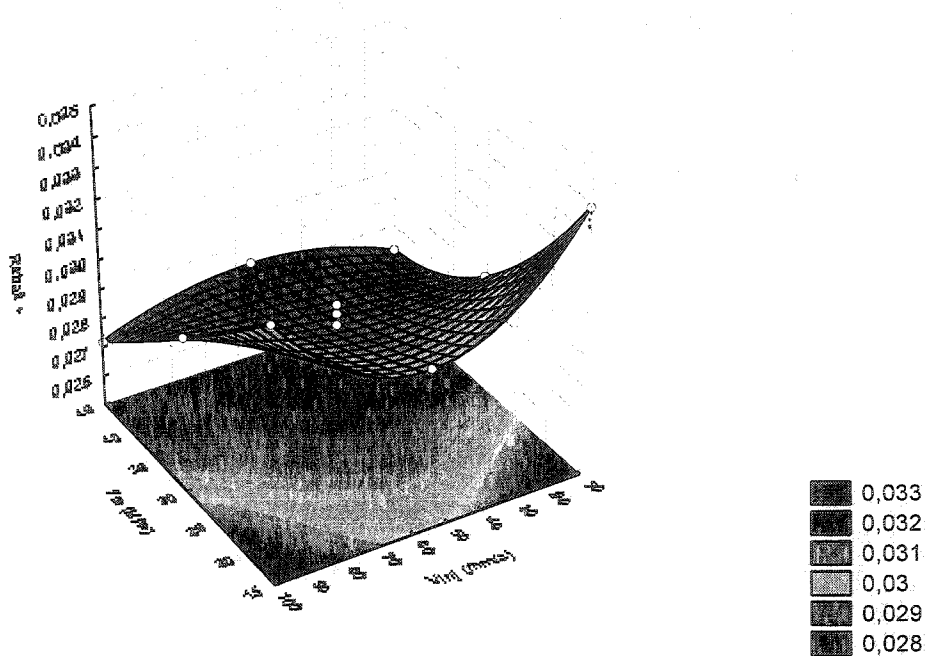


Figure B - 22: Surface de réponse montrant le retrait dans le sens transverse en fonction de la pression de maintien et de la vitesse d'injection pour la position I3

B.4.4 Analyse des résidus

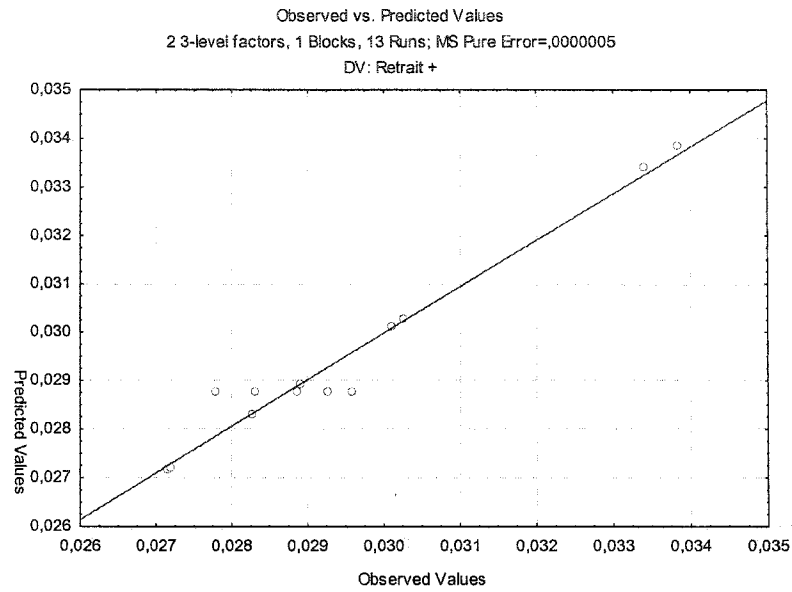


Figure B - 23: Valeurs prédites en fonction des valeurs observées pour le retrait dans le sens transverse en position I3.

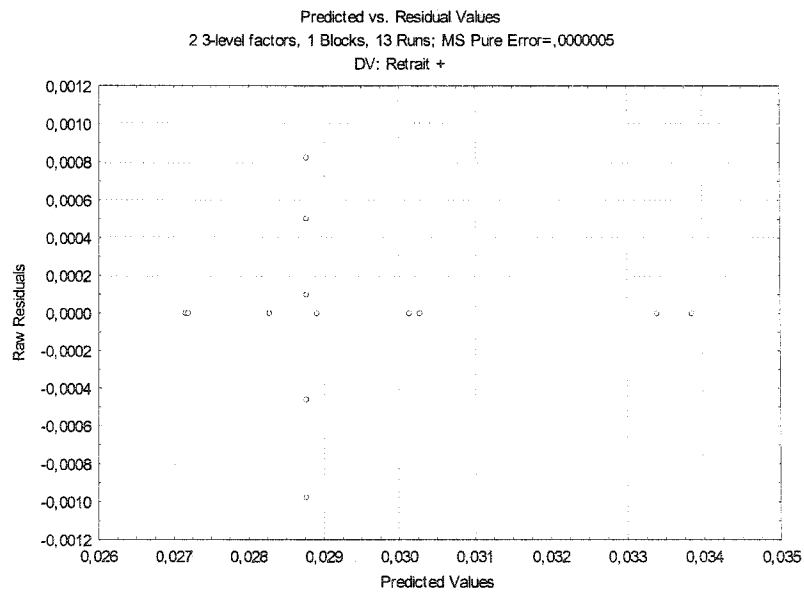


Figure B - 24: Résidus en fonction des valeurs prédites pour le retrait dans le sens transverse en position I3.

B.5 Retraits en position O3 dans le sens de l'écoulement

B.5.1 Effets estimés et diagramme de Pareto

Tableau B - 10: Effets estimés pour le retrait en O3 dans le sens de l'écoulement.

Effect Estimates; Var.:Retrait =; R-sqr=.97407; Adj.:92222 (DonneDOEO.sta)										
2 3-level factors, 1 Blocks, 13 Runs; MS Pure Error=.0000001										
DV: Retrait =										
Factor	Effect	Std.Err. Pure Err	t(4)	p	-95,% Cnf.Limt	+95,% Cnf.Limt	Coeff.	Std.Err. Coeff.	-95,% Cnf.Limt	+95,% Cnf.Limt
Mean/Interc.	0,020621	0,000092	223,1963	0,000000	0,020365	0,020878	0,020621	0,000092	0,020365	0,020878
(1)Pm (MPa)(L)	-0,002507	0,000237	-10,5725	0,000453	-0,003165	-0,001848	-0,001253	0,000119	-0,001582	-0,000924
Pm (MPa)(Q)	-0,000176	0,000186	-0,9453	0,398034	-0,000693	0,000341	-0,000088	0,000093	-0,000346	0,000170
(2)Vinj (mm/s)(L)	0,000973	0,000237	4,1053	0,014789	0,000315	0,001632	0,000487	0,000119	0,000158	0,000816
Vinj (mm/s)(Q)	-0,000076	0,000186	-0,4082	0,704035	-0,000593	0,000441	-0,000038	0,000093	-0,000296	0,000220
1L by 2L	0,000680	0,000290	2,3418	0,079225	-0,000126	0,001486	0,000340	0,000145	-0,000063	0,000743
1L by 2Q	0,000680	0,000251	2,7040	0,053869	-0,000018	0,001378	0,000340	0,000126	-0,000009	0,000689
1Q by 2L	0,000080	0,000251	0,3181	0,766309	-0,000618	0,000778	0,000040	0,000126	-0,000309	0,000389
1Q by 2Q	-0,000294	0,000175	-1,6816	0,167935	-0,000779	0,000191	-0,000147	0,000087	-0,000390	0,000096

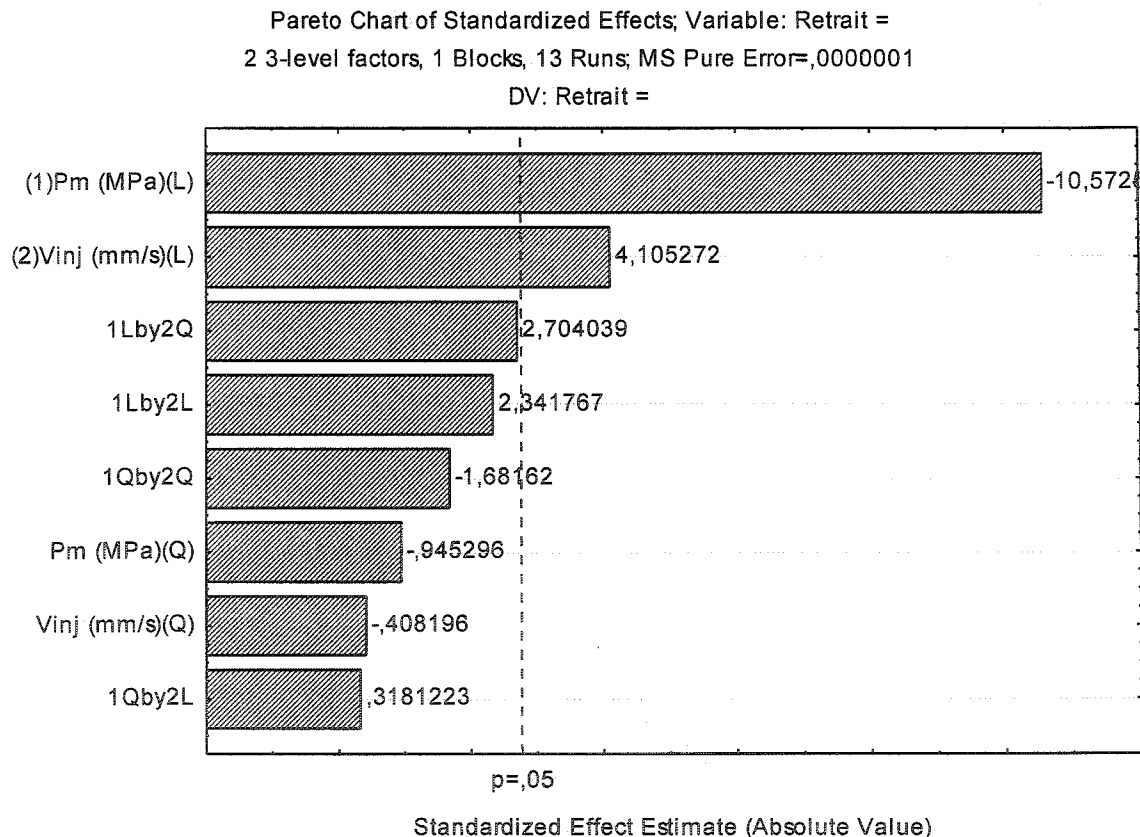


Figure B - 25: Diagramme de Pareto pour le retrait en O3 dans le sens de l'écoulement.

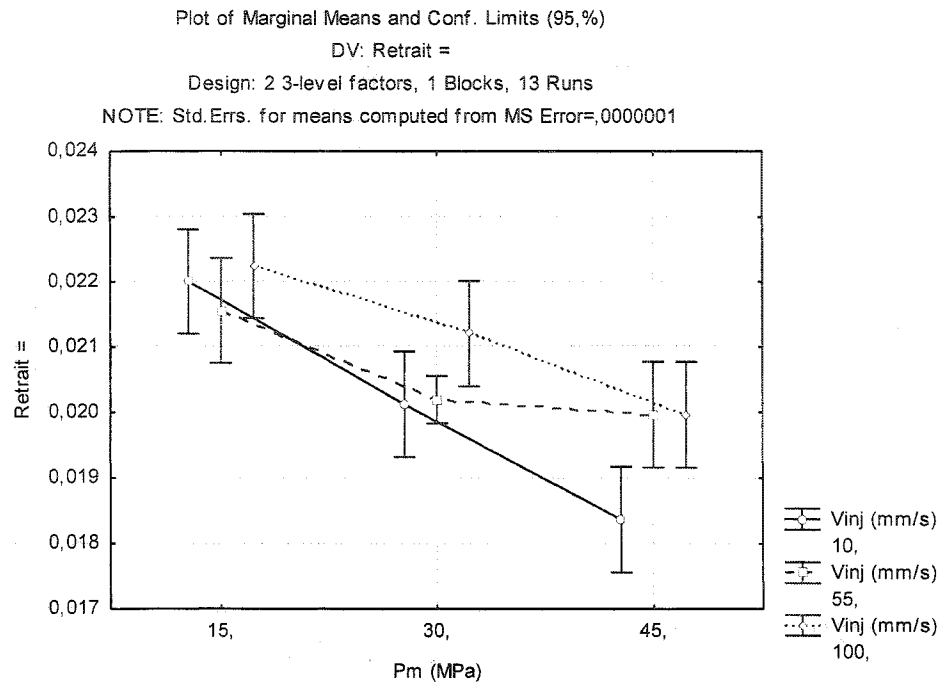


Figure B - 26: Effets principaux de la vitesse d'injection en O3 pour le retrait dans le sens de l'écoulement.

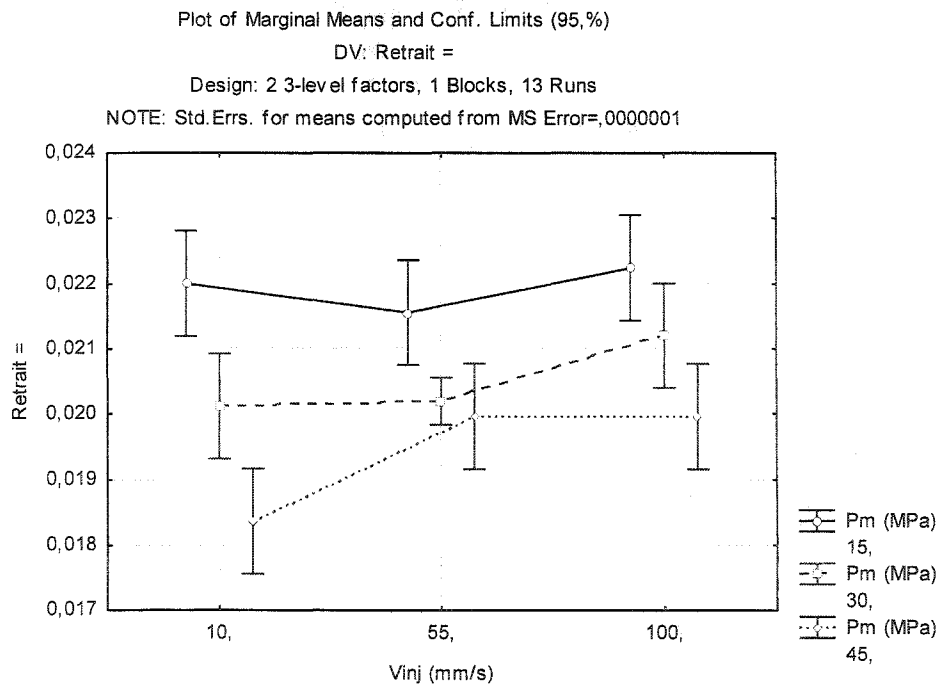


Figure B - 27: Effets principaux de la pression de maintien en O3 pour le retrait dans le sens de l'écoulement.

B.5.2 Analyse de la variance

Tableau B - 11: Tableau d'analyse de la variance en O3 pour le retrait dans le sens de l'écoulement.

ANOVA; Var.:Retrait =; R-sqr=,97407; Adj:,92222 (DonneDOEO.sta) 2 3-level factors, 1 Blocks, 13 Runs; MS Pure Error=,0000001 DV: Retrait =					
Factor	SS	df	MS	F	p
(1)Pm (MPa)(L)	0,000009	1	0,000009	111,7774	0,000453
Pm (MPa)(Q)	0,000000	1	0,000000	0,8936	0,398034
(2)Vinj (mm/s)(L)	0,000001	1	0,000001	16,8533	0,014789
Vinj (mm/s)(Q)	0,000000	1	0,000000	0,1666	0,704035
1L by 2L	0,000000	1	0,000000	5,4839	0,079225
1L by 2Q	0,000001	1	0,000001	7,3118	0,053869
1Q by 2L	0,000000	1	0,000000	0,1012	0,766309
1Q by 2Q	0,000000	1	0,000000	2,8278	0,167935
Pure Error	0,000000	4	0,000000		
Total SS	0,000013	12			

B.5.3 Surface de réponse

Fitted Surface; Variable: Retrait =
2 3-level factors, 1 Blocks, 13 Runs; MS Pure Error=,0000001
DV: Retrait =

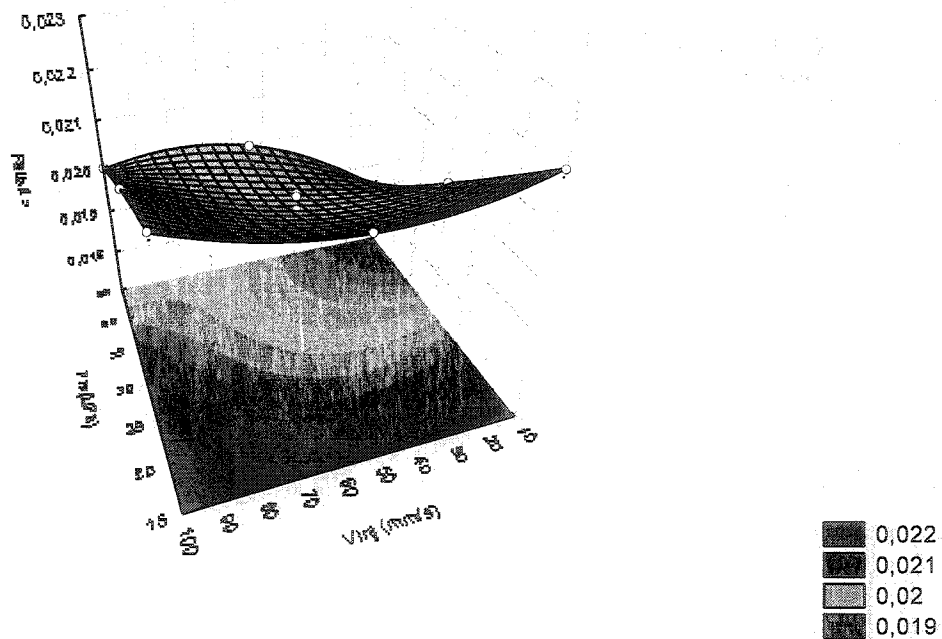


Figure B - 28: Surface de réponse montrant le retrait dans le sens de l'écoulement en fonction de la pression de maintien et de la vitesse d'injection pour la position O3

B.5.4 Analyse des résidus

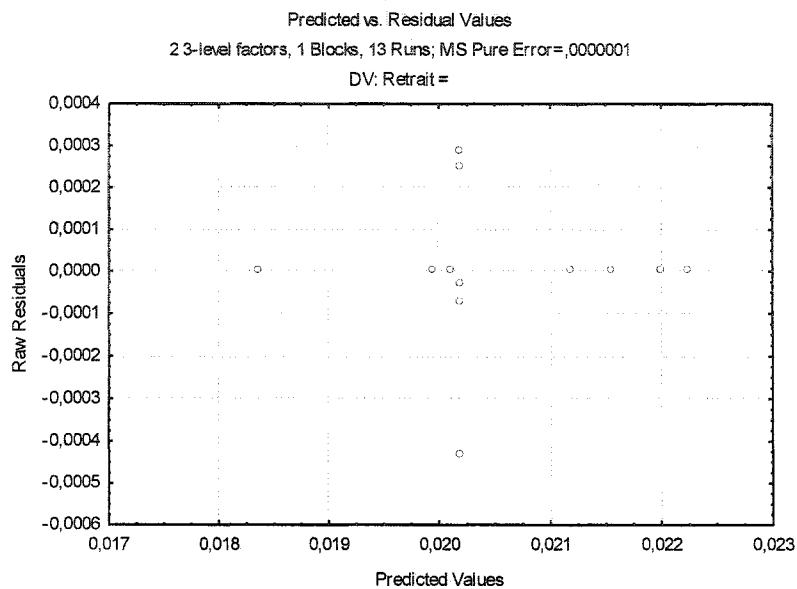


Figure B - 29: Valeurs prédites en fonction des valeurs observées pour le retrait dans le sens de l'écoulement en position O3.

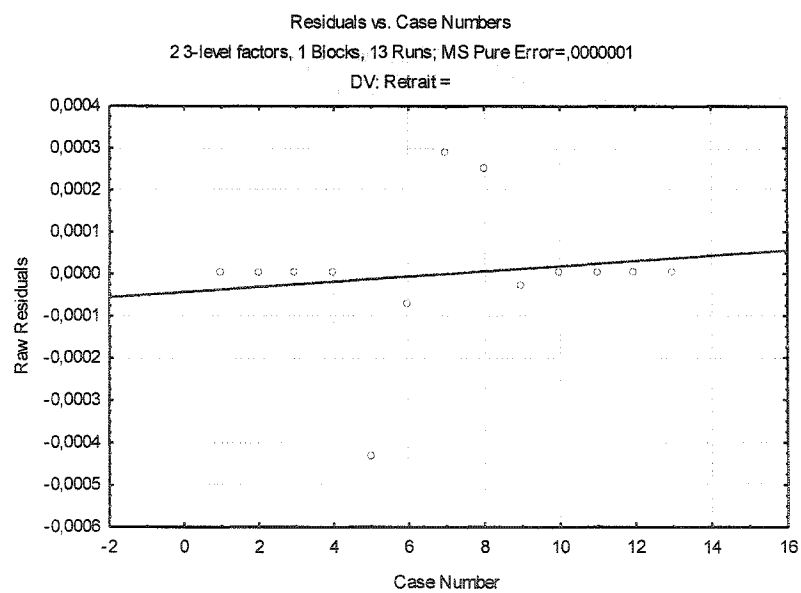


Figure B - 30: Résidus en fonction des valeurs prédites pour le retrait dans le sens de l'écoulement en position O3.

B.6 Retraits en position O3 dans le sens transverse

B.6.1 Effets estimés et diagramme de Pareto

Tableau B - 12: Effets estimés pour le retrait en O3 dans le sens transverse.

Effect Estimates; Var.:Retrait +; R-sqr=.9635; Adj.:89051 (DonneDOEO.sta) 2 3-level factors, 1 Blocks, 13 Runs; MS Pure Error=.0000004 DV: Retrait +										
Factor	Effect	Std.Err. Pure Err	t(4)	p	-95,% Cnf.Limt	+95,% Cnf.Limt	Coeff.	Std.Err. Coeff.	-95,% Cnf.Limt	+95,% Cnf.Limt
Mean/Interc.	0,029011	0,000209	139,0332	0,000000	0,028431	0,029590	0,029011	0,000209	0,028431	0,029590
(1)Pm (MPa)(L)	-0,004493	0,000535	-8,3915	0,001103	-0,005980	-0,003007	-0,002247	0,000268	-0,002990	-0,001503
Pm (MPa)(Q)	-0,000508	0,000420	-1,2081	0,293541	-0,001675	0,000659	-0,000254	0,000210	-0,000838	0,000330
(2)Vinj (mm/s)(L)	-0,001467	0,000535	-2,7391	0,051955	-0,002953	0,000020	-0,000733	0,000268	-0,001477	0,000010
Vinj (mm/s)(Q)	-0,001488	0,000420	-3,5387	0,024041	-0,002655	-0,000321	-0,000744	0,000210	-0,001328	-0,000160
1L by 2L	0,000800	0,000656	1,2199	0,289516	-0,001021	0,002621	0,000400	0,000328	-0,000510	0,001310
1L by 2Q	0,001360	0,000568	2,3946	0,074793	-0,000217	0,002937	0,000680	0,000284	-0,000108	0,001468
1Q by 2L	0,000260	0,000568	0,4578	0,670866	-0,001317	0,001837	0,000130	0,000284	-0,000658	0,000918
1Q by 2Q	0,000198	0,000395	0,5015	0,642389	-0,000898	0,001294	0,000099	0,000197	-0,000449	0,000647

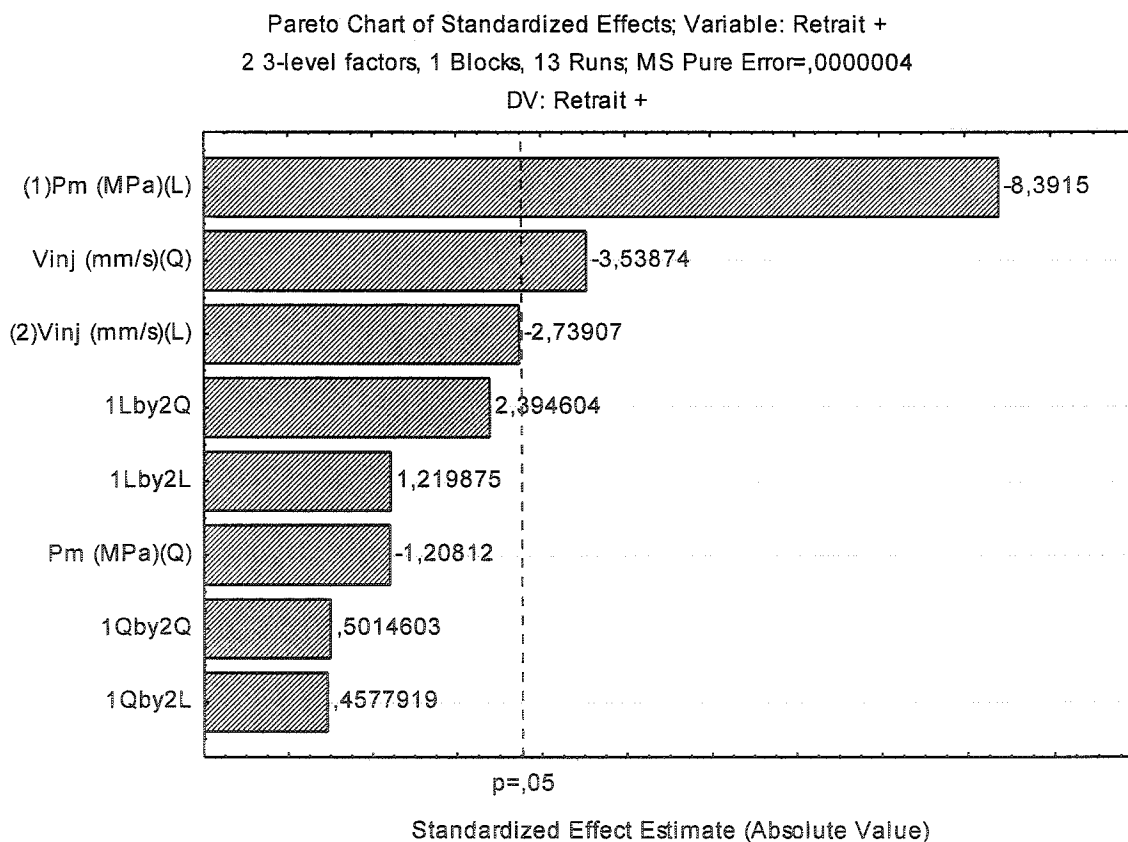


Figure B - 31: Diagramme de Pareto pour le retrait en O3 dans le sens transverse.

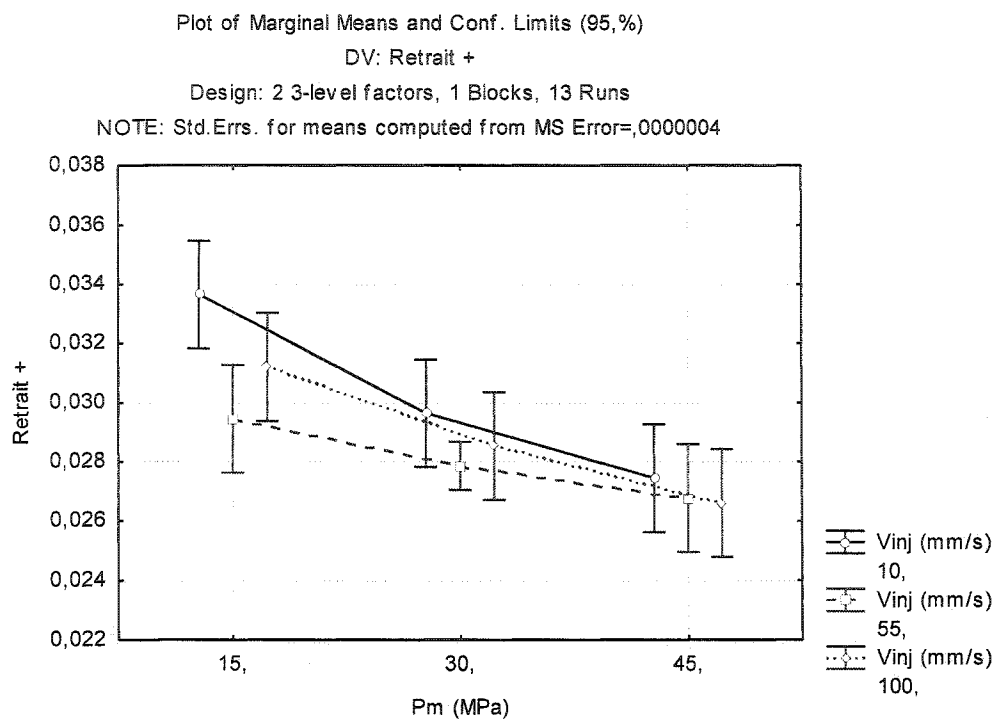


Figure B - 32: Effets principaux de la vitesse d'injection en O3 pour le retrait dans le sens transverse.

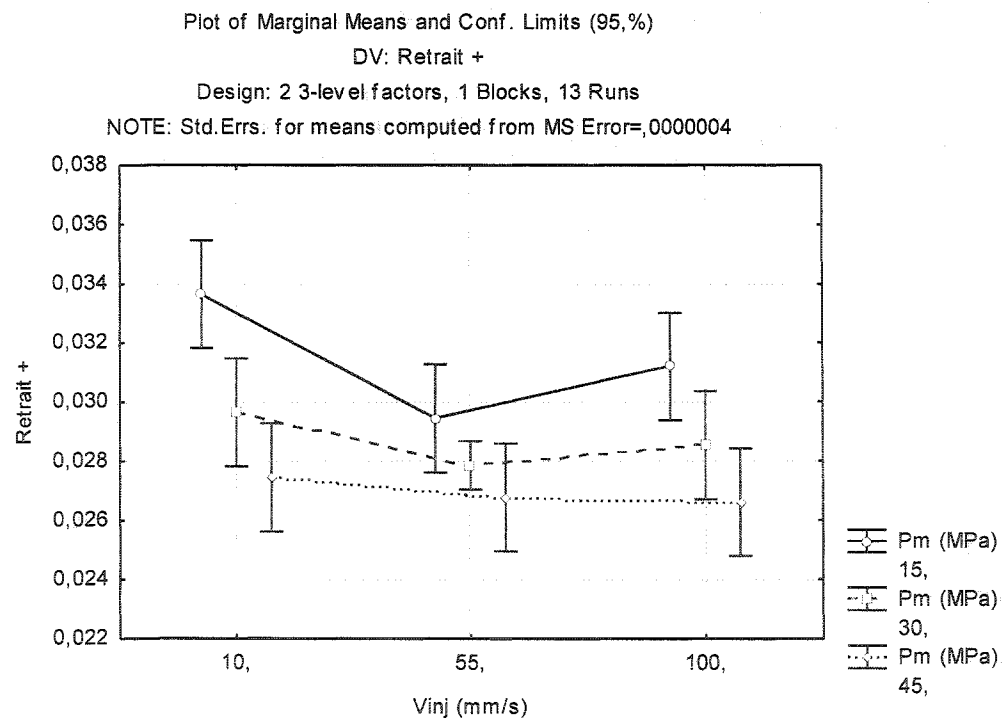


Figure B - 33: Effets principaux de la pression de maintien en O3 pour le retrait dans le sens de transverse.

B.6.2 Analyse de la variance

Tableau B - 13: Tableau d'analyse de la variance en O3 pour le retrait dans le sens transverse.

ANOVA; Var.:Retrait +; R-sqr=,9635; Adj.:89051 (DonneDOEO.sta) 2 3-level factors, 1 Blocks, 13 Runs; MS Pure Error=,0000004 DV: Retrait +					
Factor	SS	df	MS	F	p
(1)Pm (MPa)(L)	0,000030	1	0,000030	70,41729	0,001103
Pm (MPa)(Q)	0,000001	1	0,000001	1,45955	0,293541
(2)Vinj (mm/s)(L)	0,000003	1	0,000003	7,50248	0,051955
Vinj (mm/s)(Q)	0,000005	1	0,000005	12,52268	0,024041
1L by 2L	0,000001	1	0,000001	1,48810	0,289516
1L by 2Q	0,000002	1	0,000002	5,73413	0,074793
1Q by 2L	0,000000	1	0,000000	0,20957	0,670866
1Q by 2Q	0,000000	1	0,000000	0,25146	0,642389
Pure Error	0,000002	4	0,000000		
Total SS	0,000047	12			

B.6.3 Surface de réponse

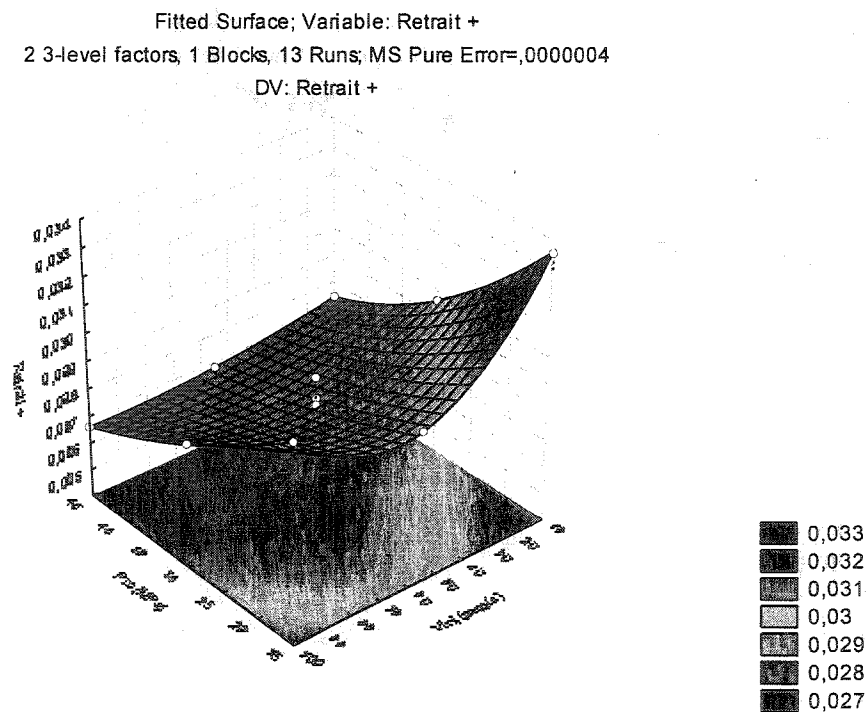


Figure B - 34: Surface de réponse montrant le retrait dans le sens transverse en fonction de la pression de maintien et de la vitesse d'injection pour la position O3.

B.6.4 Analyse des résidus

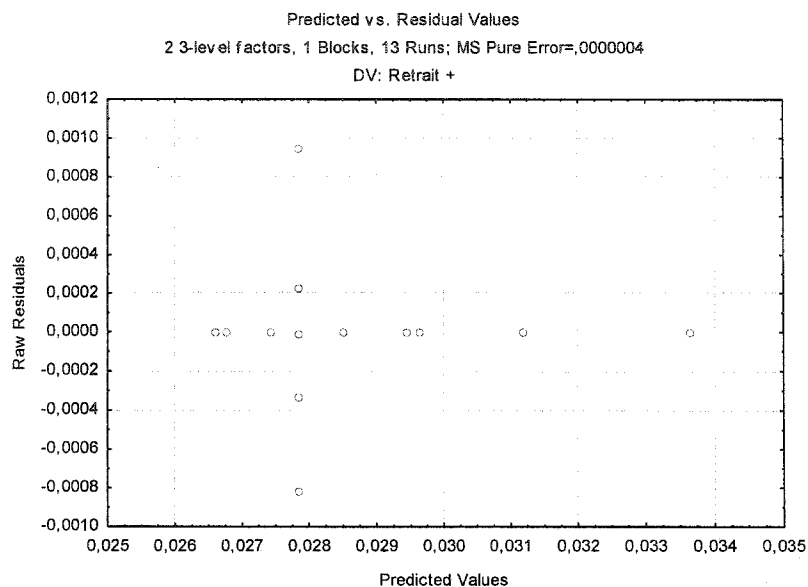


Figure B - 35: Valeurs prédites en fonction des valeurs observées pour le retrait dans le sens transverse en position O3.

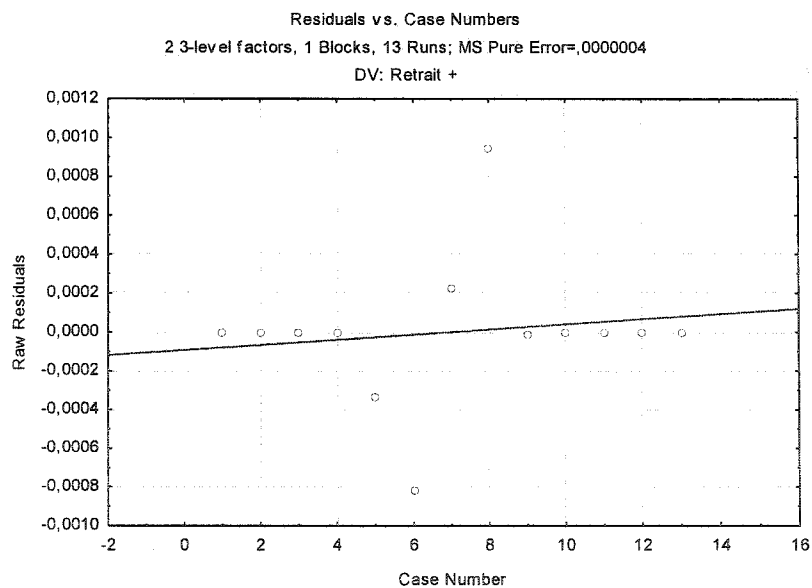


Figure B - 36: Résidus en fonction des valeurs prédites pour le retrait dans le sens transverse en position O3.