

ÉCOLE NATIONALE SUPÉRIEURE DES MINES DE PARIS

Centre de Mise en Forme des Matériaux

Mémoire de DEA 1993-94

ÉTUDE DES INSTABILITÉS D'INTERFACE
DU PROCÉDÉ DE COEXTRUSION

présenté par: Pierre CARRIER

Tuteurs:

M. Yves DEMAY, Doctorat d'État
M. Bruno VERGNES, Doctorat d'État
M. André FORTIN, Ph.D.

juin 1994

RÉSUMÉ

Une étude expérimentale et numérique du procédé de coextrusion est abordée dans ce mémoire. On trouve essentiellement les étapes de la conception d'une filière de coextrusion comportant un hublot permettant d'observer l'écoulement en continu. L'expérience est menée avec cette filière afin d'observer des instabilités à l'interface polymère-polymère. Les deux polymères coextrudés sont du polypropylène (PP) et du polyéthylène basse densité linéaire (PEBDL). Par contre, aucune instabilité n'a été observée à l'interface. Une étude de l'écoulement stationnaire a donc été menée par biréfringence. Une comparaison entre l'expérience et l'analyse numérique est effectuée en rapport avec la position de l'interface, fonction de la rhéologie et des débits et aussi en fonction des courbes de biréfringence reliées à la différence des contraintes principales.

MOTS CLEFS:

Coextrusion, Surfaces libres, Fluides newtoniens généralisés, Écoulement multi-couches.

ABSTRACT

An experimental and numerical study of the coextrusion process is made in this work. First, one find the stages to design a flat die which gives a good repartition of a polymer. The flow is observed by mean of a window on each sides of the flat die. The goal is to find instabilities at the interface. Two polymers are used: a PolyPropylene (PP) and a Linear Low Density PolyEtylene (LLDPE). No instabilities has been observed. Consequently, a study of the steady flow is made using birefringence apparatus. A comparison with a numerical simulation is made, using the same rheological properties and flow rates. The physical properties under study are the interface position and the principal strain difference, related to the interference fringes observed experimentaly.

KEY WORDS:

Coextrusion, Free Surfaces, Generalized Newtonian Fluids, Stratified Flow

SOMMAIRE

RÉSUMÉ	i
ABSTRACT	i
INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1 Design de la filière de coextrusion	2
1.1 Débits des extrudeuses	2
1.2 Forme du canal de répartition	2
1.3 Dimensions générales	5
1.4 Usinage	5
CHAPITRE 2 Expérimentation	9
2.1 Schéma de l'outillage	9
2.2 Rhéologie des polymères	10
2.3 Agenda de l'expérience	11
CHAPITRE 3 Résultats	14
3.1 Biréfringence	14
3.1.1 Phénomène	14
3.1.2 Photographies et analyse	15
3.2 Analyse numérique	17
CONCLUSION	22
BIBLIOGRAPHIE	24
ANNEXE	25

INTRODUCTION

Le procédé de coextrusion est étudié dans ce mémoire. Ce procédé consiste à faire converger plusieurs polymères débités par autant d'extrudeuses à l'intérieur d'une filière commune. On obtient ainsi un film multi-couches avec certaines propriétés physiques et mécaniques selon la combinaison choisie. En industrie on conçoit certains films en combinant plus de sept polymères. Dans cette étude des instabilités aux interfaces, seulement deux polymères sont extrudés, puisqu'on s'intéresse au mouvement et aux conditions provoquant des instabilités d'interface.

Il s'agit donc de concevoir une filière assurant une répartition uniforme des polymères. Cette répartition est directement liée à la géométrie de la filière dont la forme est en porte-manteau. On décrit au premier chapitre le design de la filière suivi d'une description de l'outillage utilisé.

Puis, à l'aide des résultats des publications sur le sujet (voir la revue bibliographique [Carrier 1994]), on se propose d'étudier l'écoulement à l'intérieur de la filière de coextrusion. Ces auteurs affirment que les principales causes d'instabilités aux interfaces sont les rapports de viscosité et de débit. On est donc amené à faire varier ces paramètres afin d'observer les conditions d'instabilité. Le rapport de viscosité est bien sûr plus difficile à faire varier que le rapport de débit. Une fenêtre dans la filière permet d'observer en continue cette interface qu'on analyse par biréfringence.

Le dernier chapitre discute des résultats obtenus. L'étude expérimentale par biréfringence a permis de comparer les résultats avec une simulation numérique, qu'on expose en dernier lieu.

CHAPITRE 1

Design de la filière de coextrusion

Avant l'usinage de la filière de coextrusion, une détermination des courbes débit-pression était nécessaire afin d'assurer une solidité et une étanchéité de la pièce. Connaissant ces courbes, il a été possible de déterminer une forme optimale du canal de répartition dans la filière en forme de porte-manteau. On donne ici la méthode de calcul permettant de maximiser la répartition des fluides. On décrit ensuite les dimensions générales de la filière ainsi que certains plans dessinés par Francis FOURNIER.

1.1 Débits des extrudeuses

Les deux extrudeuses utilisées sont la "Haake Rheocord" et la "Kaufman". L'extrudeuse "Haake" possède une vis de 25,4mm de diamètre et la "Kaufman" en possède une de 40mm. La courbe de débit-pression de l'extrudeuse "Kaufman" a été fournie par [Ronot 1993] et celle de la "Haake Rheocord" a été mesurée avec l'aide de Christian PEITI. Les débits sont mesurés au travers d'une filière de jonc. Des tests de débits-pression ont été effectués avec du polyéthylène basse densité, du polyéthylène basse densité linéaire et du polyéthylène haute densité afin de déterminer des polymères potentiellement utilisables. Il s'est avéré que les deux premiers polymères utilisés sur l'extrudeuse "Haake" fournissent des pressions constantes en sortie de filière tandis que pour le dernier, la pression oscille.

La figure 1.1 et le tableau 1.1 illustrent ces résultats pour le polyéthylène basse densité. On remarque que l'extrudeuse "Kaufman" possède des débits potentiels beaucoup plus élevés que ceux de l'extrudeuse "Haake Rheocord". Il sera facile de considérer des rapports de débit élevé mais difficilement des débits simultanément élevés ou faibles.

À partir de ces données, il a été possible de déterminer une forme optimale de la filière, ce qu'on expose ici.

1.2 Forme du canal de répartition

Considérons une filière en porte manteau illustrée à la figure 1.2 [Tadmor Gogos]. $R(x)$ correspond au canal de répartition, donc une zone creuse (de hauteur H) par rapport au reste de la filière. L'objectif ultime est d'obtenir une répartition uniforme le long de la filière, c'est-à-dire un débit constant en $z = 0$. Pour ce faire, il s'agit de déterminer la forme de la fonction $R(x)$ qui permettra d'uniformiser l'écoulement. Soit l l'axe curviligne dans le creuset d'épaisseur $R(x)$. On suppose que la pression d'entrée et la température sont constantes. L'équation permettant de déterminer le design optimal est [Tadmor Gogos]:

$$\frac{d}{dl}P = a \frac{d}{dl}L \quad (1.1)$$

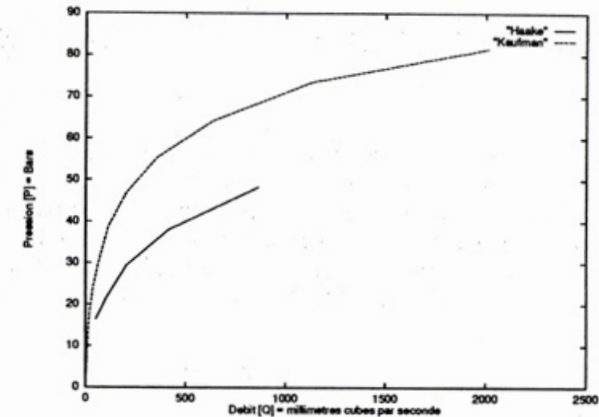


Figure 1.1 Courbe débit-pression des deux extrudeuses (PEBD à 175°C)

Débits [Q] = mm ³ /s	Pression "Haake" [P] = Bars	Pression "Kaufman" [P]=Bars
2.01	-	3.25
3.58	-	5.04
6.35	-	8.43
11.30	-	13.55
20.11	-	18.40
35.79	-	24.15
50.00	16.38	-
63.54	-	30.05
103.00	21.56	-
113.00	-	38.70
201.62	-	46.75
203.30	29.32	-
357.89	-	55.40
413.60	37.95	-
635.36	-	64.25
863.30	48.30	-
1129.97	-	73.50
2010.62	-	81.45

Tableau 1.1 Débits-pression des deux extrudeuses (PEBD à 175°C)

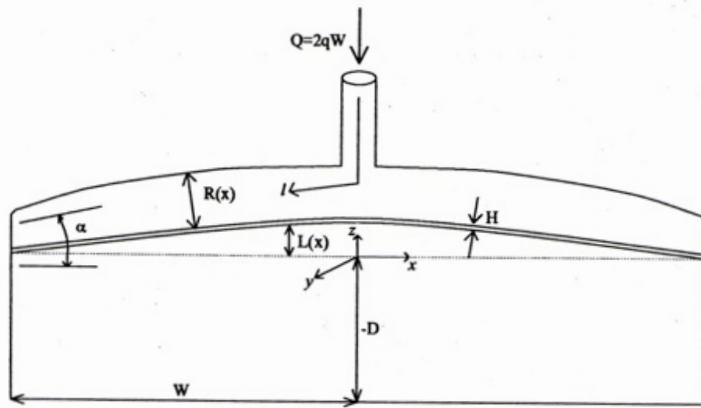


Figure 1.2 La filière

avec $P(l)$ la pression en l , P_0 la pression d'entrée en $x = 0 (= l)$. Cette équation est vérifiée pour toutes rhéologies des fluides. On considère maintenant que les fluides sont visco-plastiques avec loi de puissance:

$$\tau_{yz} = -m \left| \frac{d}{dy} v_z \right|^{n-1} \frac{d}{dy} v_z \quad (1.2)$$

où m est la consistance et n l'indice de pseudo-plasticité. La perte de charge a selon l'axe z vaut:

$$a = \frac{d}{dz} P = 2^{n+1} \left(2 + \frac{1}{n} \right)^n m \frac{q^n}{H^{2n+1}} \quad (1.3)$$

et la perte de charge suivant l'axe curviligne l est:

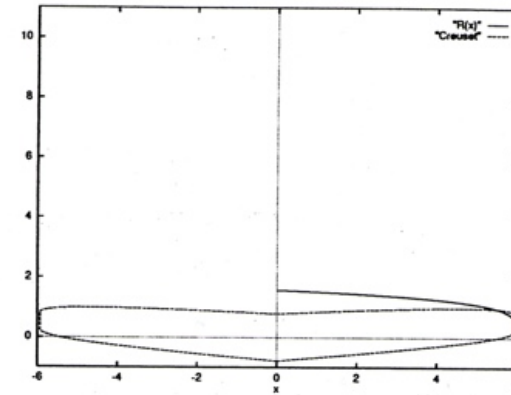
$$- \frac{d}{dl} P = \left(\frac{3 + \frac{1}{n}}{\pi} \right)^n 2m \frac{Q^n}{R(x)^{3n+1}} \quad (1.4)$$

où $Q = Q(l) = Q(x) = q(W - x)$, W étant la demi-largeur de la filière et q le débit volumique par unité de largeur. En substituant les équations (1.3) et (1.4) dans l'équation du design (1.1) on obtient la relation suivante:

$$R(x)^{3n+1} = \frac{\left(\frac{3 + \frac{1}{n}}{\pi} \right)^n H^{2n+1} (W - x)^n}{2^n \left(\frac{1}{n} + 2 \right)^n \left(\frac{d}{dl} L \right)} \quad (1.5)$$

Cette équation donnera la forme de la filière. Par la suite, pour simplifier les calculs, on suppose que l'axe l (curviligne) est une droite d'angle α par rapport à l'axe x . Ainsi,

$$\left(\frac{d}{dl} L \right) = -\sin(\alpha) \quad (1.6)$$

Figure 1.3 Courbe $R(x)$ et forme du creuset

1.3 Dimensions générales

Les paramètres déterminant le design sont n l'indice pseudo-plastique du modèle loi de puissance, H la demi-épaisseur, W la demi-largeur, m la consistance, α l'angle dans la filière, q le débit volumique par unité de largeur et P la pression. L'indice pseudo-plastique $n = 0.5$. L'épaisseur du film bi-couche est fixé à 1cm . H vaut donc 0.5cm . La largeur du film est fixée à 10cm . Le rapport géométrique (*aspect ratio*) vaut 10 correspondant à un écoulement bidimensionnel (voir la revue bibliographique [Carrier 1994]). La consistance est évaluée à $10000\text{Pa} \cdot \text{s}$. L'angle α est fixé arbitrairement à 5° comme proposé par [Tadmor Gogos]. Le débit massique a été estimée à 20kg/h . (La valeur mesurée sur l'extrudeuse "Haake" est de 3kg/h). La longueur de la filière $-D$ vaut 5cm .

Un programme simple a permis de déterminer une forme théorique du creuset par la fonction $R(x)$ (le programme est laissé en annexe). $R(x)$ correspond à la largeur du creuset. La solution est représentée à la figure 1.3. Les pertes de charge calculées selon l'axe z , $\frac{d}{dz} P = 7.70\text{Bars}$ et celle évaluée selon l'axe l $\frac{d}{dl} P = 0.81\text{Bars}$ sont assez faibles.

Usiner une pièce ayant ces caractéristiques curvilignes nécessite des coûts additionnels. Afin de simplifier l'usinage, le calcul s'est effectué sur une largeur de filière excédentaire: 11cm au lieu de 10cm . Si on retranche de chaque côté un-demi centimètre, on obtient un creuset dont les bords sont de forme linéaire et de largeur 10cm , donc facile à usiner. Le fait de combiner deux filières ajoute à la complexité. Une description sommaire des plans dessinés par Francis FOURNIER est donnée à la section suivante.

1.4 Usinage

L'allure générale de la filière est donnée à la page 8. Au centre, une pièce est constituée de deux filières en porte-manteau, une au-dessus et l'autre en-dessous. La figure 1.4 illustre

cette filière double et la figure 1.5 donne une vue de côté de cette même pièce. Cette double filière en porte-manteau est encastée entre deux plaques illustrées à la figure 1.6. Les polymères extrudés séparément en haut et en bas, se rejoignent en aval de la double filière centrale où une fenêtre permet de visualiser l'écoulement. À la fin du document, on retrouve l'ensemble des plans de la filière.

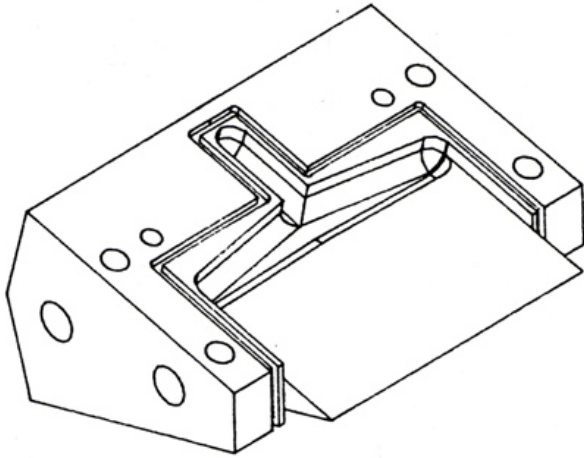


Figure 1.4 Schéma de la double filière centrale

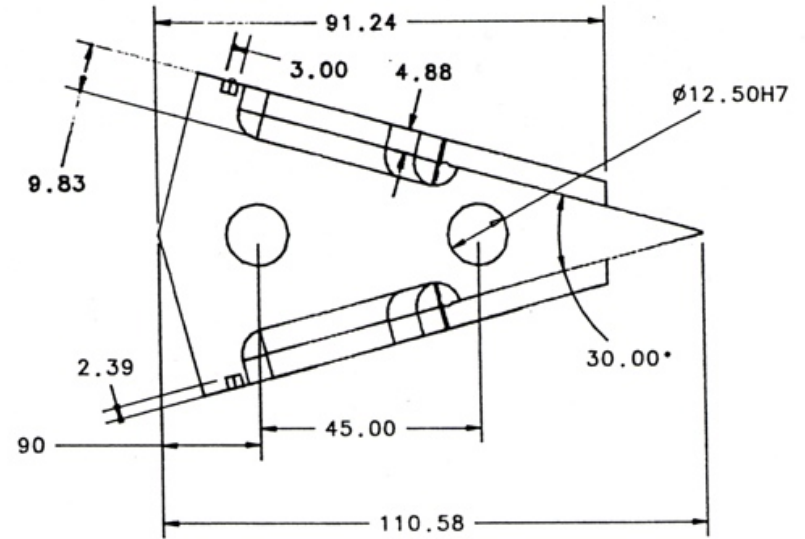


Figure 1.5 Vue de côté de la double filière centrale

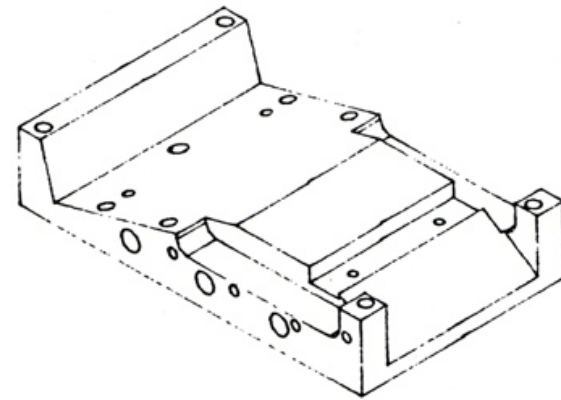
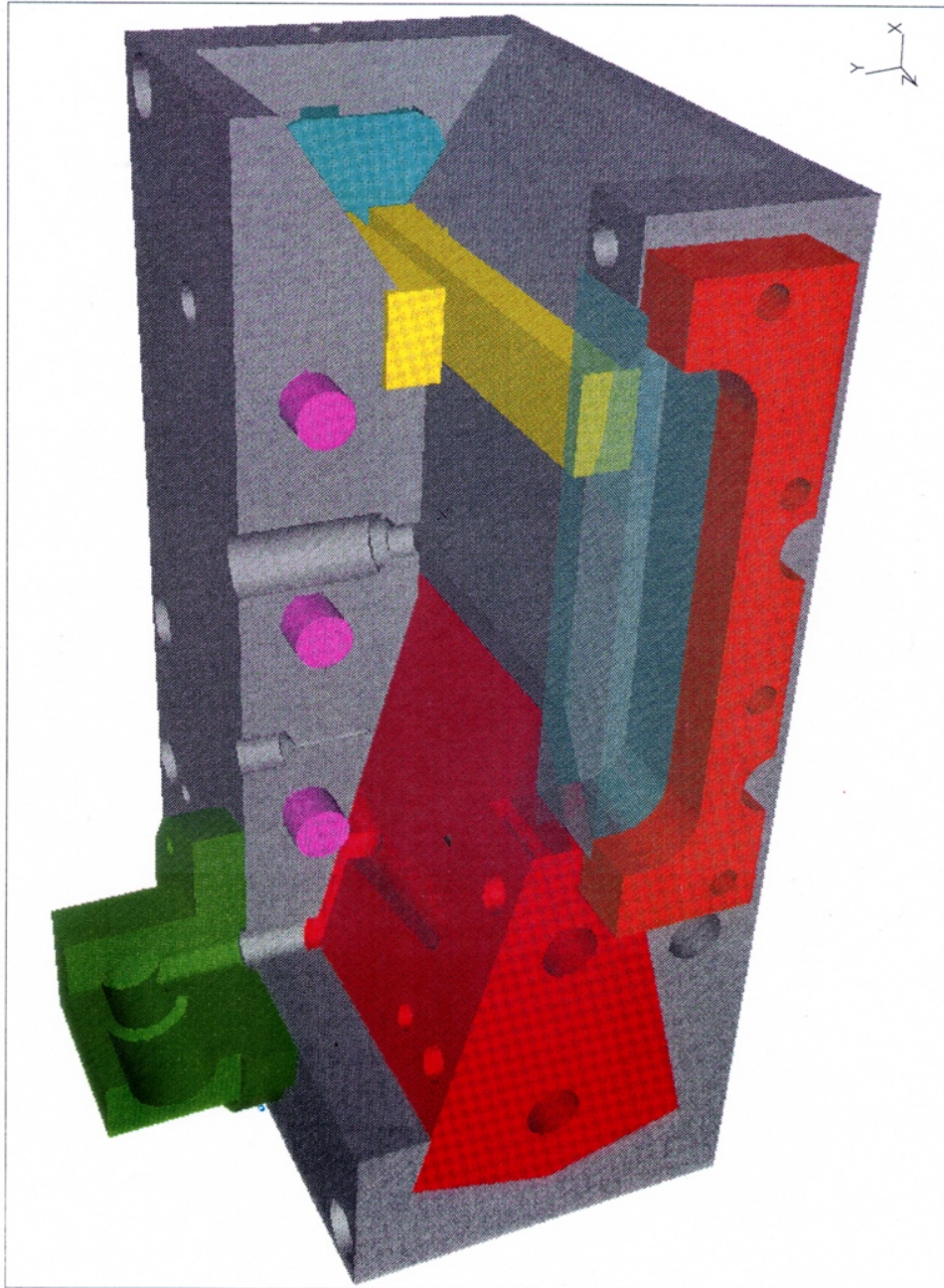


Figure 1.6 Plaque sous la pièce centrale



CHAPITRE 2

Expérimentation

2.1 Schéma de l'outillage

Deux extrudeuses de tailles différentes sont utilisées: l'extrudeuse "Haake" et l'extrudeuse "Kaufman". La première débite beaucoup plus lentement que la seconde, ce qui constitue la principale difficulté de l'expérience. La filière de coextrusion contient un hublot afin d'observer l'écoulement en continu. On donne ici une liste des appareils utilisés dans cette expérience:

- Extrudeuse "Haake".
- Extrudeuse "Kaufman" (la vis PE1022-VA2008 est instable avec le PP).
- Filière. Elle est constituée de 2 hublots et de 11 pièces métalliques: 2 serre-filières (plaque dessus et plaque dessous) qui contiennent 2 fers et 2 lèvres, 1 double filière (pièce coin) en porte-manteau, 2 brides et 2 platines qui joignent les extrudeuses à la filière. Des joints et jons de caoutchouc (2) assurent l'étanchéité. A la fin de ce mémoire, on retrouve les plans de la filière de coextrusion.
- 1 Thermocouple pour la régulation thermique de la filière chauffée par 8 cartouches chauffantes Vulstar 10166-6.
- 3 Capteur de pression Dynisco (1 fixé à la filière et 2 en sortie de chaque extrudeuse) et appareils de mesure de la pression et de la température: Kompensograph C1013 siemens, Bryans.
- Appareil de biréfringence, polariseurs avec quart d'onde (2).
- Caméra et caméscope.

Les figures 2.1 et 2.2 illustrent l'expérience.

L'installation d'un tel outillage demande plus d'une semaine. Avant tout, il faut s'assurer que les vis sont stables en pression, selon le produit utilisé. L'extrudeuse "Haake" doit être callée puisque la filière est supportée au bout des deux extrudeuses et cette filière doit rester stable. On visse d'abord les platines aux bouts des extrudeuses chauffées puis on ajuste la hauteur de l'extrudeuse "Haake" selon la position de la filière. Comme le schéma 2.1 l'illustre, les extrudeuses sont placées à angle droit afin d'aérer l'espace de travail. Il est aussi possible de placer les extrudeuses face à face. La platine de la "Haake" se positionne en-dessous de la filière.

Les hublots constituent la partie la plus fragile de l'outillage. Ceux-ci doivent être serrés avec soin (à chaud): on recommande de ne pas serrer fortement en sortie de filière, là

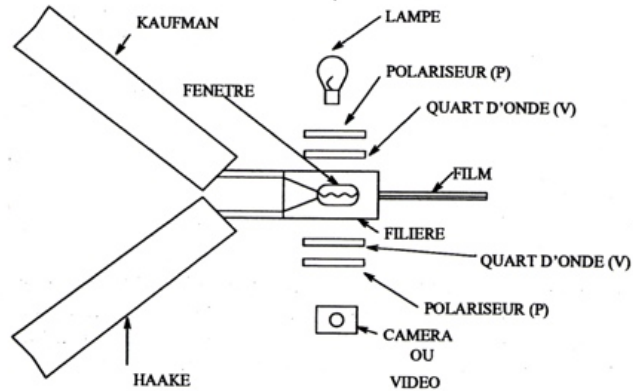


Figure 2.1 Schéma de l'expérience

où le verre risque de subir une torsion. Les pressions dans la filière étant très faibles, il est donc inutile de serrer à fond. Il serait bon de prévoir au moins un hublot supplémentaire avant de débiter toute expérience.

On règle les différentes zones de chauffage des fourreaux des extrudeuses de façon à assurer un profil thermique croissant de la trémie jusqu'à l'entrée en filière: 135°C , 150°C , 165°C et 175°C pour l'extrudeuse "Haake" débitant du PEBDL et 150°C , 180°C , 200°C et 240°C pour la "Kaufman" débitant du PP. Une chute de température à la porte de l'extrudeuse "Kaufman" (près de la filière) nécessite d'augmenter la quatrième régulation de température (240°C au lieu de 200°C). La filière est chauffée uniformément à 200°C .

Lorsque l'appareil de biréfringence ainsi que les polariseurs sont installés (voir le schéma de la figure 2.1), il est important de tester la caméra. Les polariseurs fournissent une lumière polarisée circulaire de façon à éliminer les franges dites isoclines (parallèles aux directions des contraintes principales) [Avril 1974]. L'analyse des résultats requiert donc une bonne qualité des clichés tirés.

On décrit ici les deux matériaux utilisés dans cette expérience.

2.2 Rhéologie des polymères

Les paramètres pouvant être modifiés dans l'expérience sont essentiellement la température, la combinaison des polymères utilisés et le rapport des débits. Les rapports de viscosité ne peuvent être modifiés facilement puisque seul deux polymères sont utilisés: le PEBDL-FC1010 et le PP-appryl-PP2-3050. Les données rhéologiques du PEBDL et du PP sont fournies dans les tableaux 4.1 et 4.2 en annexe ainsi que leurs graphes à la figure 2.3.

Les paramètres de la loi de Carreau ont été déterminés avec le programme de moindres-carrés fourni par François BAY. Il existe aussi un programme de moindres-carrés dans le logiciel "Rheometrics RHIOS Software" du rhéomètre cône-plan. On peut

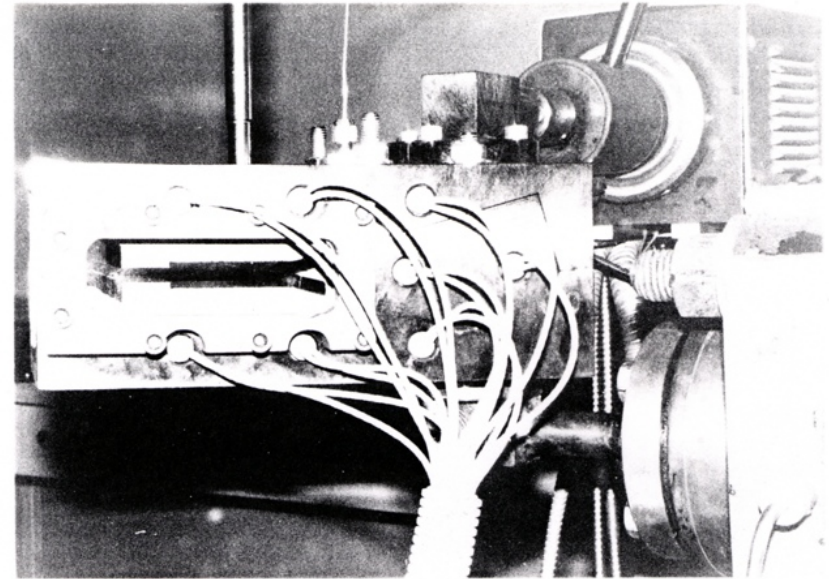


Figure 2.2 Photographie de l'outillage

consulter Christian PEITI à ce sujet. On rappelle ici la loi de Carreau (avec trois paramètres: η_0 , λ et n):

$$\eta(\dot{\gamma}) = \eta_0 \left(1 + (\lambda \dot{\gamma})^2\right)^{(n-1)/2} \quad (2.1)$$

Les paramètres de la loi de Carreau du PEBDL à une température de 200°C (celle de la filière) sont $\eta_0 = 12152.2$, $\lambda = 0.867992$ et $n = 0.494111$. De même, à une même température, ceux du PP sont $\eta_0 = 1001.27$, $\lambda = 0.302753$ et $n = 0.721821$.

2.3 Agenda de l'expérience

Une seconde expérience de mesure des débits s'est faite lorsque la filière de coextrusion a été installée. Cette fois-ci, on déterminait l'équivalence des débits en observant la position de l'interface dans la filière. Si on utilise le même polymère dans les deux extrudeuses et qu'on observe la position de l'interface, les débits seront les mêmes lorsque l'interface est au centre. Par contre, lorsqu'on utilise deux polymères de rhéologies différentes, ce rapport de viscosité influe sur la position de l'interface. Un code de calcul permettra de déterminer le débit de chaque extrudeuse, en fonction de la position de l'interface (cf chapitre 3). Si l'on ne tient pas compte de l'influence de la viscosité sur la position centrale de l'interface, on constate que la correspondance des vitesses de rotation des extrudeuses vaut: $f_{Kaufman} = 0,1545 f_{Haake}$. À ces fréquences, l'interface est au centre.

Une dernière expérience permet de déterminer les débits massiques en fonction des fréquences de rotation de chaque extrudeuse. Pour ce faire, on laisse débiter tour à tour chaque extrudeuse, individuellement, en calculant le débit massique du matériau. Cette expérience demande à être améliorée, vu l'imprécision de la mesure (la sortie de filière est concave et difficile d'accès). Le tableau 2.1 fait la synthèse de cette expérience. En supposant qu'il existe une relation linéaire entre la fréquence de rotation des extrudeuses

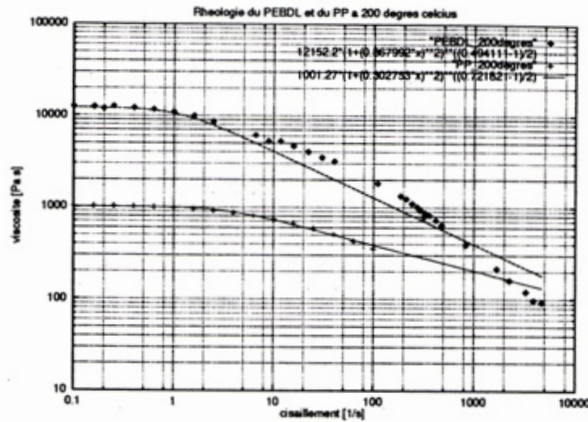


Figure 2.3 Rhéologie du PP et du PEBDL

et le débit massique, la relation entre la fréquence de rotation de l'extrudeuse "Haake" et son débit massique (pour le PEBDL) devient:

$$\text{débit massique}_{Haake} [g/min] = 0,53404 [g/tr] f_{Haake} \quad (2.2)$$

De même, la relation entre la fréquence de rotation de l'extrudeuse "Kaufman" et son débit massique (pour le PP) est:

$$\text{débit massique}_{Kaufman} [g/min] = 3,7168 [g/tr] f_{Kaufman} \quad (2.3)$$

La densité des deux polymères à l'état fondu est de 0,76. (À l'état solide, elle vaut environ 0,92). La masse volumique vaut donc 760 kg/m^3 . Un simple calcul avec les équations (2.2) et (2.3) permet de déterminer le débit volumique correspondant aux vitesses de rotation données ci-haut.

$$\text{débit volumique}_{Haake} [mm^3/s] = 11,7114 [min/tr] f_{Haake} \quad (2.4)$$

$$\text{débit volumique}_{Kaufman} [mm^3/s] = 81,5088 [min/tr] f_{Haake} \quad (2.5)$$

Ces relations seront utilisées lors de la simulation numérique. Le maillage étant dimensionné en $[mm]$, on exprime alors les débits en $[mm^3/s]$.

Le chapitre suivant traite essentiellement des résultats de l'expérience de coextrusion du PEBDL et du PP, observée par biréfringence. Une section sera consacrée à la simulation numérique.

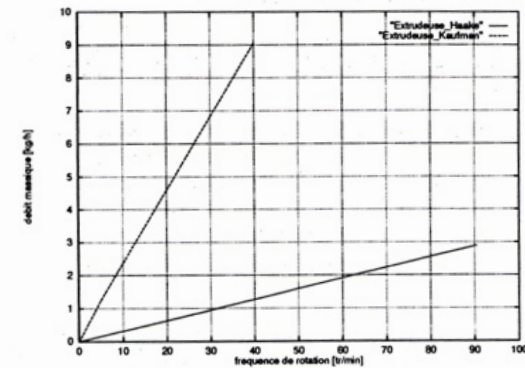


Figure 2.4 Correspondance des fréquences de rotation et des débits

extrudeuse	fréquence [tours/min]	Pression [bars]	température [°C]	débit massique [kg/h]
Haake	22.6	13.80	196	0.71
Haake	90.5	45.89	195	2.89
Kaufman	5.0	11.73	195	1.24
Kaufman	40.0	34.50	207	9.05

Tableau 2.1 Correspondance des fréquences de rotation et des débits

CHAPITRE 3

Résultats

Ce chapitre traite des résultats expérimentaux et numériques. Le titre de ce mémoire suggère que les résultats seront orientés sur des instabilités d'interface. Malheureusement, aucune instabilité n'a été observée! Dans la littérature, il a été entendu qu'un rapport de viscosité et/ou de débit provoque en général une instabilité d'interface. Dans ce cas-ci, le rapport des viscosités vaut 10 environ et le rapport maximal des débits vaut 25. Ces conditions semblent être insuffisantes pour déclencher une instabilité.

Par contre, une étude de l'écoulement stationnaire a été menée. Deux quantités physiques sont observées dans cette expérience, soient la position de l'interface entre les deux polymères et la première différence des contraintes principales obtenue par biréfringence.

On trouve donc dans l'ordre une explication sommaire du phénomène de biréfringence, quelques cas de biréfringence photographiés, en terminant par un peu d'analyse numérique. La position de l'interface est visible dans les clichés de biréfringence.

Essentiellement, les mesures se font à l'aide d'appareils optiques. Une caméra vidéo permet d'observer l'évolution des contraintes. Une cassette vidéo de l'expérience existe (voir Christian PEITI). Elle contient cinq cas de rapports des débits, pour la coextrusion du PP et du PEBDL. L'avantage de la vidéo est de visualiser immédiatement l'enregistrement. La qualité de l'image est toutefois moins bonne qu'une photographie tirée de la caméra. Aussi, l'analyse est plutôt difficile sur vidéo. (Il est possible de tirer une photographie à partir d'une image vidéo à l'aide de l'appareillage du laboratoire de microscopie.)

La caméra donnant d'excellents résultats est la "Pentax SFXn". Elle doit être utilisée avec des films pour épreuves noir-et-blanc "400-TMY-135", en manuel: un quart de secondes (position 4) avec ouverture du diaphragme 32. L'objectif est le "SMC PENTAX-M MACRO 1:4 50mm". Par contre, pour les films diapositives "Ektachrome 160T", il est conseillé d'utiliser l'appareil en automatique avec ouverture du diaphragme 11. Il est impératif de consulter Roland HAINAULT à ce sujet.

3.1 Biréfringence

3.1.1 Phénomène

La plupart des corps transparents isotropes deviennent biréfringents lorsqu'ils sont soumis à des déformations ou des contraintes. Les axes de biréfringence correspondent alors aux directions principales des déformations ou des contraintes [Avril 1974]. Pour faire apparaître les axes de biréfringence, on emploie deux filtres polarisant (à axes parallèles) et deux quarts d'ondes. Ces derniers servent à éliminer les isoclines (qui dépendent de l'orientation des polaroids) et ainsi laisser passer uniquement les isochromes, qui ne dépendent que de la différence des contraintes.

Ces isochromes sont reliées à la différence des contraintes principales par la loi de

Brewster [Beaufils 1989]:

$$\sigma_I - \sigma_{II} = \frac{k \cdot \lambda}{C \cdot e} \quad (3.1)$$

où σ_I et σ_{II} sont les contraintes principales, k un nombre entier, λ la longueur d'onde du sodium (Na), C le coefficient de Brewster et e l'épaisseur de la filière. Dans sa thèse, [Beaufils 1989] évalue C à $2.8 \times 10^{-9} m^2/N = 2800$ Brewster, pour le PEBDL Lotrex FC1010. Le coefficient de Brewster du polypropylène vaut près de $1 \times 10^{-9} m^2/N$ selon [Wales 1976]. 1 Brewster correspond à un retard de 1 Angstrom provoqué par une contrainte de 1 bar lorsque la lumière traverse 1 mm d'épaisseur du matériau photoélastique. La longueur d'onde du sodium vaut $0,589 \mu m$ et l'épaisseur de la filière, $100 mm$. En remplaçant ces valeurs dans la loi de Brewster on obtient les relations suivantes:

$$(\sigma_I - \sigma_{II})_{PP} [MPa] = 0,005890k \quad (3.2)$$

et

$$(\sigma_I - \sigma_{II})_{PEBDL} [MPa] = 0,002104k \quad (3.3)$$

pour tous nombres naturels k . Le choix de l'unité [MPa] est associé aux dimensions millimétriques du domaine de calcul. On utilisera ces relations pour les iso-contraintes calculées par le programme d'éléments finis.

On donne ici quelques résultats de la biréfringence, pour différents débits.

3.1.2 Photographies et analyse

Dans les expériences de coextrusion, les vitesses de rotation de l'extrudeuse "Haake" varient de $22,5 tr/min$ à $90,5 tr/min$ et celles de l'extrudeuse "Kaufman" varient de $20,0 tr/min$ à $90,0 tr/min$. En deçà, les franges sont imperceptibles et au-delà, le couple mesuré est trop élevé (les variations de pression de l'extrudeuse "Kaufman" sont importantes, au-dessus de $75 tr/min$, i.e. les franges de biréfringence oscillent). Le polypropylène étant beaucoup moins biréfringent que le polyéthylène basse densité linéaire, il était donc difficile de réduire la vitesse de rotation de l'extrudeuse "Kaufman" afin d'observer des franges. D'où limitation du rapport des débits (pour du PEBDL fortement débité). Un polymère hautement biréfringent permettra d'augmenter la plage des vitesses de rotation des extrudeuses (consulter le rapport de stage de Jean-Michel Lentin qui utilise le PEBDL et le PEHD coextrudés).

Dans toute l'expérience, le PEBDL est extrudé dans la "Haake" et le PP dans l'extrudeuse "Kaufman". Les fréquences de rotation des extrudeuses "Haake" et "Kaufman" ont été fixées à trois reprises respectivement à $22,5 tr/min$ et $72,0 tr/min$, $45,2 tr/min$ et $36,0 tr/min$, $90,5 tr/min$ et $72,0 tr/min$. Le critère de choix reposait sur la qualité et la quantité de franges visibles sur les photographies. Un simple calcul à l'aide des équations (2.4) et (2.5) permet de déterminer le débit volumique correspondant aux vitesses de rotation données ci-haut. Les rapports de débits volumiques (Q_{PP}/Q_{PEBDL}) de ces trois essais sont: 5,54; 5,54; 22,3.

Les figures 3.1, 3.2 et 3.3 illustre (imparfaitement) les clichés de biréfringence des trois cas de débits. Le polypropylène est toujours sous le polyéthylène et les polymères s'écoulent de droite à gauche.

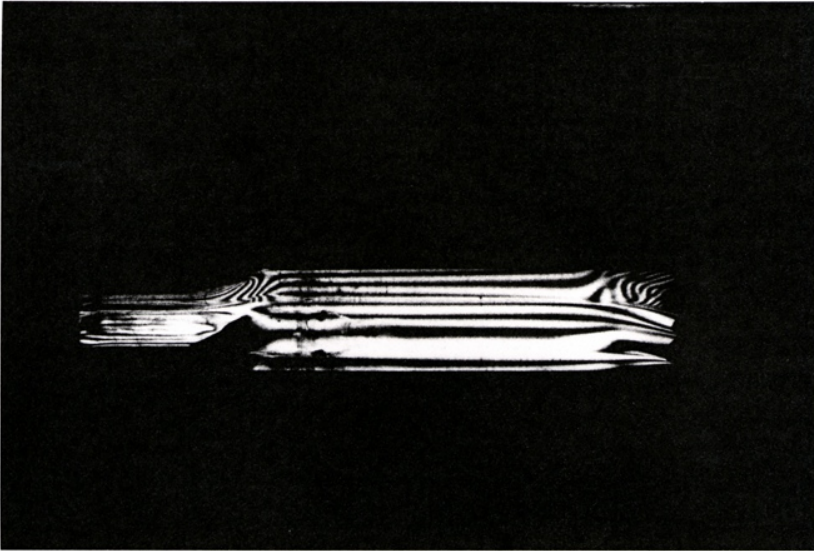


Figure 3.1 $Q_{PP} = 5868,6 \text{ mm}^3/\text{s}$ et $Q_{PEBDL} = 1059,9 \text{ mm}^3/\text{s}$; $Q_{PP}/Q_{PEBDL} = 5,54$

Il est assez difficile d'analyser les raies de biréfringence. La photo 3.1 semble la plus claire. Il est nécessaire de déterminer les conditions optiques optimales, afin d'obtenir des clichés nets (avec des hublots impeccables: les taches dans l'entrefer près du rétreint sont dûes au hublot endommagé). La filière étant d'une épaisseur de 100 mm , on doit donc considérer la profondeur de champ lors de la prise de photo. On peu distinguer l'épaisseur de la filière à l'endroit du rétreint à la figure 3.2, en bas à gauche. Donc, pour une condition d'écoulement donnée (débit, température, etc.), il faudra effectuer plusieurs photographies en focalisant l'objectif à plusieurs endroit, selon l'information désirée: position de l'interface, raies de biréfringence d'un polymère à l'entrée, à la sortie, de l'autre polymère à l'entrée, etc. En d'autres termes, il est impossible d'analyser globalement l'écoulement. Toutefois, un cliché de toute la filière permet d'analyser qualitativement l'écoulement.

En effet, on observe sur les trois photographies que les franges à l'entrée (à droite) sont plutôt linéaires dans le PP (dessous) tandis que les franges du PEBDL (dessus) subissent une déformation arrondie jusqu'au point de rencontre des deux polymères. On constate d'ailleurs les mêmes courbes dans les résultats du calcul numérique représentant la différence des contraintes principales, en page 21 (regarder le convergent en haut à droite). On constate aussi que l'écoulement dans l'entrefer s'établi rapidement. Deux centimètres suffisent pour que les franges deviennent parallèles (l'entrefer est de 5 cm de longueur). On observe la même allure, numériquement. En sortie de filière (à gauche sur les photos), il est assez difficile d'analyser l'écoulement, à cause de la profondeur de champ. On peut au moins affirmer que les franges (donc les différences de contraintes principales) se concentrent à la pointe du rétreint.

Le calcul numérique s'est fait sur tout le domaine illustré par les photographies en éliminant la partie gonflement en sortie de filière. Le gonflement doit être traité numériquement avec un modèle visco-élastique. L'analyse numérique se référera à la première

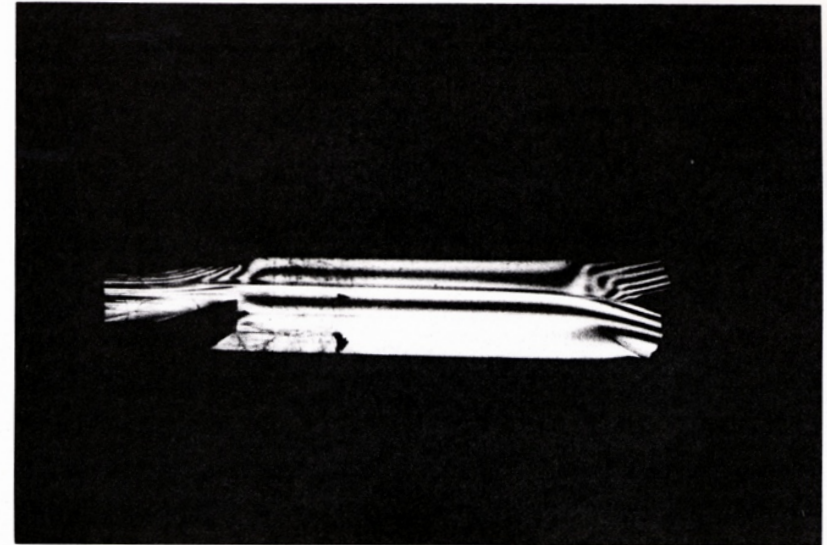


Figure 3.2 $Q_{PP} = 2934,3 \text{ mm}^3/\text{s}$ et $Q_{PEBDL} = 529,36 \text{ mm}^3/\text{s}$; $Q_{PP}/Q_{PEBDL} = 5,54$

photographie en terme de débits d'entrée.

3.2 Analyse numérique

Un calcul est présentement en cours dans une géométrie identique à ce qui est vu à travers les hublots. Ce domaine est illustré à la figure 3.4. Dans ce cas-ci on ne considère pas le gonflement en sortie de filière. Les termes temporels et de convection sont négligés (nombre de Reynolds petit).

Le calcul bidimensionnel se fait à l'aide de l'algorithme d'Uzawa formulé en vitesse-pression avec détermination de la position de l'interface par une technique de pseudo-concentration, à l'aide de la méthode numérique de Lesaint-Raviart. Une itération du point fixe de Picard relie la vitesse à la position de l'interface [Fortin, Carrier, Demay 1994].

La rhéologie a été donnée à la figure 2.3 et les débits sont ceux de la photo 3.1 c'est-à-dire $Q_{PP} = 58,686 \text{ mm}^2/\text{s}$ et $Q_{PEBDL} = 10,599 \text{ mm}^2/\text{s}$. On divise par 100 mm (i.e. la largeur de la filière) puisque le calcul est bidimensionnel. A la page 20, on illustre la solution avec ces débits. La position de l'interface est colorée et la différence des contraintes principales est dessinée en blanc, à l'intérieur du domaine. On remarque que le coefficient de Brewster du PEBDL est un multiple de trois (environ) de celui du PP. On utilise alors la relation (3.2) pour les isovalues de la différence des contraintes principales: $(\sigma_I - \sigma_{II}) = 0,00589k$ avec $k = 1, \dots, 10$. Il manque alors les franges $(3k-2)/3$ et $(3k-1)/3$ du PEBDL.

On remarque que la position de l'interface est légèrement trop élevé par rapport à la photo 3.1. Pour corriger la position de l'interface, un calcul a été effectué avec un débit du PP plus faible: $Q_{PEBDL} = 10 \text{ mm}^2/\text{s}$ et $Q_{PP} = 20 \text{ mm}^2/\text{s}$. La page 21 illustre ce calcul. La position de l'interface correspond cette fois-ci à celle observée sur la photo 3.1. De plus, à l'entrée de la filière, l'allure de la différence des contraintes principales est

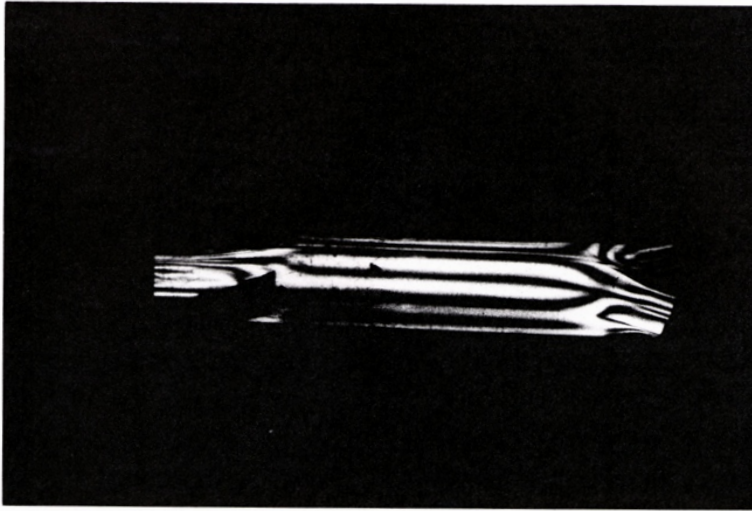


Figure 3.3 $Q_{PP} = 5868,6 \text{ mm}^3/\text{s}$ et $Q_{PEBDL} = 263,51 \text{ mm}^3/\text{s}$; $Q_{PP}/Q_{PEBDL} = 22,3$

semblable. Par contre, les débits ne correspondent pas. Une étude plus approfondie de ce défaut est nécessaire.

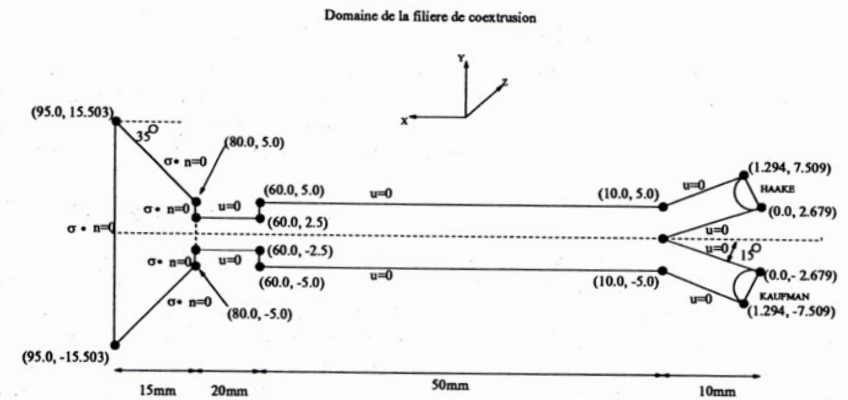
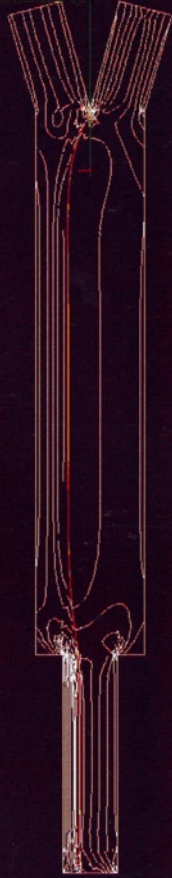


Figure 3.4 *Domaine du second maillage*

CHLOE IV M1950rap



CHLOE IV M1950rap

0.3059 0.322 0.338 0.354 0.37 0.386 0.402 0.418 0.434 0.45 0.466 0.482 0.498 0.514 0.53 0.546 0.562 0.578 0.594 0.61 0.626 0.642 0.658 0.674 0.69 0.706 0.722 0.738 0.754 0.77 0.786 0.802 0.818 0.834 0.85 0.866 0.882 0.898 0.914 0.93 0.946 0.962 0.978 0.994 1.01 1.026 1.042 1.058 1.074 1.09 1.106 1.122 1.138 1.154 1.17 1.186 1.202 1.218 1.234 1.25 1.266 1.282 1.298 1.314 1.33 1.346 1.362 1.378 1.394 1.41 1.426 1.442 1.458 1.474 1.49 1.506 1.522 1.538 1.554 1.57 1.586 1.602 1.618 1.634 1.65 1.666 1.682 1.698 1.714 1.73 1.746 1.762 1.778 1.794 1.81 1.826 1.842 1.858 1.874 1.89 1.906 1.922 1.938 1.954 1.97 1.986 2.002 2.018 2.034 2.05 2.066 2.082 2.098 2.114 2.13 2.146 2.162 2.178 2.194 2.21 2.226 2.242 2.258 2.274 2.29 2.306 2.322 2.338 2.354 2.37 2.386 2.402 2.418 2.434 2.45 2.466 2.482 2.498 2.514 2.53 2.546 2.562 2.578 2.594 2.61 2.626 2.642 2.658 2.674 2.69 2.706 2.722 2.738 2.754 2.77 2.786 2.802 2.818 2.834 2.85 2.866 2.882 2.898 2.914 2.93 2.946 2.962 2.978 2.994 3.01 3.026 3.042 3.058 3.074 3.09 3.106 3.122 3.138 3.154 3.17 3.186 3.202 3.218 3.234 3.25 3.266 3.282 3.298 3.314 3.33 3.346 3.362 3.378 3.394 3.41 3.426 3.442 3.458 3.474 3.49 3.506 3.522 3.538 3.554 3.57 3.586 3.602 3.618 3.634 3.65 3.666 3.682 3.698 3.714 3.73 3.746 3.762 3.778 3.794 3.81 3.826 3.842 3.858 3.874 3.89 3.906 3.922 3.938 3.954 3.97 3.986 4.002 4.018 4.034 4.05 4.066 4.082 4.098 4.114 4.13 4.146 4.162 4.178 4.194 4.21 4.226 4.242 4.258 4.274 4.29 4.306 4.322 4.338 4.354 4.37 4.386 4.402 4.418 4.434 4.45 4.466 4.482 4.498 4.514 4.53 4.546 4.562 4.578 4.594 4.61 4.626 4.642 4.658 4.674 4.69 4.706 4.722 4.738 4.754 4.77 4.786 4.802 4.818 4.834 4.85 4.866 4.882 4.898 4.914 4.93 4.946 4.962 4.978 4.994 5.01 5.026 5.042 5.058 5.074 5.09 5.106 5.122 5.138 5.154 5.17 5.186 5.202 5.218 5.234 5.25 5.266 5.282 5.298 5.314 5.33 5.346 5.362 5.378 5.394 5.41 5.426 5.442 5.458 5.474 5.49 5.506 5.522 5.538 5.554 5.57 5.586 5.602 5.618 5.634 5.65 5.666 5.682 5.698 5.714 5.73 5.746 5.762 5.778 5.794 5.81 5.826 5.842 5.858 5.874 5.89 5.906 5.922 5.938 5.954 5.97 5.986 6.002 6.018 6.034 6.05 6.066 6.082 6.098 6.114 6.13 6.146 6.162 6.178 6.194 6.21 6.226 6.242 6.258 6.274 6.29 6.306 6.322 6.338 6.354 6.37 6.386 6.402 6.418 6.434 6.45 6.466 6.482 6.498 6.514 6.53 6.546 6.562 6.578 6.594 6.61 6.626 6.642 6.658 6.674 6.69 6.706 6.722 6.738 6.754 6.77 6.786 6.802 6.818 6.834 6.85 6.866 6.882 6.898 6.914 6.93 6.946 6.962 6.978 6.994 7.01 7.026 7.042 7.058 7.074 7.09 7.106 7.122 7.138 7.154 7.17 7.186 7.202 7.218 7.234 7.25 7.266 7.282 7.298 7.314 7.33 7.346 7.362 7.378 7.394 7.41 7.426 7.442 7.458 7.474 7.49 7.506 7.522 7.538 7.554 7.57 7.586 7.602 7.618 7.634 7.65 7.666 7.682 7.698 7.714 7.73 7.746 7.762 7.778 7.794 7.81 7.826 7.842 7.858 7.874 7.89 7.906 7.922 7.938 7.954 7.97 7.986 8.002 8.018 8.034 8.05 8.066 8.082 8.098 8.114 8.13 8.146 8.162 8.178 8.194 8.21 8.226 8.242 8.258 8.274 8.29 8.306 8.322 8.338 8.354 8.37 8.386 8.402 8.418 8.434 8.45 8.466 8.482 8.498 8.514 8.53 8.546 8.562 8.578 8.594 8.61 8.626 8.642 8.658 8.674 8.69 8.706 8.722 8.738 8.754 8.77 8.786 8.802 8.818 8.834 8.85 8.866 8.882 8.898 8.914 8.93 8.946 8.962 8.978 8.994 9.01 9.026 9.042 9.058 9.074 9.09 9.106 9.122 9.138 9.154 9.17 9.186 9.202 9.218 9.234 9.25 9.266 9.282 9.298 9.314 9.33 9.346 9.362 9.378 9.394 9.41 9.426 9.442 9.458 9.474 9.49 9.506 9.522 9.538 9.554 9.57 9.586 9.602 9.618 9.634 9.65 9.666 9.682 9.698 9.714 9.73 9.746 9.762 9.778 9.794 9.81 9.826 9.842 9.858 9.874 9.89 9.906 9.922 9.938 9.954 9.97 9.986 10.002 10.018 10.034 10.05 10.066 10.082 10.098 10.114 10.13 10.146 10.162 10.178 10.194 10.21 10.226 10.242 10.258 10.274 10.29 10.306 10.322 10.338 10.354 10.37 10.386 10.402 10.418 10.434 10.45 10.466 10.482 10.498 10.514 10.53 10.546 10.562 10.578 10.594 10.61 10.626 10.642 10.658 10.674 10.69 10.706 10.722 10.738 10.754 10.77 10.786 10.802 10.818 10.834 10.85 10.866 10.882 10.898 10.914 10.93 10.946 10.962 10.978 10.994 11.01 11.026 11.042 11.058 11.074 11.09 11.106 11.122 11.138 11.154 11.17 11.186 11.202 11.218 11.234 11.25 11.266 11.282 11.298 11.314 11.33 11.346 11.362 11.378 11.394 11.41 11.426 11.442 11.458 11.474 11.49 11.506 11.522 11.538 11.554 11.57 11.586 11.602 11.618 11.634 11.65 11.666 11.682 11.698 11.714 11.73 11.746 11.762 11.778 11.794 11.81 11.826 11.842 11.858 11.874 11.89 11.906 11.922 11.938 11.954 11.97 11.986 12.002 12.018 12.034 12.05 12.066 12.082 12.098 12.114 12.13 12.146 12.162 12.178 12.194 12.21 12.226 12.242 12.258 12.274 12.29 12.306 12.322 12.338 12.354 12.37 12.386 12.402 12.418 12.434 12.45 12.466 12.482 12.498 12.514 12.53 12.546 12.562 12.578 12.594 12.61 12.626 12.642 12.658 12.674 12.69 12.706 12.722 12.738 12.754 12.77 12.786 12.802 12.818 12.834 12.85 12.866 12.882 12.898 12.914 12.93 12.946 12.962 12.978 12.994 13.01 13.026 13.042 13.058 13.074 13.09 13.106 13.122 13.138 13.154 13.17 13.186 13.202 13.218 13.234 13.25 13.266 13.282 13.298 13.314 13.33 13.346 13.362 13.378 13.394 13.41 13.426 13.442 13.458 13.474 13.49 13.506 13.522 13.538 13.554 13.57 13.586 13.602 13.618 13.634 13.65 13.666 13.682 13.698 13.714 13.73 13.746 13.762 13.778 13.794 13.81 13.826 13.842 13.858 13.874 13.89 13.906 13.922 13.938 13.954 13.97 13.986 14.002 14.018 14.034 14.05 14.066 14.082 14.098 14.114 14.13 14.146 14.162 14.178 14.194 14.21 14.226 14.242 14.258 14.274 14.29 14.306 14.322 14.338 14.354 14.37 14.386 14.402 14.418 14.434 14.45 14.466 14.482 14.498 14.514 14.53 14.546 14.562 14.578 14.594 14.61 14.626 14.642 14.658 14.674 14.69 14.706 14.722 14.738 14.754 14.77 14.786 14.802 14.818 14.834 14.85 14.866 14.882 14.898 14.914 14.93 14.946 14.962 14.978 14.994 15.01 15.026 15.042 15.058 15.074 15.09 15.106 15.122 15.138 15.154 15.17 15.186 15.202 15.218 15.234 15.25 15.266 15.282 15.298 15.314 15.33 15.346 15.362 15.378 15.394 15.41 15.426 15.442 15.458 15.474 15.49 15.506 15.522 15.538 15.554 15.57 15.586 15.602 15.618 15.634 15.65 15.666 15.682 15.698 15.714 15.73 15.746 15.762 15.778 15.794 15.81 15.826 15.842 15.858 15.874 15.89 15.906 15.922 15.938 15.954 15.97 15.986 16.002 16.018 16.034 16.05 16.066 16.082 16.098 16.114 16.13 16.146 16.162 16.178 16.194 16.21 16.226 16.242 16.258 16.274 16.29 16.306 16.322 16.338 16.354 16.37 16.386 16.402 16.418 16.434 16.45 16.466 16.482 16.498 16.514 16.53 16.546 16.562 16.578 16.594 16.61 16.626 16.642 16.658 16.674 16.69 16.706 16.722 16.738 16.754 16.77 16.786 16.802 16.818 16.834 16.85 16.866 16.882 16.898 16.914 16.93 16.946 16.962 16.978 16.994 17.01 17.026 17.042 17.058 17.074 17.09 17.106 17.122 17.138 17.154 17.17 17.186 17.202 17.218 17.234 17.25 17.266 17.282 17.298 17.314 17.33 17.346 17.362 17.378 17.394 17.41 17.426 17.442 17.458 17.474 17.49 17.506 17.522 17.538 17.554 17.57 17.586 17.602 17.618 17.634 17.65 17.666 17.682 17.698 17.714 17.73 17.746 17.762 17.778 17.794 17.81 17.826 17.842 17.858 17.874 17.89 17.906 17.922 17.938 17.954 17.97 17.986 18.002 18.018 18.034 18.05 18.066 18.082 18.098 18.114 18.13 18.146 18.162 18.178 18.194 18.21 18.226 18.242 18.258 18.274 18.29 18.306 18.322 18.338 18.354 18.37 18.386 18.402 18.418 18.434 18.45 18.466 18.482 18.498 18.514 18.53 18.546 18.562 18.578 18.594 18.61 18.626 18.642 18.658 18.674 18.69 18.706 18.722 18.738 18.754 18.77 18.786 18.802 18.818 18.834 18.85 18.866 18.882 18.898 18.914 18.93 18.946 18.962 18.978 18.994 19.01 19.026 19.042 19.058 19.074 19.09 19.106 19.122 19.138 19.154 19.17 19.186 19.202 19.218 19.234 19.25 19.266 19.282 19.298 19.314 19.33 19.346 19.362 19.378 19.394 19.41 19.426 19.442 19.458 19.474 19.49 19.506 19.522 19.538 19.554 19.57 19.586 19.602 19.618 19.634 19.65 19.666 19.682 19.698 19.714 19.73 19.746 19.762 19.778 19.794 19.81 19.826 19.842 19.858 19.874 19.89 19.906 19.922 19.938 19.954 19.97 19.986 20.002 20.018 20.034 20.05 20.066 20.082 20.098 20.114 20.13 20.146 20.162 20.178 20.194 20.21 20.226 20.242 20.258 20.274 20.29 20.306 20.322 20.338 20.354 20.37 20.386 20.402 20.418 20.434 20.45 20.466 20.482 20.498 20.514 20.53 20.546 20.562 20.578 20.594 20.61 20.626 20.642 20.658 20.674 20.69 20.706 20.722 20.738 20.754 20.77 20.786 20.802 20.818 20.834 20.85 20.866 20.882 20.898 20.914 20.93 20.946 20.962 20.978 20.994 21.01 21.026 21.042 21.058 21.074 21.09 21.106 21.122 21.138 21.154 21.17 21.186 21.202 21.218 21.234 21.25 21.266 21.282 21.298 21.314 21.33 21.346 21.362 21.378 21.394 21.41 21.426 21.442 21.458 21.474 21.49 21.506 21.522 21.538 21.554 21.57 21.586 21.602 21.618 21.634 21.65 21.666 21.682 21.698 21.714 21.73 21.746 21.762 21.778 21.794 21.81 21.826 21.842 21.858 21.874 21.89 21.906 21.922 21.938 21.954 21.97 21.986 22.002 22.018 22.034 22.05 22.066 22.082 22.098 22.114 22.13 22.146 22.162 22.178 22.194 22.21 22.226 22.242 22.258 22.274 22.29 22.306 22.322 22.338 22.354 22.37 22.386 22.402 22.418 22.434 22.45 22.466 22.482 22.498 22.514 22.53 22.546 22.562 22.578 22.594 22.61 22.626 22.642 22.658 22.674 22.69 22.706 22.722 22.738 22.754 22.77 22.786 22.802 22.818 22.834 22.85 22.866 22.882 22.898 22.914 22.93 22.946 22.962 22.978 22.994 23.01 23.026 23.042 23.058 23.074 23.09 23.106 23.122 23.138 23.154 23.17 23.186 23.202 23.218 23.234 23.25 23.266 23.282 23.298 23.314 23.33 23.346 23.362 23.378 23.394 23.41 23.426 23.442 23.458 23.474 23.49 23.506 23.522 23.538 23.554 23.57 23.586 23.602 23.618 23.634 23.65 23.666 23.682 23.698 23.714 23.73 23.746 23.762 23.778 23.794 23.81 23.826 23.842 23.858 23.874 23.89 23.906 23.922 23.938 23.954 23.97 23.986 24.002 24.018 24.034 24.05 24.066 24.082 24.098 24.114 24.13 24.146 24.162 24.178 24.194 24.21 24.226 24.242 24.258 24.274 24.29 24.306 24.322 24.338 24.354 24.37 24.386 24.402 24.418 24.434 24.45 24.466 24.482 24.498 24.514 24.53 24.546 24.562 24.578 24.594 24.61 24.626 24.642 24.658 24.674 24.69 24.706 24.722 24.738 24.754 24.77 24.786 24.802 24.818 24.834 24.85 24.866 24.882 24.898 24.914 24.93 24.946 24.962 24.978 24.994 25.01 25.026 25.042 25.058 25.074 25.09 25.106 25.122 25.138 25.154 25.17 25.186 25.202 25.218 25.234 25.25 25.266 25.282 25.298 25.314 25.33 25.346 25.362 25.378 25.394 25.41 25.426 25.442 25.458 25.474 25.49 25.506 25.522 25.538 25.554 25.57 25.586 25.602 25.618 25.634 25.65 25.666 25.682 25.698 25.714 25.73 25.746 25.762 25.778 25.794 25.81 25.826 25.842 25.858 25.874 25.89 25.906 25.922 25.938 25.954 25.97 25.986 26.002 26.018 26.034 26.05 26.066 26.082 26.098 26.114 26.13 26.146 26.162 26.178 26.194 26.21 26.226 26.242 26.258 26.274 26.29 26.306 26.322 26.338 26.354 26.37 26.386 26.402 26.418 26.434 26.45 26.466 26.482 26.498 26.514 26.53 26.546 26.562 26.578 26.594 26.61 26.626 26.642 26.658 26.674 26.69 26.706 26.722 26.738 26.754 26.77 26.786 26.802 26.818 26.834 26.85 26.866 26.882 26.898 26.914 26.93 26.946 26.962 26.978 26.994 27.01 27.026 27.042 27.058 27.074 27.09 27.106 27.122 27.138 27.154 27.17 27.186 27.202 27.218 27.234 27.25 27.266 27.282 27.298 27.314 27.33 27.346 27.362 27.378 27.394 27.41 27.426 27.442 27.458 27.474 27.49 27.506 27.522 27.538 27.554 27.57 27.586 27.602 27.618 27.634 27.65 27.666 27.682 27.698 27.714 27.73 27.746 27.762 27.778 27.794 27.81 27.826 27.842 27.858 27.874 27.89 27.906 27.922 27.938 27.954 27.97 27.986 28.002 28.018 28.034 28.05 28.066 28.082 28.098 28.114 28.13 28.146 28.162 28.178 28.194 28.21 28.226 28.242 28.258 28.274 28.29 28.306 28.322 28.338 28.354 28.37 28.386 28.402 28.418 28.434 28.45 28.466 28.482 28.498 28.514 28.53 28.546 28.562 28.578 28.594 28.61 28.626 28.642 28.658 28.674 28.69 28.706 28.722 28.738 28.754 28.77 28.786 28.802 28.818 28.834 28.85 28.866 28.882 28.898 28.914 28.93 28.946 28.962 28.978 28.994 29.01 29.026 29.042 29.058 29.074 29.09 29.106 29.122 29.138 29.154 29.17 29.186 29.202 29.218 29.234 29.25 29.266 29.282 29.298 29.314 29.33 29.346 29.362 29.378 29.394 29.41 29.426 29.442 29.458 29.474 29.49 29.506 29.522 29.538 29.554 29.57 29.586 29.602 29.618 29.634 29.65 29.666 29.682 29.698 29.714 29.73 29.746 29.762 29.778 29.794 29.81 29.826 29.842 29.858 29.874 29.89 29.906 29.922 29.938 29.954 29.97 29.986 30.002 30.018 30.034 30.05 30.066 30.082 30.098 30.114 30.13 30.146 30.162 30.178 30.194 30.21 30.226 30.242 30.258 30.274 30.29 30.306 30.

CONCLUSION

Une étude d'instabilité à l'interface polymère-polymère a été amorcée dans ce mémoire. Il s'agissait de concevoir une filière de coextrusion (bi-matière), assurant une répartition parfaite des deux matériaux. Un rapport de forme (*aspect ratio*) de 10 permet d'éliminer les effets de bord et de considérer l'écoulement bidimensionnel. On observe en effet une excellente répartition de la matière sur 1/10 de mètre de largeur. Un hublot permet d'observer l'écoulement en continu.

Par contre, aucune instabilité d'interface n'a été observée. Selon la littérature, les instabilités apparaissent avec de forts rapports de viscosité et/ou de débit. Dans cette expérience, les produits utilisés étaient le polypropylène et le polyéthylène basse densité linéaire. La consistance du PP vaut $1001 Pa \cdot s$ et celle du PEBDL, $12152 Pa \cdot s$ (à $200^\circ C$), d'où un rapport de viscosité de dix environ. De plus le rapport maximal des débits est en deçà de trente. Il semble que ces conditions soient insuffisantes pour faire apparaître des instabilités.

Une étude de l'écoulement stationnaire a toutefois été entreprise. En utilisant un appareil de biréfringence, il a été possible d'observer à la fois la position de l'interface et la différence des contraintes dans le repère principal. On a pu comparer les résultats expérimentaux et numériques. On constate que le rapport des débits mesurés ne correspond pas à celui calculé c'est-à-dire que l'interface ne se positionne pas exactement au même endroit selon le calcul ou l'expérience. De plus, les différences de contraintes principales ont sensiblement la même allure. Afin de poursuivre toute analyse quantitative, il est essentiel de déterminer la cause de l'erreur (numérique ou expérimentale) des débits en entrée.

Les principales difficultés survenues lors de l'expérience sont liées à la prise des mesures. La mesure la plus fiable reste la pression. Un dispositif amovible et stable de mesure de la température dans la matière doit être conçu afin d'assurer une homogénéité des mesures. Actuellement, la température est prise à la main dans chacun des produits. On pourrait imaginer un support fixé en sortie de filière auquel serait fixé un thermocouple qui pénétrerait dans la filière au moment de la mesure. Un capteur de température par infra-rouge serait idéal.

La mesure de la hauteur d'interface et des différences de contraintes principales dépend directement de la qualité des clichés. Bien sûr, les hublots doivent être impeccablement lisses. Les produits utilisés doivent être suffisamment biréfringents pour observer un nombre de franges analysable. Il s'est avéré que le polypropylène n'est pas suffisamment biréfringent pour faire une telle analyse, comparé au polyéthylène (PEBDL). Par contre le polyéthylène haute densité (PEHD) donne d'excellents résultats (voir le rapport de Jean-Michel Lentin). La largeur de la filière impose de produire plusieurs photos, afin d'éliminer les effets de la profondeur de champ. Un banc de déplacement de la caméra à été conçu par Jean-Michel LENTIN et permet de repérer les endroits de prises de photos.

Finalement, la mesure des débits massiques est quelque peu difficile, à cause de la

géométrie. Il serait intéressant de concevoir une pièce qui permette de couper de façon nette, l'écoulement en sortie de filière. Avant de débiter les expériences de biréfringence, il est important d'obtenir avec précision, la relation entre les vitesses de rotation des deux extrudeuses et le débit volumique et de déterminer si celle-ci est bel et bien linéaire.

Du point de vue numérique, il serait intéressant d'inclure la loi de Brewster afin d'unifier les isolignes de la différence des contraintes principales calculées et ainsi obtenir toutes les différences de contraintes des deux produits, pour ensuite comparer le cliché et le calcul. Un modèle visco-élastique permettra de considérer le phénomène de gonflement en sortie de filière.

Un temps de manipulation et de calcul numérique accru aurait permis de déterminer la relation exacte entre l'expérience et le calcul ainsi que de parfaire cet essai.

BIBLIOGRAPHIE

- [Avril 1974] J.AVRIL, *Encyclopédie Vishay d'analyse des contraintes*, éditions Vishay-Micromesures, (1994), 463p.
- [Beaufils 1989] P.BEAUFILS, *Étude des défauts d'extrusion des polyéthylène linéaires, Approche expérimentale et modélisation des écoulements* Thèse de l'École nationale supérieure des mines de Paris, Docteur en Sciences et génie des matériaux, 1989, 145 pages.
- [Carrier 1994] P.CARRIER, *Etude des instabilités d'interface du procédé de coextrusion*, Rapport bibliographique de l'École nationale supérieure des mines de Paris, (mars 1994), 20p.
- [Fortin, Carrier, Demay 1994] *Numerical Simulation of Coextrusion and Film Casting*, I.J.N.M.F., à paraître (1994) 42p.
- [Girod 1992] F.GIROD, *Etude des défauts d'interface en coextrusion de plaques thermoplastiques*. Rapport final du projet Mastere 1991-1992, École nationale supérieure des mines de Paris, (1992), 32p.
- [Ronot 1993] I.RONOT, *Etude des défauts d'extrusion d'un polyéthylène basse densité radicalaire*, Stage du Centre d'étude et de mise en forme des matériaux, École nationale supérieure des mines de Paris, (1993), 32p.
- [Tadmor Gogos] Z.TADMOR, C.G.GOGOS, *Principles of Polymer Processing*, ed. John Wiley & Sons.
- [Wales 1976] J.L.S. WALES, *The application of flow birefringence to rheological studies of polymer melts*, ed. Delft University Press, (1976), 110p.

ANNEXE

- Données rhéologiques des PP et PEBDL
- Programme du design de filière plate
- Plans et photographie de la filière

$\dot{\gamma}[s^{-1}]$	$\eta[Pa \cdot s](145^\circ)$	$\eta[Pa \cdot s](175^\circ)$	$\eta[Pa \cdot s](205^\circ)$
0.04	18327		
0.08	19146		
0.10		12510	8050
0.16	19556	12400	7960
0.20		11920	
0.25		12600	7720
0.32	18550		
0.40		12100	7310
0.64	17292	11600	6940
1.00		10900	6550
1.25	15443		
1.60		9900	5960
2.50		8600	5500
6.648		6107.100	
8.937		5247.846	
11.773		5240.805	
15.855		4660.990	
22.169		4014.615	
30.450		3487.685	
40.413		3169.772	
110.407		1817.820	
186.660		1330.762	
273.950		1006.753	
362.550		818.992	
212.824		1239.552	
242.848		1098.525	
291.233		936.623	
325.524		874.819	
320.016		789.375	
418.380		723.625	
478.979		637.085	
831.662		392.888	
1683.531		215.470	
2240.134		160.571	
3268.590		121.054	
3878.576		97.381	
4666.506		92.500	

Tableau 4.1 Données rhéologiques du PEBDL-FC1010

$\dot{\gamma}[s^{-1}]$	$\eta(180^\circ)$	$\eta(200^\circ)$	$\eta(220^\circ)$
0.1000	1806.3	1022.5	671.41
0.1585	1781.9	1017.1	670.72
0.2512	1749.7	1016.0	660.96
0.3981	1722.4	1006.5	657.38
0.6310	1676.6	993.13	652.60
1.0000	1621.3	976.21	644.86
1.5850	1549.1	947.92	631.64
2.5120	1458.9	910.49	612.07
3.9813	1350.6	865.04	587.60
6.3101	1230.5	807.19	557.61
10.001	1100.1	740.61	519.85
15.850	964.02	666.84	476.32
25.121	827.47	588.29	428.36
39.813	695.46	508.44	377.59
63.101	572.67	429.71	325.56
100.00	461.37	355.05	274.45

Tableau 4.2 Données rhéologiques du PP-Appryl

Extrudeuse	Polymère	Fréquence (tours/min)	Débit (kg/h)	Pression (bars)	Température (°T)
Haake	PEBDL	1.41	0.030	27.95	193
		2.83	0.069	46.23	201
		5.66	0.146	67.28	205
		11.30	0.310	93.15	203.5
		22.60	0.647	120.75	205
		45.20	1.33	143.18	204
		90.50	2.58	181.13	-
Kaufman	PP	0.10	0.189	7.00	245
		0.30	0.337	12.00	230
		0.60	0.934	27.60	229
		1.00	2.042	55.20	231
		2.00	3.388	62.10	211
		3.00	4.729	75.90	211
Kaufman	PEBDL	0.10	0.189	7.00	245
		0.50	0.0582	3.45	196
		1.00	0.147	37.95	203
		2.00	0.366	79.35	201
		4.00	0.890	120.75	195
		8.00	1.88	179.40	-
		16.00	4.66	213.90	-

Tableau 4.3 Synthèse des résultats d'extrusion monomatière

```

1  implicit none
2  double precision W, Q, ni, s, m, Qt, dx, a, Y(1000), tempo
3  double precision dpdt, pi, R, X(1000), H, p0, longz
4  character*72 bidon, result, resultat
5  integer i, nmax
6  parameter: pi = 3.141592740
7  common/param/W,ni,s,q,a,H
8  c.....
9  c
10 read(5, '(a)') bidon
11 read(5, '(a)') bidon a
12 read(5, '(a)') bidon H
13 read(5, '(a)') bidon H
14 read(5, '(a)') bidon W
15 read(5, '(a)') bidon W
16 read(5, '(a)') bidon Q
17 read(5, '(a)') bidon Q
18 read(5, '(a)') bidon ni
19 read(5, '(a)') bidon ni
20 read(5, '(a)') bidon m
21 read(5, '(a)') bidon m
22 read(5, '(a)') bidon p0
23 read(5, '(a)') bidon longz
24 read(5, '(a)') bidon nmax
25 read(5, '(a)') bidon result
26 read(5, '(a)') bidon resultat
27 c.....
28 c
29 write(6,*) a
30 write(6,*) H
31 write(6,*) W
32 write(6,*) Q
33 write(6,*) ni
34 write(6,*) m
35 write(6,*) p0
36 write(6,*) longz
37 write(6,*) nmax
38 write(6,*) resultat
39 write(6,*) 'a', 'degres'
40 write(6,*) 'H', 'metres'
41 write(6,*) 'W', 'metres'
42 write(6,*) 'Q', 'metres cubes par seconde'
43 write(6,*) 'ni', 'Pascais secondes'
44 write(6,*) 'm', 'Pascais'
45 write(6,*) 'p0', 'Pa'
46 write(6,*) 'longz', 'longz, metres'
47 write(6,*) 'nmax'
48 write(6,*)
49 open(unit=4, file=result, status='unknown')
50 open(unit=8, file=result, status='unknown')
51 arad = 2.040 * pi * a / 360.040
52 do i = 1, nmax
53   write(6,*) X(i), Y(i)
54   write(6,*) X(i)+1.0d-2, Y(i)+1.0d+2
55   tempo = X(i) * dtan(arad)
56   numer = tempo * Y(i)/2.0d0
57   write(7,*) X(i), numer
58   write(7,*) X(i), numer
59   enddo
60 do i = 1, nmax
61   write(6,*) X(i) * dtan(arad)
62   numer = tempo * Y(i)/2.0d0
63   write(7,*) X(i)+1.0d+2, numer+1.0d+2
64   write(7,*) X(i), numer
65   enddo
66 do i = 1, nmax
67   tempo = X(i) * dtan(arad)
68   numer = tempo * Y(i)/2.0d0
69   write(7,*) X(i)+1.0d+2, numer+1.0d+2
70   write(7,*) X(i), numer
71   enddo

```

```

72 do i = nmax, 1, -1
73   tempo = X(i) * dtan(arad)
74   numer = tempo * Y(i)/2.0d0
75   write(7,*) X(i)+1.0d+2, numer+1.0d+2
76   write(7,*) X(i), numer
77   c
78   enddo
79   close(7)
80   close(8)
81   end
82

```

```

1  implicit none
2  double precision W, Q, ni, s, m, Qt, dx, a
3  double precision dpdt, pi, R, X(1000), H, p0, longz
4  double precision denom, numer
5  character*72 bidon, result, resultat
6  integer i, nmax
7  parameter: pi = 3.141592740
8  common/param/W,ni,s,q,a,H
9  c.....
10 c
11 read(5, '(a)') bidon
12 read(5, '(a)') bidon a
13 read(5, '(a)') bidon H
14 read(5, '(a)') bidon H
15 read(5, '(a)') bidon W
16 read(5, '(a)') bidon W
17 read(5, '(a)') bidon Q
18 read(5, '(a)') bidon Q
19 read(5, '(a)') bidon ni
20 read(5, '(a)') bidon ni
21 read(5, '(a)') bidon m
22 read(5, '(a)') bidon m
23 read(5, '(a)') bidon p0
24 read(5, '(a)') bidon longz
25 read(5, '(a)') bidon nmax
26 read(5, '(a)') bidon result
27 read(5, '(a)') bidon resultat
28 read(5, '(a)') bidon result2
29 read(5, '(a)') bidon resultat2
30 c.....
31 c
32 echo
33 c.....
34 c
35 write(6,*) a
36 write(6,*) H
37 write(6,*) W
38 write(6,*) Q
39 write(6,*) ni
40 write(6,*) m
41 write(6,*) p0
42 write(6,*) longz
43 write(6,*) nmax
44 write(6,*) resultat
45 write(6,*) 'a', 'degres'
46 write(6,*) 'H', 'metres'
47 write(6,*) 'W', 'metres'
48 write(6,*) 'Q', 'kilogrammes par heure'
49 write(6,*) 'ni', 'metres cubes par seconde metre'
50 write(6,*) 'm', 'Pascais secondes'
51 write(6,*) 'p0', 'Pa'
52 write(6,*) 'longz', 'longz, metres'
53 write(6,*) 'nmax'
54 write(6,*)
55 s = 1/ni
56 x = 0.040 * dx
57 open(unit=4, file=result, status='unknown')
58 do i = 1, nmax
59   write(6,*) X, R(dabs(X))
60   enddo
61   close(4)
62   c
63   c
64   c
65   c
66   c
67   c
68   c
69   c
70   c
71   c

```

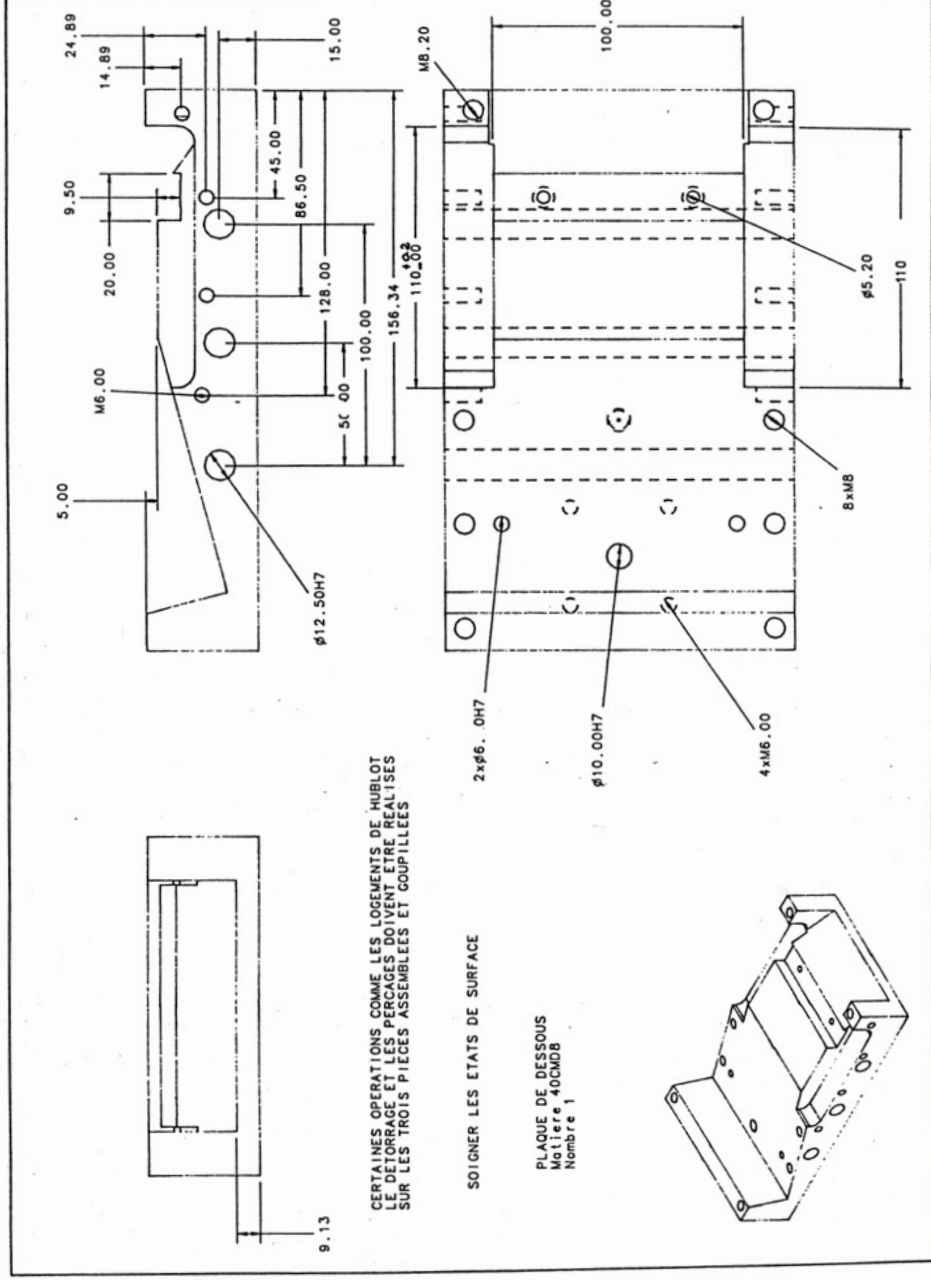
```

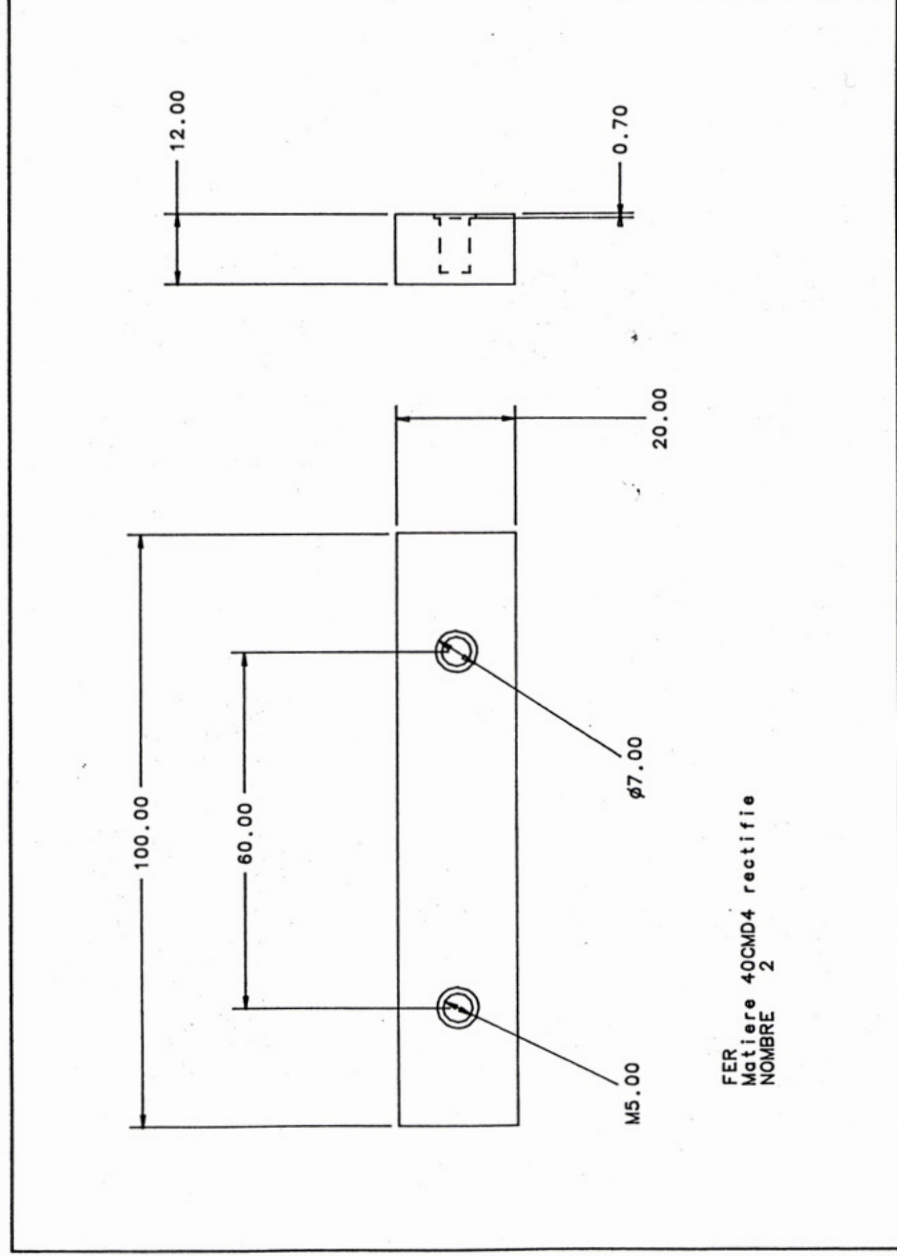
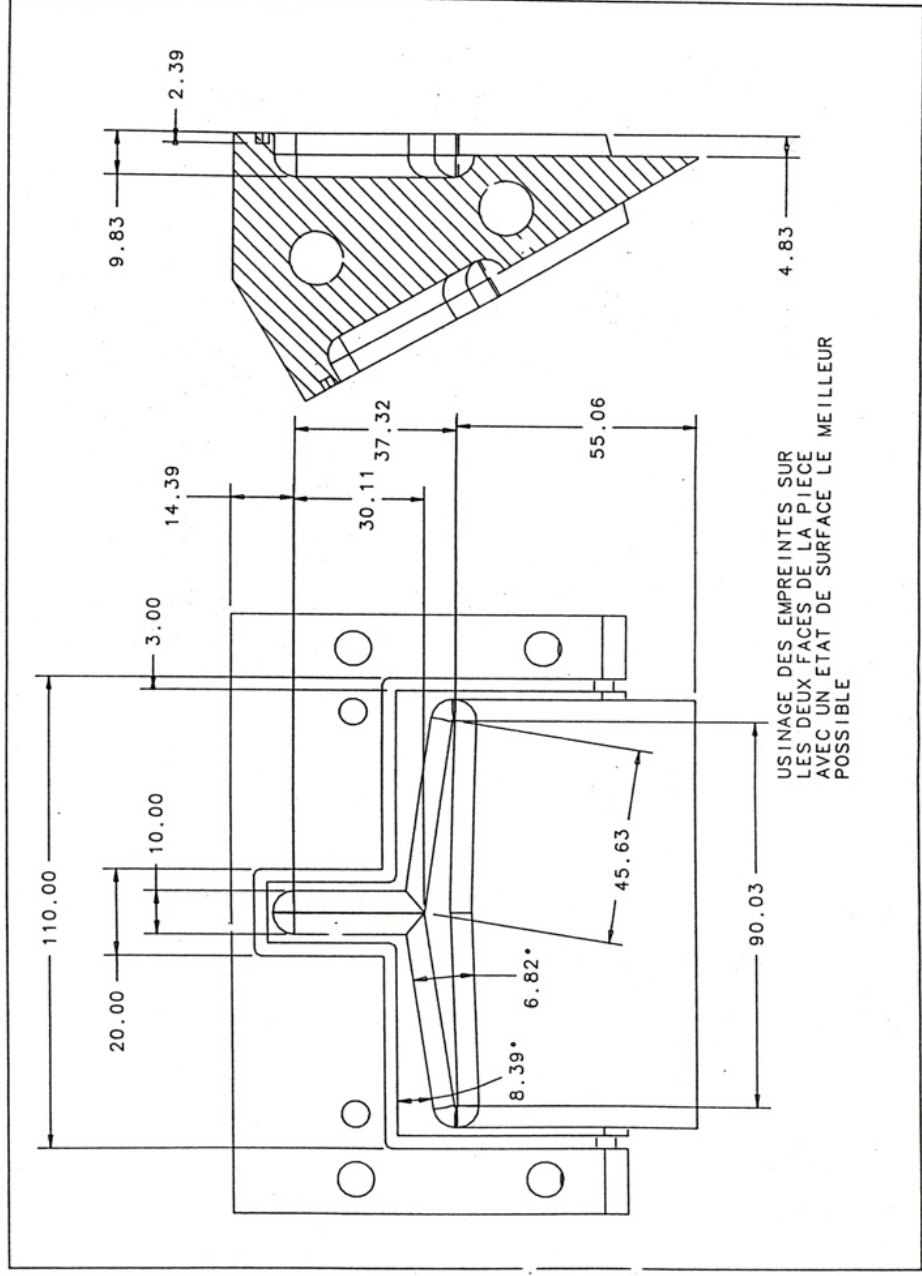
72 c.....
73 c
74 c
75 c
76 numer = 2.040 * m * ((Q*M*(3.000-s)/pi)**ni)
77 denom = R(0.040)**(3.0d0*ni-1)
78 dpdt = numer / denom
79 write(6,*) 'la perte de charge dp/dh=', dpdt, 'Pascais par metres'
80 write(6,*) 'delta p=', dpdt * W * 'Pascais'
81 write(6,*) 'delta p=', dpdt * W * 1.0d-5, 'Bars'
82 c
83 write(6,*)
84 write(6,*)
85 write(6,*)
86 write(6,*) 'delta p selon l\'axe z=', lea*longz*1.0d-5, 'Bars'
87 write(6,*) 'delta p selon l\'axe x=', dpdt * W * 1.0d-5, 'Bars'
88 write(6,*)
89 write(6,*)
90 c
91 c.....
92 double precision function R(x)
93   implicit none
94   x = x
95   double precision X, numer, denom, tempo, pi, arad
96   double precision Y, dtan(arad)
97   common/param/W,ni,s,q,a,H
98   c
99   arad = 2.040 * pi * a / 360.040
100  numer = ((13-s)/pi)**ni * ((X**(2*ni+1)) * (W * X)**ni)
101  denom = (2.040*(s-2.040))**ni * dtan(arad)
102  tempo = numer / denom
103  return tempo * ( 1.0d0 / (3.0d0*ni-1) )
104
105
106

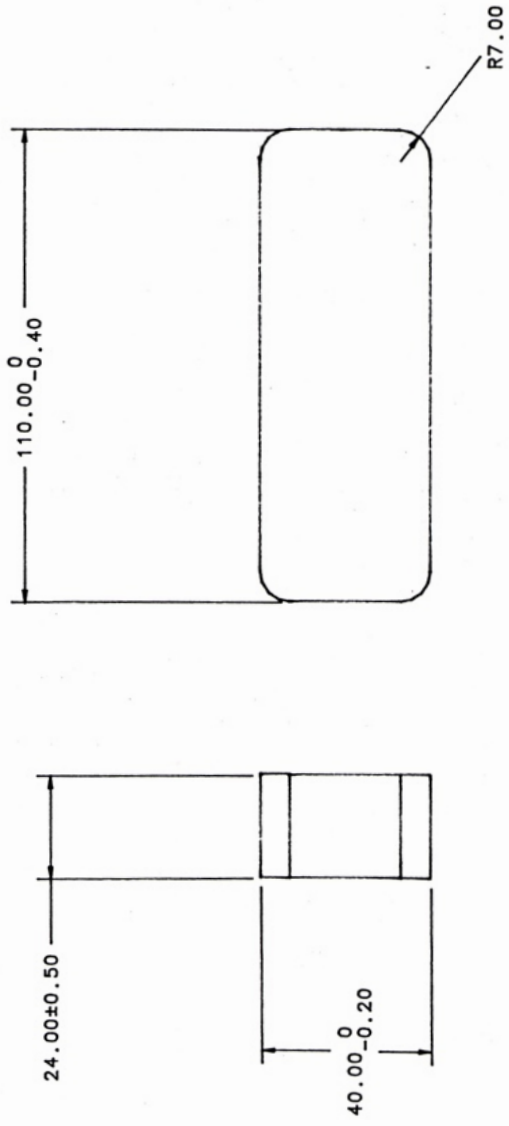
```


1	angle du cintre (a) en degres	fixe
2	5.0d+0	fixe
3	epaisseur de la couche (H)	fixe
4	5.00d-3	fixe
5	rayon de cintre (M)	fixe
6	0.0d+0	variable
7	debit massique (Qt)	fixe
8	2.0d+1	fixe
9	indice de pseudo-plasticite (n)	fixe
10	0.5d+0	fixe
11	0.0d+0	fixe
12	1.0d+4	variable
13	pression a l'entree (p0) en Bars	fixe
14	1.0d+2	fixe
15	longueur de la filiere (longz)	fixe
16	5.0d+0	fixe
17	nombre d'iterations (nmax)	fixe
18	100	fixe
19	fichier des resultats pour R(x) (result)	fixe
20	Rx	fixe
21	fichier des resultats pour dp/dl (result2)	fixe
22	prof	fixe

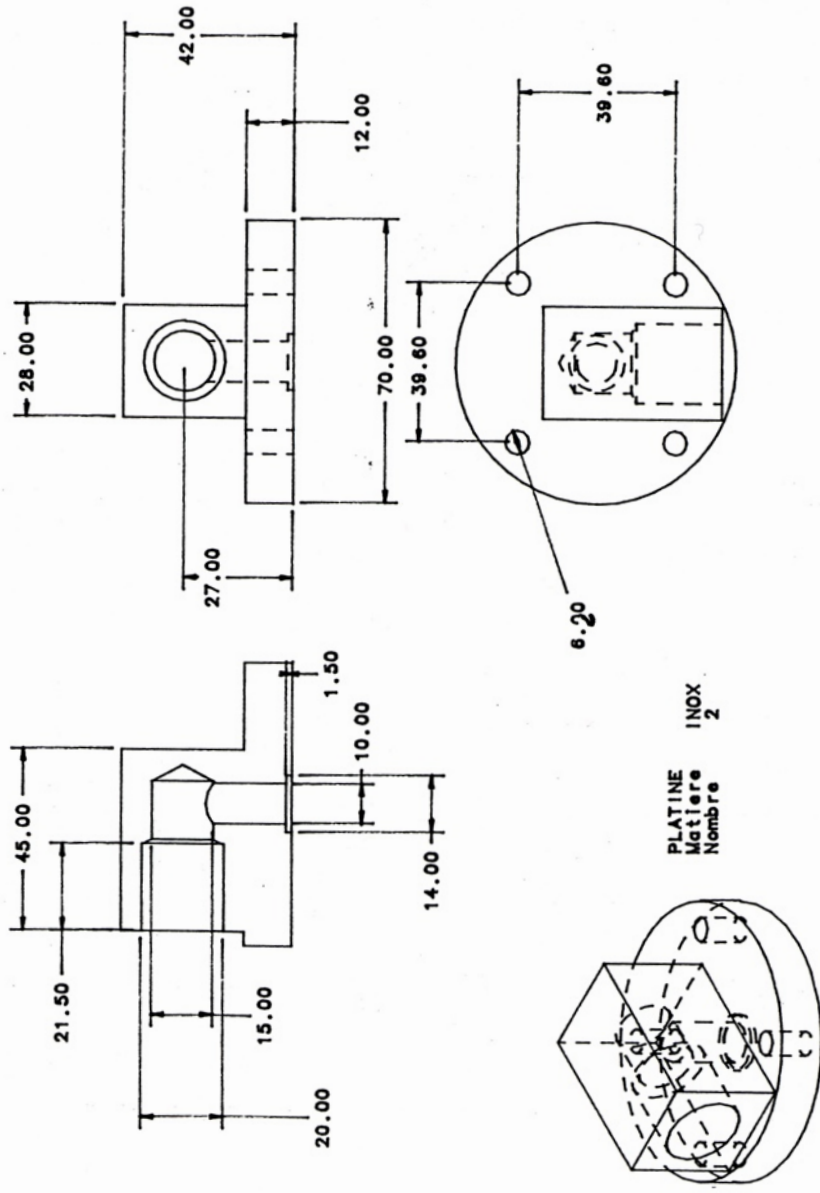
SDRC I-DEAS VI.i: Solid_Modeling







HUBLOT
Matiere PYREX recuit aux faces polies
Nombre 2



PLATINE
Matiere INOX
Nombre 2

