

T

Jan 26 1990

50376  
1990  
354

# THESE de DOCTORAT d'UNIVERSITE

(nouveau régime, arrêté du 5 Juillet 1984)

Présentée

à l'UNIVERSITE DES SCIENCES ET TECHNIQUES DE  
LILLE - FLANDRES - ARTOIS

Productique, Automatique et Informatique Industrielle

Par

Pierre DEVOS  
(Ingénieur de l'Industrie et des Mines  
à l'Ecole des Mines de Douai)



## CONTRIBUTION A L'OPTIMISATION DE LA CONDUITE D'UNE PRESSE A INJECTER LES POLYMERES THERMOPLASTIQUES

Soutenue le 10/07/90 devant la commission d'examen

M. P. BORNE  
Mme G. DAUPHIN-TANGUY  
M. M. STAROSWIECKI  
Mme S. DEGALLAIX  
M. J.P. HAUTIER  
M. J. LIENARD  
M. J. PABIOT

Président  
Rapporteurs  
Examineurs

Directeur de Thèse : P. BORNE, Directeur Scientifique de  
l'Institut Industriel du Nord (I.D.N)

A la demande de la Société qui a soutenu cette étude, ce document doit  
rester strictement confidentiel

REMERCIEMENTS
---------------

*Ce travail a été réalisé dans les laboratoires et les ateliers du Département Technologie des Polymères et Composites de l'Ecole des Mines de Douai, en collaboration avec la Société X\*.*

*Mes remerciements vont à Messieurs M. GERENTE et G. DEFRANCE, Directeurs de l'Ecole des Mines de Douai, Messieurs Y. LECOINTE et D. LANSIAUX, Sous-Directeurs, pour m'avoir autorisé à préparer cette thèse dans leur établissement et pour m'avoir fait bénéficier des équipements du Centre de Recherches de l'Ecole.*

*Je suis reconnaissant envers le personnel du Département Technologie des Polymères et Composites, envers Mesdames C. ANCELLE et M. DELSERT qui ont largement contribué à la réalisation matérielle du document et en particulier envers Messieurs E. LORTHIOIR, M. RYCKEBUSCH et Mademoiselle M. F. LACRAMPE qui m'ont conseillé et encouragé.*

*Je suis particulièrement débiteur envers Monsieur J. LIENARD pour les conseils et l'intérêt qu'il a manifesté pour ce projet, Monsieur P. BORNE, Directeur Scientifique de l'IDN qui a bien voulu me faire l'honneur de présider ce jury.*

*Madame G. DAUPHIN-TANGUY, Professeur, responsable de l'option production industrielle à l'IDN et Monsieur M. STAROSWIECKI, Professeur à l'EUDIL, ont bien voulu être rapporteurs de ce travail, je leur en sais gré. Je remercie aussi Madame S. DEGALLAIX, Professeur à l'IDN, et Monsieur J. P. HAUTIER, Responsable du Département Génie Energétique à l'Ecole des Mines de Douai, pour avoir bien voulu participer à ce jury.*

*Je dois remercier spécialement Monsieur J. PABIOT, Conseiller Scientifique et Responsable du Département Technologie des Polymères et Composites à l'Ecole des Mines de Douai, pour avoir proposé, suivi cette étude et fait de nombreux commentaires et critiques, ainsi que pour son encouragement continu.*

*\* Les clauses de confidentialité liées à cette étude n'autorisent pas la désignation de cette Société.*

S O M M A I R E
-----------------

REMERCIEMENTS
---------------

INTRODUCTION
--------------

p 6

1. DEFINITION ET OBJECTIFS DE LA RECHERCHE
--

p 7

2. SITUATION DE LA RECHERCHE
------------------------------

2.1. L'injection des polymères thermoplastiques	p 9
---	-----

p 10

2.1.1. Principe et terminologie	p 10
---------------------------------	------

p 10

2.1.2. Le groupe de fermeture-verrouillage d'une presse à injecter les thermoplastiques	p 13
--	------

p 13

2.1.3. Le groupe de plastification-injection	p 17
--	------

p 17

A) Fonctionnement du groupe de plastification-injection pendant la phase de plastification :	p 19
---	------

p 19

- la zone d'alimentation	p 19
--------------------------	------

p 19

- la zone de plastification-compression	p 20
---	------

p 20

- la zone de pompage	p 22
----------------------	------

p 22

B) Fonctionnement du groupe de plastification-injection au cours de l'injection dynamique :	p 27
--	------

p 27

- la phase dynamique d'injection	p 27
----------------------------------	------

p 27

- la phase quasi-statique d'injection	p 31
---------------------------------------	------

p 31

- description et comparaison des différents modes de passage en pression de maintien	p 37
---	------

p 37

<b>2.2. Les difficultés rencontrées sur les sites de production : notion de qualité d'une pièce injectée</b>	p 42
2.2.1. Les raisons essentielles du manque de qualité :	p 46
A) Les perturbations qui agissent sur le processus	p 46
B) Les contraintes qui limitent le processus	p 46
2.2.2. Analyse des défauts de moulage en production :	p 47
A) Présentation du site industriel	p 47
B) Analyse des rebuts de fabrication	p 47
<b>2.3. Principe de l'adaptation de commande d'une presse pendant le cycle d'injection</b>	p 55
2.3.1. Définitions et hypothèses	p 55
2.3.2. Représentation du cycle d'injection dans un diagramme PVT	p 61
2.3.3. Les dispositifs de commande basés sur les diagrammes PVT	p 64

### **3. PROGRAMME DE LA RECHERCHE**

3.1. Organisation de la recherche

p 69

p 70

3.2. Description du modèle de commande utilisé

p 71

### **4. MISE EN PLACE DES MOYENS EXPERIMENTAUX ET DETERMINATION DE LA LOI DE COMMANDE UTILISEE**

4.1. L'unité d'injection et ses périphériques traditionnels

p 78

p 80

4.2. Les dispositifs de contrôle de la qualité de la pièce

p 81

4.3. Les matières premières utilisées

p 81

4.4. L'outillage instrumenté

p 82

4.5. Détermination de la loi de commande utilisée

p 83

4.5.1. Etude d'un régulateur proportionnel à gain constant

p 85

4.5.2. Etude d'une commande adaptative à gain programmé

p 88

4.5.3. Addition d'un régulateur P.I.D.

p 100

<b>5. LES TRAVAUX ET RESULTATS EXPERIMENTAUX</b>
--

	p 111
<b>5.1. Choix de l'emplacement des capteurs de pression implantés dans l'outillage</b>	p 112
5.1.1. Emplacement du capteur de pression utilisé pour déclencher le passage en pression de maintien :	p 112
A) Capteur de pression à l'entrée du moule	p 112
B) Capteur de pression au fond du moule	p 113
5.1.2. Emplacement du capteur de pression utilisé pour contrôler la phase de maintien en pression	p 115
5.1.3. Influence de l'emplacement du capteur de pression sur la qualité des pièces injectées	p 117
<b>5.2. Influence d'une perturbation de température du polymère sur la qualité des pièces</b>	p 125
<b>5.3. Influence d'une perturbation de température de l'outillage sur la qualité des pièces</b>	p 128
<b>5.4. Influence du niveau et de la durée d'application de la pression de maintien sur les caractéristiques géométriques de la pièce</b>	p 130
5.4.1. Influence du niveau de la pression de maintien	p 130
5.4.2. Influence de la durée du maintien	p 137
<b>5.5. Analyse des contraintes internes dans les pièces</b>	p 144
5.5.1. Origines des contraintes internes	p 145
5.5.2. Le problème de la mesure des contraintes internes	p 148
5.5.3. Méthode de mesure et de comparaison des contraintes internes	p 150
A) Traitements thermiques sur pièces complètes	p 151
B) Traitements thermiques sur des échantillons	p 152
5.5.4. Présentation des résultats	p 159
A) Résultats obtenus après les recuits sur pièce	p 159
B) Résultats obtenus au cours des essais de dilatométrie	p 164

<b>5.6. Analyse de la résistance d'une ligne de soudure</b>	p 173
5.6.1. Généralités	p 173
5.6.2. Présentation de l'étude	p 174
A) Essais préliminaires en boucle fermée sur la pression dans l'empreinte	p 175
B) Comparaison des deux modes d'asservissement	p 178
C) Seconde série d'essais à température de moule variable	p 185
D) Conclusion et interprétation	p 191

<b>6. SYNTHÈSE ET CONCLUSION</b>
----------------------------------

p 195

<b>BIBLIOGRAPHIE</b>
----------------------

p 198

<b>ANNEXES</b>
----------------

p 201

Annexe 1 p 202

Annexe 2 p 205

Annexe 3 p 206

Annexe 4 p 207

Annexe 5 p 208

Annexe 6 p 224

Annexe 7 p 228

Annexe 8 p 240

<b>REPERTOIRE DES FIGURES</b>
-------------------------------

p 248

## INTRODUCTION

La production mondiale de polymère est, de nos jours, supérieure en volume à celle de l'acier. Plus de cent millions de tonnes de résines diverses ont été fabriquées dans le monde en 1986.

Ces matériaux sont appliqués dans des domaines très variés. En effet, leurs applications sont de plus en plus souvent présentes autour de nous. Certaines résines possèdent des caractéristiques mécaniques suffisantes pour justifier leur emploi dans des applications de pointe.

Par ailleurs, grâce à leur faible densité, les polymères sont des matériaux de substitution qui permettent d'alléger, à résistance égale certaines structures. Ils sont aussi utilisés pour créer de nouvelles pièces.

Le polymère, matière première, subit une opération de transformation et donne ainsi un objet fini.

Les techniques de mise en oeuvre sont très nombreuses. Elles sont propres aux types de pièce produite, ainsi l'extrusion permet de fabriquer des profilés ou produits longs, l'extrusion soufflage est utilisée pour produire des corps creux, l'injection sous haute pression autorise la fabrication de pièces de géométrie complexe qui intègrent de plus en plus de fonctions, etc...

Le secteur français de la transformation présente un taux de croissance annuel d'environ 10%. Ce dernier n'est pas sans contrainte. En effet, il entraîne l'apparition dans les principales unités de production de "plan qualité". Ceci répond aux exigences croissantes des "donneurs d'ordre", les fabricants d'automobiles par exemple.

La recherche d'une qualité élevée entraîne plusieurs niveaux d'action. Ainsi, le contrôle des matières premières est affiné. Les objets fabriqués, sont soumis à des contrôles sévères. Enfin, les machines de transformation, elles-mêmes, n'échappent pas au phénomène.

Une nouvelle préoccupation apparaît : un contrôle de processus plus efficace. Nous présentons donc un travail qui correspond à ce besoin et nous l'abordons dans le domaine de l'injection des thermoplastiques.

**1. DEFINITION ET OBJECTIFS DE LA RECHERCHE**

Il s'agit d'une analyse paramétrique du processus d'injection sous haute pression des polymères thermoplastiques. Ce travail est basé d'une part sur l'instrumentation d'une presse d'injection et de son moule, d'autre part sur la mise en place d'un auxiliaire de commande particulier.

L'objectif est une amélioration des performances des machines qui doit permettre de diminuer les taux de rebuts qui affectent la productivité des presses, et d'assurer un meilleur contrôle des dimensions des pièces.

De nos jours, l'obtention d'une qualité géométrique constante est remise en cause par la notion de flexibilité de production. En effet, la stabilisation du processus d'injection sur un point de fonctionnement donné est difficile. Néanmoins, quand cet état d'équilibre est atteint, les machines d'injection offrent une répétabilité acceptable pour la qualité dimensionnelle des objets fabriqués. Cet état de fait rend très coûteux les arrêts ou les changements de production. La situation impose de longues campagnes de production afin de limiter les pertes, notamment celles qui sont dues aux démarrages de production.

Aussi deux phénomènes contradictoires sont en présence :

- l'apparition depuis quelques années de solutions technologiques efficaces pour préparer une presse d'injection en vue d'un changement de production rapide.

- la subsistance d'une phase de démarrage de la production qui génère un taux de rebut inacceptable.

Ainsi, certaines difficultés n'ont pas encore été vaincues. Elles sont dues à la présence de phénomènes physiques qui agissent sur des échelles de temps très différentes.

Notre objectif essentiel est donc d'améliorer les conditions de démarrage d'une production et d'annuler les rebuts de fabrication qui en découlent. Nous désirons aussi enrayer l'apparition des pièces défectueuses en cours de production. Enfin, nous recherchons le système de production sous "zéro défaut".

Ces objectifs sont à l'origine du programme de recherche bâti dans un contexte industriel d'une part et à partir des travaux scientifiques déjà menés d'autre part.

**2. SITUATION DE LA RECHERCHE**

Avant d'exposer les problèmes d'injection qui sont rencontrés sur les sites industriels, nous allons définir la technologie de transformation par injection sous haute pression. En effet, il est nécessaire de faire une analyse détaillée du procédé pour comprendre les défauts qu'il occasionne. Puis, nous décrirons les solutions apportées jusqu'à présent et leurs difficultés d'application.

## 2.1. L'injection des polymères thermoplastiques

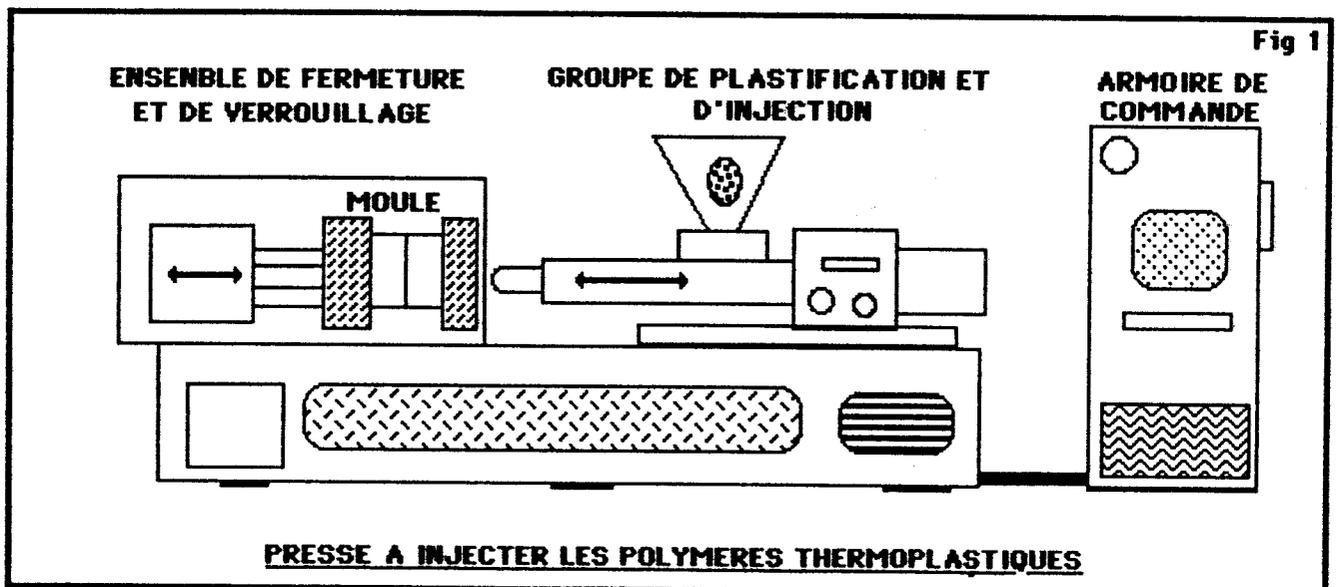
### 2.1.1. Principe et terminologie

Le procédé d'injection sous haute pression des résines thermoplastiques est important : il intéresse en valeur, plus de 40% de l'industrie de transformation des matières plastiques. Les presses d'injection représentent 60% du parc-machine des transformateurs.

L'injection permet de fabriquer des pièces de géométrie complexe en grande série, suivant un principe simple de fonctionnement.

En effet, le polymère utilisé est chauffé afin de lui donner la consistance d'un liquide visqueux. Ce liquide est ensuite injecté dans un moule, réalisé en plusieurs parties. Le polymère se refroidit jusqu'à l'état solide à la suite de quoi la pièce est extraite après ouverture de l'outillage. Une nouvelle injection est réalisée quand l'outillage est à nouveau fermé.

Une machine d'injection présente toujours l'allure qui suit (fig.1)



Cette machine est composée de trois éléments principaux :

- le groupe de fermeture qui supporte le moule
- le groupe d'injection-plastification
- l'ensemble de commande de la machine

Nous décrivons plus loin le rôle des deux premiers sous-ensembles. Nous nous intéresserons de manière plus marquée au groupe d'injection. En effet, notre étude concerne plus particulièrement le dispositif de commande de l'unité d'injection. L'armoire de commande gère l'ensemble des paramètres de réglage de la machine. De même, elle assure le séquençement des différentes opérations et le contrôle des sécurités qui sont installées sur la machine.

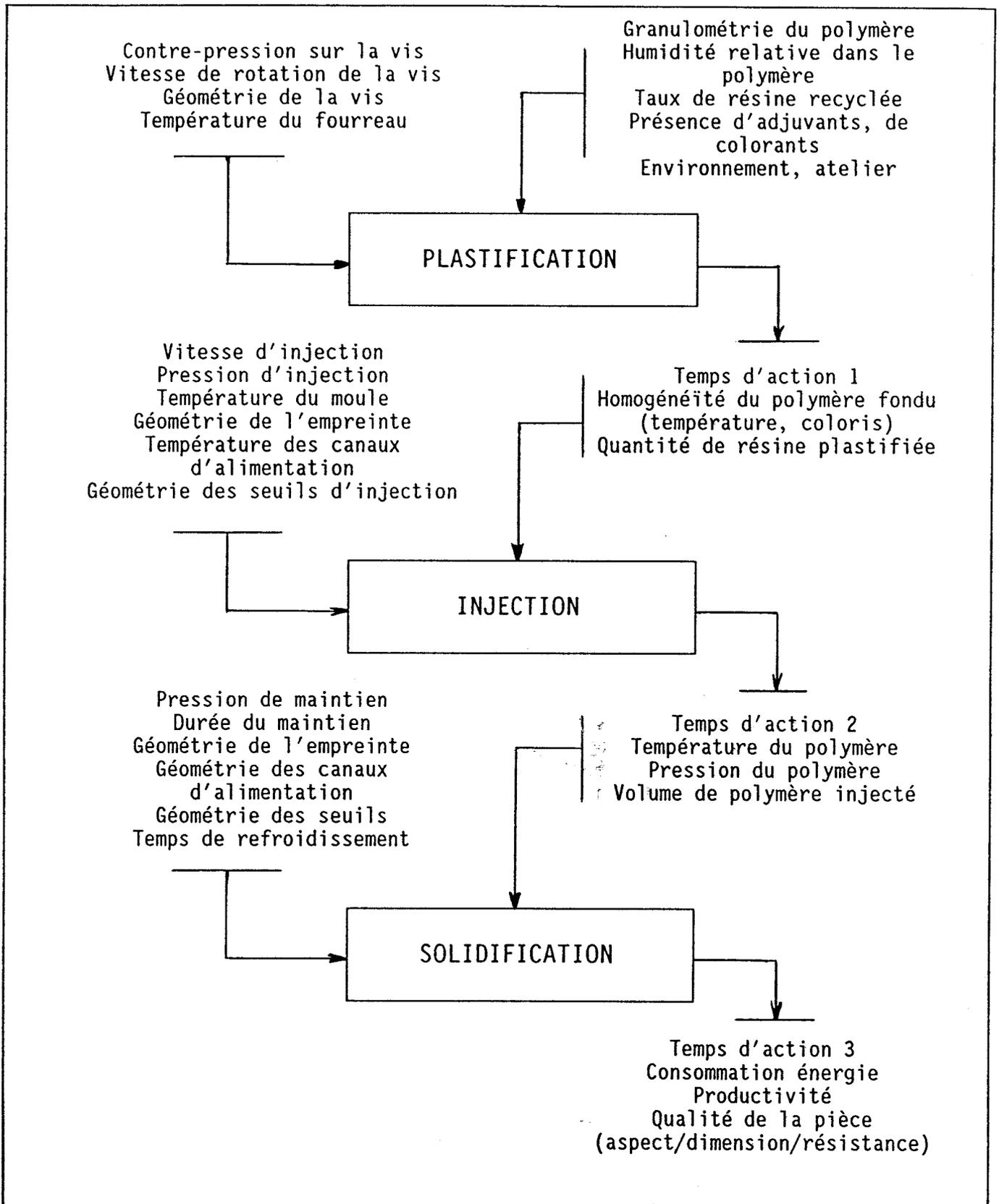
Le processus d'injection est un procédé de transformation discontinu et complexe faisant intervenir trois phénomènes physiques :

- la plastification du polymère : elle est effectuée avec un système vis-fourreau. Ce dernier provoque la fusion du polymère en lui apportant les calories nécessaires par chauffage électrique du fourreau d'une part et par malaxage et cisaillement d'autre part. Le groupe de plastification prépare la dose de polymère qui est ensuite injectée

- l'injection du polymère : la vis de l'ensemble de plastification joue le rôle du piston d'une seringue. Le polymère fondu est injecté sous un débit élevé et une pression importante dans le moule

- la solidification du polymère : l'outillage présente une température faible par rapport à celle du polymère qu'il reçoit pendant son remplissage. Le polymère se refroidit alors pour retrouver un état solide et former la pièce.

Ces différentes phases forment un système en cascade (1) représenté comme suit :



Ce schéma montre la multiplicité des grandeurs d'entrée du processus d'injection. Une presse d'injection est une machine dont les réglages sont complexes. La difficulté essentielle provient de l'interdépendance de certaines grandeurs d'entrée. Nous traiterons des cas significatifs dans le chapitre sur la notion de qualité.

La modification de certains paramètres de réglage entraîne des phénomènes complexes. Un exemple connu concerne l'influence de la vitesse d'injection sur la pression d'injection. En effet, une injection à vitesse lente favorise les échanges thermiques entre le polymère et l'outillage. Le polymère se refroidit vite. Il faut développer une pression élevée pour remplir l'outillage. Pour limiter ce niveau de pression, nous pouvons augmenter la vitesse d'injection. Cette modification provoque deux effets :

- une augmentation du débit de polymère entraîne des pertes de charges à l'écoulement qui sont croissantes. Elles produisent une élévation de la pression d'injection.

- le passage au travers des seuils d'injection provoque un échauffement du polymère par dissipation visqueuse. Un débit de polymère élevé entraîne un échauffement important qui fait chuter la viscosité du polymère donc la pression d'injection.

Par ailleurs, ces modifications de réglage en fonctionnement peuvent avoir des conséquences secondaires. En effet, les phénomènes d'auto-échauffement qui affectent le polymère, contrarient l'état d'équilibre thermique de l'outillage. La température de ce dernier évolue lentement vers un point de fonctionnement différent du régime permanent si le système de refroidissement est mal adapté.

Un nouveau réglage de machine peut donc être fiable de manière instantanée et incorrect à plus long terme.

Nous pouvons donner une multitude d'exemples qui confirment les difficultés d'identification du processus d'injection. La complexité du système sera cependant notablement réduite par le dispositif de commande que nous avons développé et qui absorbe en partie les perturbations subies par un processus d'injection conventionnel.

La description qui suit reste très générale, elle traite du fonctionnement du groupe de fermeture d'une presse d'une part et du rôle joué par l'ensemble de plastification de ce type de machine d'autre part.

### 2.1.2. Le groupe de fermeture-verrouillage d'une presse à injecter les thermoplastiques

Le principe de fonctionnement de cette partie de machine est simple. En effet, deux objectifs sont à atteindre :

- d'une part la fermeture/ouverture de l'outillage
- d'autre part le verrouillage de ce dernier.

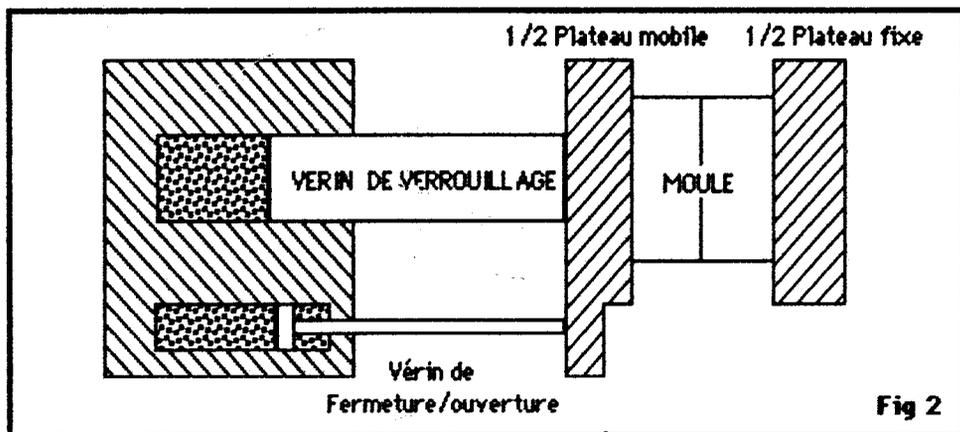
La fermeture/ouverture du moule est un mouvement de grande amplitude. Il est fait à grande vitesse avec des forces faibles. A l'inverse, le verrouillage est un mouvement de faible amplitude mais de puissance élevée. La capacité d'un système de fermeture est définie à l'aide de deux paramètres :

- la force de verrouillage disponible (de 1 à 10000 tonnes)
- les dimensions du plateau porte-moule (surface comprise entre  $1 \text{ dm}^2$  et  $6 \text{ m}^2$ ).

Les différents dispositifs de verrouillage se distinguent par la technologie employée. De manière générale, trois catégories d'unité de fermeture sont définies (figures 2, 3 et 4) d'après (2).

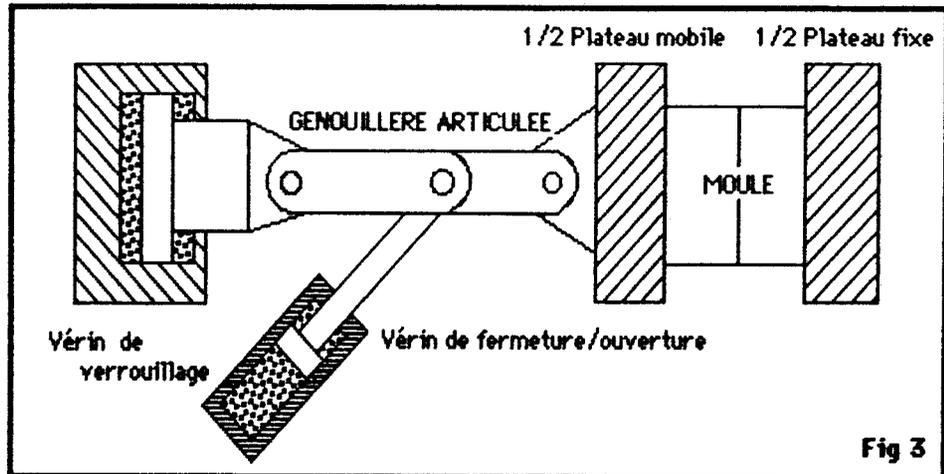
#### a) L'unité de fermeture hydraulique

- la fermeture et le verrouillage sont exécutés avec un actionneur hydraulique (fig. 2)



- avantages :
- contrôle direct de la force de verrouillage
  - effort de verrouillage central qui entraîne une bonne répartition des pressions
- inconvénients :
- taille importante des pièces en mouvement
  - volumes d'huile déplacés importants
  - mouvements de fermeture/ouverture lents

b) L'unité de fermeture hydraulique à genouillère  
(fig.3)



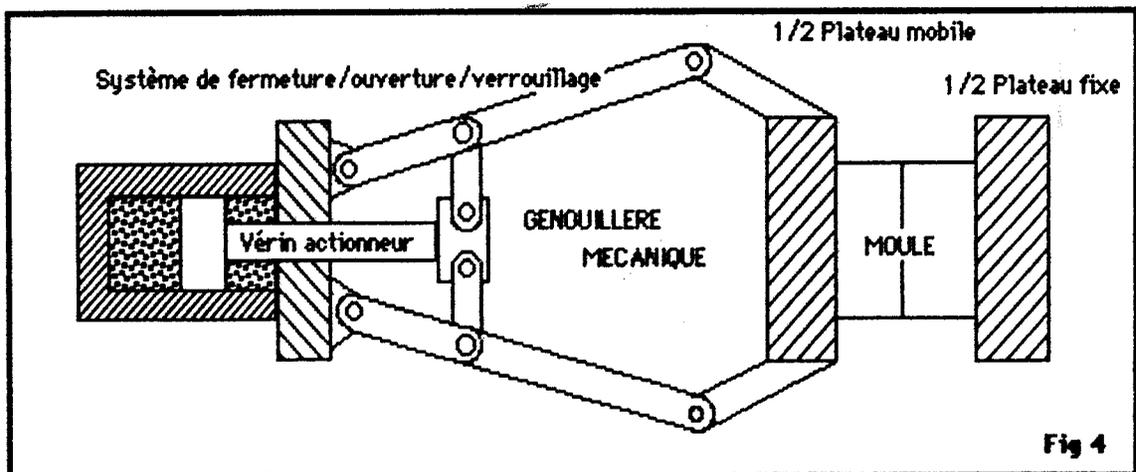
avantages :

- vitesse de fermeture/ouverture élevée
- faible consommation d'huile
- contrôle direct de la force de fermeture
- effort de verrouillage central

inconvénients :

- ce dispositif est réputé pour ne pas présenter d'inconvénient particulier. Sa seule limite concerne la force de verrouillage. En effet, au delà de 600 tonnes, le dimensionnement de la genouillère se traduit par un encombrement élevé

c) L'unité de fermeture mécanique (fig.4)



avantages :

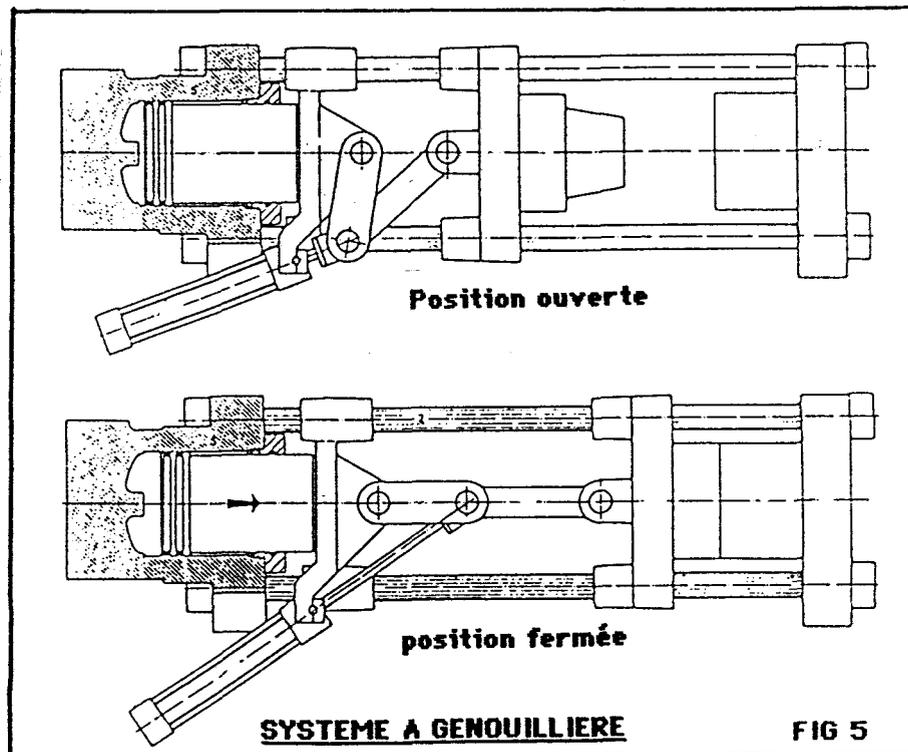
- vitesse de fermeture/ouverture élevée
- déformations axiales faibles

- inconvenients :
- contrôle difficile de la force de verrouillage
  - chocs sur le plan de joint
  - fatigue mécanique des articulations
  - flexion du plateau mobile

D'autres solutions technologiques existent sur le marché. Néanmoins, un parc machine classique est souvent constitué avec ce type de machine.

Le système de fermeture à genouillère est celui qui offre le plus d'avantages. Il a été utilisé pour réaliser notre étude.

Le schéma 5 montre un système à genouillère en position ouverte puis fermée. Sur ce type de machine, la force de verrouillage est imposée grâce à la pression hydraulique. Cette dernière est contrôlée avec un dispositif de régulation en boucle fermée.



Le groupe de fermeture/ouverture joue un rôle passif en regard de la notion de qualité en injection. Son rôle essentiel consiste à supporter l'outillage d'une part et à interdire l'ouverture de ce dernier d'autre part.

Le dernier point est essentiel. En effet, le remplissage de l'empreinte du moule définit un régime de pression. Ce dernier est rapporté à la surface du plan de joint de l'outillage. Une force minimale de fermeture est

alors calculée. Elle permet d'adapter la presse d'injection au moule utilisé.

Les presses d'injection représentent des investissements importants (7 millions de francs pour une presse de 3000 tonnes de force de fermeture). Les outillages coûtent aussi très chers (3 millions de francs pour un moule de pare-choc). Il est intéressant d'adapter au mieux un moule et une machine d'injection. Cela explique l'apparition de logiciels qui simulent les écoulements du polymère dans les outillages. Le calcul des champs de pression qui apparaissent dans le moule, permet d'optimiser le réseau d'alimentation de l'empreinte. Ainsi, nous pouvons installer l'outillage sur une machine dont la puissance est adaptée aux besoins de la production.

De la même manière, la cadence de production et la géométrie de l'outillage permettent de définir les capacités minimales du groupe de plastification. Ces derniers peuvent plastifier et injecter, selon leur taille, de quelques grammes à cent kilogrammes de polymère. La pression de ce dernier peut s'élever jusqu'à 2500 bars.

### 2.1.3. Le groupe de plastification - injection

Le groupe de plastification - injection permet de fluidifier le polymère puis de l'injecter. La qualité de la plastification est liée, d'une part à la stabilité de la température du polymère fondu cycle après cycle, d'autre part à l'homogénéité de la masse fondue.

Le principe de la mise en fusion du polymère est identique à celui qui est utilisé dans la technique de transformation par extrusion. Nous nous inspirons des états de la recherche dans ce dernier domaine principalement afin d'explicitier le phénomène de plastification.

L'étude du groupe de plastification - injection est décomposée en deux parties :

- la phase de plastification
- la phase d'injection.

#### A) Fonctionnement du groupe de plastification-injection pendant la phase de plastification

Le groupe de plastification est composé de deux parties essentielles :

- le groupe de motorisation (moteur et réducteur)
- le système vis-fourreau (vis d'Archimède)

Le groupe de motorisation entraîne la vis de plastification dans son mouvement de rotation. Cette vis assure le débit de polymère fondu vers l'avant du groupe de plastification.

Le système de plastification est constitué d'une part d'un fourreau métallique dont la température est régulée, et d'autre part d'une vis d'Archimède de géométrie singulière ; celle-ci est mobile en rotation et en translation. Elle est placée à l'intérieur de ce fourreau. L'ensemble prend l'allure qui suit (fig.6) :

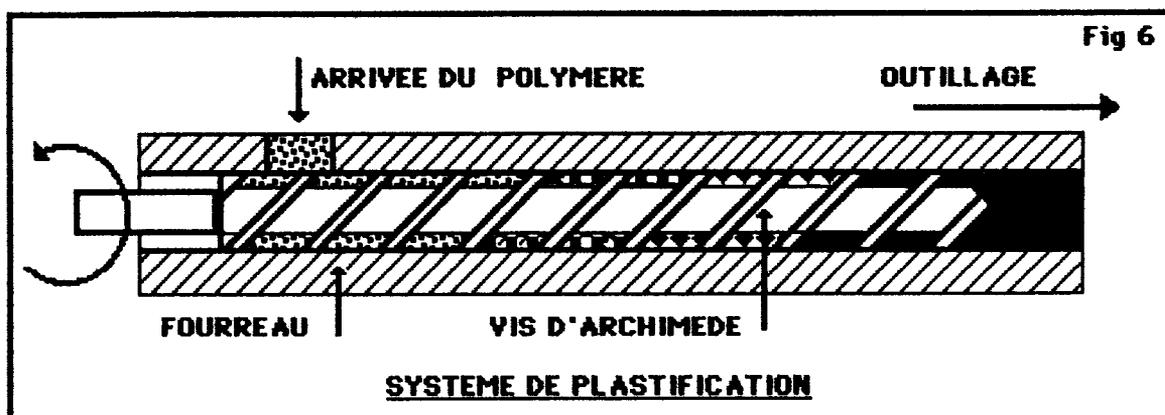


FIG.6 : SYSTEME DE PLASTIFICATION

Le fourreau du système de plastification présente souvent une géométrie simple. La vis est par contre très sophistiquée. Elle peut être constituée d'éléments de forme très variée. Néanmoins, nous pouvons généralement distinguer trois zones successives. Chaque zone a une longueur définie par un nombre donné de diamètres.

Les désignations usuelles des trois zones sont : (3)  
(4) (5)

- zone d'alimentation [1]
- zone de compression [2]
- zone de pompage [3]

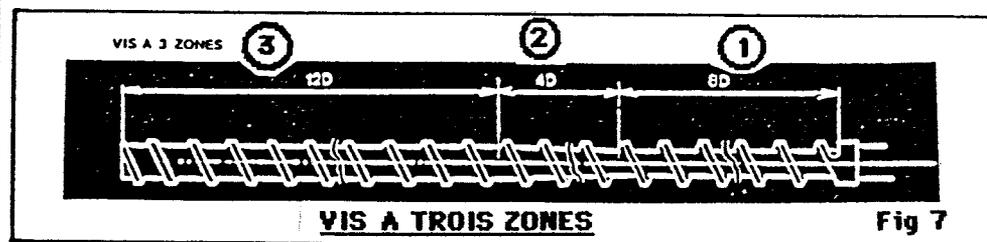


FIG 7 : VIS A TROIS ZONES

### La zone d'alimentation

Elle est également appelée zone solide. Le polymère est mis au contact de la vis par gravité à partir d'une trémie d'alimentation ou en force à l'aide d'un dispositif de gavage.

La rotation de la vis assure la mise en pression des granulés ou de la poudre de polymère. Celui-ci reste en grande partie à l'état solide jusqu'à son approche vers la zone de compression. En effet, la température du fourreau est relativement faible à cet endroit et le temps de séjour du polymère dans cette zone reste court. Il ne favorise pas l'amorçage de la fusion de la résine.

Les difficultés qui sont rencontrées dans cette zone concernent l'adhérence du polymère sur la vis de plastification et la face intérieur du fourreau. Les deux exemples qui suivent, concernent des cas extrêmes afin de mieux appréhender les difficultés du problème.

premier cas : le coefficient de frottement entre le polymère et la vis est élevé ; le coefficient de frottement entre le polymère et le fourreau est faible.

Dans son mouvement de rotation, la vis entraîne le polymère qui glisse sur le fourreau. La résine et la vis sont solidaires. Le débit de l'unité de plastification est donc compromis.

second cas : il est opposé au premier cas.

Le coefficient de frottement entre le polymère et la vis est faible.

Le coefficient de frottement entre le polymère et le fourreau est élevé.

Le système "vis-matière" se comporte comme un ensemble "vis-écrou". Le polymère est donc entraîné en masse vers l'avant du groupe de plastification. Ces hypothèses de travail assurent un débit de plastification important. Néanmoins, elles peuvent provoquer un couple résistant trop élevé sur la vis. Ce phénomène peut entraîner la rupture de cette dernière.

La solution technologique adoptée est mitigée. Elle entraîne la réalisation de vis de plastification dont l'état de la surface est de grande qualité.

La pérennité de la qualité de surface est obtenue à l'aide de traitements de surface divers : traitement thermique, métallisation, etc...

L'intérieur des fourreaux peut parfois présenter des usinages particuliers (rainurage) afin d'améliorer de manière artificielle le rendement de la machine. Cette solu-

tion technologique est rare dans le domaine de l'injection.

A ce stade de notre analyse, le polymère est peu fondu. Il est entraîné et transporté vers la zone de plastification encore appelée zone de compression.

### La zone de plastification - compression

La fusion du polymère est réalisée le long de cette zone. Plusieurs observations en laboratoire ont mis en évidence différents processus de plastification. Les manipulations sont généralement réalisées comme suit :  
(7, 8, 9)

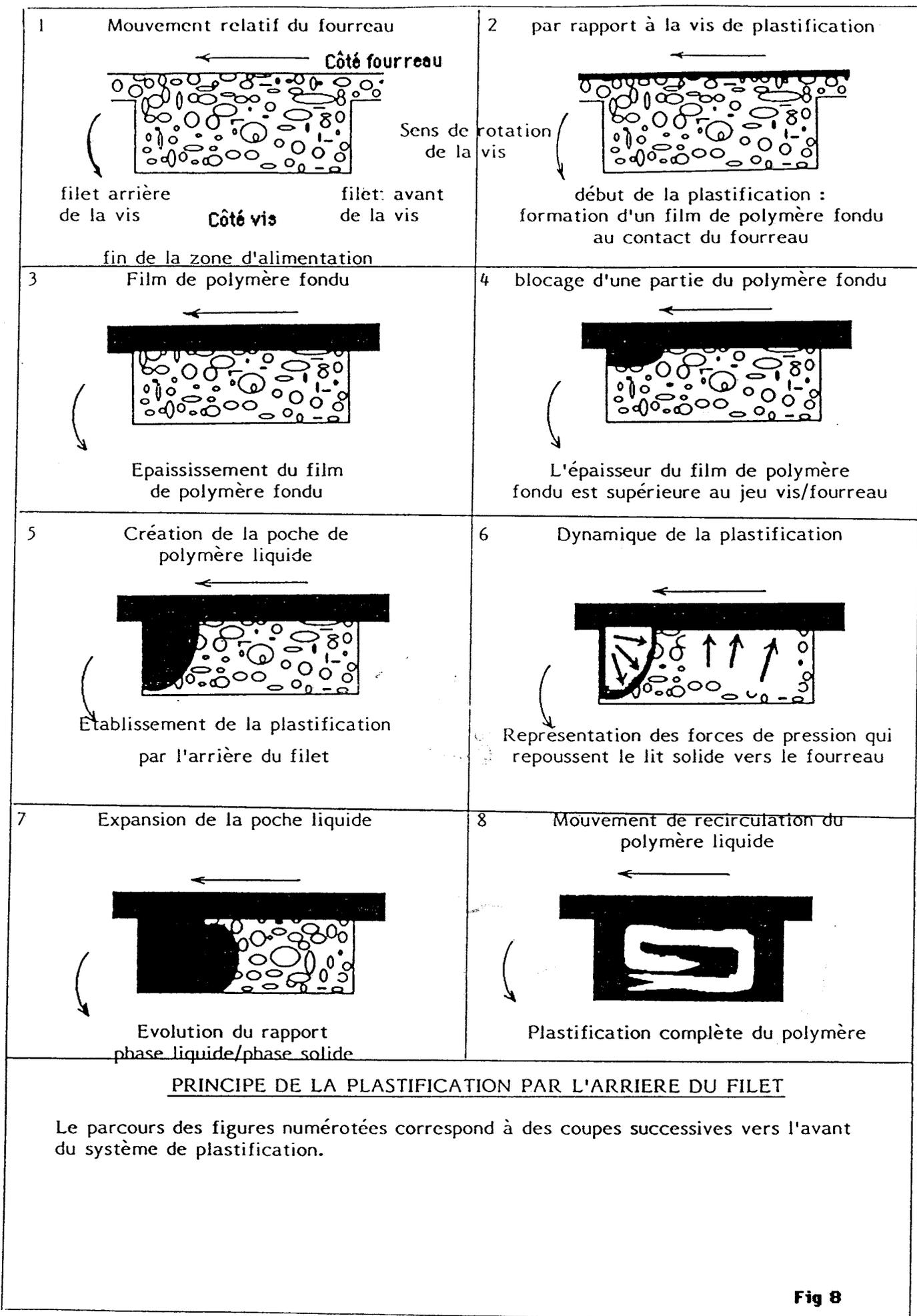
- mise en régime stable d'un groupe de plastification
- arrêt de fonctionnement
- refroidissement rapide du système vis-fourreau
- extraction de la vis ou ouverture du fourreau
- déroulage du "filet" de polymère et analyse de la morphologie des coupes successives.

Trois processus de plastification peuvent être observés :

- la plastification par l'arrière du filet
- la plastification par l'avant du filet
- la plastification mixte (à la fois par l'avant et par l'arrière du filet)

La plastification par l'arrière du filet correspond au phénomène le plus souvent généré avec un groupe de plastification en bon état. Ce phénomène est fréquent avec un jeu faible entre vis et fourreau qui autorise des débits de plastification élevés (8).

Certains auteurs ont bien étudié la plastification par l'arrière du filet (5). La figure 8 décrit de manière simple l'apparition et la progression des phases en présence (polymère fondu à l'état liquide/polymère solide) :



Au cours de la plastification par l'arrière du filet, les phénomènes de mise en pression de la poche liquide sont très importants. En effet, la présence de la pression va autoriser ou non le processus de plastification. Elle doit pour cela avoir une valeur suffisante afin de déformer le lit solide. Ce dernier est alors plaqué contre le fourreau qui entraîne sa fusion.

Le niveau de pression obtenu est corrélé à la hauteur du jeu mécanique qui existe entre la vis et le fourreau. Un jeu trop important interdit la déformation du lit solide. Il remet en cause le principe de la plastification par l'arrière du filet.

### La zone de pompage

Cette zone terminale met en pression le polymère. Le mouvement relatif de la vis et du fourreau permet d'augmenter la pression du polymère. Il assure l'écoulement de la résine vers l'avant du système vis-fourreau.

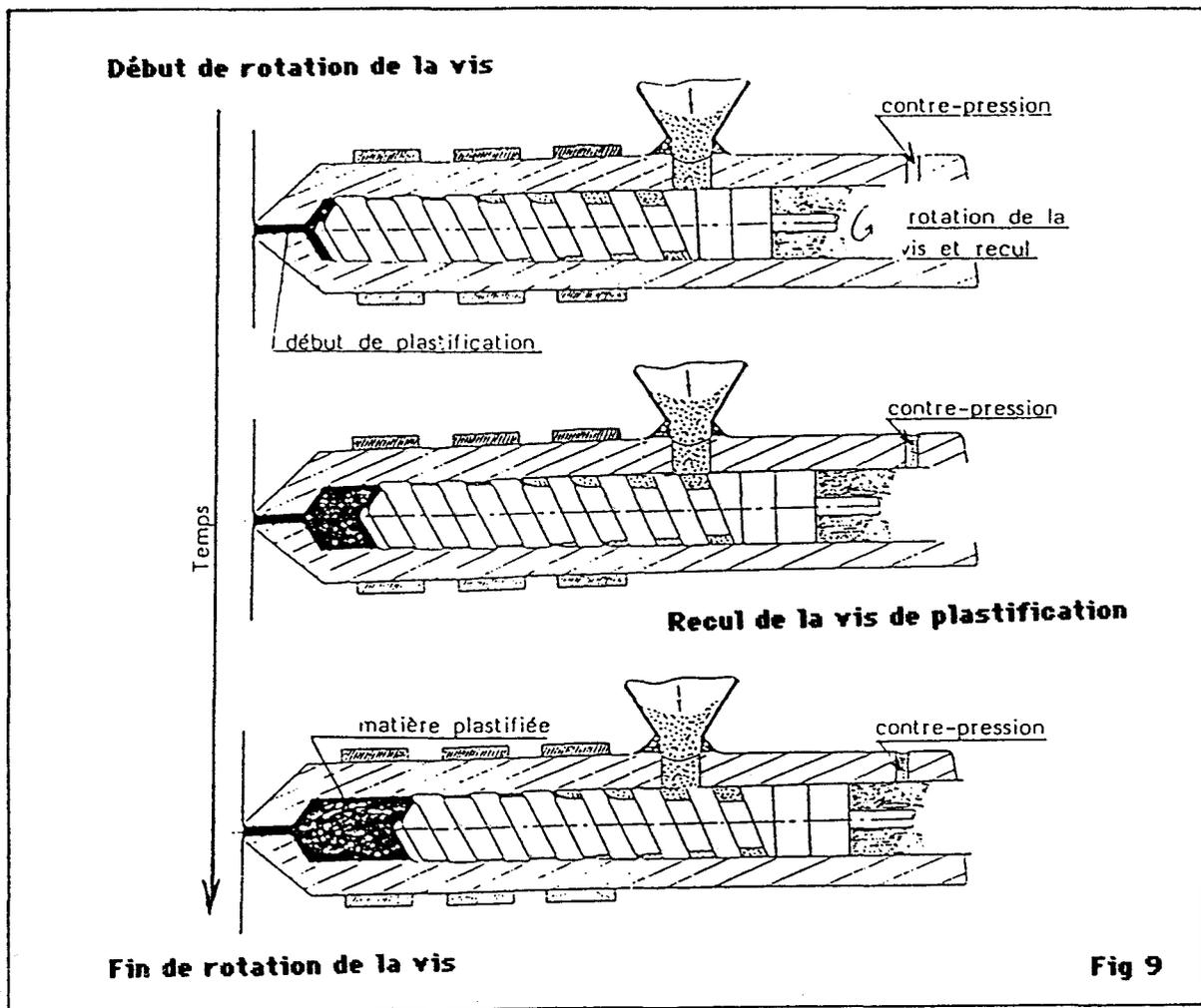
Le débit de polymère provient de la superposition d'un écoulement de Poiseuille de refoulement d'une part et d'un écoulement de cisaillement d'autre part.

L'ensemble de plastification d'une presse d'injection travaille de manière discontinue. En effet, le groupe d'injection remplit deux rôles :

- la préparation d'une quantité de matière plastifiée encore appelée phase de dosage ou de plastification
- le transfert du polymère dans l'outillage c'est-à-dire la phase d'injection.

### Fonction du système vis-fourreau au cours du dosage

La vis d'injection est mobile en translation. Cette mobilité permet de libérer un espace de stockage à l'avant de la vis. Ainsi, le polymère plastifié s'accumule dans cette zone. La figure 9 définit le mouvement de la vis pendant la phase de plastification.



Le débit de plastification est contrôlé grâce à deux paramètres de réglage :

- la contre-pression
- la vitesse de rotation

La contre-pression correspond à une pression hydraulique qui s'oppose au mouvement de recul de la vis.

Ce paramètre de réglage permet d'améliorer deux choses : l'homogénéité du matériau plastifié d'une part et le contrôle de l'échauffement du polymère par dissipation visqueuse d'autre part.

En effet, une contre-pression élevée augmente la durée totale de la phase de dosage. Si la vitesse de rotation de la vis est constante, cette dernière effectue un nombre de tours plus important. Ainsi, ce dernier paramètre est constant si la vitesse de rotation est diminuée. Ceci permet de diminuer le taux de cisaillement qui est imposé au polymère.

La contre-pression hydraulique est parfois régulée par paliers pendant le recul de la vis d'injection. Le polymère qui est devant la vis, peut atteindre des pressions de 400 bars lors de la phase de dosage.

La vitesse de rotation est aussi régulée en fonction de la position de la vis. Certaines presses d'injection autorisent des vitesses de rotation de 250 tours par minute.

La rotation de la vis rend homogène le produit transformé. Ce paramètre représente la principale source d'échauffement par cisaillement du polymère. Par conséquent, une vitesse de rotation élevée risque d'entraîner la dégradation thermique par échauffement local trop important. Nous avons montré comment limiter ce phénomène sans remettre en cause l'efficacité du malaxage de la résine. En effet, la contre-pression est utile dans ce cas.

Nous pouvons donc conclure que les deux paramètres de réglage de la phase de plastification sont complémentaires. Un polymère qui s'échauffe facilement par dissipation visqueuse, nécessite un dosage sous vitesse de rotation faible et contre-pression élevée. Dans le cas contraire, la rotation rapide de la vis de plastification assure un malaxage acceptable et permet de limiter la valeur de la contre-pression.

L'intérêt des profils de contre-pression d'une part, et des vitesses de rotation d'autre part est justifié de manière simple. En effet, au fur et à mesure du recul de la vis, les conditions de plastification sont modifiées. La partie utile de la vis devient de plus en plus courte. Néanmoins, l'expérience définit un critère qui limite l'effet de ce phénomène sur la qualité du dosage. La longueur maximale de dosage ne doit pas excéder 3 à 4 fois le diamètre de la vis de plastification.

La durée de la phase de plastification ne présente pas un inconvénient majeur. En effet, ce travail est effectué en temps masqué pendant la phase de refroidissement de la pièce injectée.

Néanmoins, pour les pièces à paroi mince réalisées à des cadences élevées la phase de refroidissement est inexistante ou très courte. Les machines sont équipées de groupes de plastification rapides.

Cette possibilité est offerte avec des actionneurs électriques. Ces moteurs sont montés sur des presses dont la force de fermeture est inférieure à 100 tonnes. Ces machines sont rares. Les machines d'injection sont en effet, en majorité, équipées de moteur hydraulique.

Ces actionneurs présentent deux avantages essentiels :

- un rapport puissance/encombrement exceptionnel
- une connexion directe sur le groupe hydraulique qui fournit déjà la puissance du système de fermeture-verrouillage.

Cependant, les moteurs hydrauliques offrent des phases transitoires de démarrage fort longues. Ces phénomènes sont inévitables. Ils altèrent l'efficacité du contrôle de la phase de plastification. Nous décrivons plus loin les répercussions de ces difficultés sur la stabilité de la qualité des pièces.

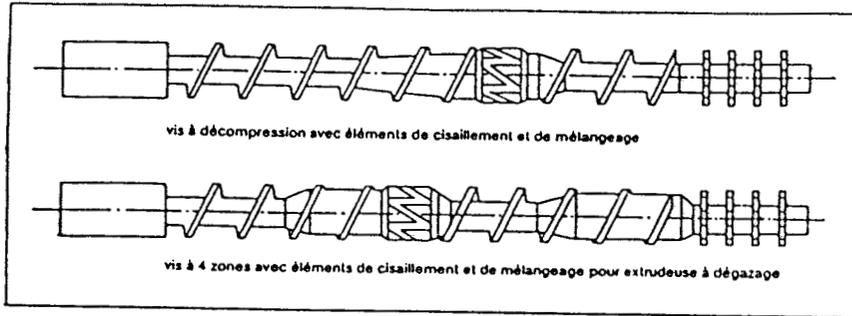
L'optimisation de la plastification concerne aussi le profil géométrique de la vis (10).

En effet, il est techniquement possible d'adapter une vis de plastification à une résine. Des besoins particuliers de malaxage peuvent aussi être pris en considération. Néanmoins, ces vis spécialisées sont réservées à des productions importantes réalisées avec le même produit.

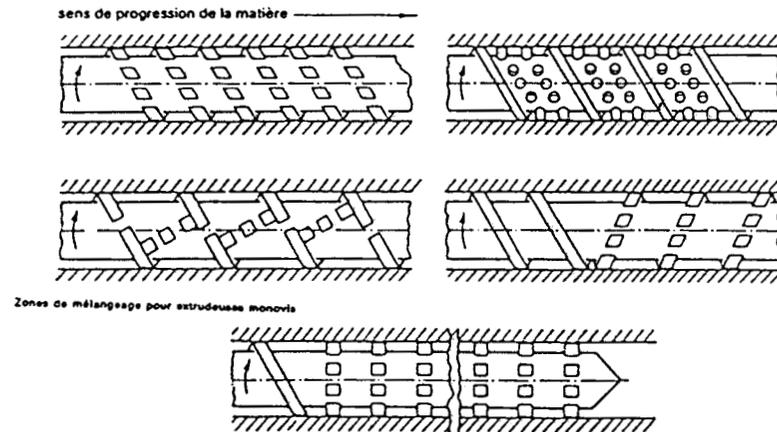
Cette situation n'est pas compatible avec la notion de flexibilité de production qui sous-entend l'emploi de résines différentes afin de réaliser des pièces variées. Parfois, le changement de coloris, par adjonction de mélanges maîtres, entraîne, seul, des modifications de comportement du polymère non négligeables. Ces perturbations remettent vite en cause l'optimisation d'un profil de vis qui reste une opération coûteuse. Elle est illustrée par la complexité d'usinage des exemples qui apparaissent sur la figure 10.

## ELEMENTS COMPLEXES DE VIS DE PLASTIFICATION

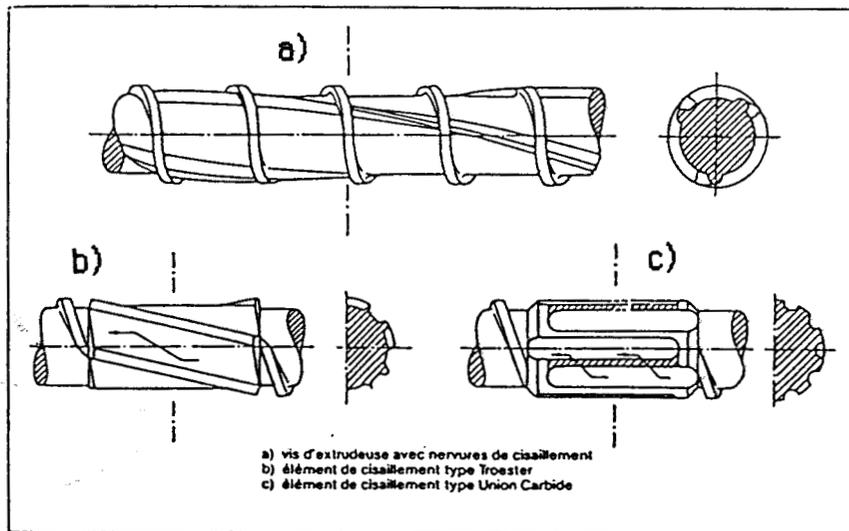
FIG 10



Formes de vis avec éléments de cisaillement et de mélangeage



Zones de mélangeage pour extrudeuses monovis



a) vis d'extrudeuse avec nervures de cisaillement  
 b) élément de cisaillement type Troester  
 c) élément de cisaillement type Union Carbide

Eléments de cisaillement

Mais les presses d'injection ne sont pas équipées de matériel aussi perfectionné. En effet, les vis de plastification sont dites universelles. Elles présentent une partie centrale de conicité constante. Les taux de compression de ces vis sont compris entre 2,3 et 2,7. Ils correspondent au rapport entre : le volume disponible dans le filet de vis au niveau de la trémie, et ce même volume à l'extrémité de la vis d'injection.

La phase de plastification se termine quand la quantité de polymère qui se trouve devant la vis, correspond au volume de l'empreinte taillée dans l'outillage.

## B) Fonctionnement du groupe de plastification-injection au cours de l'injection dynamique

Dans le domaine de la transformation des résines thermoplastiques, il n'existe plus de machines d'injection pour lesquelles les fonctions de plastification et d'injection sont dissociées mécaniquement.

En effet, les machines qui alimentent en matière plastifiée un cylindre ou un pot de transfert grâce à l'ensemble vis-fourreau et, qui mettent en action cet ensemble de transfert pour réaliser le remplissage du moule, sont réservées à des applications très particulières (pièces de masse élevée). Ainsi, le système vis-fourreau classique permet le remplissage du moule grâce à l'application d'une poussée sur la vis d'injection. Cette dernière se déplace en translation et joue le rôle du piston d'une seringue (le fourreau) qui entraîne l'écoulement du polymère dans l'outillage.

La phase d'injection du polymère se décompose en deux sous-phases :

- la phase dynamique d'injection ou phase de remplissage-compactage
- la phase quasi-statique d'injection encore appelée phase de post-remplissage, phase de maintien en pression ou seconde phase.

<b>La phase dynamique d'injection</b>
---------------------------------------

La vis-piston est mise en mouvement de translation. Elle met en pression le polymère qui a été plastifié auparavant. Deux problèmes se posent lorsque ce travail est réalisé :

- le contrôle du mouvement de la vis-piston
- la minimisation des fuites de polymère vers l'arrière de la vis.

### Le contrôle du mouvement de la vis-piston

Afin de mieux comprendre l'importance de la phase de remplissage, nous devons rappeler qu'il s'agit de l'écoulement à une température de 250°C à 350°C du polymère fondu, fluide visqueux (100 à 10000 Pa.s), non newtonien dans un outillage relativement froid (10°C à 120°C). Ainsi, le moule est le siège d'échanges thermiques importants.

L'écoulement est fort affecté par le refroidissement du polymère. Ce dernier est très rapide lors de son initialisation. Il est ensuite amorti par la faible conduc-

tibilité thermique de la couche de polymère qui constitue la peau de la pièce injectée.

Par ailleurs, le caractère pseudoplastique voire viscoélastique du polymère entraîne des difficultés. En effet une modification peu sensible des paramètres d'écoulement (par exemple le débit volumique) est à l'origine de variations importantes des pertes de charge créées au cours du remplissage du moule.

Dans ces conditions, il est nécessaire de contrôler le mieux possible la phase d'injection ou d'assurer la répétitivité de cette opération, cycle après cycle. Les fabricants de machines d'injection proposent quatre types d'injection dynamique :

- injection à pression hydraulique constante imposée sur le piston support de vis (avec ou sans asservissement en boucle fermée)

- injection à pression hydraulique constante par paliers (2 à 5 paliers) (avec ou sans asservissement en boucle fermée)

- injection à vitesse de translation constante et unique de la vis piston (avec ou sans asservissement en boucle fermée)

- injection à vitesse de translation de la vis-piston constante par paliers (2 à 15 paliers) (avec ou sans asservissement en boucle fermée)

Le dernier modèle cité permet d'atteindre une bonne reproductibilité s'il est associé à une régulation en boucle fermée. En effet, il est capable d'absorber plusieurs classes de perturbation :

- perturbation sur les températures : matière, outillage

- perturbation sur la viscosité du polymère.

L'utilisation de plusieurs paliers d'injection dynamique est très appréciée. En effet, les outillages d'injection présentent des empreintes dont la géométrie est souvent défavorable à l'avancée régulière d'un front de matière. Nous pouvons citer l'importante réduction de la section d'écoulement quand le réseau d'alimentation passe à l'empreinte proprement dite de l'outillage. Ainsi, la diminution du débit d'injection, à ce moment, permet la suppression de deux phénomènes :

- d'une part, éviter la surpression hydraulique, réaction du système d'asservissement face à la perte de charge qui est vite créée

- d'autre part, éliminer les phénomènes de jet libre qui sont dus à l'accélération brutale de la vitesse d'a-

vancée du front de polymère dans le moule ce "jetting" entraîne un affaiblissement mécanique de l'objet fini et d'importants défauts sur la surface de la pièce injectée).

Enfin, certains travaux récents (11) permettent de corréliser l'orientation des fibres de verre courtes (dans les composites à matrice thermoplastique) avec les conditions d'écoulement du produit lors de son injection. La maîtrise du débit de polymère dans un outillage permettra de contrôler l'anisotropie des caractéristiques mécaniques des pièces.

Néanmoins, il faut plusieurs conditions pour garantir un débit volumique du polymère constant lors de la phase dynamique d'injection. En effet, le refoulement du polymère vers la partie arrière de la vis piston doit être évité.

#### La minimisation des fuites de polymère vers l'arrière de la vis

Les fuites du polymère plastifié sont, a priori, inévitables. En effet, lors de la plastification, le polymère qui est mis sous pression, parcourt le fond de filet de la vis pour s'accumuler à l'avant du système vis-fourreau. L'avancée rapide de la vis piston vers l'avant met à nouveau le polymère sous pression. Ce dernier peut donc reprendre le chemin du filet de la vis et se diriger vers la trémie.

Néanmoins, la fuite est limitée et n'empêche pas l'injection. Mais, le refoulement du polymère est incontrôlable cycle après cycle. Ce phénomène entraîne des variations de débit d'injection aléatoires, donc néfastes à l'obtention d'une qualité de production constante.

De nos jours, la seule solution à ce problème est mécanique. Elle consiste à équiper l'extrémité de la vis de plastification d'un clapet anti-retour. Le fonctionnement de ce dispositif apparaît sur la figure 11.

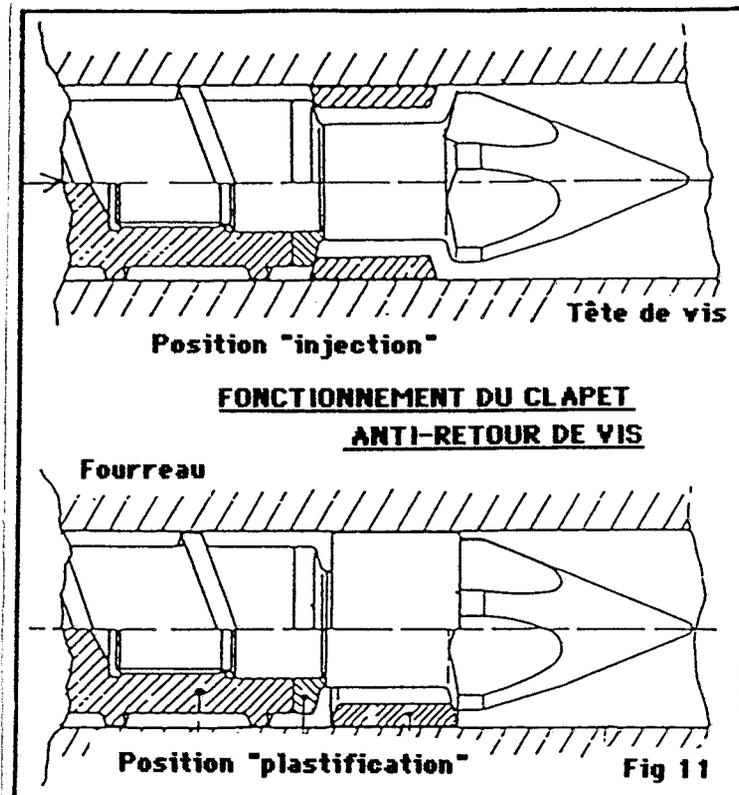


FIG. 11 : FONCTIONNEMENT DU CLAPET ANTI-RETOUR DE VIS

Cependant cette technologie présente de grands inconvénients. En effet, le clapet anti-retour est une pièce d'usure qui est soumise à des contraintes thermiques et mécaniques très sévères. C'est un dispositif dont la forme est vite altérée. Cela entraîne des points de stagnation du polymère dans une zone à température élevée. Ainsi, les dépôts de polymère qui atteignent les limites de stabilité thermique, se dégradent. Ils provoquent l'apparition des défauts sur les objets finis. Ces défauts ont un aspect qui est du type "point noir". La fréquence d'entraînement du polymère qui est dégradé, est aléatoire. Ce phénomène ne facilite pas le diagnostic sur le manque de qualité.

L'emploi d'un clapet nécessite donc la mise en place d'un système de maintenance préventive. Pour vérifier l'efficacité du clapet utilisé sur notre machine de marque BILLION, nous avons effectué des purges à partir de dosages variables et à des vitesses d'injection croissantes. La pesée des purges a laissé apparaître des pertes par fuite inférieures à 0,1% de la masse plastifiée avant injection.

Deux remarques sont cependant à faire :

- d'une part, ces manipulations sont réalisées sans charge car l'injection n'est pas faite dans un outillage mais dans l'air. Ce choix limite, a priori, la pression du polymère donc sa fuite vers l'arrière

- d'autre part, le clapet de vis coulisse dans le fourreau au cours de l'injection. Un jeu mécanique est nécessaire entre ces deux pièces. Ce système ne peut en aucun cas éliminer tous les reflux de résine.

L'influence de la phase dynamique d'injection sur les caractéristiques finales du produit fabriqué, est très importante, nous y reviendrons.

Au cours de la phase dynamique, l'outillage se remplit de polymère. Quand le moule est rempli, la machine passe en mode d'injection quasi-statique. L'unité d'injection entretient alors la pression du polymère dans l'empreinte.

### La phase quasi-statique d'injection

Au cours du remplissage de l'empreinte, le polymère qui circule dans le moule, est soumis aux lois de la mécanique des fluides. Afin d'assurer le débit de matière, il est donc nécessaire de vaincre les pertes de charge qui sont subies par la résine. Des champs de pression naissent le long du trajet du polymère. Ils peuvent prendre l'allure de la figure 12, en fonction de la géométrie parcourue:

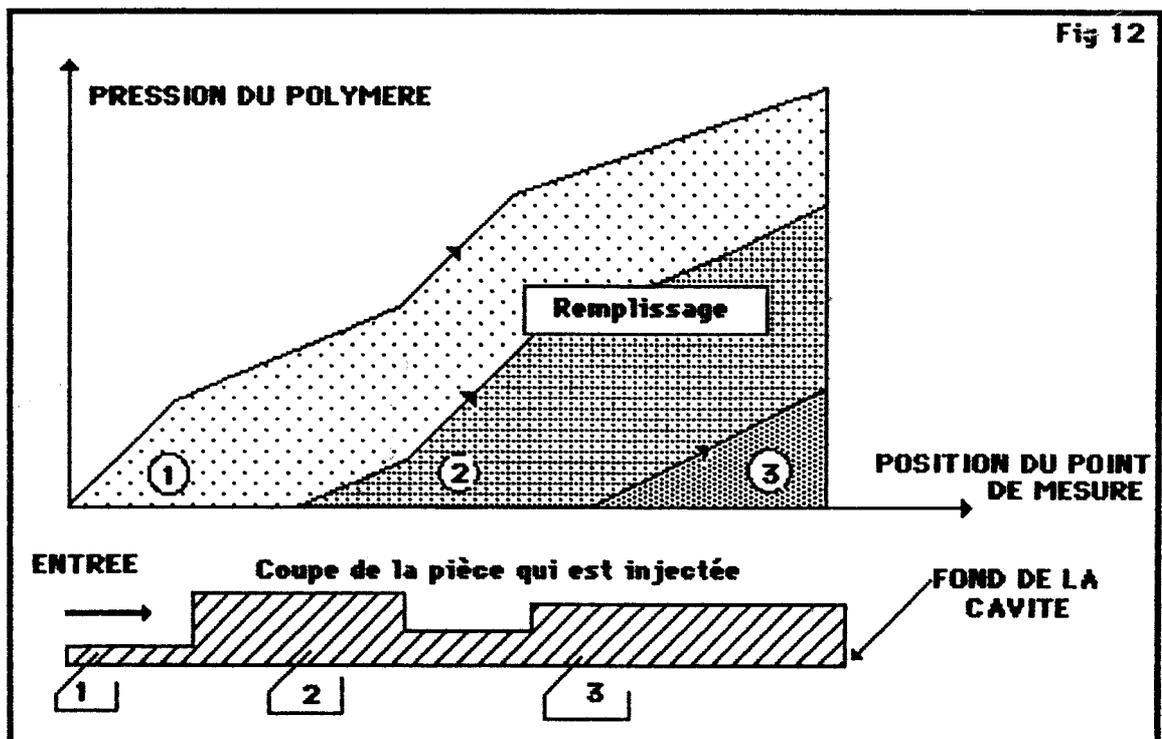


FIG. 12 :REPARTITION DES PRESSIONS AU COURS DU REMPLISSAGE

Ainsi, l'ensemble du polymère présent dans la cavité est sous pression (quelques centaines d'atmosphères).

Lors du remplissage, le polymère est, dans un premier temps, mis au contact des parois du moule. Il est ainsi refroidi. Mais la couche solidifiée reste faible par rapport à l'épaisseur de la pièce (cependant, il existe une exception : les pièces à parois minces dont l'épaisseur est inférieure à quelques dixièmes de mm). En effet, le coeur de cette pièce reste à l'état fondu.

Nous pouvons donc assimiler la pièce en cours de réalisation à un véritable ballon qui est constitué d'une peau de polymère solidifié et d'une âme gonflée de polymère liquide sous pression. La phase de maintien en pression est appliquée à partir de cet état initial :

- dans un premier temps, le maintien en pression entretient et équilibre les niveaux de pression développés au cours de la phase de remplissage

- dans un second temps, la phase de maintien limite les effets du refroidissement caractérisés par un retrait volumique du matériau.

La phase de maintien en pression est définie sur les machines modernes à l'aide de deux paramètres :

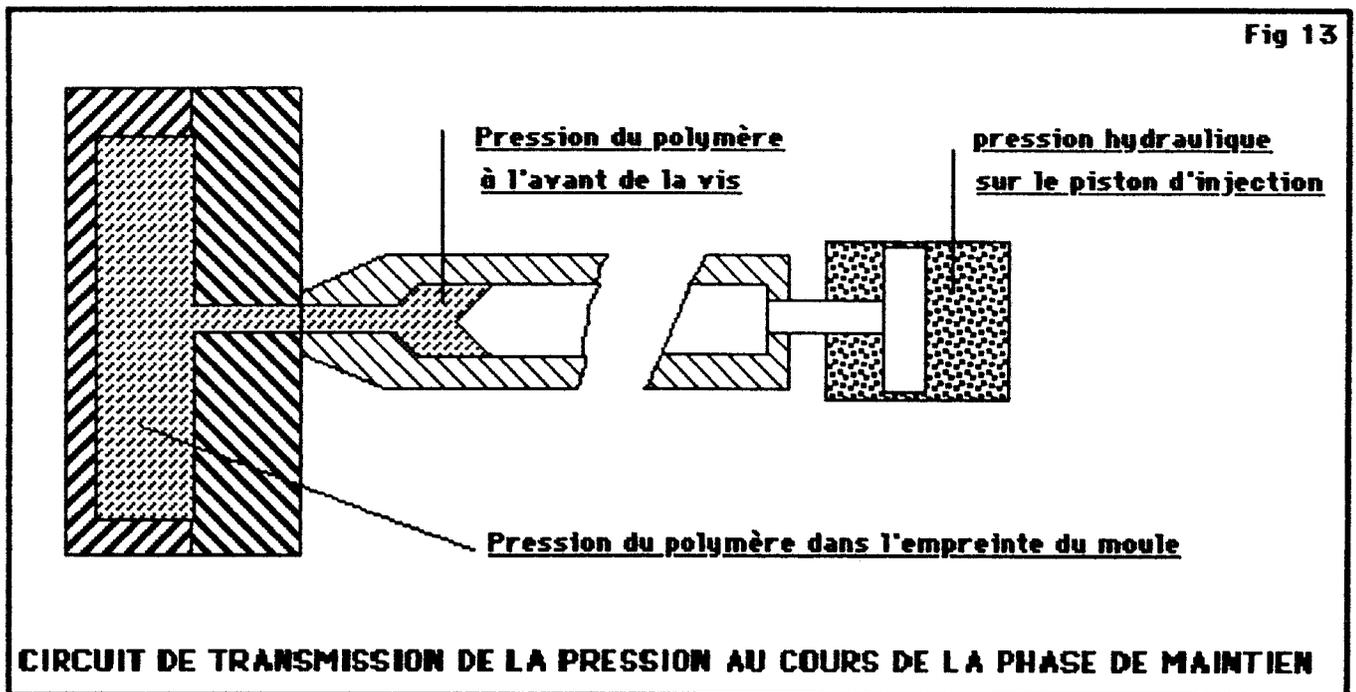
- le niveau de la pression hydraulique appliquée sur la vis d'injection

- la durée d'application de cette pression

Rôle du niveau de la pression hydraulique appliquée sur la vis d'injection lors de la phase quasi-statique

La pression hydraulique appliquée sur le piston d'injection (support de la vis), est transmise à la cavité du moule grâce au matelas de matière plastique liquide, correspondant à l'excès de volume plastifié.

Le transfert de pression est réalisé comme la figure 13 l'indique.



Le niveau idéal de pression hydraulique doit maintenir la pression du polymère en fin d'injection.

En effet, la résine thermoplastique étant compressible à l'état liquide, une décompression du polymère entraîne un flux sortant de résine du moule vers l'avant du système d'injection.

Une pression de maintien faible est nuisible pour deux raisons :

- d'un point de vue énergétique car la résine qui vient d'être transférée avec difficulté dans l'outillage, quitte aussitôt et en partie le moule

- pour une raison de qualité géométrique de la pièce car le flux sortant du polymère peut créer des retassures à la surface de la pièce

Une pression de maintien trop élevée présente deux inconvénients :

- un risque d'ouverture de moule. Le polymère liquide s'écoule alors dans le plan de joint de l'outillage et la pièce présente des bavures : c'est une pièce "toilée"

- un apport de résine trop important au coeur de la pièce. Celui-ci crée donc des contraintes internes qui

diminuent la résistance au choc des pièces (voir le chapitre 5.5. sur la mesure des contraintes internes).

Le réglage du niveau de pression hydraulique est donc important. La difficulté majeure réside dans le manque de corrélation entre cette pression et la pression du polymère dans l'empreinte. Nous développerons cette difficulté plus loin.

Par ailleurs, le rapport entre ces pressions évolue dans le temps. La durée de la phase quasi-statique est alors primordiale.

#### Rôle de la durée de la phase quasi-statique

Au cours de la phase de maintien, des phénomènes thermiques sont en jeu. En effet, le polymère injecté se refroidit. Sa densité augmente. Il faut donc compenser le retrait volumétrique du polymère. Dans ce cas, le matelas de matière présent devant la vis d'injection, est utilisé.

En effet, la couche de polymère solidifiée au contact des parois du moule, s'épaissit et la résine densifiée libère du volume. Le moule est alors alimenté de façon continue en polymère liquide grâce à la pression appliquée sur le matelas.

Le faible débit de compensation du retrait s'effectue jusqu'à solidification d'une section d'alimentation du moule et de ses canaux, à partir de quoi la pression de maintien n'a plus d'action.

Deux cas peuvent être envisagés :

- un temps de maintien en pression trop court entraîne une compensation du retrait incomplète. Des défauts importants sont créés sur les pièces.

En effet, les retassures à coeur provoquent l'apparition de vacuoles ou bulles. Ces dernières sont visibles si le polymère utilisé est transparent. Ces manques de matière affectent les caractéristiques mécaniques des pièces injectées.

Les pièces transparentes cumulent ce défaut mécanique avec un défaut d'aspect.

- un temps de maintien trop long est à l'origine d'un coût énergétique élevé. En effet, il correspond à l'application d'une pression hydraulique qui reste sans conséquence sur la qualité de la pièce injectée.

CONSEQUENCES DES DIFFERENTS REGLAGES DES PARAMETRES QUI DEFINISSENT LA PHASE DE MAINTIEN

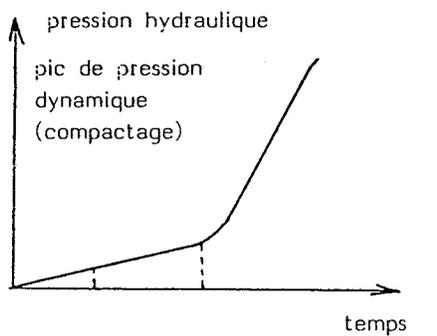
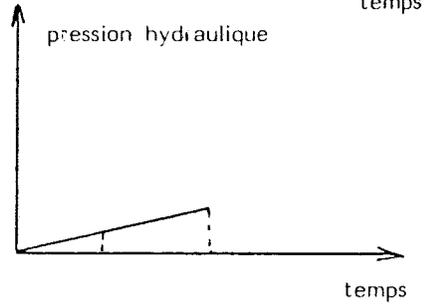
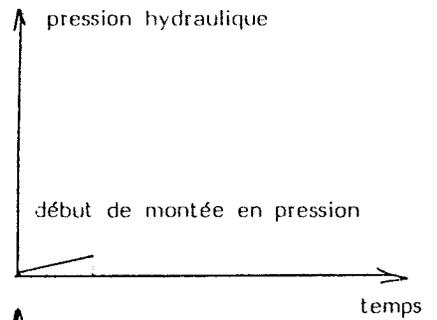
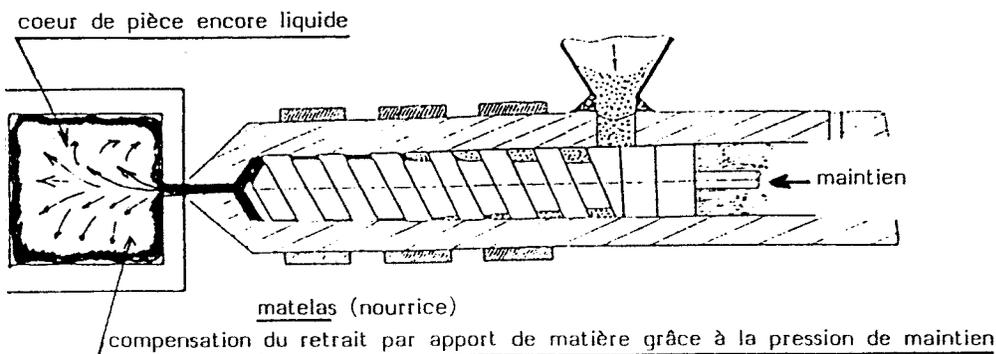
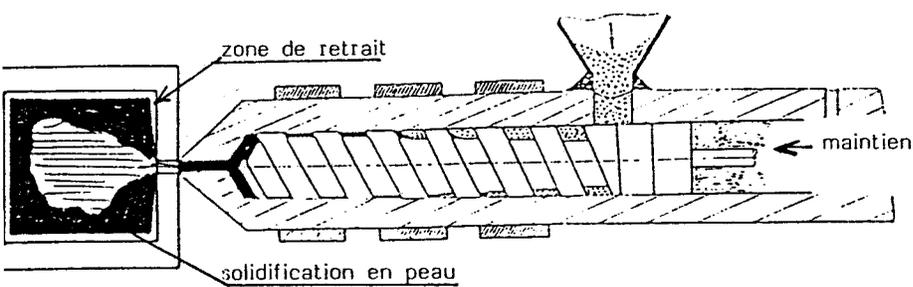
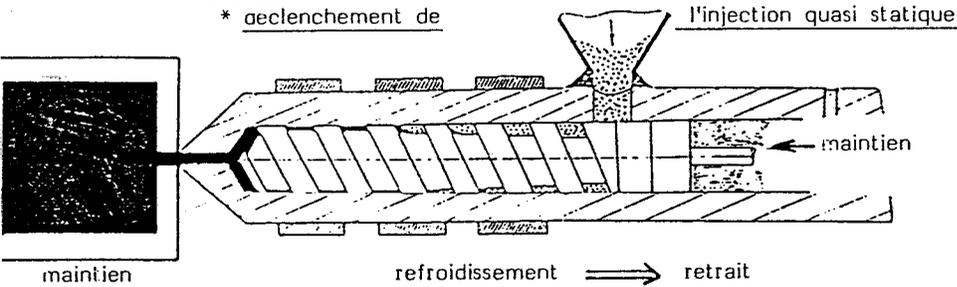
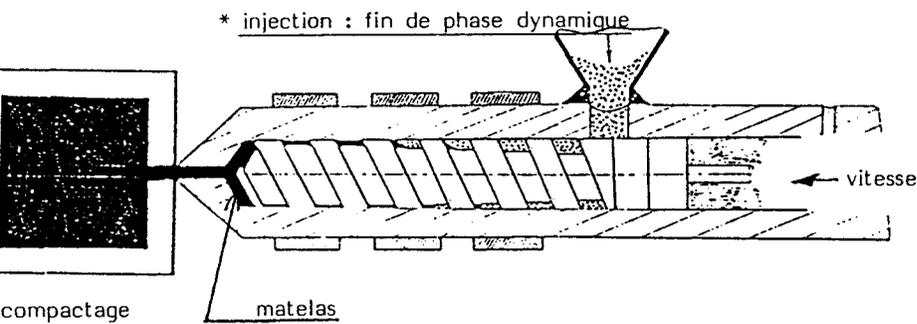
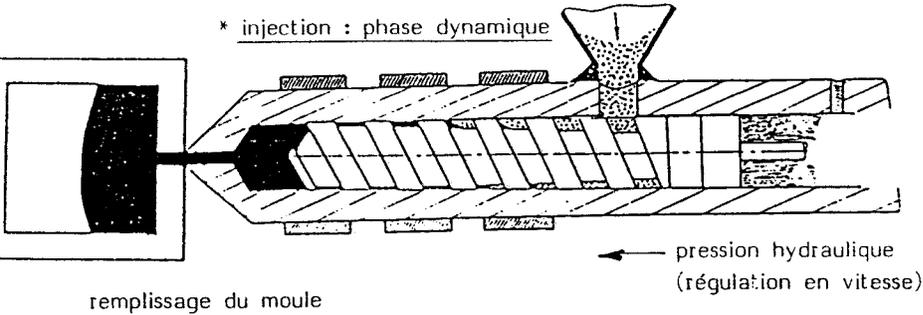
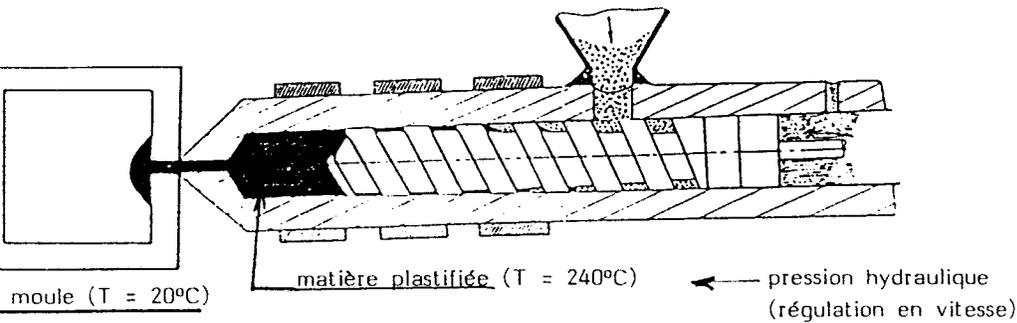
	Trop faible/court	Trop élevé/long
Niveau de pression	<ul style="list-style-type: none"> <li>*flux sortant de résine</li> <li>*retassures</li> <li>*déformation des pièces</li> <li>*contraintes résiduelles de compression en surface</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>*pièce toilée sur le plan de joint</li> <li>*contraintes résiduelles de traction en surface</li> <li>*difficultés de démoulage</li> <li>*coût élevé de production</li> </ul>
Temps de maintien	<ul style="list-style-type: none"> <li>*retassures</li> <li>*déformation des pièces</li> <li>*vacuoles au coeur de la pièce</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>*ralentissement des cadences de production</li> <li>*coût énergétique supplémentaire</li> </ul>

Avant de parfaire la description du fonctionnement d'un groupe d'injection, nous pouvons synthétiser les éléments qui précèdent à l'aide de la série de croquis ci-après.

La figure 14 schématise les phases de remplissage, de compactage et de maintien. Dans un souci de clarté nous faisons juste apparaître l'évolution de la pression hydraulique. C'est le seul paramètre qui est disponible sur les machines d'injection (12). La pression du polymère est néanmoins plus significative.

Les trois premiers schémas concernent la phase d'injection dynamique.

Les trois dernières figures se rapportent à la phase d'injection quasistatique.



passage de la régulation en vitesse du déplacement de la vis à la régulation en pression sur la vis

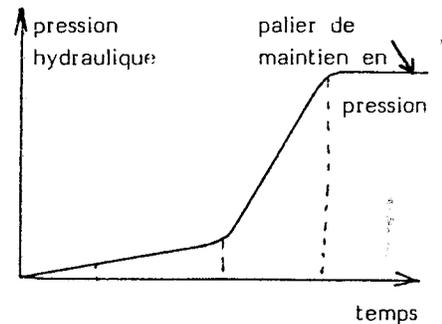


Fig 14

<b>Description et comparaison des différents modes de passage en pression de maintien</b>
---

Nous avons considéré la phase de remplissage d'une part et la phase de maintien en pression d'autre part. Nous abordons ci-dessous le problème du passage de la première à la seconde phase. Nous comparons les différentes solutions technologiques disponibles pour réaliser ce changement de commande.

Elles sont au nombre de 4 (13) :

- passage de la première phase à la seconde après une durée donnée d'injection dynamique (la machine travaille avec un temps d'injection constant)

- passage de la première phase à la seconde après le passage de la vis d'injection sur une position géométrique donnée

- passage de la première phase à la seconde en définissant un seuil haut de déclenchement sur la valeur de la pression hydraulique

- passage de la première phase à la seconde en définissant un seuil haut de déclenchement sur la valeur de la pression du polymère dans l'outillage.

Les quatre modes de déclenchement de la phase de maintien présentent des caractéristiques techniques différentes.

### Comparaison des quatre solutions

#### \* Technologies nécessaires et difficultés de mise en oeuvre

Type de passage en maintien	Technologies nécessaires	Difficultés de mise en oeuvre
A partir d'un temps d'injection dynamique	Technologie très simple	Aucune difficulté système monté en série coût : négligeable
A partir d'une position de la vis d'injection	Capteur de position monté sur le système d'injection	Système simple et robuste monté en série coût 1 500 F
A partir d'un seuil de pression hydraulique dans le circuit d'injection	Capteur de pression piézo-résistif Amplitude de mesure 0-300 bar maxi	- capteurs fragiles mais peu exposés - position du capteur dans le circuit hydraulique coût 6000 F
A partir d'un seuil de pression du polymère dans l'outillage	Capteur de pression piézo-électrique Temps de réponse faible Amplitude de mesure 0-2000 bar maxi	- capteurs très fragiles - définition de la position du capteur dans l'empreinte - durée de vie limitée du capteur coût 14 000 F

Ce tableau permet d'appréhender l'efficacité relative de ces différents systèmes. En effet, la mesure de la pression dans le moule est sans doute la solution idéale. car elle prend directement en compte l'état du polymère dans l'outillage.

Les autres solutions sont basées sur des critères indépendants de l'état du polymère dans le moule, au moins pour les deux premiers.

Le chapitre qui suit illustre de manière très concrète les limites de chacune des solutions techniques proposées.

#### \*Performances des quatre dispositifs de déclenchement de la phase de maintien

Nous analysons dans ce chapitre l'incidence d'une perturbation au niveau de la viscosité du polymère lors de l'utilisation de ces différents systèmes.

Le tableau qui suit présente les réactions de chaque dispositif de passage en maintien lors d'une augmentation de la viscosité du polymère.

Systèmes de déclenchement		Conséquences sur la pièce injectée
Déclenchement par le temps ou par la position de la vis	<p><u>a) Injection dynamique à vitesse de vis imposée</u>            Les pertes de charge créées au cours du remplissage sont plus importantes            Pour un même volume de résine transféré, elles entraînent une pression moyenne du polymère dans l'empreinte plus élevée. Cette surpression à la fin du remplissage est immédiatement suivie par une décompression qui est due à un transfert moins marqué de la pression sur le matelas de résine vers la cavité du moule</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- risque de toilage</li> <li>- création de contraintes internes à cause des flux d'entrée et de sortie du polymère</li> <li>- défauts géométriques de surface</li> </ul>
	<p><u>b) injection dynamique à pression hydraulique imposée</u>            * déclenchement par le temps            Une viscosité élevée se traduit par un remplissage incomplet de l'empreinte au moment du passage en maintien. Cette lacune peut persister au cours de la phase de maintien. Dans tous les cas, la finition d'un remplissage pendant la phase de maintien n'est pas satisfaisant car elle s'effectue lentement</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- défauts géométriques importants : pièces incomplètes</li> <li>- création de contraintes internes</li> </ul>

	<p><b>* déclenchement par la position</b>  Le déplacement d'un volume fixé de polymère (position finale de la vis constante) à l'aide d'une pression hydraulique constante, est plus difficile si le polymère est moins fluide. Dans ce cas, le remplissage de l'empreinte devient trop lent : des contraintes internes sont créées. La machine peut aussi se bloquer car elle ne fournit pas une pression hydraulique suffisante pour atteindre la consigne de position de vis qui lui est imposée (fabrication d'incomplet).</p>	idem
<p>Déclenchement avec un seuil de pression hydraulique</p>	<p>Le seuil de pression hydraulique qui est imposé, peut devenir insuffisant. Dans ce cas, il est atteint avant le remplissage complet de l'empreinte. La phase de maintien en pression est appliquée sur une empreinte incomplète. Si la pression de maintien est trop faible, la fin du remplissage ne peut même pas être réalisée. Dans le cas contraire, la fin du remplissage crée des contraintes internes importantes (écoulement du polymère qui présente un temps de relaxation très long)</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- présence de contraintes internes importantes</li> <li>- production de pièces incomplètes</li> </ul>

<p>Déclenchement avec un seuil de pression du polymère dans l'outillage</p>	<p>Dans ce cas, les difficultés de remplissage n'influencent plus la décision. En effet, la pression du polymère est toujours la même au moment du basculement. Cela donne souvent de bonnes garanties quant au remplissage complet de l'empreinte. La production de pièces incomplètes est donc impossible. Mais une augmentation importante de viscosité peut provoquer une élévation de la <u>pression moyenne</u> du polymère dans le moule et entraîner l'ouverture de celui-ci. Ces résultats dépendent de l'emplacement du capteur de pression dans l'empreinte. Si celui-ci est mal placé, les risques d'incomplètes persistent.</p>	<p>- risque de production de pièces toilées dans le cas de perturbations importantes au niveau de la viscosité du polymère</p>
---	--	--

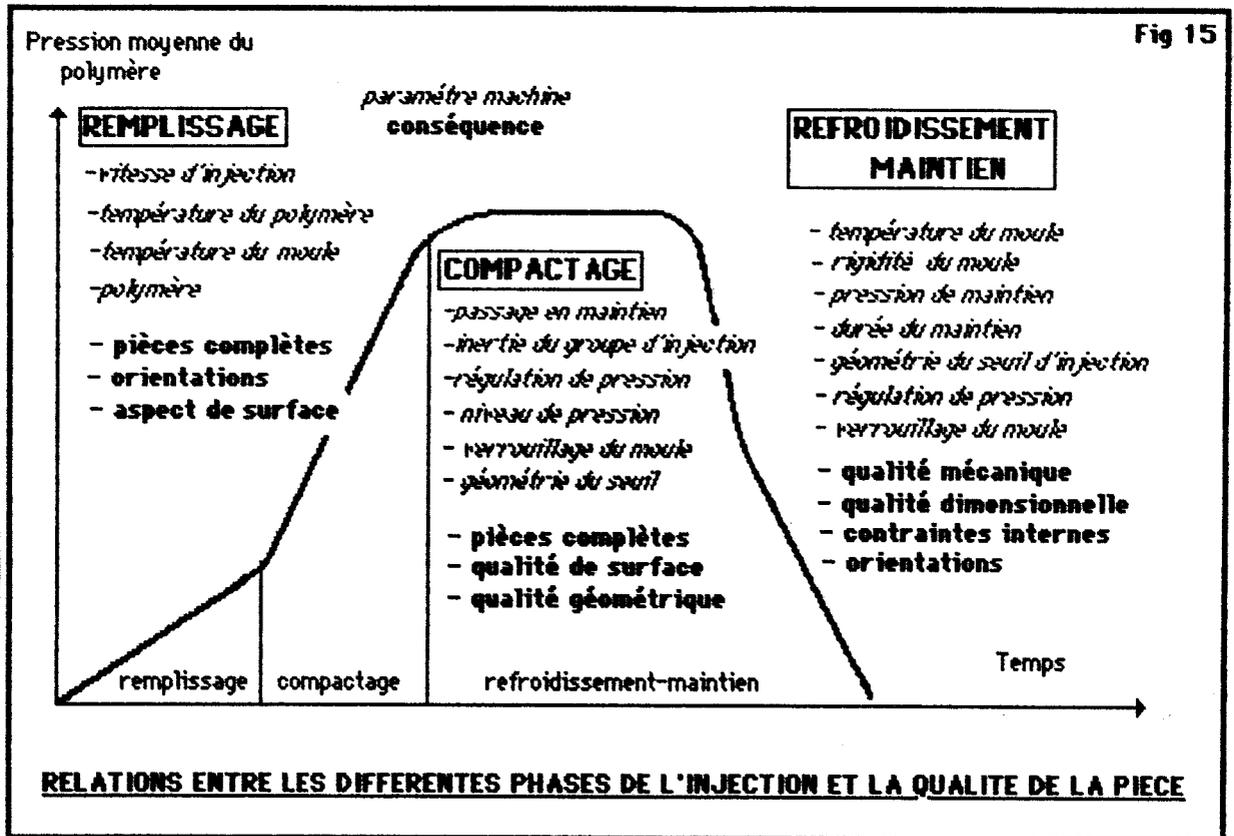
Seul le dispositif qui permet le passage en maintien par seuillage de la pression du polymère dans le moule, est capable d'absorber une perturbation de viscosité du polymère. Le capteur de pression, placé dans l'empreinte rend compte de l'état du polymère de manière directe.

Nous connaissons les difficultés qui sont rencontrées pour mettre en oeuvre cette technologie. Mais l'avenir de tels procédés semble assuré. En effet, si 1 à 2% des moules d'injection sont instrumentés avec des capteurs de pression en France, l'Allemagne de l'Ouest équipe plus de 10% des outillages en service de nos jours. (Donnée KISTLER SA : fabricant de capteurs de pression).

Les constructeurs de capteur de pression font de gros efforts afin de développer des produits qui sont adaptés aux besoins particuliers de l'injection. Ces capteurs peuvent aussi être utilisés pour protéger les moules de tous dépassements de pression très destructifs dans certains cas.

Le mode de fonctionnement du groupe d'injection est maintenant décrit en totalité. L'évolution de la pression du polymère au cours du temps donne une image complète de ce qui se passe pendant le cycle d'injection.

En effet, l'expérience permet de corrélérer les évolutions de pression avec différents critères de qualité. Nous illustrons ceci avec la figure 15 (14).



Cette figure donne un aperçu très général de la notion de qualité des pièces injectées.

## 2.2. Les difficultés rencontrées sur les sites de production : Notion de qualité d'une pièce injectée

La notion de qualité est décomposée en trois composantes principales : aspect, précision dimensionnelle et propriétés d'usage. Leur intérêt est maintenant imposé par le marché. (15)

En effet, si nous considérons la majeure partie des développements technologiques apparus pendant les dernières années, la qualité d'aspect des pièces injectées joue un rôle prédominant.

En outre, l'apparition de nouveaux polymères offre des possibilités d'application de plus en plus nombreuses. Ces résines, appelées "polymères techniques", présentent des caractéristiques mécaniques élevées. Elles sont donc utilisées pour réaliser des pièces qui nécessitent une grande qualité géométrique.

Cette précision dimensionnelle est indispensable pour des raisons fonctionnelles d'une part et pour rendre possible l'automatisation des opérations d'assemblage qui sont réalisées en aval de la production d'autre part.

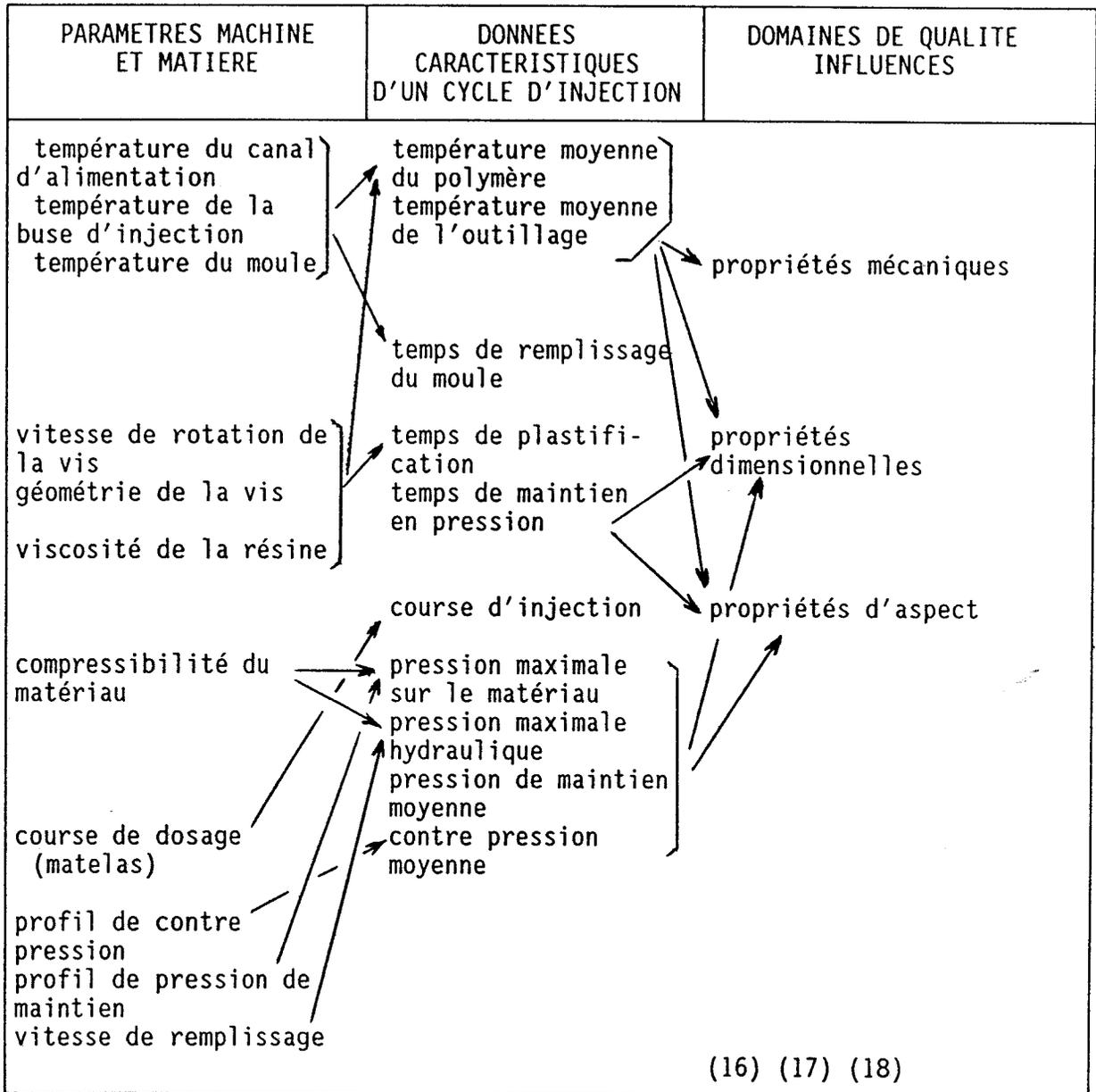
Enfin, les caractéristiques mécaniques des pièces injectées sont sans cesse améliorées notamment par l'utilisation croissante des résines thermoplastiques renforcées avec des fibres de verre.

Notre classification apparaît dans ce tableau :

COMPOSANTES DE LA QUALITE D'UNE PIECE INJECTEE	EXEMPLES DE DESIGNATION DES DEFAUTS
<u>Propriétés d'aspect</u>  - état de surface - transparence - coloration	marbrure, veinage, givrage, brûlure...
<u>Propriétés géométriques</u>  - dimensions de la pièce (cotation) - forme de la pièce (planéité)	pièces incomplètes, retassures, vacuoles, bulles, pièces voilées, pièces toilées, retrait, gauchissement...
<u>Propriétés mécaniques</u>  - résistance à la rupture sous différents modes de sollicitation dont la résistance au choc	fragilité des lignes de soudure, fragilité de pièces

Bien que notre étude s'intéresse plus à la maîtrise de la qualité dimensionnelle des pièces injectées, nous présentons un bilan général sur les relations qui existent entre la mise en oeuvre d'un polymère et les propriétés de la pièce obtenue.

Cette approche met en évidence la complexité des relations qui existent entre les paramètres de réglage d'une machine et les caractéristiques finales d'une pièce comme on peut le voir dans le tableau suivant :



La maîtrise de la qualité est difficile à cause de l'interdépendance de certains paramètres de transformation.

Si l'on étudie par exemple, le cas de la fluidité du polymère, elle dépend de la température imposée à la résine qui dépend elle-même d'une multitude de paramètres. En effet, la température du polymère n'est pas obtenue avec un simple réglage d'éléments chauffants. L'échauffement du polymère varie en fonction :

- du cisaillement de la résine dans la vis de plastification qui dépend :

- . de la géométrie de la vis
- . de la contre pression qui est appliquée sur la vis
- . de la vitesse de rotation de la vis

- du cisaillement de la résine pendant le passage dans des restrictions de section. Le phénomène d'auto-échauffement qui est créé dépend :

- . du débit d'injection
- . de la pression d'injection
- . de la géométrie de la buse d'injection et des seuils des empreintes

- du temps de séjour du polymère dans différents endroits. Ce paramètre est lié :

- . à la longueur des canaux d'injection
- . à la capacité de plastification de la vis
- . à la durée totale du cycle d'injection.

Par ailleurs, si nous considérons le temps de remplissage d'une empreinte, ce dernier est une fonction :

- de la fluidité du polymère
- de la pression d'injection
- du débit d'injection
- de la température de l'empreinte (elle-même fonction du circuit de refroidissement et du temps de cycle)
- du nombre de seuils d'injection et de leur emplacement
- du volume de la pièce et de la géométrie en général.

Sur ces seuils deux paramètres d'injection les fonctions sont déjà très complexes.

En effet, la viscosité du polymère est, en partie, reliée à sa température, en fonction du débit d'injection. Or le débit d'injection est lui-même dépendant de la fluidité du polymère quand nous injectons sous pression constante.

Par ailleurs, un temps de remplissage variable affecte l'état d'équilibre thermique dans lequel nous travaillons.

Il ne nous appartient pas de faire une description exhaustive des relations qui relient les paramètres de transformation à la qualité des pièces injectées. Néanmoins, nous devons définir les sources du manque de qualité afin de comprendre les difficultés qui nous attendent.

### 2.2.1. Les raisons essentielles du manque de qualité

Sans rentrer dans le détail, nous pouvons dire que les défauts de qualité proviennent des perturbations qui déstabilisent le processus d'une part et des contraintes qui limitent ce processus d'autre part.

#### A) Les perturbations qui agissent sur le processus

Elles sont de trois ordres :

##### a) L'environnement de la machine :

- instabilité des conditions de température de l'atelier
- variation du taux d'humidité relative dans l'atelier
- fonctionnement cyclique des périphériques qui assurent la régulation de la température du moule et l'alimentation de la presse d'injection.

##### b) La qualité de la matière première

- manque d'homogénéité
- pollution des résines (circuit de recyclage)

##### c) Les phénomènes d'usure et d'encrassement

- modification des caractéristiques du circuit hydraulique
- évolution de la géométrie de certaines parties de l'empreinte ou du réseau d'alimentation
- encrassement des événements sur les plans de joint.

#### B) Les contraintes qui limitent le processus comprennent aussi trois points :

##### a) Les contraintes physiques

- la température maximale admise par la matière
- le temps de maintien en température
- la valeur du retrait de la matière
- la valeur de la viscosité de la matière
- le comportement thermique de la matière (phénomène de recristallisation partielle)

##### b) Les contraintes technologiques

- limite du groupe hydraulique
- limite de l'unité de plastification
- limite de l'unité de fermeture
- limite de l'outillage
- temps de réponse de l'unité d'injection
- inertie de la vis d'injection

### c) Les contraintes économiques

- durée du temps de cycle
- coût de revient de la pièce.

L'ensemble des informations précédentes reste très général. La recherche d'une qualité optimale de la production fait appel à deux méthodes :

- le contrôle très fin des paramètres de transformation
- ou la mise au point d'un système de commande capable d'absorber tout ou partie des perturbations qui affectent le processus d'injection.

L'étude réalisée ; correspond à la seconde solution dont nous définirons les choix technologiques.

Auparavant, nous présentons dans le chapitre suivant les résultats d'une enquête qui est réalisée dans un site industriel et qui nous permet de relativiser l'importance de certaines perturbations.

### 2.2.2. Analyse des défauts de moulage en production

#### A) Présentation du site industriel

Cette étude est basée sur l'analyse de la qualité de production dans une société de transformation. Cette entreprise possède un grand parc de machines d'injection de quarante presses. Leurs forces de fermeture vont de 50 tonnes à 3000 tonnes.

L'unité de production utilise environ 10000 tonnes de polymère par année. Les pièces injectées, pèsent de quelques grammes à près de dix kilogrammes.

L'usine est représentative des unités de production industrielles françaises sérieuses et modernes.

#### B) Analyse des rebuts de fabrication

L'étude de la qualité des pièces est réalisée sur cent outillages. Le temps d'observation correspond à une production de un mois. Un premier résultat est présenté de manière très synthétique dans le tableau qui suit.

Les différents outillages sont classés dans trois catégories définies par une fourchette du taux de rebut.

Taux de rebut	< à 2%	2% à 4,5%	> à 4,5%
% des outillages concernés	62,0%	27,0%	12,0%
Part de production concernée (en coût)	47,5%	45,5%	7,0%
Part de rebut concernée (en coût)	19,0%	62,5%	18,5%

Une analyse plus détaillée des relevés statistiques a mis en évidence l'importance de la série vis-à-vis du taux de rebut : des séries importantes de production, entraînent des taux de rebut faibles.

Une recherche plus fine permet d'établir des liens étroits entre la production de mauvaises pièces et les mises en route ou les redémarrages après arrêt des presses d'injection. Par ailleurs, la catégorie principale de défaut est la fabrication de pièces incomplètes qui représentent 70% du coût total des rebuts.

Une campagne d'observation menée au cours de quelques postes de fabrication montre que plus de 60% des pièces incomplètes, proviennent des démarrages de machine. Les différentes sources probables de difficultés sont analysées dans les paragraphes qui suivent.

**Les perturbations qui sont propres au démarrage d'un ensemble moule-machine**

Les unités de production de pièces injectées travaillent de manière discontinue. L'ensemble machine-moule-matière est dans un état d'équilibre thermique instable. Aussi, un arrêt accidentel de la production provoque des perturbations importantes. De la même manière, lors du démarrage de production, le processus parcourt une phase transitoire qui affecte la qualité des pièces fabriquées. Nous étudions ces difficultés ci-dessous.

**Perturbations liées au démarrage d'une machine d'injection**

Ces difficultés sont rencontrées au début de chaque semaine sur les machines de petite et moyenne capacité. En effet, les machines de forte puissance ne sont pas arrêtées pendant les fins de semaine : elles sont en production 24 heures sur 24. L'entretien préventif est effectué avec une fréquence faible. Elle est inférieure à la durée d'un poste par mois.

Le démarrage d'une machine entraîne l'échauffement de l'huile du réseau hydraulique. En effet, l'huile est mise en circulation dans les différents composants de la presse et subit des contraintes de cisaillement qui provoquent une augmentation de température.

Cette dernière modifie les performances de la machine d'injection. L'huile réchauffée devient plus fluide. Une huile réchauffée se transporte plus facilement. Elle permet d'augmenter les capacités des éléments qui assurent un débit hydraulique. Mais, l'huile chaude est davantage compressible. Ce phénomène réduit les capacités des éléments qui participent au transfert de la pression hydraulique.

Les variations de viscosité peuvent être prises en compte avec des systèmes d'injection équipés de dispositifs de régulation en boucle fermée. Mais, les machines d'injection de cette catégorie sont encore rares dans les ateliers de production. Par ailleurs, les systèmes hydrauliques de fermeture de moule sont rarement commandés avec des montages en boucle fermée.

Ainsi, une huile plus compressible entraîne des ouvertures accidentelles d'outillage lorsque le groupe de verrouillage de la machine est utilisé à la limite de ses capacités.

Les machines modernes sont équipées de dispositif de régulation en température de l'huile. Une solution technologique est donc disponible pour limiter ce phénomène. Mais les systèmes de régulation thermique n'apportent pas toujours une solution définitive. Nous le montrons dans le cas des outillages d'injection.

### Perturbations liées à la mise en service d'un outillage

Les outillages d'injection sont des masses métalliques imposantes. La régulation thermique de blocs d'acier qui peuvent peser entre deux cent cinquante kilogrammes et quinze tonnes, est difficile.

Les outillages les plus importants nécessitent des temps de préchauffage qui atteignent parfois plus de 15 heures. Cette opération fait augmenter leur température moyenne afin d'atteindre des températures généralement comprises entre 50°C et 80°C. Le moule est ensuite lancé en production. Il doit retrouver un nouvel équilibre thermique par échange avec la matière injectée.

Les dispositifs de régulation ont réchauffé le moule dans un premier temps. Ils doivent fournir des frigories dans un second temps. Les cadences d'injection définissent le nouvel équilibre thermique de l'outillage. En effet, l'inertie thermique du moule ne permet pas l'évacuation instantanée des calories qui proviennent du polymère injecté.

La raison essentielle de ce retard est due à la conception des réseaux de refroidissement constitués de canaux dans lesquels un fluide caloporteur circule. Ces réseaux tubulaires ne sont pas usinés dans les zones proches de l'empreinte. En effet, la complexité des empreintes limitent les possibilités d'implantation. Par ailleurs un réseau de refroidissement efficace présente une section importante qui affaiblit la résistance mécanique des moules.

Les courbes de la figure 16 sont relevées pour un moule de petite taille. L'outillage pèse 350 kilogrammes. Il est utilisé sur une machine dont la force de verrouillage atteint 90 tonnes.

Plusieurs sondes thermiques sont installées dans différentes parties de l'outillage. Nous enregistrons les signaux de trois thermocouples :

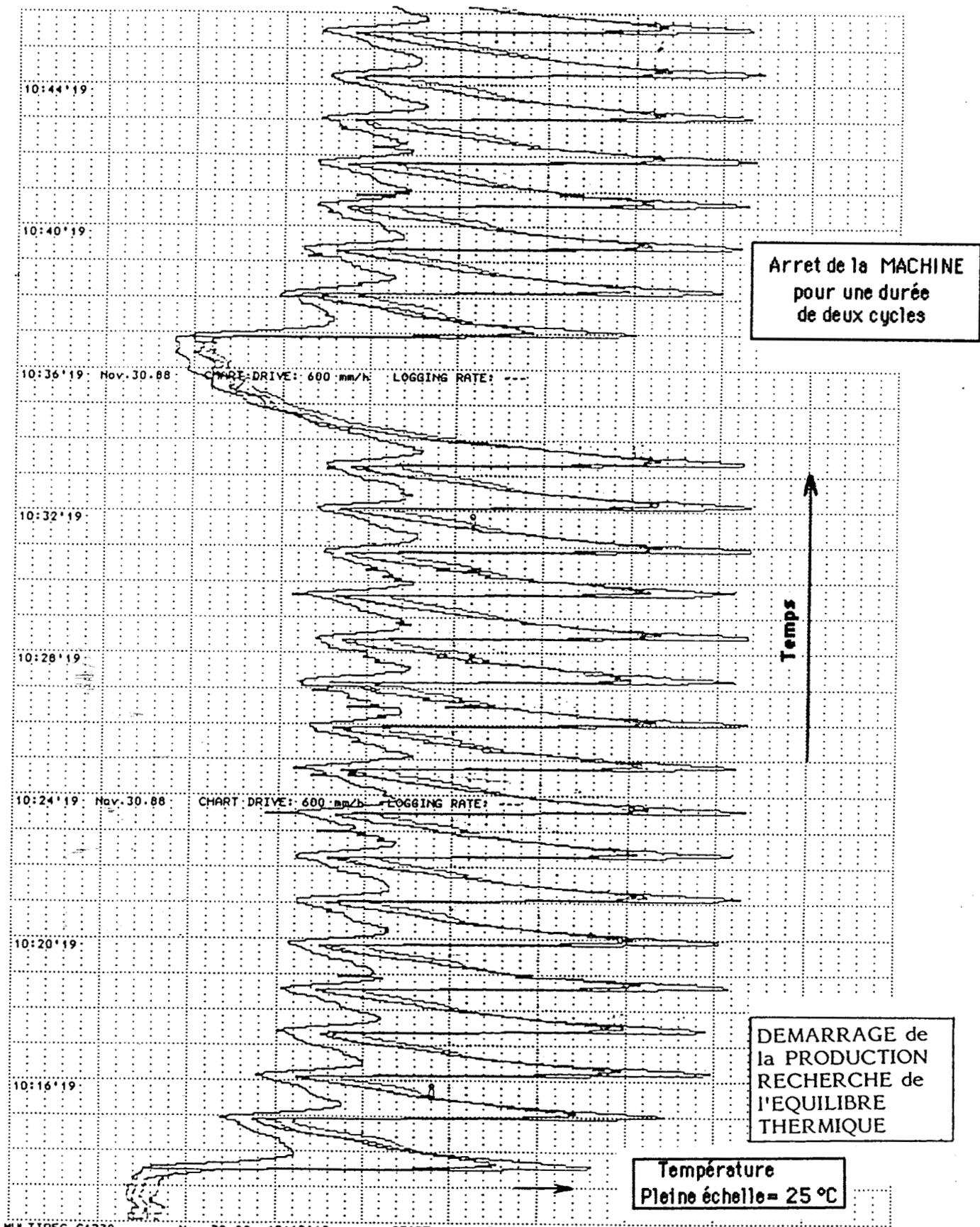
- un thermocouple implanté au coeur du moule
- deux thermocouples placés à moins de 3 mm de la surface de l'empreinte.

Le thermocouple placé au coeur du moule, présente la variation de moins grande amplitude. Chaque injection se traduit par une variation de  $2,5^{\circ}\text{C}$  (1 graduation). Les autres températures évoluent de façon plus marquée. En effet, les variations atteignent  $10^{\circ}\text{C}$ .

Nous nous intéressons à la phase de démarrage de la production (bas du graphe) puis à l'incidence d'un arrêt momentané de la production d'une durée de deux cycles (2 mn 30).

VARIATIONS DE LA TEMPERATURE DE L'OUTILLAGE,  
(température à coeur, température de paroi)

Fig 16



CHANNEL	RANGE	REFERENCE TEMP.	ZERO SCALE VALUE	FULL SCALE VALUE	ALARM MIN	ALARM MAX	RESPONSE TIME	COLOUR
MULTIREG C1730	Nov.30.88	10:12'18	START	CHART DRIVE: 600 mm/h	LOGGING RATE: ---			
13	5: -200°C / +950°C J(Fe-CuNi)	0: Intern	025.0 °C	050.0 °C	-----	-----	0 s	6: ---
12	5: -200°C / +950°C J(Fe-CuNi)	0: Intern	025.0 °C	050.0 °C	-----	-----	0 s	5: ---
11	5: -200°C / +950°C J(Fe-CuNi)	0: Intern	025.0 °C	050.0 °C	-----	-----	0 s	4: ---
10	5: -200°C / +950°C J(Fe-CuNi)	0: Intern	025.0 °C	050.0 °C	-----	-----	0 s	3: ---
9	5: -200°C / +950°C J(Fe-CuNi)	0: Intern	025.0 °C	050.0 °C	-----	-----	0 s	2: ---
8	5: -200°C / +950°C J(Fe-CuNi)	0: Intern	025.0 °C	050.0 °C	-----	-----	0 s	1: ---

Le moule est régulé à une température de 29°C lors du démarrage de la production. Un nouvel équilibre thermique est atteint après 10 cycles de fabrication. Il s'établit autour de valeurs moyennes : de 35°C pour la partie centrale du moule, de 40°C pour les zones qui sont proches de la cavité.

Pendant la phase d'arrêt des injections, la rupture des cadences de production provoque un retour global à une température de 31°C. Le redémarrage de la machine demande à nouveau quelques cycles avant de retrouver les conditions d'injection qui précèdent.

Cette expérience permet d'expliquer les observations qui sont effectuées dans les ateliers de production. Les pièces incomplètes sont dues en partie à la température du moule.

D'une manière plus générale, d'autres problèmes d'origine thermique apparaissent dans les outillages. Les réseaux d'alimentation des moules de grande taille sont particuliers. Ils sont constitués d'ensembles à canaux chauds et de busettes d'injection. Ces éléments forment des points chauds au sein même du moule. Le contrôle de leur température est difficile. Une busette d'injection surchauffée provoque des flux de résine préférentiels qui déséquilibrent l'alimentation des empreintes. Ceux-ci peuvent entraîner la fabrication de pièces incomplètes.

Les busettes d'injection subissent des variations de température à chaque injection. Les gradients thermiques sont provoqués par la dissipation visqueuse du polymère qui s'écoule au travers de sections faibles. Ainsi, ces zones sont très sensibles aux cadences de production. Ces points de passage obligés influencent de manière nette les conditions de remplissage de l'outillage. La qualité de la pièce injectée est très dépendante de la stabilité thermique du ou des points d'injection.

#### Perturbations qui affectent le groupe d'injection-plastification

Avant le démarrage de la presse d'injection, le système vis-fourreau est dans un état d'équilibre donné. La demande soudaine de plastification provoque un déséquilibre. Les trois figures qui suivent illustrent le phénomène que nous décrivons (19) (20).

Le polymère utilisé, est un polyéthylène haute densité (PEHD). La température d'injection est réglée à 230°C.

Les figures 17, 18, 19 sont constituées comme suit :

Axe des abscisses : éloignement du point de mesure par rapport à la buse d'injection (le maximum : 95 mm correspond à la longueur de dosage)

Axe des ordonnées : écart entre la température mesurée et la température de consigne (230°C).

Chaque courbe correspond à un profil de température mesuré à une distance donnée par rapport à la paroi intérieure du fourreau.

Fig.17 :  
Répartition des écarts de température après la première injection

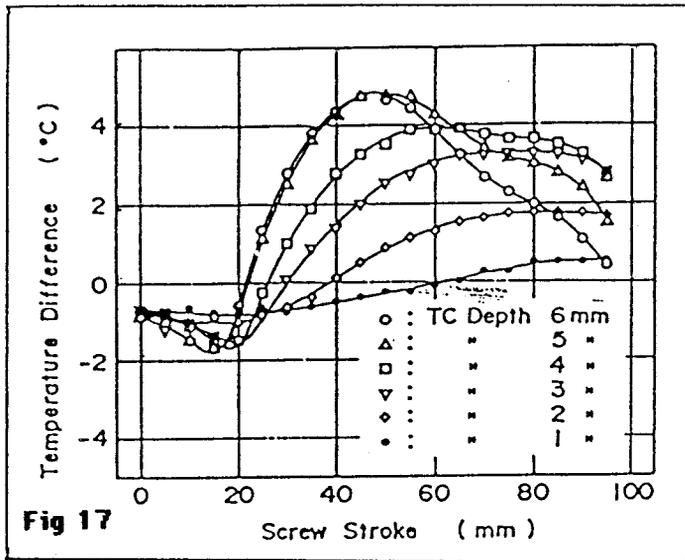
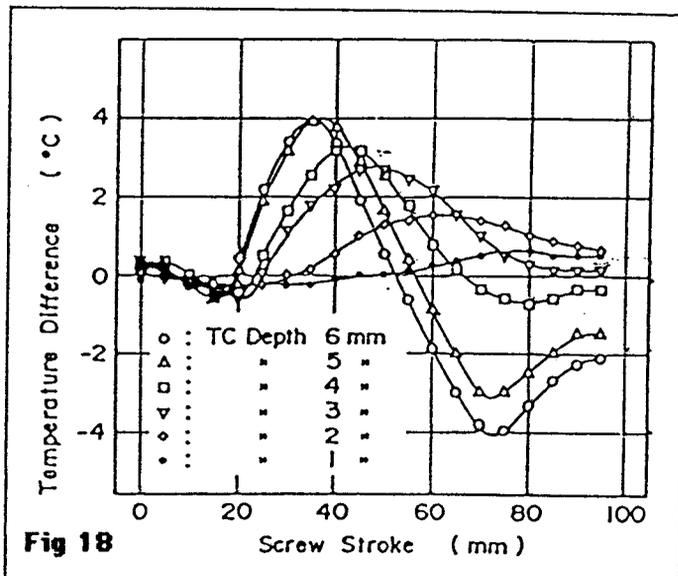


Fig. 18 :  
Répartition des écarts de température après la seconde injection



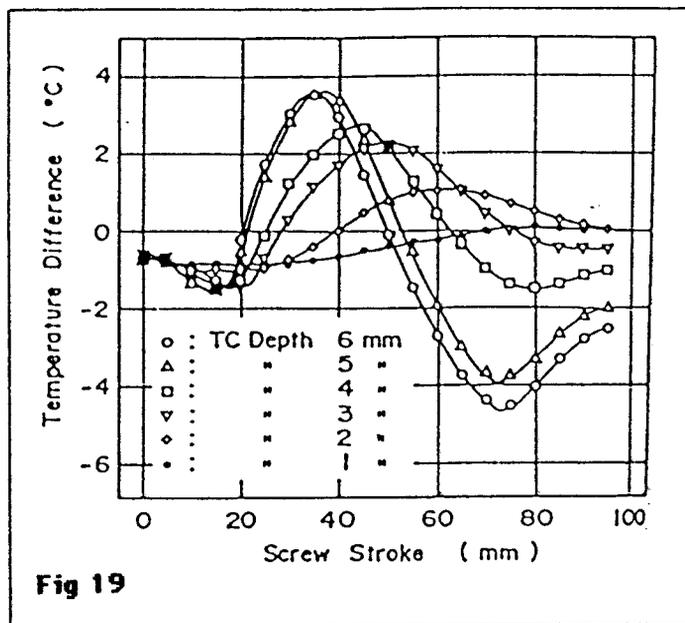


Fig. 19 :  
Répartition des écarts de température pendant une production stable (moyenne sur 6 cycles après 20 injections).

Ces figures font apparaître le manque d'homogénéité de la température dans le volume de polymère injecté d'une part et les variations de température dues au démarrage des injections d'autre part. Ces dernières atteignent près de 10°C dans la zone arrière du dosage.

Par ailleurs, la section du canal étudiée, est faible ( $\phi$  12 mm). Les fourreaux des machines d'injection ont des diamètres qui varient de 30 mm à 250 mm. Les gradients de température qui apparaissent dans une machine de production sont donc plus importants.

En conclusion, les exemples qui précèdent, nous permettent de bien situer les difficultés de démarrage d'une presse qui ont des conséquences importantes sur la gestion et les coûts de production.

En effet, à chaque mise en production, la présence d'un régleur est indispensable pour ajuster les paramètres de fonctionnement de la machine jusqu'à la stabilisation du processus.

Les moules de grande taille et de géométrie complexe sont coûteux au démarrage. Ils assurent donc des campagnes de production très longues. Néanmoins, les nouvelles techniques de changement rapide des outillages (15 minutes sur une presse de 1800 tonnes) permettent, a priori, de travailler en flux tendu.

Par ailleurs, ce type de production entraîne une augmentation des coûts de stockage.

L'amélioration des performances du processus d'injection fait partie de nos objectifs. L'obtention de la production "zéro défaut" systématique, donnera tout son intérêt à la notion de flexibilité dans le domaine de l'injection des résines thermoplastiques.

Avant de définir la technologie qui est mise en oeuvre pour améliorer le contrôle du processus d'injection, il est important de présenter le cycle d'injection sous

son aspect thermodynamique et les systèmes de commande qui en découlent.

### 2.3. Principe de l'adaptation de commande d'une presse pendant le cycle d'injection

#### 2.3.1. Définitions et hypothèses

Le cycle d'injection peut être représenté dans le diagramme d'état thermodynamique du polymère (diagramme dit PVT) :

- Pression (bar)
- Volume spécifique ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )
- Température (degrés C)

Les unités choisies, correspondant au système habituellement employé.

Nous considérons l'état du polymère complètement défini lorsque deux de ces variables sont connues. En effet, les trois paramètres sont reliés entre eux par une équation d'état.

#### Les modèles d'équations d'état des polymères

De nombreux auteurs ont tenté de définir des équations d'état universelles pour les polymères. La solution parfaite n'est pas encore atteinte. Cela se traduit par la présence de modèles multiples plus ou moins liés aux structures macromoléculaires des résines (amorphe, semi-cristallin).

Weir propose une relation polynomiale du type :

$$* V = V_0 [1 + A_1 * P + A_2 * P^2 + A_3 * P^3 + T(B_0 + B_1 * P + B_2 * P^2 + B_3 * P^3) + T^2(C_0 + C_1 * P + C_2 * P^2 + C_3 * P^3)]$$

(polymères à structure amorphe)

Une équation d'état est également présentée par Tait sous la forme qui suit (21) :

$$* 1 - \frac{V_0}{V} = C \times \ln\left(1 + \frac{P}{D}\right) \quad \text{dans laquelle } C \text{ et } D \text{ sont des fonctions de la température}$$

Dans ce cas particulier, une simplification peut être réalisée. En effet, la constance du paramètre C est généralement admise ( $C = 0,0894$ ). Toutefois, cette hypothèse devient hasardeuse dans la zone de transition vitreuse des polymères.

D'autres équations sont également proposées dans la littérature. Leurs formes générales prennent l'allure suivante :

$$* \quad \frac{V}{V_0} = \left[ \frac{1}{2} + \left[ \frac{P}{A} + \frac{1}{4} \right]^{1/2} \right]^{-B} \quad (36)$$

$$* \quad V = K_1 + K_2 * T + K_3 \exp [K_4 * T - K_5 * P] + K_6 * P * T^2 + \frac{K_7}{K_8 + P} \quad (14)$$

(comportement semi-cristallin)

L'intérêt principal de ces modèles réside dans la possibilité de créer une corrélation correcte entre les points de mesure expérimentaux et les points calculés à partir des équations.

Les données expérimentales qui sont traduites par ces modèles, ont l'allure qui suit :

Représentation de la variable Pression (P) dans l'espace Température (T), volume spécifique (V) :

Cas d'un polymère cristallin

fig. 20

Cas d'un polymère amorphe

fig. 21

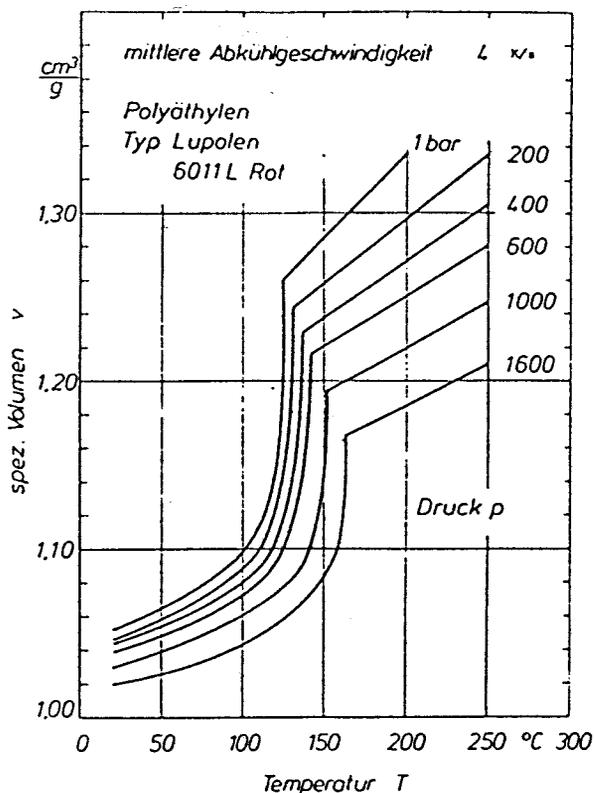


Fig 20

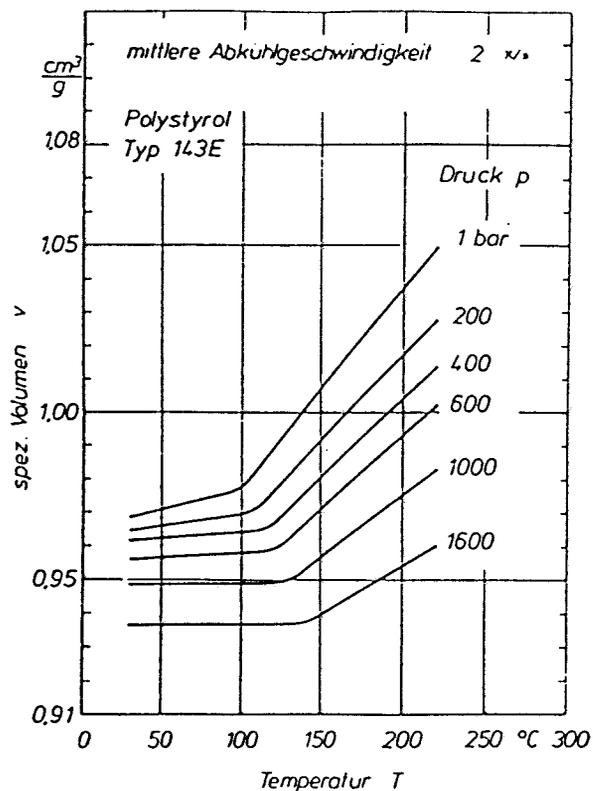
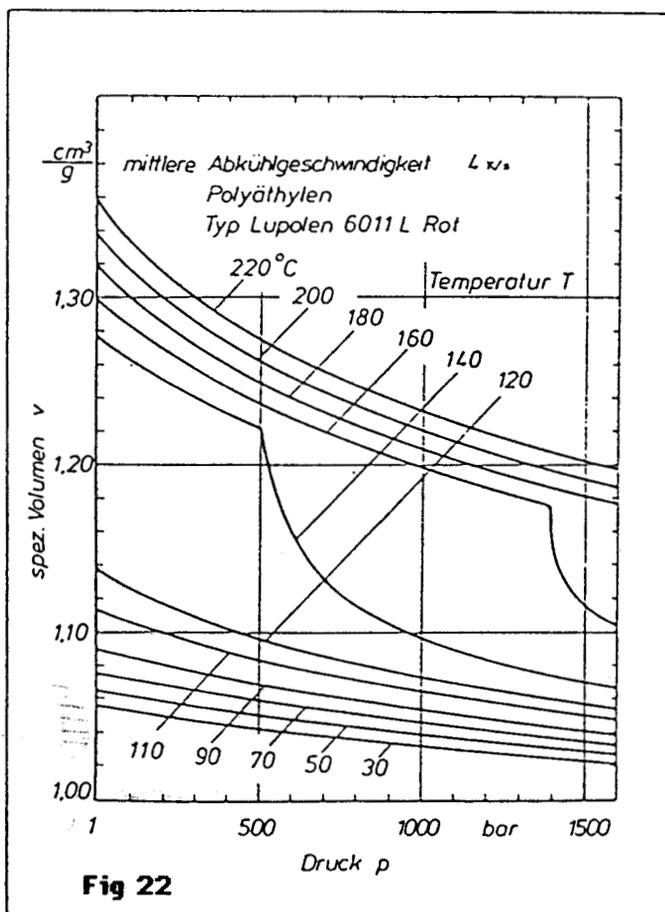


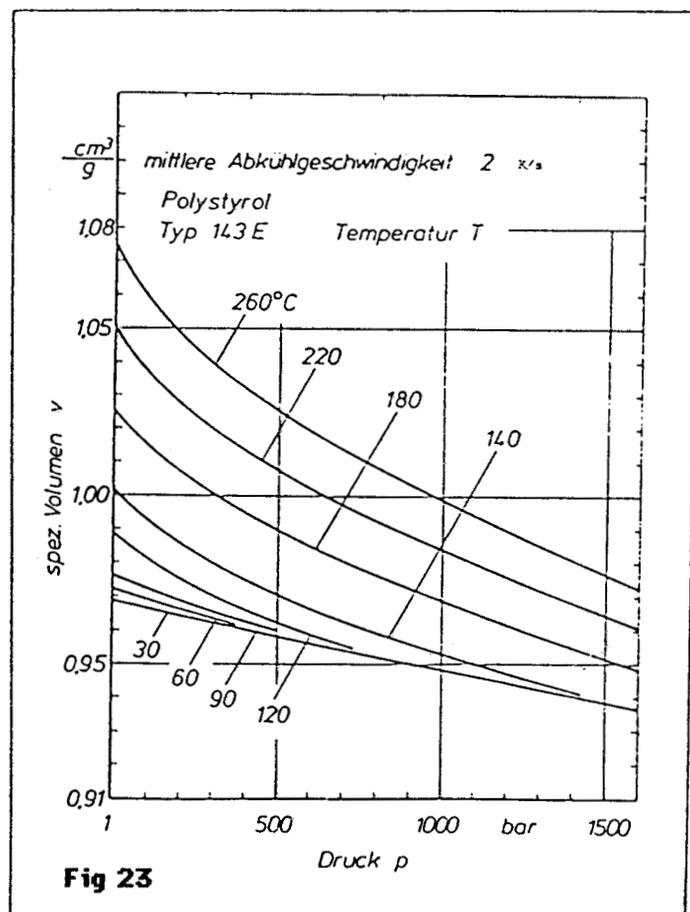
Fig 21

Représentation de la variable d'état Température (T)  
dans l'espace Pression (P), volume spécifique (V)

Cas d'un polymère cristallin  
fig. 22



Cas d'un polymère amorphe  
fig. 23



Ces différents espaces de représentation peuvent être utilisés pour tracer l'évolution de l'état de la matière au cours de sa transformation.

En effet, la matière subit des changements d'état en pression et en température. Ces variations sont généralement représentées dans l'espace température, volume spécifique. Toutefois, ce mode de représentation nécessite quelques hypothèses.

### Hypothèses de représentation

Nous pouvons nous placer en un point particulier de la pièce qui vient d'être injectée.

L'état thermodynamique de la matière située en ce point évolue sans cesse au cours du cycle d'injection.

En effet, deux phénomènes prennent naissance :

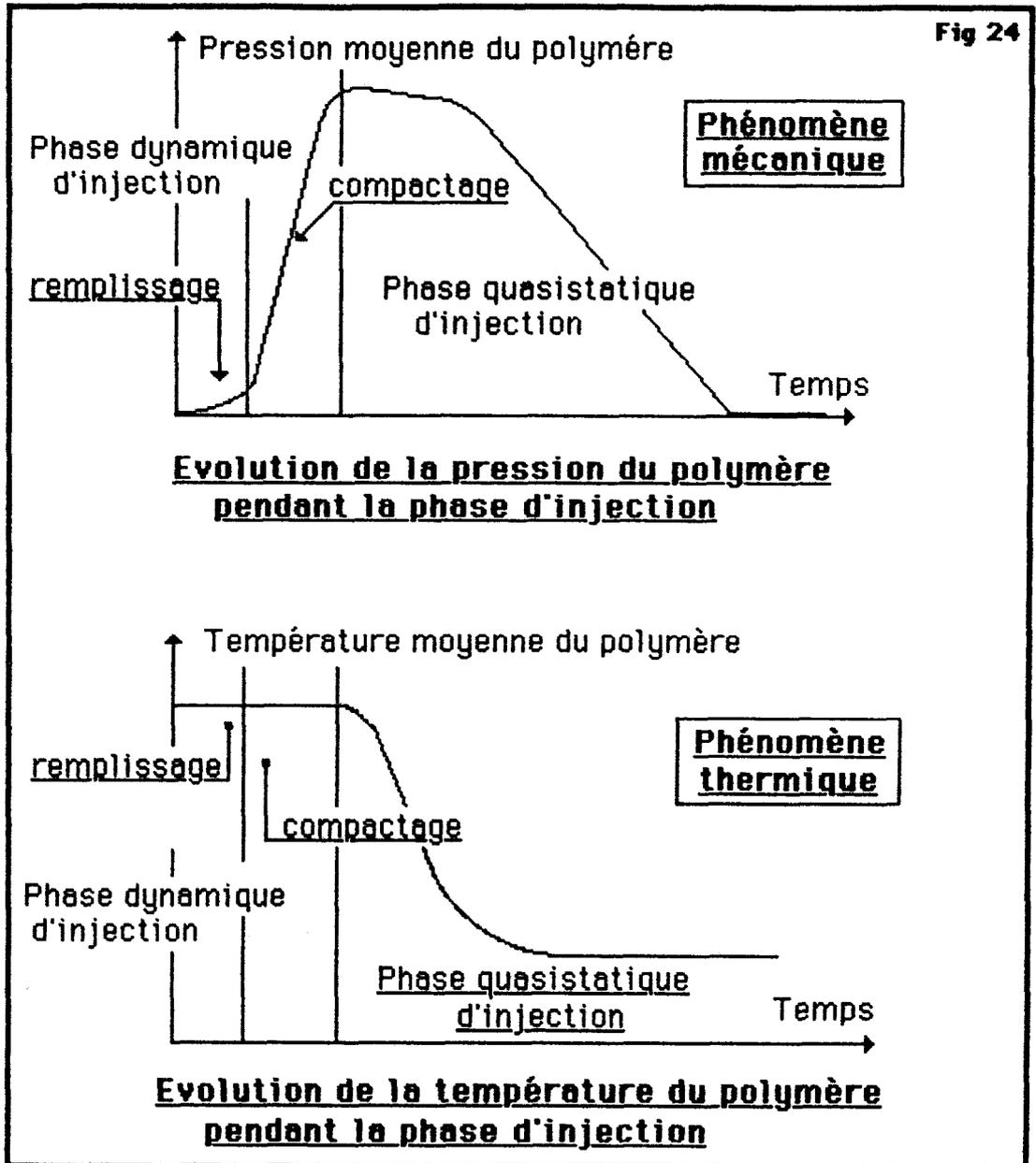
- un phénomène thermique
- un phénomène mécanique

La matière injectée, se trouve à une température importante (200 - 300°C). Elle est transférée dans un moule froid (10 - 90°C). Un échange thermique s'établit et la régulation de température du moule tend à refroidir le matériau.

Le phénomène mécanique qui trouve son siège dans un moule, est relatif à la pression exercée sur la matière. En effet, le remplissage d'une empreinte entraîne des pertes de charge importantes (quelques centaines de bars). Cela implique des montées en pression indispensables afin d'assurer un transfert complet du polymère vers le moule. Enfin, lorsque le moule est rempli, la pression de la matière diminue afin de rejoindre la pression ambiante. Nous associerons plus tard cette chute de pression et le phénomène du retrait.

Néanmoins, à tout instant et en tout endroit de l'empreinte, la température et la pression évoluent de manière différente. Les tendances sont identiques dans toute la pièce mais, elles s'établissent à des rythmes variables.

La figure 24 permet de mieux apprécier ce qui se passe dans l'outillage d'injection. Ces courbes concernent des valeurs moyennes de pression et de température.



En effet, les échanges thermiques sont différents au coeur de la pièce et sur la peau. Les conditions initiales sont également variables en fonction de l'éloignement par rapport au point d'injection.

Par ailleurs, le problème est identique en ce qui concerne les pressions. Nous admettons aisément ces conditions car l'évolution de pression est très corrélée avec l'évolution de la température qui est elle-même hétérogène dans l'ensemble du moule.

Toutefois, les représentations habituelles du cycle d'injection prennent en considération une pression moyenne dans l'empreinte et une température moyenne.

Le choix d'une pression moyenne n'est pas éloigné de la vérité lorsque nous nous trouvons dans la phase quasistatique d'injection.

Dès lors, le problème de la température moyenne prend toute son ampleur. En effet, les gradients thermiques sont importants dans toute l'empreinte. Ils provoquent des phénomènes très complexes reliés à la dynamique du régime thermique.

### Le problème du régime thermique instationnaire

Deux méthodes de détermination des diagrammes thermodynamiques sont disponibles dans la littérature :

- les diagrammes PVT établis en régime statique

La mesure du volume spécifique est effectuée sous pression constante et température constante (point par point)

- les diagrammes PVT établis en régime dynamique stable.

La mesure du volume spécifique est effectuée de façon continue en imposant une chute de température constante.

Chaque taux de refroidissement ( $0,5^{\circ}\text{C/s}$ ,  $5^{\circ}\text{C/s}$ , etc...) correspond à un diagramme.

Ces deux méthodes de mesure fournissent des résultats identiques au delà de la température de transition vitreuse des polymères amorphes et de la température de cristallisation des polymères semi-cristallins.

En-dessous de ces températures, la cinétique de refroidissement du polymère influence les résultats, la valeur de ces températures étant aussi elle-même influencée.

La figure 25 illustre ce phénomène. En effet, nous observons des différences de caractéristiques après le point de recristallisation qui correspond au changement brutal de pente sur les courbes isobares.

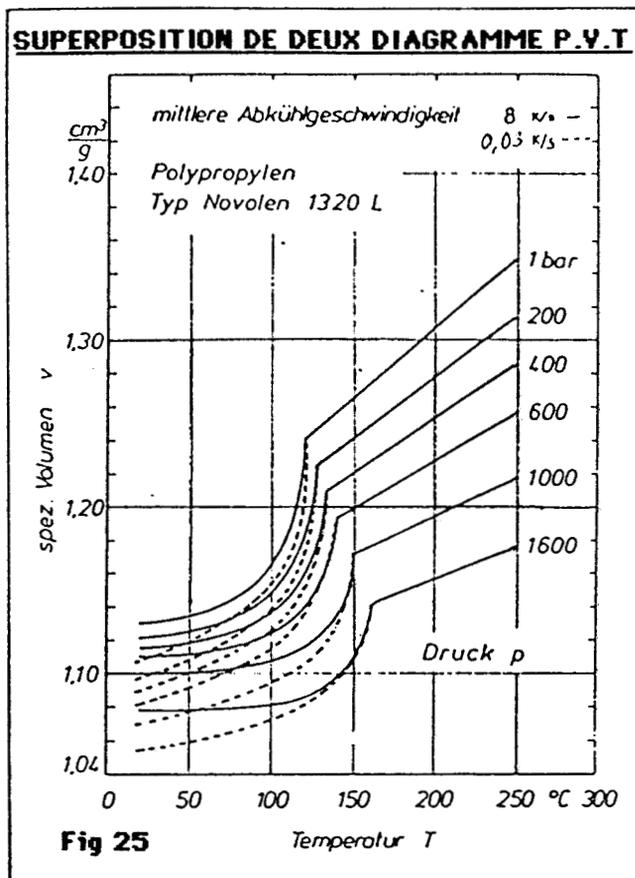


FIG. 25 : SUPERPOSITION DE DEUX DIAGRAMMES PVT ETABLIS A DES TAUX DE REFROIDISSEMENT DIFFERENTS

La solidification d'une pièce injectée est donc complexe. Les cinétiques de refroidissement du polymère dépendent de la géométrie de la pièce. Elles varient de manière sensible dans le sens de l'épaisseur de la pièce.

La peau de la pièce se refroidit parfois au rythme de plusieurs centaines de degrés Celsius par minute. A l'opposé, la température du coeur des pièces épaisses diminue de quelques degrés par minute.

Ces remarques interdisent théoriquement la représentation du cycle d'injection dans un seul diagramme thermodynamique. Néanmoins, cet outil permet de comprendre simplement les phénomènes qui régissent l'injection.

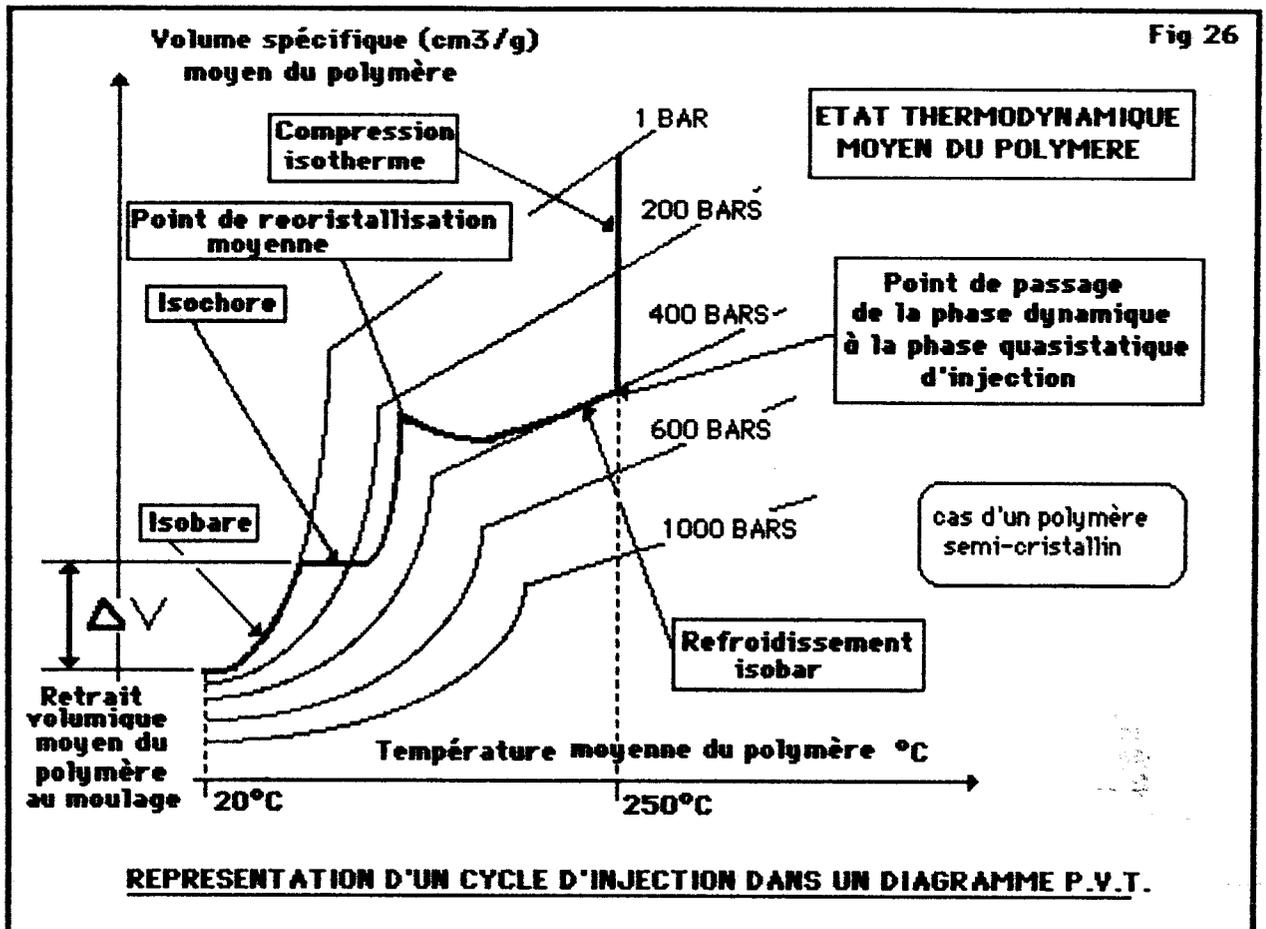
### 2.3.2. Représentation du cycle d'injection dans un diagramme PVT

Compte tenu de la définition du cycle d'injection, nous pouvons le représenter dans un diagramme PVT (cf chapitre sur le fonctionnement du système d'injection), sur la figure 26 où le temps est implicite.

En première approximation, la phase dynamique d'injection est représentée sous la forme d'une compression isotherme. La phase de maintien correspond à un refroidissement isobar à son tout début.

Puis, le maintien associe une chute de pression avec une diminution de température. Enfin, un refroidissement isochore s'établit quand l'entrée de la cavité se solidifie.

La trajectoire se termine le long de l'isobare 1 bar au cours du refroidissement complet de la pièce injectée.



Cette représentation permet de mettre en évidence la notion de retrait au moulage. En effet, une pièce moulée a toujours des dimensions inférieures à celles de l'empreinte dans laquelle le polymère est injecté.

Ce retrait correspond à la différence de volume spécifique du polymère au cours de son refroidissement le long de l'isobare 1 bar. Le diagramme PVT révèle l'existence d'un retrait volumique.

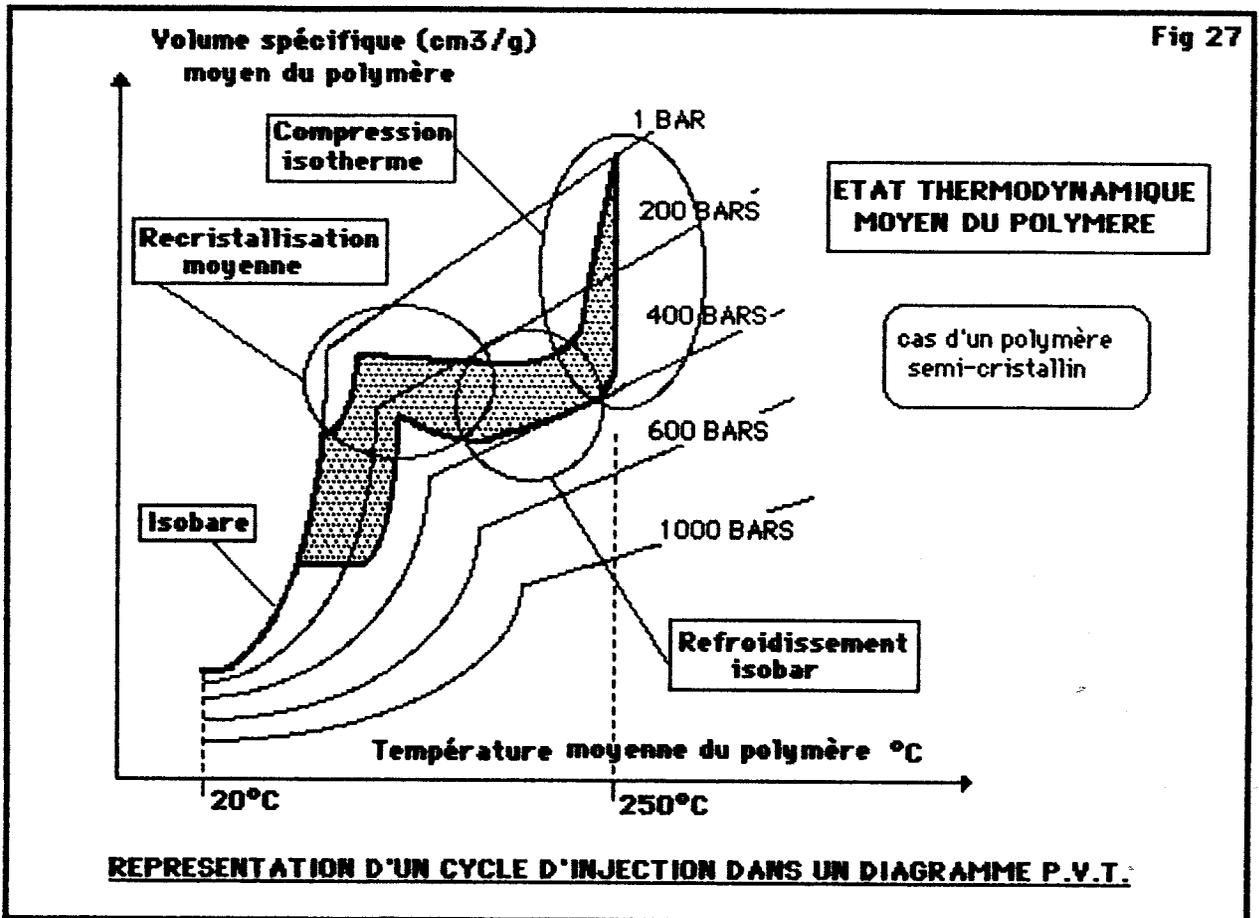
Néanmoins, le retrait des pièces injectées n'est pas homogène. Il dépend de nombreux paramètres : épaisseur de pièce, température d'injection, vitesse de refroidissement, orientation du polymère, etc... Il est difficile à maîtriser.

Les difficultés qui sont liées au contrôle du retrait n'apparaissent donc pas dans le type de représentation qui est choisi. Cette dernière présente pourtant l'avantage de

faire une bonne synthèse des phénomènes qui nous intéressent.

Nous pouvons améliorer notre schématisation avec les tracés des phénomènes thermodynamiques qui affectent le polymère placé au fond de la cavité du moule d'une part, et le polymère qui se trouve à l'entrée de l'empreinte de l'outillage d'autre part.

Nous obtenons les tracés de la figure 27 :



Nous connaissons les multiples perturbations qui affectent l'état d'équilibre du processus d'injection. Nous avons montré les difficultés qui sont liées au démarrage des productions.

La représentation du cycle d'injection dans un diagramme thermodynamique permet de définir un système de contrôle idéal du processus d'injection. C'est un dispositif qui absorbe toutes les perturbations. Par conséquent, ce système de commande est capable d'assurer la reproductibilité des conditions de transformation du polymère. Ceci se traduit par le parcours d'un chemin thermodynamique moyen constant cycle après cycle. C'est-à-dire le contrôle de l'état thermodynamique du polymère au cours de sa transformation.

Les diagrammes PVT sont utilisés par certains constructeurs de presse à injecter afin d'améliorer les performances de leur machine.

La phase dynamique d'injection est réalisée avec un contrôle en boucle fermée sur la vitesse de la vis d'injection. Néanmoins, la rapidité de la phase de compactage ne permet pas un contrôle aisé. En effet, les vitesses de montée en pression atteignent plusieurs milliers de bars par seconde dans les cas extrêmes.

Aussi, les constructeurs se sont davantage intéressés à la phase quasi-statique d'injection. Nous avons montré l'influence de la phase de maintien sur les caractéristiques géométriques d'une pièce injectée. Cet axe de développement est donc important. Par ailleurs, la phase de maintien est souvent plus longue que la phase d'injection dynamique. Cela permet de contrôler le processus sur une durée importante.

Nous nous intéressons donc maintenant aux systèmes de commande PVT qui existent ou ont existé.

### 2.3.3. Les dispositifs de commande basés sur les diagrammes PVT

Les systèmes de contrôle de la phase de maintien, sont tous construits à partir d'une même base : les diagrammes thermodynamiques PVT des résines thermoplastiques injectées. Le succès commercial de ces modules est inexistant. En effet les unités d'injection qui sont équipées de tels dispositifs sont rares. Nous définissons plus loin leur principe de fonctionnement commun. Par ailleurs, ces machines ne sont pas installées sur des sites de production.

En France, les premières presses d'injection à "régulation PVT" ont été commercialisées sans succès à partir de 1975. En effet, l'exemple du module 6 de la société DK CODIM est caractéristique. A cette époque, cette société a vendu moins d'une dizaine d'unités de production de cette nouvelle génération. De nos jours et, à notre connaissance, sur ces dix unités, seules deux machines sont utilisées avec un module PVT actif en laboratoire.

Les responsables de la société qui commercialisaient le module CPI 03 à la fin des années 1970 ont abandonné ce produit vers 1985, faute d'acheteur.

La société SANDRETTO a lancé sur le marché un module PVT 1 au cours du salon international EUREXPO-PLASTEXPO de Lyon en Septembre 1988.

La réussite commerciale de ce nouveau modèle est, elle-même probablement nulle. En effet, dès le début de l'année 1989 SANDRETTO annonce la création d'un nouveau

modèle : le PVT 2. Ce modèle est mis en vente à partir d'un argument qui étonne : "le PVT 1 n'était pas au point".

Les systèmes de commande PVT semblent peu prisés des transformateurs. Les explications qui suivent nous éclairent pour comprendre ce manque de motivation.

Nous éliminons de notre propos les systèmes de commande rattachés aux diagrammes PVT pour des raisons commerciales. En effet, ils ne présentent aucun intérêt car leur mode de fonctionnement est souvent peu évolué. Certaines "astuces" commerciales consistent à utiliser le sigle PVT pour créer la confusion entre :

PVT :            Pression de    Volume spécifique    Température de  
                  la matière    de la matière        la matière

et

PVT :            Pression            Vitesse d'injection    Température du  
                  hydraulique    fourreau

ou

PVT :            Position de    Viscosité de la        Température du  
                  vis                    résine                    fourreau  
                  d'injection

Les seuls modules de commande basés sur les diagrammes PVT des résines, sont les suivants :

- module 6 DK CODIM (fabricant de presses)
- CPI 03 (société d'automatisation des ateliers)
- module ENGEL (fabricant de presses)
- système PVT 1 SANDRETTO (fabricant de presses)
- système PVT 2 SANDRETTO
- module UNILOG 8000 BATTENFELD (fabricant de presses)

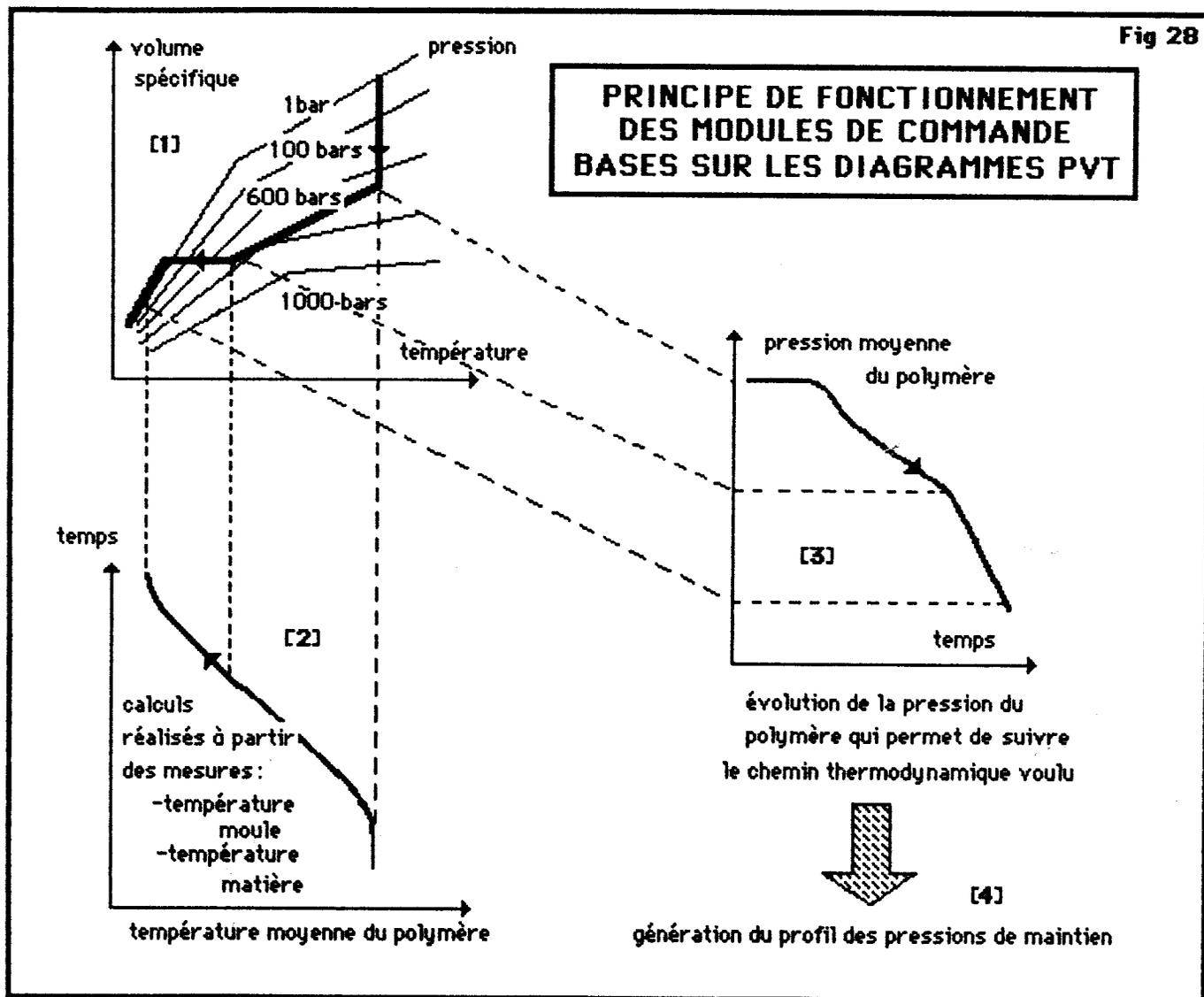
Nous ne décrivons pas dans le détail ces différents types de commande. Ils dérivent des travaux réalisés à l'IKV (Institut Für Kunststoff Verarbeitung) d'Aix-la-Chapelle (RFA) où le professeur MENGES a été l'initiateur de ces recherches. Ainsi l'IKV a travaillé pour une meilleure maîtrise du cycle d'injection entre 1970 et 1980. Aujourd'hui encore, ce sont les résultats obtenus à cette époque qui sont exploités (22) (23) (24) (25) (26) (27).

Le principe de fonctionnement d'un module de commande PVT est le suivant :

- connaissance des diagrammes thermodynamiques de la résine
- définition d'une trajectoire thermodynamique moyenne (idéale) dans ces diagrammes [1]

- calcul de la température moyenne du polymère en fonction du temps pendant le refroidissement de la pièce [2]
- calcul de l'évolution de pression associée à l'évolution de température pour le chemin thermodynamique moyen choisi [3]
- application et contrôle de l'évolution de pression ainsi calculée [4].

La figure 28 résume la démarche employée (14) (28):



Les principales difficultés de mise en oeuvre de ce modèle sont les suivantes :

\* les diagrammes thermodynamiques des résines ne sont pas fournis par les producteurs de matières premières. La mesure des caractéristiques PVT d'une résine n'est pas

facile. En Europe, un seul laboratoire intègre dans ses prestations de service la mesure de diagramme PVT. Cette unité est une résurgence de l'IKV qui a évidemment une grande expérience dans ce domaine. Ces essais sont coûteux et longs à réaliser.

Par ailleurs, les diagrammes PVT sont fournis sous la forme de réseaux de points. Leur mise en équation n'est pas simple. En effet, elle concerne les isobares des matériaux semi-cristallins qui présentent une discontinuité aux températures de cristallisation.

\* La trajectoire thermodynamique moyenne et "optimale" de la résine est parfois délicate à suivre. En effet, les conditions initiales de la phase de maintien en pression sont difficilement reproductibles (voir le chapitre sur le problème du passage en phase de maintien).

\* Les cinétiques réelles de refroidissement ne sont pas prises en compte.

\* Les calculs des échanges thermiques entre la résine et l'outillage sont effectués à partir d'informations peu précises.

La température du polymère est souvent relevée de façon ponctuelle dans la buse d'injection. Seule la société DK CODIM propose une mesure de température qui intègre le manque d'homogénéité du produit fondu avant son injection (mesure par émission I.R.).

Le problème est identique pour la température de l'outillage. Des gradients de température importants sont présents dans de telles masses d'acier. Les systèmes de régulation thermiques sont associés à des réseaux de canalisation parfois complexes. Dans les applications modernes, les outillages sont régulés en température par zone. Ceci rend impossible la prise en compte d'une température moyenne.

\* La régulation de la pression pose un problème essentiel. En effet, les modules de commande qui sont en service en milieu industriel, présentent une lacune importante (29).

La régulation de la pression de la résine n'est pas effectuée directement dans l'outillage. En réalité les constructeurs de machine supposent que la pression hydraulique est directement corrélée à celle du polymère dans l'empreinte. Cette hypothèse simplificatrice est acceptable dans un nombre de cas très limité. La géométrie de l'empreinte, les caractéristiques visco-élastiques du polymère, la géométrie des canaux de remplissage et celle des seuils d'injection sont des paramètres qui limitent rapidement le transfert de la pression hydraulique appliquée sur la vis d'injection, vers le polymère injecté.

Ce choix permet d'éviter une difficulté majeure. En effet, le problème de l'emplacement du capteur de pression dans l'outillage ne se pose plus. Nous montrons plus loin la solution qui est choisie pour répondre à cette question.

Le principe général des systèmes de commande qui utilisent les données thermodynamiques, est marqué par la volonté d'atteindre l'isobare 1 bar au même endroit d'un cycle à l'autre. Nous avons montré les carences des différents dispositifs qui sont industrialisés. Ainsi, l'amélioration des performances de ces modules de contrôle est nécessaire. Elle justifie donc la définition du programme de recherche.

**3. PROGRAMME DE LA RECHERCHE**

### 3.1. Organisation de la recherche

#### ※ Modification d'une machine d'injection classique :

Nous équipons une presse à injecter d'un module de commande supplémentaire afin de réaliser un asservissement sur la pression du polymère au cours de la phase de maintien.

#### ※ Instrumentation d'un outillage d'injection :

Nous implantons des capteurs de pression et des sondes de température dans un outillage d'injection. Il est nécessaire d'installer plusieurs capteurs de pression car certains choix technologiques sont à réaliser.

#### ※ Essais préliminaires :

Ces campagnes d'essais permettent de vérifier s'il est possible de contrôler la pression du polymère d'une part et de définir le rôle des différents capteurs en fonction de leur emplacement d'autre part.

#### ※ Réglages des paramètres de régulation en pression avec deux matériaux de comportements rhéologiques différents :

- . une résine polypropylène semi-cristalline (PP)
- . une résine acrylonitrile - butadiène - styrène amorphe (ABS)

Le choix de ces produits permet de rencontrer les difficultés qui sont reliées aux deux structures fondamentales des polymères.

Par ailleurs, le PP et l'ABS sont des résines de grande consommation dans le domaine de la transformation des polymères.

#### ※ Evaluation des performances du système de commande face à certaines perturbations :

Nous déstabilisons volontairement le processus afin d'analyser les conséquences de différentes perturbations sur la qualité de la pièce fabriquée :

\* influence d'une perturbation de la température du polymère

\* influence d'une perturbation de la température de l'outillage

Lors de ces expériences, nous comparons les capacités qui sont offertes par le modèle de commande proposé d'une part et par un système classique de régulation sur la pression hydraulique d'autre part.

✱ Evaluation des possibilités de réglage du dispositif de maintien en pression :

Nous contrôlons l'influence du niveau de pression sur la géométrie de la pièce. Le but de ce travail est de montrer s'il est possible de régler les dimensions d'une pièce injectée.

Néanmoins, la qualité dimensionnelle de la pièce ne doit pas nuire à sa qualité mécanique. Il faut donc analyser l'influence du système de commande sur ce dernier point.

✱ Etude de l'influence du dispositif de maintien sur les caractéristiques mécaniques d'une pièce injectée:

\* influence sur le taux de contraintes internes qui est présent dans la pièce injectée d'une part,

\* influence sur les caractéristiques mécaniques d'une ligne de soudure d'autre part.

### 3.2. Description du modèle de commande mis en oeuvre

L'objectif essentiel de cette étude est le contrôle de la qualité dimensionnelle des pièces injectées. La première difficulté est liée à la présence d'un taux de retrait au moulage important pour les résines thermoplastiques.

Par ailleurs, le retrait ne s'établit pas de façon homogène. Nous mettons en oeuvre une unité d'injection classique, avec certaines modifications qui seront justifiées ultérieurement.

Une première évolution consiste à réaliser le contrôle de la pression du polymère de manière directe. Néanmoins, les phénomènes thermiques qui naissent au sein des outillages, ne facilitent pas l'obtention d'un profil de pression variable dans le temps. Cette difficulté majeure remet en cause une partie du chemin thermodynamique moyen du polymère : le trajet sur une isochore.

Le refroidissement isochore est possible quand le seuil d'alimentation de la cavité de l'outillage est solidifié. En effet, la masse de polymère présente dans l'empreinte, n'évolue plus car l'alimentation est impossible, et le volume de l'empreinte est fixe si le moule est, par hypothèse, indéformable.

Ainsi le rapport entre le volume et la masse du polymère dans la cavité, est constant. Nous obtenons un comportement isochore au cours du refroidissement de la résine. Il est représenté par une droite horizontale dans un diagramme PVT.

Cette isochore sera toujours parcourue quand l'empreinte est isolée du réseau d'alimentation en polymère. Elle atteint l'isobare 1 bar pour un volume spécifique constant. Dans ce cas, la qualité géométrique de la pièce est toujours la même.

Nous fixons un nouvel objectif. Il consiste à :

**atteindre la solidification du seuil d'injection avec une pression constante du polymère dans l'empreinte.**

Dans ce cas, l'isochore parcourue, débute toujours à partir du niveau de pression imposé.

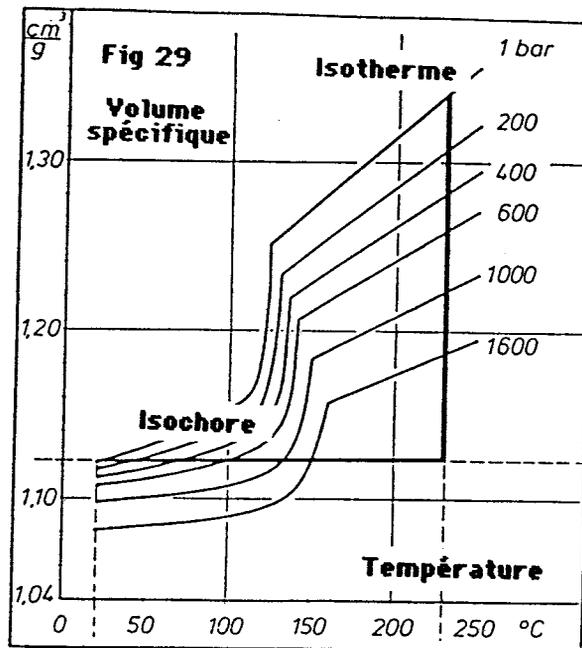
Le bouchage de la cavité intervient quand la résine atteint une température critique qui dépend de la cinétique de refroidissement. Celle-ci présente peu de variation pour un même lot de fabrication.

Ainsi, nous accédons à l'isochore décrite ci-dessus avec une température moyenne du polymère constante d'une part et avec une pression moyenne du polymère constante d'autre part. Ceci se traduit par un point de passage qui est fixe dans le diagramme PVT.

La répétabilité des conditions de travail est assurée de cette manière. Les arguments qui suivent, expliquent aussi le choix de cette technique de travail. Un modèle d'injection théorique permet de supprimer le retrait. Mais les limites technologiques interdisent le passage de ce modèle théorique à la réalité technique.

En effet, nous pouvons imaginer un cycle d'injection idéal. Il est composé d'une phase de remplissage puis de la compression isotherme d'une part et d'une phase de refroidissement isochore d'autre part.

Si la phase isochore est obtenue à partir d'un volume spécifique Normal (au sens thermodynamique du terme, c'est-à-dire sous des conditions normales : 1 atmosphère, 23°C), le retrait du polymère est nul. Le cycle d'injection prend l'allure de la figure 29, dans un diagramme PVT.



Ce cycle d'injection idéal pose trois problèmes pratiques incontournables :

- le contrôle du parcours isochore
- le niveau de pression en fin de remplissage
- le démoulage de la pièce finie

En effet, le parcours isochore est réalisé à travers une évolution permanente de la pression du polymère. Le contrôle d'un régime de pression dynamique est complexe. Des tentatives peu fructueuses ont déjà été menées à l'IKV d'Aix-la-Chapelle (26). Nous montrons alors les difficultés qui ont été rencontrées pour effectuer le contrôle d'un régime de pression statique.

Par ailleurs, le niveau de pression qui doit être atteint dès le début de la progression isochore, est très élevé. L'exemple tracé dans le diagramme qui précède, nous donne, en début d'isochore, une pression du polymère de 3000 bars environ.

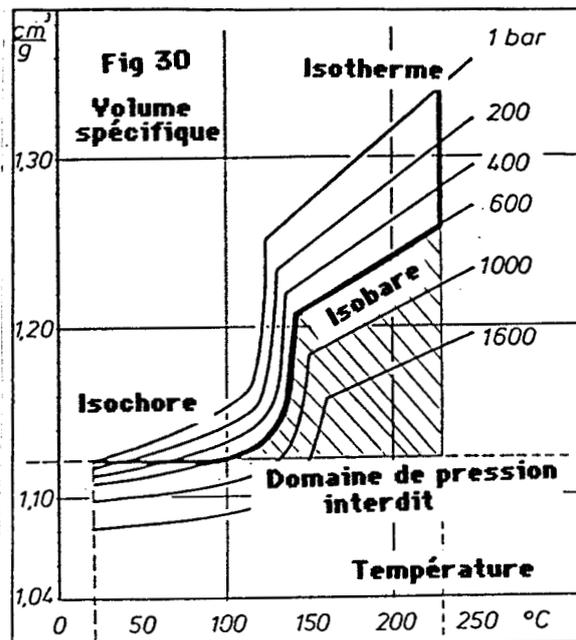
Or, les pressions maximales d'injection qui sont disponibles actuellement, ne dépassent pas 2500 bars. Ces pressions sont mesurées en tête de vis. Ainsi, elles correspondent à des valeurs optimistes : elles sont, en effet plus faibles dans la cavité du moule.

Par ailleurs, des pressions élevées dans un outillage, entraînent des forces de verrouillage importantes. Il est nécessaire de surdimensionner les ensembles de fermeture des presses à injecter. Ceci entraîne des baisses de productivité.

Enfin, les outillages ne sont pas en mesure d'accepter de très hautes pressions. Des pressions élevées provoquent une fatigue importante. Certains systèmes d'éjection de pièce imposent des jeux mécaniques qui sont des sources de fuite du polymère si ce dernier est mis sous haute pression.

La troisième difficulté qui est rencontrée avec ce modèle d'injection, concerne un point pratique : celui du démoulage. En effet, la pièce injectée occupe exactement le volume de l'empreinte. Ainsi, le frottement du polymère solide sur les parois de la cavité s'oppose à la sortie de la pièce. La qualité d'aspect est alors mise en cause.

Un autre modèle doit être envisagé. L'exemple qui suit, prend en considération un moule dans lequel la pression moyenne du polymère ne peut pas excéder 600 bars. Nous appliquons le principe du contrôle du retrait en intégrant cette contrainte technologique. Le cycle d'injection qui devient réalisable, est représenté dans le diagramme PVT déjà utilisé (fig. 30):



Dans ce cas, le cycle d'injection est décomposé en trois phases :

- une compression isotherme jusqu'à 600 bars
- un refroidissement isobar jusqu'au volume spécifique normal
- un refroidissement isochore jusqu'à la pression atmosphérique

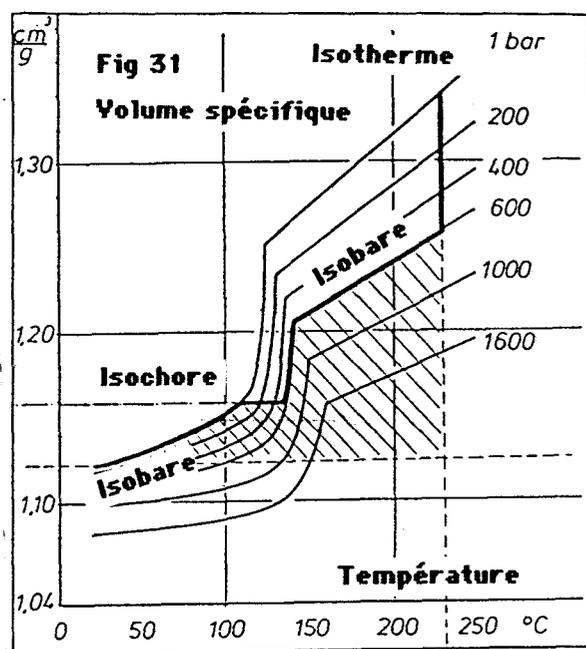
Le domaine de pression qui est situé au-delà de 600 bars, est évité. L'état thermodynamique moyen du polymère longe la frontière isobare du domaine interdit.

Le nouveau cycle d'injection est : d'une part plus réaliste, d'autre part plus facile à obtenir. En effet, le contrôle de la pression du polymère consiste à entretenir un régime statique (isobar) avant de retrouver le régime dynamique des pressions indispensables pour parcourir l'isochore finale. Nous avons déjà évoqué les difficultés d'obtention de cette dernière.

Néanmoins, ce cycle est encore trop idéaliste par rapport à la réalité. Le contrôle de la pression du polymère est réalisé à partir du groupe hydraulique de l'unité d'injection. Le transfert de la pression vers l'empreinte de l'outillage est impossible quand le seuil d'injection est solidifié. Cette voie d'accès à la pièce est toujours de faible section. Ainsi, le seuil d'injection se solidifie rapidement. La pression n'est plus transférée vers l'empreinte du moule. Cependant, la température moyenne du polymère est encore élevée au coeur de la pièce.

Dans ces conditions, la trajectoire isochore est abordée plus tôt au cours du cycle. Elle correspond à un volume spécifique supérieur à celui du cas qui précède.

Donc l'obtention d'une retrait nul est impossible. En effet, le cycle obtenu, se termine par un élément de parcours sur l'isobare 1 bar. La pièce obtenue, présente un retrait à l'injection. La représentation de ce cycle d'injection dans un diagramme PVT prend alors la forme qui suit (fig. 31) :



Le passage de l'évolution isobare du polymère à son évolution isochore dépend de la forme du seuil d'injection. Néanmoins, la régulation de pression qui est choisie dans notre cas, permet de parcourir l'isobare voulue sur sa partie la plus importante.

Le contrôle du retrait est impossible à cause de plusieurs contraintes technologiques. Ainsi, notre objectif se rapporte au contrôle de la constance et de la stabilité de ce retrait. Il faut atteindre l'isobare 1 bar avec un volume spécifique moyen du polymère constant. L'isochore parcourue au cours du cycle, doit rester la même d'une injection à l'autre. La rupture de relation entre la cavité et le groupe d'injection doit être réalisée dans des conditions thermodynamiques identiques.

Nous atteignons cet objectif d'une part au niveau de la pression et d'autre part au niveau des températures. En effet, notre système de contrôle impose la pression moyenne du polymère. Par ailleurs, le seuil d'injection se fige toujours à la même température. Les variations de la cinétique de refroidissement sont faibles dans cette zone de taille réduite. Ainsi, les conditions de température peuvent être considérées identiques pour le polymère qui se trouve au-delà de ce seuil juste solidifié.

Les paramètres thermiques du processus d'injection présentent des inerties importantes. Néanmoins, il est possible de réguler la température d'un outillage complet. Il faut alors limiter les gradients thermiques qui peuvent s'y développer. Certains outillages complexes présentent plusieurs zones qui sont régulées en température, indépendamment les unes des autres.

Cette relative souplesse de réglage est inexistante pour les pressions. Ainsi, les emplacements des capteurs de pression installés dans le moule, jouent un rôle essentiel. Nous organisons donc notre travail en donnant la priorité à ce problème.

**4. MISE EN PLACE DES MOYENS  
EXPERIMENTAUX ET DETERMINATION  
DE LA LOI DE COMMANDE UTILISEE**

L'ensemble des moyens expérimentaux est  
présenté figure 32

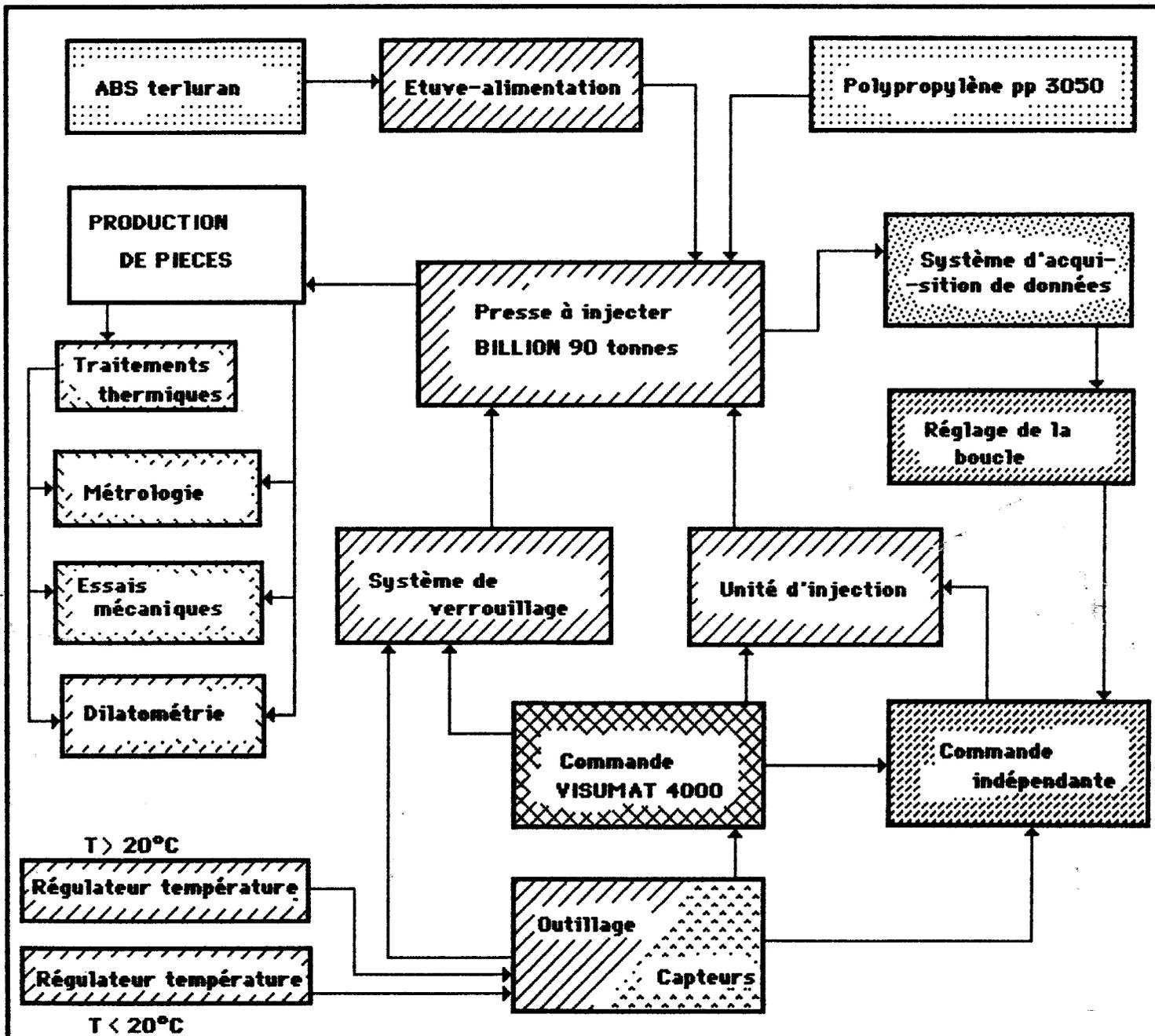


Fig 32

ENSEMBLE DES MOYENS EXPERIMENTAUX MIS EN PLACE

Les cinq composantes principales sont :

- l'unité d'injection et ses périphériques,
- les dispositifs qui servent au contrôle de la qualité des pièces,
- les matières premières utilisées,
- l'outillage instrumenté,
- le système de commande de la phase de maintien qui est rapporté au dispositif de commande classique.

#### 4.1. L'unité d'injection et ses périphériques traditionnels

(annexe 1)

Nous travaillons avec une machine de la marque BILLION de force de fermeture de 90 tonnes. La presse est équipée d'une servo-valve pour piloter le groupe d'injection. Le système de commande de la presse est un automatisme à microprocesseur du type VISUMAT 4000.

Il s'agit d'une presse à injecter d'excellente qualité qui appartient à une génération de machines très récente :

- un pilotage de la vitesse d'injection en boucle fermée pendant la phase dynamique d'injection,
- une possibilité de passage en phase de maintien par seuillage de la pression du polymère dans l'empreinte du moule,
- un asservissement en boucle fermée sur la pression hydraulique pendant la phase de maintien.

La pression hydraulique maximale disponible, de 160 bars permet de générer une pression de 1650 bars sur le polymère qui se trouve en tête de vis.

L'élément important de la machine est la servo-valve qui équipe le groupe d'injection. Ce servo-distributeur offre un débit nominal de 160 litres/minutes d'une part et un temps de réponse de 35 millisecondes pour 100% de sa course d'autre part. Cette qualité permet d'envisager de bonnes performances pour l'asservissement mis en place (annexe 3).

Les matériels périphériques sont les suivants :

\* Les régulateurs de la température de l'outillage :

- un groupe refroidisseur dont la puissance de refroidissement maximale est de 4000 kcal/h et la puissance de chauffage atteint 3 kW

- un groupe réchauffeur dont la puissance de chauffage est de 6kW et la puissance de refroidissement de 9000 kcal/h.

Ces équipements sont surdimensionnés par rapport à l'outillage utilisé.

\* Le système d'alimentation et de séchage automatique :

Il permet d'assurer l'étuvage de la résine ABS de façon continue. En effet, ce produit reprend quelques points d'humidité en stockage. Il faut le sécher pendant 2 heures à 80°C pour le transformer.

Dans le cas contraire, la viscosité du polymère est variable et des défauts d'aspect de surface sont créés sur les pièces.

#### 4.2. Les dispositifs de contrôle de la qualité de la pièce

Cet ensemble de matériels est constitué d'une balance METTLER précise au dixième de milligramme pour le contrôle des masses.

Par ailleurs, différents montages de mesures dimensionnelles ont été confectionnés. L'élément de mesure est un comparateur électronique MITUTOYO de précision 1 micron (annexe 4).

Enfin, les caractéristiques mécaniques des pièces ont été relevées avec un dynamomètre INSTRON pour les essais de traction d'une part et avec un dilatomètre ADAMEL LOMARGHY pour les essais de dilatométrie d'autre part.

#### 4.3. Les matières premières utilisées (annexe 2)

Nous utilisons deux polymères différents :

\* un polymère à structure semi-cristalline, le polypropylène PP3050 MN1 de APPRYL,

\* un polymère à structure amorphe, l'acrylonitrile-butadiène-styrène : ABS Terluran 969 T de BASF.

Les polypropylènes et les ABS sont des résines de grande diffusion. Elles sont employées pour la fabrication d'un grand nombre d'articles.

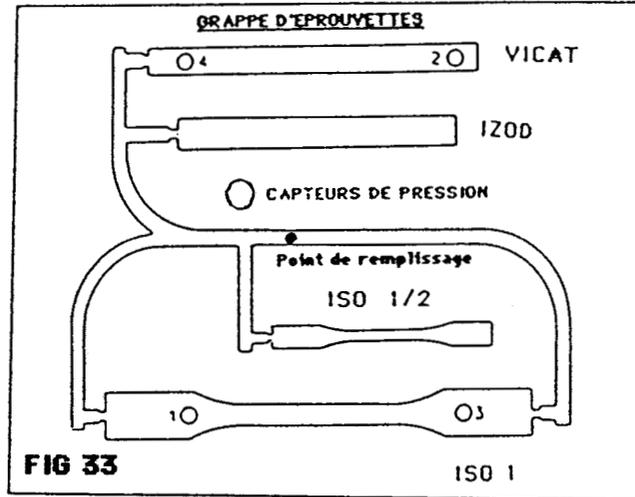
Ce ne sont pas des résines techniques. Néanmoins, de nombreuses pièces automobiles sont fabriquées avec ces produits : planche de bord, pare-choc, grille de calandre, etc...

Le polypropylène présente un retrait important qui pose des problèmes de qualité dimensionnelle de pièce. Par ailleurs, sa viscosité est faible. La résine ABS est, au contraire, très visqueuse. Elle présente des difficultés dans le cadre du contrôle des pressions dans les outillages mais, son retrait est plus faible.

Les deux grades de résine utilisés, ont été approvisionnés en quantité suffisante dès le début de l'étude afin d'éviter les changements de lot de fabrication au cours des essais.

#### 4.4. L'outillage instrumenté

Les pièces fabriquées, sont des grappes d'éprouvettes normalisées dont les quatre empreintes sont séparées des canaux d'alimentation par des seuils rectangulaires. La pièce complète apparaît sur la figure 33 :



Nous avons implanté des capteurs d'une part dans l'empreinte d'éprouvette normalisée ISO 1, et d'autre part dans l'empreinte d'éprouvette normalisée VICAT.

Chaque empreinte dispose de deux capteurs :

- un capteur placé en début de pièce
- un capteur placé en fond d'empreinte

L'empreinte de l'éprouvette ISO 1 peut en outre être alimentée par ses deux extrémités. Cette forme d'alimentation crée une ligne de soudure dont on étudiera la qualité.

Par ailleurs, une sonde thermique placée au coeur de l'outillage permet de contrôler la température moyenne du moule.

Les capteurs de pression sont du type piézoélectrique. Ils sont bien adaptés à nos besoins. Leurs caractéristiques sont décrites en annexe n° 3.

Ces capteurs sont des éléments importants. Ils influencent la qualité du montage qui est ajouté à la machine d'injection utilisée.

#### 4.5. Détermination de la loi de commande utilisée

La machine d'injection du laboratoire ne permet pas d'appliquer directement les principes qui sont décrits dans le chapitre 2.3. En effet, la phase de maintien en pression est réalisée avec un asservissement en boucle fermée sur la pression hydraulique appliquée dans le vérin d'injection.

La presse BILLION doit donc être modifiée pour réaliser ce type d'asservissement et imposer le contrôle de la pression du polymère.

Compte tenu de la fiabilité de la machine en ce qui concerne les phases dynamiques d'injection et de contrôle de fermeture de l'outillage, l'installation du dispositif de commande ne remet pas en cause l'ensemble de gestion du processus d'origine. En effet, la presse est toujours contrôlée par son système VISUMAT 4000 (annexe 1). Après le déclenchement de la phase de maintien, nous faisons basculer la commande de la servo-valve MOOG de la machine vers un circuit indépendant du VISUMAT 4000. Puis, la machine reprend son fonctionnement normal quand le temps de maintien programmé est écoulé.

Ainsi, l'ensemble de la commande du groupe d'injection est défini à l'aide de la figure 34 où apparaît en traits pointillés le dispositif ajouté.

L'installation et le développement du système de maintien en pression ont nécessité des travaux de mise au point.

En effet, le contrôle de la pression du polymère est difficile. La structure du polymère injecté évolue de manière considérable pendant la phase de maintien. Le refroidissement limite rapidement les performances de notre asservissement.

L'étude s'est déroulée en trois étapes :

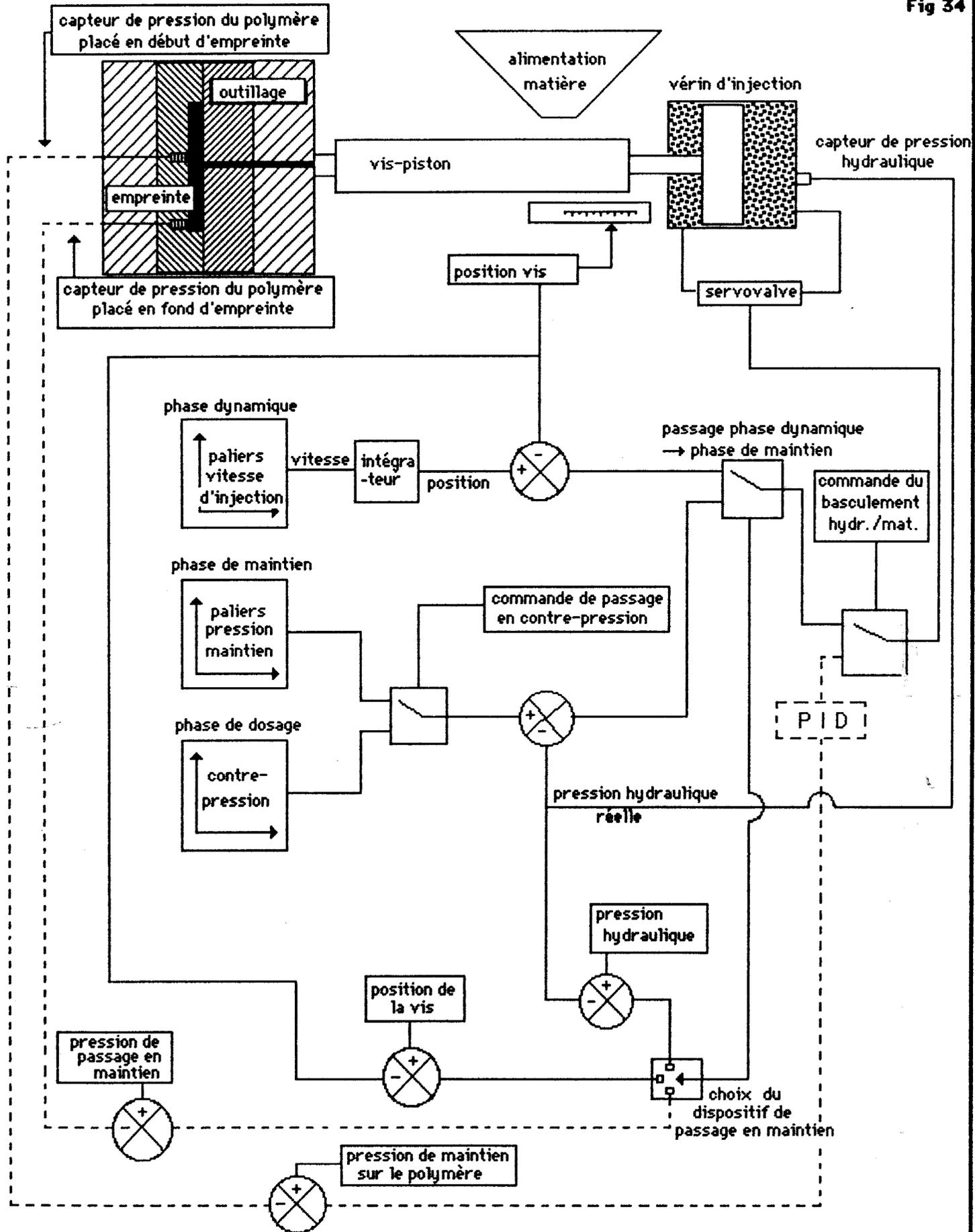
- Etude d'un régulateur proportionnel qui comme on le verra s'est avéré insuffisant pour obtenir une évolution isobare satisfaisante.

- Installation d'un système à gain programmé pour appliquer une technique de synthèse limitée aux systèmes linéaires.

- Mise en place d'un régulateur P.I.D. afin d'améliorer la qualité de la boucle de régulation de pression.

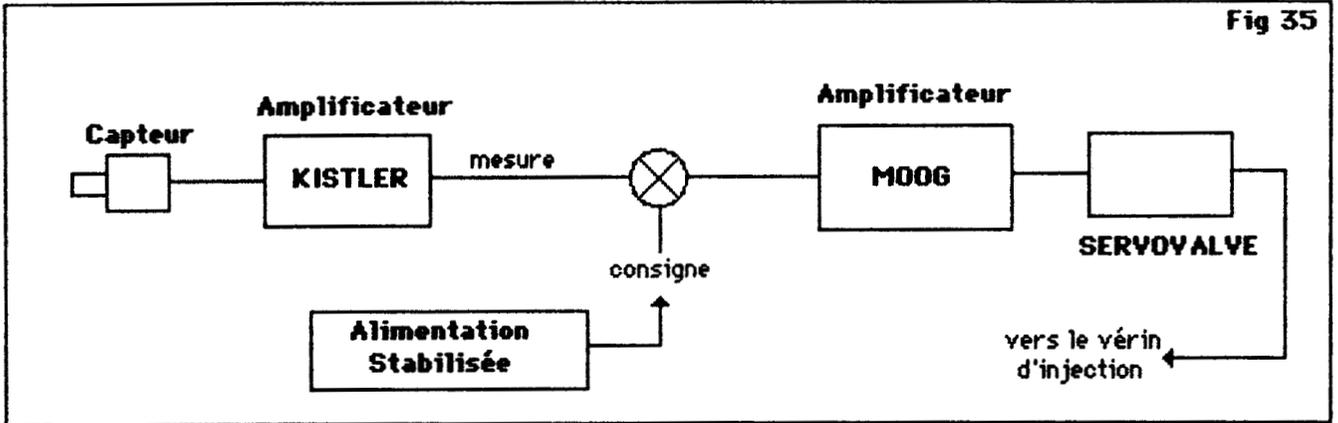
Les deux derniers points ont été motivés par les difficultés rencontrées avec le polymère amorphe. Les chapitres suivants décrivent dans le détail les différentes phases de travail.

Fig 34



#### 4.5.1. ETUDE D'UN REGULATEUR PROPORTIONNEL A GAIN CONSTANT

La chaîne de mesure utilisée est schématisée figure 35



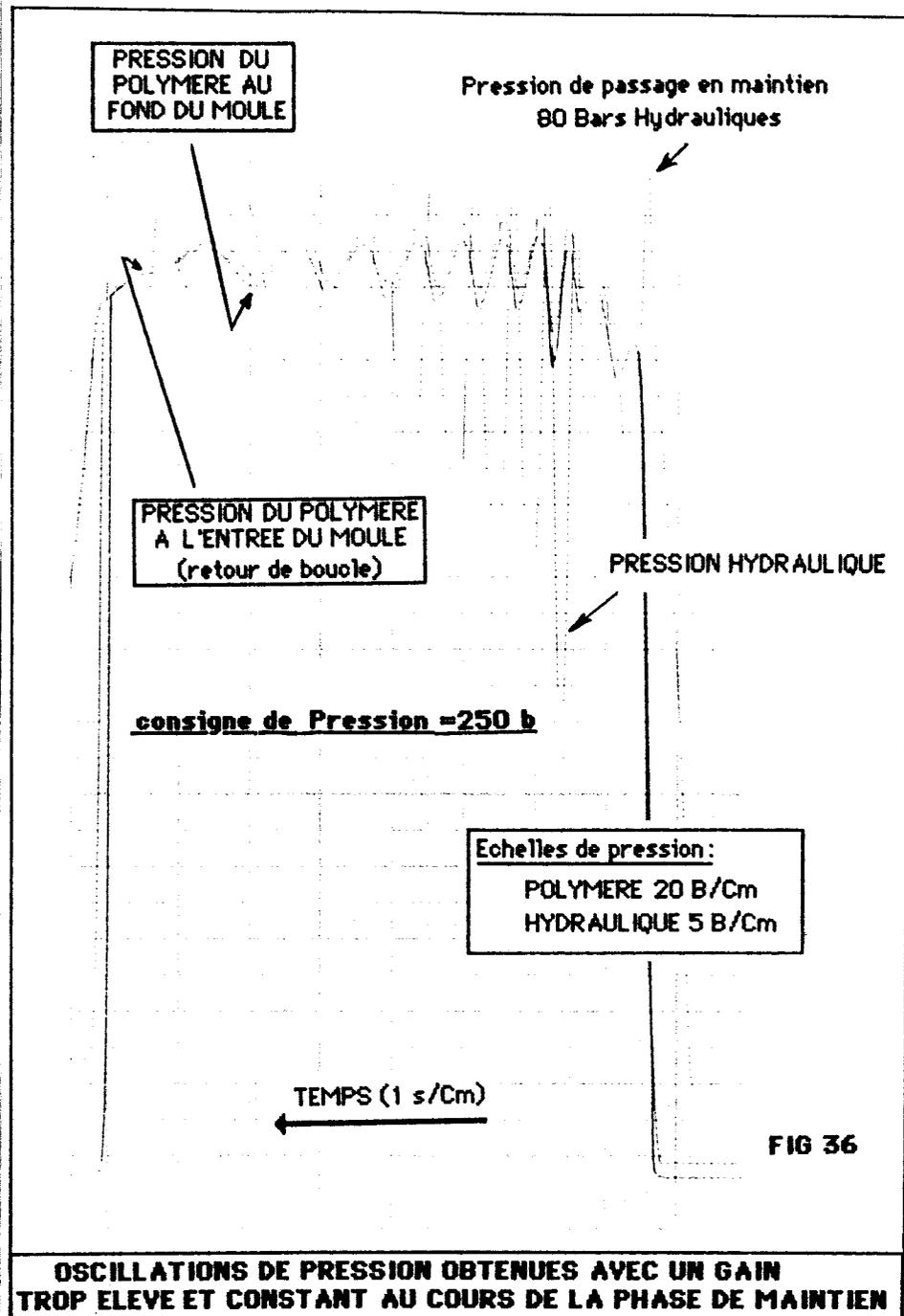
Elle est constituée de deux amplificateurs montés en série avec comme objectifs :

- Pour l'un la mesure de la pression du polymère qui demande une grande précision. L'amplificateur KISTLER associé au capteur de pression piézoélectrique fournit un signal 0 - 10 volt sur la gamme de mesure du capteur (0 - 1500 bars ou 0 - 2000 bars).

- Pour l'autre, la régulation de pression du polymère : cet asservissement est déjà réalisé en milieu industriel. Un amplificateur est placé dans la carte MOOG F 122-202. Dans ce cas, la précision est moins importante mais la fiabilité doit être parfaite.

La stabilité de l'ensemble de la chaîne de régulation est garantie avec la séparation de ces deux niveaux d'action. En effet, le rapport d'amplitude entre le signal fourni par le capteur de pression piézoélectrique et le signal de pilotage de l'actionneur (servovalve MOOG) interdit l'utilisation d'un amplificateur unique. Le gain global important (jusqu'à quelques centaines d'unités) provoquerait de façon inévitable l'instabilité du système de commande.

Les enregistrements qui suivent (fig. 36), illustrent les phénomènes d'instabilité avec un seul amplificateur à gain élevé. Les oscillations de pression provoquent une succession de flux et de reflux de résine entre l'outillage et le matelas de polymère situé à l'avant du groupe d'injection.



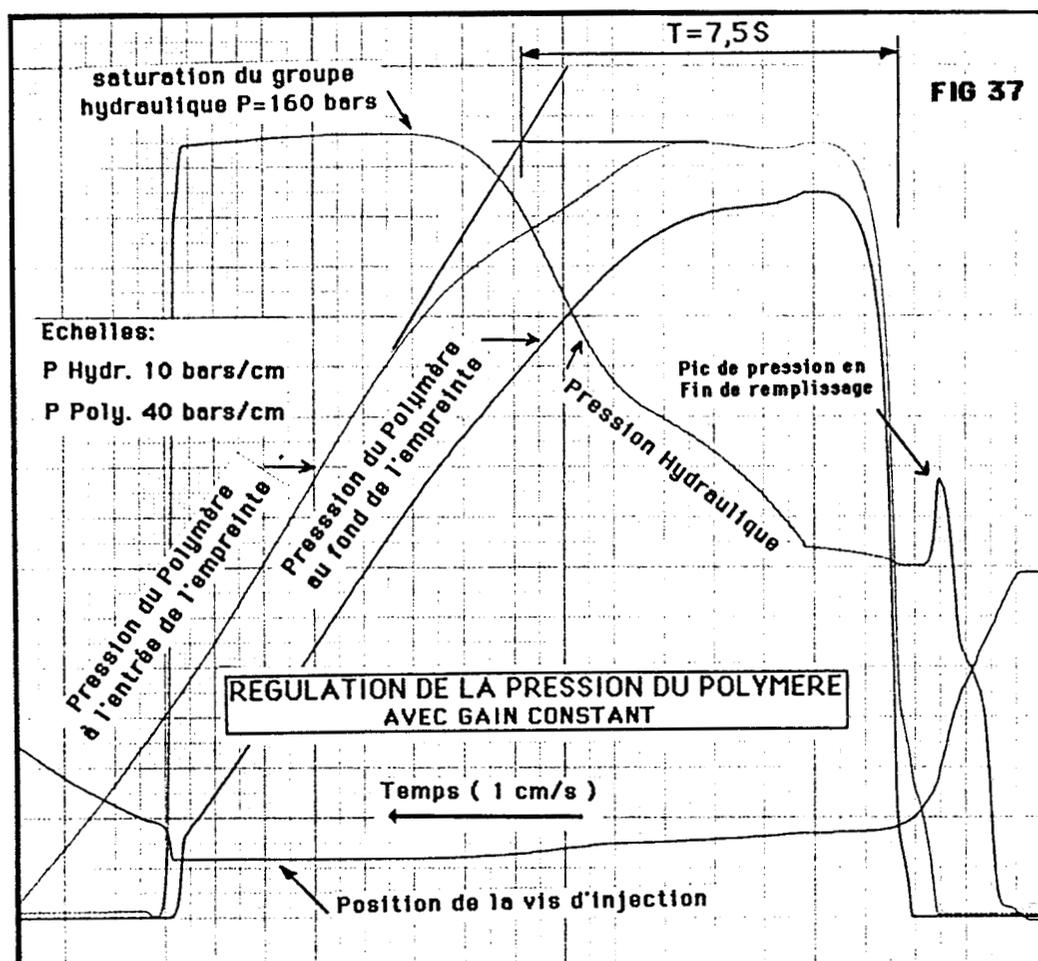
L'utilisation de deux amplificateurs en cascade est nécessaire mais pas suffisante.

En effet, dans certains cas de fonctionnement, liés à la résine utilisée ou à l'empreinte alimentée, nous n'obtenons pas une bonne régulation de la pression.

L'exemple d'enregistrement de la figure 37, nous révèle un cas problématique lorsque nous utilisons un dispositif à gain fixe sans correction du type intégrale et dérivée. Le résultat présenté nous démontre l'incapacité du système de pilotage, à contrôler une chute de pression dans l'outillage.

Lorsque l'on travaille avec une résine très visqueuse (polymère amorphe), la transmission de la pression vers l'outillage est délicate. Le polymère, fluide au moment de l'injection dynamique, devient très visqueux pendant son refroidissement.

Cela provoque un amortissement et la boucle de régulation présente rapidement un gain trop faible. Il serait nécessaire d'ajuster le gain en fonction du temps pour réguler la pression de façon satisfaisante.



Aussi, une modification du système a été réalisée avec comme objectif :

- \* d'une part l'installation d'une commande adaptative à gain programmé dans le but de conserver la dynamique du processus ;

- \* d'autre part l'identification du processus ainsi modifié afin de définir les paramètres d'un correcteur à action Proportionnelle, Intégrale et Dérivée qui améliore la précision du système de commande, notamment en éliminant les risques d'erreur statique en boucle fermée.

#### 4.5.2. ETUDE D'UNE COMMANDE ADAPTATIVE A GAIN PROGRAMME

Un modèle simplifié du processus nous aide à définir une loi de commande théorique qui permet de conserver les caractéristiques dynamiques du processus. Cette dernière est ensuite ajustée à partir des observations réalisées sur le processus en fonctionnement réel.

On a retenu un système de contrôle adaptatif au sens de Yoan D. LANDAU (37).

En effet, le polymère qui est dans le moule présente des variations de pression dues à des modifications structurelles du système contrôlé.

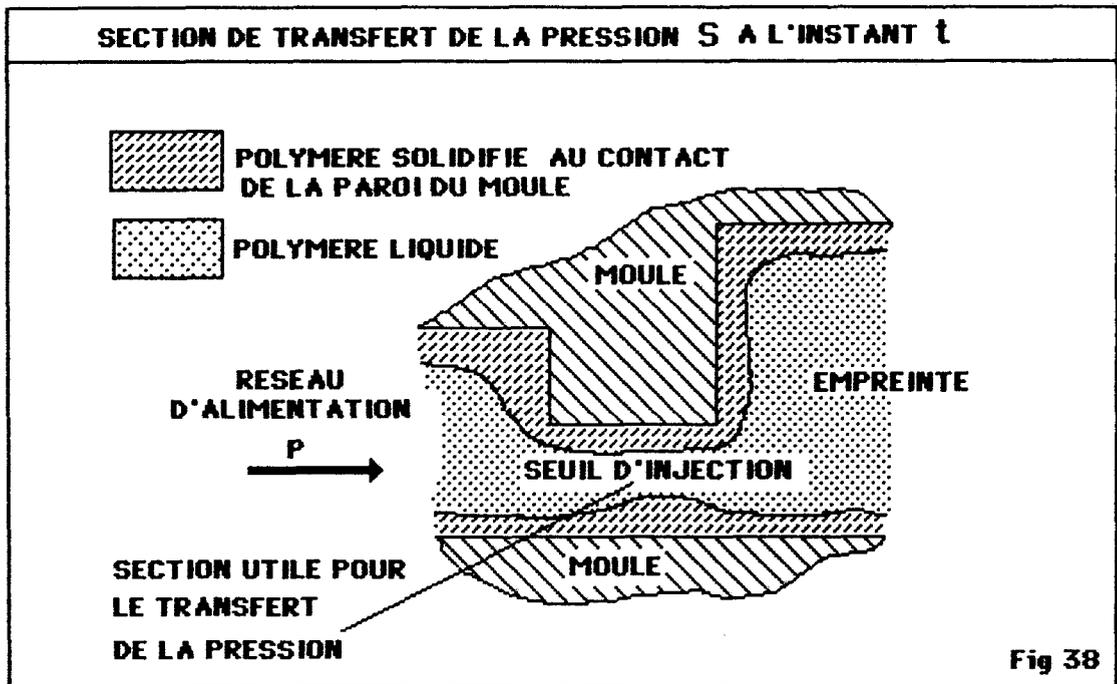
Ces variations provoquent l'évolution des caractéristiques dynamiques du processus. Elles peuvent être approchées à l'aide d'un modèle simplifié. Ce dernier définit, à priori, une loi d'adaptation du gain qui sera directement installée sur le processus puis, modulée en fonction de nos observations expérimentales.

#### a) Modélisation théorique du processus et de l'évolution de ses caractéristiques dynamiques

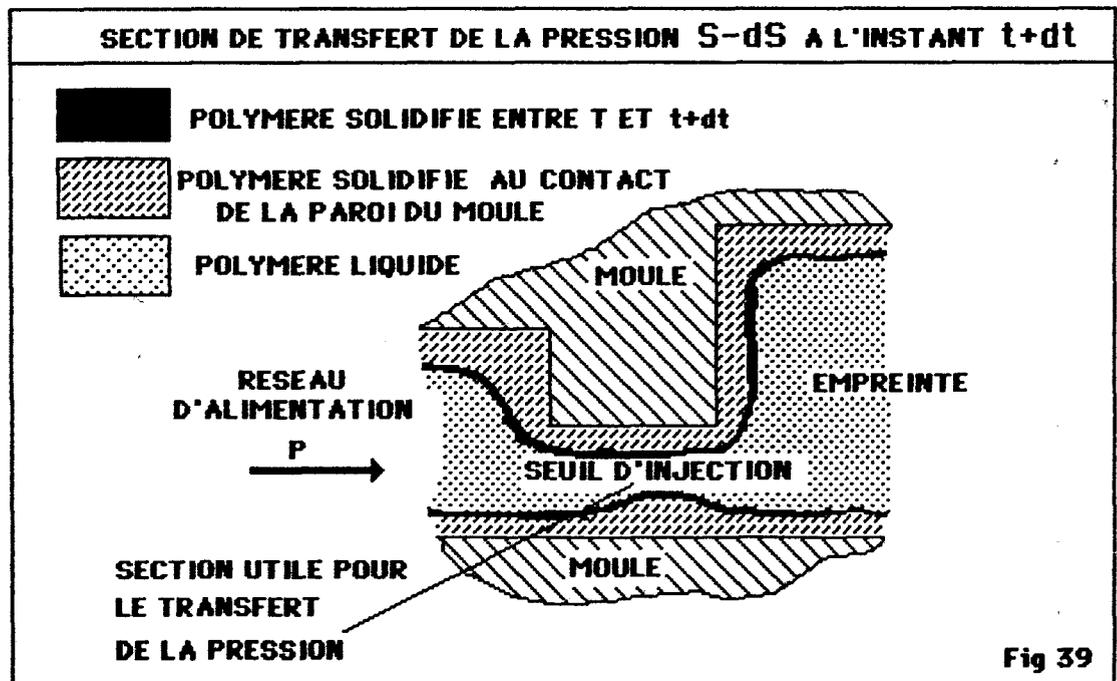
##### - Description physique du phénomène

Nous pouvons schématiser le problème en étudiant la chute de pression dans le moule au cours de la phase de maintien. Il faut pour cela associer un phénomène thermique et un phénomène mécanique.

En effet, le seuil d'injection est une section de petite taille. Dans le cas de l'empreinte d'éprouvette ISO 1, elle est de  $6 \text{ mm}^2$ . Cette surface est un point de passage obligé pour assurer le transfert de la résine vers l'empreinte. Or, cette section diminue avec le temps car la couche de polymère solidifiée sur la paroi du moule à l'emplacement du seuil d'injection, s'épaissit pendant la durée du maintien en pression. Les figures 38 et 39 illustrent cette notion de bouchage de l'empreinte.



**EVOLUTION DE LA SECTION UTILE DU SEUIL D'INJECTION AU COURS DU TEMPS**



Le refroidissement du polymère injecté et la réduction de la section du seuil d'injection provoquent la chute de la pression du polymère en altérant l'efficacité de la pression hydraulique appliquée sur la vis d'injection.

Par conséquent, le système de commande proposé doit atténuer ce phénomène de trois façons :

- d'une part en compensant le retrait volumique du polymère prisonnier de l'empreinte ;
- d'autre part en compensant la réduction de section utile au transfert de polymère par l'augmentation du niveau de pression situé en amont de cette section ;
- enfin en ralentissant l'établissement de cette réduction de section. En effet, un transfert de polymère plus important à travers le seuil d'injection modifie le régime thermique en apportant davantage de calories dans cette zone.

#### Modèle mathématique utilisé

Ce modèle est issu d'une approche physique des phénomènes mis en jeu au cours de la phase de maintien.

Néanmoins, certaines hypothèses sont indispensables pour simplifier notre modélisation et valider notre démarche.

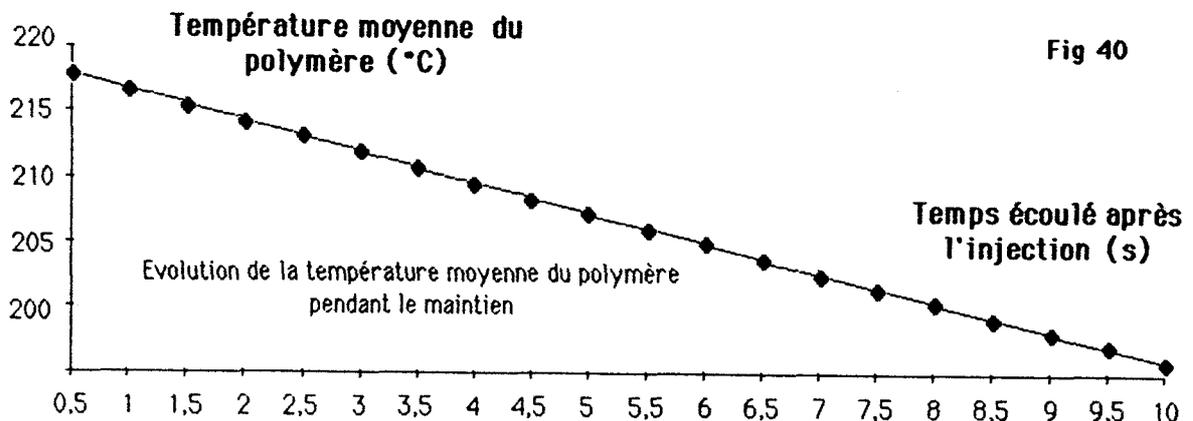
#### Démarche et hypothèses simplificatrices

Nous travaillons sur des grandeurs physiques moyennes concernant l'ensemble du polymère présent dans la cavité du moule, à la fin de la phase de remplissage.

- *Hypothèses sur la thermique du polymère présent dans l'empreinte*

\* Le régime thermique de refroidissement ayant dépassé sa phase transitoire d'initiation, on admet que la température moyenne du polymère présent dans l'empreinte chute avec une vitesse constante.

La figure 40 permet de justifier la linéarisation de l'évolution de la température moyenne dans l'empreinte.



\* Le volume spécifique moyen du polymère évolue de façon linéaire avec la température donc le temps d'après la première hypothèse, dans le domaine de température considéré ( $T^{\circ}\text{C} >$  à la température de transition vitreuse pour les polymères amorphes -  $T^{\circ}\text{C} >$  à la température de fusion pour les polymères semi-cristallin). Ce qui est admissible compte tenu de l'allure des diagrammes thermodynamiques P.V.T. (fig. 20 et 21 - page 56).

Donc, si on admet que le moule est indéformable, il faut alimenter le coeur de la pièce injectée avec un débit de polymère constant au cours du temps pour compenser la perte de volume liée au refroidissement du polymère et maintenir ainsi les conditions initiales de pression.

- Hypothèses sur l'écoulement du polymère

La recherche d'un débit constant de polymère à travers des sections d'écoulement qui diminuent, entraîne des pertes de charges de plus en plus élevées.

\* L'évolution des pertes de charge est négligeable dans le réseau d'alimentation de l'outillage. Seules des modifications importantes prennent naissance dans les seuils d'injection (La section des seuils d'injection est dix fois plus petite que celle du réseau d'alimentation).

\* La viscosité du polymère en écoulement n'évolue pas au cours du temps.

\* La section du seuil d'injection est assimilée à celle d'un capillaire cylindrique.

\* L'écoulement du polymère dans le seuil d'injection est un écoulement de Poiseuille. Dans ce cas, la perte de charge à débit et viscosité constants est inversement proportionnelle au carré de la section d'écoulement.

L'ensemble de ces hypothèses nous permet d'écrire que l'évolution dans le temps de la pression nécessaire au maintien d'un débit constant de polymère à travers le seuil d'injection, est directement proportionnelle à celle du carré de la section du seuil d'injection :

$$\left( \frac{\text{Section d'écoulement à l'instant } t}{\text{Section d'écoulement à l'instant } t+\delta t} \right)^2 = \frac{\Delta \text{Pression du polymère } (t+\delta t)}{\Delta \text{Pression du polymère } (t)} \quad (2)$$

(1)  $\Delta$  Pression du polymère à  $t = P$  entrée du seuil  $(t) - P$  cavité

(2)  $\Delta$  Pression du polymère à  $t + \delta t = P$  entrée du seuil  $(t + \delta t) - P$  cavité

$$\text{avec (1)} = \frac{k}{(\text{section utile du seuil à } t)}$$

$$\text{et (2)} = \frac{k}{(\text{section utile du seuil à } t+\delta t)}$$

$$\text{donc } \frac{P \text{ cavité} - P \text{ seuil } (t)}{P \text{ cavité} - P \text{ seuil } (t+\delta t)} = \frac{S_{\text{utile}} (t+\delta t)^2}{S_{\text{utile}} (t)^2}$$

Aussi, le calcul de l'évolution théorique des sections d'écoulement nous permet de connaître l'évolution théorique de la pression du polymère avant le seuil d'injection pour maintenir sous pression constante le polymère situé dans l'empreinte du moule. Cette pression est directement corrélée à la pression hydraulique appliquée sur le vérin d'injection.

La définition de la section d'écoulement est basée sur un critère de non écoulement. Nous optons à priori pour la température appelée "NOFLOW Temperature" ou température de figeage, telle qu'elle est définie dans certains logiciels de simulation d'écoulement.

Pour l'ABS Terluran 969 T de BASF, la "NOFLOW temperature" est égale à 130°C (température en dessous de laquelle il n'y a pas d'écoulement du polymère à travers un capillaire de 1 mm de diamètre et 40 mm de longueur, sous une pression de 500 bars).

Par ailleurs, nous travaillons à partir des caractéristiques de la matière, données par le fournisseur de résine (conductivité thermique, chaleur spécifique, densité).

### Calculs et résultats

Le calcul est une résolution de l'équation de la chaleur par la méthode des différences finies :

$$\frac{\delta T}{\delta t} = a \nabla^2 T \quad \text{avec } a \text{ la diffusivité thermique du polymère en } m^2 s^{-1}$$

$$a = \frac{k}{\rho c} \quad \begin{array}{l} \text{où } k = \text{conductivité thermique du polymère} \\ \rho = \text{masse volumique du polymère} \\ c = \text{capacité calorifique du polymère} \end{array}$$

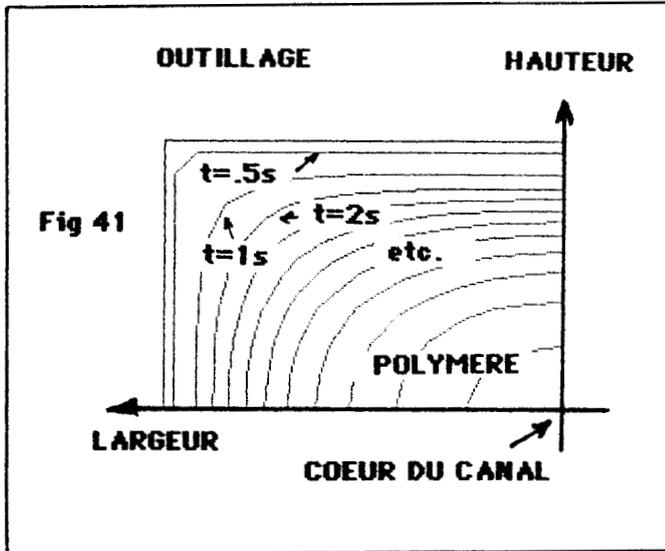
(supposées indépendantes de la température et de la pression)

La symétrie du problème permet de travailler sur 1/4 de section. Par ailleurs, la section rectangulaire du seuil d'injection permet un maillage aisé.

Les conditions initiales du calcul sont les suivantes :

- la température d'injection du polymère à l'intérieur de la section de calcul ;
- la température du moule à l'extérieur de la section du seuil.

Les résultats obtenus prennent l'allure des faisceaux de courbes de la figure 41 :



$T_{\text{moule}} = 60^{\circ}\text{C}$   
 $T_{\text{matière}} = 255^{\circ}\text{C}$   
 Matière = ABS  
 $\text{No flow } T = 130^{\circ}\text{C}$

Position de l'isotherme  $130^{\circ}\text{C}$  au cours du temps

Evolution des isothermes de non écoulement au cours du temps (intervalle de temps entre chaque isotherme = 0,25 secondes).

A chaque instant, la position de l'isotherme  $130^{\circ}\text{C}$  nous permet de calculer la section utile théorique. Aussi, en rapportant cette section à la section d'origine du seuil d'injection et en élevant le tout au carré, nous obtenons le coefficient qui permet d'adapter la commande en pression hydraulique pour obtenir un débit théorique constant de polymère dans l'empreinte.

La figure 42 nous donne une image complète de l'évolution de ce coefficient théorique.

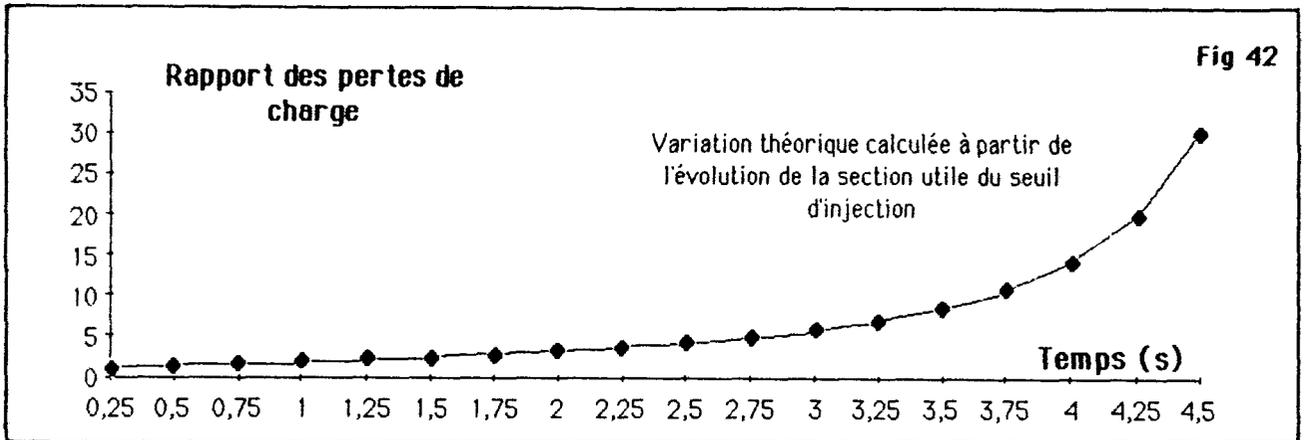
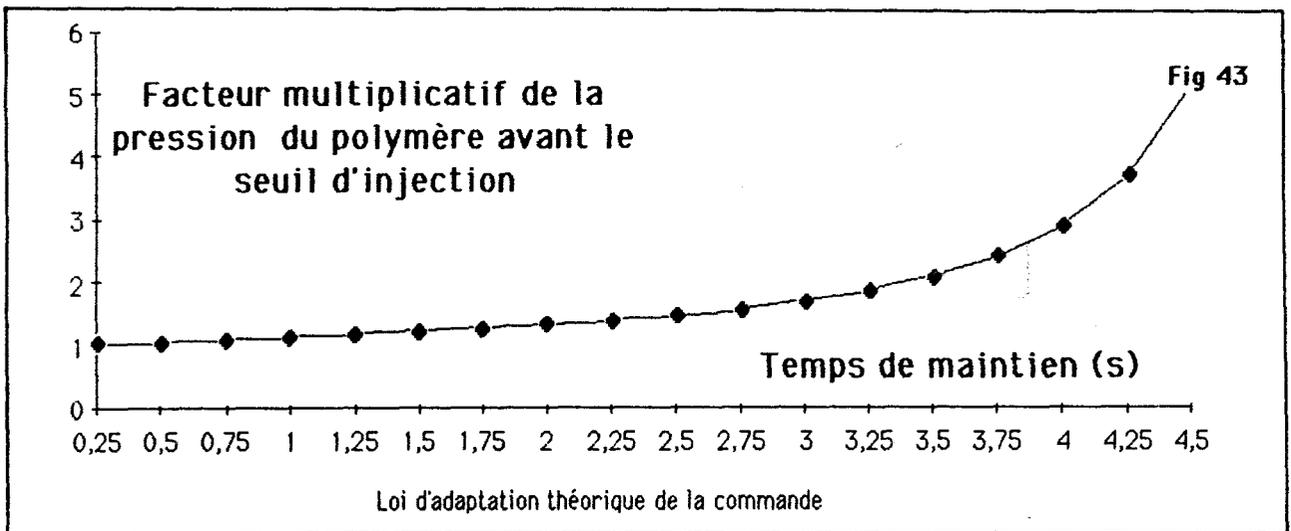


Fig. 42 : Evolution du rapport des pertes de charge au cours du temps.

Ce premier calcul nous permet de définir l'évolution relative de pression du polymère situé avant le seuil de la cavité. Nous obtenons, dans le cas particulier de la résine ABS maintenue à 600 bars, la loi d'évolution de pression de la figure 43 :



Nous avons donc choisi un modèle qui permet de définir une loi de commande avec laquelle nous installons un contrôle adaptatif sur notre processus.

Néanmoins, le modèle simplifié de la dynamique du processus, est pessimiste. En effet, nos différentes hypothèses de calcul tendent toutes à imposer une élévation de gain trop rapide par rapport à celle qui est vraiment indispensable pour maintenir les caractéristiques dynamiques de notre processus.

Dans les calculs de thermique, l'hypothèse la plus restrictive est l'absence de la prise en considération des phénomènes dus à l'écoulement du polymère à travers le seuil d'injection, pendant la phase de maintien :

- l'échauffement local dans cette zone,
- le régime thermique perturbée par l'écoulement du polymère.

Une seconde hypothèse est également importante. En effet, nous ne prenons pas en compte les phénomènes d'auto échauffement local pendant la phase dynamique d'injection. Ils entraînent des élévations de température du moule et du polymère au niveau de seuil d'injection (endroit critique compte tenu de sa géométrie réduite).

Cette première approche demande une mise au point pratique. Nous adoptons une méthode de variation (essai - erreur) jusqu'à l'ajustement expérimental au gain optimal (minimum compte tenu des contraintes de fonctionnement).

#### b) Recherche de la variation de gain optimale

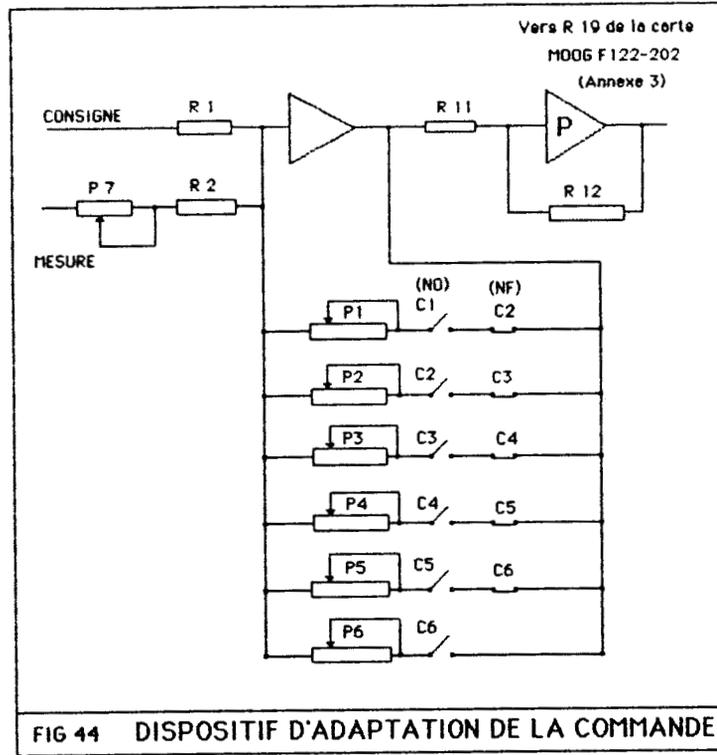
L'ajustement du gain au cours du temps de maintien peut être réalisé de trois façons différentes :

- un incrément de gain variable à fréquence de changement constante ;
- un incrément de gain constant à fréquence de changement variable ;
- un incrément de gain variable à fréquence de changement variable.

Nous avons choisi la méthode la plus complète pour effectuer les réglages : la troisième. Seul le choix du dispositif le plus complexe (2 variables : le temps, le gain) nous permet d'étalonner notre système de commande. Il sera ensuite simplifié.

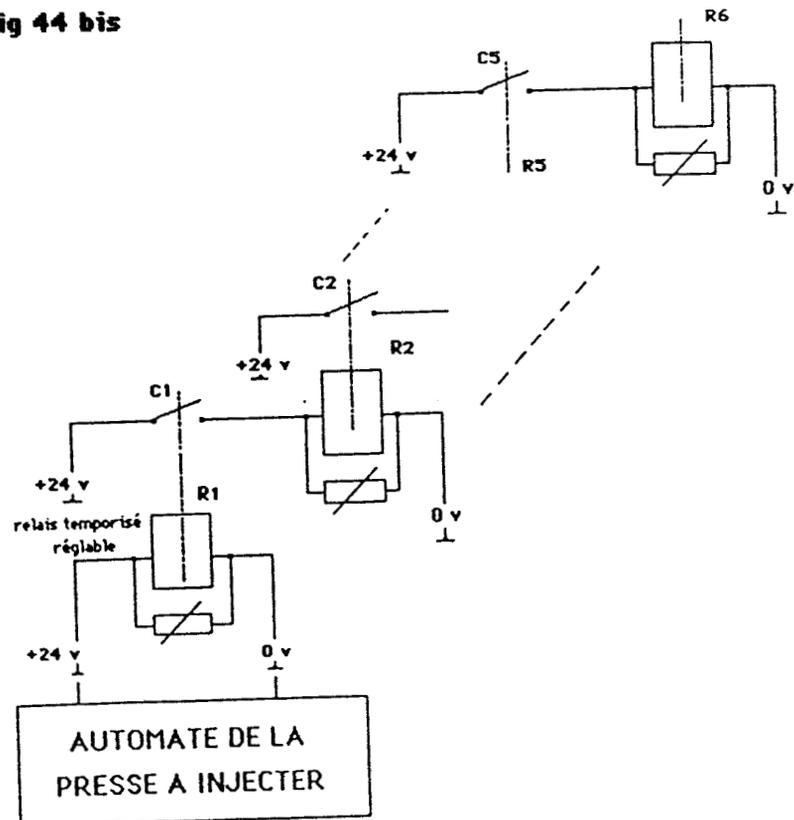
Nous avons bâti des courbes idéales de variation du gain en fonction du temps en utilisant d'une part des résistances potentiométriques pour disposer d'un niveau de gain continu et d'autre part en faisant varier des temporisations de basculement sur des relais.

Le montage électrique prend l'allure décrite figures 44 et 44 bis.



Le module rapporté est construit comme suit :

Fig 44 bis



L'ensemble est monté sur le dispositif de commande de la presse d'injection.

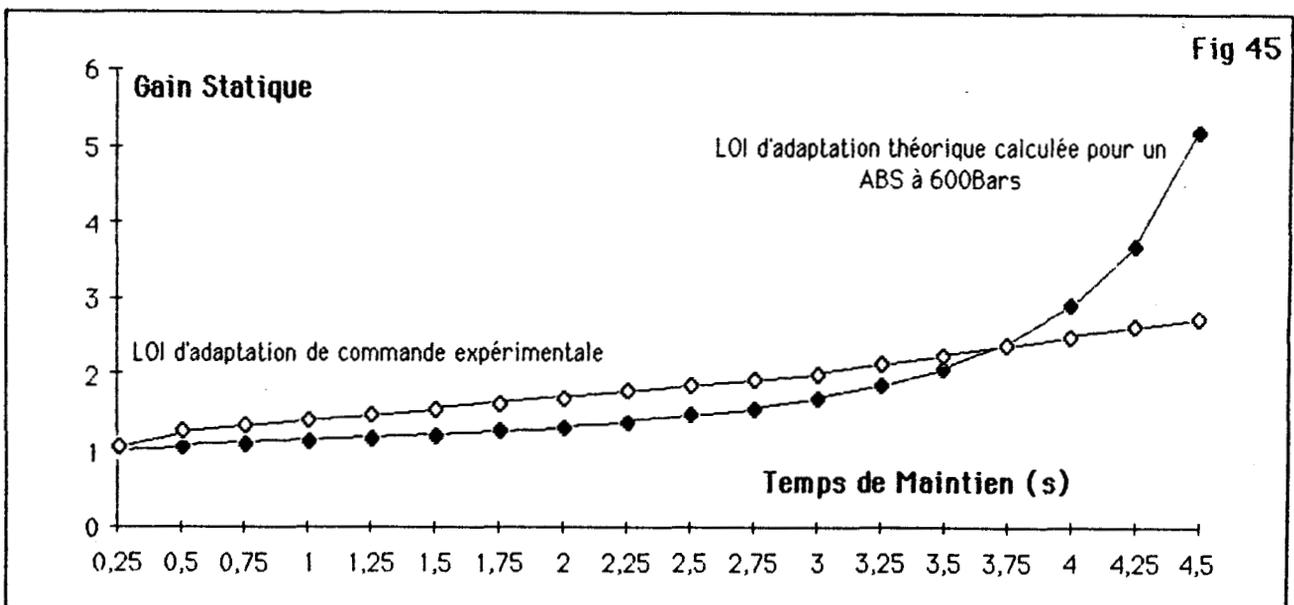
Nous programmons la loi de commande théorique. Elle est discrétisée en fonction du nombre de relais dont nous disposons.

Nous recherchons ensuite à minimiser le gain nécessaire. L'observation directe du comportement du processus est indispensable pour réaliser ce réglage.

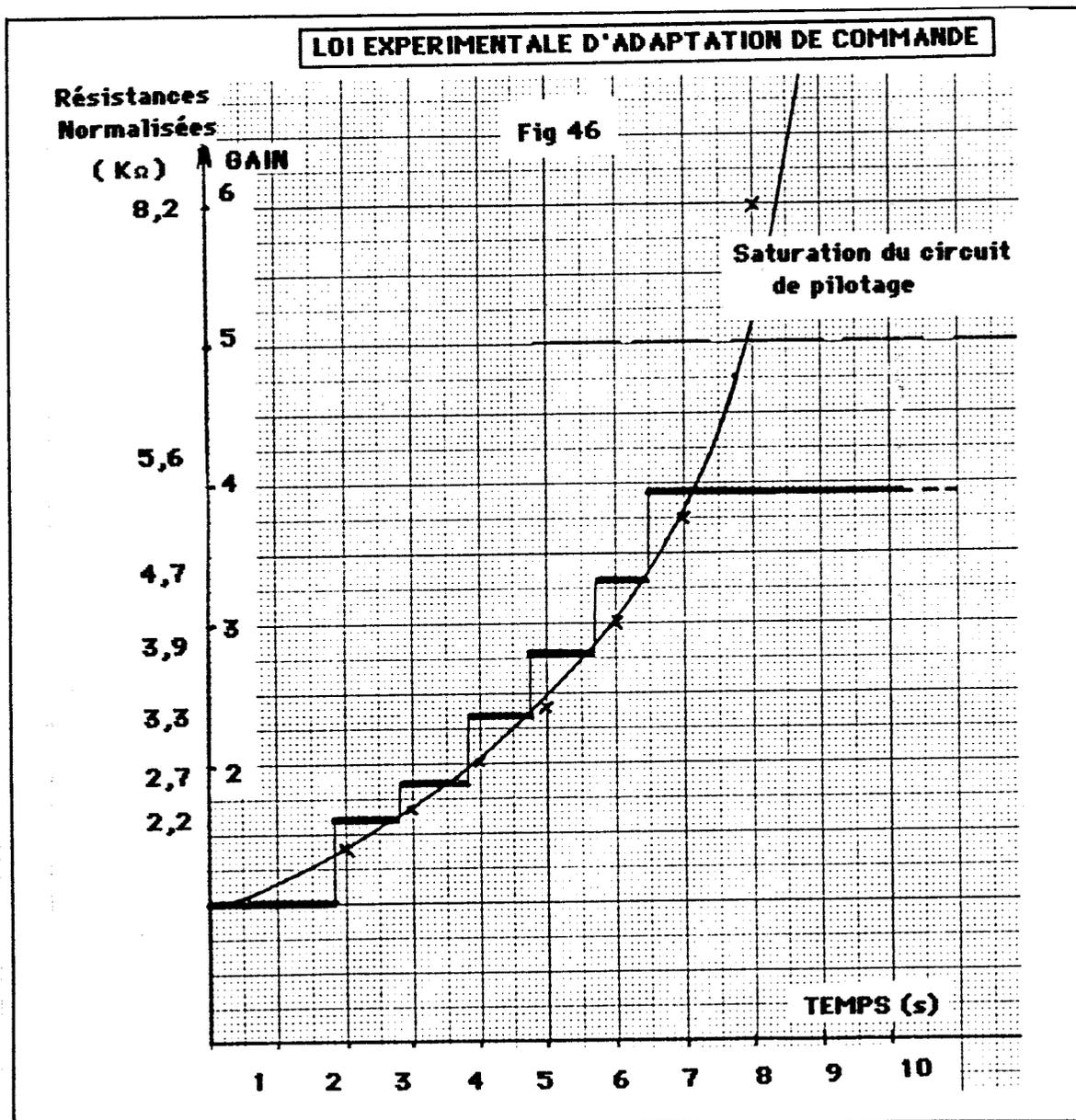
Le gain est considéré trop faible dès l'apparition d'une dérive de pression vers une valeur inférieure à celle de la pression de consigne. Aussi, nous définissons une loi de commande corrigée qui diffère sensiblement de la règle calculée a priori. Par ailleurs, elle intègre les contraintes technologiques de notre dispositif (saturation du signal de pilotage de la servo-valve).

La courbe 45 laisse apparaître les deux lois de commandes concernées :

- Loi de commande calculée à partir du modèle
- Loi de commande obtenue après mise au point pratique.



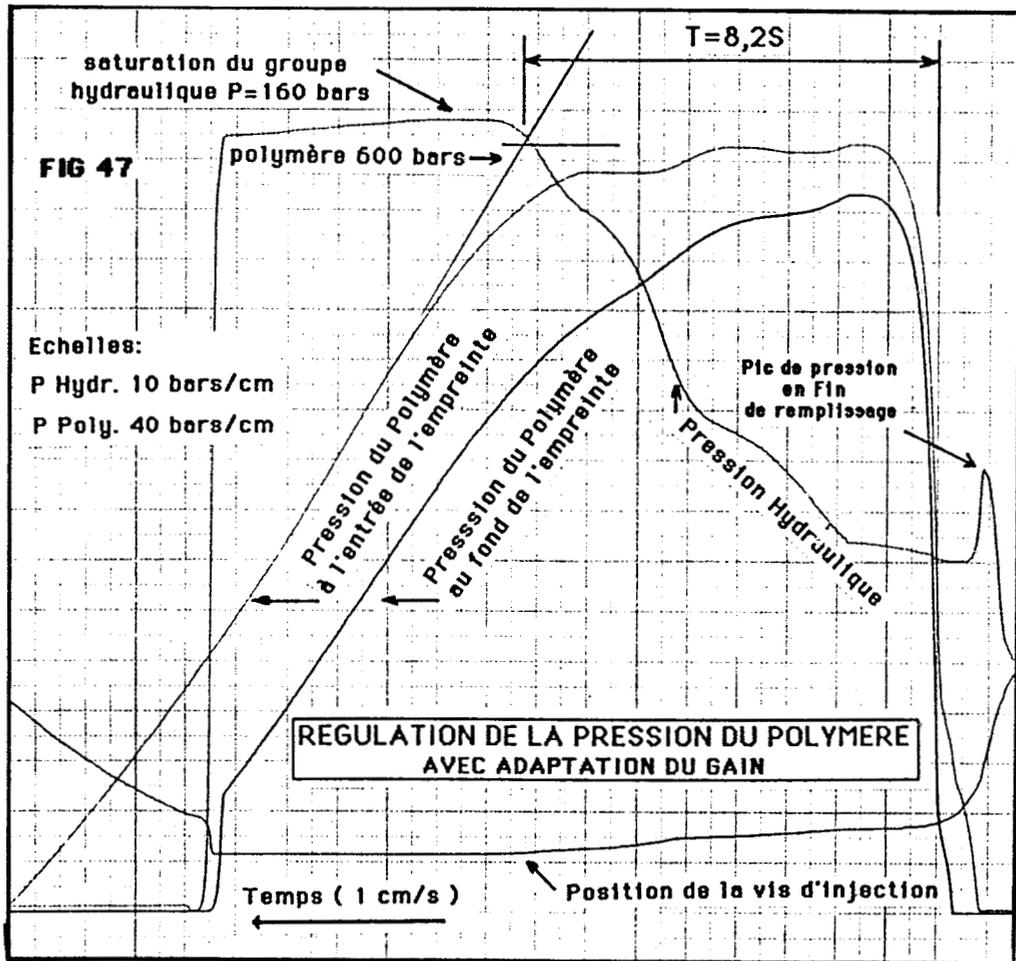
La loi de commande mise au point sur la machine nous permet de définir un dispositif de contrôle plus simple et tout aussi efficace. En effet, à l'aide d'une temporisation, nous imposons une série de valeurs du gain disponibles en fonction des résistances normalisées (1 k, 1,2 k, et...3,9 k, 4,7 k etc...). Les potentiomètres peuvent donc disparaître. Nous choisissons alors un système à incrément de gain imposé et fréquence de changement variable. Le fonctionnement de ce système apparaît sur la courbe de la figure 46 sous la forme d'une fonction en escalier.



Cette simplification ne présente pas d'inconvénient majeur. Nous obtenons des résultats satisfaisants.

En effet, le cas précédemment exposé nous donne, après modification, les variations de pression correctes par rapport à notre premier objectif.

L'enregistrement relevé ci-dessous correspond au comportement décrit dans le premier exemple après l'opération d'adaptation de gain (figure 47).



Cette première opération nous satisfait pleinement, nous pouvons envisager l'étape qui suit.

#### 4.5.3. Addition d'un régulateur P.I.D.

Cette deuxième opération a deux objectifs. Elle permet d'améliorer la précision du système de commande, notamment pendant la phase transitoire créée dès le déclenchement du contrôle de la pression du polymère dans l'empreinte.

Par ailleurs, l'utilisation d'une action intégrale supprime les erreurs statiques au cours de la régulation de pression, même si la phase de maintien reste relativement courte (moins de 10 secondes dans le cas de la résine ABS).

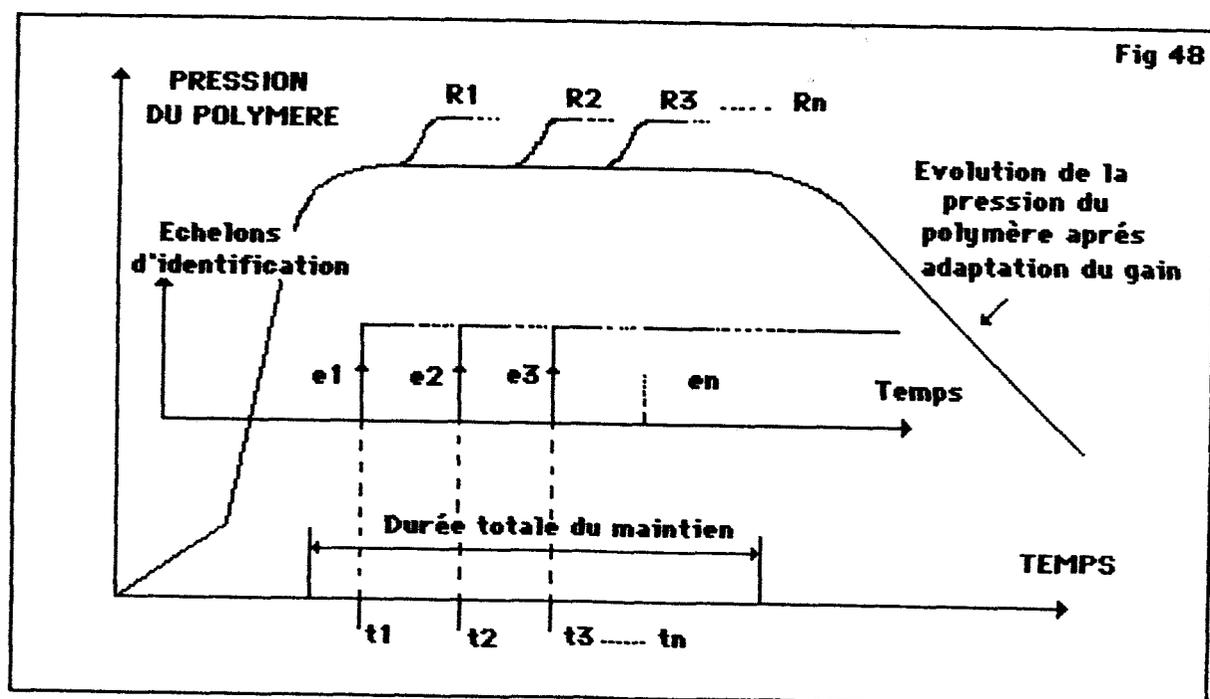
#### Identification du processus pendant la phase de maintien

##### Etude de la réponse indicielle du processus

L'étude expérimentale du processus complet est difficile pour plusieurs raisons.

D'abord, la réponse indicielle doit être étudiée au cours de la phase de maintien or celle-ci ne dure que quelques secondes (cf le chapitre sur le temps de maintien optimal).

En outre, l'étude de la réponse de l'ensemble moule-machine-matière sur toute la durée de la phase de maintien se traduit par une série d'expériences schématisées sur la figure 48.



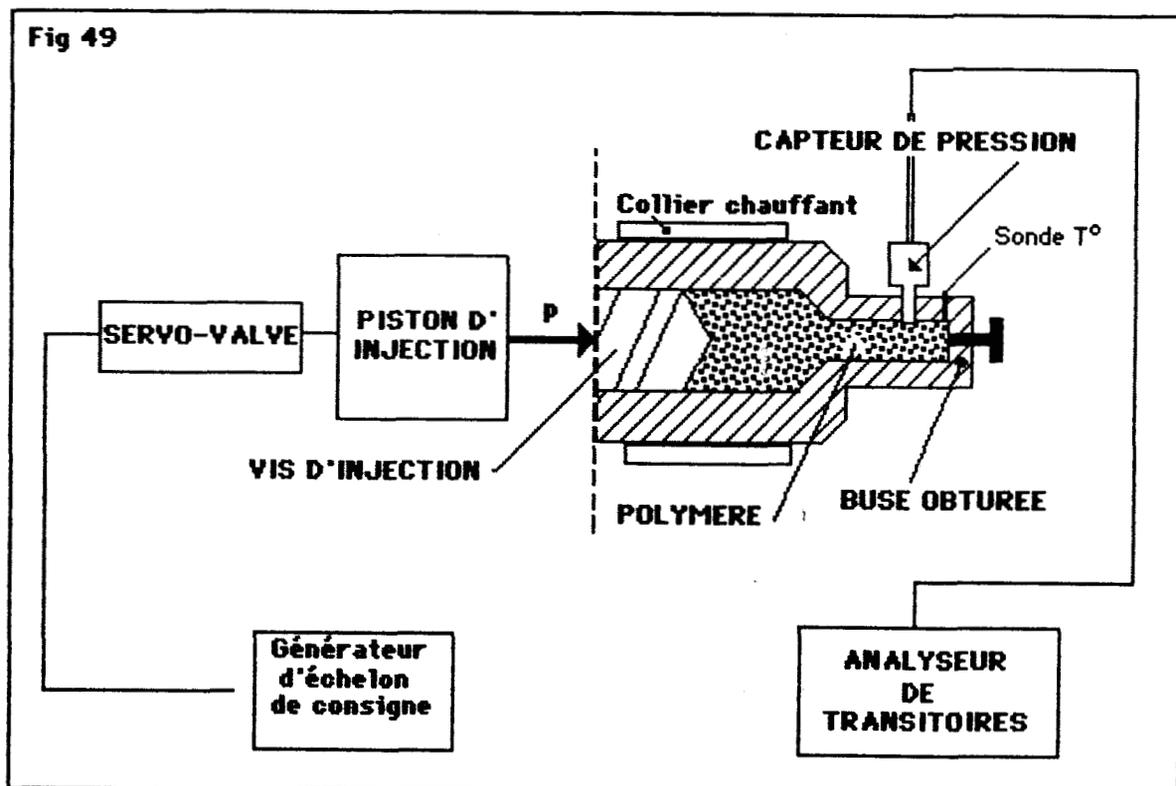
Il faut connaître les réponses  $R_1, R_2 \dots R_n$  du système au temps  $t_1, t_2, t_3 \dots$  etc, afin de vérifier la validité du réglage P.I.D. qui sera calculé, pendant la phase de maintien.

De telles manipulations présentent des risques pour les outillages. En effet, le déclenchement de surpression rapide entraîne des alimentations brusques de polymère qui provoquent le blocage des pièces dans les empreintes du moule. Aussi, nous ne pouvons pas prendre le risque de détériorer les tiges d'éjection du moule et l'outillage.

Nous avons choisi de traiter le problème d'une façon différente. Nous réalisons l'étude en dehors du moule en installant un nouveau dispositif à l'extrémité du système vis-fourreau.

### Etude de la réponse indicielle d'un système simplifié

Nous utilisons l'installation décrite figure 49.



Cette simplification permet d'étudier la réaction du matelas de polymère placé entre l'extrémité de la vis et le capteur de pression implanté dans la buse.

Nous avons montré la nécessité d'identifier la réponse du système complet (avec l'outillage) tout au long de la phase de maintien.

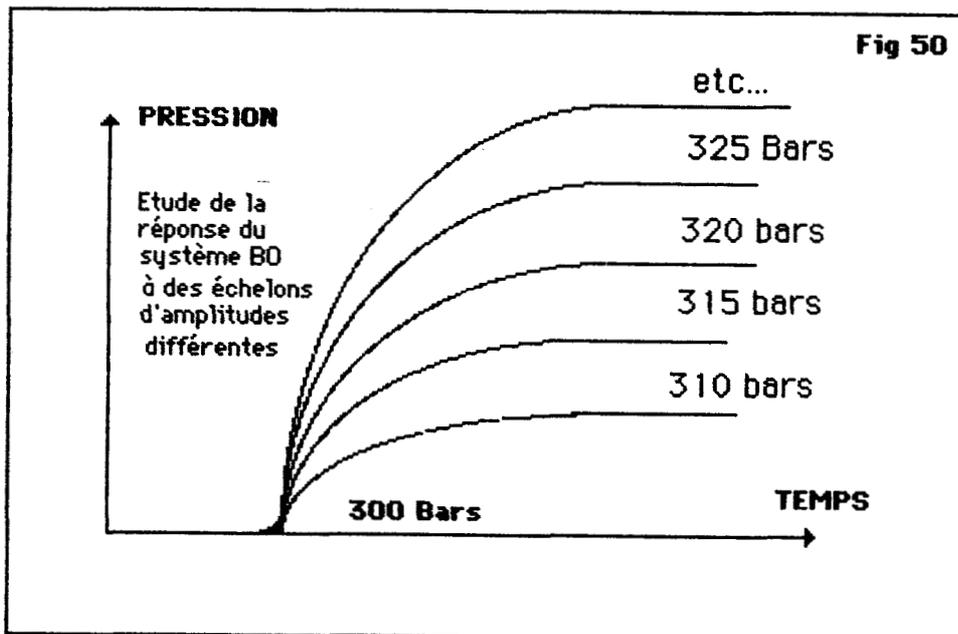
Cette notion de temps peut être rattachée à une notion de température. En effet, pendant la phase de maintien, la température moyenne du polymère diminue.

Nous étudions alors la réponse de notre montage en travaillant à différentes températures. Dans le cas de la résine, A.B.S., nous travaillons à la température d'injection puis, par incrément de 10°C jusqu'à une température de 200°C.

Nous limitons volontairement la chute de température. En effet, en approchant de la température de transition vitreuse de ce polymère, les essais ne sont plus réalistes : les seuils d'injection de faible dimension sont solidifiés avant que la pièce injectée n'atteigne ces niveaux de température.

Notre asservissement réel ne travaille donc pas dans ces zones de température.

Nous obtenons pour chaque température les enregistrements qui suivent.

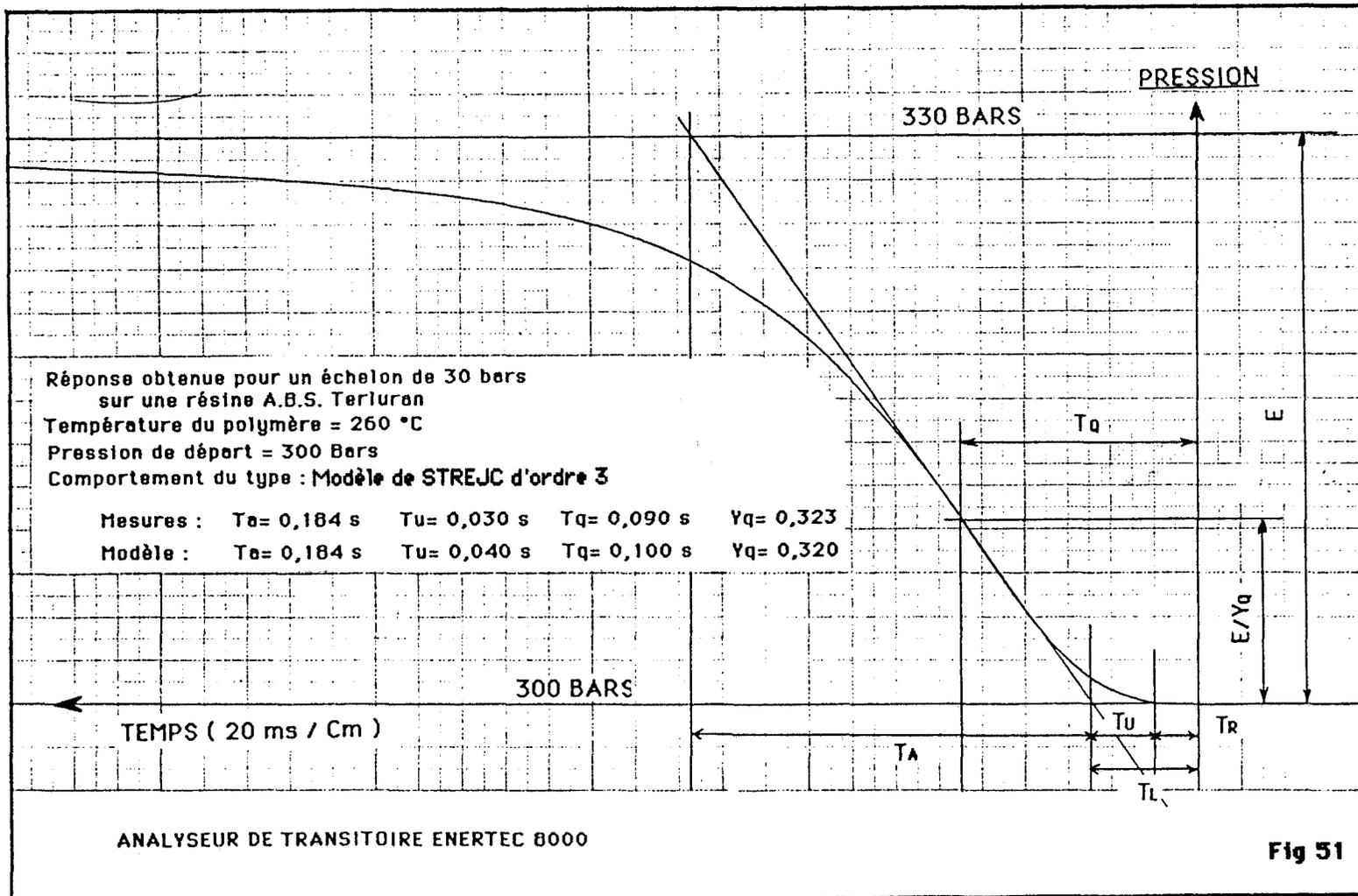


En travaillant à des températures différentes, nous obtenons des réponses indicielles identiques. Cette observation traduit l'influence négligeable de la viscosité du polymère qui varie pourtant avec la température. Par déduction, cette dernière devient elle-même négligeable dans un premier temps car il n'y a pas d'écoulement de polymère.

Le modèle qui a été choisi n'est donc pas mis en défaut par ce type d'observation.

Aussi, l'identification du système rapporté au niveau de la buse d'injection nous permet de mesurer des paramètres correctifs qui sont liés aux propriétés viscoélastiques du polymère injecté.

La figure qui suit nous donne un exemple d'enregistrement de la réponse à un échelon, du système installé dans la partie avant du groupe d'injection.



L'exemple présenté permet d'obtenir un modèle de comportement du processus étudié (38-39) .

Nous ne présumons rien du système, aussi nous recherchons un modèle de comportement qui peut être représenté par la forme de STREJC.

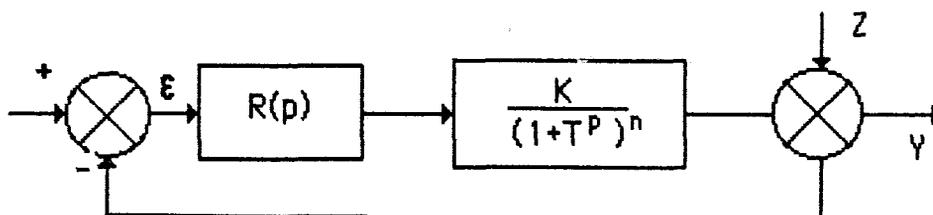
Les enregistrements réalisés nous font assimiler le processus à un modèle d'ordre 3.

En effet, ce modèle est proche de la réalité. Les paramètres calculés sont peu différents des paramètres mesurés (voir enregistrement).

Notre système est identifié. Nous pouvons maintenant faire la synthèse du correcteur qui va être installé. Nous utilisons une méthode de synthèse réservée aux systèmes linéaires. La première partie de notre travail, nous autorise à utiliser cette démarche.

### Synthèse du correcteur

Nous voulons améliorer la stabilité et la précision du système. Aussi, nous installons dans la chaîne de pilotage du processus, un correcteur à action proportionnelle, intégrale et dérivée. Nous utilisons le critère de Ziegler et Nichols. Ces auteurs choisissent d'atteindre le régime permanent aussi rapidement que possible (minimisation d'un critère donné). Le schéma fonctionnel du système bouclé prend la forme suivante :



Z est une entrée de perturbation

avec une seule action proportionnelle =  $R(p) = A$

nous obtenons au régime critique :

$$\frac{AoK}{(1+j\omega_oT)^n} = -1$$

ce qui donne une condition de gain :

$$\frac{AoK}{(1+T^2\omega_o^2)^{n/2}} = -1$$

et une condition de phase

$$n \cdot \text{Arctg } \omega_o T = \pi$$

avec  $\omega_0 = \frac{2\pi}{T_0}$  et la condition de phase

$$\text{nous obtenons : } T_0 = \frac{(2\pi) \cdot T}{\text{tg}(\pi/n)} \quad (n > 2)$$

La condition de phase peut s'écrire  $\omega_0 T = \text{tg}\left(\frac{\pi}{n}\right)$

en la reportant dans la condition de gain, nous obtenons:

$$A_0 = \frac{1}{K} \cos(\pi/n)^{-n} \quad (n > 2)$$

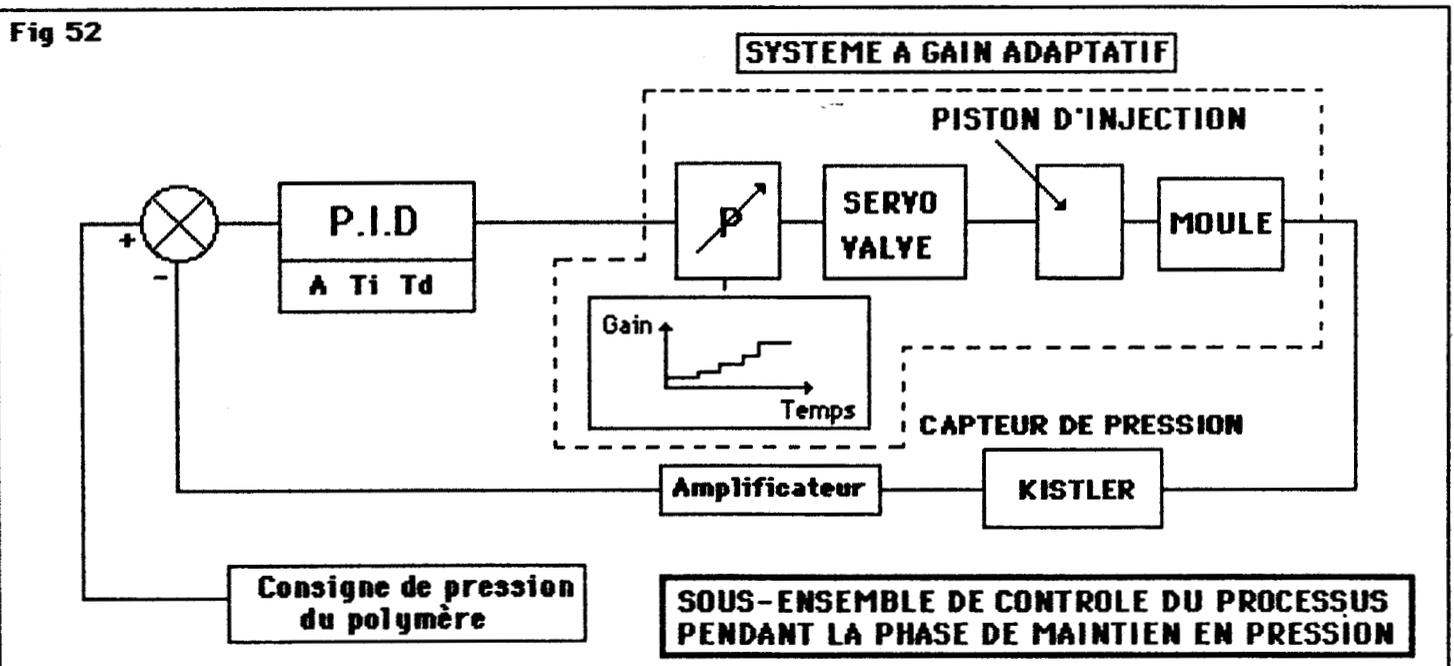
Or, le critère de Ziegler et Nichols, à partir des valeurs de gain et de pulsation du régime critique oscillatoire sous une action proportionnelle seule, entraîne les réglages suivants :

$$A = 0,6 A_0 \quad T_i = 0,5 T_0 \quad T_d = 0,125 T_0$$

Aussi, en appliquant ce principe au cas représenté par l'enregistrement qui précède, nous réglons la carte P.I.D. avec les valeurs :

$$A = 4,8 \quad T_i = 90 \text{ ms} \quad T_d = 22 \text{ ms.}$$

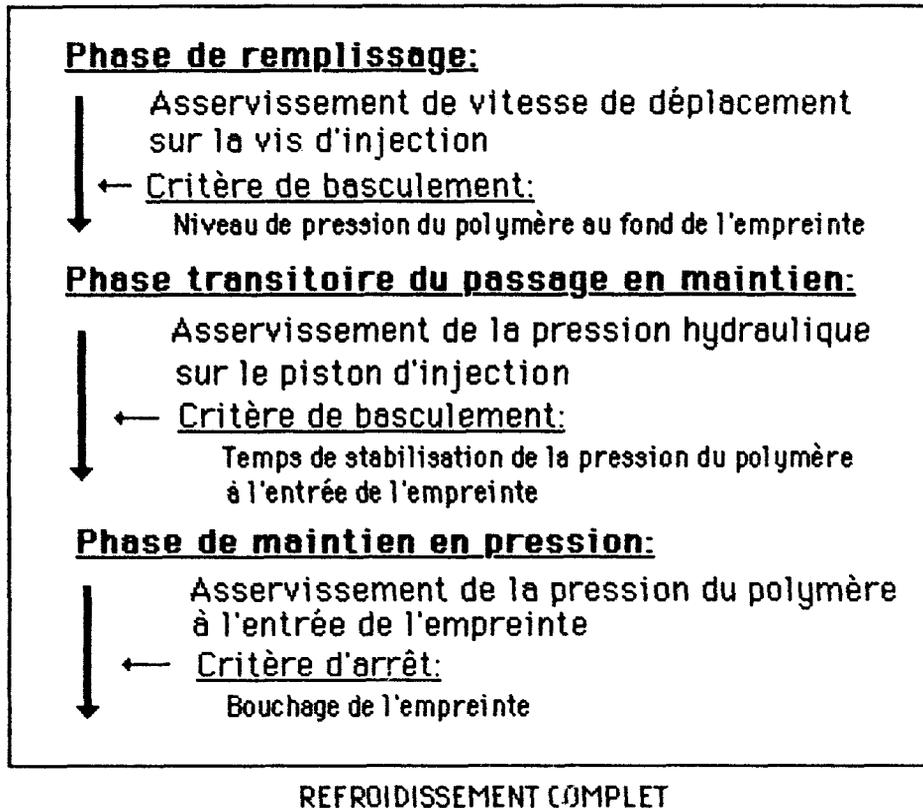
Nous affectons ces valeurs au dispositif qui prend l'allure générale décrite sur la figure 52.



Au moment de l'injection, l'ensemble du processus est par conséquent piloté par un asservissement à topologie variable. Ce dernier est articulé de la façon suivante :

## FERMETURE DU MOULE

Fig 53



Les courbes qui suivent illustrent l'intérêt du régulateur à action P.I.D. ajouté au système. La comparaison des quatre enregistrements démontre l'utilité de la loi de commande installée :

FIG 54

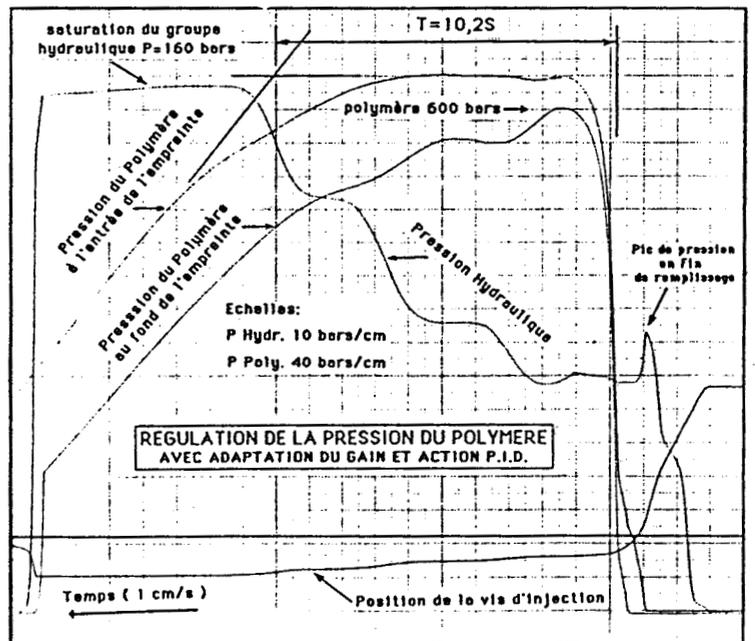
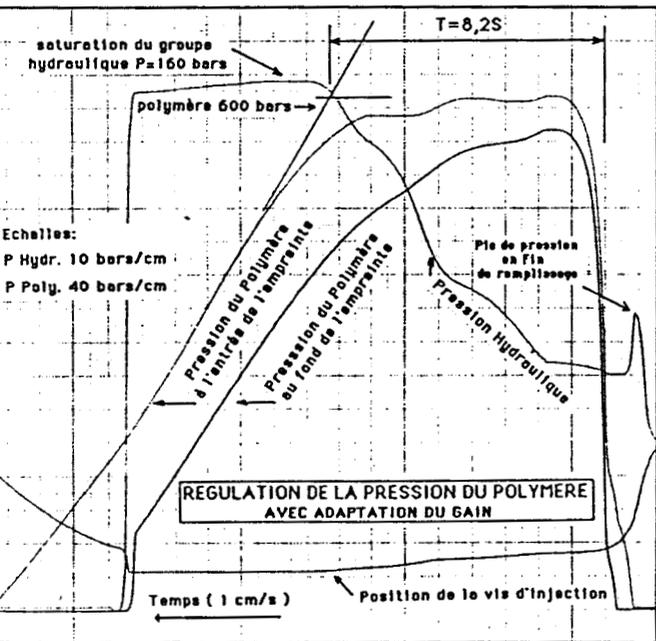
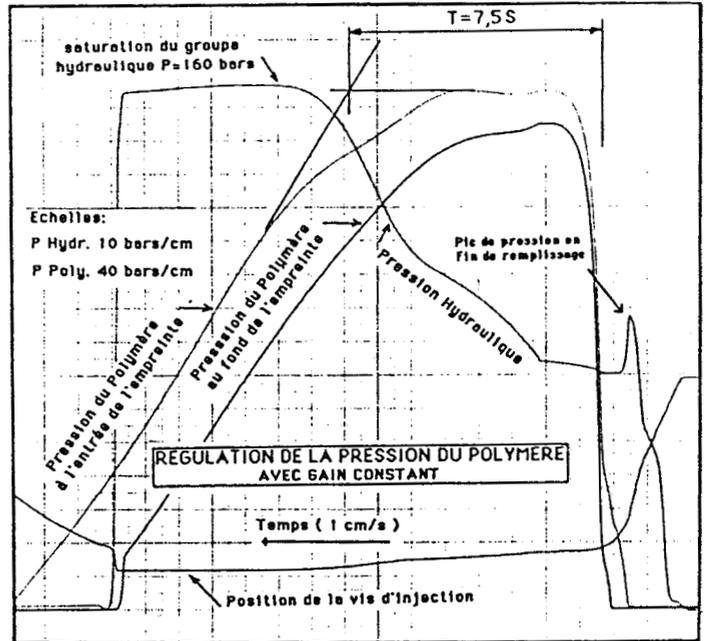
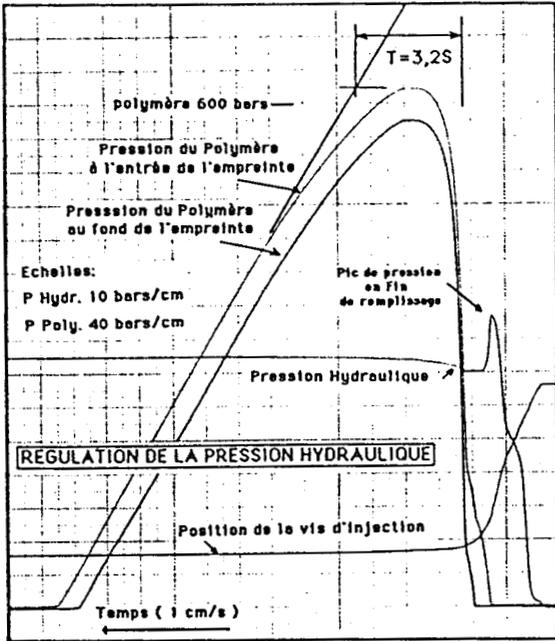


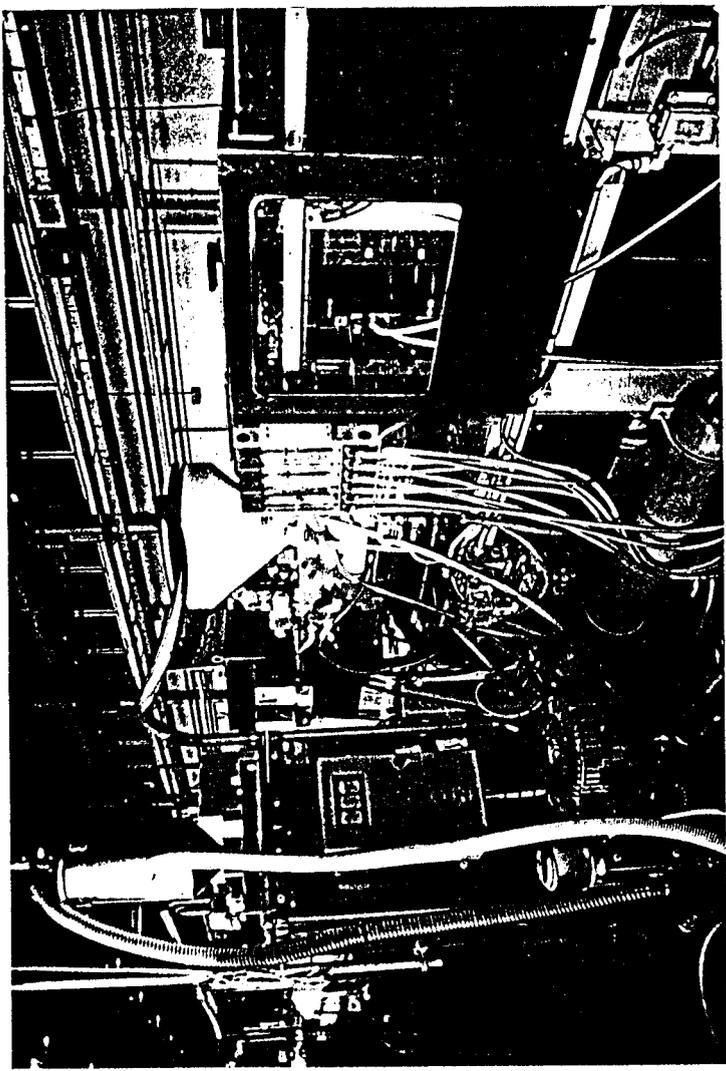
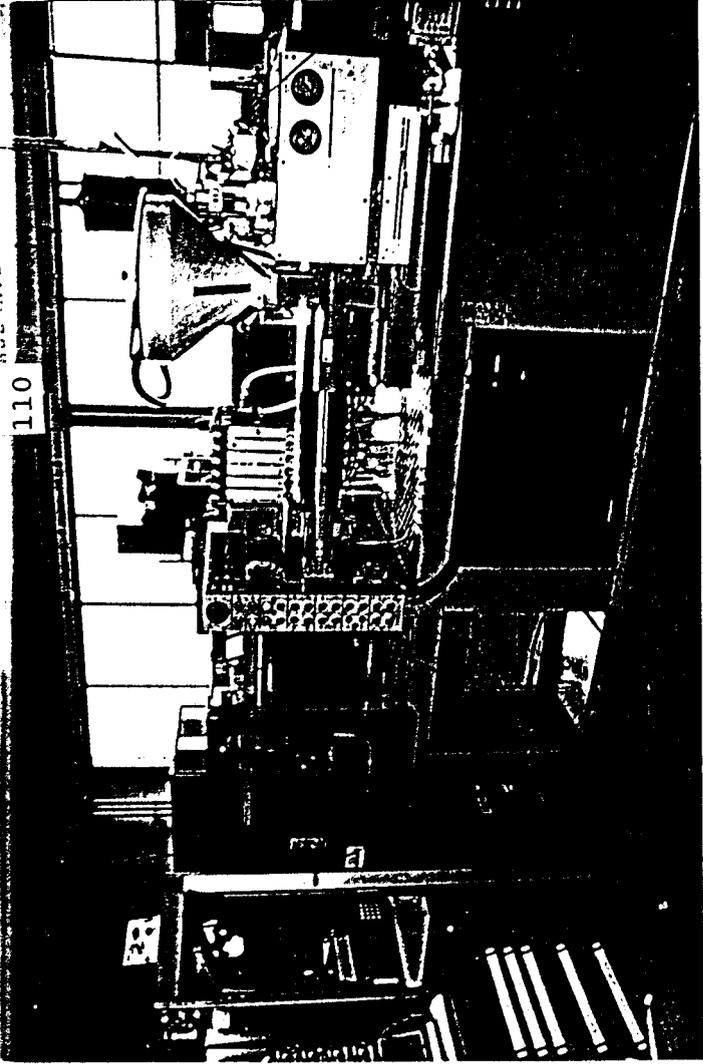
FIG 55

Le travail qui vient d'être fait nous permet d'installer sur la machine un système de commande robuste et classique. En effet, le souci permanent du caractère industriel de notre recherche nous a imposé cette solution. Une carte d'asservissement numérique est très coûteuse et reste difficile à mettre en oeuvre dans un atelier de production.

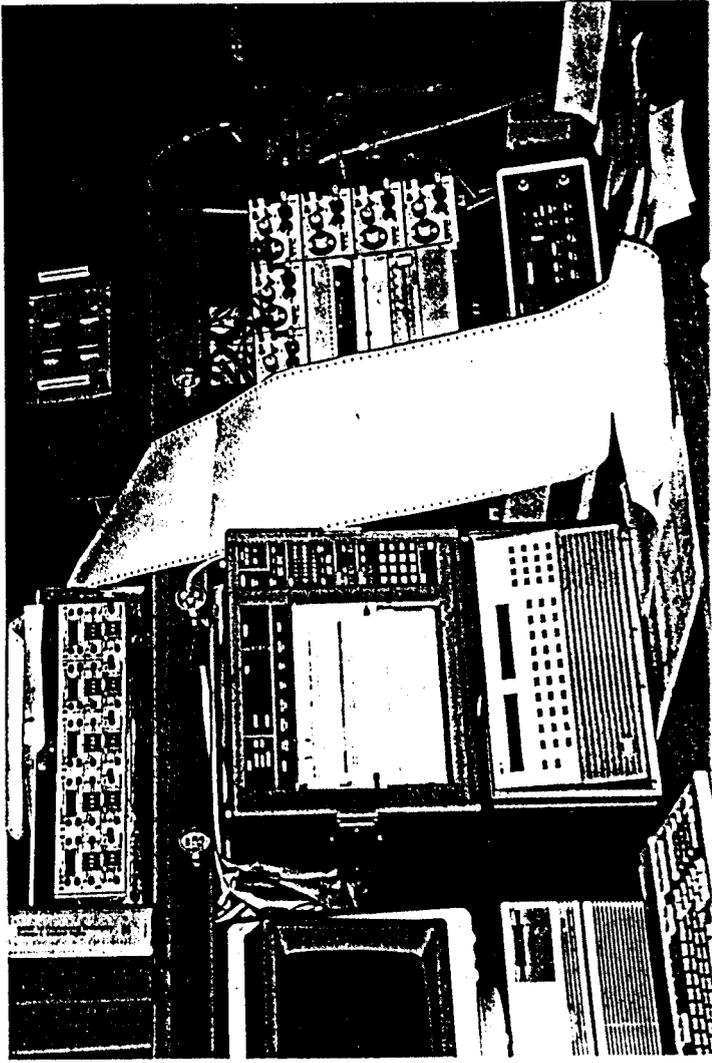
Au cours des manipulations, l'acquisition des données est faite à l'aide d'un analyseur de transitoire SERVO-FRAME. Il peut travailler sur six voies avec une fréquence d'échantillonnage de 2000 hertz. Nous enregistrons les pressions dans l'outillage, la pression hydraulique, la position de la vis d'injection et différents signaux de déclenchement.

La vitesse de scrutation de cet enregistreur est adaptée à nos besoins car nous travaillons pendant la phase quasistatique d'injection.

L'ensemble des moyens expérimentaux est présenté sur les photos qui suivent.



OTOS DE L'INSTALLATION



**5. LES TRAVAUX ET RESULTATS EXPERIMENTAUX**

## 5.1. Choix de l'emplacement des capteurs de pression implantés dans l'outillage

### 5.1.1. Emplacement du capteur de pression utilisé pour déclencher le passage en pression de maintien

Nous pouvons justifier l'emplacement de ce capteur en étudiant deux cas opposés : l'utilisation d'un capteur situé à l'entrée de l'empreinte d'une part et la mise en service d'un capteur implanté à l'extrémité de la cavité du moule d'autre part.

#### A) Capteur de pression à l'entrée de moule

Ce capteur est activé dès le début du remplissage de l'empreinte. Par ailleurs, cette zone est soumise aux pressions les plus élevées. En effet, les pertes de charge dues à l'écoulement du polymère, s'établissent dans la plupart des cas pendant le parcours des zones qui sont situées après l'entrée de l'empreinte.

La variation de pression présente une grande amplitude dans cette zone. C'est un facteur intéressant. En effet, le déclenchement en phase de maintien est réalisé à partir de la détection d'un niveau de pression. Ainsi, l'étendue du réglage de ce seuil de pression est importante. Nous disposons alors d'une précision relative plus grande pour réaliser le passage en maintien.

Néanmoins, ce choix présente certaines lacunes. En effet, ce système de passage en maintien est inefficace lorsque le polymère injecté présente des caractéristiques viscoélastiques variables. Une perturbation sur la valeur de la viscosité de la résine entraîne plusieurs phénomènes :

- une augmentation de viscosité peut déclencher l'arrêt de la phase dynamique d'injection avant le fin du remplissage de l'empreinte. En effet, cette perturbation provoque une augmentation des pertes de charge dues à l'écoulement du polymère. Le seuil de pression imposé est atteint trop tôt.

- une diminution de viscosité facilite le transfert de la pression dans l'empreinte. L'accroissement global de la pression qui en découle peut alors entraîner l'ouverture du moule sans même avoir atteint le seuil de pression imposé pour déclencher le passage en maintien.

L'implantation du capteur de pression à l'entrée du moule est aussi remise en cause, à juste titre, pour les raisons qui suivent : l'entrée du moule est très proche du groupe d'injection. A la fin de la phase dynamique d'injection, la résine qui se trouve entre la vis d'injection et le capteur de pression est très liquide. La pression du polymère au niveau du capteur est donc particulièrement bien corrélée à la pression hydraulique appliquée sur la vis d'injection. Aussi, l'investissement qui est réalisé

dans la chaîne de lecture de la pression du polymère, n'est plus justifié. (capteur, amplificateur, usinage du moule). Néanmoins, ce type d'implantation permet de prendre en compte les pertes de charges qui s'établissent dans la buse d'injection et le système vis-fourreau.

#### B) Capteur de pression au fond du moule

Le fond du moule désigne la zone dans l'empreinte qui est atteinte la dernière par le front de résine. L'évolution de la pression dans cette zone est très différente de celle étudiée précédemment.

En effet, la pression du polymère à la fin du remplissage est faible. Le front d'écoulement est à la pression atmosphérique lorsqu'il atteint le fond de l'empreinte.

Néanmoins, le polymère subit aussitôt un compactage très important. Les vitesses de montée en pression atteignent plusieurs centaines de bars par seconde. Ce phénomène entraîne des contraintes sur les seuils de pression utilisables d'une part et sur les temps de réaction du système d'autre part.

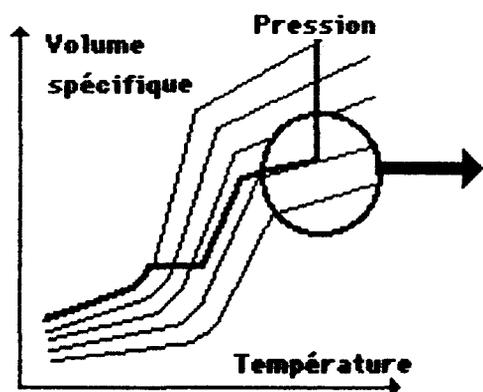
Le réglage du seuil de pression présente une étendue faible. Ce phénomène limite sa souplesse d'utilisation. Il est impossible de réaliser le passage vers la phase de maintien au cours du pic de pression de compactage. L'inertie des systèmes d'injection provoque des pics de pression redoutables.

Néanmoins, l'installation du capteur au fond de l'empreinte offre certaines garanties : le passage en pression de maintien est toujours effectué sur un outillage complètement rempli.

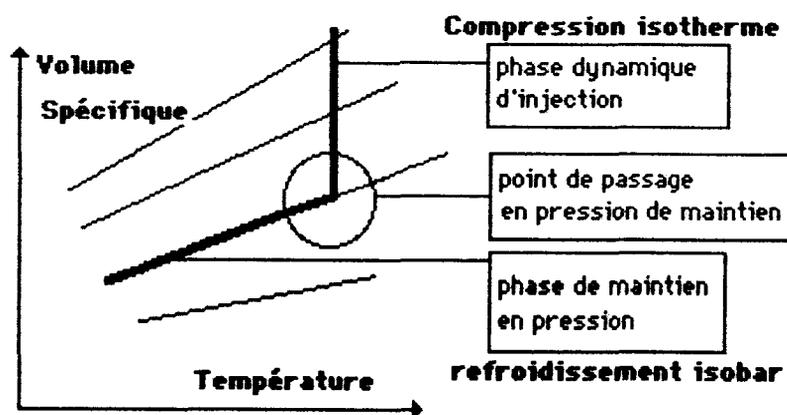
Nous désirons travailler avec un dispositif capable de compenser les perturbations qui affectent le processus. Compte tenu des remarques qui précèdent, la solution idéale est d'implanter le capteur au fond de l'empreinte. Néanmoins, le passage en maintien ne peut pas être fait de façon idéale. Nous sommes amenés à faire un nouveau choix technologique.

En effet, le passage en maintien est décrit de façon idéaliste dans un diagramme PVT. C'est un point anguleux sur le chemin thermodynamique qui est tracé dans le diagramme de la matière injectée. Il se trouve entre la compression isotherme de la phase dynamique d'injection et le refroidissement isobar du début de maintien en pression.

Fig 56



Chemin thermodynamique complet



Détail sur le point de passage en maintien

Fig 57

Chemin thermodynamique complet (fig. 56)

Détail sur le point de passage en phase de maintien (fig. 57)

Il est impossible de passer directement d'une compression isotherme à un refroidissement isobar. L'inertie mécanique des systèmes d'injection et l'inertie thermique de l'ensemble pièce-moule créent une phase transitoire.

Deux cas réels de passage en pression de maintien sont analysés : passage en maintien réalisé trop tôt ou trop tard.

#### Passage tardif en pression de maintien

Le cycle présente l'allure qui suit (fig. 58) :

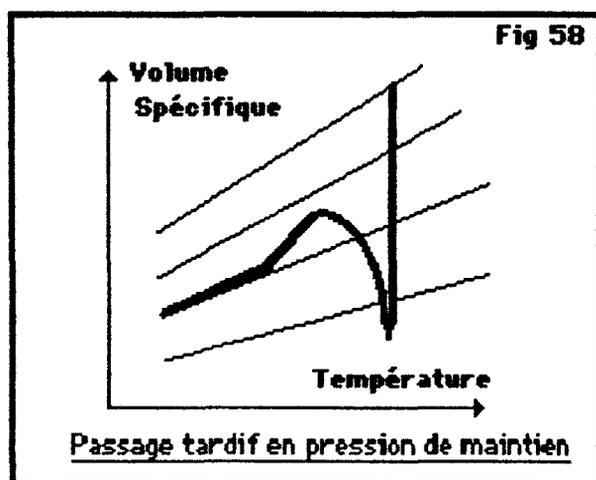


Fig 58

Le retard entraîne un dépassement de pression.

La pression de maintien crée ensuite une chute de pression. Ce chemin thermodynamique est très chaotique. Sa reproductibilité est difficile d'un cycle d'injection à l'autre.

Par ailleurs, la succession d'une compression et d'une décompression du polymère injecté dans le moule pro-

voque des flux de résine anarchiques. Les orientations qui sont générées dans la pièce injectée, nuisent à la qualité de cette dernière.

#### Passage précoce en pression de maintien

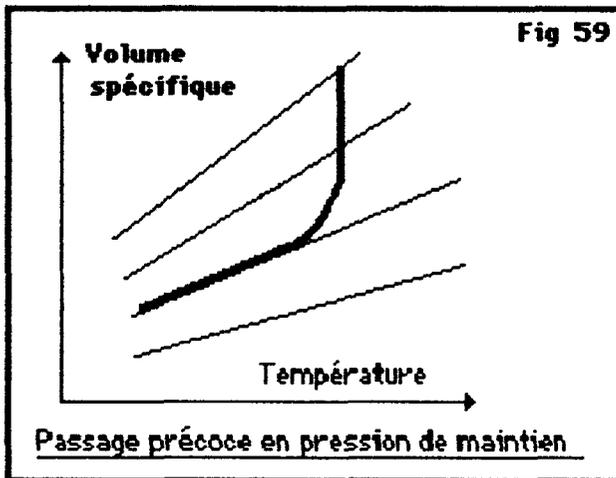


fig. 59 : Le passage prématuré à la phase de maintien en pression est moins nocif. En effet, les flux de résine restent orientés du fourreau vers le moule. Les effets d'orientation macromoléculaires persistent. Néanmoins ils sont moins importants dans ce cas. La résine suit un chemin thermodynamique moyen beaucoup plus stable. Ce dernier est facilement reproductible.

Nous choisissons de réaliser un passage en pression de maintien prématuré en implantant le capteur de pression en retrait par rapport au fond de l'empreinte. Cette solution permet d'associer une amplitude de réglage maximale avec une avance systématique sur le passage en pression de maintien.

Nos conditions de passage en maintien sont dorénavant figées. Le chapitre qui suit, justifie l'emploi d'un autre capteur de pression destiné au contrôle de la phase de maintien en pression.

#### 5.1.2. Emplacement du capteur de pression utilisé pour contrôler la phase de maintien en pression

A la fin de la phase de remplissage du moule, l'état du polymère dans l'empreinte, n'est pas homogène. La résine située près de l'entrée du moule, est d'une part plus chaude et d'autre part plus comprimée que celle qui se trouve au fond de l'empreinte.

Le gradient de pression crée des conditions initiales différentes lors d'une tentative de contrôle de cette même pression. Le gradient de température a une incidence sur l'évolution dans le temps des difficultés de contrôle de la pression.

La répartition de la température initiale entraîne en effet dans le temps une solidification non homogène du polymère. Par conséquent, le contrôle de la pression est

possible moins longtemps au fond de l'empreinte. Par ailleurs, un contrôle de pression localisé à l'entrée de l'outillage n'est pas satisfaisant, le fond de l'empreinte est "oublié" dans ce cas, sa pression n'est pas réellement contrôlée.

Pourtant la seconde solution est mieux adaptée pour répondre à nos besoins. En effet, les schémas 60 et 61 permettent de mieux comprendre les phénomènes qui sont mis en jeu. Nous prenons pour exemples la régulation à un niveau constant de la pression à l'entrée du moule d'une part, au fond de l'empreinte d'autre part.

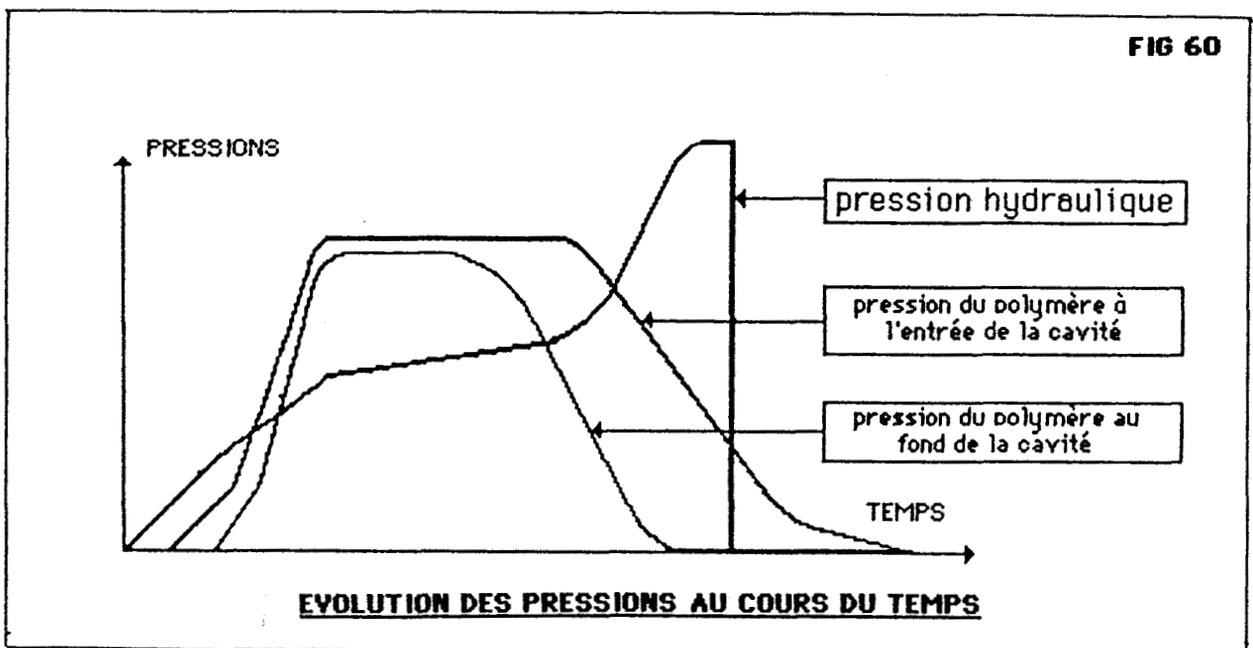
Dans chaque cas, la réaction du système hydraulique a la même allure :

Au début du maintien, une bonne transmission de la pression hydraulique vers le polymère prisonnier dans le moule limite la réaction du système d'asservissement. Puis la quantité de polymère solidifié en peau de pièce augmente. Ceci rend la transmission de pression plus difficile. Les sections de transfert du polymère diminuent : la pression hydraulique augmente pour assurer un refroidissement isobar.

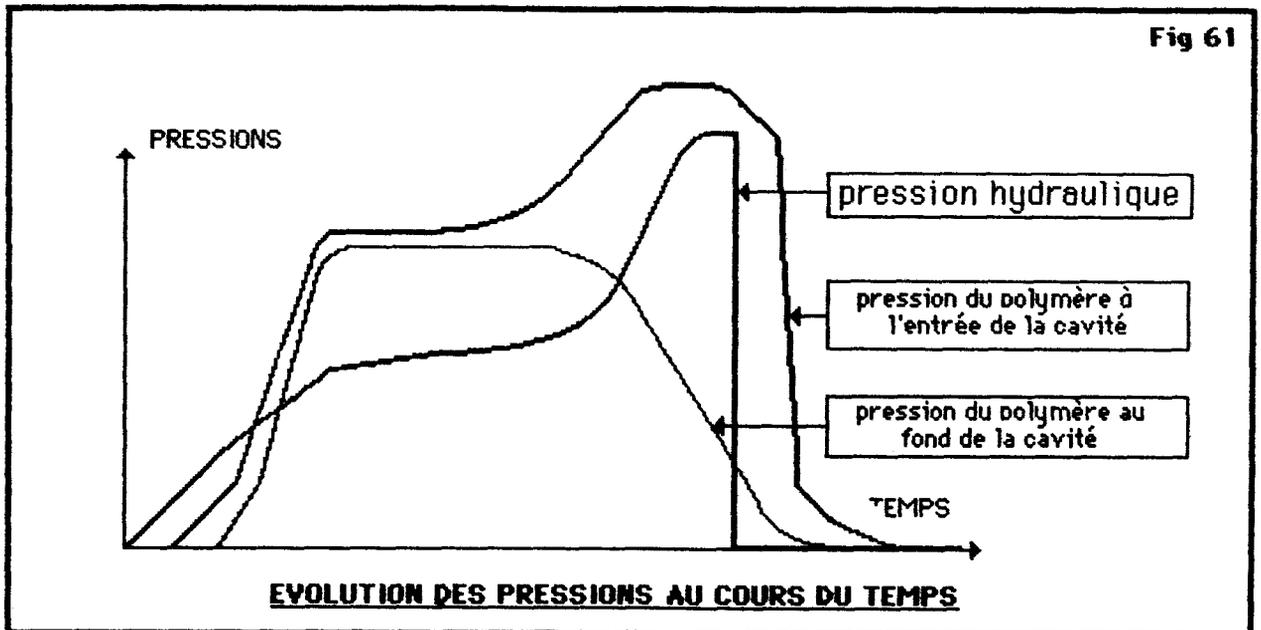
Enfin, la solidification du polymère interdit le transfert de pression. La pression hydraulique augmente de façon exponentielle pour vaincre la chute de pression, celle-ci est lue par le capteur implanté dans le moule. Aussi, la régulation de pression est arrêtée.

Intéressons-nous aux phénomènes qui apparaissent dans la zone sur laquelle nous n'assurons pas la régulation de pression :

1er cas : régulation en entrée de cavité : fig. 60



2e cas : régulation en fond de cavité : fig. 61



Les deux exemples qui sont décrits ne permettent pas de faire un choix définitif. En effet, ils présentent chacun des inconvénients. Néanmoins, la régulation de la pression à l'entrée de la cavité est la mieux appropriée.

La seconde solution provoque en effet une élévation incontrôlable de la pression du polymère à l'entrée du moule. Aussi, compte tenu de la température du polymère plus élevée qui permet d'assurer une durée de contrôle plus importante, la régulation de pression à l'entrée de la cavité est préférable.

Le modèle qui vient d'être décrit étant adapté de façon pratique sur l'unité d'injection, nous étudions maintenant ses performances.

### 5.1.3. Influence de l'emplacement du capteur de pression sur la qualité des pièces injectées (annexe 5)

Nous étudions quatre cas différents. Nous utilisons les cavités ISO 1 et VICAT de l'outillage. Ces empreintes sont considérées indépendantes. Elles sont toutes les deux isolées du réseau d'alimentation par des seuils d'injection étroits (figure 33 p 82).

Dans tous les cas, la phase de maintien en pression est déclenchée à partir d'un seuil de pression sur le polymère. Le capteur qui intervient, est toujours situé au fond de l'empreinte. Pour chaque type d'empreinte, nous produisons des pièces avec deux boucles d'asservissement différentes :

- d'une part, la pression de maintien du polymère est régulée au fond de l'empreinte

- d'autre part, la pression de maintien du polymère est régulée à l'entrée de l'empreinte

Les résultats sont fournis sous la forme de courbes moyennes établies à partir de dix valeurs mesurées. La durée de la phase de maintien est variable. Ce choix permet de juger la stabilité des niveaux de pression développés d'une part et d'étudier la corrélation qui existe entre la masse de l'éprouvette et ses dimensions d'autre part.

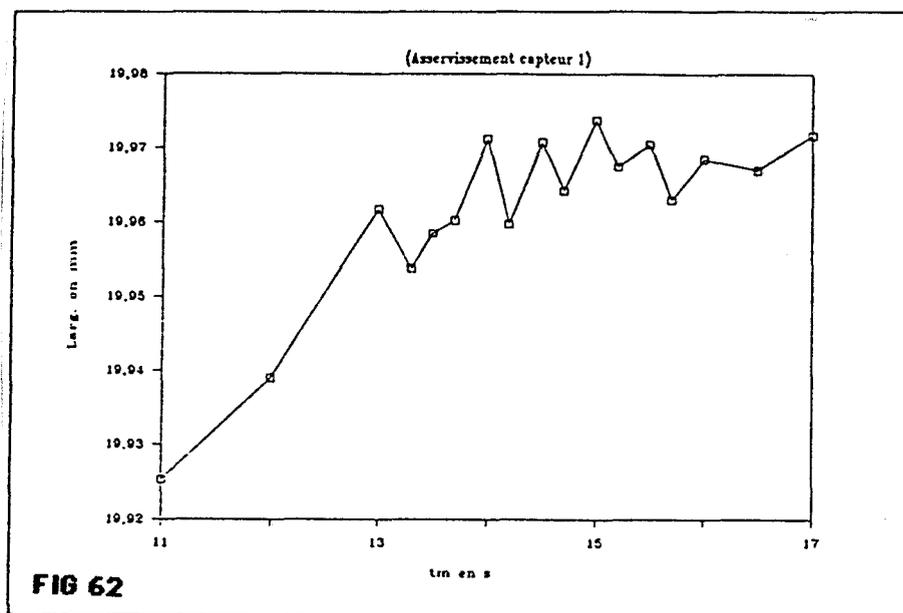
Nous observons des discontinuités importantes sur l'évolution des masses et des dimensions des pièces lors de l'asservissement en fond d'empreinte.

En revanche, les relevés dimensionnels sont moins dispersés pendant l'utilisation de l'asservissement de la pression du polymère dans une zone proche de celle du seuil d'injection.

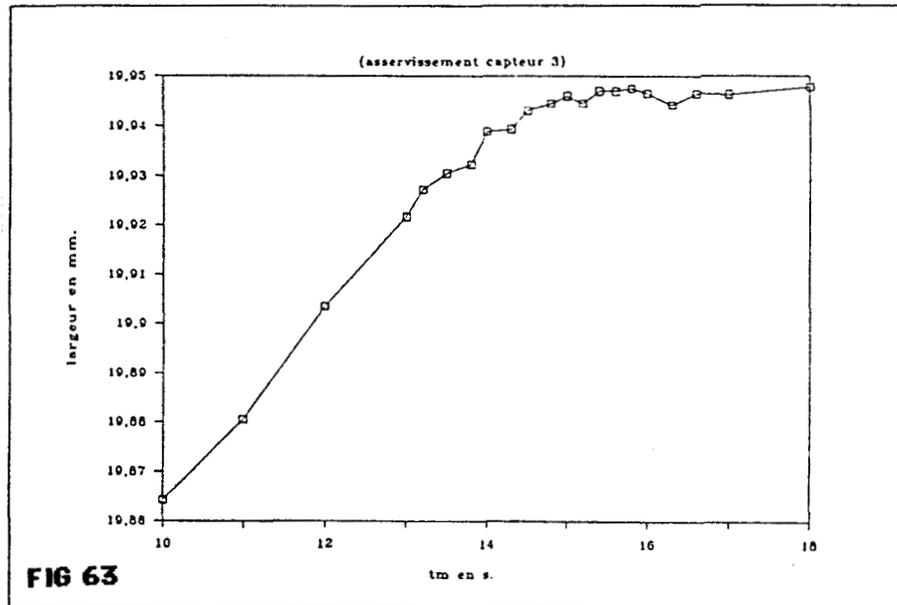
On obtient les résultats suivants :

#### Evolution de la largeur de l'éprouvette ISO 1

a) Régulation de la pression au fond de l'empreinte:  
fig. 62



b) Régulation de la pression à l'entrée de l'empreinte : fig.63



Ces courbes montrent l'intérêt du deuxième type d'asservissement. Ces résultats sont confortés avec les observations qui suivent.

#### Dispersion moyenne des masses obtenues

Nous nous plaçons dans une zone pour laquelle le temps de maintien n'affecte plus les caractéristiques mesurées. La durée minimale prise en compte, définit le temps de maintien optimal ou, temps de bouchage, notion développée plus loin.

Il dépend d'une part de la résine qui est mise en oeuvre et des conditions thermiques de transformation d'autre part.

Ainsi, nous avons mesuré pour le polypropylène PP 3050 MN1 injecté à 225°C dans l'outillage à une température régulée de 30°C :

- pour l'empreinte ISO 1, un temps de bouchage de 15s
- pour l'empreinte VICAT, un temps de bouchage de 17s

Les essais de régulation en pression sont effectués avec des durées supérieures au temps de bouchage. Nous disposons de plusieurs relevés associés à des écarts types. Nous calculons la moyenne des écarts types afin de caractériser la stabilité des résultats obtenus.

Ce tableau rassemble ces valeurs :

Emplacement du point de mesure de la pression du polymère utilisé pour réaliser l'asservissement	A l'entrée de l'empreinte ISO1	Au fond de l'empreinte ISO1	A l'entrée de l'empreinte VICAT	Au fond de l'empreinte VICAT
Nombre de relevés	10	7	14	10
Moyenne des écarts types sur les masses%	0,014	0,054	0,020	0,020
Moyenne des écarts types sur les largeurs %	0,0067	0,0096	0,0144	0,016
Moyenne des écarts types sur les longueurs %	0,0048	0,0058	-	-
Moyenne des écarts types sur les épaisseurs %	0,039	0,061	0,060	0,052

Cette première série d'essais permet de faire un choix sur la boucle d'asservissement. En effet, l'asservissement de la pression du polymère à l'entrée de l'empreinte offre de meilleurs résultats.

Il faut donc implanter deux capteurs dans l'empreinte qui nous intéresse. Cette décision n'est pas sans conséquence financière. En effet, les capteurs de pression piézoélectriques qui correspondent aux besoins de l'injection, sont coûteux. Le marché européen est alimenté par un seul fournisseur. Mais, ce monopole risque de disparaître car d'autres entreprises développent des produits qui seront bientôt compétitifs.

En résumé, cette première étude entraîne les choix technologiques ci-dessous :

- nous implantons deux capteurs dans l'empreinte de l'outillage avec lequel nous travaillons :

\* un capteur est placé près du seuil d'injection. Il est utilisé pour réguler la pression du polymère pendant la phase de maintien

\* un capteur est installé près du fond de l'empreinte. Il permet de déclencher le passage de la phase dynamique à la phase quasi-statique d'injection.

Nous rencontrons quelques problèmes pour contrôler la pression du polymère : le manque d'homogénéité des pressions dans l'empreinte d'une part et la régulation de pression difficile à la fin de la phase de maintien d'autre part.

Intéressons-nous à chacun d'entre eux.

Les enregistrements de pression mettent en évidence la perte de charge : entre le capteur d'entrée et de fond d'empreinte. Ce gradient de pression persiste au cours de la phase de maintien. Il augmente de manière significative à la fin de cette phase. La figure 63 bis page 124 illustre cette observation. Ce phénomène vient du gradient thermique qui affecte le polymère injecté. Ce dernier est plus froid en fond d'empreinte. Il subit un échange thermique important le long de son parcours d'écoulement. Celui-ci est plus court pour le polymère qui est à l'entrée de l'empreinte.

Ainsi, le transfert de la pression appliquée par le groupe d'injection est moins marqué vers le fond du moule. Néanmoins, une augmentation de température généralisée favorise une meilleure répartition des pressions. Ainsi, le gradient de pression entre l'entrée et le fond de la cavité diminue et le contrôle de la pression est facilité par une moindre viscosité du polymère. Ceci se traduit par la solidification sous pression d'une part plus importante de résine. Le retrait du polymère est donc mieux compensé. La masse et les dimensions des pièces augmentent.

Or la géométrie du seuil d'injection intervient aussi dans le contrôle de la pression. En effet, un seuil de section importante facilite le transfert du polymère (donc de la pression) vers l'empreinte. Il favorise aussi la régulation de pression. Celle-ci n'est pas toujours facile à la fin de la phase de maintien.

En effet, le seuil d'injection peut être modélisé par une fonction de transfert dont le gain tend vers zéro au cours de la phase de maintien. Mais la vitesse de variation du gain est dépendante de la structure du polymère.

En effet, un polymère semi-cristallin entraîne une chute rapide du gain. Ce phénomène provient d'une vitesse de densification élevée au moment de la recristallisation. Celle-ci fait vite croître la viscosité du polymère et entraîne l'isolation rapide entre la cavité du moule et le réseau d'alimentation de ce dernier.

Nous pouvons comparer les vitesses de densification. Il faut alors rapporter les variations de densité aux variations de température. Nous utilisons les diagrammes PVT des polymères pour effectuer ces comparaisons.

Désignation de la résine	Polypropylène PPN 1060		Acrylonitrile-Butadiène Styrène ABS TERLURAN 877 T	
Conditions de refroidissement	5,4°C/seconde sur l'isobare 1 bar		4,5°C/seconde sur l'isobare 1 bar	
Températures (°C)	d'injection 250	de recristallisation 120	d'injection 250	de transition* 150
Densités (g/cm <sup>3</sup> )	1/1,360	1/1,250	1/1,052	1/0,958
Densités à 20°C	1/1,120		1/1,0950	
Zones de température °C	250 120	120 20	250 150	150 20
Variations de la densité moyenne dans les zones de températures définies g/cm <sup>3</sup> /°C x 10 <sup>-5</sup>	+49,7	+93	+93,3	+6,8
* cette température correspond à une rupture de pente dans le diagramme PVT				

Ces calculs donnent des valeurs moyennes. Néanmoins, ils confirment nos observations. En effet, en-dessous de la température de recristallisation d'une part et de la température de transition d'autre part, les coefficients calculés, présentent un rapport supérieur à 10.

Par ailleurs, les coefficients qui correspondent à la première phase de refroidissement, sont aussi utiles pour la compréhension de nos difficultés. En effet, les valeurs affichées expliquent la facilité relative avec laquelle nous parvenons à réguler la pression du polymère semi-cristallin avant le bouchage de l'empreinte.

En effet, dans le cas de la résine ABS, nous avons des difficultés pour réguler la pression du polymère. Nous améliorons le dispositif de commande avec une adaptation dans le temps de l'action proportionnelle. Celle-ci est multipliée par cinq en quatre paliers pendant la durée de la phase de maintien. Le système devient plus lourd à mettre en place. Mais, un gain élevé dès le début du maintien entraîne l'instabilité du dispositif lors de l'apparition d'un écart de pression faible à l'origine.

Régulation en boucle fermée sur la pression du POLYMERE

Régulation en boucle fermée sur la pression HYDRAULIQUE

Echelles : P Hydraulique 10 Bar/cm ↑  
 P Matière 40 Bar/cm ↑  
 Temps 1 s/cm ←

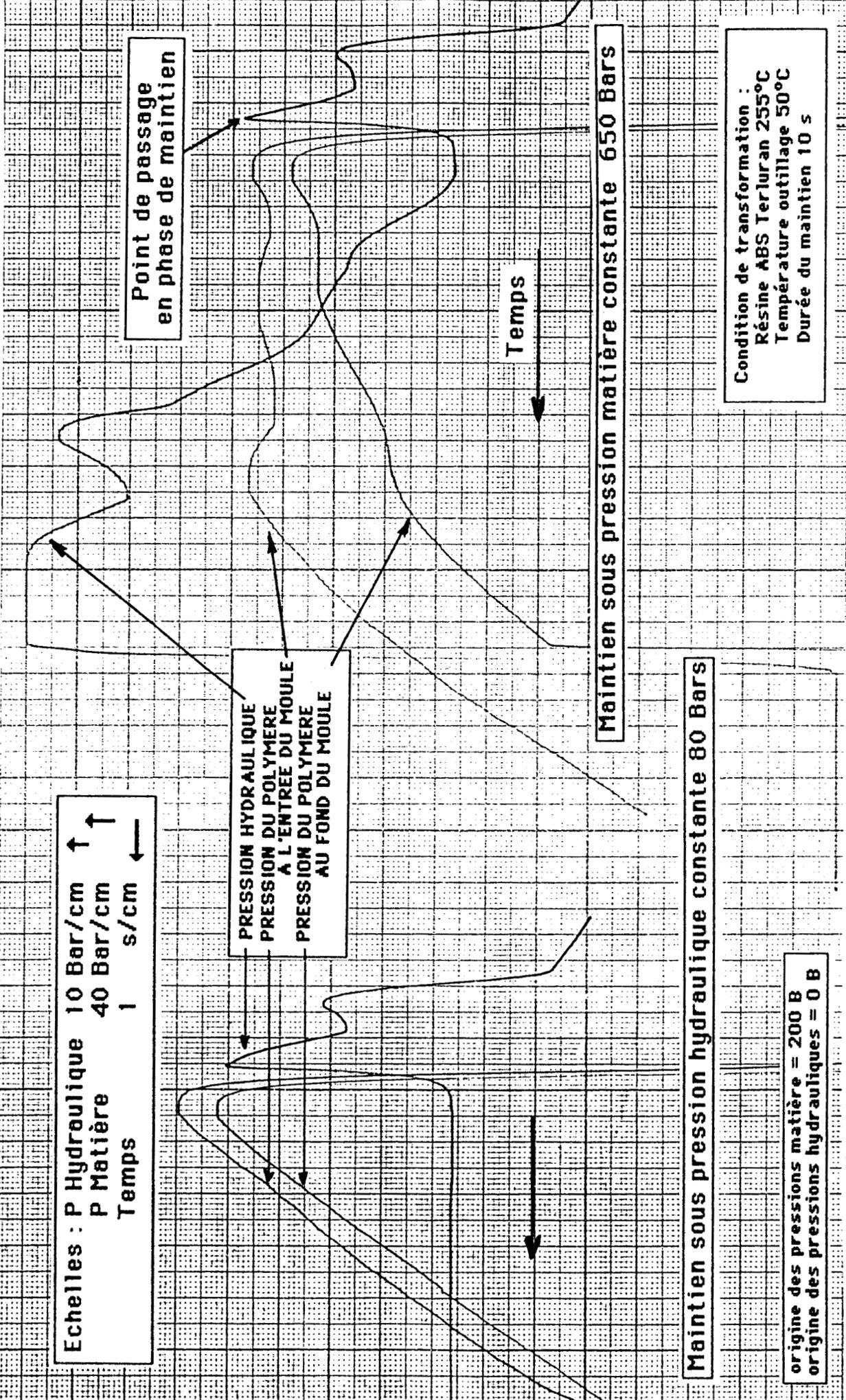


Fig 63 Bis

Maintien sous pression hydraulique constante 80 Bars

Maintien sous pression matière constante 650 Bars

Condition de transformation :  
 Résine ABS Terluran 255°C  
 Température outillage 50°C  
 Durée du maintien 10 s

origine des pressions matière = 200 B  
 origine des pressions hydrauliques = 0 B

Les conditions de contrôle du processus sont donc déterminées. La phase d'analyse doit mettre en évidence l'intérêt pratique de ce système de commande.

### 5.2. Influence d'une perturbation de température du polymère sur la qualité des pièces

La perturbation imposée au processus d'injection permet de simuler plusieurs phénomènes.

En effet, une perturbation principale sur la température du polymère entraîne la modification de l'équilibre thermique de l'outillage.

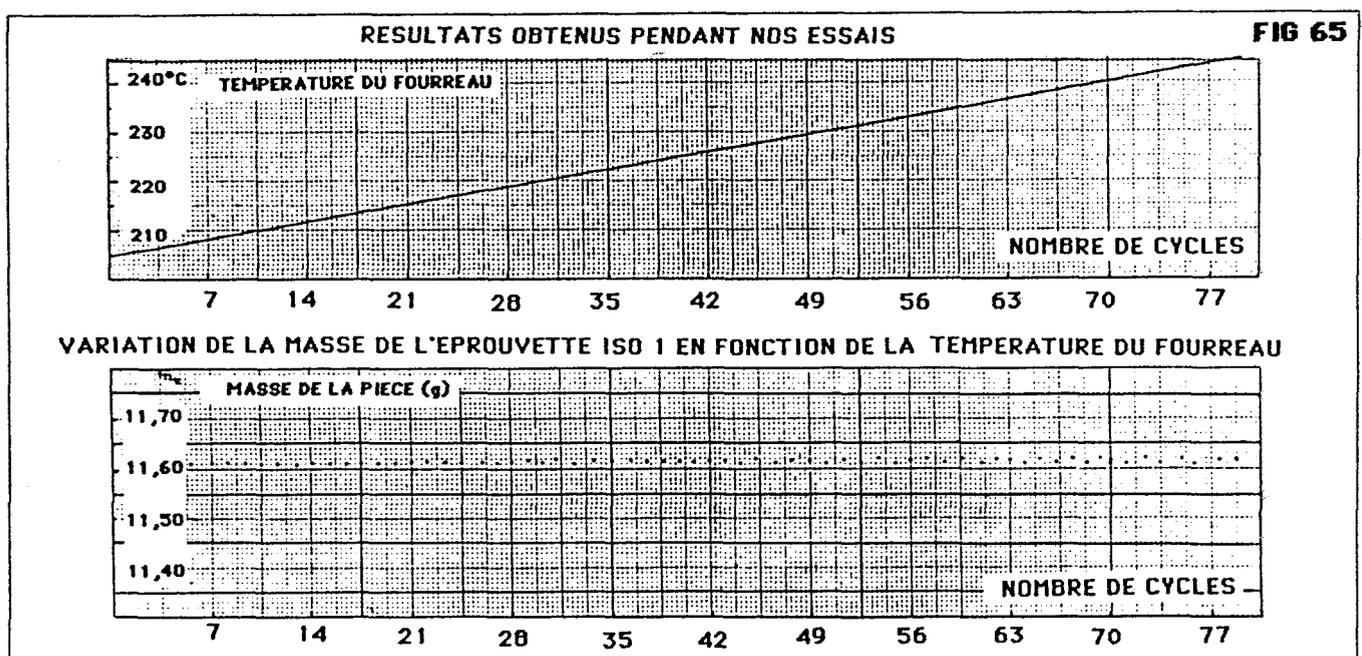
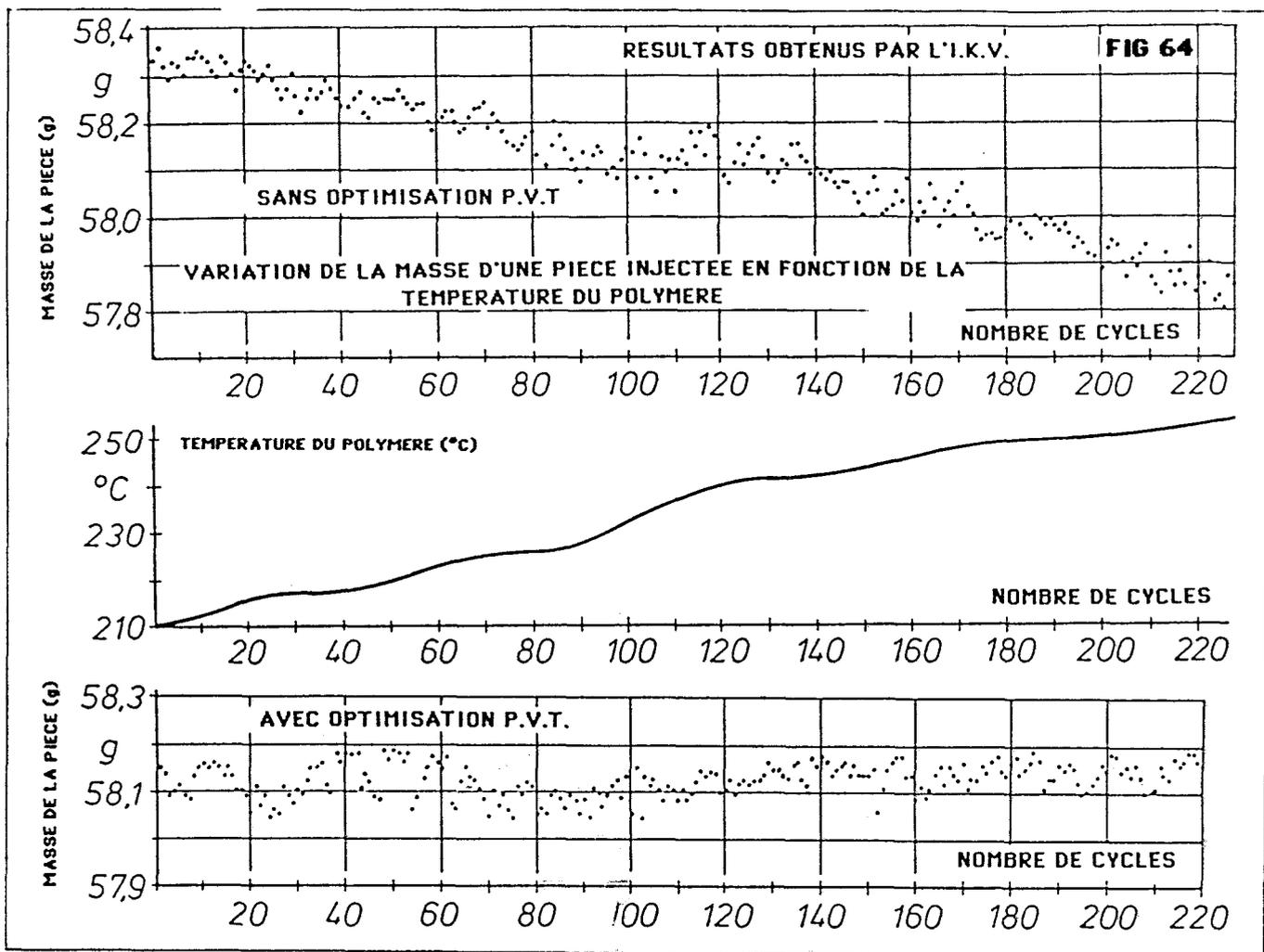
Par ailleurs, la variation de la température du polymère permet de simuler des évolutions de caractéristiques rhéologiques du matériau. Aussi, cette manipulation décrit le comportement du processus quand il est alimenté avec des lots de résine non homogènes.

Une première campagne de mesures consiste à relever les masses des pièces injectées. Nous travaillons avec du polypropylène. La température du polymère évolue de 205°C à 245°C. Au cours du même essai, la température du moule passe de 47°C à 55°C. Nous relevons une augmentation totale de masse de 0,11 %.

La perturbation de température est créée avec des réglages variables des zones de chauffage du fourreau d'injection, à vitesse de rotation de vis constante, pour éviter l'incidence des phénomènes d'auto-échauffement.

En comparant les résultats obtenus à ceux de l'IKV d'Aix-la-Chapelle nous observons un résultat global satisfaisant. Nous obtenons une stabilité relative de la masse très marquée.

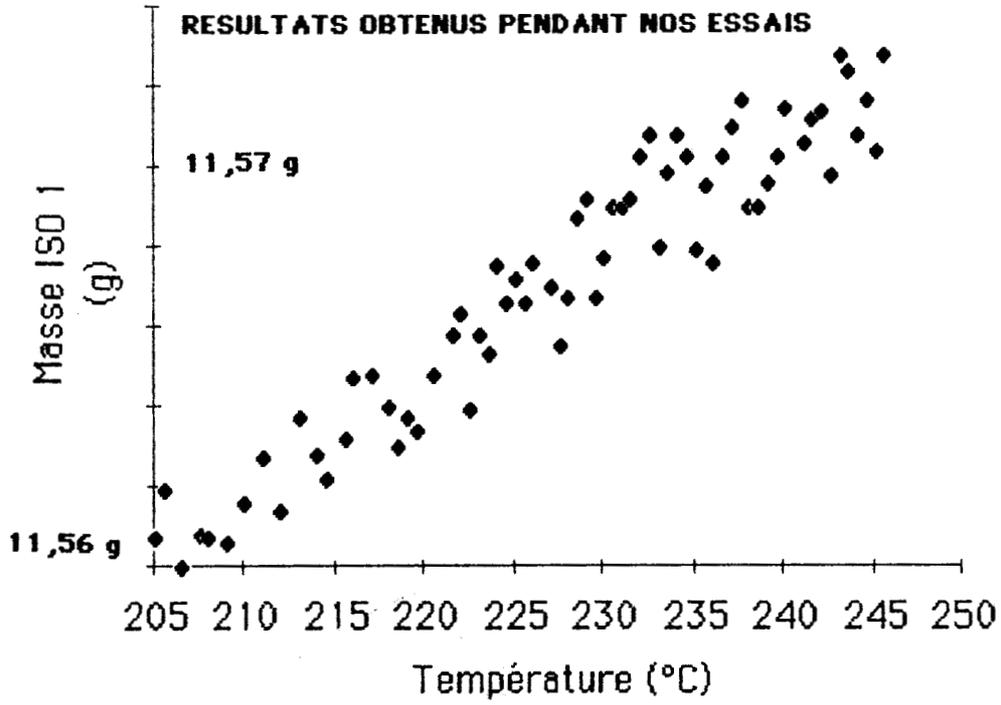
Les figures 64, 65 et 66 illustrent ces résultats :



**EVOLUTION DE LA MASSE DE L'ISO 1 EN FONCTION DE LA TEMPERATURE DU FOURREAU**

(Echelle dilatée)

FIG 66



D'autres expériences montrent des variations de masses entre les deux types de maintien qui évoluent du simple au double.

Variations relatives de masse pour	Maintien en boucle fermée hydraulique	Maintien en boucle fermée matière
résine PP 3050 MN1 moule à 30°C variation de T=40°C matière	0,56 %	0,29 %
résine ABS Terluran moule à 60°C variation de T=40°C matière	0,39 %	0,23 %

Concernant la géométrie, les résultats font apparaître la supériorité du système de contrôle de la pression du polymère. En effet, le polymère semi-cristallin et la résine amorphe présentent, dans ces conditions, des variations de dimension inférieures (annexe 6).

Les résultats obtenus varient en fonction de la direction dans laquelle les mesures sont faites. Nous obtenons de meilleurs résultats dans le sens perpendiculaire à la direction principale d'écoulement du polymère.

### 5.3. Influence d'une perturbation de température de l'outillage sur la qualité des pièces

L'ensemble des expériences réalisées est répertorié dans l'annexe (6).

Nous présentons ci-dessous, un cas particulier afin d'associer des ordres de grandeur aux phénomènes mesurés.

Nous travaillons avec une résine semi-cristalline : du polypropylène 3050 MN1. La phase de maintien est réalisée en boucle fermée hydraulique d'une part et en boucle fermée sur la pression du polymère d'autre part. La température de l'outillage est réglée à 16°C, 30°C, 43°C puis 56°C. Les différents relevés réalisés sont les suivants :

Ecart de température moule = 40°C		
Evolution du paramètre mesuré sur l'éprouvette ISO1	Asservissement sur la pression hydraulique	Asservissement sur la pression du polymère
Variation relative de la masse (%)	- 1,28 %    1,5 10 <sup>-3</sup>	- 0,81 %    1,8 10 <sup>-3</sup>
Variation relative de la longueur (%)	- 0,165 %    1,2 10 <sup>-3</sup>	- 0,099 %    1,3 10 <sup>-3</sup>
Variation relative de la largeur (%)	- 0,24 %    2,8 10 <sup>-3</sup>	- 0,26 %    2,8 10 <sup>-3</sup>
Variation relative de l'épaisseur (%)	- 0,64 %    1,8 10 <sup>-3</sup>	- 0,5 %    1,8 10 <sup>-3</sup>
Les chiffres de droite sont les moyennes des écarts types relevés pour les quatre températures de moule étudiées		

L'asservissement de la pression du polymère entraîne une variation de masse faible par rapport aux résultats obtenus avec un dispositif de commande classique. Cet avantage se retrouve au niveau de la longueur des échantillons.

Les largeurs et épaisseurs des éprouvettes ne présentent pas un comportement identique à celui qui précède. Néanmoins, les résultats restent favorables à la commande en boucle fermée sur la pression du polymère. L'incidence des réglages sur les variations de largeur et d'épaisseur est moins contrastée. Ce phénomène provient de la petite-esse des cotes mesurées. En effet, les rapports entre la longueur des échantillons et leurs autres dimensions sont de 1/10 et 1/50 pour la largeur et l'épaisseur.

Enfin, cette campagne d'essais est réalisée avec différents niveaux de pression qui sont compris entre 80% et 100% de la pression du cycle standard lors du bouclage sur la pression du polymère. Nous constatons une grande régularité des variations des caractéristiques dimensionnelles en fonction de la température du moule.

Rapport entre la variation maximale et la variation minimale du paramètre pour un $\Delta T_{\text{moule}} = 40^{\circ}\text{C}$	Bouclage sur la pression hydraulique	Bouclage sur la pression du polymère
masses	3,22	1,35
longueurs	1,94	1,36
largeurs	1,71	1,44
épaisseurs	8	3,16

Ces coefficients sans dimension mettent en valeur la stabilité relative des caractéristiques de la pièce injectée sous le contrôle de la pression du polymère dont nous allons analyser l'influence en amplitude et temps.

#### 5.4. Influence du niveau et la durée d'application de la pression de maintien sur les caractéristiques géométriques de la pièce

##### 5.4.1. Influence du niveau de la pression de maintien

Nous désirons évaluer l'incidence du niveau de pression imposé dans l'empreinte, au cours du maintien, sur les caractéristiques massiques et géométriques des pièces injectées.

Un cycle d'injection de référence est donc choisi afin de situer l'évolution thermodynamique moyenne du polymère.

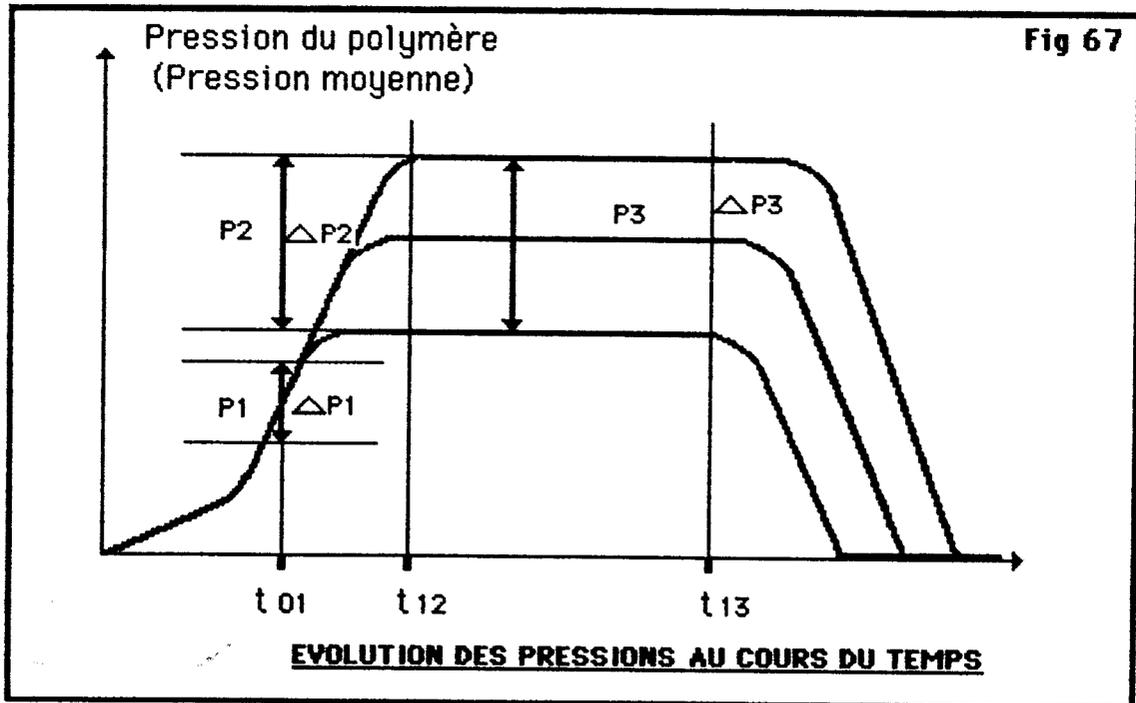
Nous travaillons autour de ce point de fonctionnement a priori défini par un ensemble de paramètres d'injection et de maintien "idéaux". Les variations d'évolution thermodynamique du polymère sont obtenues en modifiant trois paramètres de réglage fondamentaux de la presse :

- la pression de déclenchement de la phase quasi-statique
- la pression hydraulique de maintien sur la vis d'injection
- la pression matière de maintien qui définit la consigne de la boucle de régulation rapportée

Ces trois paramètres définissent la notion de pression au cours de la phase de maintien. Cette situation est intéressante. En effet, nous avons déjà montré l'intérêt du système d'asservissement. Il nous permet de prendre en compte les perturbations au niveau de la température du polymère injecté. Nous pouvons donc, au cours de cette expérience, considérer la pression du polymère comme une

variable indépendante. Cette situation permet de définir des relations entrées-sorties relativement simples pour identifier l'ensemble du processus moule-machine.

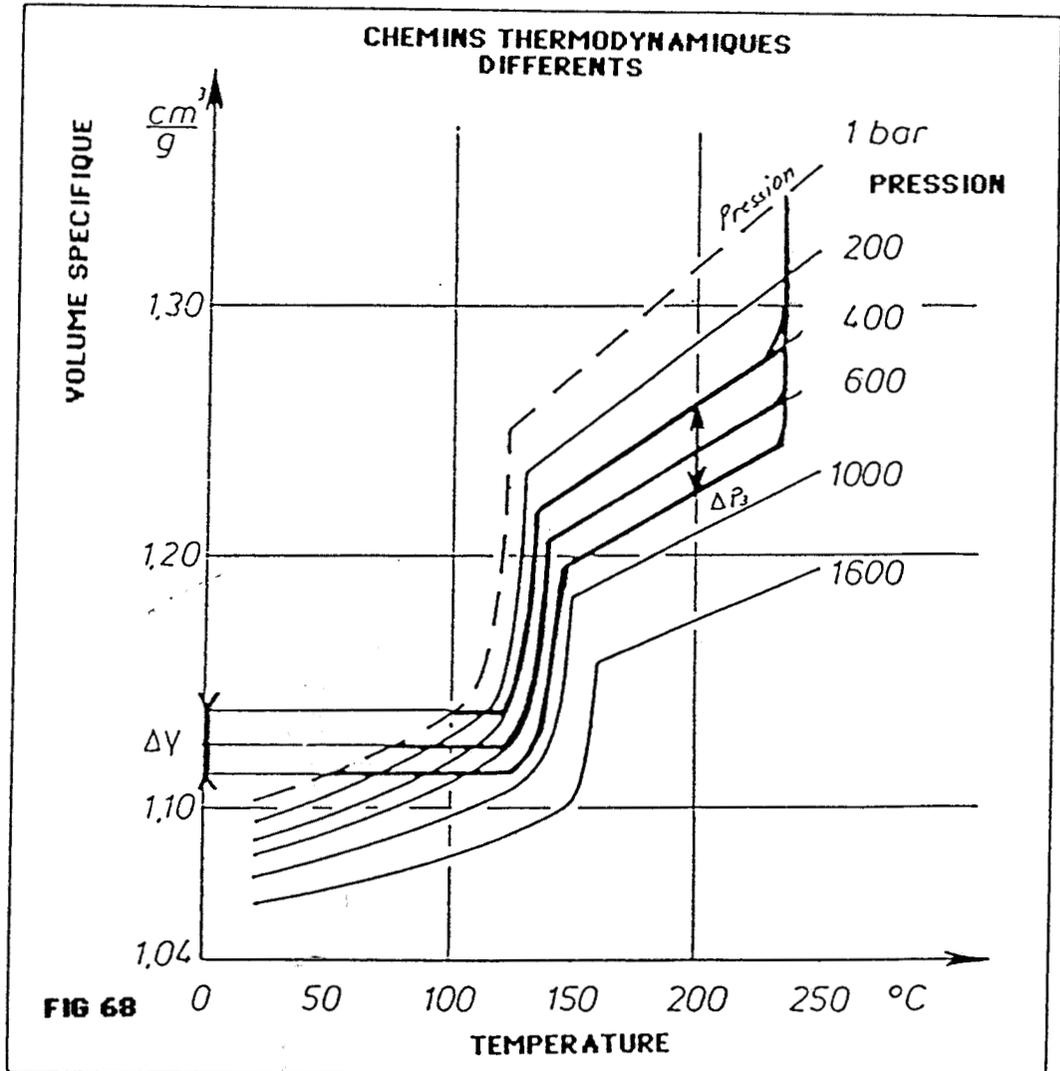
**DESCRIPTION DES VARIATIONS IMPOSEES SUR LES PARAMETRES D'ENTREE : fig. 67**



- P1 : pression interne au moule qui autorise le passage en maintien. Les variations de cette valeur de consigne se traduisent par une translation quasi-v verticale dans le diagramme pression-temps. En effet, au stade du compactage, les vitesses de montée en pression sont extrêmement importantes (plusieurs centaines de bars par seconde).
- P2 : pression hydraulique dans le circuit d'injection. L'utilisation momentanée de la commande d'origine du maintien permet de prendre en compte les caractéristiques inertielles du système d'injection. Cela se traduit par une évolution moins brutale de la pression vers la consigne P3.
- P3 : pression de consigne de l'asservissement en boucle fermée. C'est une valeur fondamentale au cours de l'expérience. Elle définit effectivement ce qui se passe au niveau de la représentation d'un cycle d'injection dans le diagramme PVT du polymère utilisé. Ceci, principalement au cours du refroidissement intense du polymère.

EVOLUTION DU CHEMIN THERMODYNAMIQUE MOYEN PARCOURU AU COURS  
DES CYCLES D'INJECTION : fig. 68

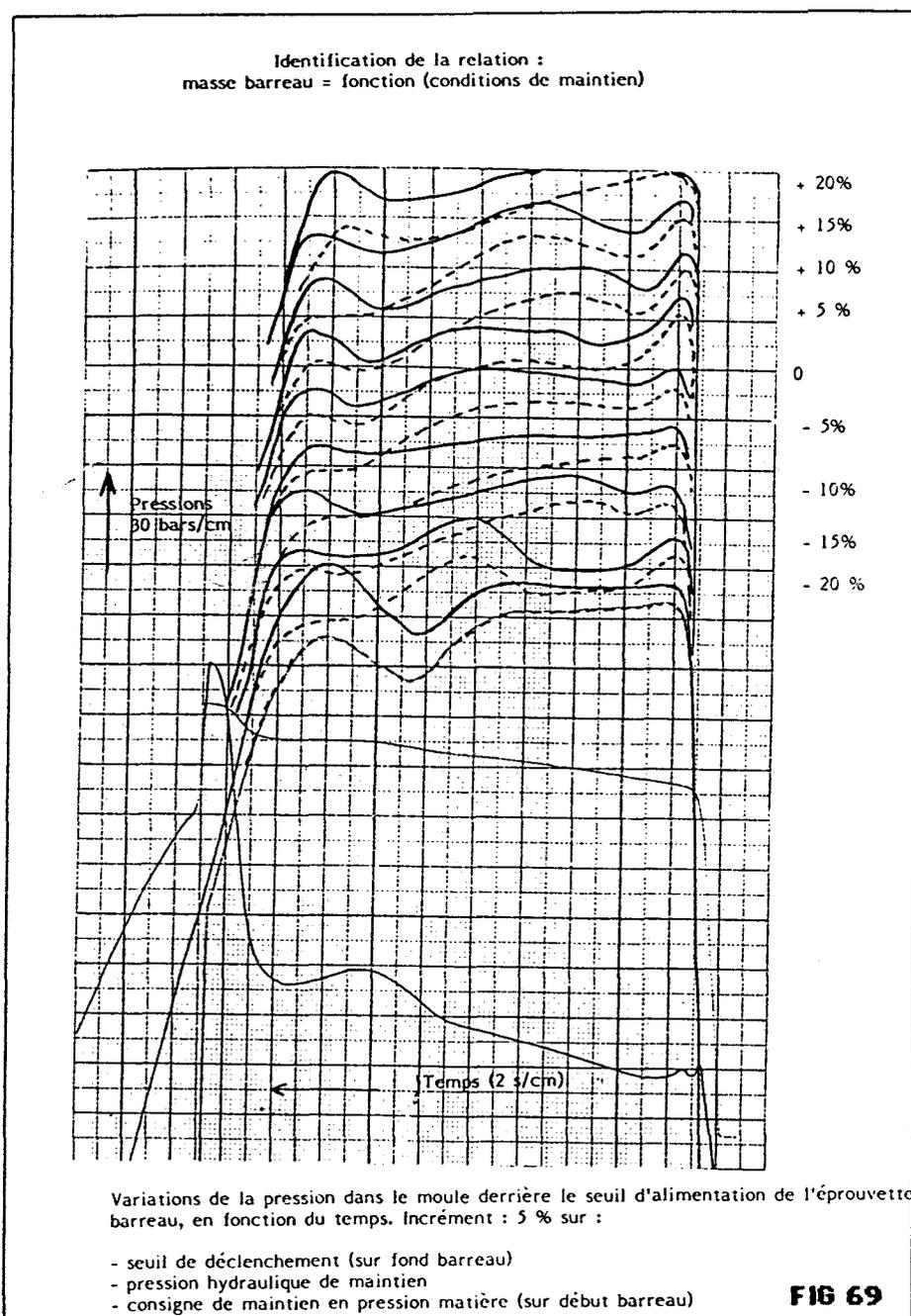
Les variations des paramètres P1, P2 et P3 permettent de définir, a priori, plusieurs trajets moyens dans un diagramme PVT.



Cette représentation reste idéaliste et concerne des valeurs moyennes de température et de pression. En effet, des expériences sur presse à injecter permettent d'enregistrer les variations de pression dans un moule. Les courbes ne sont pas strictement parallèles entre elles. Ces distorsions sont principalement dues à l'instabilité du système que nous tentons d'asservir. La fonction de transfert qui relie la valeur de pression hydraulique de maintien à la valeur de pression matière dans l'outillage, est sans cesse modifiée. En effet, la température du polymère (non homogène dans les trois dimensions du volume de l'empreinte du moule) diminue en permanence à des vitesses variables. Les échanges thermiques entre polymère et moule rendent la résine de moins en moins fluide jusqu'à sa solidification. L'évolution des paramètres matière entraîne la modification de la fonction de transfert qui nous concerne. Au moment de la solidification du seuil d'injection cette fonction présente un gain nul.

Les limites supérieures des niveaux de pression sont imposées par la puissance de la presse. En effet, nous arrêtons les essais si la force de fermeture appliquée au moule, devient trop faible (90 tonnes). Nous parcourons des intervalles de cycle pression compris entre -20% et +20% de la pression du cycle de référence utilisé.

Les enregistrements des pressions sont représentés sur la figure 69.



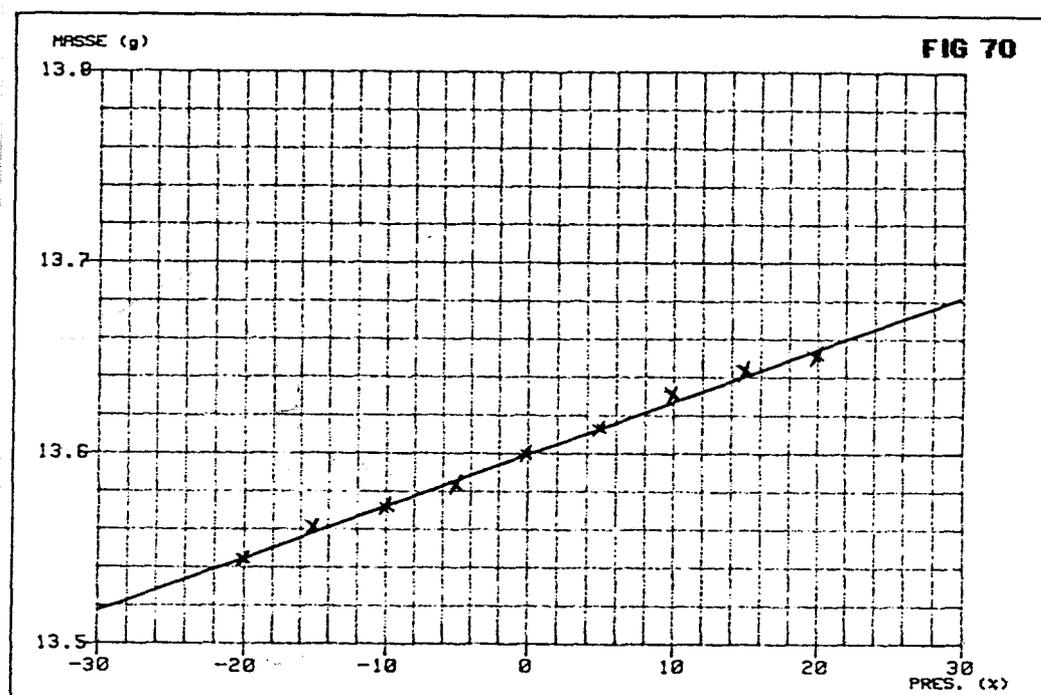
**VARIATION DE LA PRESSION DU POLYMERE EN FONCTION DU TEMPS  
ETUDE DE PLUSIEURS NIVEAUX DE PRESSION**

Ces courbes sont tracées de manière continue. Elles correspondent au signal qui est donné par le capteur de pression placé à l'entrée de l'empreinte.

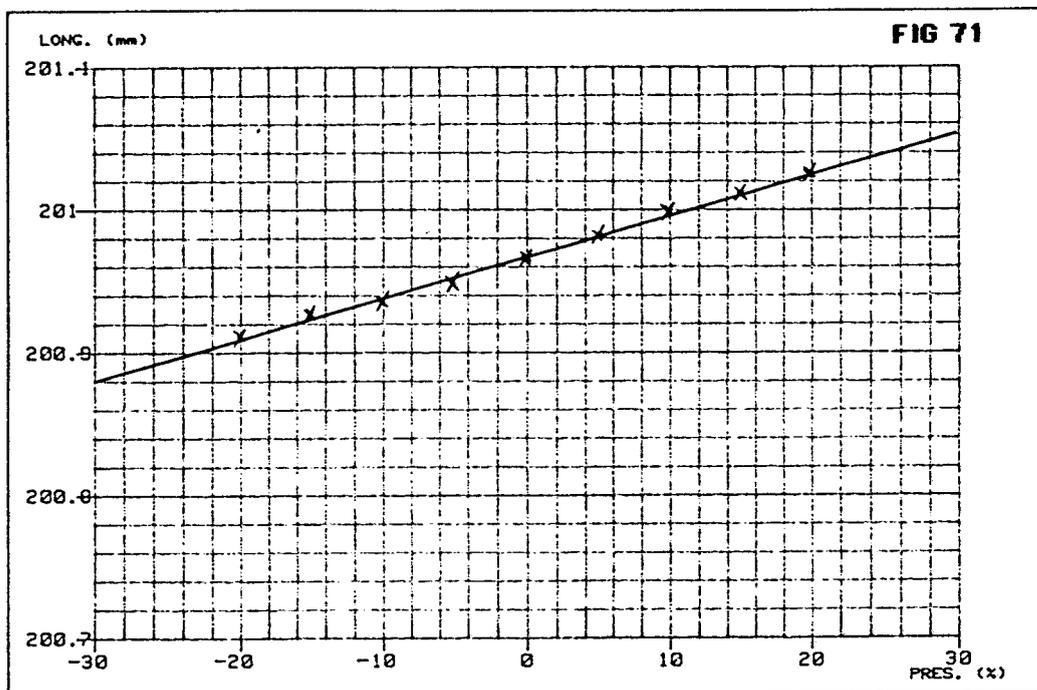
Les tracés discontinus concernent le capteur de pression implanté au fond de l'empreinte. Ces différents relevés mettent en évidence les difficultés rencontrées pour obtenir l'évolution isobare idéale.

Les premiers résultats obtenus, font apparaître une relation simple entre les niveaux de pression et la masse de la pièce injectée.

Certaines des courbes obtenues avec la résine ABS, sont représentées figure 70 :



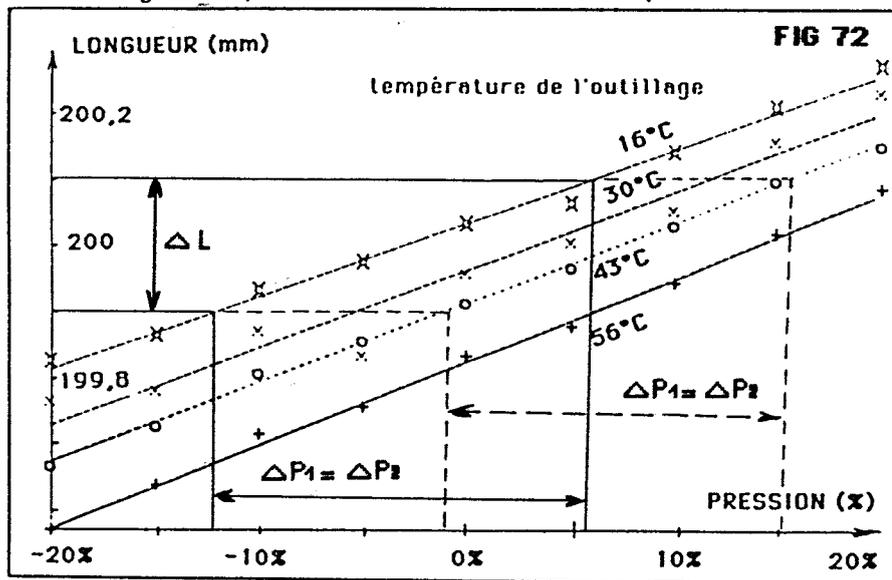
De la même manière, les dimensions de l'éprouvette sont corrélées avec la pression imposée (fig.71) :



Nous avons cumulé les variations de pression et des variations de température d'outillage. Nous obtenons des relations linéaires entre la pression d'une part et la masse, la longueur, la largeur et l'épaisseur de la pièce d'autre part (annexe 7).

Par ailleurs, les lois obtenues, forment un faisceau de droites parallèles. La figure 72 illustre ces observations.

Relation longueur=f(pression) en fonction de la température de l'outillage

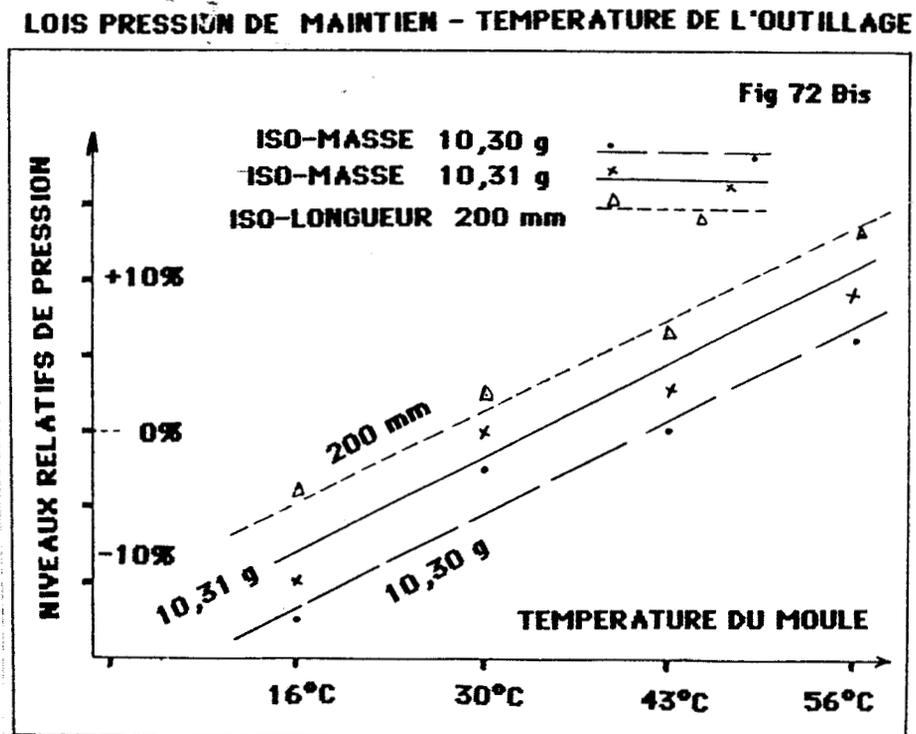


Ce faisceau de droites parallèles permet de définir un modèle de régulation de pression pour obtenir la dimension qui nous intéresse, quelle que soit la température de l'outillage. La pente moyenne des droites représente le facteur de correction de pression qui garantit des dimensions constantes. (Une dérive de longueur  $\Delta l$  est corrigée par une variation de pression relative  $\Delta P_1$  ou  $\Delta P_2$  indépendamment de la température du moule compte tenu du parallélisme des droites). Par conséquent, un contrôle dimensionnel sur une pièce fabriquée permet d'ajuster les niveaux de pression en fonction de la cote qui doit être atteinte. Pour parfaire le dispositif de maintien, il faut associer : un dispositif de commande en boucle fermée qui agit pendant le cycle d'une part, et un système qui ajuste la pression d'un cycle à l'autre d'autre part.

Par ailleurs, nous relevons des variations de dimension faibles dans l'intervalle de pression qui est utilisé. Le polypropylène offre, sur la longueur de la pièce,  $12 \mu\text{m}$  par % de pression.

Le coefficient directeur de cette droite est faible. Il permet d'envisager un contrôle théorique très fin. En effet, les consignes de pression sont assez précises pour établir des variations de longueur inférieures à  $10 \mu\text{m}$ .

La figure 72 bis représente les lois pression de maintien - température obtenues dans des conditions iso-massiques et iso-dimensionnelles.



#### 5.4.2. Influence de la durée du maintien

Cette étude est menée pour deux raisons :

- le souci de limiter les consommations en énergie du groupe d'injection
- la volonté de ménager les unités d'injection et d'augmenter leur durée de vie.

Le système de régulation de la pression du polymère peut entraîner l'utilisation de pressions hydrauliques élevées. En effet, les enregistrements réalisés, mettent en évidence la saturation du groupe hydraulique de la machine.

Ce phénomène est localisé à la fin de la phase de maintien, c'est-à-dire, après le bouchage de la cavité du moule. Nous voulons vérifier la nécessité du pic de pression final d'une part et l'importance de sa durée d'autre part sur la qualité finale de la pièce injectée.

Lors de cette étude, nous dissociions les matériaux amorphes et semi-cristallins dont les comportements sont très différents.

Lorsque la machine d'injection atteint un état de production stabilisé, nous réalisons des pièces avec des temps de maintien variables.

Nous relevons ensuite les caractéristiques massiques et géométriques d'échantillons prélevés par séries de dix unités. Nous étudions différentes empreintes afin de faire varier les conditions géométriques d'injection. Les résultats obtenus sont présentés dans le chapitre qui suit.

##### A) Cas d'un polymère semi-cristallin

Trois expériences ont été réalisées. Dans chaque cas, nous obtenons des courbes caractéristiques :

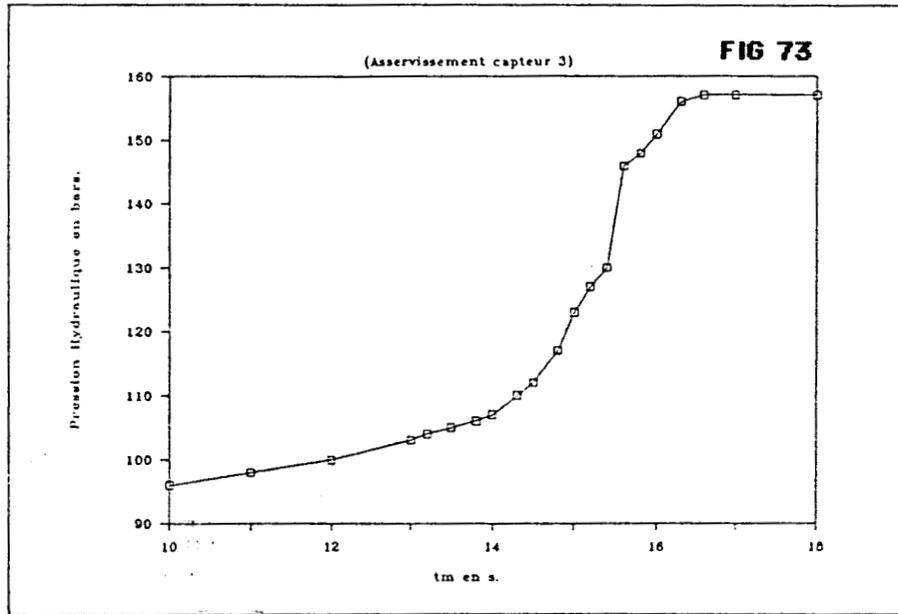
- évolution de la masse de la pièce en fonction de la durée de la phase de maintien
- évolution des facteurs géométriques de la pièce en fonction de la phase de maintien.

Nous relevons des comportements identiques. En effet, les masses et les dimensions des pièces injectées, tendent vers une limite asymptotique, au-delà d'un temps de maintien donné. Ce phénomène est facilement expliqué. Quand le seuil d'injection est solidifié, le flux de résine vers l'empreinte est nul.

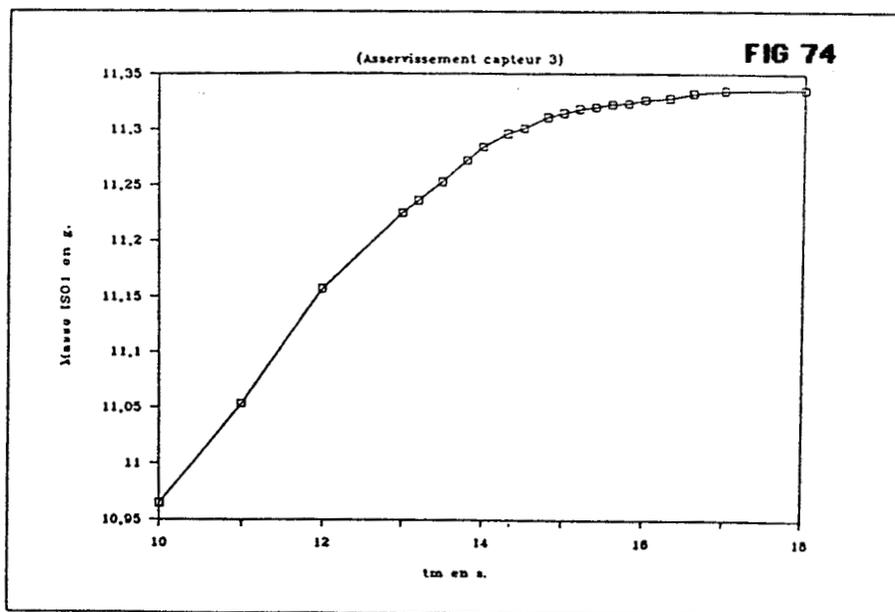
Cette limite asymptotique s'établit à partir d'un temps de maintien pour lequel le groupe hydraulique de la

presse n'a pas donné toute sa puissance. Ce phénomène permet de moins solliciter la machine.

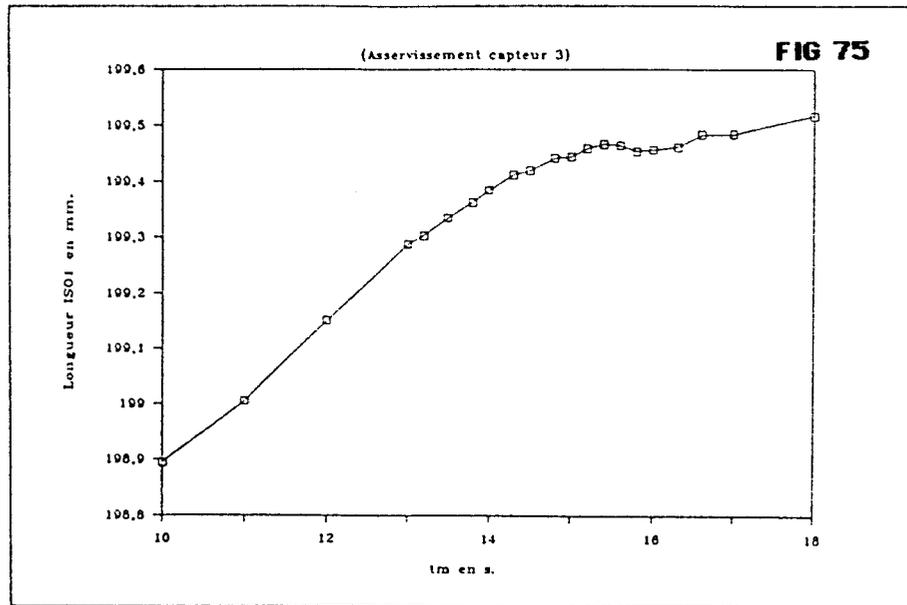
Des résultats ont été obtenus avec une résine du type PP 3050 MN1 de la société APPRYL. Le polymère est injecté à 225°C dans un outillage dont la température est régulée à 30°C. La pression du polymère est entretenue à un niveau de 600 bars pendant la phase quasi-statique d'injection. Cette dernière est déclenchée puis réalisée dans les conditions qui sont propres à notre modèle de pilotage.



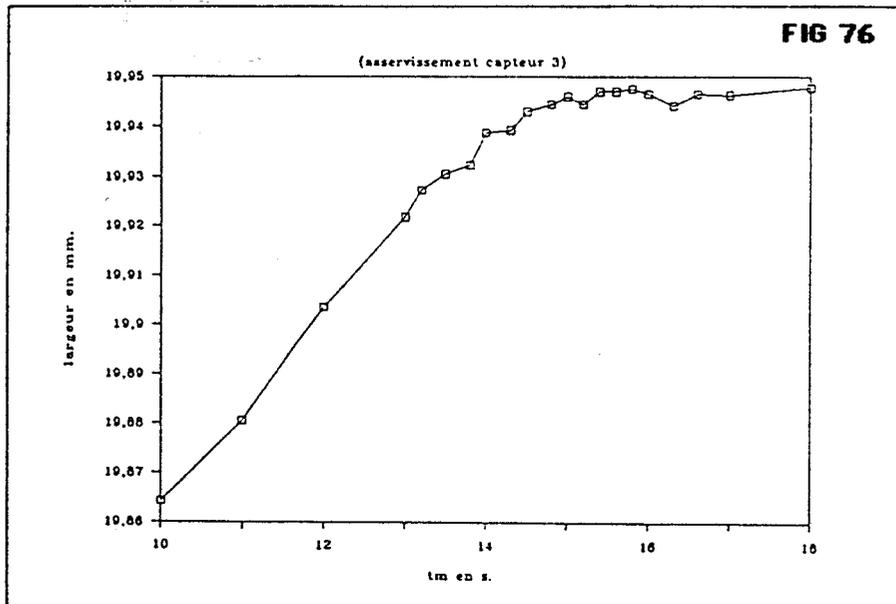
Evolution de la Pression hydraulique en fonction du temps de maintien (fig. 73).



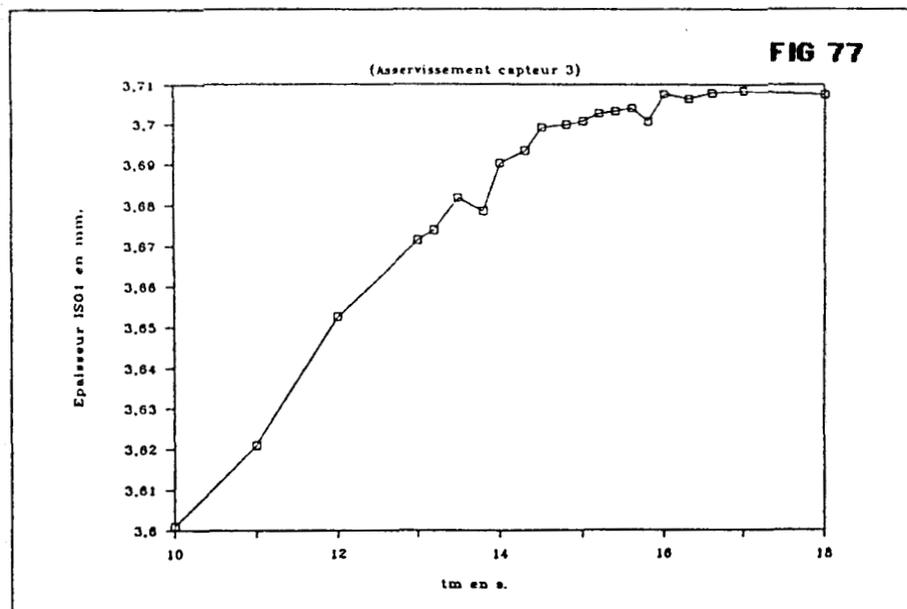
Evolution de la Masse de l'éprouvette ISO 1 en fonction du temps (fig. 74).



Evolution de la Longueur de l'éprouvette ISO 1 en fonction du temps (fig. 75).



Evolution de la Largeur de l'éprouvette ISO 1 en fonction du temps (fig. 76)



Evolution de l'Epaisseur de l'éprouvette ISO 1 en fonction du temps (fig. 77)

A partir d'une durée de maintien en pression de 15 secondes, nous remarquons une saturation en masse de l'éprouvette ISO 1, ainsi qu'en longueur, largeur et épaisseur. La valeur de la pression hydraulique qui est fournie par le groupe d'injection au même instant étant de 125 bars.

Il est donc inutile d'appliquer une consigne de maintien en pression au delà de ce temps. Nous évitons ainsi le pic de pression hydraulique qui atteint la limite du groupe hydraulique : 160 bars, une seconde plus tard.

Dans ce cas particulier, nous pouvons limiter la durée de la phase de maintien. Ce temps optimal reste propre à l'exemple donné. Nous désirons donner la définition d'un critère plus général. En effet, une simple perturbation sur la température de l'outillage rend notre résultat inexploitable. Cette modification affecte le temps de

bouchage de l'empreinte. Un moule plus froid raccourcit ce temps. Le temps de maintien optimal devient lui-même plus court.

Généralisation du temps de maintien optimal pour les polymères semi-cristallins

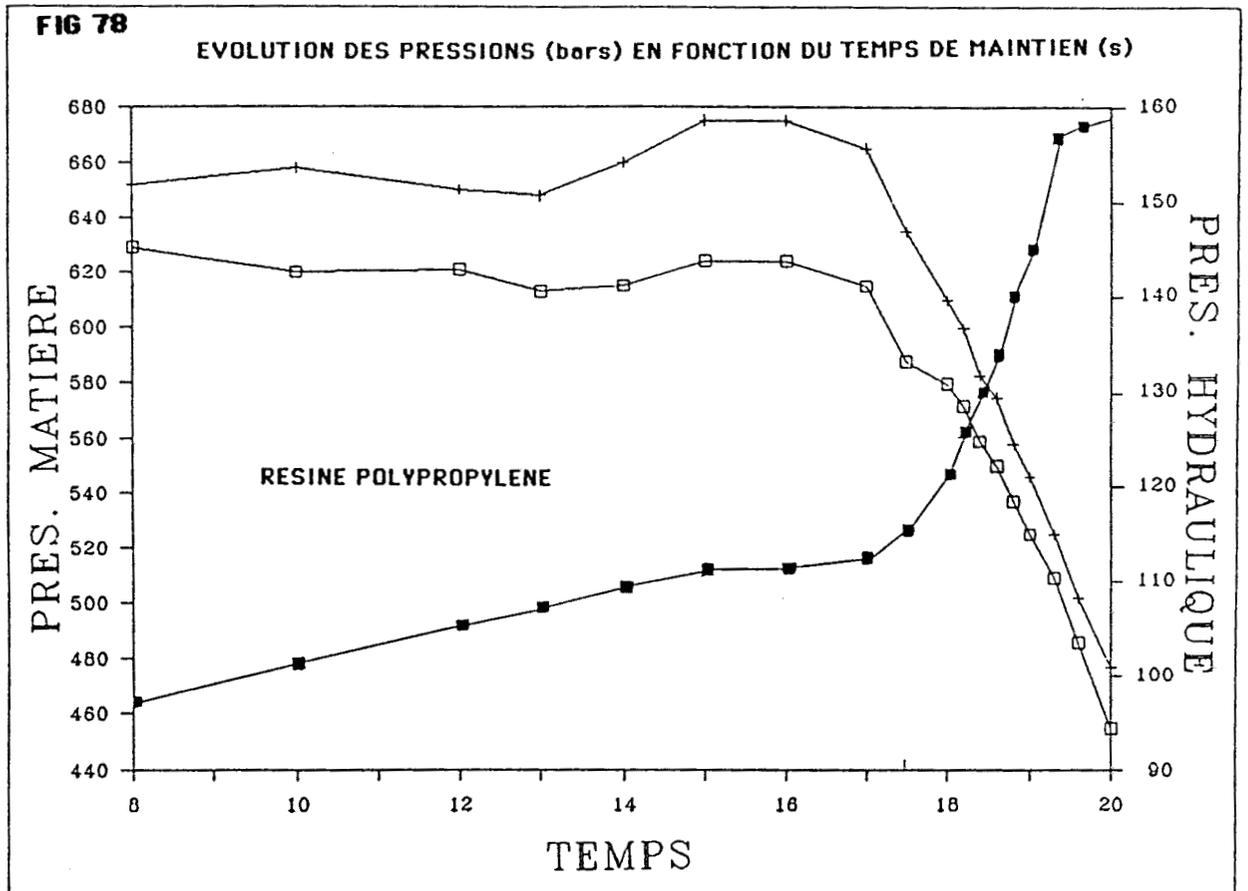
Nous avons défini des temps de maintien optimaux différents avec les essais qui suivent :

\* injection d'une éprouvette ISO 1 en PP 3050 MN1  
APPRYL sous 600 bars et à 225°C : temps optimal  
15 secondes

\* injection d'une éprouvette ISO 1 en PPN 1060 F  
HOECHT sous 550 bars et à 240°C : temps optimal  
18 secondes

\* injection d'une éprouvette VICAT en PP 3050 MN1  
APPRYL sous 600 bars et à 225°C : temps optimal  
16,5 secondes.

Les temps obtenus varient avec les conditions d'injection. Néanmoins, si nous nous intéressons à la pression du polymère dans l'empreinte et au temps optimal, nous observons un phénomène identique dans chaque cas. En effet, la pression du polymère est inférieure d'environ 5 à 8% par rapport à la pression de consigne. Cet écart de pression provient du début de recristallisation du seuil d'injection. La chute de pression s'accroît ensuite très vite. Elle entraîne la réaction de la boucle d'asservissement. Cette réaction est traduite par le pic de pression hydraulique qui apparaît sur la figure 78.



Ainsi nous pouvons définir un nouveau critère d'arrêt de la phase de maintien :

- la phase de maintien en pression doit cesser dès l'apparition d'un écart de valeur entre la consigne de pression affichée et la pression du polymère dans l'empreinte

- l'amplitude de cet écart peut être définie par un certain pourcentage de la valeur de consigne affichée

Dans les cas qui ont été traités expérimentalement, un écart de 10% est suffisant. La recristallisation du seuil d'injection est indiquée par ce phénomène.

Le critère qui est défini, n'intègre plus la notion de temps mais l'état thermodynamique réel du polymère. Par ailleurs, la solution technologique qui permet de le mettre en oeuvre, est très simple et peut coûteuse.

Les polymères semi-cristallins présentent une cinétique de recristallisation qui n'est pas étrangère à la simplicité du principe présenté. En effet, le seuil d'injec-

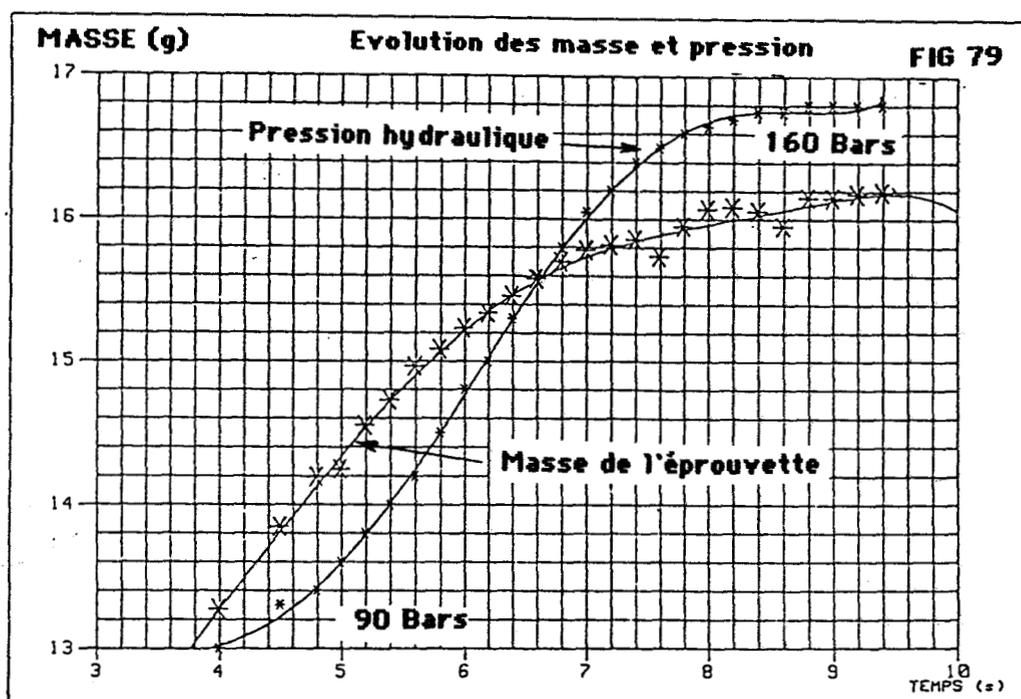
tion se solidifie de manière brutale, dès l'apparition des premiers germes cristallins.

Les polymères amorphes ne se comportent pas de la même façon. Nous montrons dans le paragraphe qui suit, les difficultés rencontrées avec ce type de résine.

### B) Cas d'un polymère amorphe

Nous avons déjà montré la corrélation entre les masses des éprouvettes ISO 1 et leurs dimensions. Nous nous intéressons aux premières afin de mettre en évidence un temps de maintien optimal.

Les variations de la pression hydraulique du groupe d'injection et de la masse de l'éprouvette en fonction du temps de maintien, prennent la forme de la figure 79 :



Nous constatons à nouveau la saturation de la masse de l'éprouvette. Elle apparaît à partir de 9 secondes de maintien.

Néanmoins, cette tendance asymptotique est marquée uniquement quand le groupe d'injection a fourni toute sa puissance. Il n'est donc pas possible de diminuer la durée de la phase de maintien.

Nous sommes obligés de laisser travailler le groupe d'injection jusqu'au maximum de ses capacités. Le critère d'arrêt de la phase de maintien qui a été défini dans le cas précédent, n'est pas utilisable.

Cette différence de comportement provient du caractère amorphe de la résine ABS. En effet, le seuil d'injection de l'outillage qui se solidifie, devient de moins en moins perméable à la poussée hydraulique du groupe d'injection. Cette modification s'établit peu à peu. La viscosité du polymère augmente de manière régulière au cours du refroidissement jusqu'à la phase caoutchoutique. Celle-ci amortit l'effet de la poussée du groupe d'injection dans la cavité mais ne l'annule pas.

### Conclusion sur la durée de la phase de maintien

Les polymères amorphes ne présentent pas l'avantage des résines semi-cristallines pour la recherche d'un temps de maintien optimal.

En outre, les résultats obtenus ne sont pas universels. En effet, la géométrie du seuil d'injection d'une part, la régulation de température dans cette zone d'autre part, jouent un rôle important sur le bouchage de l'empreinte.

Il paraît donc essentiel de faire des essais sur chaque type d'outillage pour déterminer la durée idéale de la phase de maintien. L'implantation d'un capteur de pression près du seuil d'injection facilite cette démarche.

En effet, les indications de ce capteur permettent de savoir si l'empreinte du moule est bouchée. A la fin de la phase de maintien, la pression hydraulique du groupe d'injection chute brutalement. La durée du maintien est correcte si cette décompression brutale ne crée pas de discontinuité sur l'évolution de la pression du polymère qui est proche de l'entrée de la cavité.

A la fin du maintien, les conditions thermiques qui règnent dans le polymère, ne favorisent pas l'écoulement de ce dernier. Néanmoins, la régulation de pression entraîne des flux de résine jusqu'au bouchage de l'empreinte.

Ces écoulements sous haute viscosité, peuvent entraîner l'apparition de contraintes mécaniques dans les pièces. Nous allons étudier le phénomène.

### 5.5. Analyse des contraintes internes dans les pièces

Nous voulons mettre en évidence la présence de contraintes résiduelles dans les pièces injectées.

Ces contraintes internes sont très nocives. En effet, elles se libèrent lorsque la température du polymère dépasse un seuil critique, provoquent des déformations et mettent en cause la qualité dimensionnelle des pièces.

Les seuils thermiques de relaxation sont souvent atteints dans des conditions d'utilisation normales.

Un exemple est connu dans les pièces utilisées dans les automobiles. Une planche de bord placée sous un pare-brise, lui-même exposé au rayonnement solaire, s'échauffe rapidement, la température de surface atteint des niveaux supérieurs à 100°C.

Les chapitres qui suivent, vont :

- dans un premier temps définir les principales sources des contraintes résiduelles dans une pièce injectée
- dans un second temps décrire les méthodes de mesure utilisées pour mesurer ces contraintes
- et enfin présenter les travaux entrepris puis analyser les résultats obtenus.

#### 5.5.1. Origines des contraintes internes

Nous pouvons définir les différentes sources possibles des contraintes internes. Elles sont identifiées de façon exhaustive dans des ouvrages de référence (30) :

- les contraintes internes d'origine mécanique
- les contraintes internes d'origine thermique

Les contraintes internes d'origine mécanique sont créées par les écoulements du polymère dans l'empreinte du moule. Les macromolécules entraînées dans le flux de résine, s'orientent préférentiellement dans le sens de l'écoulement.

Les écoulements s'établissent d'une part au cours de la phase dynamique d'injection, d'autre part pendant la phase de maintien en pression.

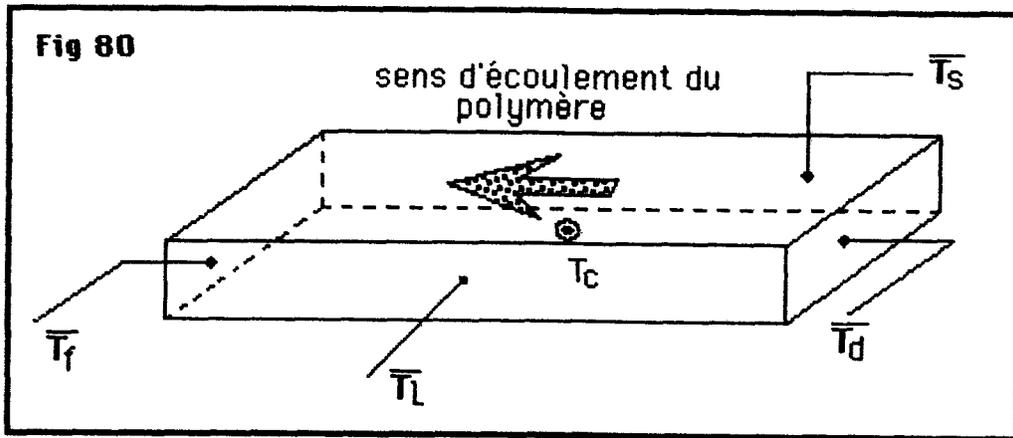
Les orientations créées au cours de la phase de remplissage du moule, se relaxent si la température du polymère permet le mouvement des chaînes macromoléculaires. Les macromolécules cherchent à retrouver une forme stable : la pelote statistique. Néanmoins, les régimes thermiques n'autorisent pas la relaxation complète de ces orientations et une contrainte résiduelle en résulte.

Pendant l'application de la pression de maintien, un certain volume de polymère est transféré dans l'outillage à vitesse et température plus basses créant ainsi un déséquilibre structural donc des tensions internes.

Les contraintes internes d'origine thermique s'établissent au cours des phases de post-remplissage et de refroidissement de la pièce, le refroidissement de la pièce injectée s'effectuant rapidement de façon non homogène.

Le polymère est notamment soumis à des gradients thermiques multidirectionnels. La figure 80 explique simplement ces phénomènes :

FIG. 80 : GRADIENTS DE TEMPERATURE PRESENTS DANS UN ELEMENT RECTANGULAIRE INJECTE



$\bar{T}_F < \bar{T}_d$  avec  $\bar{T}_F$  la température moyenne de la section avant de l'élément

$\bar{T}_d$  la température moyenne de la section arrière de l'élément

$\bar{T}_L < T_c$  avec  $\bar{T}_L$  la température moyenne des sections latérales  
 $T_c$  la température au coeur de l'élément considéré

$\bar{T}_S < T_c$  avec  $\bar{T}_S$  la température moyenne des sections inférieures et supérieures

enfin :  $\bar{T}_S \neq \bar{T}_L$

Les déséquilibres thermiques sont expliqués :

- d'une part, à partir de la différence de température qui règne entre le polymère injecté et l'outillage,

- d'autre part, grâce à la faible conductivité thermique du polymère solidifié au contact direct du moule.

Les gradients thermiques qui sont décrits, créent une dynamique de solidification hétérogène. La résine se solidifie dans un premier temps, à la surface de la pièce et

dans un second temps au coeur de la pièce avec des cinétiques différentes.

Aussi, le coeur de la pièce se refroidit dans un carcan solide. Ce dernier est constitué de la peau qui est déjà solidifiée. Le retrait ne peut pas s'établir. Il y a formation de vacuoles (ou bulles) lorsque la phase de maintien ne compense pas cette perte de volume. Dans le cas contraire, le maintien compense en partie le retrait. Néanmoins, la partie centrale de l'objet injecté reste soumise à des contraintes de traction résiduelles.

Les figures 81 illustrent les différents cas qui sont rencontrés.

FIG. 81 : ETABLISSEMENT DES CONTRAINTES INTERNES AU COURS DU REFROIDISSEMENT DE LA PIÈCE INJECTÉE

Coupe de la pièce à la fin de la phase de remplissage

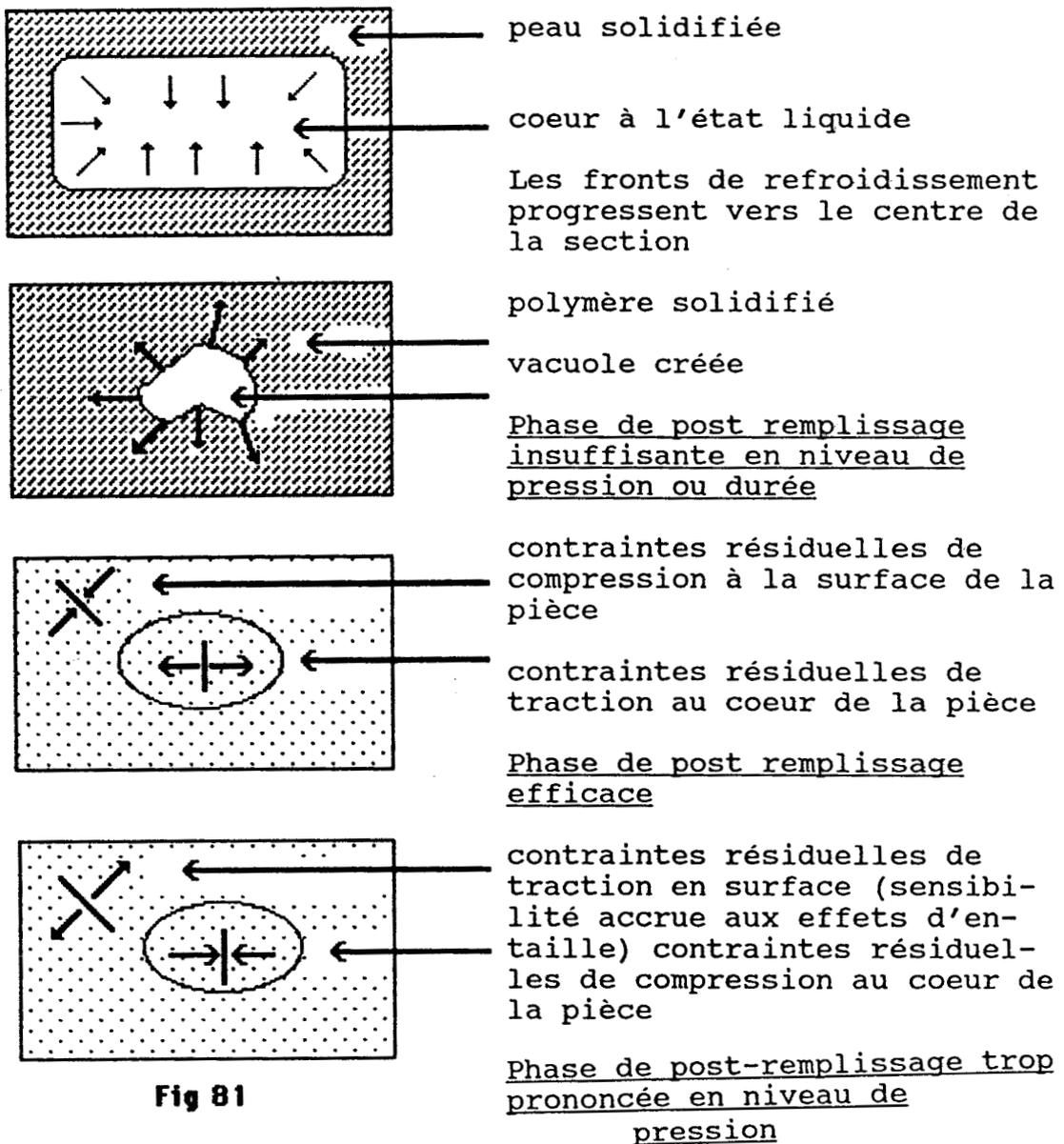


Fig 81

Le dernier exemple présenté est rare. Il correspond à un apport de résine trop important au cours de la phase de post-remplissage. La pièce est "gonflée" de matière.

Des exemples remarquables ont provoqué jusqu'à l'éclatement des pièces après leur sortie du moule.

De nombreux auteurs ont tenté de mesurer les niveaux de contraintes internes. Ces travaux permettent d'associer ces contraintes à leurs causes.

Nous allons présenter les différentes méthodes utilisées.

### 5.5.2. Le problème de la mesure des contraintes internes

Deux classes de mesure sont présentées :

- les méthodes non destructives
- les méthodes destructives

#### Les méthodes non destructives

Ces méthodes sont basées sur l'observation des phénomènes de biréfringence d'un rayon lumineux. Leurs applications sont limitées aux polymères transparents.

#### Les méthodes destructives

Ces méthodes sont nombreuses. Nous développons uniquement les techniques les plus utilisées.

##### a) Méthode de mesure par perçage

Un trou est percé dans l'échantillon. Cet usinage perturbe l'équilibre des contraintes dans la pièce. L'évolution des déformations est enregistrée en fonction de la profondeur de perçage. La difficulté majeure de cette méthode, est de réaliser un usinage sans générer de contraintes additionnelles. (31) (32).

##### b) Méthode par relaxation de contrainte

Cette méthode est basée sur le principe d'une relation entre la cinétique de la relaxation des contraintes et le niveau des contraintes internes. La loi utilisée s'écrit : (33)

$$\frac{\dot{\sigma}}{E} + B \sigma^n = \dot{\epsilon}$$

où

B et n sont des constantes empiriques  
 E le module d'Young du polymère  
 $\sigma$  la contrainte de traction uniaxiale  
 $\epsilon$  la déformation uniaxiale

Les échantillons sont maintenus à une température donnée. L'évolution de leurs dimensions au cours du temps est enregistrée.

Les courbes de relaxation obtenues sont directement corrélées au niveau des contraintes internes présentes dans l'éprouvette.

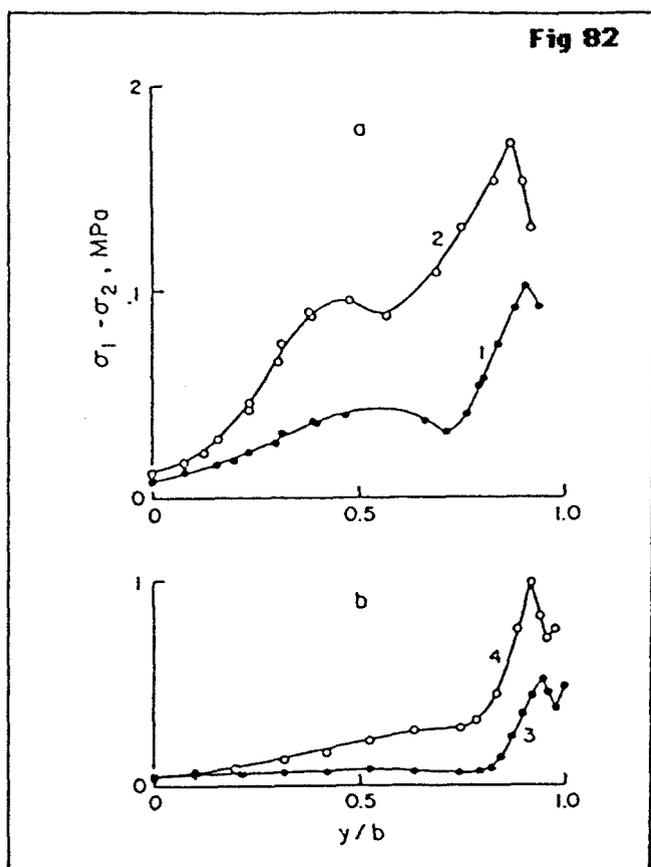
Nos travaux sont basés sur une technique d'analyse qui est très proche de celle-ci.

### c) Méthode par enlèvement de couches minces

Cette méthode est proche du système de mesure par perçage. L'échantillon étudié est pelé. Après chaque enlèvement d'une fine couche, la géométrie de l'éprouvette évolue. Il est possible d'associer une déformation donnée à chaque profondeur de pelage. Cette méthode a été proposée par Treuting et Read (34). Les auteurs enregistrent l'évolution des courbures des échantillons dans deux directions perpendiculaires.

Néanmoins, les mesures de courbures doivent être réalisées rapidement après l'enlèvement d'une couche de polymère. En effet, le fluage de l'éprouvette provoque des erreurs de mesure quand il s'établit.

L'ensemble des méthodes qui sont décrites ci-dessus, permet d'établir la cartographie des contraintes internes dans une pièce injectée. Les résultats prennent parfois l'allure qui suit : (30)



Température du moule :  
60°C

Température de la  
matière :  
courbe1=244°C Vinj élevée  
courbe2=210°C Vinj faible  
courbe3=247°C Vinj moyen  
courbe4=215°C Vinj moyen

$\sigma_1$  contrainte dans le sens // à celui de l'écoulement  
 $\sigma_2$  contrainte dans le sens  $\perp$  à celui de l'écoulement

FIG. 82 : REPARTITION DES CONTRAINTES EN FONCTION DE L'ÉPAISSEUR

Les différentes techniques de mesure présentées sont appliquées au stade du laboratoire. Les méthodes mises en oeuvre, donnent des résultats parfois contradictoires, souvent inexplicables. Les difficultés sont liées à l'interdépendance de nombreux paramètres de transformation.

Des travaux sont encore menés de nos jours afin de mieux corréliser la répartition des contraintes internes avec les réglages de la presse d'injection. (Centre d'Etude et de mise en forme des matériaux à Sophia-Antipolis) (35).

### 5.5.3. Méthode de mesure et de comparaison des contraintes internes utilisée

Notre analyse est située à deux niveaux. Dans un premier temps, nous travaillons sur la pièce complète. Dans un deuxième temps, nous prélevons dans ces pièces des échantillons de taille réduite qui sont ensuite analysés.

### A) Traitements thermiques sur pièces complètes

Nous faisons subir aux éprouvettes ISO 1 des traitements thermiques de relaxation de contrainte. Deux cas sont étudiés. D'une part, les thermoplastiques amorphes (A.B.S Acrylonitrile, Butadiène, Styrène) d'autre part, les résines thermoplastiques semi-cristallines (PP Polypropylène).

Les caractéristiques géométriques des éprouvettes sont relevées après l'injection. Un délai minimum de 7 jours s'écoule entre la fabrication de la pièce et la mesure de ses cotes. Ce retard permet de travailler avec des pièces bien stabilisées. Cette stabilisation est indispensable pour le polypropylène.

La cristallisation de cette résine n'évolue presque plus après 48 heures. Pendant la période d'attente, les pièces sont stockées dans un local à atmosphère contrôlée (23°C, 50% HR). Des essais comparatifs ont permis de constater la constance des cotes entre un relevé effectué 5 jours après injection et un relevé effectué 6 mois après sur les mêmes pièces.

Les pièces injectées sont repérées dès leur sortie du moule. Nous pouvons les identifier sans difficulté. Ainsi, chaque série de cotes correspond à des lots de fabrication connus.

Lorsque les premières mesures sont réalisées, nous plaçons les pièces dans des étuves ventilées. Les recuits effectués ont une durée minimale de 15 heures. Nous associons cette durée d'exposition à des niveaux de température qui dépendent du matériau.

Les couples (temps, température) choisis engendrent un retrait mesuré par dilatométrie.

Les conditions de recuit sont :

- pour la résine PP : 100°C pendant plus de 15 heures
- pour la série ABS : 90°C pendant plus de 15 heures

Les pièces sont ensuite remises à la température ambiante. Après une période d'au moins 48 heures, les mesures des caractéristiques géométriques sont renouvelées. Des comparaisons sont réalisées.

Ces traitements thermiques sont faits sur des lots d'échantillons variés fonctions :

- de la résine utilisée (ABS, PP)
- de système de commande de la phase de maintien
- de la température de la résine
- de la température de l'outillage
- du niveau de pression de maintien
- du mode de remplissage de l'empreinte.

Ces essais permettent de travailler dans de bonnes conditions compte tenu de la rapidité avec laquelle ils peuvent être exécutés. En effet, les lots d'éprouvettes sont entièrement placés dans la même étuve. Les pièces subissent exactement le même traitement. Néanmoins, ces mesures métrologiques ne sont pas simples. Les montages utilisés sont décrits à l'aide des photographies placées en annexe (4).

La répétabilité des mesures est assurée par la robustesse des éléments qui composent les différents dispositifs de contrôle dimensionnel d'une part et la qualité des appareils de mesure d'autre part.

En effet, le retrait entraîne des variations de dimension très faibles. L'utilisation d'appareils de précision est indispensable. Nous utilisons des micromètres électroniques dont la précision de lecture est de 1 micron.

Des manipulations successives sont réalisées sur une même pièce. Elles nous ont permis d'effectuer les mesures avec une précision de 4 microns. La dureté superficielle des pièces affecte considérablement cette valeur. Des essais équivalents réalisés avec une cale en acier, nous permettent d'atteindre une précision de 1 micron.

Ces valeurs permettent donc de valider nos observations. Les essais de dilatométrie sont réalisés avec un appareil encore plus performant.

#### B) Traitements thermiques sur des éprouvettes

Le traitement thermique appliqué sur les échantillons, est différent de celui qui précède. Il se décompose en trois phases successives :

- une montée en température de la température ambiante (23°C) à 105°C pour la résine ABS, à 150°C pour la résine PP.

- une isotherme de plusieurs heures à la température atteinte à la fin de la phase qui précède

- un refroidissement de la température du palier à la température ambiante avec des durées variables d'une campagne d'essais à une autre. En effet, cette phase n'est pas essentielle.

La manipulation est réalisée avec un dilatomètre linéaire de la marque ADAMEL-LHOMARGY. L'échantillon est extrait du coeur de l'éprouvette normalisée ISO1. Il est de forme parallélépipédique avec une section de  $2 \times 2 \text{ mm}^2$  et une longueur comprise entre 10 et 20 mm. Le barreau est usiné dans l'éprouvette à l'aide d'une fraiseuse. Les vitesses de coupe de l'outil et les profondeurs des passes d'usinage sont choisies pour limiter l'échauffement du polymère.

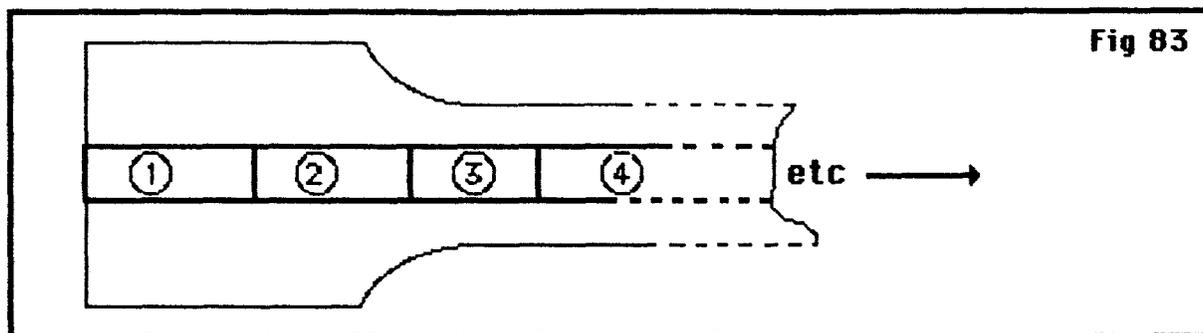
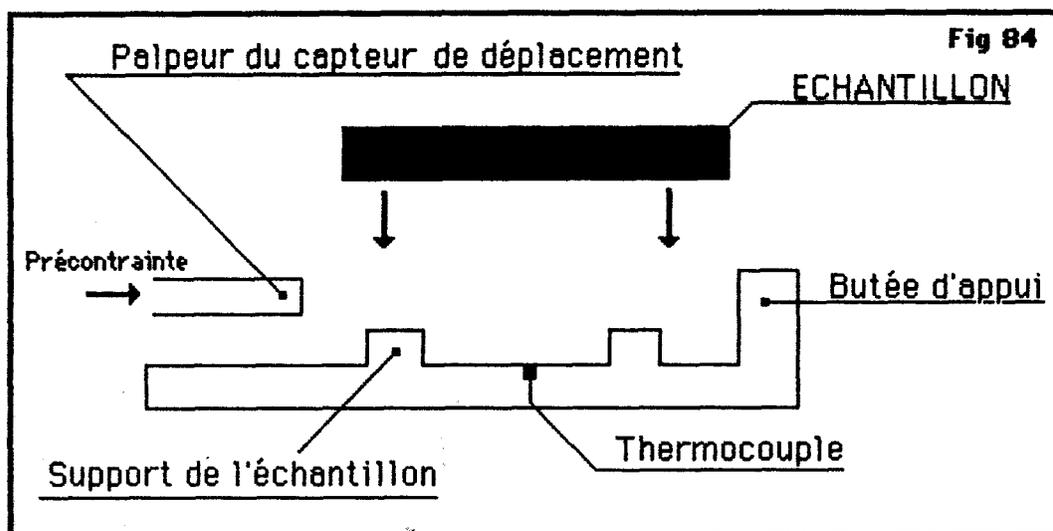


FIG. 83 : POSITION DES ECHANTILLONS QUI SONT EXTRAITS DES EPROUVETTES

Neuf à dix échantillons sont usinés dans chaque éprouvette.

Le dilatomètre est composé d'un support d'échantillon placé dans un four. Le barreau analysé est mis en butée sur une face. Le palpeur d'un capteur de déplacement est placé sur la face opposée à la première.

Le montage a l'allure de la figure 84 :



Une précontrainte de serrage est appliquée sur l'échantillon. Elle permet de bien plaquer le barreau sur la butée d'appui. Cette précontrainte est gardée constante pour tous les essais. Au cours de la montée en température, puis du maintien de celle-ci, le capteur de déplacement permet d'enregistrer les déformations de l'échantillon. Les résultats d'un essai peuvent correspondre à trois types de données :

- déplacement en fonction de la température de l'échantillon (phase de montée en température)

- déplacement en fonction du temps (phase de maintien à température constante)

- déplacement en fonction de la température de l'échantillon (phase de retour à la température ambiante).

Les différents déplacements sont ramenés à des valeurs relatives par rapport à la longueur initiale du barreau de polymère. Leurs dérivées par rapport à la température d'une part et au temps d'autre part sont également analysées.

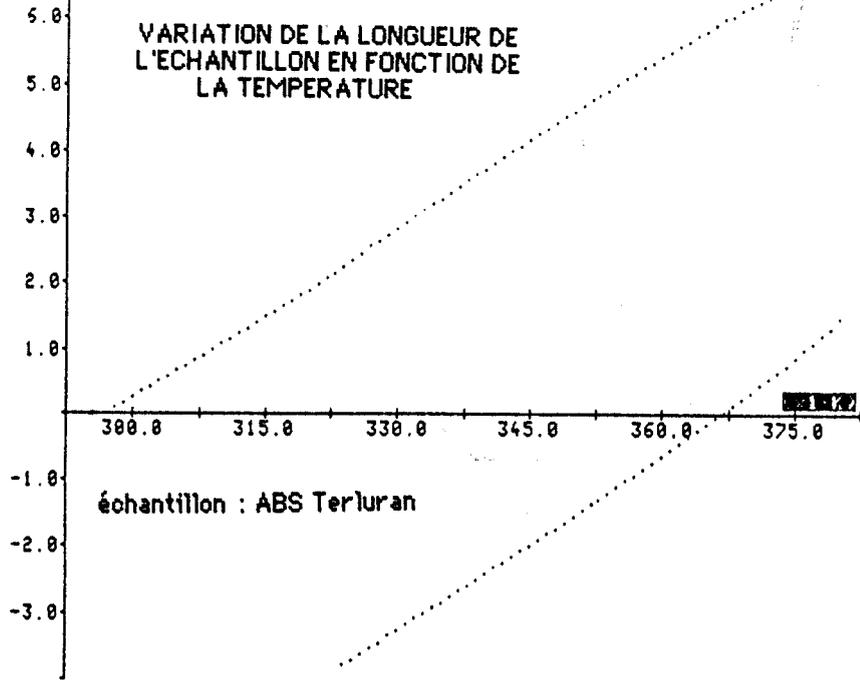
Les courbes obtenues sont présentées sur la figure 85.

dL/Lo=f(t)

FIC.MES.: ABS0%17  
NON CORRIGE

CODE:000170  
Lo = 252

08 Aug 1988

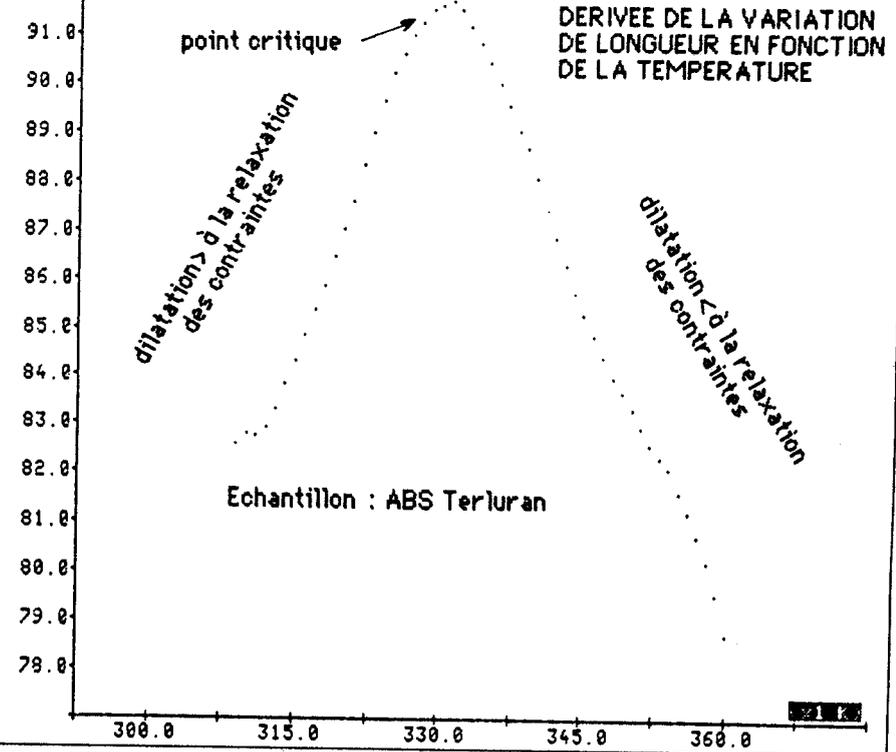


d(dL/Lo)/dt

FIC.MES.: ABS0%17  
NON CORRIGE

n = 25  
CODE:000170  
Lo = 252

08 Aug 1988

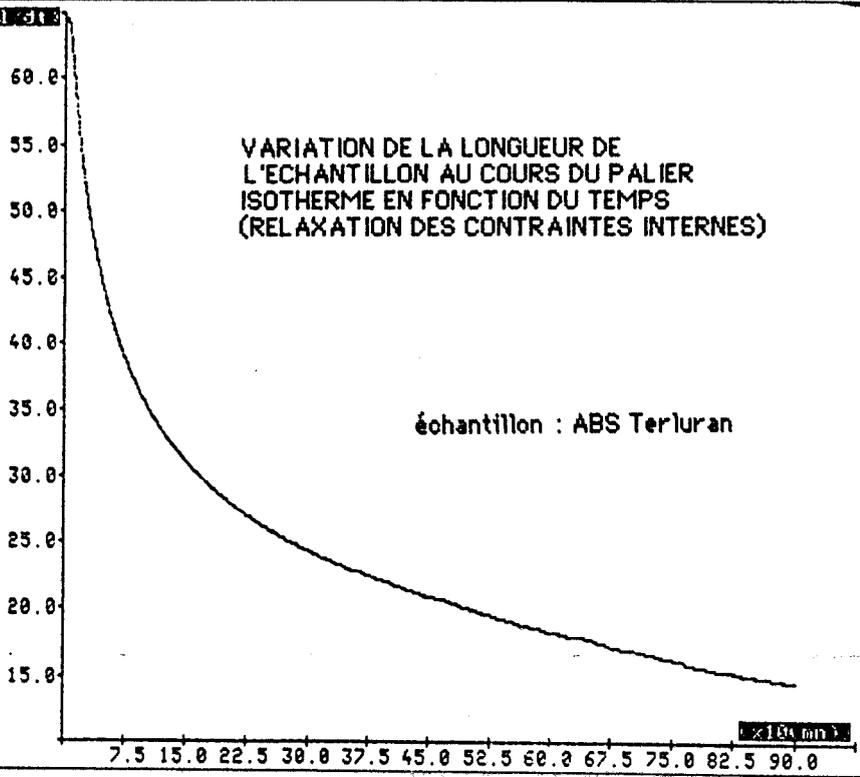


dL/Lo=f(t)

FIC.MES.: ABS0%17  
NON CORRIGE

CODE:000170  
Lo = 252

08 Aug 1988



d(dL/Lo)/dt

FIC.MES.: ABS0%17  
NON CORRIGE

n = 25  
CODE:000170  
Lo = 252

08 Aug 1988

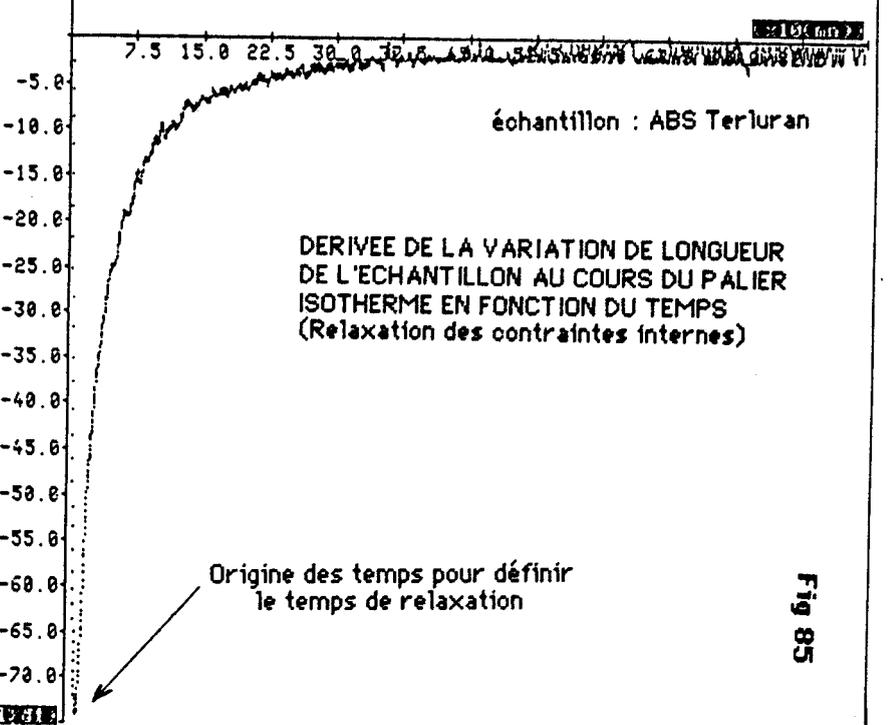


Fig 85

Les différentes courbes mettent en évidence plusieurs phénomènes. La représentation de la longueur de l'échantillon en fonction de la température présente une discontinuité au niveau de la température finale de la rampe. Cette discontinuité est due à la rétraction de l'échantillon pendant l'isotherme. Elle correspond à une droite verticale qui descend. Cette contraction est mise en évidence avec la seconde courbe. La dérivée par rapport à la température de l'allongement relatif de l'échantillon  $(d(dL/L_0)/d\theta)$  présente une allure intéressante. En effet, une variation brutale apparaît à une température proche de 60°C pour la résine ABS, 80°C pour la résine PP. Cette inversion de pente traduit une diminution soudaine du coefficient de dilatation du polymère.

Ce phénomène peut être relié à la présence de contraintes internes. Ces contraintes sont figées en-deçà d'une certaine température. Ainsi, au-delà de cette température critique, elles s'opposent à la dilatation thermique : ce qui explique les variations mesurées.

Le comportement du matériau, pendant un régime isotherme, est aussi intéressant. En effet, les niveaux de température sont choisis bien au-delà des températures critiques qui sont décelées pendant la première partie du traitement thermique. Néanmoins, nous travaillons en-dessous de la température de transition vitreuse de la résine ABS (110°C) et dans une zone éloignée de la température de fusion du PP (170°C).

Ces températures portent une désignation différente car elles sont attachées à des polymères de structure amorphe d'une part, et cristalline d'autre part. Elles représentent des seuils énergétiques fondamentaux. En effet, au-delà de ces températures, la mobilité macromoléculaire est importante. Elle est suffisante pour permettre la relaxation des orientations macromoléculaires créées pendant l'écoulement et assurer la recouvrance élastique du polymère.

Cette relaxation se superpose à celle des contraintes internes que nous étudions (cf le chapitre sur les origines des contraintes internes). Ainsi, les températures choisies doivent permettre de séparer au moins en partie les deux phénomènes.

Les contraintes internes ne se relaxent pas de façon instantanée. Nous étudions la dynamique de ce phénomène dans les conditions définies ci-dessous :

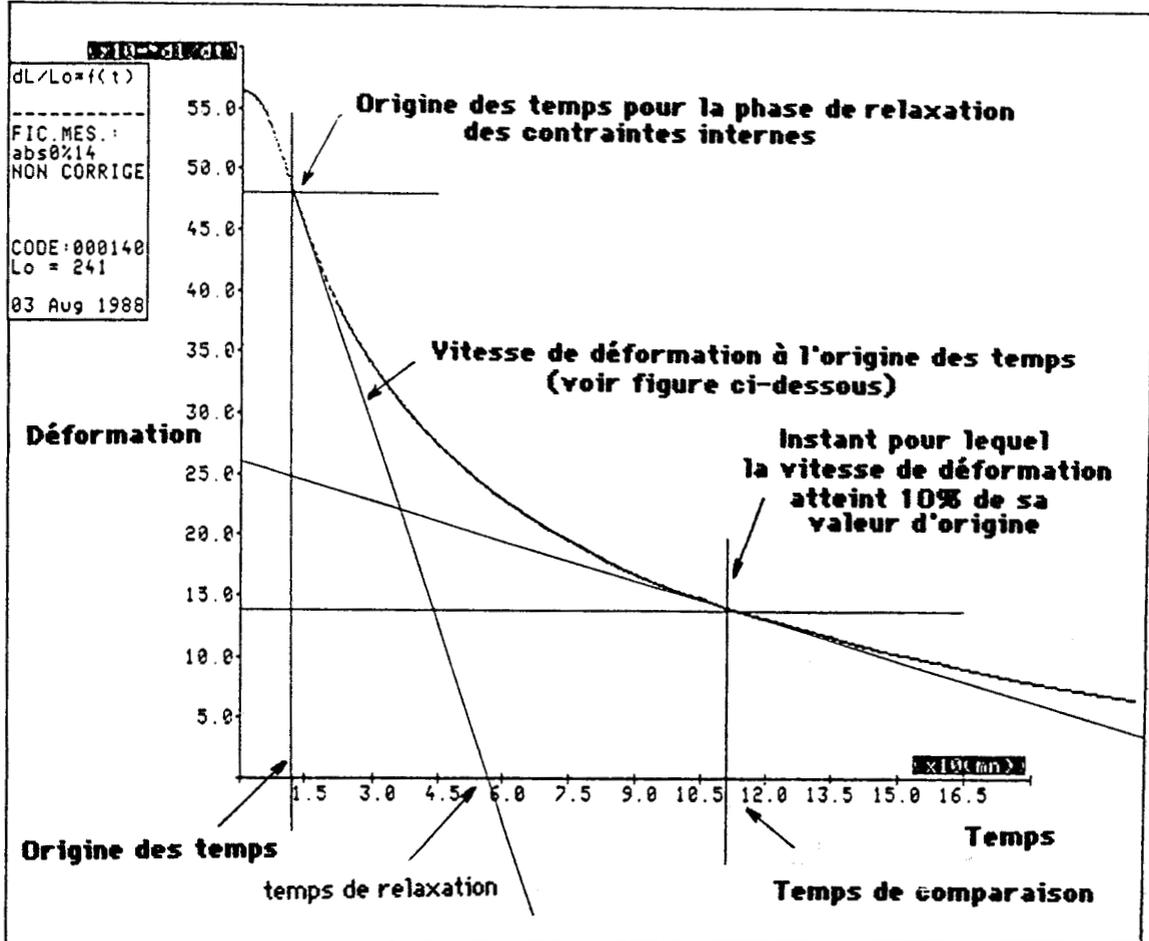
- l'origine des temps choisie, correspond au maximum de la vitesse de relaxation

- le temps de réponse moyen du système qui se relaxe, est calculé à l'intersection de l'axe des abscisses avec la pente de la courbe de relaxation à l'origine des temps définis ci-dessus.

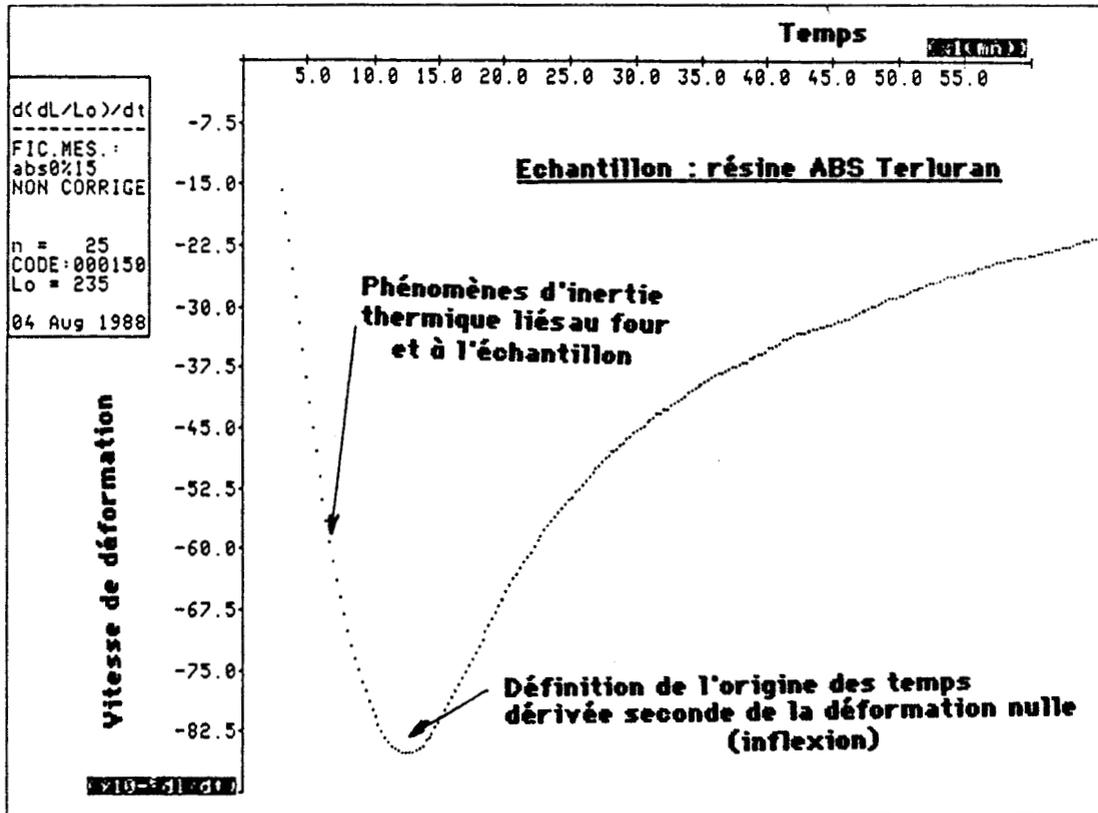
- nous prenons en considération le temps qui est nécessaire pour atteindre 10% de la vitesse de relaxation initiale, seuil considéré comme l'amorce d'un régime stable.

La figure 86 illustre ces définitions. La nouvelle origine des temps choisie est indispensable. En effet, elle permet de nous affranchir des phénomènes d'inertie thermique de l'échantillon étudié.

**Essais dilatométriques**



**Variation de longueur au cours d'une isotherme**



**Dérivée de la variation de longueur au cours d'une isotherme**

#### 5.5.4. Présentation des résultats

##### A) Résultats obtenus après les recuits sur pièce

Dans chaque cas étudié, nous avons travaillé avec cinq éprouvettes. Tous les cycles standards d'injection ont été étudiés avec cette méthode de caractérisation. Nous observons des comportements identiques d'un lot d'éprouvettes à un autre.

Nous présentons une série de résultats afin de donner un exemple. Nous concluons de manière plus générale sur l'intérêt de ces essais.

##### Exemple de résultats

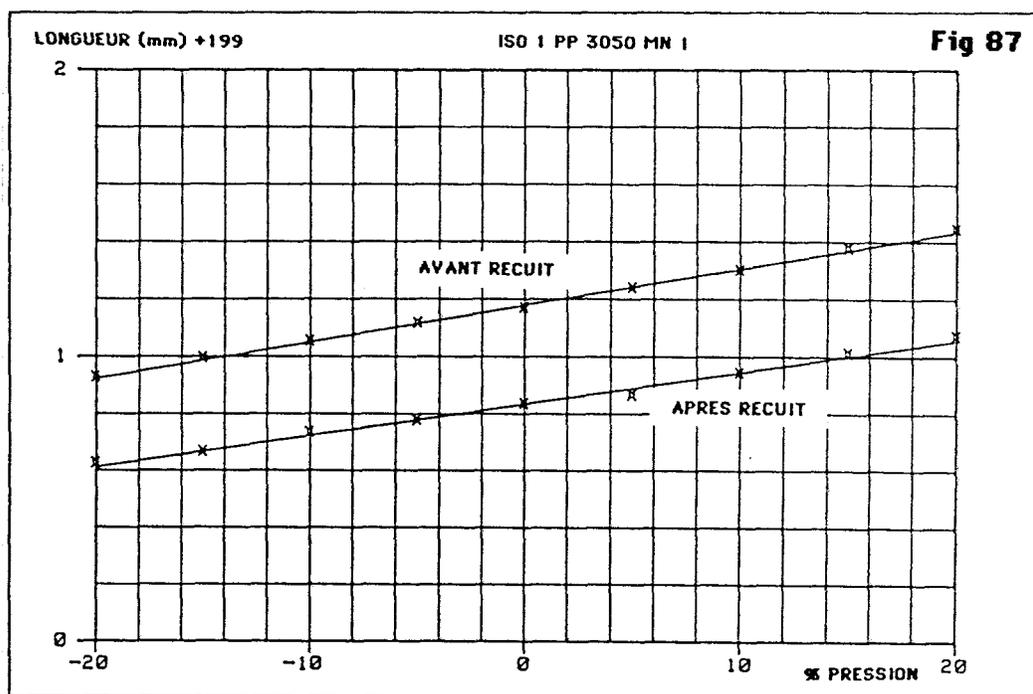
Les résultats sont obtenus avec la résine polypropylène 3050 MN1. Les dimensions qui sont prises en compte, sont celles de l'éprouvette ISO 1 injectée par ses deux extrémités. Ainsi, une ligne de soudure est présente au milieu de la pièce. Cette particularité n'affecte pas le caractère général de cette manipulation définie à partir des caractéristiques qui suivent : l'outillage est régulé thermiquement à une température de 16°C. Le cycle standard (0%) correspond à une phase de maintien en pression à 600 bars. Le déclenche-ment en phase de maintien est réalisé à partir d'un seuil de pression de 375 bars sur un des deux capteurs de pression qui sont implantés dans l'empreinte de l'ISO 1. La phase de main-tien est effectuée en boucle fermée sur la pression du polymère dans la cavité du moule. Elle dure 20 secondes.

Nous présentons successivement les évolutions de la longueur, la largeur et l'épaisseur de l'éprouvette ISO 1.

##### Longueur de l'ISO 1

Niveaux de pression	-20%	-15%	-10%	-5%	0	5%	10%	15%	20%
Longueur moyenne (mm) avant recuit (5 éprouvettes) (+199mm)	0,623	0,663	0,732	0,775	0,833	0,864	0,942	1,010	1,072
Ecart type (en $\mu\text{m}$ )	8	12	21	6	30	34	21	31	28
Longueur moyenne (mm) après recuit (5 éprouvettes) (+198 mm)	0,925	0,993	1,051	1,114	1,168	1,237	1,299	1,375	1,443
Ecart type (en $\mu\text{m}$ )	3	4	12	3	1	4	5	3	1
Retrait relatif dû au recuit (%)	0,35	0,34	0,34	0,33	0,33	0,31	0,32	0,32	0,31

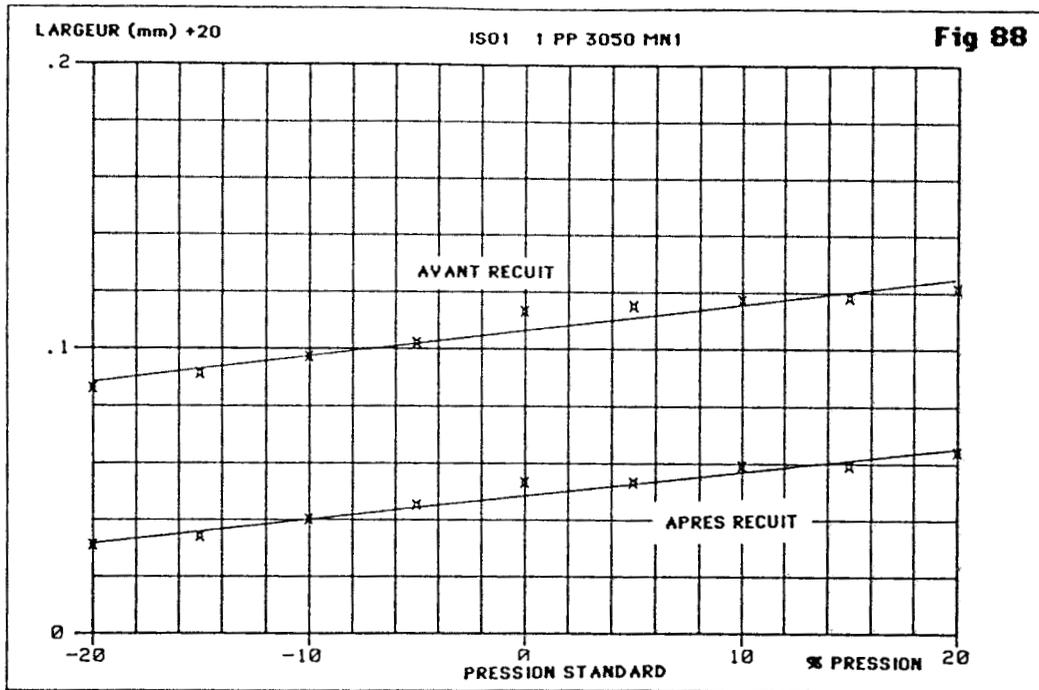
## Représentation graphique (fig. 87)



## Largeur de l'ISO 1

Niveaux de pression	-20%	-15%	-10%	-5%	0	5%	10%	15%	20%
Largeur moyenne (mm) avant recuit (5 éprouvettes) (+20mm)	0,086	0,091	0,097	0,102	0,113	0,115	0,117	0,118	0,121
Ecart type (en $\mu\text{m}$ )	17	5	4	3	4	6	4	2	3
Largeur moyenne (mm) après recuit (5 éprouvettes)	0,031	0,034	0,040	0,045	0,053	0,053	0,059	0,059	0,064
Ecart type (en $\mu\text{m}$ )	4	5	3	2	4	4	4	7	10
Retrait relatif dû au recuit (%)	0,27	0,28	0,28	0,28	0,30	0,31	0,29	0,29	0,28

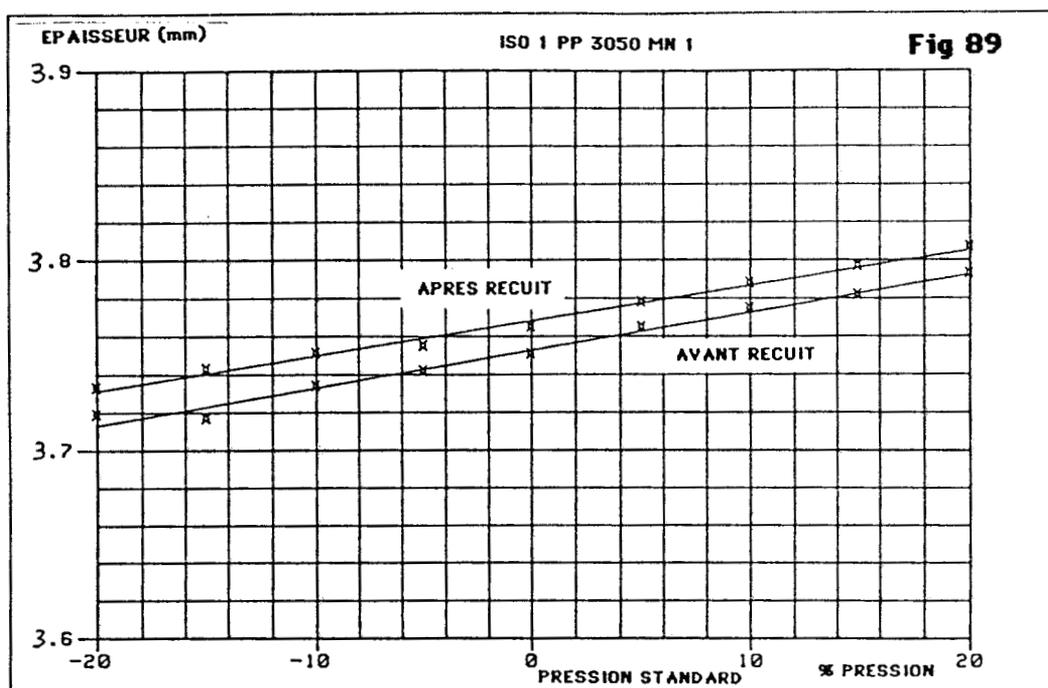
## Représentation graphique (fig. 88)



Epaisseur de l'ISO 1

Niveaux de pression	-20%	-15%	-10%	-5%	0	5%	10%	15%	20%
Epaisseur moyenne (mm) avant recuit (5 éprouvettes)	3,719	3,717	3,734	3,742	3,751	3,765	3,775	3,782	3,793
Ecart type (en $\mu\text{m}$ )	4	2	3	<1	2	1	2	2	2
Epaisseur moyenne (mm) après recuit (5 éprouvettes)	3,733	3,743	3,751	3,755	3,765	3,778	3,788	3,797	3,807
Ecart type (en $\mu\text{m}$ )	6	2	1	2	1	1	2	3	1
Retrait relatif dû au recuit (%)	-0,37	-0,43	-0,45	-0,35	-0,37	-0,35	-0,34	-0,40	-0,37

Représentation graphique (fig. 89)



Nous remarquons deux phénomènes intéressants :

- l'indépendance du retrait relatif par rapport au niveau de la pression de maintien d'une part,
- le comportement hétérogène de la pièce en fonction de la dimension mesurée d'autre part

La première observation est étonnante. En effet, une pression de maintien élevée entraîne un transfert d'une quantité importante de résine vers l'empreinte du moule. Néanmoins, ce phénomène n'affecte pas le taux de retrait de la pièce. Il peut s'agir de tensions d'orientation non sensibles au champ de température étudié.

Nous confirmerons ces résultats à l'aide des essais de dilatométrie.

La seconde observation provient des phénomènes contradictoires qui sont mis en évidence : un rétrécissement des longueurs et largeurs de l'éprouvette accompagné d'une augmentation de l'épaisseur. L'interprétation de ce phénomène n'est pas simple. Cependant, nous pouvons comparer nos résultats à ceux qui ont été obtenus par l'IKV d'Aix-la-Chapelle en 1988.

Le travail est basé sur des mesures de dilatation thermique d'une plaque injectée en polypropylène. L'objectif est de valider un modèle mathématique qui fait une estimation de l'anisotropie du retrait dans une pièce injectée.

Les trois directions principales de la pièce sont explorées. Les résultats sont résumés à travers les trois courbes de la figure 90.

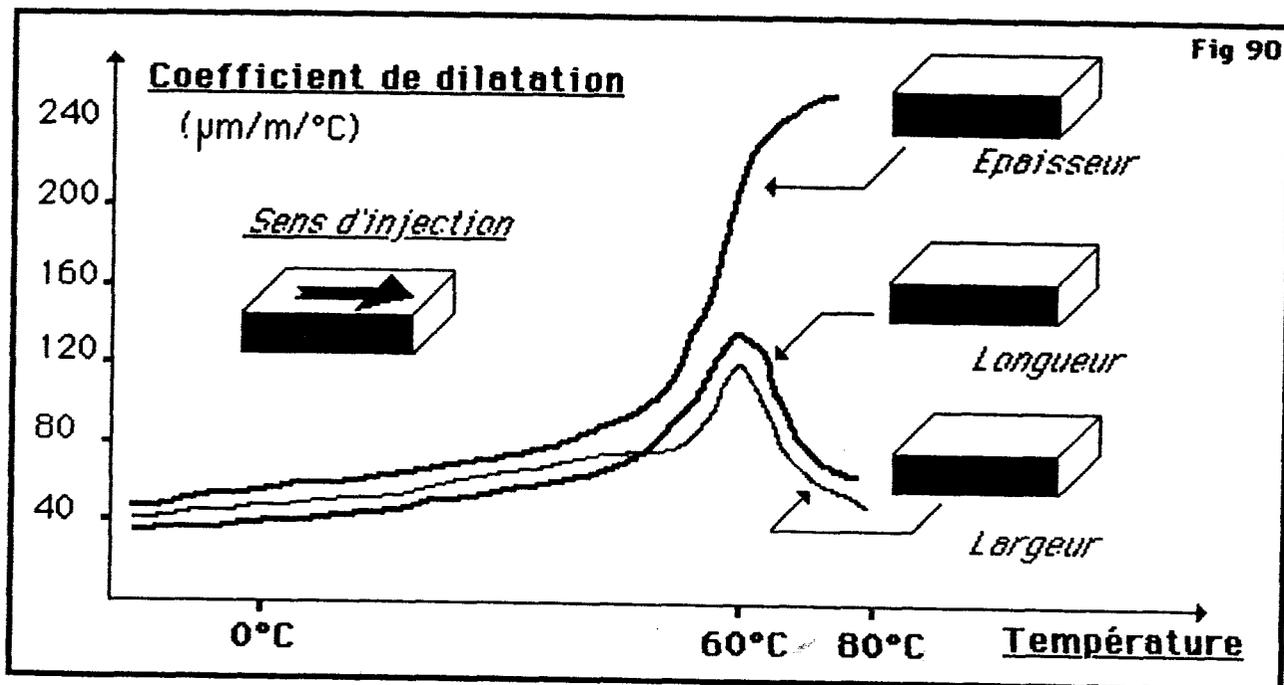


FIG. 90 EVOLUTION DU COEFFICIENT DE DILATATION EN FONCTION DE LA TEMPERATURE ET DE LA DIRECTION DE MESURE

La température maximale des essais est de  $90^\circ\text{C}$  avec une vitesse de montée en température de  $10^\circ\text{C}/\text{mn}$ . Les coefficients de dilatation qui sont mesurés sur la longueur et la largeur de l'échantillon, présentent une inversion de tendance vers  $60^\circ\text{C}$ . Cette diminution correspond à la relaxation des contraintes internes. Nous confirmerons ces observations.

La chute du coefficient de dilatation est plus importante dans le sens de l'injection (longueur). A l'inverse, le matériau réagit de façon différente dans le sens de l'épaisseur de la pièce. En effet, le coefficient de dilatation croît sans cesse. La relaxation des contraintes internes provoque une dilatation. Celle-ci s'ajoute à celle qui provient du régime thermique imposé à l'échantillon.

La comparaison des coefficients de dilatation et de leur évolution confirme nos observations : c'est-à-dire une

anisotropie du retrait après recuit. Dans l'exemple présenté nous relevons les valeurs moyennes du retrait qui suivent :

- + 0,32 % dans le sens de la longueur
- + 0,28 % dans le sens de la largeur
- 0,38 % dans le sens de l'épaisseur.

Nous constatons une très bonne corrélation entre ces valeurs de retrait d'une part et les valeurs des vitesses de relaxation qui sont obtenues par l'IKV au delà de la température critique de 60°C d'autre part.

La campagne d'essais réalisée par l'IKV est aussi basée sur des paramètres de transformation variables (température du moule, température de la résine, pression hydraulique de maintien, vitesse d'injection). Les résultats obtenus avec des pressions hydrauliques variables au cours de la phase de maintien, sont intéressants. En effet, les niveaux de pression hydraulique n'influencent pas le comportement en dilatation de l'échantillon.

Ainsi, nous observons des valeurs de retrait très peu variables dans le champ de pression de maintien étudié avec des techniques d'ailleurs différentes :

- pour l'IKV : contrôle de la pression hydraulique pendant la phase de maintien
- pour notre étude : contrôle de la pression du polymère pendant la phase de maintien.

Ce qui généralise la conclusion sur la stabilité dimensionnelle indépendante du niveau de pression. Nous pourrions donc utiliser la pression pour atteindre des objectifs géométriques sans modifier le taux des contraintes qui sont présentes dans la pièce, au moins dans les conditions expérimentales de l'étude.

Un contrôle identique est réalisé sur des éprouvettes injectées en résine ABS. Elles présentent le même comportement. Le retrait longitudinal est constant, quel que soit le niveau de pression imposé. Il atteint 0,13%. Cette valeur est inférieure à celle qui est obtenue avec le polypropylène. Ceci est dû à la structure amorphe de l'ABS.

## B) Résultats obtenus au cours des essais de dilatométrie

### a) Essais préliminaires sur la résine ABS

Nous avons fabriqué plusieurs lots d'éprouvettes dans les conditions suivantes :

- Une pression de maintien hydraulique de 90 bars pendant une durée de 9,5 secondes (cycle de référence déjà présenté)
- Une pression de maintien nulle

- Une pression de maintien nulle et un recuit de 90 heures à 70°C. Ce traitement permet de libérer en partie les contraintes internes auxquelles nous nous intéressons.

### Dilatométrie en régime de température croissante

L'étude de la phase de montée en température permet de caractériser chaque type d'éprouvette. Les résultats obtenus (la figure 91) montrent le comportement différent des échantillons qui proviennent des différents lots.

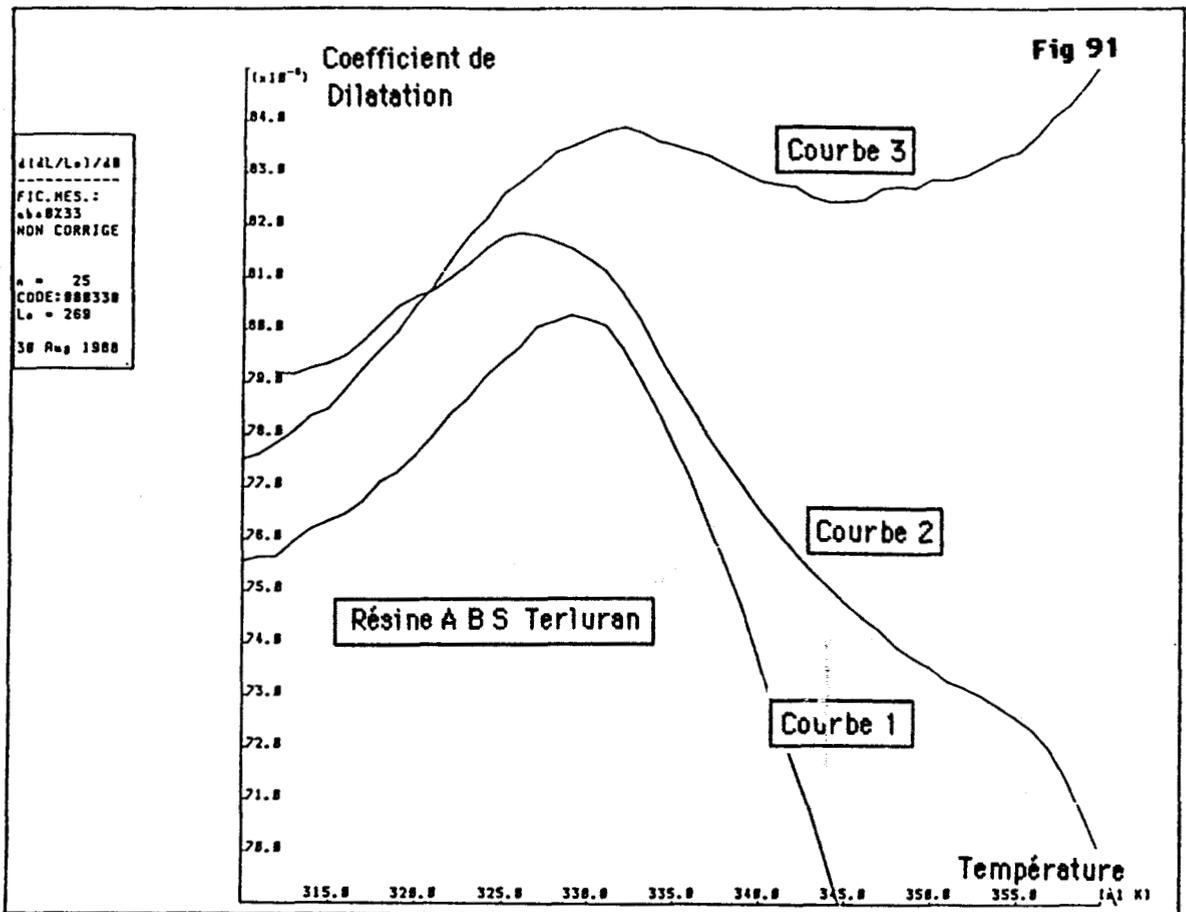


FIG. 91 : EVOLUTION DE LA DILATATION (COEFFICIENT DE DILATATION) EN FONCTION DE LA TEMPERATURE DE L'ECHANTILLON

Nous nous intéressons à la pièce qui présente, a priori, le taux de contraintes internes le plus élevé. Nous tenons compte des paramètres qui régissent la phase de maintien en pression. Son coefficient de dilatation apparent chute rapidement et sans discontinuité. Cette diminution brutale de la vitesse de dilatation apparaît au-delà de 57°C.

Les contraintes internes s'opposent à la dilatation de l'échantillon avant même d'atteindre cette température critique. Ce phénomène est illustré par le coefficient de dilatation maximal qui est atteint dans chaque cas. Ce maximum décroît avec le niveau des contraintes internes supposées présentes dans l'échantillon.

La cinétique de la déformation de l'échantillon est différente dans le second cas étudié. En effet, une pression de maintien nulle entraîne une évolution moins brutale du coefficient de dilatation. La courbe obtenue est caractérisée par un ralentissement des phénomènes de rétraction jusqu'à une température de 87°C.

Enfin, la pièce soumise à un traitement thermique, donne un spectre de dilatométrie fort différent des deux premiers. Le coefficient de dilatation présente un palier entre 60 et 90°C. Au delà de la dernière température, la vitesse de dilatation reprend une allure traditionnelle.

Un essai conventionnel de dilatation avec suivi du coefficient apparent de dilatation en fonction de la température permet donc de caractériser les échantillons en fonction de leur histoire thermomécanique.

#### Dilatométrie en phase isotherme

Les résultats obtenus sont rassemblés dans ce tableau (valeurs moyennes pour quatre essais minimum)

Désignation de la valeur mesurée ou calculée	Définition du lot d'échantillon		
	Pmaintien normale	Pmaintien nulle	Pmaintien nulle+recuit
Vitesse de relaxation maximale ( $\frac{d}{dt} \left( \frac{dL}{L_0} \right)_{\text{mini}} \times 10^{-6} \text{ (s}^{-1}\text{)})$	116	80	16
Temps de relaxation $\tau$ (mn)	61'38"	76'59"	503'
Décalage de l'origine des temps par rapport au début de l'isotherme (mn)	11'05"	12'30"	42'20"
$dL/L_0$ à l'origine des temps ( $\times 10^{-5}$ )	521	495	662
Durée écoulée pour atteindre 10% de la vitesse de relaxation maximale (mn)	115'30"	137'10"	328'15"
$dL/L_0$ au temps ci-dessus ( $\times 10^{-5}$ )	164	203	470
Amplitude de relaxation $dL/L_0$ à l'origine des temps - $dL/L_0$ ci-dessus ( $\times 10^{-5}$ )	357	292	192

Ces valeurs sont cohérentes. En effet, les pièces qui contiennent un taux important de contraintes internes, sont susceptibles de relaxer ces dernières avec davantage d'importance. Aussi, cela se traduit par des vitesses de relaxation maximales plus rapides d'une part, et des ampli-

tudes de relaxation (entre 100% et 10% de la valeur initiale de  $dL/L_0$ ) plus importante.

Par ailleurs, les décalages de l'origine des temps sont expliqués de façon simple. Un taux de contrainte élevé s'oppose plus rapidement aux phénomènes de dilatation thermique. Ainsi, un système fort contraint est plus nerveux qu'un échantillon recuit.

Les résultats obtenus confirment donc l'intérêt de la méthode pour l'analyse des tensions internes en fonction des conditions de pression.

### Essais de dilatométrie avec des conditions d'injection variables

#### b) Dilatométrie dans le sens longitudinal

Nous désirons connaître l'incidence de la phase de maintien en pression sur le taux de contraintes internes. Nous comparons quatre types d'éprouvettes en polypropylène.

- . éprouvette ISO 1 injectée avec une phase de maintien en pression réalisée en boucle fermée sur la pression du polymère dans l'empreinte : niveau de pression : 365 bars

- . éprouvette ISO 1 réalisée dans les conditions qui précèdent mais, avec un niveau de pression de 600 bars

- . éprouvette ISO 1 réalisée dans les mêmes conditions mais, avec un niveau de pression de 780 bars

- . éprouvette ISO 1 injectée avec une phase de maintien en pression réalisée avec régulation de la pression hydraulique

Les résultats obtenus en dilatométrie au cours de la phase de montée en température (de 290 K à 440 K) puis, pendant le parcours de l'isotherme à 440 K, sont rassemblés dans ce tableau.

VALEURS MOYENNES SUR UN MINIMUM DE 8 ECHANTILLONS				
Définition de la caractéristique qui est relevée	Désignation du lot d'éprouvettes			
	780 bars	600 bars	365 bars	pression hydraul.
Premier maximum du coefficient de dilatation ( $\times 10^{-6}$ ) m/m/°C	121 12,7	124 6,6	117 19,8	130 8
Ecart entre le premier maximum et le premier minimum de dilatation ( $\times 10^{-6}$ ) m/m/°C	14 5,2	14,1 6,4	17,6 7,1	18 6
Dilatation maximum atteinte au cours de l'isotherme ( $\times 10^{-2}$ %)	186,5 14,9	187,2 22,9	181,3 11,3	188,2 12,5
Temps au bout duquel ce maximum est atteint (mn)	8,83 0,4	8,85 0,3	8,78 0,5	9,3 0,4
Décalage entre l'origine de l'isotherme et la nouvelle origine des temps (mn)	13,68 0,9	14,03 0,9	14,11 0,6	14,4 0,6
Dilatation à la nouvelle origine des temps ( $\times 10^{-2}$ %)	183,9 14,7	183,9 22,6	177,8 19,7	185,5 12,6
Vitesse de relaxation à l'origine des temps ( $10^{-3}$ %/mn)	-8,75 0,9	-9,60 1,1	-9,21 1,5	-7,8 1
Temps de relaxation mn	213 35,7	192,3 23,1	200,3 52,2	241,8 29,8
Amplitude de la déformation permanente générée par le cycle complet (à l'abscisse 360 K) $10^{-3}$	5,3 0,9	5,5 1,0	5,5 1,3	5,3 0,5

Remarque : les chiffres situés en bas de chaque case sont les écarts types attachés à la valeur moyenne calculée.

Ces résultats confirment les premières observations réalisées à partir des pièces complètes. En effet, les trois séries d'éprouvettes fabriquées avec une phase de maintien en boucle fermée sur le polymère, présentent des comportements identiques.

La méthode de mesure n'est pas suffisamment fine pour distinguer des niveaux de contraintes internes différents. Le quatrième lot d'éprouvettes présente un temps de relaxation plus grand et une vitesse de relaxation à l'origine des temps plus faible. Néanmoins, ces écarts ne sont pas significatifs pour conclure sur les taux de contraintes internes.

Les traitements thermiques sur les pièces complètes ne laissent pas apparaître de différence entre les régulations de pression qui sont mises en oeuvre. Les mesures de dilatométrie confirment donc nos premières observations.

#### Dilatométrie dans le sens transversal

Nous utilisons les éprouvettes fabriquées dans des conditions identiques à celles qui précèdent. Néanmoins, nous ajoutons une nouvelle série de pièces qui sont injectées dans des conditions très particulières. En effet, la phase dynamique d'injection provoque un pic de pression de 780 bars. Elle est suivie d'une phase de maintien à 365 bars. Ce choix de paramètres entraîne une compression brutale puis une détente du polymère dans l'empreinte.

Ces éprouvettes permettent de distinguer les effets des deux phases d'injection sur les contraintes internes.

Les résultats obtenus sont rassemblés dans le tableau qui suit :

## VALEURS MOYENNES SUR UN MINIMUM DE 8 ECHANTILLONS

Définition de la caractéristique qui est relevée	Désignation du lot d'éprouvettes			
	780 bars	600 bars	365 bars	780 bars puis 365 bars
Premier maximum du coefficient de dilatation ( $\times 10^{-6}$ ) m/m/°C	137 8	129,5 15,8	144 8	128 14
Ecart entre le premier maximum et le premier minimum de dilatation ( $\times 10^{-6}$ ) m/m/°C	29 9	20 8,7	20 3	25,5 7,5
Dilatation maximum atteinte au cours de l'isotherme ( $\times 10^{-2}$ %)	161,8 13	164,9 8,7	174,6 10,0	158,6 13,7
Temps au bout duquel ce maximum est atteint (mn)	7,5 0,3	7,7 0,2	8,1 0,3	7,7 0,3
Décalage entre l'origine de l'isotherme et la nouvelle origine des temps (mn)	13,1 0,3	13,5 0,7	14,6 1,4	13,0 0,3
Dilatation à la nouvelle origine des temps ( $\times 10^{-2}$ %)	158,6 12,8	161,7 9,0	173,1 10,4	155,7 13,6
Vitesse de relaxation à l'origine des temps ( $10^{-3}$ %/mn)	-8,6 1,0	-8,0 0,5	-7,0 1,4	-8,1 0,3
Temps de relaxation mn	185,3 12,1	203,3 22,9	258,7 65,4	192,1 22,4
Amplitude de la déformation permanente générée par le cycle complet (à l'abscisse $360 \text{ K})10^{-3}$	7,0 0,5	6,3 0,4	5,8 0,3	7,3 1,3

Les chiffres en bas de chaque case représentent les écarts types

Nous obtenons des temps de relaxation qui décroissent en fonction du niveau de la pression de maintien sur le polymère. Néanmoins, le lot additionnel d'échantillons possède une vitesse de relaxation faible. Aussi, nous pouvons établir la prédominance de la phase dynamique sur les problèmes de retrait après recuit.

Les vitesses de relaxation à l'origine des temps ne sont pas significatives. Néanmoins, la dilatométrie permet de distinguer des niveaux de contraintes qui dépendent des conditions de maintien. En effet, les déformations permanentes des échantillons après les essais diminuent avec le niveau de pression. Toutefois, cette constatation ne remet pas en question la commande en boucle fermée sur la pression du polymère. En effet, les traitements thermiques sur les pièces complètes montrent que ces dernières ne sont pas sensibles aux conditions de maintien.

Pour terminer notre investigation, nous avons appliqué une méthode d'analyse des contraintes internes par lumière polarisée sur des échantillons transparents.

La résine utilisée est fabriquée par la société BP Chemical. Les pièces ont été injectées avec des pressions de maintien différentes.

Notre analyse est qualitative. Les clichés qui sont placés dans l'annexe 8, rassemblent nos résultats.

Nos constatations se résument comme suit :

- les essais avec une durée de maintien variable font évoluer le nombre de franges d'interférence. Ces dernières intègrent à la fois l'orientation macromoléculaire et les tensions internes présentes dans toute l'épaisseur de la pièce

- le nombre de franges est plus important quand la pièce est injectée avec une phase de maintien en pression sur le polymère. Néanmoins, le niveau de pression employé n'entraîne pas d'évolution sensible.

Ce dernier point peut provenir des orientations macromoléculaires provoquées par un remplissage plus important de l'empreinte au cours du maintien en pression. Nous réalisons un recuit de longue durée (> 48 heures) pour libérer en partie les contraintes internes. Nous travaillons en isotherme, à une température inférieure à la température de transition vitreuse (100°C -5°C).

- après le recuit, nous relevons une faible modification de l'état de contrainte. L'orientation macromoléculaire est donc la principale cause des franges qui apparaissent sur les pièces.

Un recuit supplémentaire est réalisé sans succès. En effet, au delà de la température de transition vitreuse, le polymère devient opaque et ne permet pas de poursuivre l'analyse optique. Néanmoins, des clichés mettent en évidence une relaxation des orientations macromoléculaires qui sont très importantes dans la région du seuil d'alimentation.

Cette ultime analyse met encore en évidence l'importance des orientations macromoléculaires par rapport aux

contraintes internes. Néanmoins, l'ensemble des techniques de mesure utilisées peut être amélioré.

En effet, les mesures de dilatométrie nécessitent des échantillons dont la taille est relativement importante. Néanmoins, les contraintes internes sont dangereuses à cause de leur concentration dans des zones restreintes. Elles sont très élevées dans les zones d'alimentation des empreintes. Aussi, la dilatométrie linéaire reste une méthode trop macroscopique pour étudier ce phénomène.

Nous restons donc prudents quant à la faible incidence apparente de la technique de maintien sur le taux de contraintes internes.

## 5.6. Analyse de la résistance d'une ligne de soudure

### 5.6.1. Généralités

Un autre phénomène affecte aussi les caractéristiques mécaniques de la pièce : les lignes de soudure. Ces dernières forment des discontinuités dans les pièces. Ainsi, nous analysons l'influence du système de maintien en pression sur ce phénomène.

L'injection des thermoplastiques permet de fabriquer des objets finis dont la géométrie est souvent complexe. Ces pièces présentent inévitablement des lignes de soudure.

Elles sont dues à la rencontre de deux fronts de matière en fin d'écoulement dans un outillage. Ce phénomène provient :

- soit du remplissage du moule à partir de plusieurs points d'injection (pièces de grandes dimensions)
- soit d'une progression non homogène du front de matière dans l'empreinte (variation d'épaisseur)

La présence d'une ligne de soudure crée une zone de fragilité dans la pièce. Elle peut également laisser des traces souvent visibles à l'oeil nu. Cette dernière difficulté est généralement maîtrisée à l'aide des logiciels de simulation d'écoulement. En effet la modélisation de l'avancement des fronts de matière dans les outillages permet, à partir de modification de la géométrie de l'empreinte, de déplacer l'emplacement des lignes de soudure. Il est donc possible de placer les fronts de soudure dans des endroits discrets de manière à les rendre invisibles lorsque la pièce finie est en service. Cette méthode exige une maîtrise certaine de l'outil informatique qui doit être associée à une bonne expérience pratique dans le domaine de la conception des outillages.

Si le problème de la qualité d'aspect des pièces injectées peut artificiellement être résolu, celui qui concerne la qualité mécanique dans la zone de la soudure persiste. En effet, une ligne de soudure est fragile. La rencontre des deux flux de polymère qui créent une jonction, s'établit le plus souvent en fin de remplissage du moule. Le polymère se trouve alors à une température inférieure à celle qui lui est imposée au moment de son transfert dans l'outillage. Au cours de la pénétration du matériau dans l'empreinte, celui-ci se refroidit.

La baisse de température du polymère entraîne l'augmentation de sa viscosité. La diminution de fluidité limite l'interpénétration des deux fronts de résine qui se rencontrent. La ligne de rencontre des flux doit donc davantage être assimilée à une ligne de collage. Les chaînes macromoléculaires qui composent chacun des fronts de matière, ne peuvent pas réellement créer de continuité au

niveau de la ligne de soudure qui présente donc une structure très différente de celle du reste de la pièce.

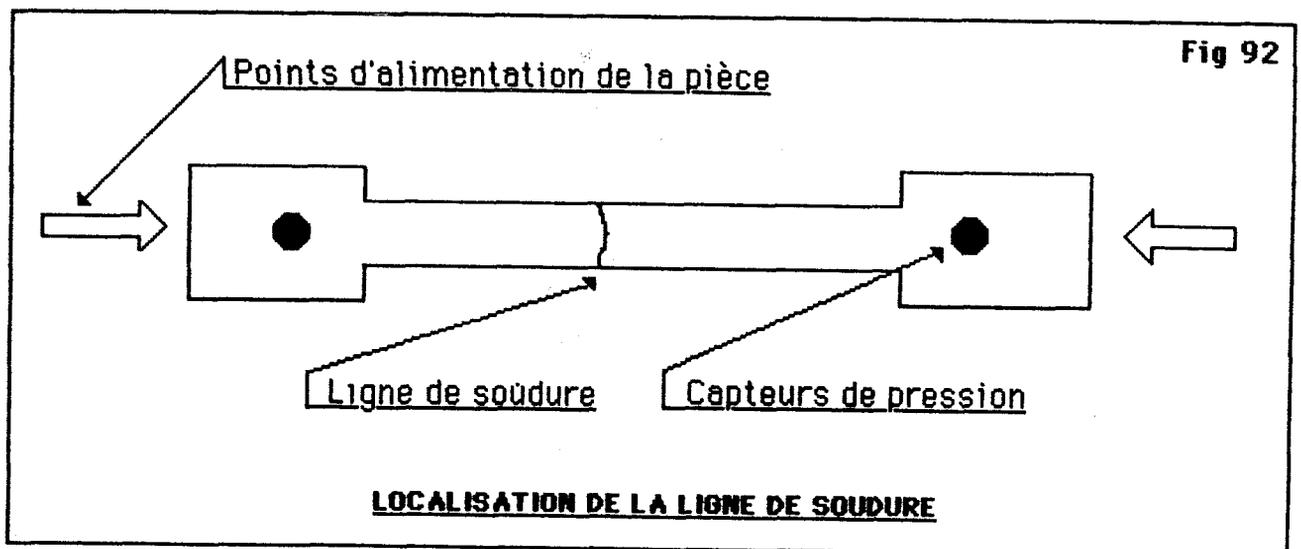
La présence d'une telle discontinuité affecte beaucoup les caractéristiques mécaniques de la pièce fabriquée. La fragilité des lignes de soudure est très facilement mise en évidence à l'aide d'essais destructifs classiques (essais au choc, essais en flexion sous charge...).

L'étude présentée dans les prochains paragraphes tente de mettre en évidence l'influence de la seconde pression d'injection sur la qualité mécanique d'une ligne de soudure. En effet, la pression de maintien permet d'entretenir un contact plus ou moins marqué entre les deux fronts de matière qui forment la ligne de soudure.

### 5.6.2. Présentation de l'étude

#### Localisation de la ligne de soudure

Nous utilisons un outillage "grappe d'éprouvettes" qui présente la possibilité de créer une ligne de soudure au centre d'une éprouvette normalisée ISO 1 (alimentation par chacune des extrémités de la pièce). Le cas de figure étudié reste simple. Nous connaissons avec une bonne précision les conditions dans lesquelles les soudures s'établissent (fig. 92).



#### Définition des conditions opératoires

Nous réalisons deux classes d'expérience. Elles sont basées sur l'utilisation de deux systèmes de régulation de la pression de maintien :

- régulation de la pression hydraulique à l'arrière de la vis d'injection
- régulation de la pression de la matière à l'intérieur de l'empreinte

En outre une première série de mesures a été réalisée dans les conditions et le but précisés ci-dessous.

A) Essais préliminaires en boucle fermée sur la pression dans l'empreinte

Vérification de l'évolution des masses et de la géométrie

Au cours d'expériences précédentes, nous avons obtenu d'excellentes corrélations entre la masse des éprouvettes fabriquées et le niveau de pression que nous imposons dans l'empreinte.

Une première série de mesures a pour objet de vérifier si la présence d'une ligne de soudure en milieu de pièce a une influence sur cette observation.

Conditions d'essai : (le polymère est un PP 3050 MN1 APPRYL polypropylène)

Le cycle d'injection utilisé comme cycle de référence peut être défini comme suit :

- VISUMAT 4000 sur presse BILLION H 280/90
- INJECTION DYNAMIQUE
  - longueur de dosage = 55 mm
  - paliers d'injection (%) = 25 ; 20 ; 10 ; 36
  - vitesse d'injection (%) : constante = 10
- TEMPERATURE DU POLYMERE = 240°C
- DECLENCHEMENT de la phase de maintien et entretien de cette phase :

Compte tenu de certaines observations déjà réalisées, une implantation idéale de capteur conduit à nous situer au milieu de cette éprouvette (dernier endroit atteint par le flux de matière). Malheureusement, l'équipement dont nous disposons, ne permet pas de travailler dans ces conditions.

Aussi, nous utilisons les deux capteurs de pression placés dans la région des têtes de l'éprouvette ISO 1 injectée. Un capteur identifie le signal qui nous donne le seuil de pression pour déclencher la phase de maintien. L'autre capteur est employé pour réaliser l'asservissement en pression.

Afin de conserver "l'esprit" dans lequel nous avons travaillé jusqu'ici, le choix du rôle joué par chaque capteur est réalisé comme suit : le capteur de déclenchement est le dernier atteint par le polymère au cours du remplissage du moule. Cet emplacement, associé à un niveau

de pression suffisamment élevé (300 bars), nous donne de bonnes garanties de remplissage de l'empreinte avant de passer à la phase de maintien.

Nous utilisons le capteur le premier atteint pour fermer la boucle de régulation en pression. Une démarche analogue nous demande également un maintien classique (pression hydraulique à 80 bars) sur une durée de 0,5 seconde.

#### - PHASE DE MAINTIEN EN PRESSION

La boucle d'asservissement en pression est établie avec une consigne de pression constante égale à 650 bars pour le cycle de référence. Le temps de maintien est de 18 secondes. L'observation de la réaction du système au bout de cette durée nous garantit un bouchage correct de l'empreinte (dérive rapide de la pression hydraulique à l'arrière de la vis d'injection).

#### - VARIATION DES CONDITIONS D'INJECTION

Nous considérons les valeurs des pressions (matière, hydrauliques) qui interviennent au cours du déclenchement de la phase de maintien et pendant sa réalisation. Elles sont échelonnées sur une étendue de -20 % à + 20 % des valeurs de référence avec un incrément de 5 %.

#### Expression des résultats

Remarque : les résultats affichés sont des moyennes réalisées à partir d'un ensemble de dix mesures.

Variation de la masse de l'éprouvette ISO 1 et écart type :

REPÈRE ECHANTILLON	MASSE (g)	ECART TYPE
-20 %	10,192	0,0028
-15 %	10,228	0,0056
-10 %	10,266	0,0033
- 5 %	10,287	0,0018
0 %	10,309	0,0073
+ 5 %	10,325	0,0022
+10 %	10,343	0,0047
+15 %	10,373	0,0027
+20 %	10,403	0,0027

(température du moule : 30°C, matière PP 3050 MN 1)

Variation de l'épaisseur au centre de l'ISO 1 et écart type

REPERE ECHANTILLON	EPAISSEUR (mm)	ECART TYPE
-20 %	3,5213	0,0032
-15 %	3,5394	0,0045
-10 %	3,5700	0,0050
- 5 %	3,595	0,0021
0 %	3,6204	0,0015
+ 5 %	3,3610	0,0011
+10 %	3,6470	0,0030
+15 %	3,6724	0,0019
+20 %	3,699	0,0020

(température du moule : 30°C, matière PP 3050 MN 1)  
Variation de l'épaisseur sur le bord de l'ISO 1 et écart type

REPERE ECHANTILLON	EPAISSEUR (mm)	ECART TYPE
-20 %	3,8501	0,0022
-15 %	3,8585	0,0011
-10 %	3,8650	0,0000
- 5 %	3,8685	0,0008
0 %	3,8758	0,0012
+ 5 %	3,8803	0,0014
+10 %	3,8842	0,0012
+15 %	3,8912	0,0009
+20 %	3,9027	0,0032

(température du moule : 30°C, matière PP 3050 MN 1)

L'ensemble des résultats qui apparaissent dans ces tableaux confirme les comportements déjà observés. En effet, les calculs de corrélation nous donnent des valeurs remarquables :

- coefficient de corrélation entre l'épaisseur au centre et la masse : 0,99674
- coefficient de corrélation entre l'épaisseur sur le bord et la masse : 0,99353

La présence de la ligne de soudure ne remet pas en cause la relation linéaire qui a été établie entre le niveau de pression imposé et les caractéristiques géométriques et massique de l'éprouvette ISO 1. Ce modèle, valable sur un domaine de pression relativement important, devra être corroboré avec des outillages dont la géométrie diffère de celle du cas particulier étudié ici.

Après cette vérification préliminaire nous pouvons tenter de mener à terme la comparaison de deux modes de fonctionnement de machine.

### B) Comparaison des deux modes d'asservissement

#### Conditions d'essai

##### a) essais en boucle fermée sur la pression dans l'empreinte

Les conditions de fonctionnement de la presse à injecter sont rigoureusement identiques à celles qui ont été choisies pour effectuer la vérification précédente.

##### b) essais en boucle fermée sur la pression hydraulique à l'arrière de la vis d'injection

La presse d'injection travaille à nouveau dans les conditions déjà présentées. Cette fois nous faisons varier la seule pression hydraulique de maintien. Pour ce faire nous utilisons le même incrément (+ ou -5%).

#### Expression des résultats obtenus

Remarque : les résultats affichés sont des moyennes réalisées à partir d'un ensemble de dix mesures.

#### CARACTERISTIQUES MECANQUES DES EPROUVETTES SOUMISES A UN ESSAI DE TRACTION

##### Boucle fermée en pression hydraulique

REPERE ECHAN.	MOD. daN/mm <sup>2</sup>	ECART TYPE	CONT.A RUPTU.	ECART TYPE	A % RUPTU.	ECART TYPE
+20 %	120,7	2,63	2,84	0,11	7,06	1,64
+15 %	128,3	1,76	2,57	0,05	4,14	0,20
+10 %	127,5	2,76	2,51	0,12	3,85	0,49
+ 5 %	127,9	2,37	2,59	0,19	4,50	1,28
0 %	121,0	3,41	2,80	0,06	6,00	0,68
- 5 %	127,7	-	2,88	0,03	6,98	0,12
-10 %	129,4	1,70	2,91	0,03	9,00	0,59
-15 %	125,1	1,36	2,89	0,04	11,20	0,50
-20 %	124,9	2,19	2,68	0,23	5,46	1,95

(température du moule : 30°C, matière PP 3050 MN1)

MOD : module d'élasticité à la traction (daN/mm<sup>2</sup>)  
CONT.A RUPTU. : contrainte à la rupture sous traction  
(daN/mm<sup>2</sup>)  
A % RUPTU. : allongement pour cent à la rupture sous  
traction (%)

La vitesse de sollicitation utilisée pour réaliser ces mesures est choisie de manière à marquer davantage les différences de comportement éventuelles entre chaque lot d'éprouvettes. Dans notre cas, la traction est réalisée à 50 mm/mn.

Une première analyse met en évidence la constance de la valeur du module d'élasticité en traction quel que soit le niveau de pression appliqué. Les contraintes à la rupture en traction sont également indépendantes des conditions de maintien. L'allongement à la rupture peut également être considéré comme constant et donc indépendant de la pression malgré la dispersion habituellement rencontrée sur cette caractéristique. Cependant son niveau de quelques % comparé au 600 % d'allongement du même matériau sans soudure est très faible et caractérise un comportement fragile.

La localisation de la rupture fragile reste identique pour l'ensemble des éprouvettes. En effet, aucune rupture n'est enregistrée hors d'une zone située très près de la ligne de soudure. L'éloignement maximal de la section de rupture de celle de soudure est de 6 mm.

CARACTERISTIQUES MECANQUES DES EPROUVETTES SOUMISES  
A UN ESSAI DE TRACTION

Boucle fermée en pression matière dans l'empreinte  
Température du moule 30°C, temps de maintien 18 secondes

+20%	+15%	+10%	+5%	0%	-5%	-10%	-15%	-20%	Repère Echantillon
125,8	124,1	123,4	120,1	121,7	120,7	123,1	121,1	124,2	mod. daN/mm <sup>2</sup>
2,86	3,17	2,86	2,71	2,61	2,03	1,28	1,12	3,27	Ecart type
-	1,25	1,84	1,89	1,93	1,67	2,57	2,83	2,84	Cont. à rupture
0,24	0,07	0,72	0,68	-	-	-	0,10	0,14	Ecart type
194,8	118,6	99,6	109,8	155,0	160,7	79,04	7,82	6,43	A % à rupture
38,6	89,33	92,10	0,03	139,1	144,4	84,72	1,59	1,86	Ecart type
2,98	2,91	2,94	2,91	3,00	2,93	2,95			Cont. maxi
0,02	0,04	0,03	0,18	0,77	0,02	0,04			Ecart type
9,00	9,87	10,03	10,14	9,50	10,05	10,01			A % cont. max.
0,89	0,32	0,37	-	-	0,03	0,24			Ecart type

La constance du module d'élasticité en traction est à nouveau constatée. La contrainte à la rupture est plus faible que celle obtenue dans le cas précédent. Mais la contrainte maximale atteinte (seuil d'écoulement haut) est pratiquement équivalente. La dispersion de l'ensemble des résultats est plus importante pour cette série d'expériences. Ce phénomène est sans doute dû à la présence, à la fois, de ruptures non fragiles et de ruptures fragiles pour certains lots de pièces. Alors que précédemment on obtenait le seul comportement fragile.

Aussi, ce type de régulation permet donc de réduire la fragilité de la pièce au-dessus d'un certain seuil de pression. Pour poursuivre l'analyse, l'influence de la température de l'outillage est vérifiée.

Influence de la température de l'outillage

Les conditions de réalisation des essais sont identiques à celles qui ont déjà été définies dans les cas précédents.

Nous travaillons avec trois températures de moule différentes : 30°C, 45°C, 60°C. Elles sont supérieures ou égales à la température de l'outillage au cours du cycle de référence afin d'éviter des difficultés de remplissage de l'empreinte qui sont, a priori, très nuisibles aux lignes de soudure : le refroidissement de la matière peut devenir trop important. Dans ce cas, les fronts d'écoulement, devenus trop visqueux, risquent de ne plus présenter d'interpénétration. Nous n'aurons plus de soudure mais la juxtaposition de deux fronts froids.

Les températures d'outillage plus élevées modifient les régimes thermiques au cours de la transformation. Nous prenons en compte cette variation en modifiant le temps de maintien qui est fixé à 18, 20,5 puis 22 secondes.

#### CARACTERISTIQUES MECANQUES DES EPROUVETTES SOUMISES A UN ESSAI DE TRACTION

Boucle fermée en pression matière, température du moule : 45°C, temps de maintien 20,5 secondes

+20%	+15%	+10%	+5%	0%	-5%	-10%	-15%	-20%	Repère Echantillon
130,7	135,8	132,1	130,2	131,3	131,4	132,3	134,2	130,6	Mod. daN/mm <sup>2</sup>
4,18	3,38	4,37	2,00	2,30	1,34	2,60	1,08	2,42	Ecart type
-	1,50	1,65	1,36	1,40	1,53	1,89	3,08	3,02	Cont. à rupture
>300	>300	>300	>300	>300	>300	28,5	9,90	9,90	A % à rupture
3,05	3,07	3,04	2,99	3,02	3,06	3,09	3,08	3,02	Cont. maxi
0,03	0,03	0,04	0,07	0,03	0,01	0,01	0,02	0,07	Ecart type
9,86	9,56	10,07	9,96	10,04	9,89	10,10	9,90	9,92	A % cont. max.
0,11	0,14	0,29	0,40	0,06	0,11	0,36	0,21	0,27	Ecart type
1,76	1,77	1,78	1,78	1,80	1,81	-	1,75	1,79	Cont au seuil Sup.
0,02	0,03	0,02	0,02	0,03	0,01		-	-	Ecart type

Le module d'élasticité en traction présente une régularité remarquable quel que soit le niveau de pression. Nous retrouvons le même phénomène pour la contrainte maximale.

Néanmoins, l'allongement à la rupture est sujet à une variation brutale dans la zone de pression des -10 %. En effet, nous passons d'une rupture fragile (avec un allongement inférieur à 10 %) à une absence de rupture (allongement supérieur à 300 %) qui correspond à un arrêt de l'essai par la course maximum de la machine (la rupture ne présentant d'ailleurs aucun intérêt).

Boucle fermée en pression matière, température du moule : 60°C, temps de maintien 22 secondes.

+20%	+15%	+10%	+5%	0%	-5%	-10%	-15%	-20%	Repère Echantillon
127,3	124,0	-	123,6	119,0	120,1	119,2	121,4	122,0	Mod. daN/mm <sup>2</sup>
2,56	2,32	1,03	1,69	4,00	2,20	0,90	1,86	0,80	Ecart type
1,68	1,51	2,71	2,69	2,35	2,70	2,76	2,83	2,86	Cont. à rupture
0,55	0,57	0,04	0,04	0,60	0,06	0,13	0,05	0,07	Ecart type
151,8	163,5	16,0	18,0	28,5	16,9	15,2	12,9	13,4	A % à rupture
117,4	93,5	1,09	9,03	25,0	0,43	3,02	3,22	2,51	Ecart type
3,08	3,06	3,06	3,07	3,04	3,05	3,06	3,06	3,07	Cont. maxi
0,03	0,04	0,03	0,03	0,03	0,01	0,01	0,02	0,03	Ecart type
10,1	10,0	10,7	9,9	10,34	10,25	10,01	10,01	10,01	A % à cont. max.
31,0	0,43	2,06	0,09	0,16	0,28	0,62	0,17	0,28	Ecart type

Cette série d'expérience nous donne à nouveau deux états de comportement caractérisés par des allongements à la rupture d'environ 15 % d'une part et, supérieurs à 150 % d'autre part.

#### PREMIERES OBSERVATIONS SUR L'EFFET DE LA TEMPERATURE DE L'OUTILLAGE

L'ensemble des résultats, obtenus au cours de cette série d'essais comparatifs, est intéressant à plusieurs titres :

- la faible dispersion des mesures réalisées met en évidence la bonne reproductivité des manipulations effectuées

- chaque expérience laisse apparaître deux types de rupture. Les zones de passage entre des ruptures du type fragile (allongement faible) et, des ruptures ductiles (allongement important) sont très bien marquées. Ce tableau permet de mieux saisir le phénomène :

TEMPERATURE DU MOULE	ZONE DE TRANSITION (niveau de pression)
30 °C	- 10 %
45 °C	- 5 %
60 °C	+ 10 %

De façon schématique nous pouvons tracer ce diagramme: (fig.93)

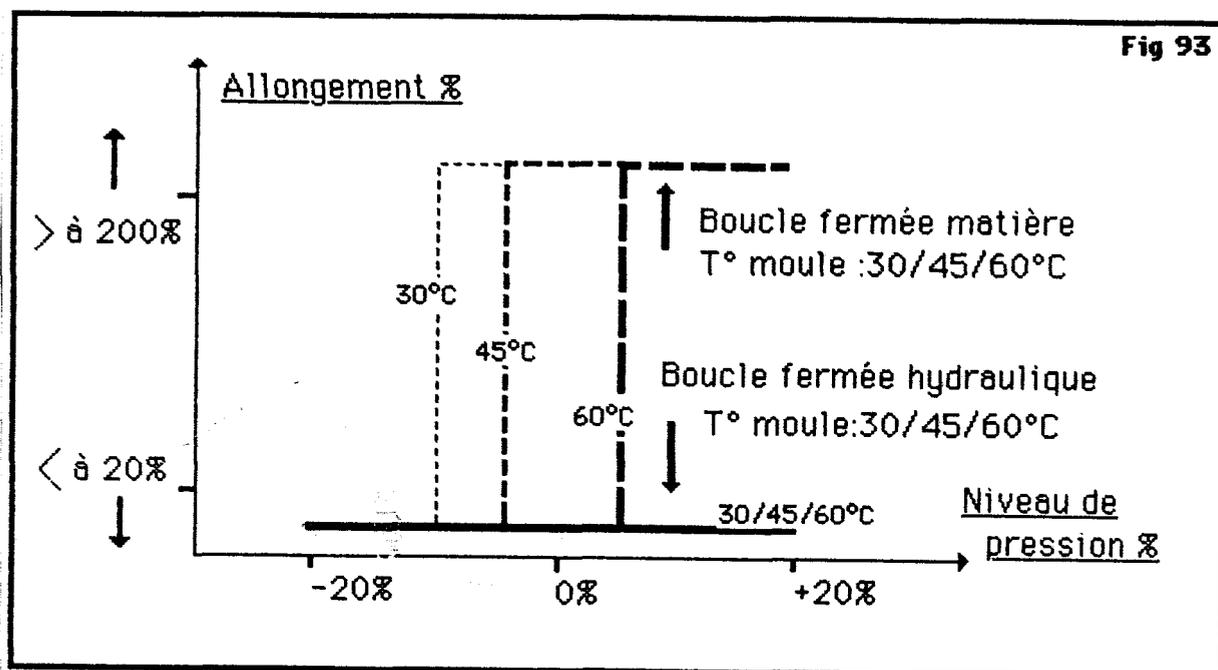


FIG. 93 : EVOLUTION DES ALLONGEMENTS % A LA RUPTURE

- boucle fermée hydraulique  $T_{\text{moule}} : 30^{\circ}\text{C}/45^{\circ}\text{C}/60^{\circ}\text{C}$
- ..... boucle fermée matière  $T_{\text{moule}} : 30^{\circ}\text{C}$
- boucle fermée matière  $T_{\text{moule}} : 45^{\circ}\text{C}$
- - - boucle fermée matière  $T_{\text{moule}} : 60^{\circ}\text{C}$

L'influence du mode de régulation en pression sur la fragilité des soudures a été confirmée par une série d'essais supplémentaire effectuée avec une température de moule de 45°C puis 60°C et un système de maintien par contrôle de la pression hydraulique seule. Nous ne modifions pas le type de rupture qui est déjà obtenu avec une température de moule de 30°C (rupture fragile).

Cependant, l'obtention d'une soudure dont les caractéristiques s'améliorent avec une température d'outillage décroissante, est étonnante. Ceci nous conduit à réaliser des essais complémentaires.

C) Seconde série d'essais à température de moule variable

Nous réalisons une caractérisation mécanique des lignes de soudure réalisées dans des conditions proches des précédentes.

Nouvelles conditions d'essais

Le polymère est injecté à une température de 250°C. La température du moule est successivement réglée à 16°C, 30°C, 43°C puis 56°C.

Les niveaux de pression appliqués en boucle fermée sur le polymère, sont choisis à partir de la valeur de 600 bars par incréments de 30 bars.

Le cycle standard correspond à une pression hydraulique de 80 bars. Par ailleurs la phase de maintien est déclenchée par seuillage de la pression du polymère au niveau du capteur piézoélectrique qui est déjà utilisé dans les cas précédents. (valeur du seuil : 375 bars).

Les éprouvettes sont ensuite soumises à un essai de traction à une vitesse de 50 mm/mn.

CARACTERISTIQUES MECANQUES DES EPROUVETTES SOUMISES A UN ESSAI DE TRACTION

Boucle fermée en pression hydraulique, température du moule : 16°C, temps de maintien supérieur au temps de bouchage de l'empreinte.

+20%	+10%	0%	-10%	-20%	Repère Echantillon
86	84	91	90	83	Mod. daN/mm <sup>2</sup>
8	2	3	4	2	Ecart type
1,23	1,26	-	1,19	1,25	Cont. à rupture
0,02	0,01	-	0,05	0,03	Ecart type
304,5	286,2	-	274,8	276,1	A% à rupture
14,0	42,8	-	11,9	34,2	Ecart type
2,94	2,93	2,94	2,96	2,94	Cont. max.
0,04	0,08	0,01	0,02	0,02	Ecart type
8,1	4,5	11,2	6,9	8,2	A% au seuil
0,3	0,7	0,3	2,4	4,3	Ecart type

Boucle fermée en pression hydraulique, température du moule : 30°C, temps de maintien supérieur au temps de bouchage de l'empreinte.

+20%	+10%	0%	-10%	-20%	Repère Echantillon
95	92	91	89	86	Mod. daN/mm <sup>2</sup>
2	5	3	5	2	Ecart type
2,89	2,24	2,28	2,60	2,62	Cont. à rupture
0,04	0,04	0,99	0,33	0,64	Ecart type
8,2	4,6	102,1	7,0	8,3	A% à rupture
0,3	0,7	154,7	2,4	4,4	Ecart type

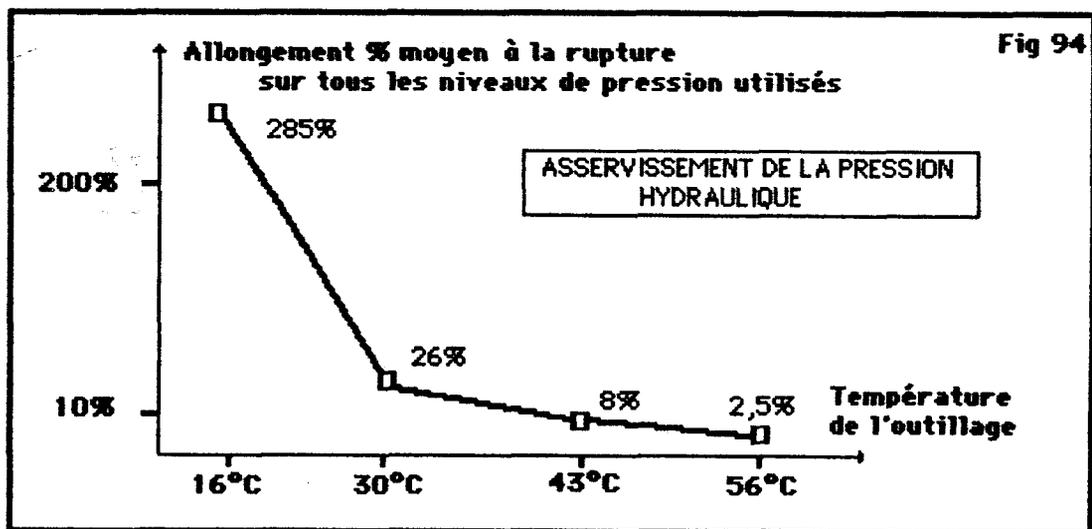
Boucle fermée en pression hydraulique, température du moule : 43°C, temps de maintien supérieur au temps de bouchage de l'empreinte.

+20%	+10%	0%	-10%	-20%	Repère Echantillon
114	108	100	95	100	Mod. daN/mm <sup>2</sup>
9	1	6	7	4	Ecart type
2,74	2,98	3,07	2,93	2,73	Cont. à rupture
0,50	0,20	0,06	0,20	0,36	Ecart type
6,4	8,1	9,3	10,0	5,8	A% à rupture
4,2	3,3	2,7	2,3	2,7	Ecart type

Boucle fermée en pression hydraulique, température du moule : 56°C, temps de maintien supérieur au temps de bouchage de l'empreinte.

+20%	+10%	0%	-10%	-20%	Repère Echantillon
112	115	113	105	107	Mod. daN/mm <sup>2</sup>
0,3	2	3	5	3	Ecart type
1,95	1,99	1,94	1,74	1,75	Cont. à rupture
0,20	0,19	0,34	0,15	0,09	Ecart type
2,8	2,7	2,9	2,4	2,4	A% à rupture
0,3	0,4	0,7	0,3	0,2	Ecart type

L'allongement à la rupture est la grandeur la plus significative. Nous rassemblons les résultats obtenus en boucle fermée hydraulique sur la figure 94.



Boucle fermée en pression matière, température du moule 16°C, temps de maintien supérieur au temps de bouchage de l'empreinte.

+20	%+15%	10%	+5%	0%	-5%	-10%	-15%	-20%	Repère Echant.
84	81	82	89	88	86	84	84	86	Mod.daN/mm <sup>2</sup>
5	2	8	6	4	6	10	5	4	Ecart type
1,14	1,20	-	-	-	1,22	1,20	1,27	1,37	Cont.à rupt.
0,06	0,09	-	-	-	0,06	0,12	0,07	0,31	Ecart type
267,0	282,6	1NR/5*	1NR/5*	3NR/5*	266,7	281,3	294,1	286,0	A% à rupture
40,4	23,2	-	-	-	30,1	30,9	14,9	26,4	Ecart type
2,88	2,93	2,92	2,94	2,92	2,91	2,93	2,96	2,93	Cont.au seuil
0,03	0,02	0,04	0,03	0,03	0,08	0,02	0,03	0,03	Ecart type
11,7	11,8	11,4	11,6	11,3	10,9	11,4	11,7	11,3	A% au seuil
0,3	0,4	0,4	0,2	0,2	0,4	0,3	0,3	0,5	Ecart type

\* NR = non rompu

Boucle fermée en pression matière, température du moule 30°C, temps de maintien supérieur au temps de bouchage de l'empreinte.

+20	%+15%	10%	+5%	0%	-5%	-10%	-15%	-20%	Repère Echantillon
99	100	100	98	98	100	100	97	96	Mod. daN/mm <sup>2</sup>
5	5	2	5	5	5	1	5	3	Ecart type
1,14	1,12	1,12	1,12	1,51	1,43	1,43	1,04	1,51	Cont. à rupt.
0,05	0,13	0,11	0,06	0,76	0,81	0,65	0,02	0,77	Ecart type
273,9	298,6	305,4	296,9	241,7	242,7	242,1	298,2	246,0	A% à rupture
27,5	10,3	14,1	13,1	133,5	128,3	126,0	12,7	130,2	Ecart type
2,95	2,94	2,94	2,91	2,93	2,94	2,92	2,91	2,90	Cont. au seuil
0,02	0,03	0,02	0,03	0,02	0,02	0,04	0,03	0,03	Ecart type
10,7	10,6	10,7	10,7	11,1	11,2	11,3	11,3	11,6	A% au seuil
0,3	0,5	0,4	0,3	0,2	0,3	0,3	0,1	0,3	Ecart type

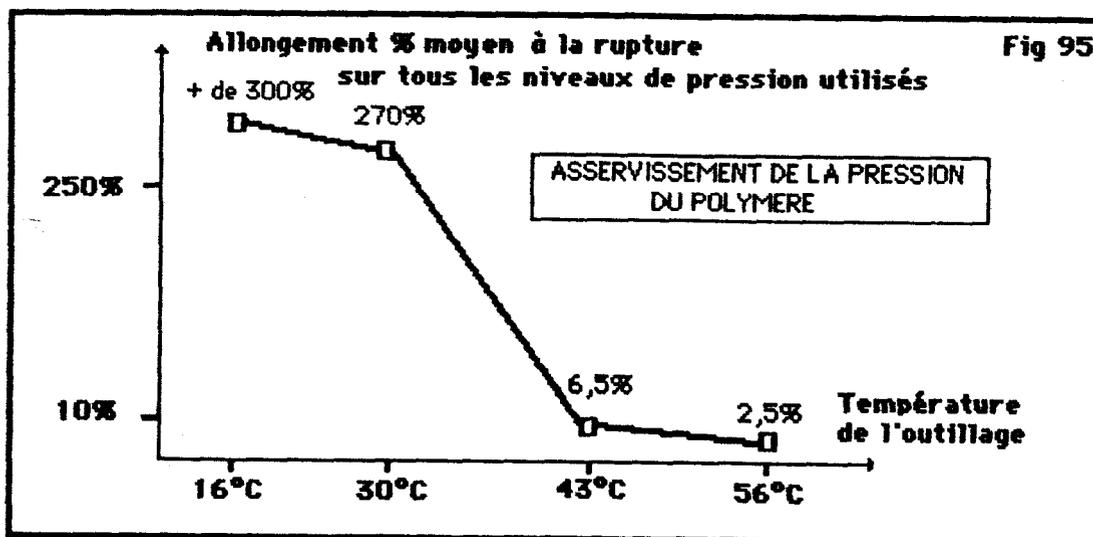
Boucle fermée en pression matière, température du moule 43°C, temps de maintien supérieur au temps de bouchage de l'empreinte.

+20	%+15%	10%	+5%	0%	-5%	-10%	-15%	-20%	Repère Echantillon
106	104	106	106	111	116	108	108	105	Mod. daN/mm <sup>2</sup>
5	3	3	4	3	2	0,5	5	3	Ecart type
2,93	2,73	2,80	2,78	2,83	2,97	2,52	2,44	2,33	Cont. à rupt.
0,28	0,22	0,21	0,21	0,24	0,22	0,47	0,27	0,29	Ecart type
9,6	8,1	7,7	6,3	2,7	9,3	6,0	5,3	4,2	A% à rupture

Boucle fermée en pression matière, température du moule 56°C, temps de maintien supérieur au temps de bouchage de l'empreinte.

+20	%+15%	10%	+5%	0%	-5%	-10%	-15%	-20%	Repère Echant.
114	104	111	104	104	114	110	116	112	Mod.daN/mm <sup>2</sup>
7	4	2	4	2	10	4	4	2	Ecart type
2,18	2,36	1,8	2,24	2,16	2,02	1,79	2,20	1,78	Cont.à rupt
0,22	0,26	0,20	0,26	0,15	0,13	0,12	0,16	0,12	Ecart type
2,7	3,5	2,0	3,2	2,9	2,7	2,5	3,1	2,4	A% à rupture
0,5	1,0	0,3	0,6	0,5	0,4	0,5	0,4	0,2	Ecart type

La figure 95 illustre les résultats obtenus sur l'allongement%.



Nouvelles observations sur l'effet de la température de l'outillage en fonction du type d'asservissement en pression qui est utilisé

A nouveau, les modules d'élasticité à la traction et sont peu différentes d'une série d'éprouvettes à l'autre, en revanche l'allongement est fortement influencé.

Nous remarquons deux types de rupture :

- des ruptures fragiles avec un allongement à la rupture inférieur à 10%

- des ruptures ductiles avec des allongements supérieurs à 250%.

Suivant le mode de régulation en pression, la transition est sensiblement différente :

Température du moule	16°C	30°C	43°C	56°C
Asservissement				
Boucle fermée pression hydraulique	Ductile	FRAGILE	FRAGILE	FRAGILE
Boucle fermée pression matière	Ductile	Ductile	FRAGILE	FRAGILE

A la différence de la première série d'expériences, nous ne distinguons pas d'évolution de comportement sous traction en fonction du niveau de la pression appliquée à une température donnée d'outillage.

Néanmoins, la technique de maintien en pression du polymère en boucle fermée permet de travailler avec un moule plus chaud sans mettre en cause la résistance à la traction de la ligne de soudure.

C'est une possibilité intéressante. En effet, le remplissage d'un moule est facilité lorsque ce dernier est chaud (phase dynamique d'injection). Par ailleurs, le contrôle de la qualité dimensionnelle d'une pièce injectée est mieux réalisé avec un outillage chaud. Le temps de bouchage du moule est plus long, le retrait de la résine est compensé plus longtemps.

#### D) Conclusions et interprétations

La fragilité de la ligne de soudure disparaît sous certaines conditions de maintien en pression. En effet, le maintien en pression en boucle fermée sur l'empreinte permet de réaliser des pièces à grand allongement sous traction. Par ailleurs ce résultat est obtenu au delà de certains niveaux de pression en fonction des cas étudiés. Un niveau de pression élevé favorise le contact entre les deux fronts de résine qui se rencontrent. La variation de pression de maintien ne peut pas influencer la pénétration des fronts de matière car la soudure est établie après le remplissage, au cours du compactage.

Ainsi, la soudure s'établit sur une surface dont la géométrie est constante. La pression du polymère au cours de son refroidissement, joue un rôle important sur la structure qui se développe au sein de la pièce injectée.

En effet, dans le cas d'un polymère semi-cristallin, la pression modifie la morphologie du polymère. Les macromolécules qui sont mises sous pression, présentent une mobilité moins grande. Au cours du refroidissement, la formation de cristallites de taille importante est impossible. Nous obtenons une structure plus fine. Les schémas qui suivent, permettent de mieux comprendre les phénomènes mis en cause (fig. 96).

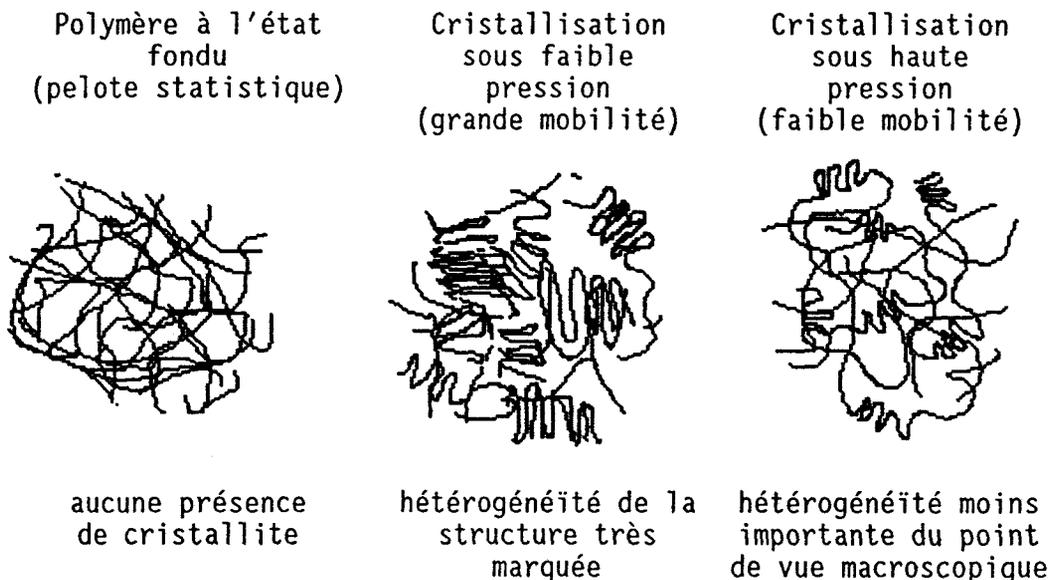


Fig 96

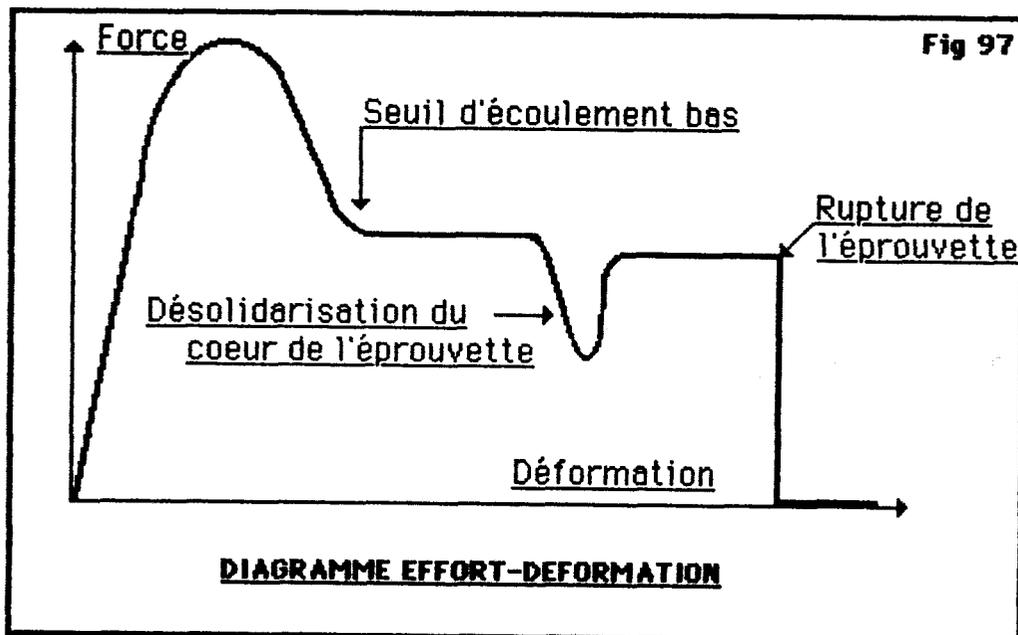
La présence d'une cristallisation plus "fine" peut expliquer les comportements sous traction des éprouvettes injectées sous contrôle de la pression du polymère dans le cas des pressions élevées. Cette structure est à comparer avec celle d'un acier qui présente des grains fins. Des grains de taille importante offrent des joints de grains grossiers qui sont autant d'amorces à la rupture.

Le contrôle de la pression du polymère dans le moule provoque cet affinement de structure de façon non homogène. Le phénomène est sans doute plus marqué dans les zones sous-cutanées de la pièce injectée. La peau de la pièce ne peut pas subir cette influence car elle est immédiatement figée. Le coeur de la pièce, quant à lui, n'est plus soumis à la pression voulue dès que le seuil d'accès à l'empreinte est solidifié. Cette analyse est confortée par les observations qui suivent.

Les essais de traction permettent d'enregistrer un phénomène très intéressant. En effet si la striction initiale s'installe dans une section éloignée de celle de la soudure, l'essai se déroule de façon classique et, un seuil bas d'écoulement à l'état solide est atteint. Néanmoins, lorsque la zone de striction affecte les environs directs de la ligne de soudure, nous mesurons une chute importante de l'effort de traction

(environ -20 à -25%). Celle-ci est suivie par un retour vers une contrainte d'écoulement "normale". Lorsque ce phénomène est enregistré, nous constatons au même moment une désolidarisation du coeur de l'éprouvette. Le centre de l'échantillon se détache et laisse apparaître une forme en dard. La physionomie de cette discontinuité rappelle la forme de la surface de contact. En effet, elle s'établit entre les fronts de résine qui se rencontrent. L'enveloppe de la surface de soudure est bien visible après un grossissement des éprouvettes qui sont injectées lors d'un changement de coloris. (ce qui marque davantage les lignes de flux).

Allure générale de la courbe effort/déformation dans le cas d'une rupture ductile : (fig. 97)



\* grossissement de la surface de rupture (microscope à balayage) (x12,7) (fig. 98).



Lorsque la contrainte au seuil d'écoulement bas retrouve son niveau d'origine, le dard décrit ci-dessus se trouve enfermé dans une gaine de polymère qui continue à se déformer.

La solidité de l'éprouvette est donc juste garantie par la zone qui se trouve entre la peau et le coeur de la pièce.

**6. SYNTHÈSE ET CONCLUSION**

Sur une machine industrielle équipée d'un moule de pièce simple mais de conception néanmoins industrielle, nous avons implanté un auxiliaire de commande piloté par une grandeur liée directement au matériau : la pression dans le moule.

Nous avons alors effectué une étude paramétrique comparative entre un tel système de régulation et le système de régulation classique, à partir de la pression hydraulique appliquée en amont du système d'injection.

Nous nous sommes limités à analyser l'influence d'une régulation de la seule deuxième phase du cycle de pression, le maintien en pression après remplissage, le remplissage de l'outillage étant maintenant traité dans l'industrie avec des techniques de régulation suffisamment performantes et reproductives (régulation de vitesse d'avance de vis de plastification notamment).

Les travaux effectués et les résultats obtenus ont été les suivants :

- mise en place du système d'asservissement :

Une boucle de régulation de la pression du polymère dans le moule a été ajoutée à la machine. Elle autorise des réglages P.I.D. adaptés à nos besoins. Néanmoins, le comportement de la résine amorphe a imposé la mise au point d'un dispositif électronique qui permet de faire varier le gain proportionnel par palier et de manière importante au cours de la phase de maintien.

- mise en place des capteurs de pression dans le moule :

L'hétérogénéité des champs de pression dans un moule a été étudiée en implantant plusieurs capteurs de pression dans différentes zones de l'empreinte.

Nous avons montré la nécessité d'emploi de deux capteurs de pression d'une part, et la position idéale de ces derniers d'autre part :

. à l'entrée de l'empreinte pour réguler la pression de maintien

. au fond de l'empreinte pour déclencher la phase de maintien en pression

- influence de certaines perturbations :

Les performances d'un système d'injection classique et d'un système d'injection modifié, ont été comparées. Nous avons montré la nette supériorité de la régulation de pression dans le moule par rapport à la régulation de la pression hydraulique, notamment dans le cas d'une perturbation de la température d'injection.

La régulation de pression dans le moule entraîne une stabilité remarquable des masse et dimension de la pièce.

Néanmoins, la perturbation de la température du moule n'offre pas d'aussi bons résultats.

- possibilité de régulation de géométrie :

Nous avons montré la linéarité de la relation entre les dimensions de la pièce et la pression régulée dans le moule.

Par ailleurs, cette relation garde un caractère linéaire indépendant de la température du moule.

Ces deux caractéristiques autorisent la régulation, cycle après cycle de la dimension de la pièce et permet d'absorber une perturbation de la température du moule.

- étude des contraintes internes :

Différentes mesures ont mis en évidence la grande similitude des états de contraintes résiduelles dans les pièces injectées avec les deux techniques de régulation.

- étude des lignes de soudure :

Des essais de traction ont montré l'amélioration des caractéristiques mécaniques d'une pièce avec ligne de soudure, en utilisant l'auxiliaire de commande rapporté à la machine.

Le bilan est positif avec néanmoins quelques contradictions telles que :

- des lignes de soudure moins fragiles avec des températures basses d'outillage qui sont sans doute liées à des problèmes de structure et de morphologie du polymère

- si la régulation de pression est efficace face à une perturbation de la température du polymère, des résultats moins intéressants ont été obtenus dans le cas d'une perturbation de la température de l'outillage. Ces phénomènes dépendent probablement de la géométrie du seuil d'injection.

Des travaux sont actuellement en cours pour exploiter et développer les résultats obtenus en entreprise sur des machines de plus forte puissance et des pièces de géométrie plus complexe, en collaboration avec l'industriel qui a participé au soutien de cette étude.

BIBLIOGRAPHIE
---------------

- (1) PABIOT José : Refroidissement et bilan thermique dans les procédés de transformation des polymères  
Comité Français d'Electrothermie -  
Colloque AVIGNON - Mai 1983
- (2) JOHANNABER F. : Injection molding machines, a user's guide - Hanser Publishers - Novembre 1982
- (3) WIPPLER C. : Extrusion de tubes, profilés, câbles, feuilles et films - Cours EAHP-CEMEF-ENSTIMD - Paris - Juin 1989
- (4) NEYRET B. : Extrudeuses et têtes d'extrusion - Société EMS - Octobre 1985
- (5) AVENAS P., AGASSANT J.F., SERGENT J.Ph. : La mise en forme des matières plastiques - approche thermomécanique - Lavoisier - Technique et documentation - 1982
- (7) MADDOCK B.H. : SPE Journal - 15, 383 - 1959
- (8) CHUNG C.I. : Plastics engineering, 48-49 - 1976
- (9) MENGES G. et KLENCK P. : Kunststoffe, 57, 598-603 - 1967
- (10) WIEGERT Marcel : Les techniques de l'Ingénieur Plastiques A 3650
- (11) MUNEHARU S. : Fiber orientation in injection molding Polymer Engineering and Science - Vol. n°16 - 1985
- (12) DEVOS Pierre : Optimisation de la phase de maintien en pression sur une presse à injecter les thermoplastique - DEA UST Lille - Septembre 1986
- (13) MALLOY R.A., CHEN S.J., ORROTH S.A. : A study of injection to holding pressure switch-over techniques based on time, position or pressure - ANTEC 87,225 - 1987
- (14) WORTBERG J. : Process control - Kunststoffverarbeitung I.K.V.
- (15) DEVOS Pierre : Influence des conditions de moulage par injection sur la qualité des pièces en thermoplastique - Cours EAHP-CEMEF-ENSTIMD - Paris Octobre 1988
- (16) PLASTIQUES MODERNES ET ELASTOMERES : Etudes scientifiques et techniques automation en injection - Novembre 1977



- (17) SANCHAGRIN B. : Process control of injection moulding  
Polymer engineering and science. Vol. 23 n°8 -  
juin 1983
- (18) DENES B. : Computer aided "on cycle quality control"  
in injection moulding  
Hurrkar Laboratory, CINCINNATI, OHIO - ANTEC 1982
- (19) AMANO O. et UTSUGI S. : Température measurments of  
polymer melts in the heating barrel during injection  
molding. Part 2. Polymer engineering and science  
Vol. 29 n°3 - Mid February 1989
- (20) PEISCHL G.C. et BRUKER I. : Melt homogeneity in  
injection molding : application of a ring bar device  
Polymer engineering and science Vol. 29 N°3 -  
February 1989
- (21) BONGKEE CHO : Equations of state of polymer  
Polymer Engineering and science Vol. 25 N°18  
December 1985
- (22) BONGARDT W. : Verbesserung dee Prozebführung beim  
spritzgießen durch selbsteinstellende regelungen  
Thèse à l'IKV d'Aachen - 1982
- (23) BONGARDT W. et MENGES G. : An injection moulding  
machine which automatically finds its optimum working  
point - SPE Technical papers ANTEC - 1980
- (24) MENGES G. et BONGARDT W. : Der einsatj von  
Mikrorechmern beim spritzgießen  
Kunststoffe - Plastics n° 27 - 1980
- (25) SCHWAB E. : Sterrerung, Regelung und Prozebführung  
beim Spritzgießen - Plastverarbeiter 1981
- (26) Studienarbeit : Optimierung der nachdruckphase durch  
das PVT - Verfahren bei gleichzeitiger adaption des  
Werkzeuginnendruckreglers. IKV Aachen - Juin 1983
- (27) Engineering and processing news : Injection molding  
control has PVT optimization  
Modern Plastics International - Août 1987
- (28) NUNN R.E. et GROLMAN C.P. : A deductive approach to  
process control  
Plastics engineering - February 1989
- (29) ROTHE J. : Open and closed loop controls on injection  
moulding machines - Kunststoffe German Plastics n°4  
1986
- (30) ISAYEV A.I. et CROUTMAMEL D.L.  
Résidual stress development in the injection molding  
of polymers - Polymer plast. technology Eng. - 1984

- (31) SCHMIDT : Polymer Engineering Vol.1 (1984)
- (32) ITO K. : Japan plastics age n°15 - 1937
- (33) KUBAT J. : Journal of polymer material n°3 - 1981
- (34) TREUTING R.G. et READ. W.T. : Journal of applied physics n°22 - 1951
- (35) AGASSANT J.F., DENIZART O., VINCENT M. : Etude expérimentale et théorique des contraintes résiduelles dans les pièces injectées en matière plastique - Journée SFIP 12 Octobre - 1988
- (36) Rémi DETERRE : Thèse de docteur ingénieur Université Louis Pasteur de Strasbourg, Décembre 1984
- (37) Yoan. D. LANDAU  
Control and System theory (volume 8)  
Adaptative control : the model reference approach  
Marcel DEKKER, INC - 1979
- (38) P. de LARMINAT et Y. THOMAS  
Automatique des systèmes linéaires (vol. 3 :  
Commande) (vol. 2 : Identification)  
FLAMMARION Sciences 1977
- (39) J.P. HAUTIER  
Cours d'automatique des systèmes linéaires  
Asservissement  
ENSTIM DOUAI 1988

Remarque : tous les diagrammes P.V.T. présentés dans ce document sont issus de l'ouvrage :

Kenndaten für die Verarbeitung thermoplastischer Kunststoffe  
THERMODYNAMIK Teil 1  
HANSER 1979

**ANNEXES****TABLE DES ANNEXES**

- ANNEXE 1 : Caractéristiques de la presse à injecter  
BILLION et du VISUMAT 4000
- ANNEXE 2 : Caractéristiques des polymères mis en oeuvre
- ANNEXE 3 : Description des capteurs, carte d'asservissement  
et servodistributeur utilisés
- ANNEXE 4 : Photos des montages de contrôle dimensionnel
- ANNEXE 5 : Résultats des essais dans le cadre de la défini-  
tion de l'emplacement des différents capteurs
- ANNEXE 6 : Résultats obtenus suite à une perturbation de la  
température de l'outillage
- ANNEXE 7 : Résultats obtenus en fonction du niveau de  
pression imposé
- ANNEXE 8 : Analyse des contraintes internes par lumière  
polarisée

1 - PRESENTATION GENERALEINTRODUCTION

SMTP introduit une nouvelle famille de système de contrôle des machines à injecter ; la famille VISUMAT.

Le VISUMAT utilise les dernières nouveautés technologiques en matière de commande, de contrôle et de dialogue.

Les performances de cet équipement sont dues à la puissance de calcul des microprocesseurs qu'il utilise ; sa fiabilité, à l'utilisation de circuits statique ; son confort d'emploi, à un dialogue homme / machine utilisant un vocabulaire simple.

Ce dialogue peut-être assuré :

- d'une part : en direct, par un clavier alphanumérique et un tube cathodique.
- d'autre part : en indirect par bande magnétique, ou par un système hiérarchisé (ordinateur).

DESCRIPTION DE L'EQUIPEMENT DE LA MACHINE

Pour pouvoir faire bénéficier de toutes les possibilités de VISUMAT à la machine, un choix technologique particulier a du être fait pour son équipement.

La machine utilise :

1°) Deux types de capteurs pour informer le système

- a) des capteurs tout ou rien (interrupteur fin de course, bouton poussoir etc...)
- b) des capteurs analogiques (capteur de pression, capteur de position potentiométrique, thermocouple etc...)

2°) Deux types d'actionneurs pour commander la machine

- a) des actionneurs tout ou rien (distributeur hydraulique, pneumatique, contacteur etc...)
- b) des actionneurs proportionnels (servo valve, valve de réduction ou de débit, distributeurs proportionnels etc...)

DESCRIPTION DE L'ENSEMBLE EQUIPEMENT ELECTRONIQUE

Le VISUMAT se compose de 5 parties principales :

- 1°) La partie automate gère tout le déroulement du cycle séquentiel de la machine ainsi que les entrées des différents capteurs (interrupteurs, bouton poussoir etc...) et des différentes sorties qui vont piloter les actionneurs (vérins, moteur, voyant etc...)
- 2°) La partie analogique fait la conversion des grandeurs analogiques mesurées (température, position, pression etc...) en grandeurs numériques ; et la conversion des grandeurs numériques (résultant des calculs) en grandeurs analogiques.
- 3°) La partie calcul traite les informations selon des lois définies pour conduire la machine et pour faciliter le dialogue Homme/machine.
- 4°) La partie gestion surveille, enregistre, archive, centralise les différents paramètres et résultats de fabrication qu'elle tient à la disposition de l'opérateur ou des périphériques .
- 5°) La partie dialogue s'établit sous la forme d'un groupement de textes et de consignes, appelé page, spécifique à une fonction (injection, température etc. visualisé sur l'écran d'un tube cathodique et d'un clavier comportant des touches de fonction et alpha-numériques.

DESCRIPTION DES CARACTERISTIQUES DU FONCTIONNEMENT DE LA MACHINE EQUIPEE VISUMAT1°) Partie injection :

La phase injection peut se décomposer en deux parties

- a) une partie dynamique correspondant au remplissage de l'empreinte du moule.
- b) une partie statique correspondant à la phase maintien de la pression en fin de remplissage de l'empreinte du moule.

La partie dynamique est fractionnée en 4 paliers ajustables en longueur et en vitesse donnant la possibilité d'ajuster le profil de la courbe course/vitesse d'injection.

La pression pendant la phase dynamique est surveillée et comparée à une pression limite que l'opérateur a affichée. Si cette consigne de pression est dépassée, une alarme (HL) est activée permettant de situer dans quel palier cette pression limite a été atteinte, et un ordre est donné pour limiter la pression d'injection à la valeur de la pression de maintien.

Le choix du passage en pression de maintien peut être choisi parmi 3 modes :

- par fonction course du vérin d'injection en fin de palier 4
- par la pression hydraulique relevée dans le vérin d'injection par le capteur de pression
- par la pression de la matière dans le moule, relevée par le capteur moule (voir chapitre mesure de la pression de la matière dans le moule).
- si la pression hydraulique dans le vérin, ou la pression de la matière dans le moule dépassent la consigne de la pression du mode de passage en maintien choisi pendant la phase dynamique, une alarme est activée ; par contre, si cette pression n'a pas été atteinte avant la limite palier 4, une autre alarme est activée.

La pression de maintien peut être modulée suivant 3 temps permettant de profiler une courbe de pression de maintien.

Une décompression de la chambre d'injection peut-être faite avant ou après ou avant et après la plastification (dosage).

En option un cycle d'éjection de la goutte froide (purge de la buse) est mise en place.

Pour pouvoir injecter les matières therm durcissables le cycle d'injection permet l'injection compression et l'injection avec dégazage.

## 2\*) Partie régulation thermique :

L'équipement de base standard comporte 7 points de régulation plus une zone de mesure :

- 4 zones fourreau
- 1 zone nez
- 1 zone buse (ou canaux chauds ou zone moule)
- 1 zone moule
- 1 zone mesure température matière \*

une extension permet d'augmenter le nombre de points de régulation de 7 à 15 répartis comme suit :

- 1 zone fourreau supplémentaire au maximum
- 7 zones moules supplémentaires au maximum

La partie régulation thermique de l'équipement de base des grosses machines et des machines spéciales est précisée sur le descriptif de chaque machine.

La capacité maximale en zone moule de la régulation thermique est de 14 zones (pour un nombre supérieur consulter la SMTP Billion)

\* La zone température de matière est une option conditionnée par la mise en place de la sonde et de son support dans le bout du fourreau.

Dans le cas d'une machine Bi-matière 10 points sont réservés pour réguler le 2eme fourreau d'injection et ses liaisons avec le 1er fourreau.

Chaque zone peut-être définie pour travailler soit :

- sur contacteur (technique encore valable sur les zones à grande inertie)
- sur relais statique (TRIAC.THYRISTORS) pour les zones à faibles inerties (buse, cartouche chauffante etc...)

Les zones affectées au fourreau fonctionnent exclusivement en régulateurs ; les zones affectées au buse ou au moule peuvent fonctionner en doseur d'énergie, ce montage étant parfois rendu nécessaire par l'impossibilité qu'il y a à poser une sonde dans la zone que l'on veut contrôler.

### Mise en chauffe progressive

- La mise en température du fourreau et celle du moule s'effectuent d'une manière progressive et homogène ; pour ce faire les consignes de chaque point de régulation d'un ensemble sont fractionnées en 10 paliers. La montée en température se fera en surveillant chaque point de régulation.

Le passage d'un palier à un palier supérieur sera fait quand toutes les zones auront atteint l'égalité avec leur fraction de consigne respective.

Ce dispositif protège les éléments chauffants et les éléments chauffés contre les chocs thermiques.

### Mise en état de veille

- La mise en service de cette fonction fait que l'ensemble du fourreau sera régulé autour d'une température choisie et ce sans intervention au niveau de chaque zone. A la suppression de cette fonction l'ensemble régulation reprendra son allure normale.

Ce dispositif est pratique pour mettre en attente la machine sans être obligé de refaire un cycle de chauffage avec tous les inconvénients qui en découlent (perte de temps, contraintes thermiques reprise d'humidité etc...)

### Surveillance d'écart de température

A chaque consigne des points de régulation de température est associées deux consignes d'écart (en + et en -)

Ces consignes délimitent une zone autour de la consigne de régulation et permettent une surveillance de cette zone. Le débordement de cette zone est signalé avec en plus une action sur la vis (voir chapitre sécurité vis).

.../...

.../...

VISU A3

VISU - A4

CARACTERISTIQUES DES FONCTIONS REGULATEUR

- Entrée mesure thermocouple fer-constantan type J
- Etendue de la mesure 0-400°C
- Surveillance de l'écart autour du point de consigne (en plus et en moins).
- Réglage de la bande proportionnelle de 0 à 10% de l'étendue de mesure.
- La constante de temps d'action dérivée est ajustée à la personnalisation de l'équipement en fonction de la machine.
- La sortie de régulation peut être faite suivant l'option choisie à la personnalisation soit sur relais soit sur triac commuté au zéro.

La période d'intervention mini du relais est de 10 secondes  
 la période d'intervention mini du triac est de 1/seconde

CARACTERISTIQUES DES FONCTIONS DOSEUR D'ENERGIE

L'affichage du réglage se fait de 0 à 99%  
 La sortie se fait sur triac par train d'ondes réglage mini (1%) égal à une période pleine de la fréquence secteur.

Sécurité vis

La sécurité vis prend en compte le signal d'écart négatif des zones fourreau, interdit la commande d'injection et de rotation vis (plastification).

Le coefficient proportionnel

A chaque zone est affecté un coefficient proportionnel réglable pour permettre d'ajuster au mieux les performances de la régulation en fonction des caractéristiques de cette zone.

Contrôle du circuit de refroidissement du moule

La température du moule est bien souvent le résultat d'un équilibre thermique entre les calories amenées par la matière injectée et les calories évacuées par le circuit de refroidissement. Cet équilibre est rompu si il y a interruption du cycle de la machine.

Pour minimiser les effets de cet arrêt de cycle, le temps de cycle étant défini comme étant le temps qui s'écoule entre deux commandes de fermeture du moule, le calculateur compare le temps du cycle précédent à celui qui est en cours ; dès que ce temps devient plus long un ordre d'arrêt coupe le circuit de refroidissement.

Plastification

La vitesse vis est régulée pour rester constante malgré les variations de la puissance demandée à la vis. L'affichage est fait en tours/minute. La rotation de la vis est décélérée progressivement en fin de dosage pour assurer un arrêt avec précision.

3°) Partie fermeture/ouverture du moule :

La course de fermeture et ouverture du moule peut-être fractionnée en 3 paliers ajustables en longueur et en vitesse .

- a) décollage / accélération
- b) rapide
- c) décélération / accostage

Dans la partie contrôlée par le 3eme palier dans le sens fermeture du moule, on peut régler la pression afin de limiter la force appliquée au moule. Ce réglage combiné avec la décélération de la vitesse assure une protection du moule.

Après avoir contrôlé la bonne exécution de la fermeture du moule, la presse est verrouillée. La force de ce verrouillage est réglable.

4°) Partie éjection hydraulique des pièces

La commande de l'éjection est programmable sur toute la course d'ouverture du moule.

L'éjection peut-être :

- a) temporisée en sortie, c'est-à-dire maintenue commandée sortie pendant un temps.
- b) pulsée, c'est-à-dire faisant des cycles en séquence de sortie et de rentrée.
- c) retardée, c'est-à-dire commandée après un temps.

La pression et la vitesse d'éjection ne sont pas prise en compte par Visumat.

5°) Partie commande des mouvements extérieurs (H.M)

(noyau dans un moule, éjection, système d'évacuation des pièces etc...) Visumat peut être équipé pour gérer et commander en synchronisme avec le cycle de la machine jusqu'à huit actionneurs avec leurs contrôles.

La programmation de ces HM se fait à partir d'une page spécifique N°13 sur laquelle, l'utilisateur déclare le nombre d'actionneurs utilisés, et si ces actionneurs comportent des contrôles de fin de mouvement. A dix séquences du cycle de la machine (avant fermeture, après fermeture partielle, après fermeture après verrouillage, après injection, avant déverrouillage, avant ouverture, après ouverture partielle, après ouverture, avant éjection) est associé un folio repère de 1 à 10 qui est matérialisé sur l'écran par une matrice composée de huit lignes, de huit points. Par une procédure simple en positionnant des 0 des 1 et des 2 le programme du déroulement des cycles extérieurs est programmé par l'utilisateur. Ce programme spécifique peut-être mémorisé sur une bande magnétique, seul, ou avec le programme de la machine, ou avec le programme de fabrication.

La version de base est équipée :

- 1°) des sorties de commande et des entrées de contrôle, pour un mouvement hydraulique
- 2°) des sorties de commande et des entrées de contrôle, pour un actionneur spécifique à l'utilisateur, pour un mouvement à commande électrique (24V 1A)
- 3°) des sorties de commande sans les entrées de contrôle pour un actionneur spécifique à l'utilisateur (par exemple : éjection pneumatique)

A la demande du client l'équipement peut-être équipé de 5 commandes avec leurs contrôles en supplément.

Pour assurer le séquençement de ces mouvements dans le cas où le contrôle de fin de mouvement n'est pas jugé nécessaire, on peut utiliser par programmation un temps.

La pression et le débit pour les prises hydrauliques mises à la disposition de l'utilisateur ne sont pas prise en compte par Visumat.

CARACTERISTIQUES GENERALES DES POLYMERES UTILISES

RESINE A.B.S

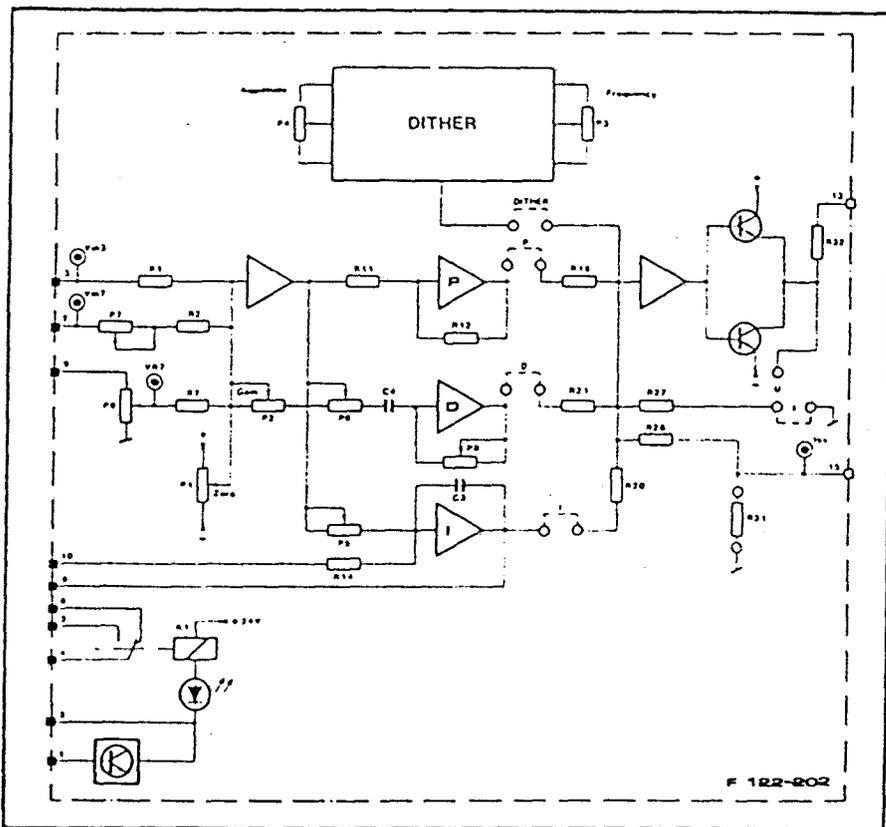
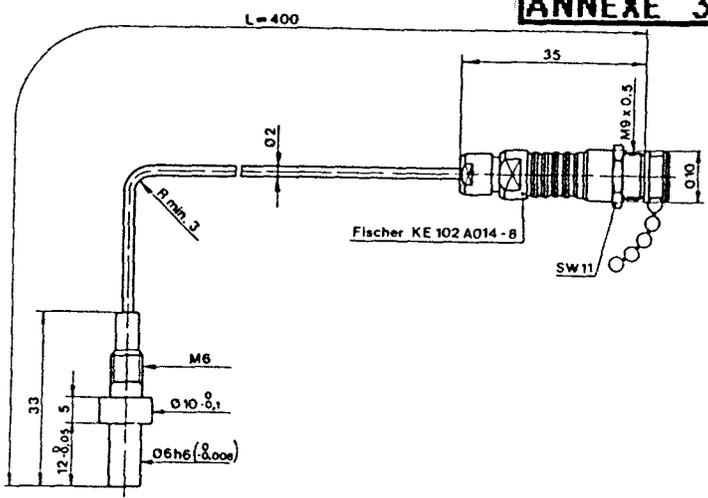
Propriété	Unité	Norme	
<b>Propriétés mécaniques</b>			
Contrainte au seuil d'éboulement*	N/mm <sup>2</sup>	DIN 53455	58
Contrainte à la rupture	N/mm <sup>2</sup>	DIN 53455	39
Allongement au seuil d'éboulement	%	DIN 53455	2,9
Allongement à la rupture	%	DIN 53455	15
Module d'élasticité (en traction)	N/mm <sup>2</sup>	DIN 53457	2700
Module de cisaillement	N/mm <sup>2</sup>	DIN 53445	950
Résistance à la flexion*	N/mm <sup>2</sup>	DIN 53452	90
	kJ/m <sup>3</sup>	DIN 53453	non brisé
Résistance au choc	kJ/m <sup>2</sup>	DIN 53453	80
	kJ/m <sup>2</sup>	DIN 53453	70
Résistance au choc sur éprouvette entaillée	kJ/m <sup>2</sup>	DIN 53453	11
	kJ/m <sup>2</sup>	DIN 53453	4
Résilience avec entaille (Iodt)	kJ/m <sup>2</sup>	ISO 180	28
Epaisseur d'éprouvette 3,2 mm	J/m	ISOIR 180	280
Résistance au choc en barreau perforé	kJ/m <sup>2</sup>	DIN 53753	25
Dureté à la bille H 358/30	N/mm <sup>2</sup>	DIN 53456	120
<b>Propriétés thermiques</b>			
Température de ramollissement Vicat VST/BSO	°C	DIN 53460	109
Température de fléchissement sous charge	°C	DIN 53461	104
Température selon ISO 75	°C	DIN 53461	109
Température max. admissible en service*	°C	—	90
Coefficient de dilatation linéaire	1/K	DIN 53752	6-11 · 10 <sup>-1</sup>
Conductivité thermique (entre -40°C et +80°C)	W/(K · m)	DIN 52612	0,17
<b>Propriétés électriques*</b>			
Permittivité relative (1 MHz)	—	DIN 53483	3,0
Tangente de l'angle de perte diélectrique (1 MHz)	—	DIN 53483	0,013
Résistivité volumique	Ω · cm	DIN 53482	10 <sup>11</sup>
Résistance superficielle R <sub>s</sub>	Ω	DIN 53402	10 <sup>11</sup>
Rigidité diélectrique*	kV/mm	DIN 53481	130
Résistance au cheminement	CT I	DIN IEC 112/	600
	CT (km)	VDE 0303 T.1	300
<b>Propriétés diverses</b>			
Masse volumique	g/cm <sup>3</sup>	DIN 53479	1,06
Indice de fluidité MFI 200/21,6	g/10 min	DIN 53735	6
Retrait de moulage*	%	DIN 53735	3
	mg	DIN 16901	0,4 - 0,7
Absorption d'eau	%	DIN 53495	25
	%	DIN 53495	0,4

RESINE POLYPROPYLENE

INJECTION

Caractéristiques Propriétés Eigenschaften	Unité Unit Einheit	Norme Standard Norm	3030 MIN 1	3050 MIN 1
Matières 230°C / 2,16 kg Matières 230°C / 2,16 kg Schmelzprobe 230°C / 2,16 kg	g/10mm	ASTM D 1238 DIN 53735 ISO R 1183	3	5
Densité Density Dichte		ASTM D 1505 DIN 53479 ISO R 1133	0,905	0,905
Température de fusion Schmelzpunkt	°C	Méthode APPRYL*	166	166
Température Vicat Vicat temperature Vicat Erweichungstemperatur	10 N 50 N	ASTM D 1525 DIN 53460 ISO R 306	151 100	151 100
Température de déformation sous charge Heat deflection temperature Formbeständigkeit in der Wärme	0,46 MPa 1,82 MPa	ASTM D 648 DIN 53461 ISO R 75	95 63	96 64
Résistance au seuil d'éboulement Strength at yield point	MPa	ASTM D 638 DIN 53455 ISO R 327	34	34
Allongement à la rupture Elongation at break Bruchdehnung	%	ASTM D 638 DIN 53455 ISO R 327	> 600	> 600
Module d'élasticité en flexion Flexural modulus E - Modul (Biegezug)	MPa	ASTM D 790 DIN 53455 ISO R 178	1300	1400
Dureté Shore D Shore D hardness	D	ASTM D 1706 DIN 53503 ISO —	74	74
Choc 1200 encaixe 1200 impact test 1200 Schlaganstoß	23°C 0°C -20°C	ASTM D 256 DIN — ISO R 180	58 33 —	55 30 —
Choc PMI PMI impact test PMI Schlaganstoß	-20°C -40°C	BS 2782 - 306 B	—	—
<p>APPLICATIONS :</p> <p>APPLICATIONS :</p> <p>ANWENDUNGEN :</p>				
<p>*Méthode APPRYL par DSC montée en température de 20°C/min. APPRYL method by DSC test in temperature 20°C/min. APPRYL-Verfahren mittels DSC bei einer Temperatur von 20°C/min</p>				

<b>Gamme</b>	bar	0 ... 2000	206
<b>Gamme partielle étalonnée</b>	bar	0 ... 200	
<b>Surcharge</b>	bar	2500	
<b>Sensibilité</b>	pC/bar	-8	
<b>Linéarité, toutes les gammes</b>	% FSO	≤ ±1	
<b>Fréquence propre</b>	kHz	>40	
<b>Sensibilité à l'accélération</b>	bar/g	<0,005	
<b>Gamme de température d'utilisation</b>			
Capteur	°C	0 ... 200*	
Connecteur	°C	0 ... 170	
<b>Coefficient de température de la sensibilité</b>	%/°C	±0,01	
<b>Capacité</b>	pF	~40	
<b>Résistance d'isolement</b>			
à 20 °C	Ω	≥10 <sup>13</sup>	
à 200 °C	Ω	≥10 <sup>12</sup>	
<b>Masse (incl. câble et connecteur)</b>	g	27	

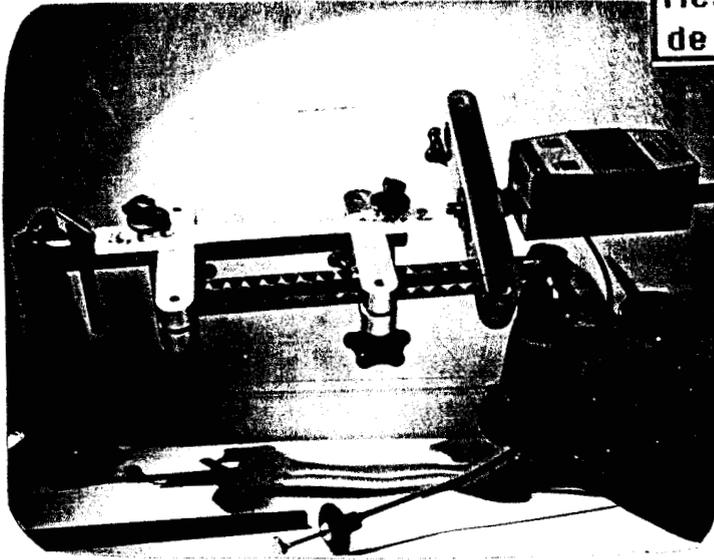
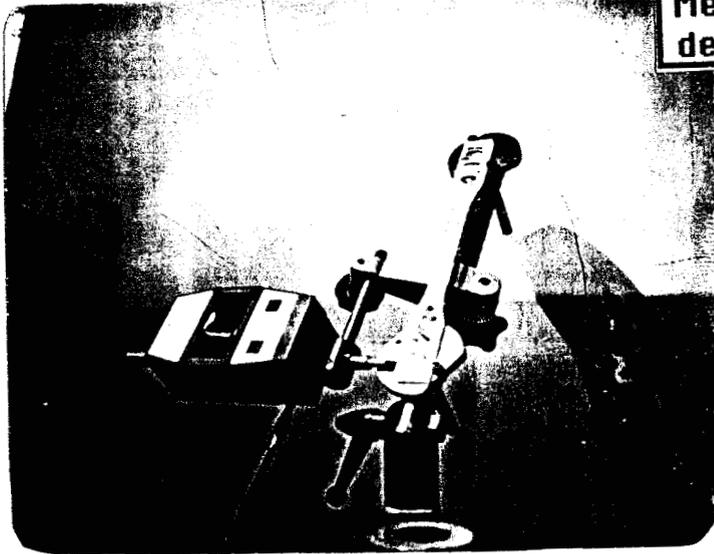
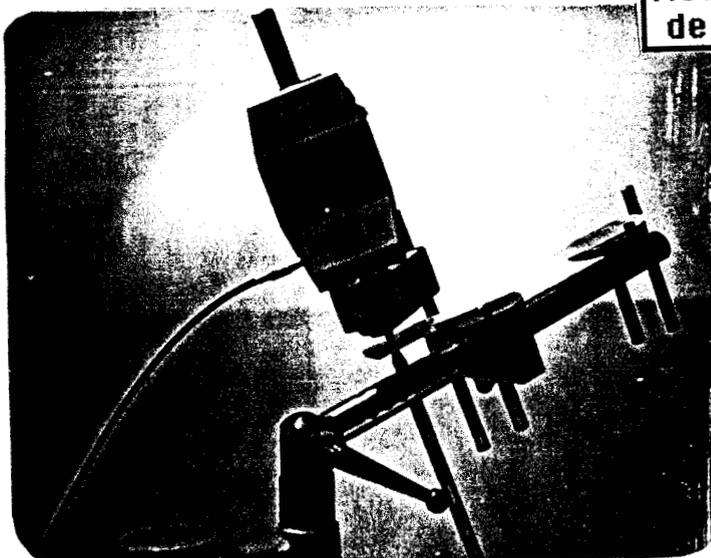


**Caractéristiques des capteurs de pression implantés dans l'outillage**

**Caractéristiques de la carte d'asservissement mise en place**

**Caractéristiques du servo-distributeur installé sur la presse**

SERIE	D642		
Plan de pose diamètre nominal	CETOP 7 Ø 19		
Débit nominal (± 10%) avec 10 bar de perte de charge	160 l/min	160 l/min	160 l/min
Constitution	2 étages	2 étages	3 étages
Exécution du tiroir	Standard	Hte réponse	Standard
Servovalve pilote	D061	D061	D076
Temps de réponse pour 0 à 100 % de la course*	120 ms	35 ms	16 ms
Seuil*	< 0,25%	< 0,4%	< 0,3%
Hystérésis*	< 1%	< 1,5%	< 1%
Dérive du zéro pour T = 55°C	< 1,5%	< 1,5%	< 2%
Débit de fuite	5,5 l/min	5,5 l/min	4,5 l/min
Débit utile* au pilotage pour 100 % d'amplitude	3 l/min	3 l/min	20 l/min
Poids	11,3 kg	11,4 kg	11,6 kg

**MONTAGES DE CONTROLE DIMENSIONNEL DES EPROUVETTES****Mesure de la longueur  
de l'éprouvette ISO 1****Mesure de la largeur  
de l'éprouvette ISO 1****Mesure de l'épaisseur  
de l'éprouvette ISO 1**

RESULTATS EXPERIMENTAUX

Matière PP 3050 MN 1 APPRYL

Paramètres machine

Dosage 55 mm lim. pression 135 b

Paliers 1 2 3 4

Course 0.30 0.20 0.10 0.310

Vitesses 0.10 0.10 0.10 0.10

Maintien par P moule à 0.090 volt

Durée du maintien 20 s à 90 bars Hydraulique

Dosage 100 tours/mn contre pression 2 bars

Décompression après dosage 1 mm

Températures

Zones	1	2	3	4	nez
°C	180	210	220	225	225

Asservissement pression du polymère : 4.65 volts

Retard 0.5 s P.I.D. : 1.0.0.

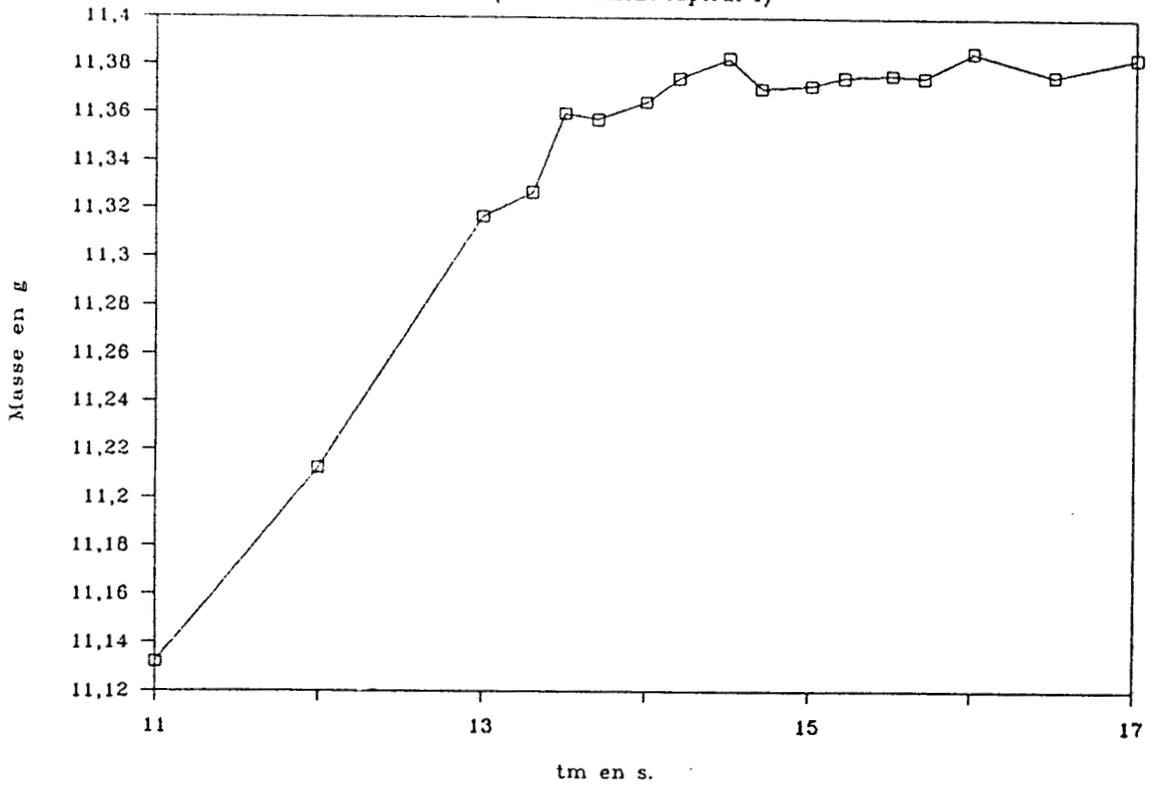
CAPTEUR N°1=	FOND ISO 1
CAPTEUR N°2=	ENTREE ISO 1
CAPTEUR N°3=	FOND VICAT
CAPTEUR N°4=	ENTREE VICAT

DEFINITION DE L'EMPLACEMENT DES  
DIFFERENTS CAPTEURS

ASSERVISSEMENT SUR LE CAPTEUR AU FOND DE L'ISO1

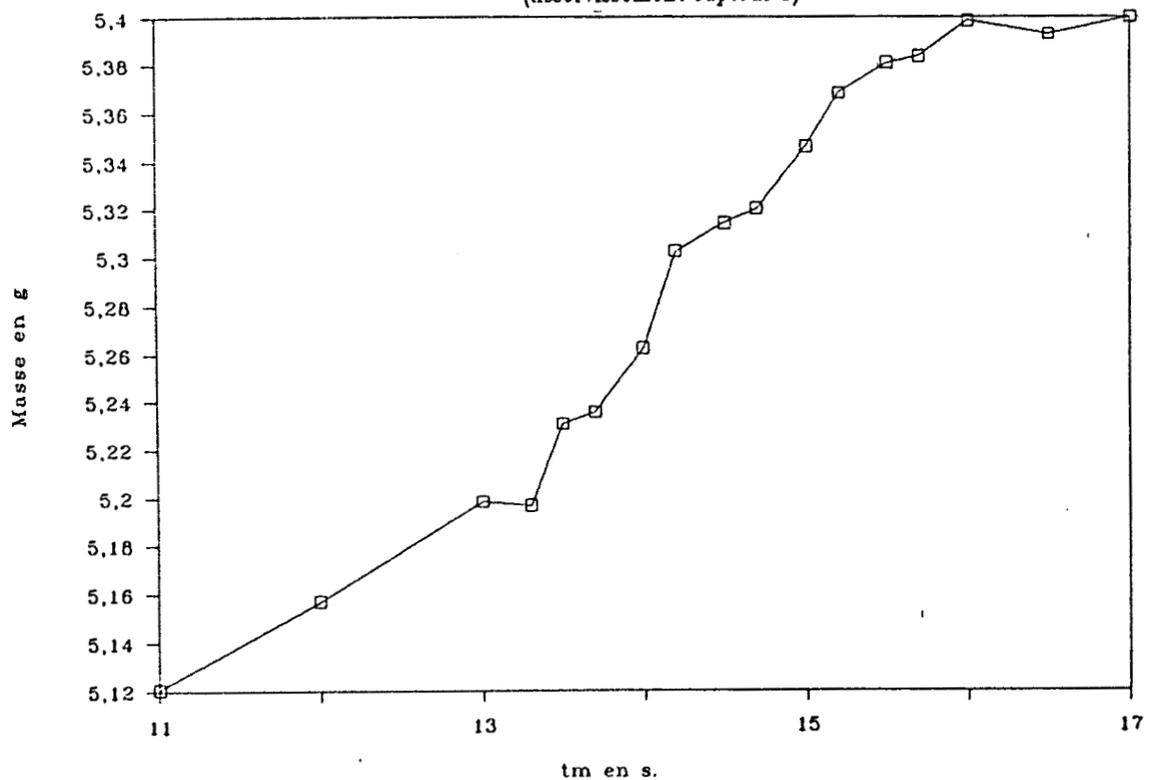
MoyIsol en fonction du temps

(Asservissement capteur 1)



MoyVicat en fonction du temps

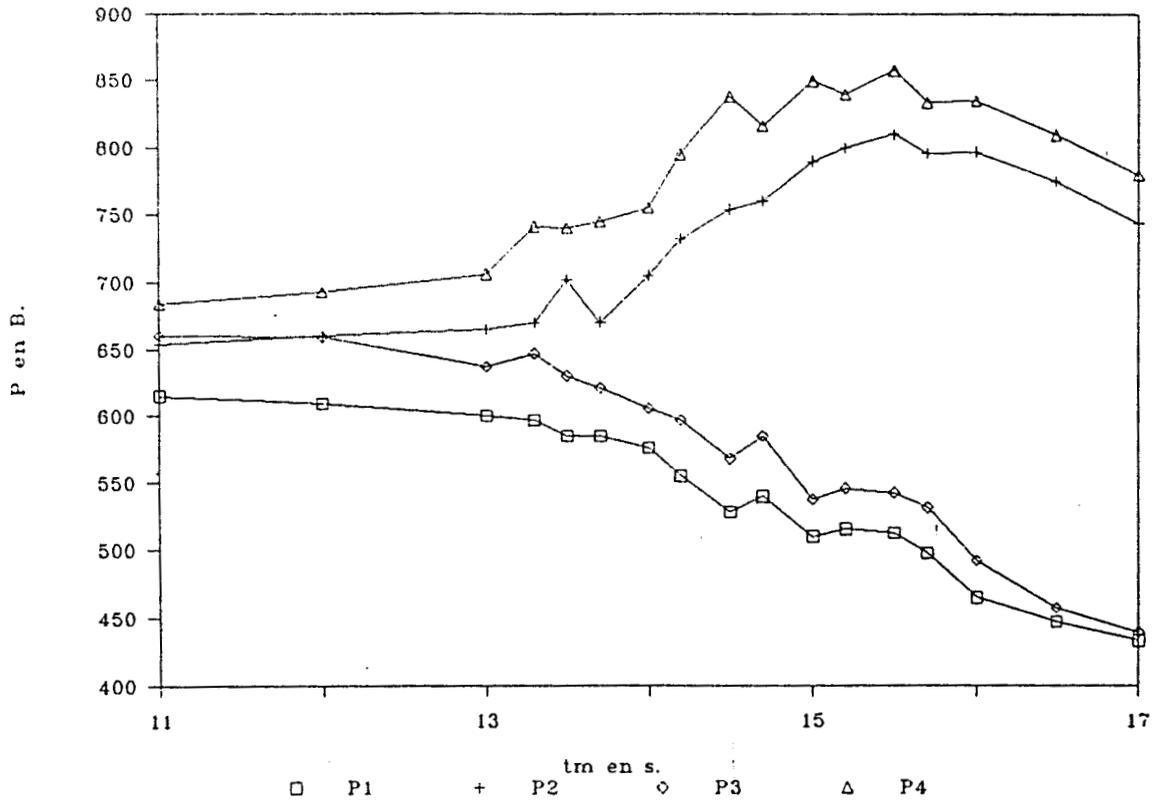
(Asservissement capteur 1)



**ASSERVISSEMENT SUR LE CAPTEUR AU FOND DE L'ISO 1**

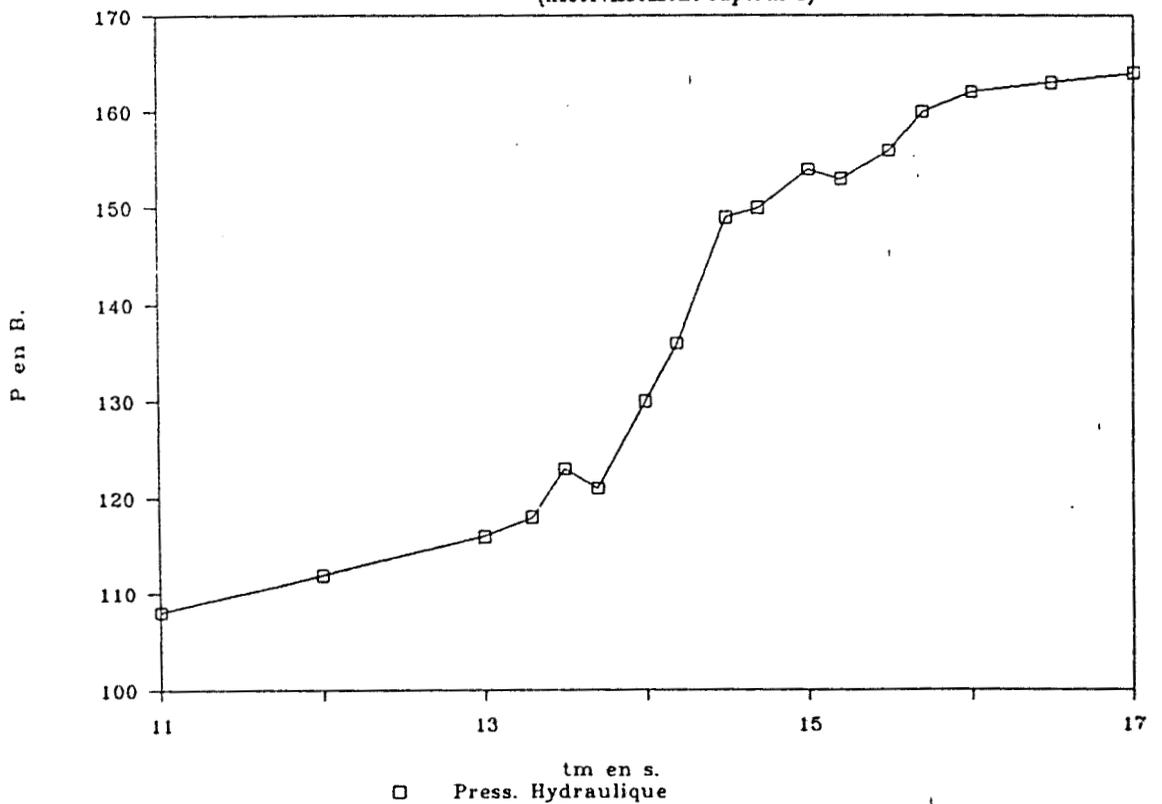
**PRESSIION EN FONCTION DU TEMPS**

(Asservissement capteur 1)



**PRESSIION EN FONCTION DU TEMPS**

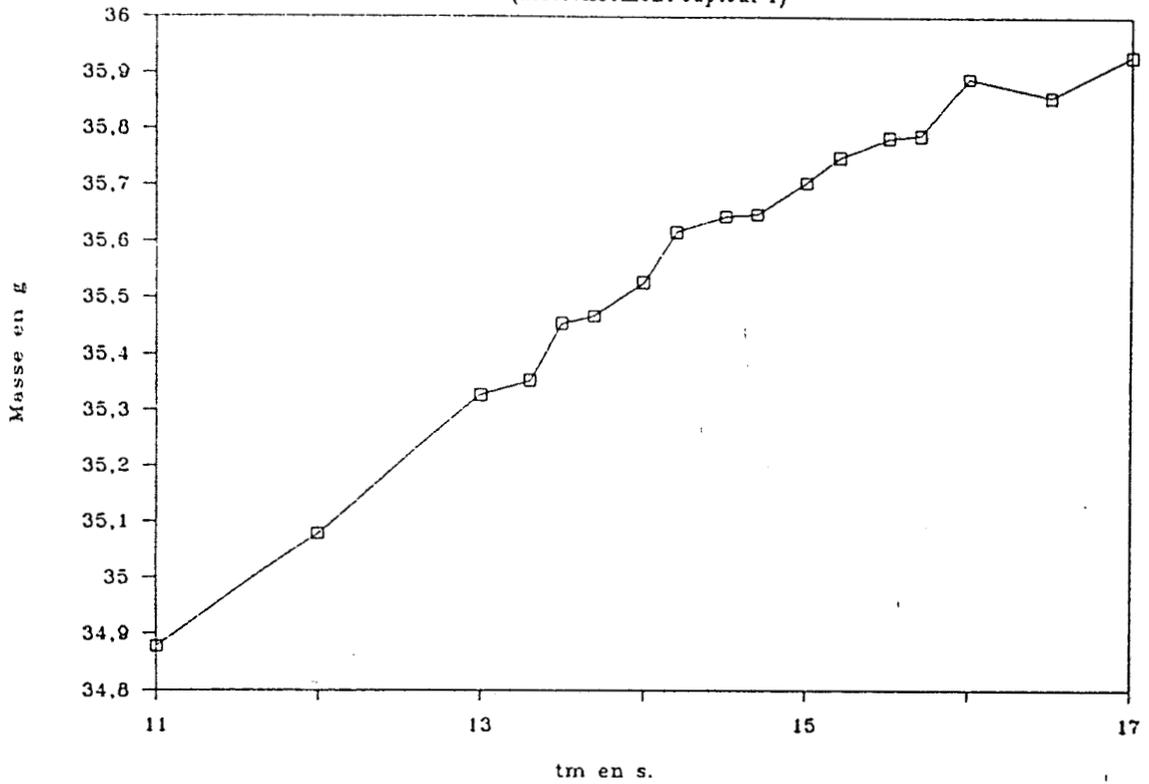
(Asservissement capteur 1)



ASSERVISSEMENT SUR LE CAPTEUR AU FOND DE L'ISO 1

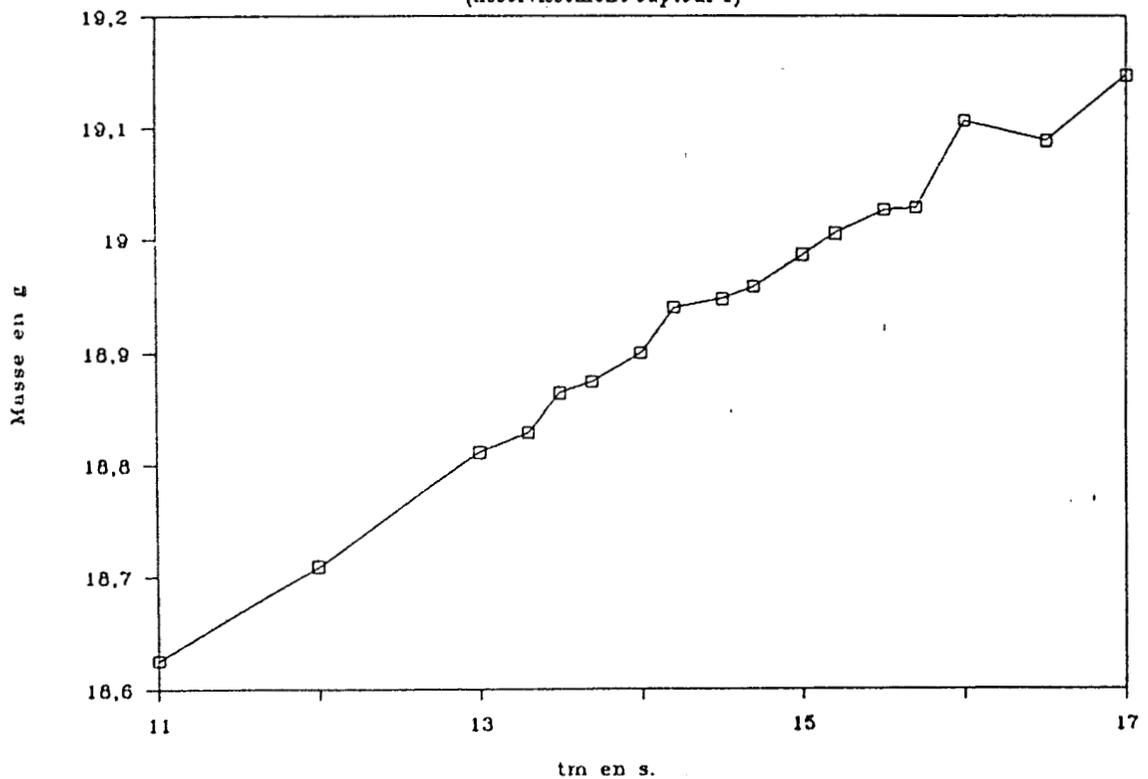
MoyGrpTt en fonction du temps

(Asservissement capteur 1)



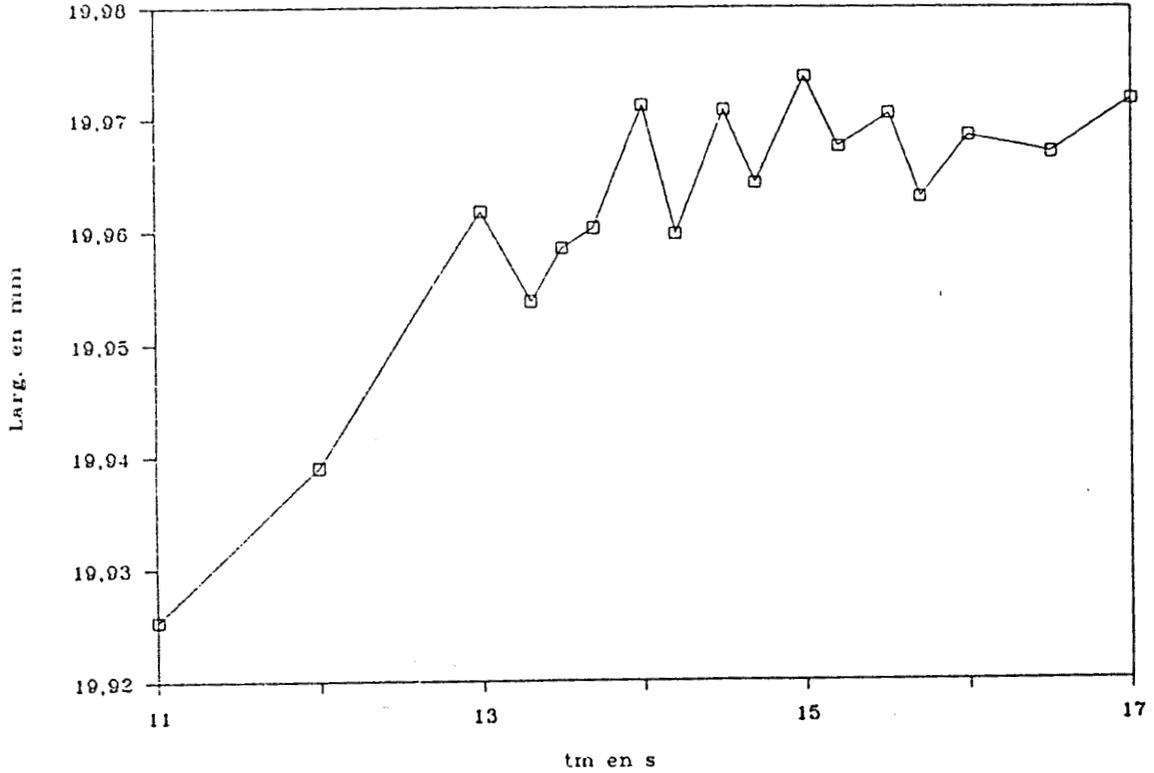
MoyGrap en fonction du temps

(Asservissement capteur 1)

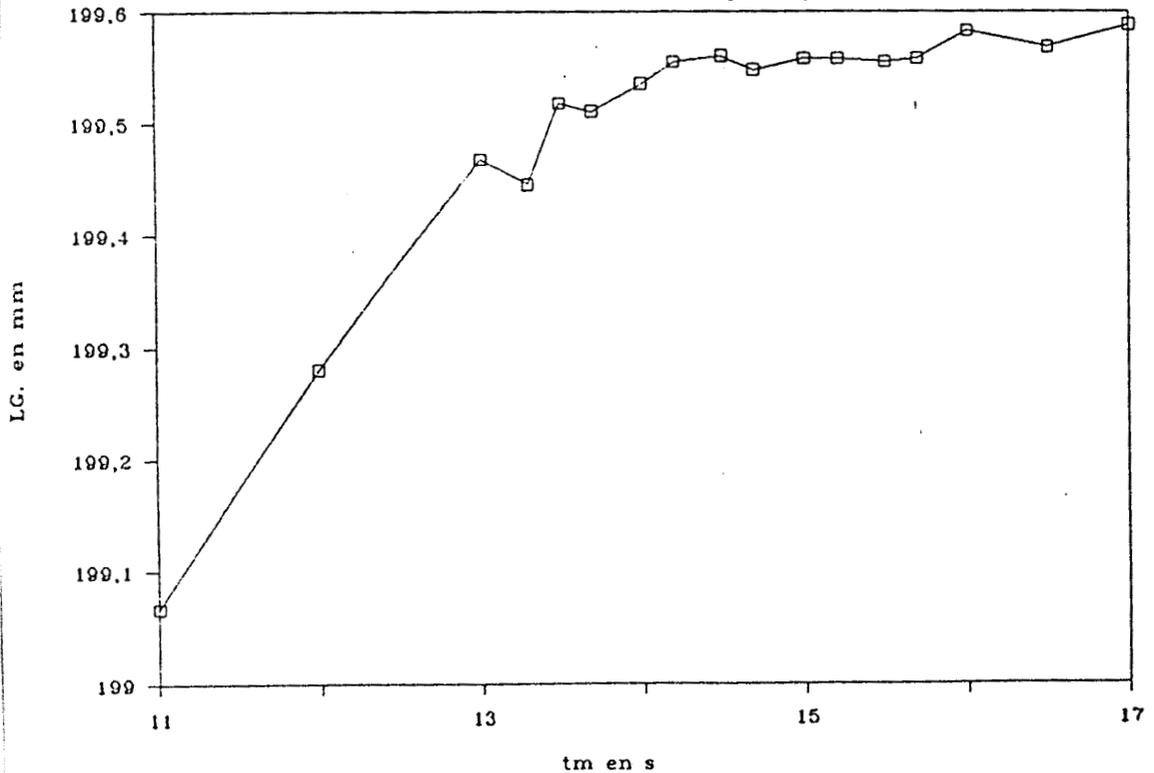


ASSERVISSEMENT SUR LE CAPTEUR AU FOND DE L'ISO 1

LARGEUR FIN ISO1 EN FONCTION DU TEMPS  
(Asservissement capteur 1)

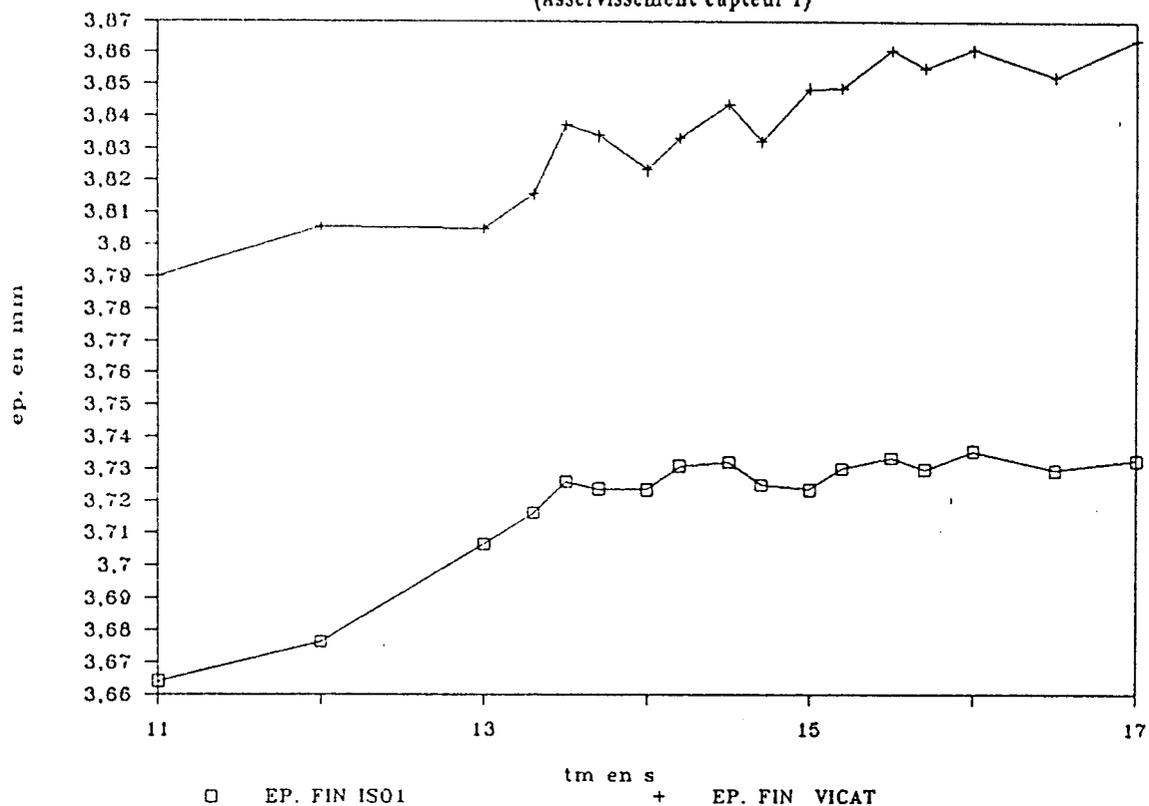


LONGUEUR ISO1 EN FONCTION DU TEMPS  
(Asservissement capteur 1)



## EPAISSEURS EN FONCTION DU TEMPS

(Asservissement capteur 1)

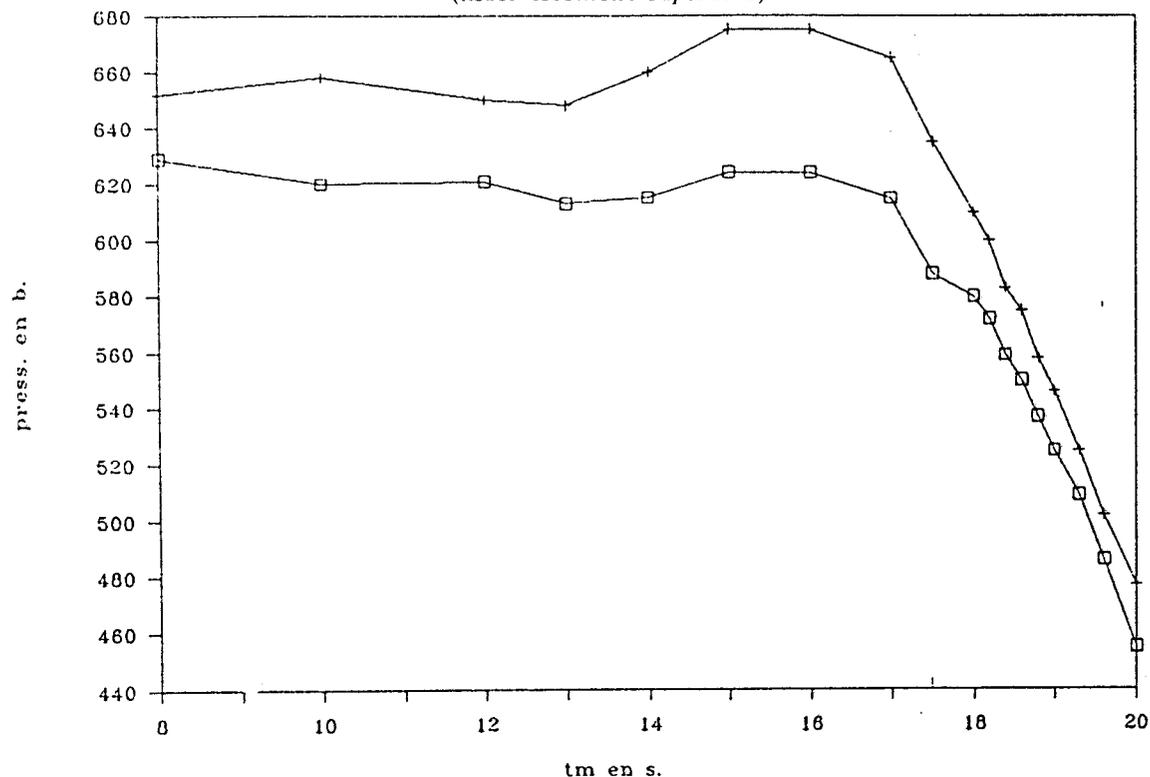


**ASSERVISSEMENT SUR LE CAPTEUR AU FOND DE L'ISO 1**

## ASSERVISSEMENT SUR LE CAPTEUR D'ENTREE DE L'ISO 1

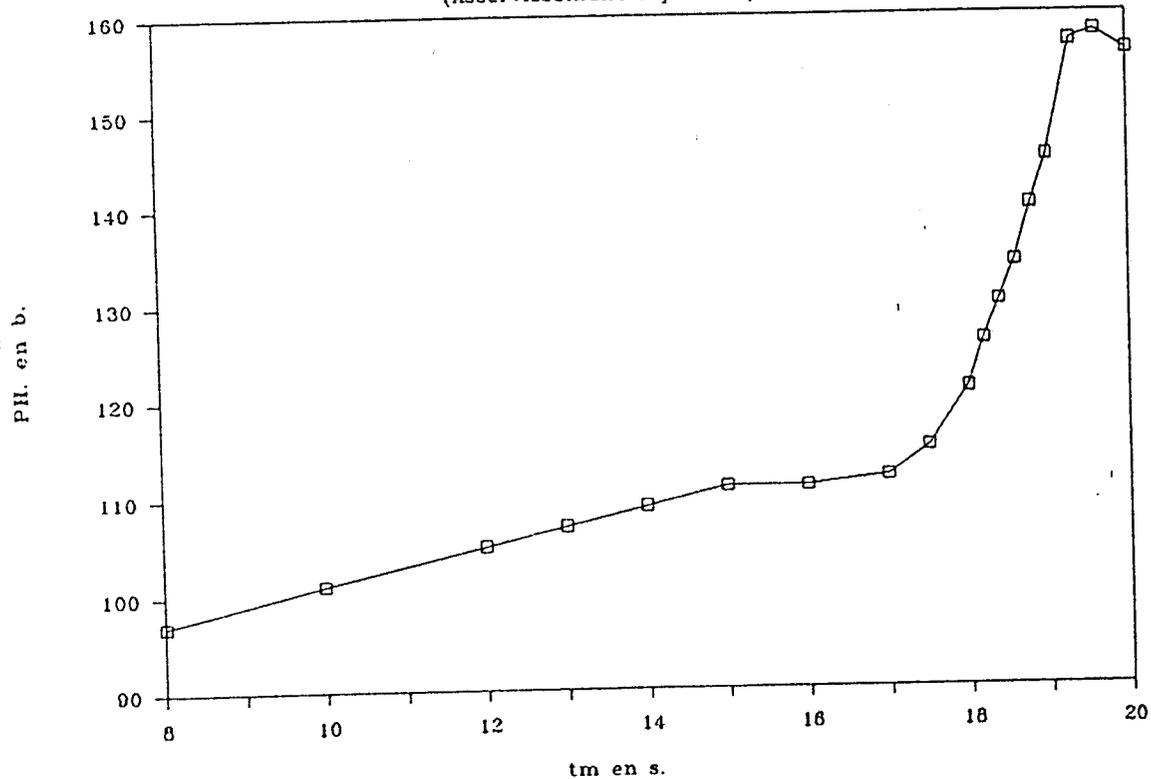
### PRES. MATIERE EN FONCTION DU TEMPS

(Asservissement capteur 2)



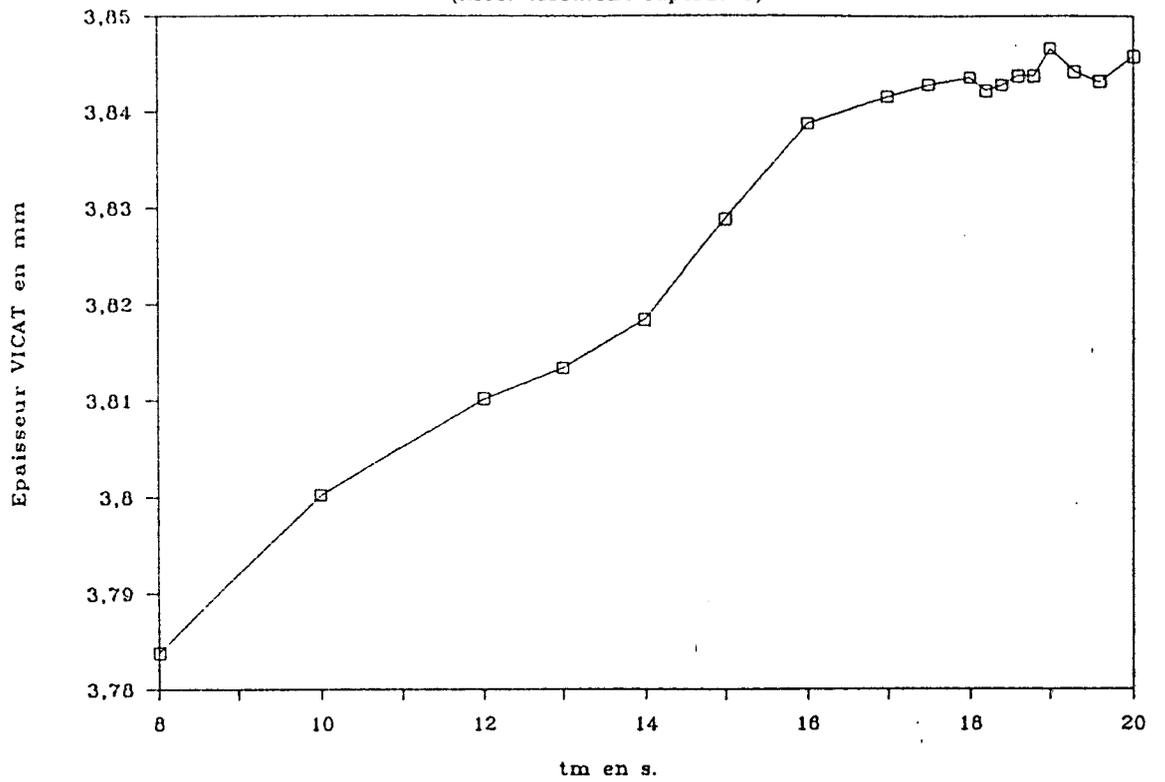
### PRES. HYDRAULIQUE EN FONCTION DU TEMPS

(Asservissement capteur 2)



**ASSERVISSEMENT SUR LE CAPTEUR D'ENTREE DE L'ISO1****EPAISSEUR VICAT EN FONCTION DU TEMPS**

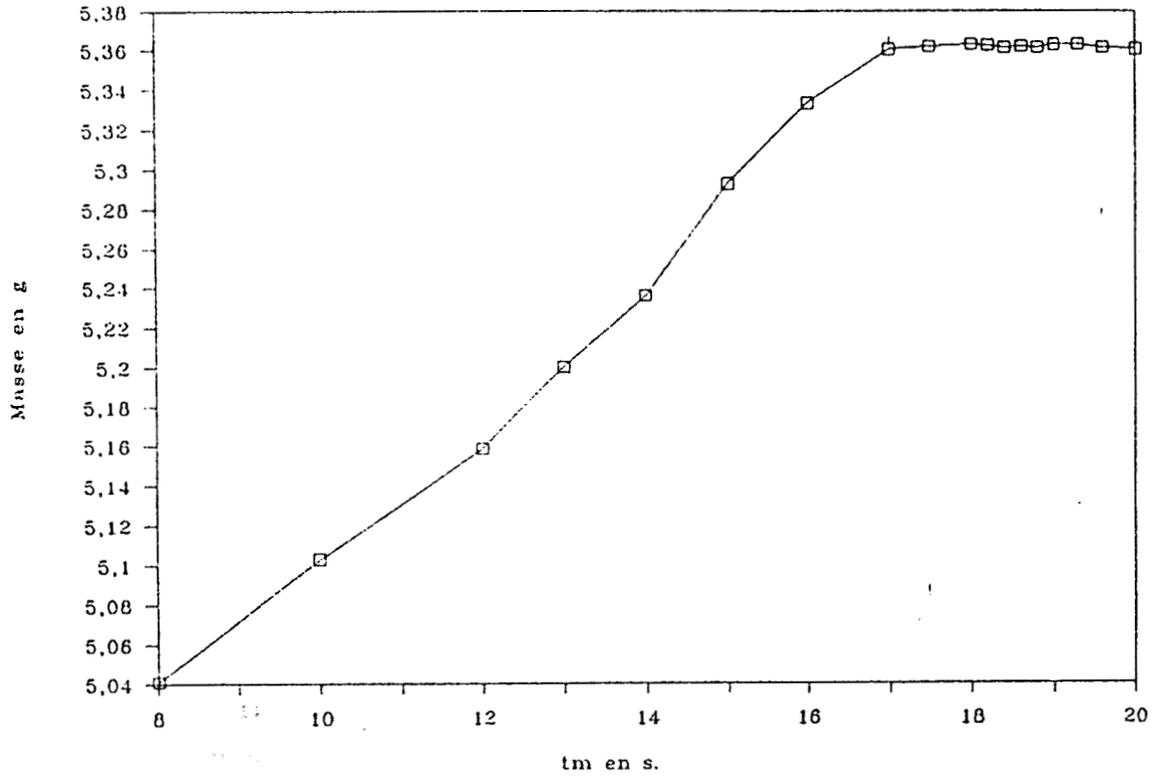
(Asservissement capteur 2)



## ASSERVISSEMENT SUR LE CAPTEUR D'ENTREE DE L'ISO 1

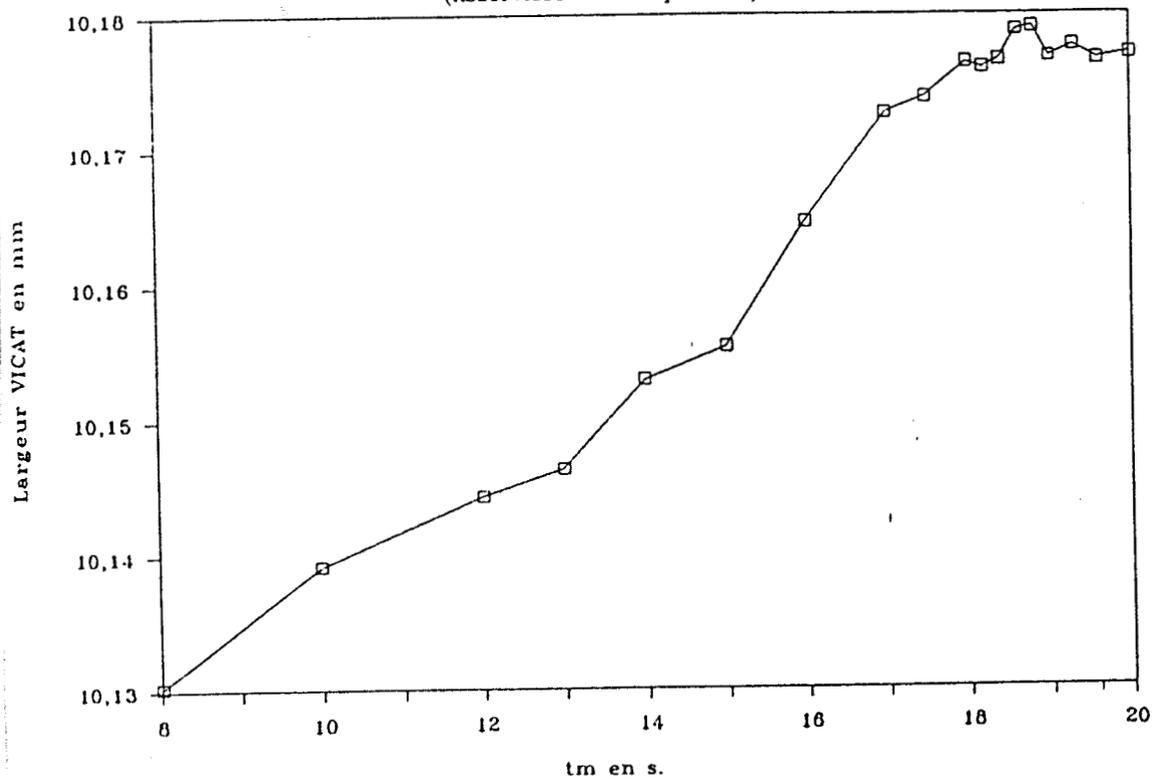
### MASSE VICAT EN FONCTION DU TEMPS

(Asservissement capteur 2)

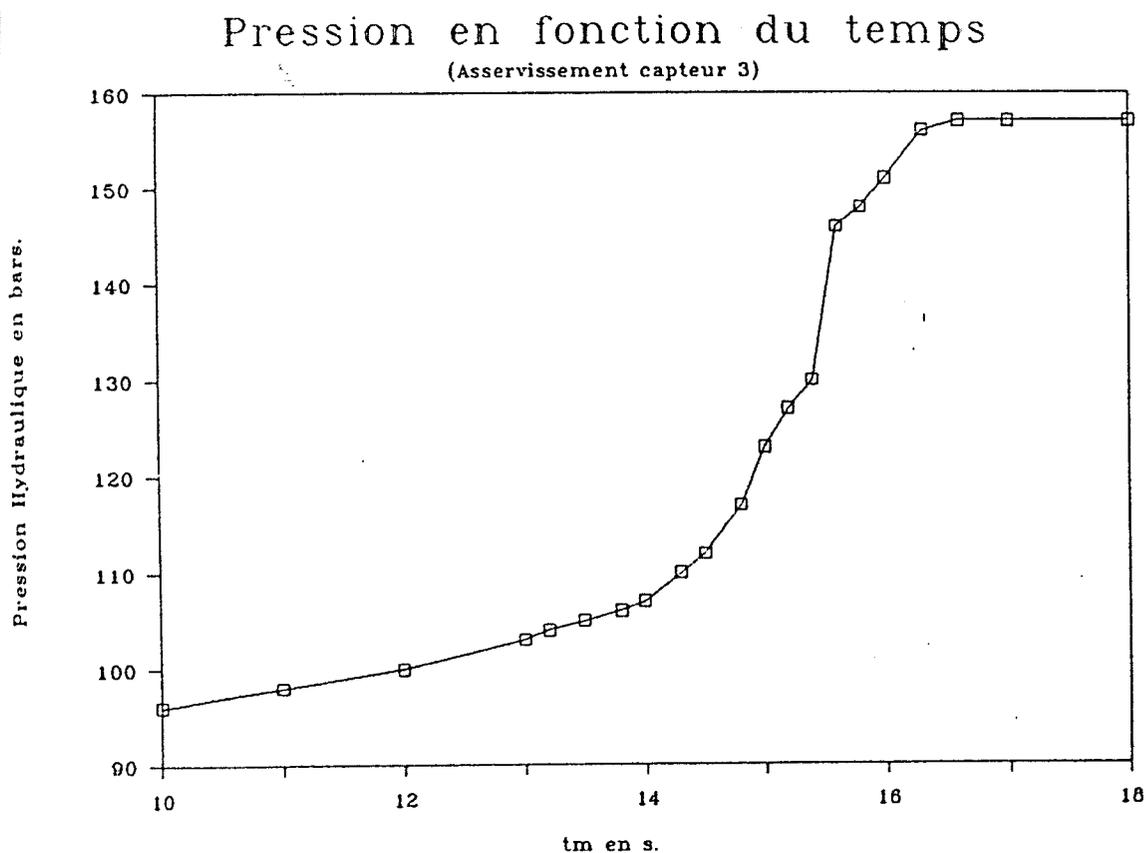
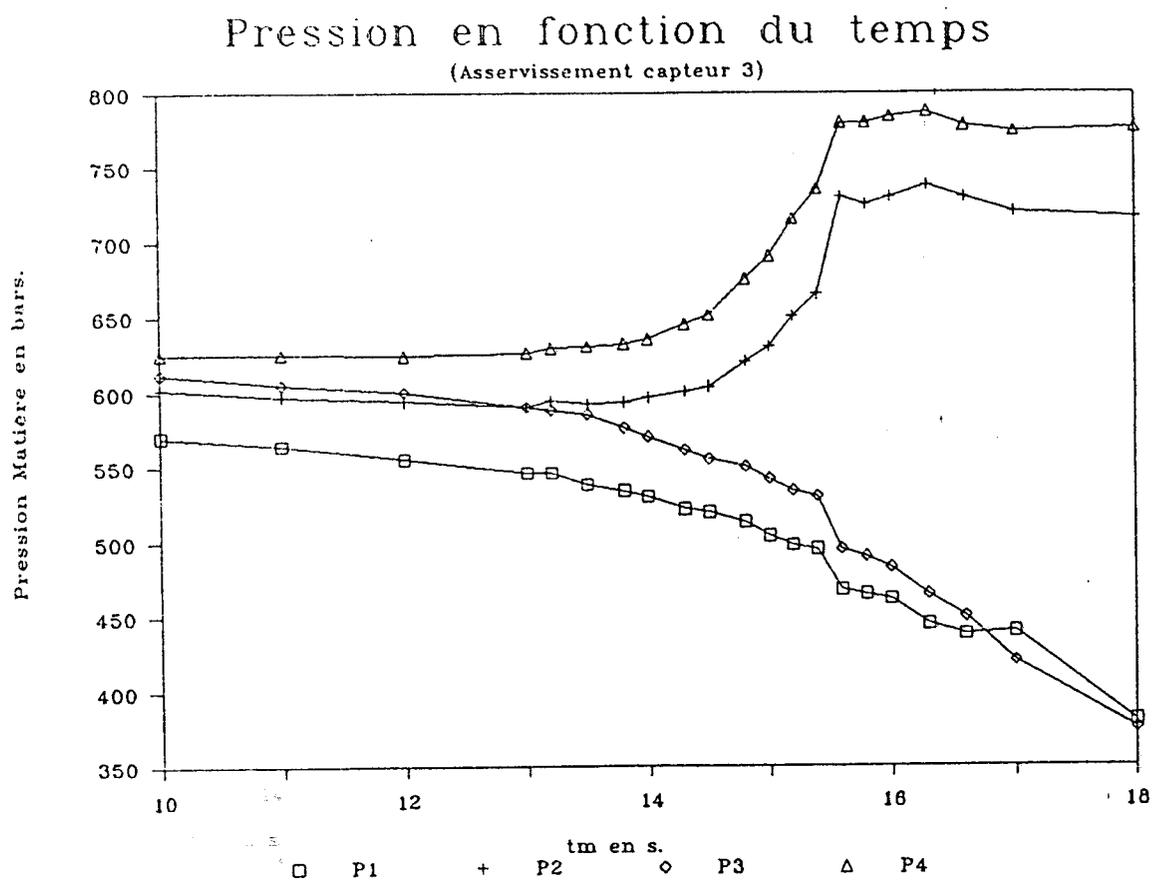


### LARGEUR VICAT EN FONCTION DU TEMPS

(Asservissement capteur 2)



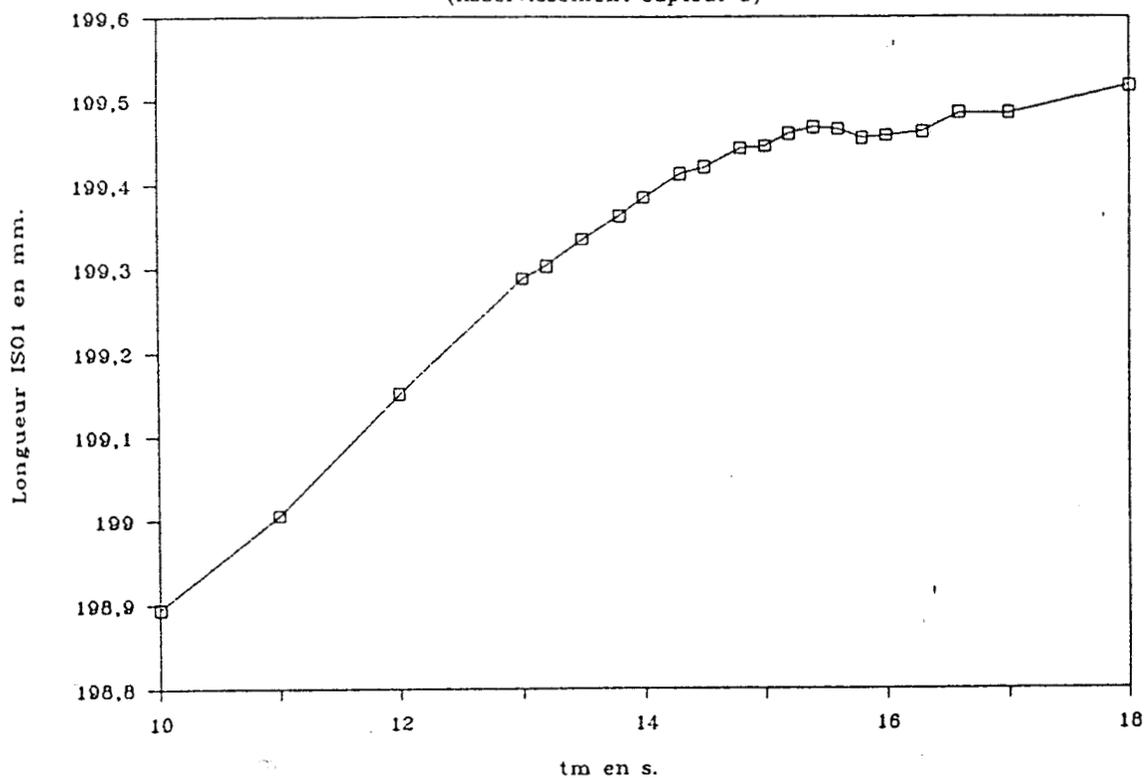
## ASSERVISSEMENT SUR LE CAPTEUR DU FOND DE VICAT



**ASSERVISSEMENT SUR LE CAPTEUR DU FOND DE VICAT**

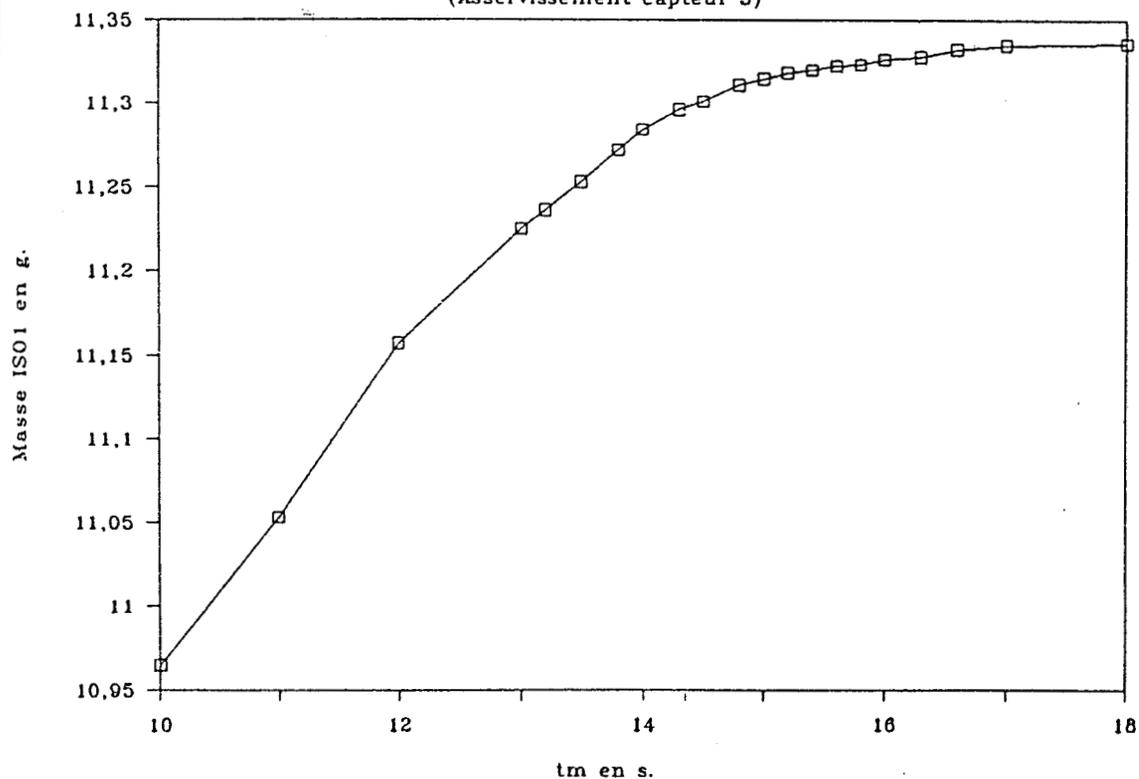
## LONGUEUR ISO1 en fonction du temps

(Asservissement capteur 3)



## Masse ISO1 en fonction du temps

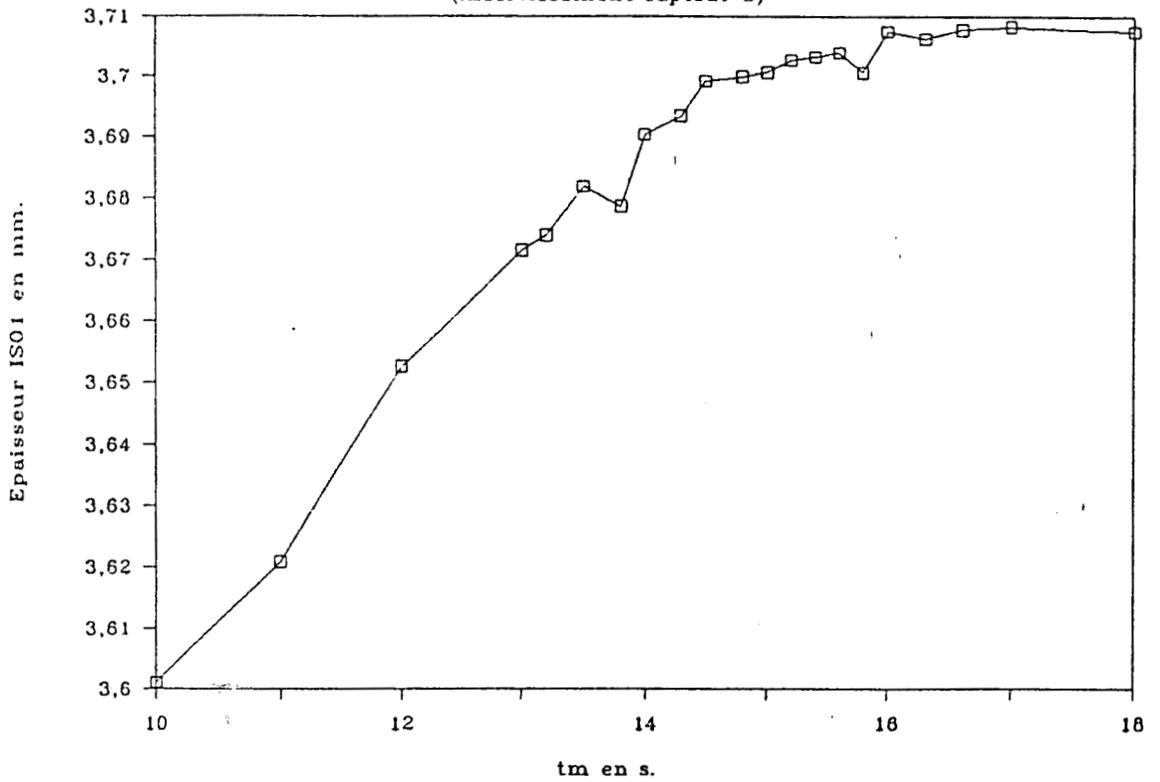
(Asservissement capteur 3)



**ASSERVISSEMENT SUR LE CAPTEUR DU FOND DE VICAT**

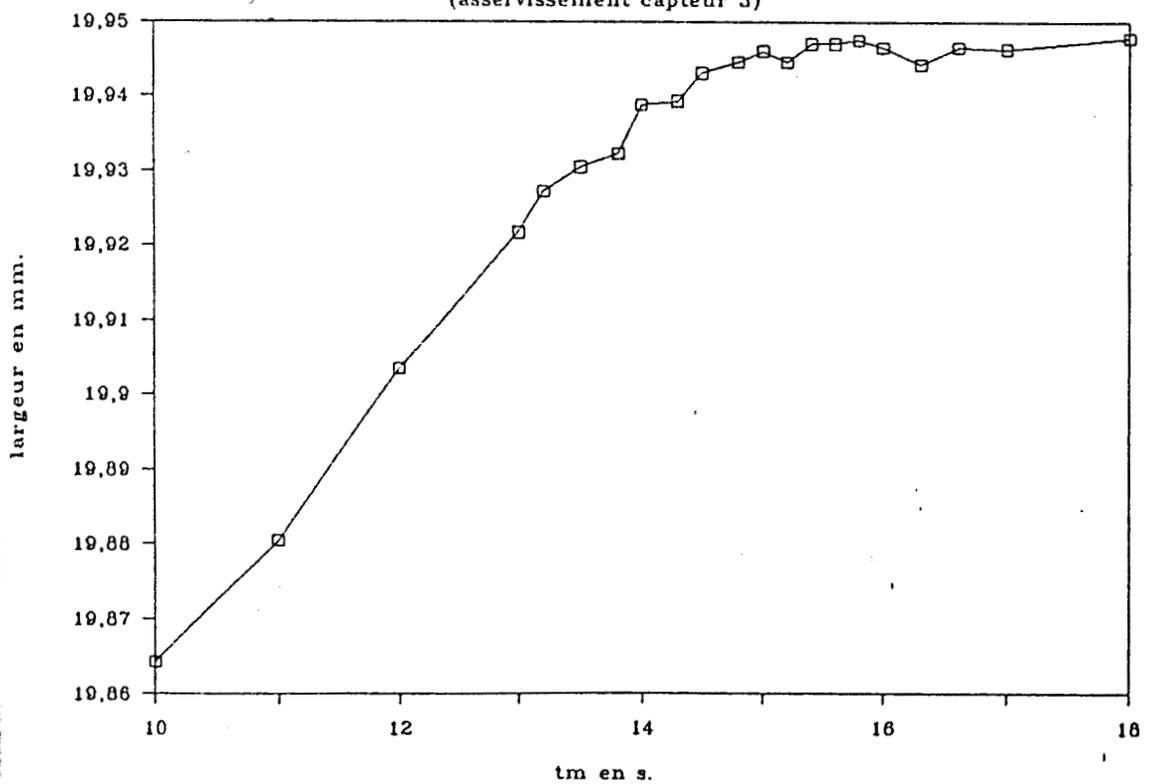
## Epaisseur ISO1 en fonction du temps

(Asservissement capteur 3)



## Largeur ISO1 en fonction du temps

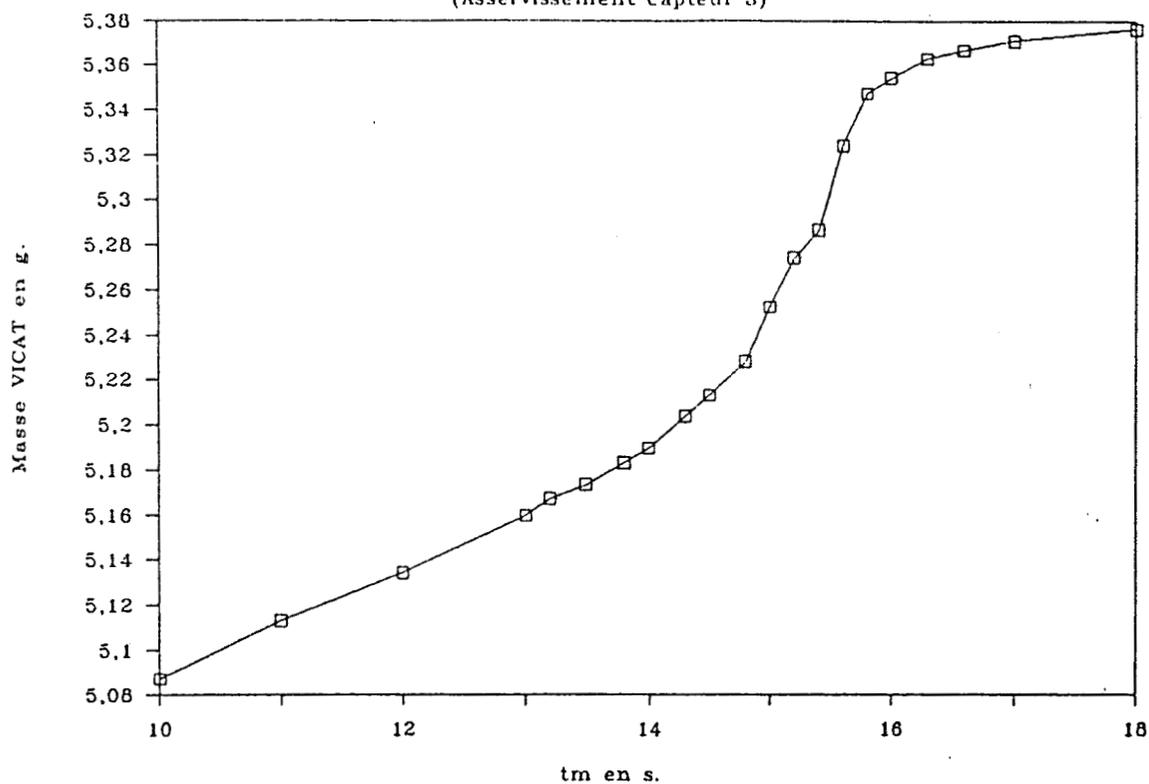
(asservissement capteur 3)



**ASSERVISSEMENT SUR LE CAPTEUR DU FOND DE VICAT**

## Masse VICAT en fonction du temps

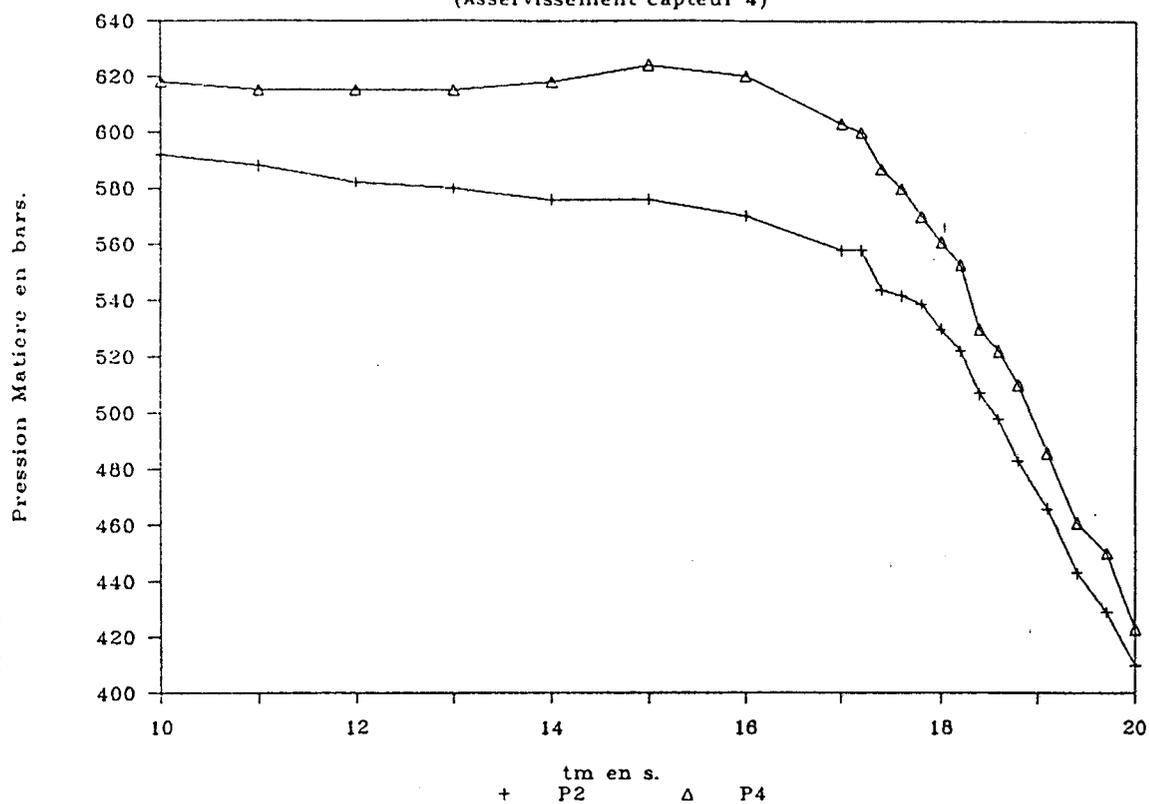
(Asservissement capteur 3)



**ASSERVISSEMENT SUR LE CAPTEUR D'ENTREE DE VICAT**

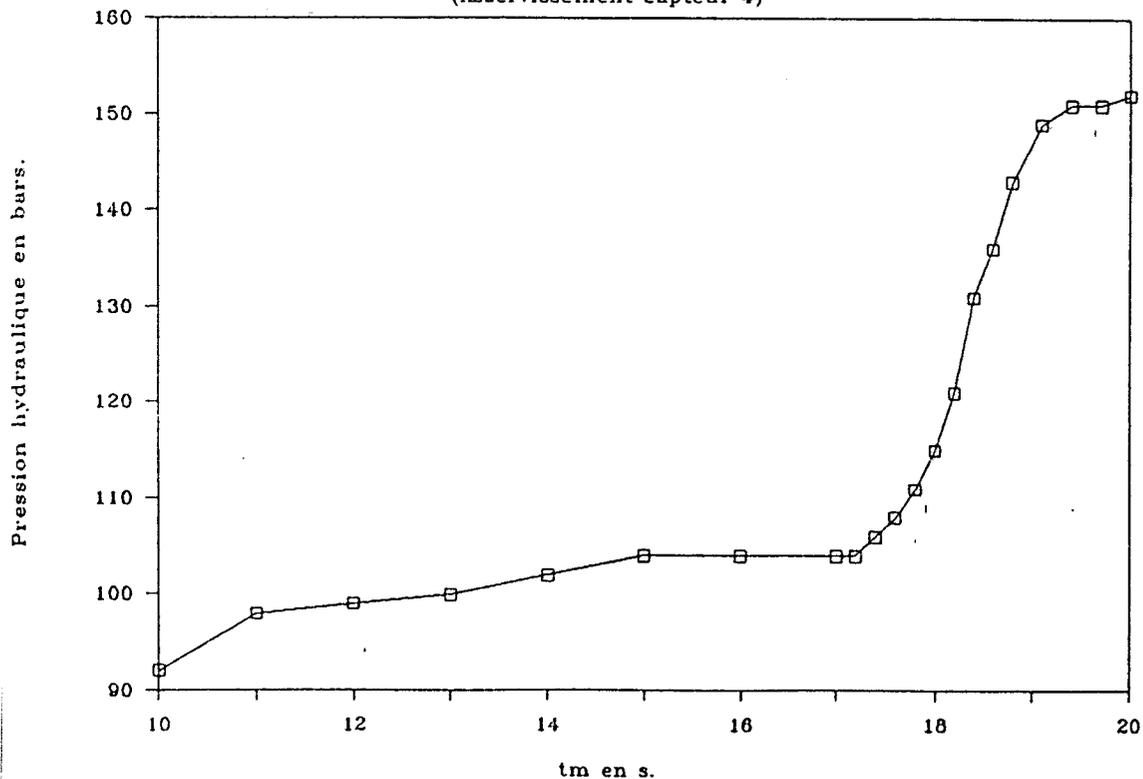
Pression en fonction du temps

(Asservissement capteur 4)



Pression en fonction du temps

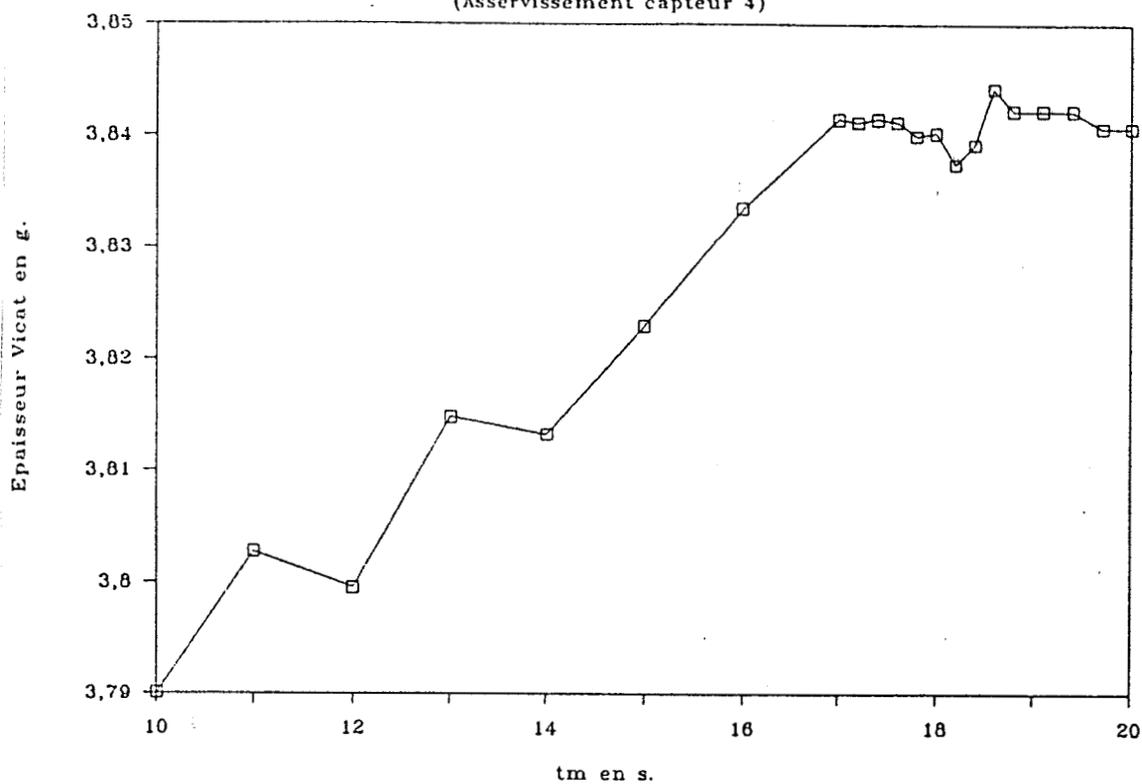
(Asservissement capteur 4)



## ASSERVISSEMENT SUR LE CAPTEUR D'ENTREE DE VICAT

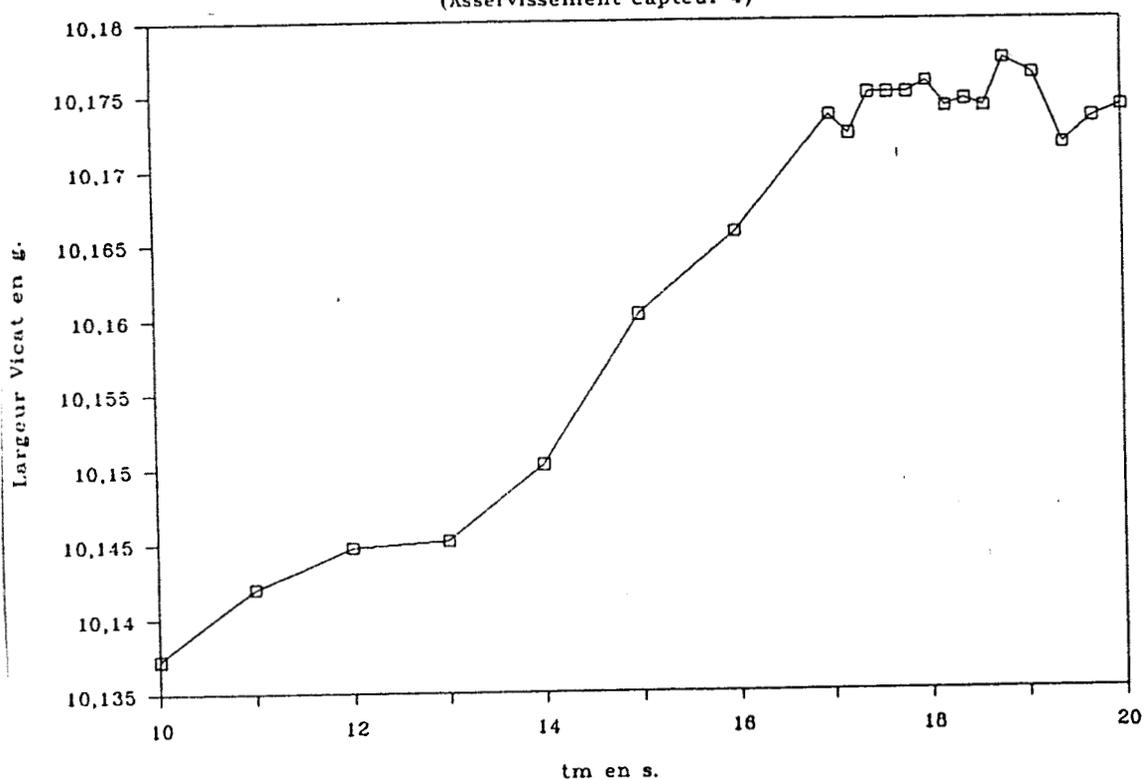
### Epaisseur Vicat en fonction du temps

(Asservissement capteur 4)



### Largeur Vicat en fonction du temps

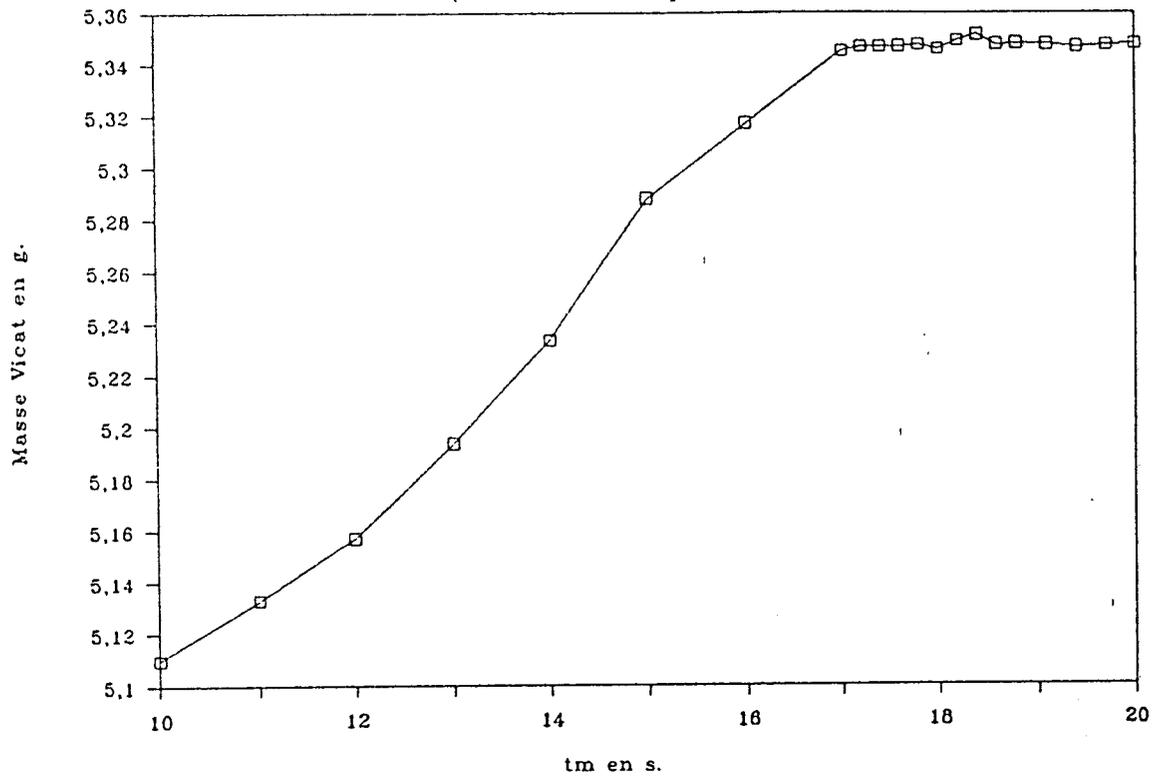
(Asservissement capteur 4)



**ASSERVISSEMENT SUR LE CAPTEUR D'ENTREE DE VICAT**

Masse Vicat en fonction du temps

(Asservissement capteur 4)





## EPAISSEUR DE L'ÉPROUVETTE ISO 1 (mm)

## NIVEAUX DE PRESSION RELATIFS DU POLYMERE (par rapport au standard)

Temp-outillage		-20%	-15%	-10%	-5%	0%	5%	10%	15%	20%
16°C	m	3,719	3,727	3,734	3,742	3,751	3,765	3,775	3,782	3,793
	$\sigma$	0,004	0,002	0,003	0,001	0,002	0,001	0,002	0,002	0,002
30°C	m	3,709	3,711	3,722	3,720	3,732	3,744	3,759	3,773	3,779
	$\sigma$	0,002	0,001	0,003	0,002	0,002	0,001	0,001	0,002	0,002
43°C	m	3,708	3,715	3,729	3,738	3,744	3,753	3,760	3,769	3,777
	$\sigma$	0,001	0,001	0,003	0,002	0,002	0,001	0,001	0,002	0,001
56°C	m	3,700	3,718	3,726	3,736	3,745	3,752	3,757	3,768	3,777
	$\sigma$	0,004	0,005	0,002	0,001	0,001	0,002	0,002	0,003	0,002

## LARGEUR DE L'ÉPROUVETTE ISO 1 (mm) - 18 mm

## NIVEAUX DE PRESSION RELATIFS DU POLYMERE (par rapport au standard)

Temp-outillage		-20%	-15%	-10%	-5%	0%	5%	10%	15%	20%
16°C	m	2,086	2,091	2,097	2,102	2,113	2,115	2,117	2,118	2,121
	$\sigma$	0,017	0,005	0,004	0,003	0,004	0,006	0,004	0,002	0,003
30°C	m	2,072	2,079	2,082	2,088	2,087	2,095	2,102	2,104	2,108
	$\sigma$	0,003	0,005	0,003	0,008	0,004	0,002	0,002	0,002	0,002
43°C	m	2,054	2,062	2,069	2,072	2,079	2,084	2,091	2,094	2,097
	$\sigma$	0,002	0,002	0,003	0,001	0,001	0,002	0,001	0,001	0,002
56°C	m	2,042	2,048	2,053	2,056	2,061	2,061	2,078	2,082	2,084
	$\sigma$	0,004	0,004	0,003	0,003	0,002	0,004	0,002	0,002	0,001

## LONGUEUR DE L'ÉPROUVETTE ISO 1 (mm)

- 195,20 mm

## NIVEAUX RELATIFS DE PRESSION HYDRAULIQUE (par rapport au standard)

Temp-outillage		-20%	-15%	-10%	-5%	0%	5%	10%	15%	20%
16°C	m	4,420		4,555		4,690		4,829		4,967
	$\sigma$	0,019		0,006		0,021		0,005		0,004
30°C	m	4,364		4,526		4,669		4,793		4,935
	$\sigma$	0,005		0,002		0,004		0,005		0,013
43°C	m	4,302		4,438		4,585		4,722		4,867
	$\sigma$	0,007		0,005		0,001		0,004		0,006
56°C	m	4,201		4,338		4,360		4,657		4,797
	$\sigma$	0,014		0,007		0,022		0,003		0,006

## MASSE DE L'ÉPROUVETTE ISO 1 (grammes)

## NIVEAUX RELATIFS DE PRESSION HYDRAULIQUE (par rapport au standard)

Temp-outillage		-20%	-15%	-10%	-5%	0%	5%	10%	15%	20%
16°C	m	10,186		10,230		10,281		10,322		10,376
	$\sigma$	0,002		0,001		0,001		0,001		0,004
30°C	m	10,153		10,208		10,256		10,296		10,350
	$\sigma$	0,001		0,001		0,002		0,001		0,001
43°C	m	10,142		10,192		10,240		10,287		10,337
	$\sigma$	0,004		0,001		0,001		0,001		0,001
56°C	m	10,097		10,156		10,149		10,274		10,335
	$\sigma$	0,001		0,002		0,002		0,001		0,004

## LARGEUR DE L'ÉPROUVETTE ISO 1 (mm) - 18 mm

## NIVEAUX RELATIFS DE PRESSION HYDRAULIQUE (par rapport au standard)

Temp-outillage		-20%	-15%	-10%	-5%	0%	5%	10%	15%	20%
16°C	m	2,045		2,074		2,087		2,100		2,115
	$\sigma$	0,009		0,005		0,002		0,002		0,007
30°C	m	2,034		2,063		2,080		2,101		2,105
	$\sigma$	0,001		0,002		0,003		0,007		0,001
43°C	m	2,032		2,054		2,066		2,077		2,088
	$\sigma$	0,002		0,002		0,002		0,001		0,001
56°C	m	2,017		2,037		2,039		2,061		2,072
	$\sigma$	0,004		0,003		0,004		0,002		0,003

## RESULTATS EXPERIMENTAUX

Matière PP 3050 MN 1 APPRYL

Paramètres machine

Dosage 55 mm lim. pression 135 b

Paliers 1 2 3 4

Course 0.30 0.20 0.10 0.310

Vitesses 0.10 0.10 0.10 0.10

Maintien par P moule à 0.090 volt

Durée du maintien à 80 bars Hydraulique

Dosage 100 tours/mn contre pression 2 bars

Décompression après dosage 1 mm

Températures

Zones	1	2	3	4	nez
°C	180	210	220	225	225

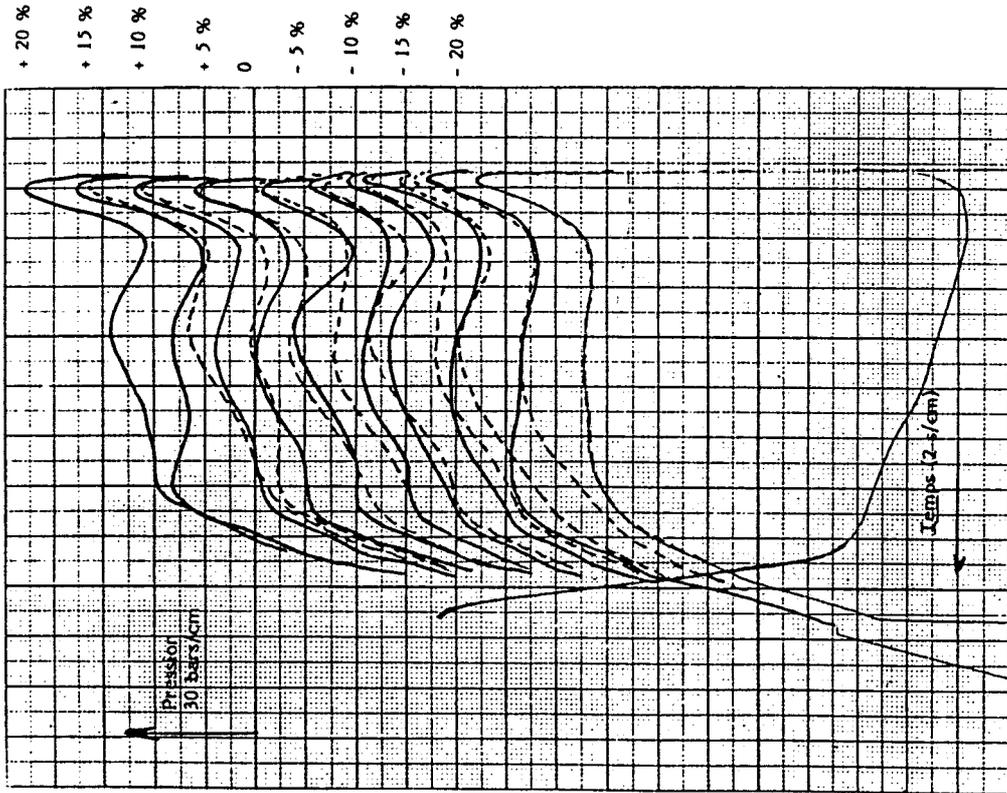
Asservissement pression du polymère : 4.50 volts

Retard 0.5 s P.I.D. : 1.0.0.

CAPTEUR N°1=	FOND ISO 1
CAPTEUR N°2=	ENTREE ISO 1
CAPTEUR N°3=	FOND VICAT
CAPTEUR N°4=	ENTREE VICAT

**INFLUENCE DU NIVEAU DE LA PRESSION**  
**SUR LES CARACTERISTIQUES GEOMETRIQUES**  
**ET MASSIQUE DES EPROUVETTES**

Identification de la relation :  
masse ISO 1 : fonction (conditions de maintien)



Variation de la pression dans le moule derrière le seuil d'alimentation de l'éprouvette ISO 1 en fonction du temps. Incrément 5 % :  
 - seuil de déclenchement (sur fond ISO 1)  
 - pression hydraulique de maintien  
 - consigne de maintien en pression matière sur début ISO 1

IDENTIFICATION DE LA RELATION

MASSE DE L'ÉPROUVETTE ISO 1 = FONCTION (condition de maintien)

CONDITIONS OPERATOIRES ET RÉSULTATS

Température moule : (°C)  
 Longueur de dosage : (mm)  
 Injection dynamique :            1    2    3    4  
     course                            0,3   0,2   0,1   0,310  
     vitesse                            0,1   0,1   0,1   0,1

Déclenchement :  
 ISO 1    sur le capteur en fin d'éprouvette  
           : 100 mV ( 150 bars)

Maintien en pression matière au début de l'éprouvette  
 Consigne de pression matière : 4,20 volt ( 630 bars)  
 Maintien 0,5 secondes sous : 80 bars

Durée du maintien : 18 s  
 Solidification : 20 s  
 Température/zone : 200 /1    210 /2    230 /3    240 /4 240 /N  
 Matière : PP 3050 MNI  
 Rotation vis : 100 tours/mm ; contre pression : 2 bars  
 Décompression après dosage : 10 mm

Les conditions définies ci-dessus concernent le cycle de référence de cette manipulation.

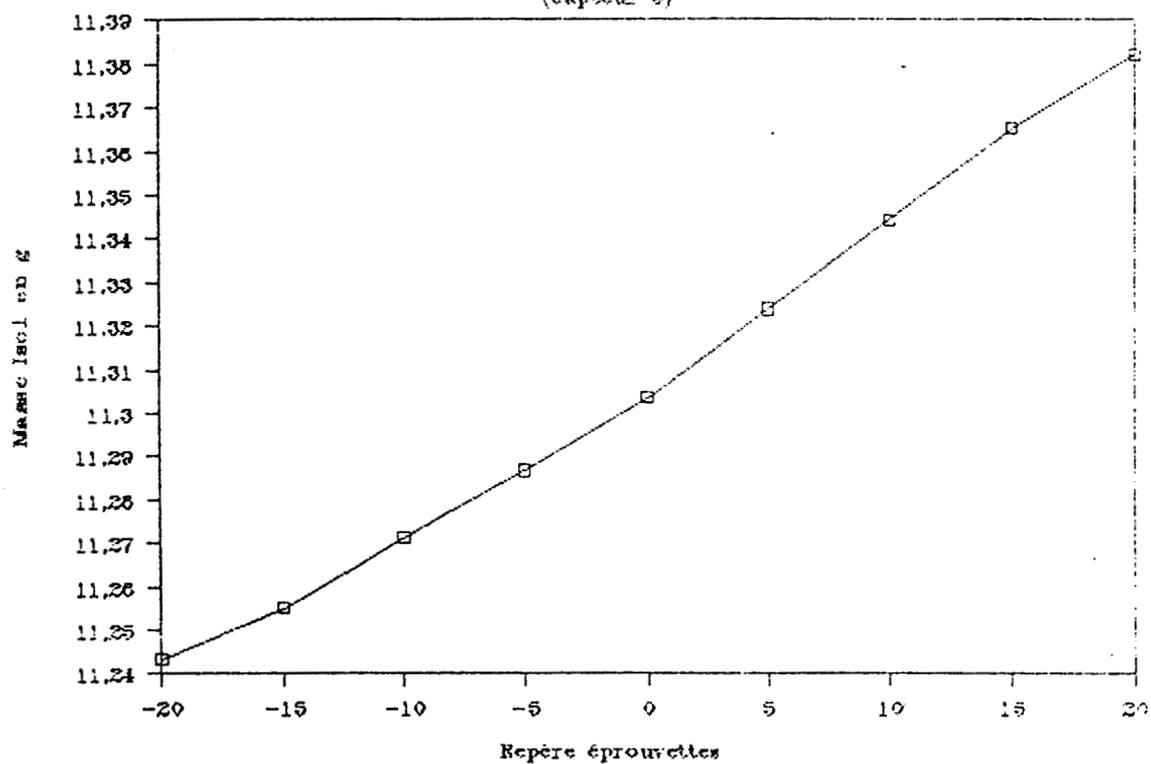
- Nous faisons varier avec un incrément de 5 % :
- la pression matière de déclenchement du maintien
  - la pression hydraulique de maintien 0,5 s
  - la pression matière de consigne en maintien

## RESULTATS

Repère éprouvette	-20%	-15%	-10%	-5%	0	+5%	+10%	+15%	+20%
Déclenchement (mV) fond ISO 1	80	85	90	95	100	105	110	115	120
Pression hydraulique (bars)	64	68	70	76	80	84	88	92	96
Pression matière (volts)	3,36	3,57	3,78	3,99	4,20	4,41	4,62	4,83	5,04
Masse moyenne de la pièce (g)	11,2432	11,2551	11,2712	11,2868	11,3036	11,3240	11,3446	11,3654	11,3822
Chute de masse (%)	- 0,53	- 0,43	- 0,28	- 0,14	0	+0,18	+0,36	+0,546	+0,695

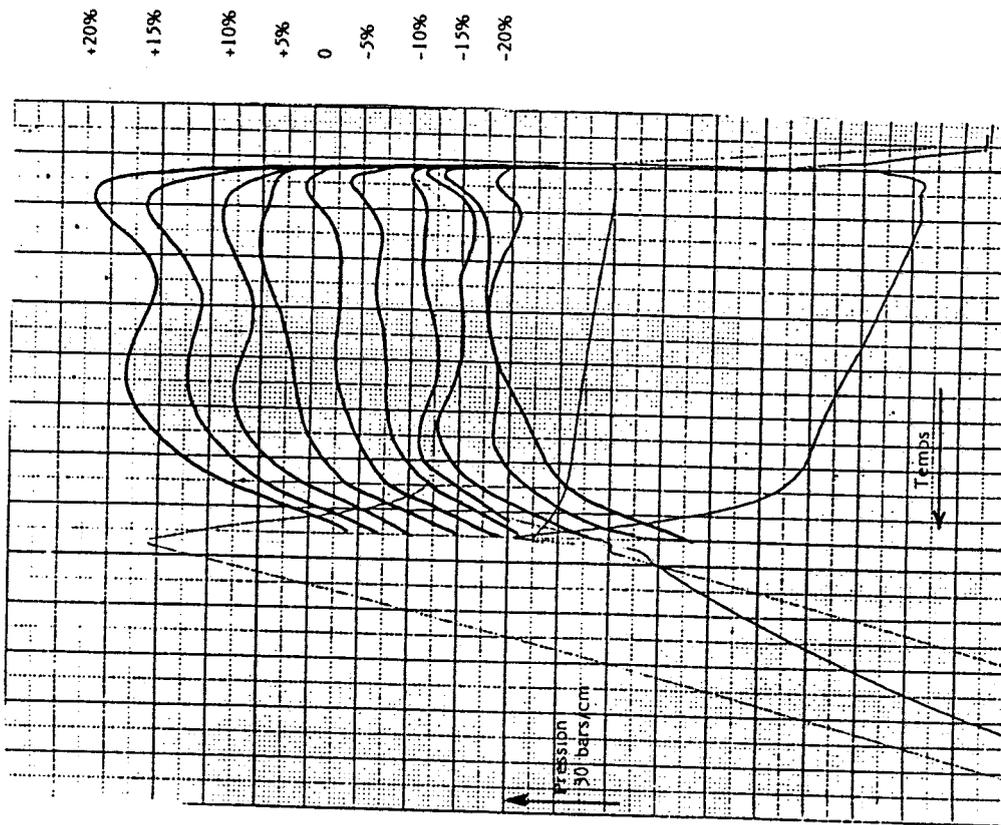
### MASSE ISO1

(capteur 3)



**NIVEAU RELATIF DE PRESSION DE MAINTIEN**

Identification de la relation :  
masse ISO 1 = fonction (conditions de maintien)



Variations de la pression dans le moule derrière le seuil d'alimentation de l'éprouvette ISO 1, en fonction du temps. Incrément : 5 % sur :

- seuil de déclenchement (sur fond ISO 1)
- pression hydraulique de maintien
- consigne de maintien en pression matière (sur fond ISO 1)

IDENTIFICATION DE LA RELATION

MASSE DE L'ÉPROUVETTE ISO 1 = FONCTION (condition de maintien)

CONDITIONS OPERATOIRES ET RESULTATS

Température moule : (°C) 30  
 Longueur de dosage : (mm) 56  
 Injection dynamique : palier 1 2 3 4  
                                   course 0,3 0,2 0,1 0,310  
                                   vitesse 0,1 0,1 0,1 0,1

Déclenchement :

sur le capteur en fond d'éprouvette  
 ISO 1 : 100 mV ( 150 bars)

Maintien en pression matière au fond de l'éprouvette  
 Consigne de pression matière : 4,2 volt ( 630 bars)

Maintien 0,5 secondes sous : 30 bars

Durée du maintien : 15 s

Solidification : 20 s

Température/zone : 190 /1 200 /2 210 /3 220 /4 220 /N

Matière : PP APPRYL 3050 MNI

Rotation vis : 100 tours/mn ; contre pression : 2 bars

Décompression après dosage : 10 mm

Les conditions définies ci-dessus concernent le cycle de référence de cette manipulation.

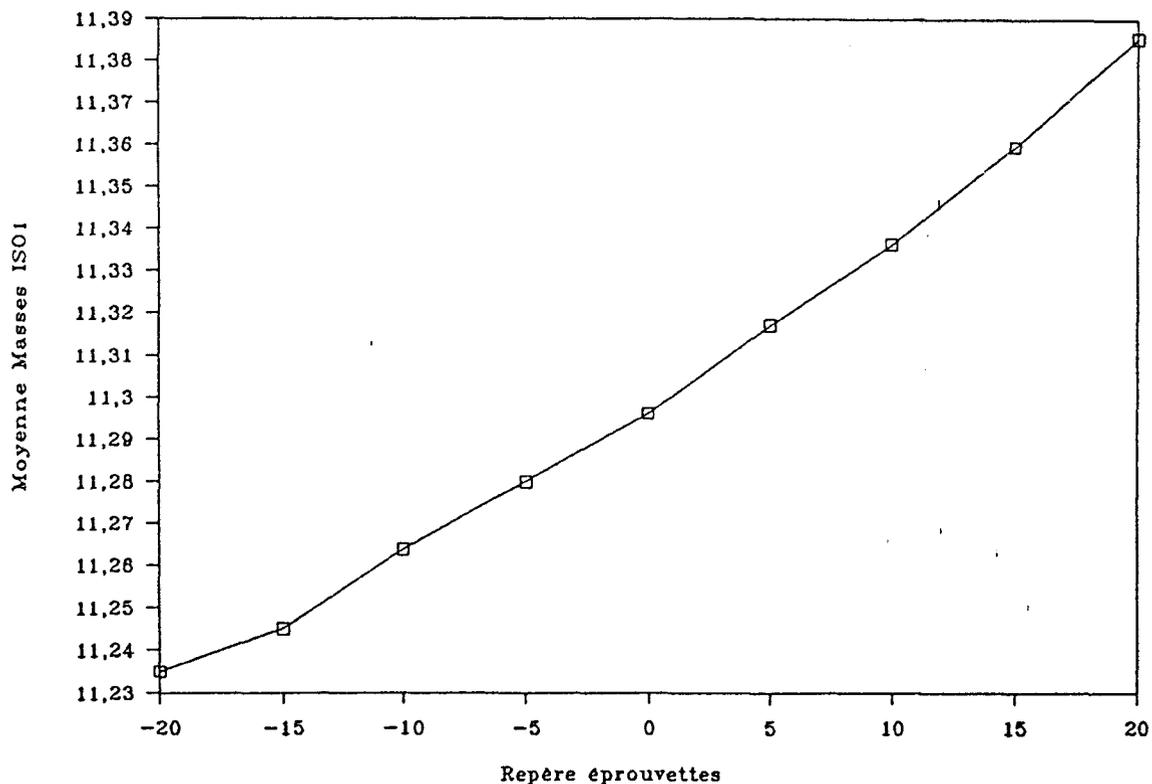
Nous faisons varier avec un incrément de 5 % :

- la pression matière de déclenchement du maintien
- la pression hydraulique de maintien 0,5 s
- la pression matière de consigne en maintien

## RESULTATS

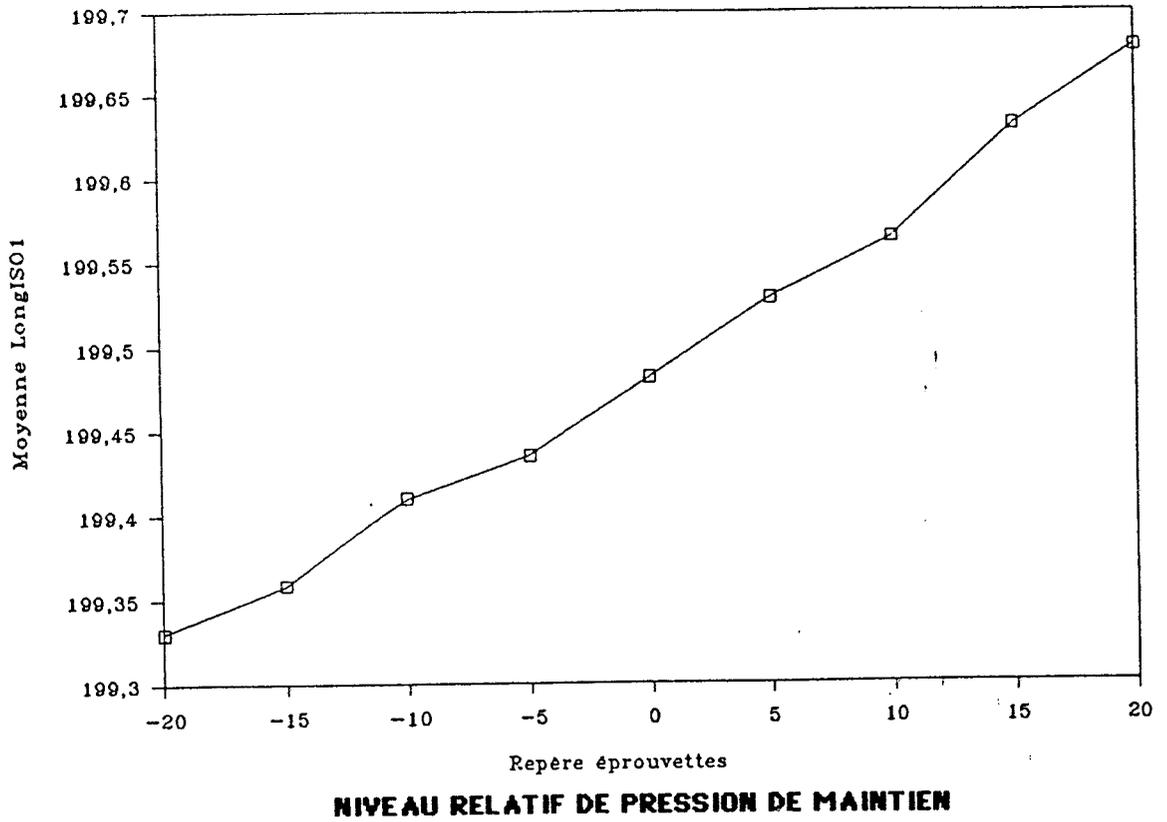
Repère éprouvette	-20%	-15%	-10%	-5%	0	+5%	+10%	+15%	+20%
Déclenchement (mV) fond ISO 1	80	85	90	95	100	105	110	115	120
Pression hydraulique (bars)	64	68	70	76	80	84	88	92	96
Pression matière (volts)	3,36	3,57	3,78	3,99	4,20	4,41	4,62	4,83	5,04
Masse moyenne de la pièce (g)	11,235	11,245	11,264	11,28	11,296	11,317	11,336	11,364	11,385
Chute de masse (%)	- 0,54	- 0,46	- 0,29	- 0,15	0	0,185	0,354	0,560	0,788
Longueur moyenne de la pièce (mm)	199,33	199,36	199,41	199,44	199,48	199,53	199,57	199,63	199,68
Epaisseur moyenne de la pièce (mm)	3,668	3,670	3,673	3,677	3,683	3,688	3,695	3,705	3,713

## Masse ISO1



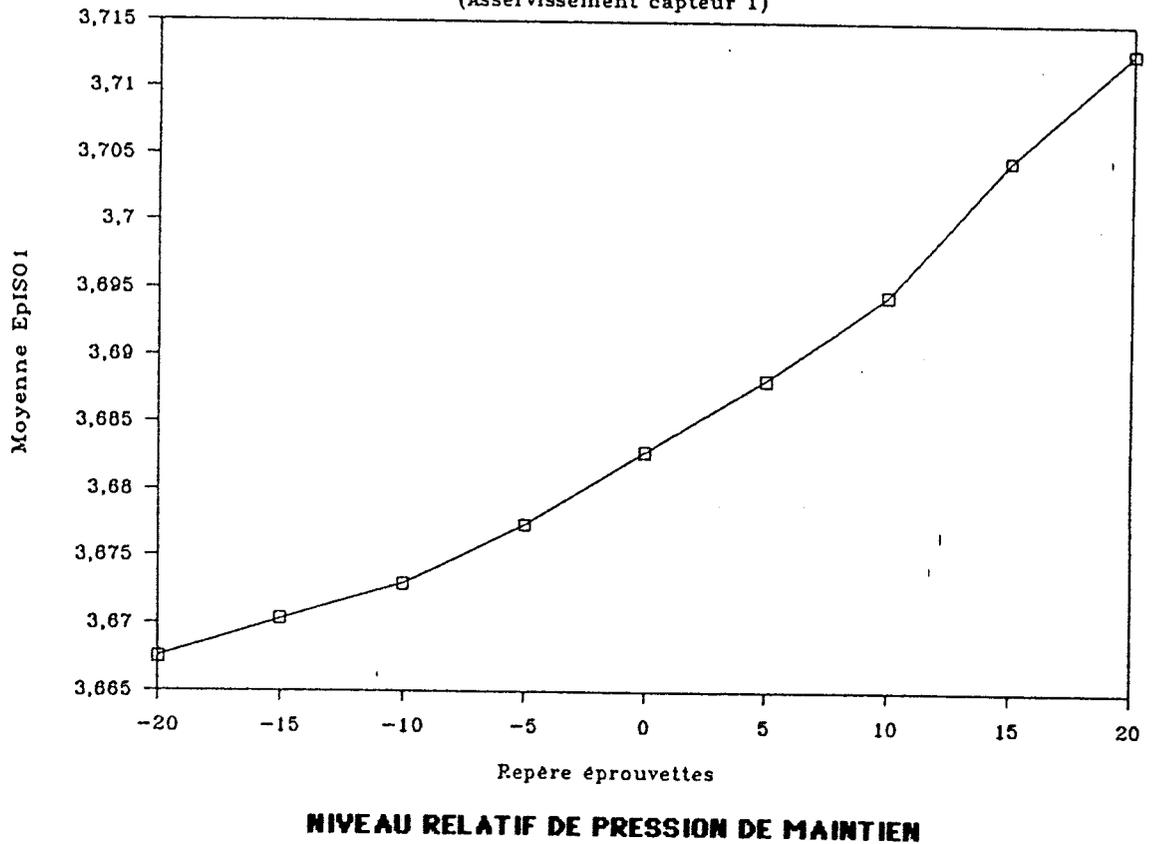
**NIVEAU RELATIF DE PRESSION DE MAINTIEN**

### Longueur ISO1

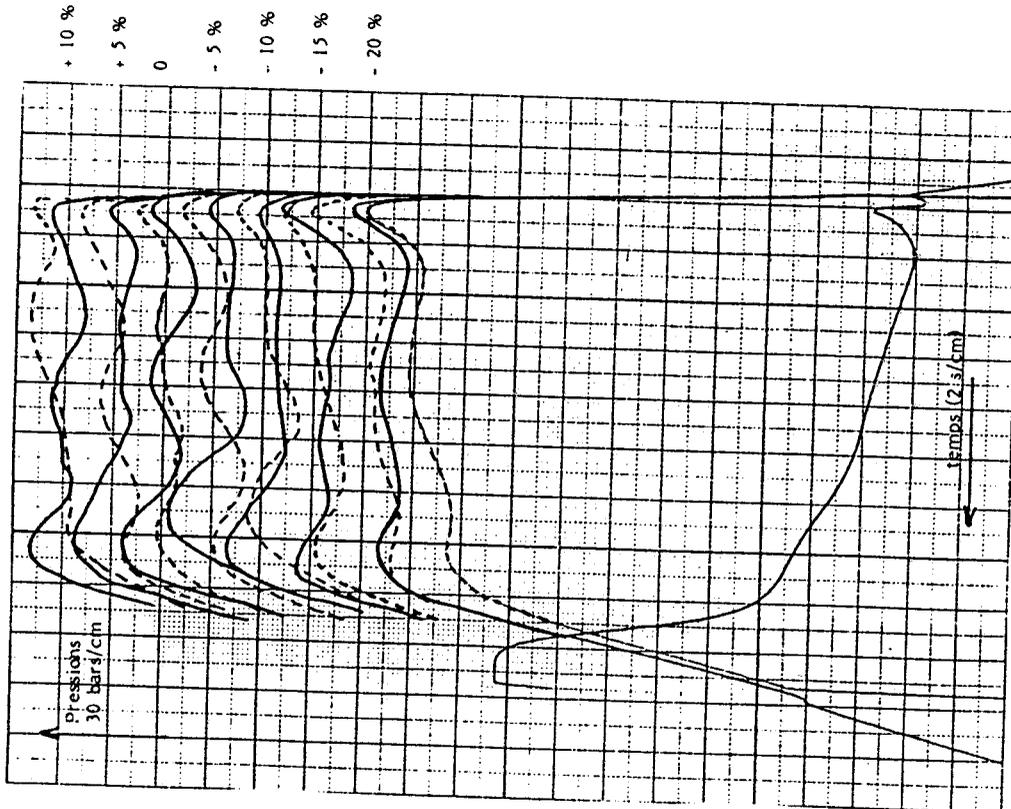


### Epaisseur ISO1

(Asservissement capteur 1)



Identification de la relation :  
masse barreau = fonction (conditions de maintien)



Variations de la pression dans le moule derrière le seuil d'alimentation de l'éprouvette barreau, en fonction du temps. Incrément : 5 % sur :

- seuil de déclenchement (sur fond barreau)
- pression hydraulique de maintien
- consigne de maintien en pression matière (sur fond barreau)

IDENTIFICATION DE LA RELATION

MASSE DE L'ÉPROUVETTE barreau = FONCTION (condition de maintien)

CONDITIONS OPERATOIRES ET RESULTATS

Température moule : (°C) 30

Longueur de dosage : (mm) 56

Injection dynamique :		1	2	3	4
palier		0,3	0,2	0,1	0,310
course		0,1	0,1	0,1	0,1
vitesse					

Déclenchement :

sur le capteur en fond d'éprouvette barreau : 120 mV ( 90 bars)

Maintien en pression matière au fond de l'éprouvette

Consigne de pression matière : -1,7 volt ( 705 bars)

Maintien 0, 5 secondes sous : 90 bars

Durée du maintien : 20 s

Solidification : 20 s

Température/zone : 190 /1 200 /2 210 /3 220 /4 220qN

Matière : PP APPRYL 3050 MN 1

Rotation vis : 100 tours/mn ; contre pression : 2 bars

Décompression après dosage : 3 mm

Les conditions définies ci-dessus concernent le cycle de référence de cette manipulation.

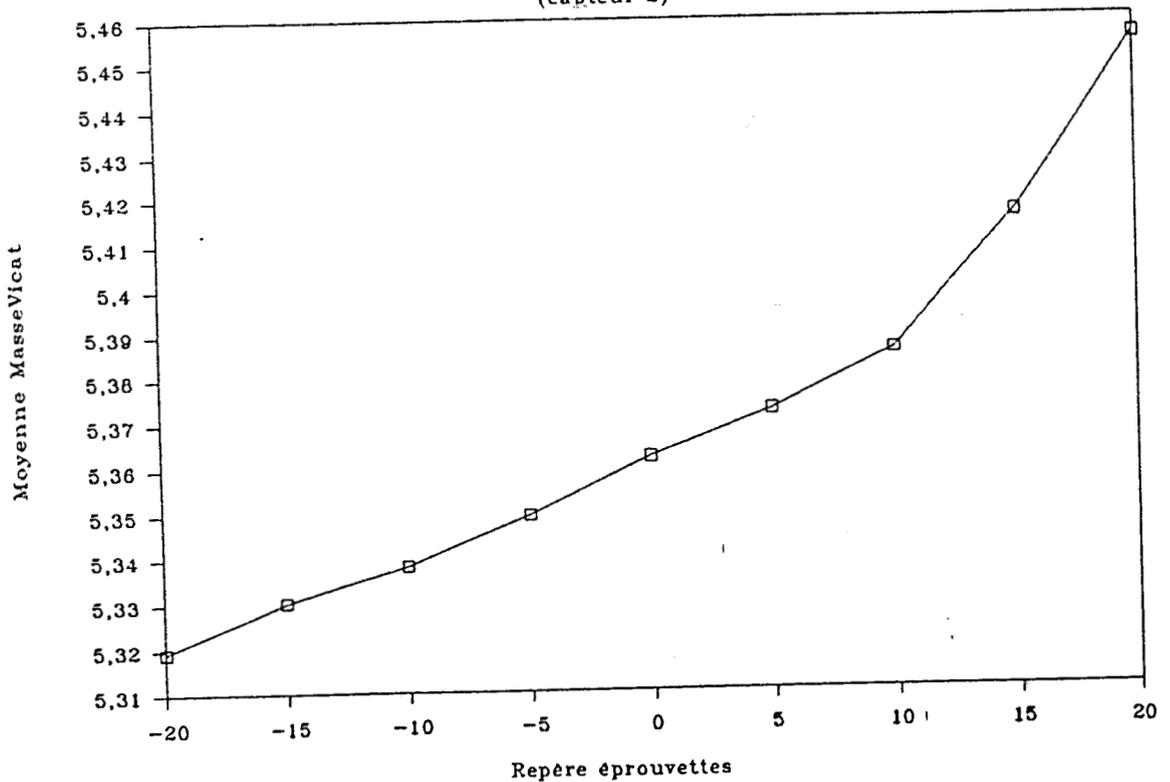
Nous faisons varier avec un incrément de 5 % :

- la pression matière de déclenchement du maintien
- la pression hydraulique de maintien 0,5 s
- la pression matière de consigne en maintien

## RESULTATS

Repère éprouvette	-20%	-15%	-10%	-5%	0	+5%	+10%	+15%	+20%
Déclenchement (mV) fond Ebrreau	96	102	108	114	120	126	132	138	144
Pression hydraulique (bars)	72	77	81	86	90	95	99	104	108
Pression matière (volts)	3,76	3,995	4,23	4,465	4,70	4,935	5,17	5,405	5,64
Masse moyenne de la pièce (g)	5,308	5,317	5,326	5,337	5,347	5,36	5,374	5,393	5,422
Chute de masse (%)	- 0,72	- 0,57	- 0,4	0,189	0	0,239	0,5	0,852	1,39
Longueur moyenne de la pièce (mm)	10,161	10,163	10,164	10,166	10,166	10,168	10,169	10,170	10,175
Epaisseur moyenne de la pièce (mm)	3,825	3,830	3,830	3,836	3,840	3,842	3,850	3,856	3,871

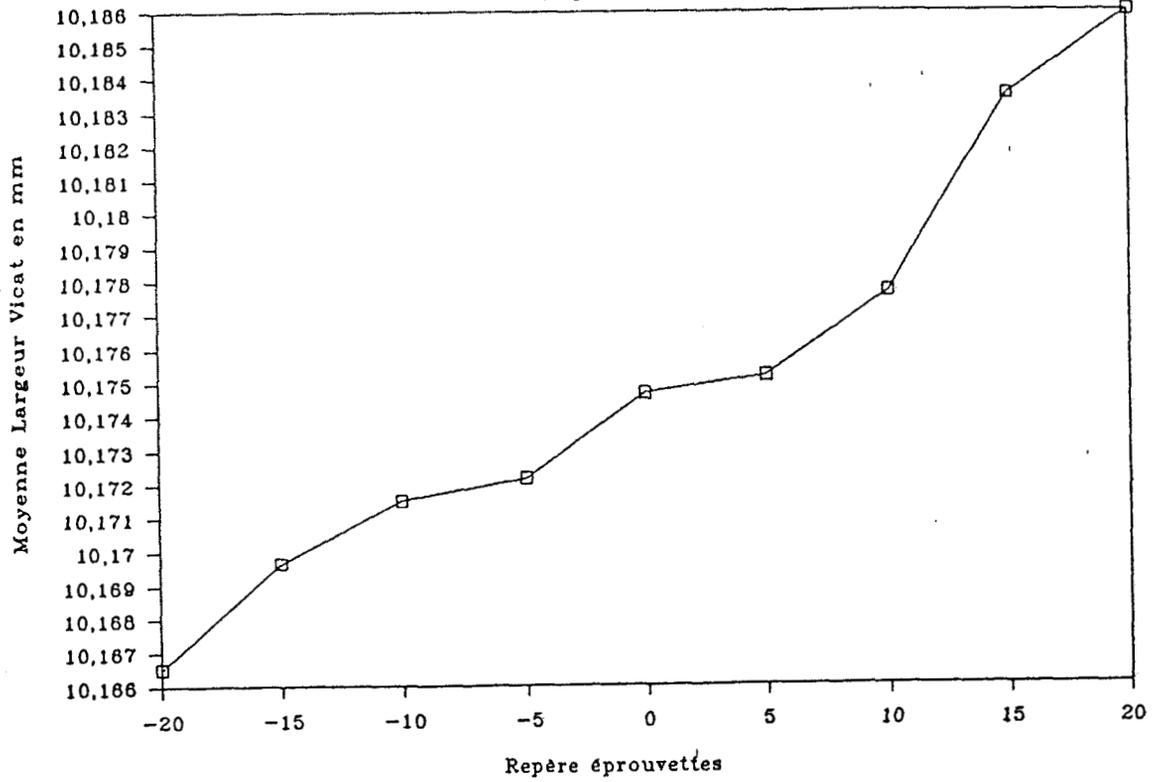
### Masse VICAT (capteur 2)



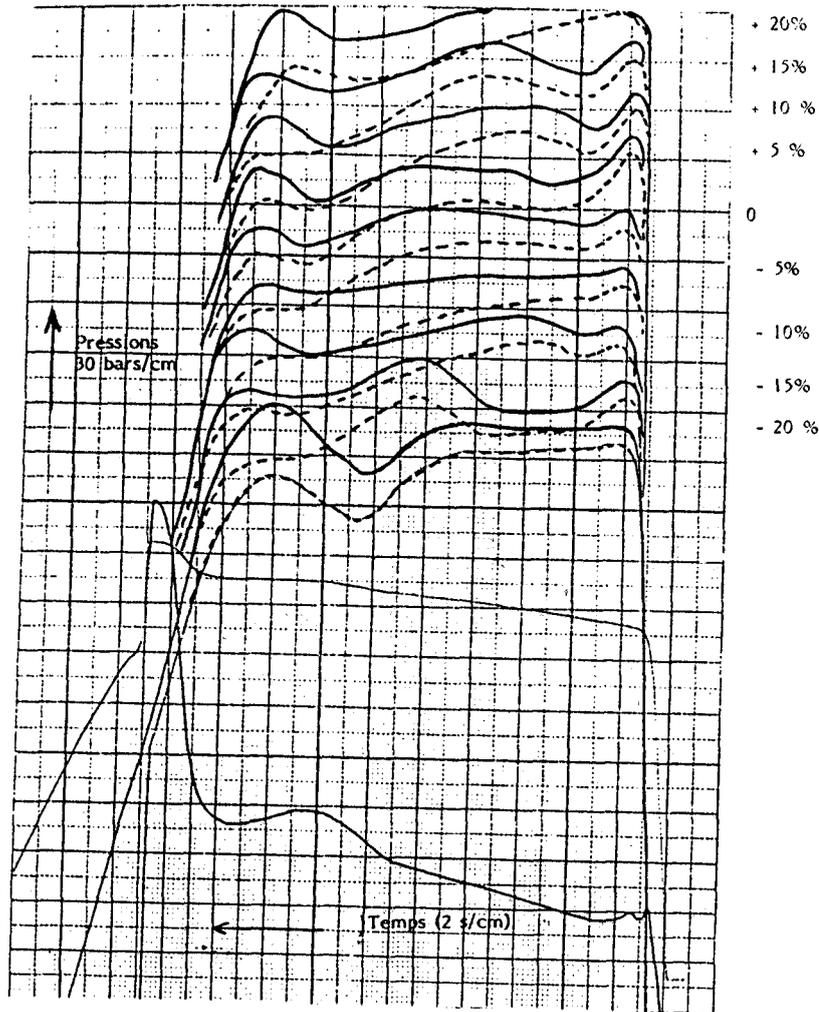
**NIVEAU RELATIF DE PRESSION DE MAINTIEN**

## LARGEUR VICAT

(capteur 2)

**NIVEAU RELATIF DE PRESSION DE MAINTIEN**

Identification de la relation :  
 masse barreau = fonction (conditions de maintien)



Variations de la pression dans le moule derrière le seuil d'alimentation de l'éprouvette barreau, en fonction du temps. Incrément : 5 % sur :

- seuil de déclenchement (sur fond barreau)
- pression hydraulique de maintien
- consigne de maintien en pression matière (sur début barreau)

### IDENTIFICATION DE LA RELATION

MASSE DE L'ÉPROUVETTE barreau = FONCTION (condition de maintien)

### CONDITIONS OPERATOIRES ET RESULTATS

Température moule : (°C) 30

Longueur de dosage : (mm) 56

Injection dynamique :	palier	1	2	3	4
	course	0,3	0,2	0,1	0,310
	vitesse	0,1	0,1	0,1	0,1

Déclenchement :

sur le capteur en fond d'éprouvette  
 barreau : 120 mV ( 90 bars)

Maintien en pression matière au début de l'éprouvette

Consigne de pression matière : 4,70 volt ( 705 bars)

Maintien 0,5 secondes sous : 90 bars

Durée du maintien : 20 s

Solidification : 20 s

Température/zone : 190 /1      200 /2      210 /3      220 /4      220 /N

Matière : PP APPRYL 3050 MINI

Rotation vis : 100 tours/mn ; contre pression : 2 bars

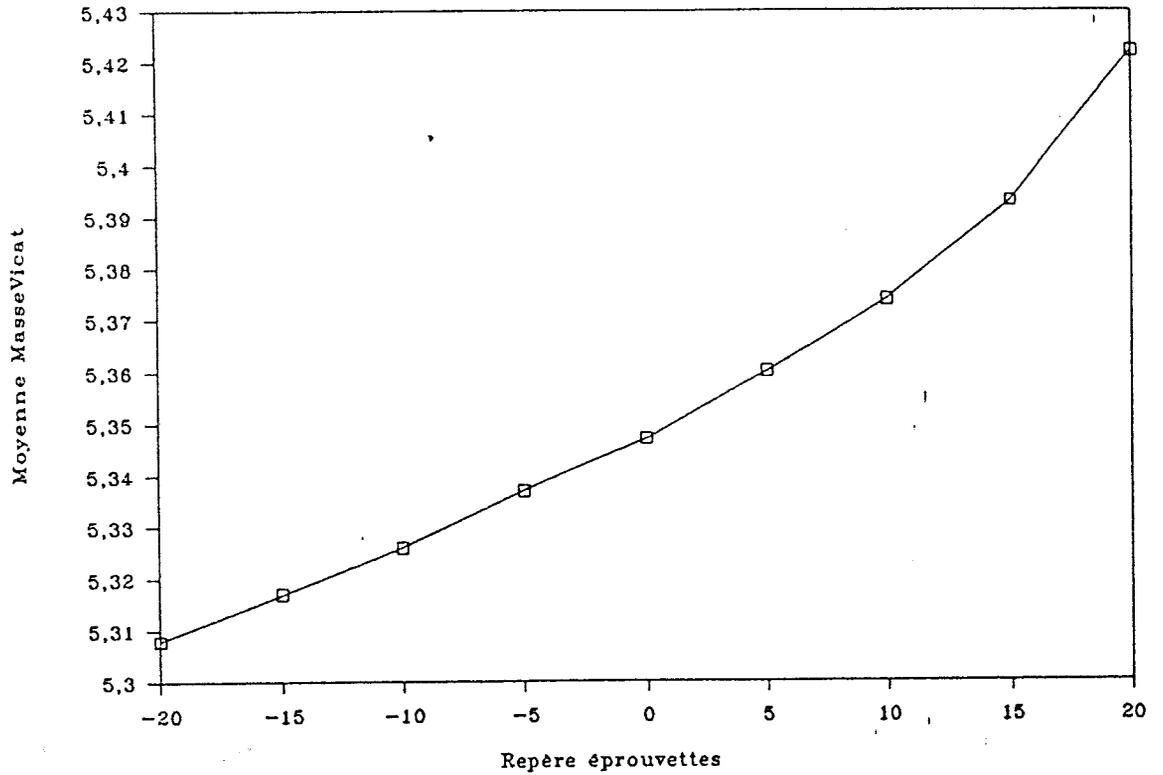
Décompression après dosage : 3 mm

Les conditions définies ci-dessus concernent le cycle de référence de cette manipulation.

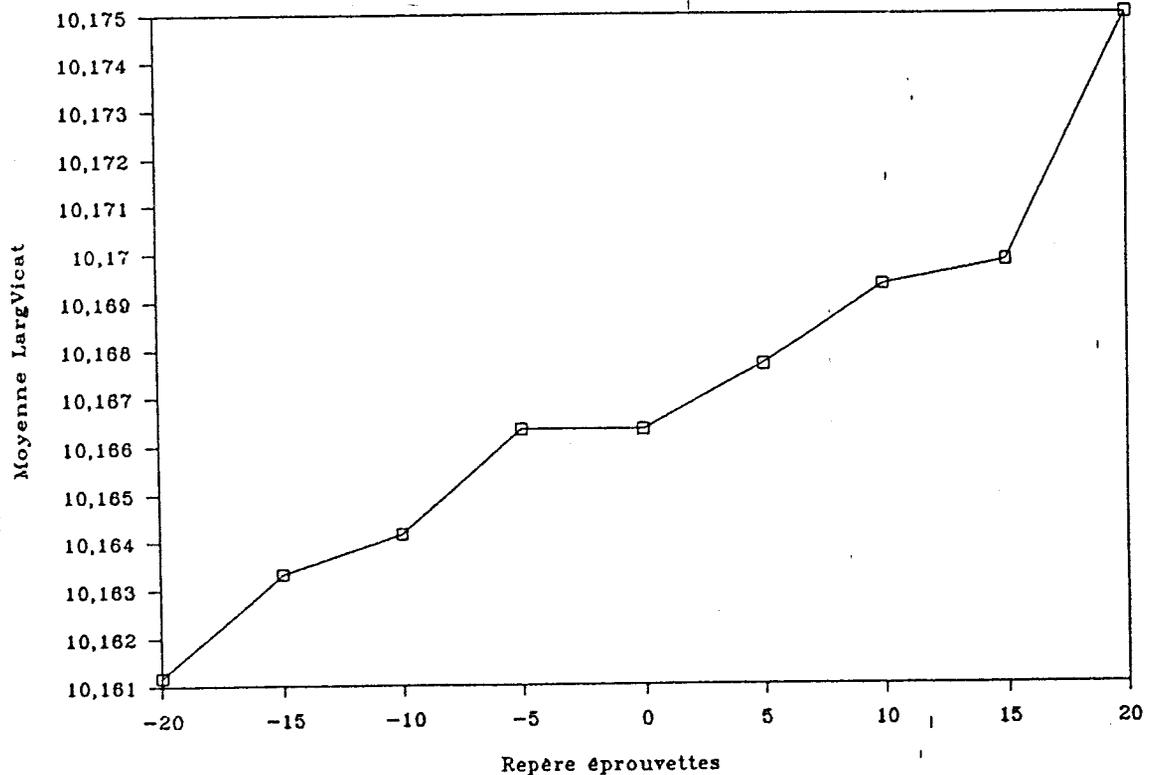
Nous faisons varier avec un incrément de 5 % :

- la pression matière de déclenchement du maintien
- la pression hydraulique de maintien 0,5 s
- la pression matière de consigne en maintien

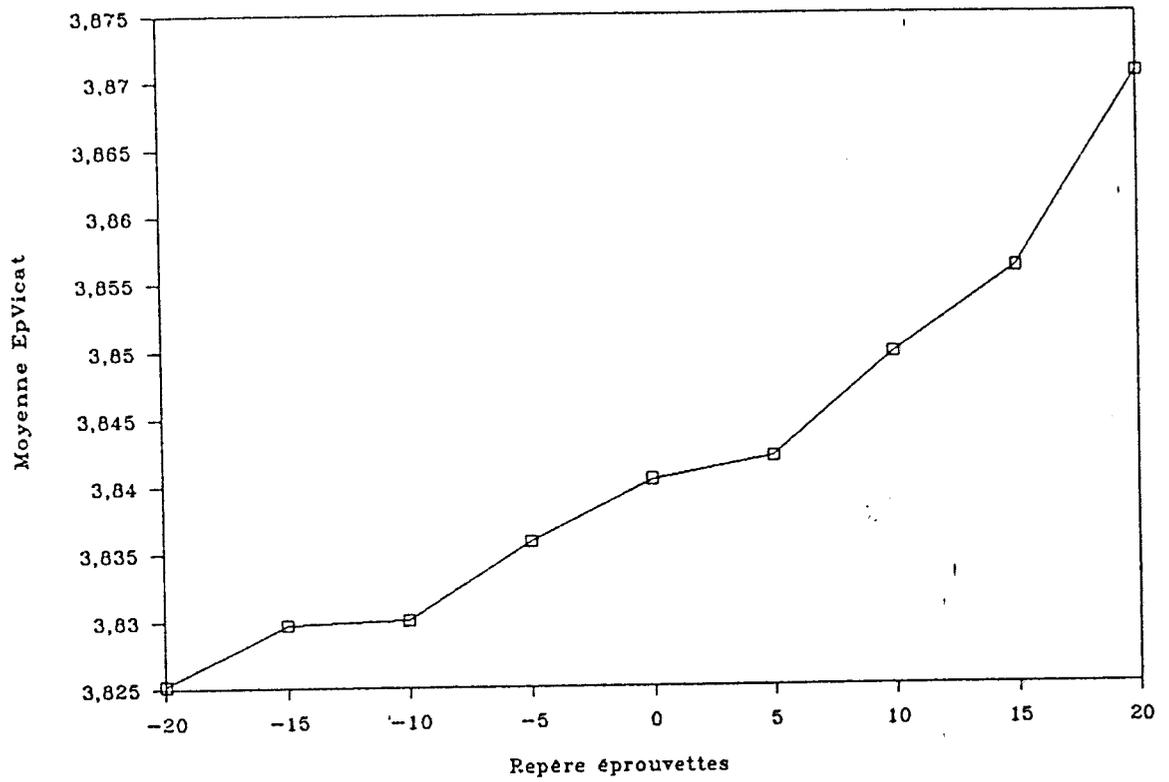
## Masse VICAT

**NIVEAU RELATIF DE PRESSION DE MAINTIEN**

## Largeur VICAT

**NIVEAU RELATIF DE PRESSION DE MAINTIEN**

## Épaisseur VICAT

**NIVEAU RELATIF DE PRESSION DE MAINTIEN**

**RESULTATS EXPERIMENTAUX**

Matière PS BP HF 555 MMV 20020

Paramètres machine

Dosage 52 mm lim. pression 140 b

Paliers 1 2 3 4

Course 0.25 0.20 0.18 0.140

Vitesses 0.10 0.10 0.10 0.10

Maintien par P moule à 0.150 volt

Durée du maintien 19 s à 48 bars Hydraulique

Dosage 100 tours/mn contre pression 2 bars

Décompression après dosage 5 mm

Températures

Zones 1 2 3 4 nez

°C 220 230 240 250 250

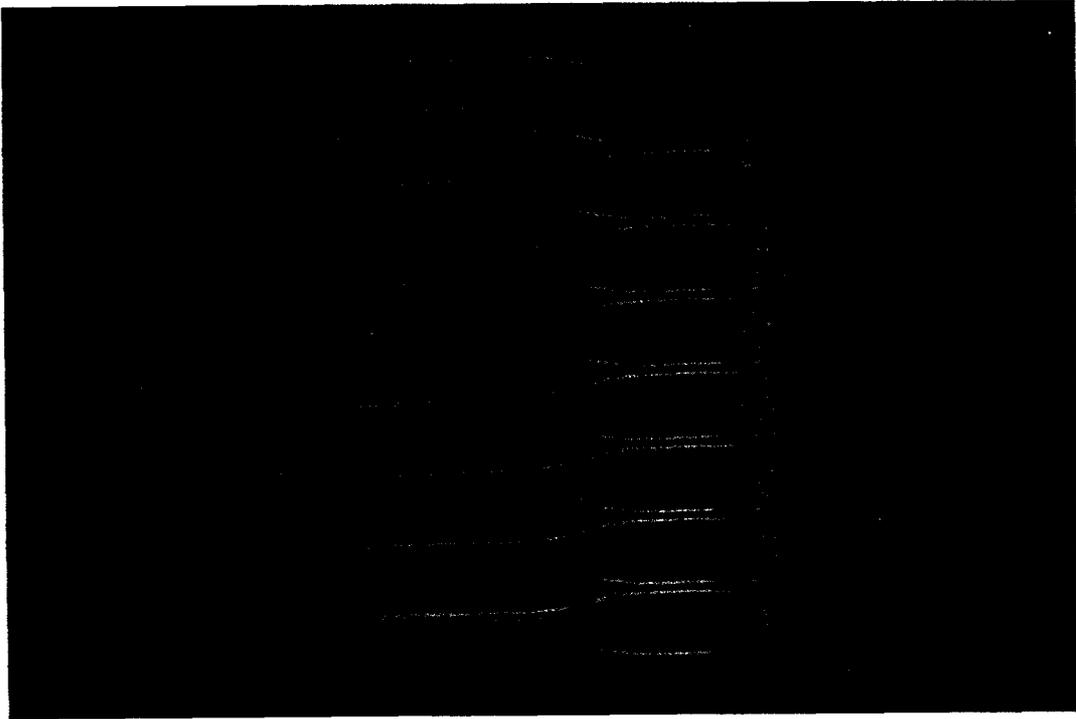
Asservissement pression du polymère : 5 volts

Retard 0.5 s P.I.D. : 1.0.0.

**ANALYSE DES EPROUVETTES SOUS**  
**LUMIERE POLARISEE**

**Boucle fermée sur la pression du polymère**

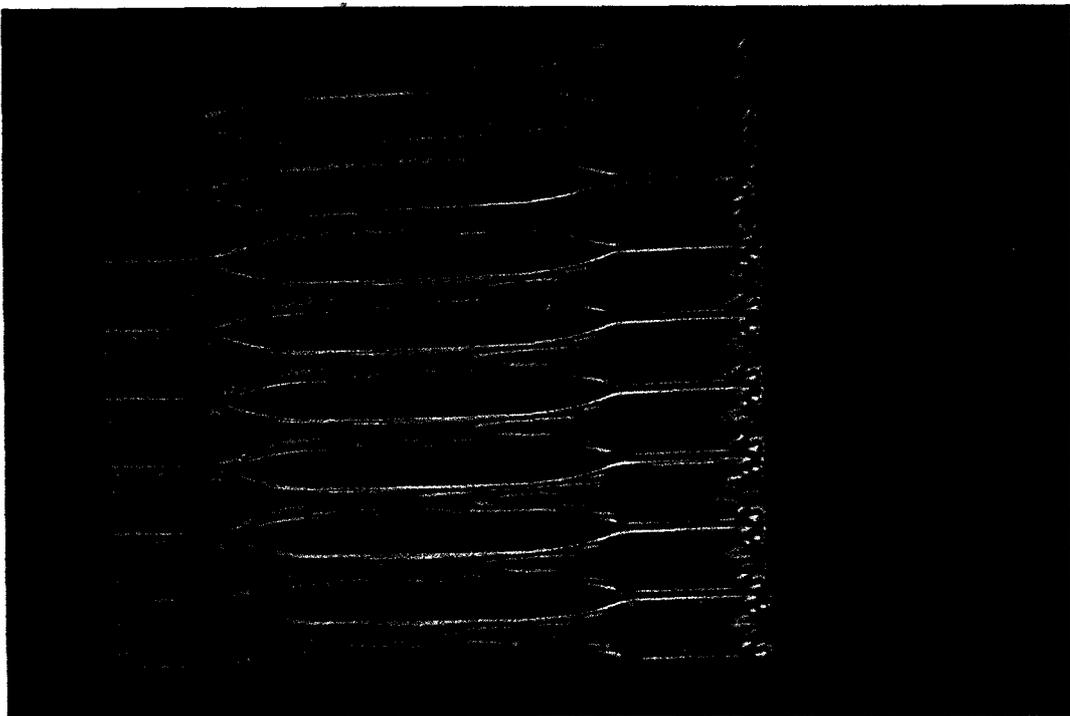
**Temps de maintien croissant (12s,13s,14s,15s,16s,17s,18s,19s,20s)**



**Boucle fermée sur la pression du polymère**

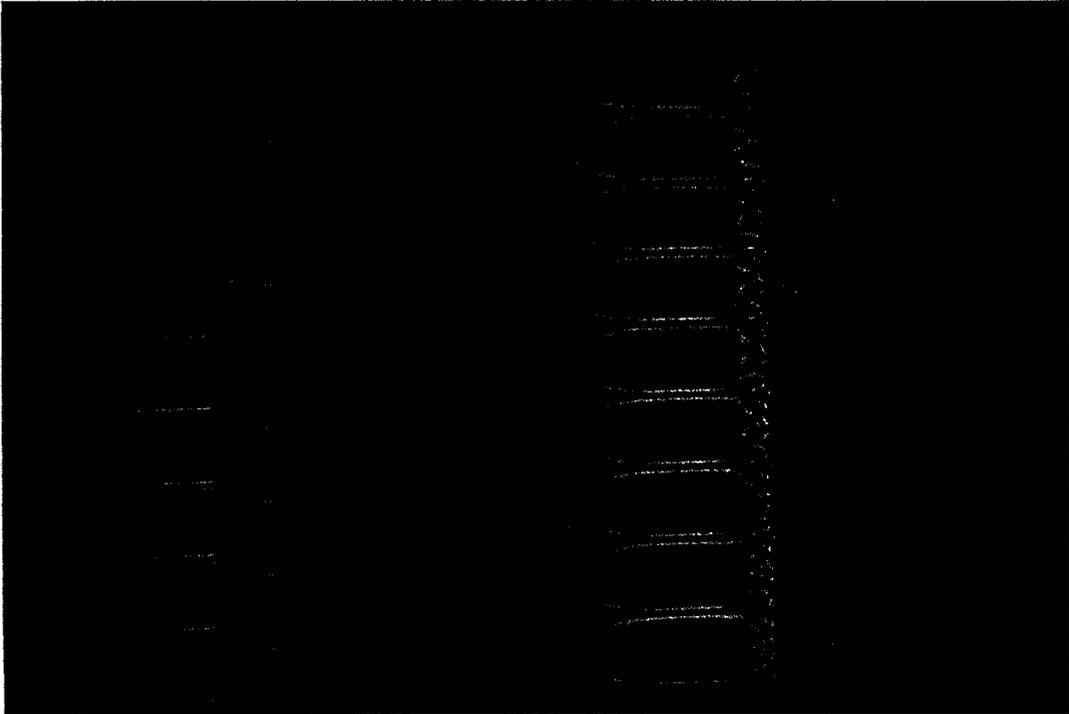
**Temps de maintien croissant (12s,13s,14s,15s,16s,17s,18s,19s,20s)**

**Eprouvettes avec ligne de soudure**



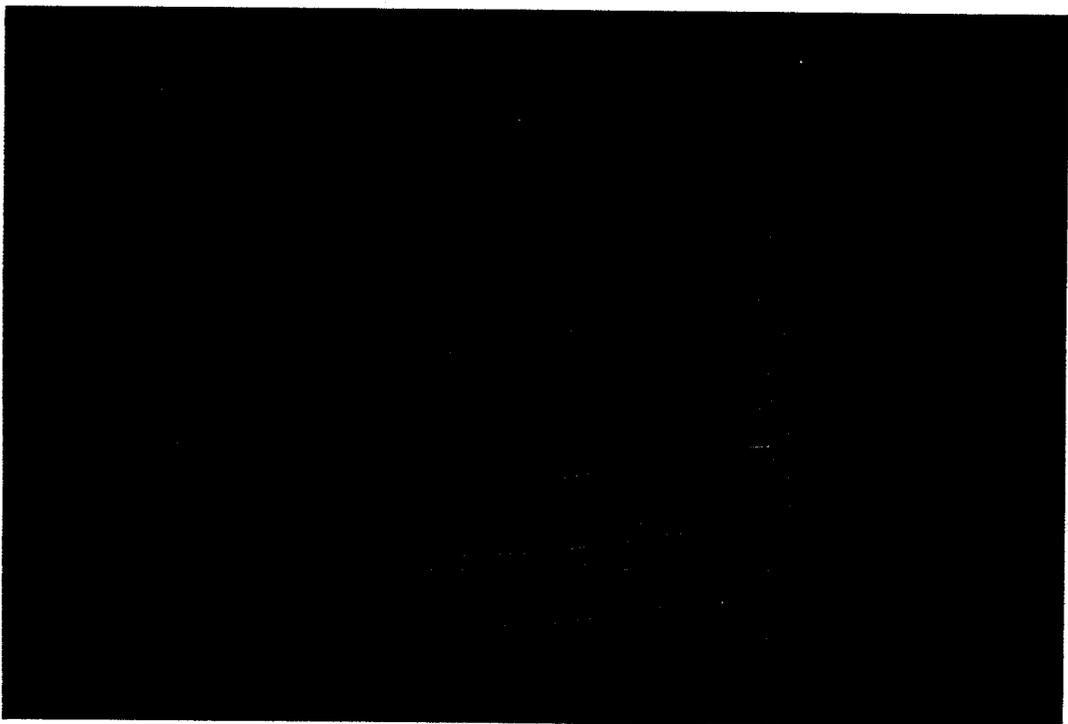
**Boucle fermée sur la pression du polymère**

**Niveau de pression croissant (-20%,-15%,-10%,-5%,0%,5%,10%,15%,20%)**



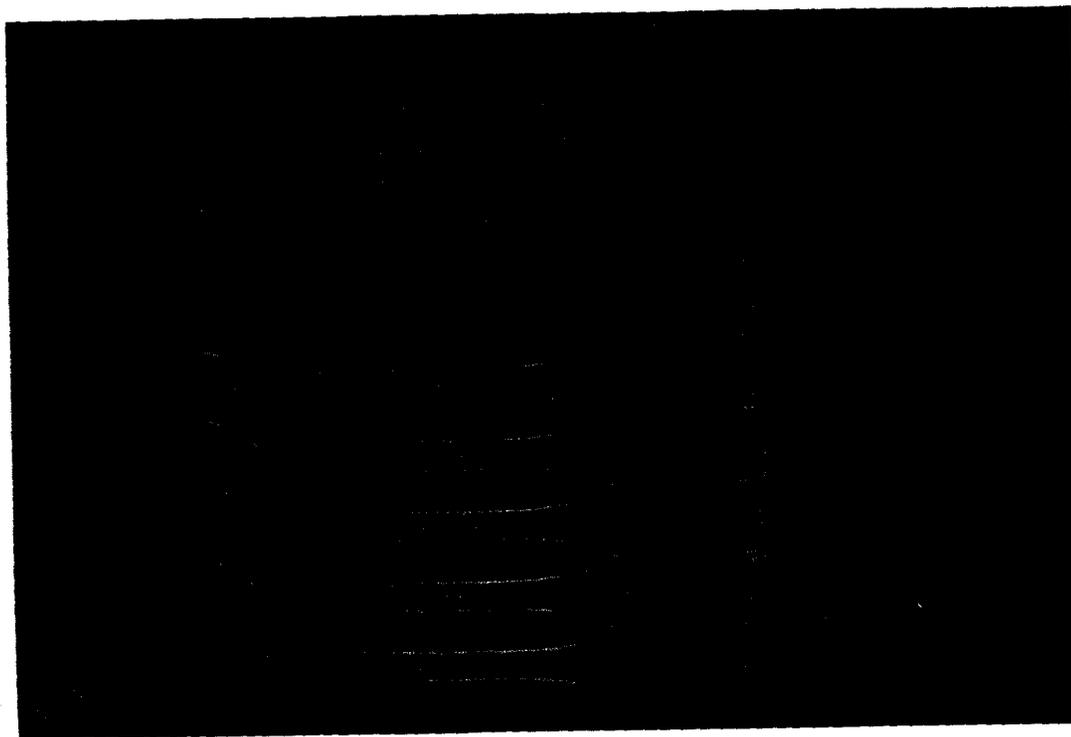
**Boucle fermée sur la pression hydraulique**

**Niveau de pression croissant (-20%,-15%,-10%,-5%,0%,5%,10%,15%,20%)**



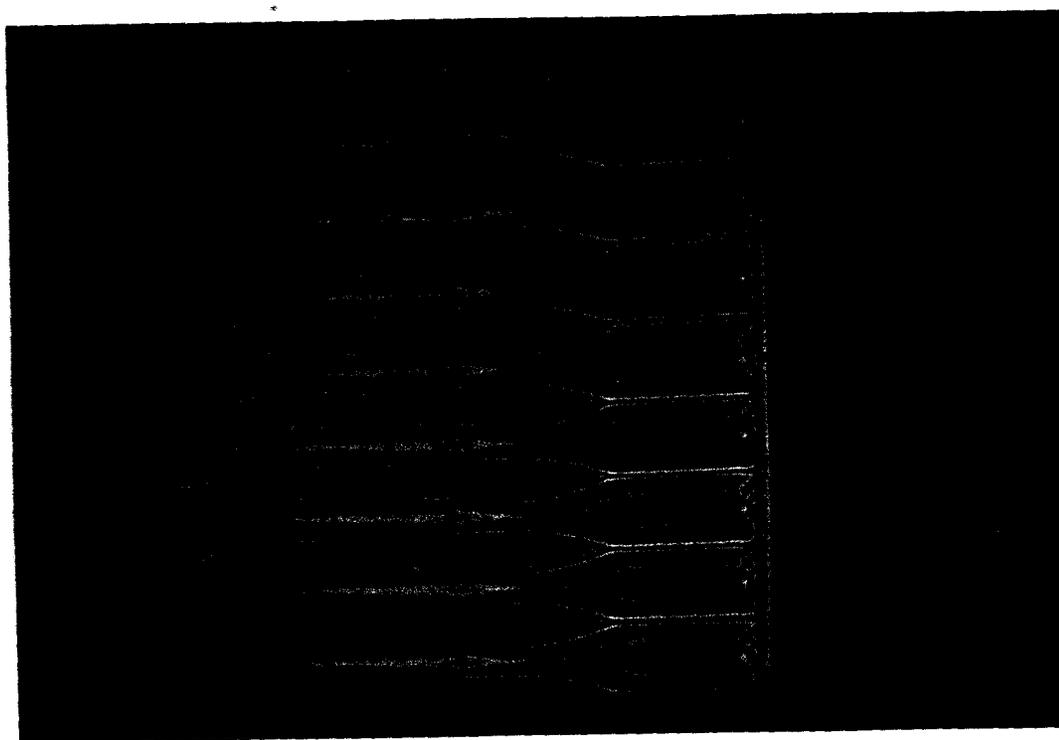
**Boucle fermée sur la pression hydraulique**

**Temps de maintien croissant (12s,13s,14s,15s,16s,17s,18s,19s,20s)**



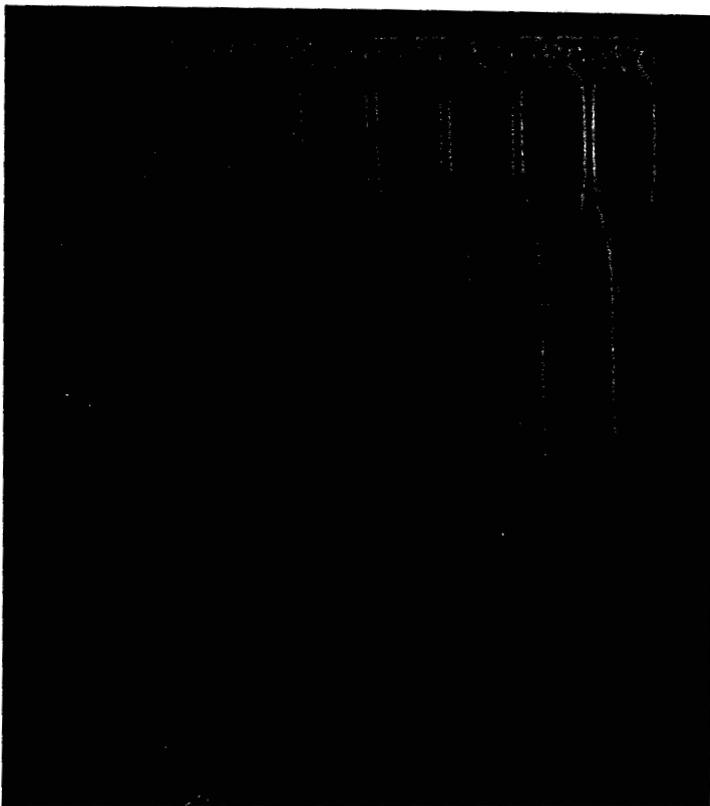
**Boucle fermée sur la pression hydraulique**

**Temps de maintien croissant (12s,13s,14s,15s,16s,17s,18s,19s,20s)**

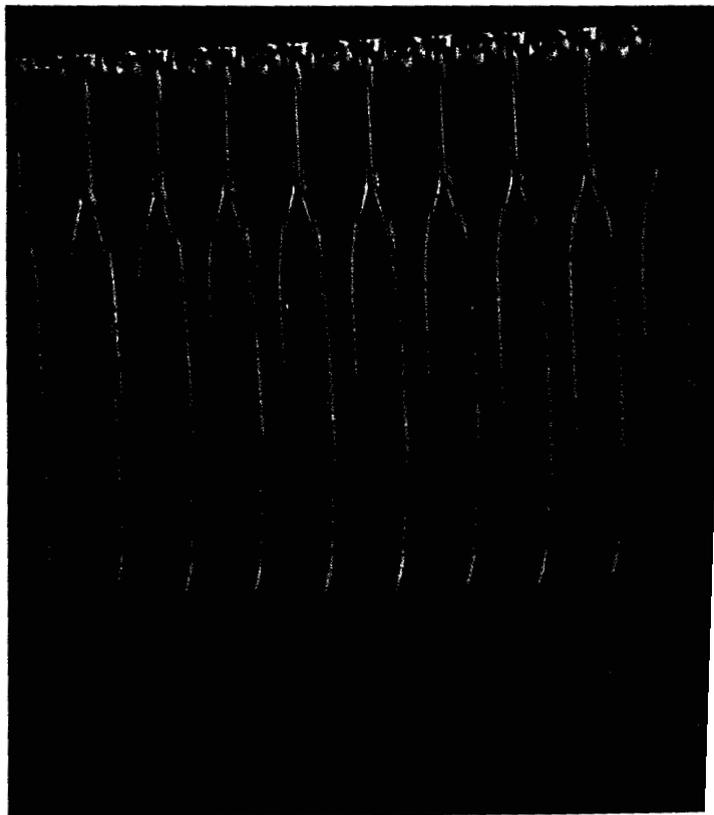


Temps de maintien croissant (12s, 13s, 14s, 15s, 16s, 17s, 18s, 19s, 20s)  
Boucle fermée sur la pression du polymère

AVANT LE PREMIER RECUIT



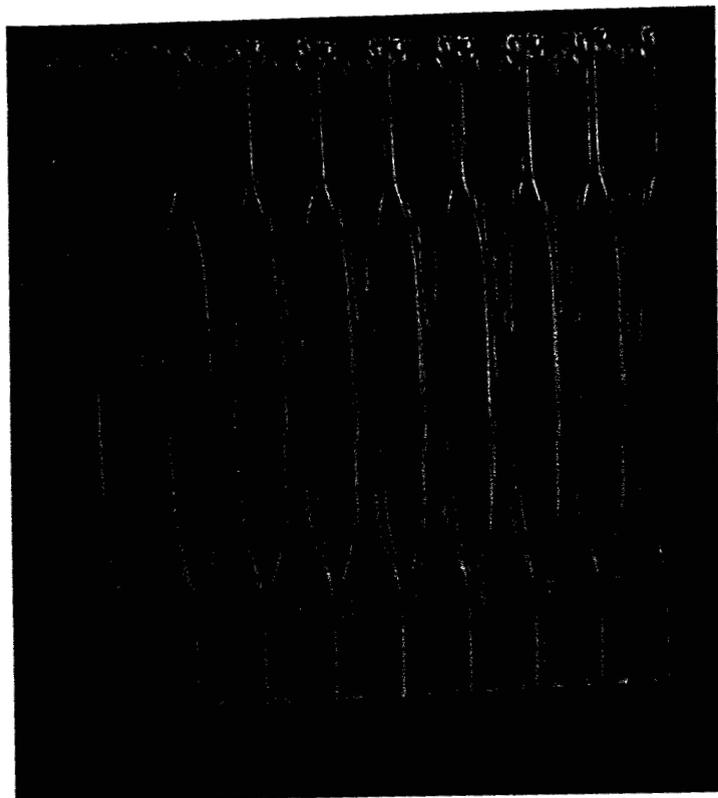
APRES LE PREMIER RECUIT



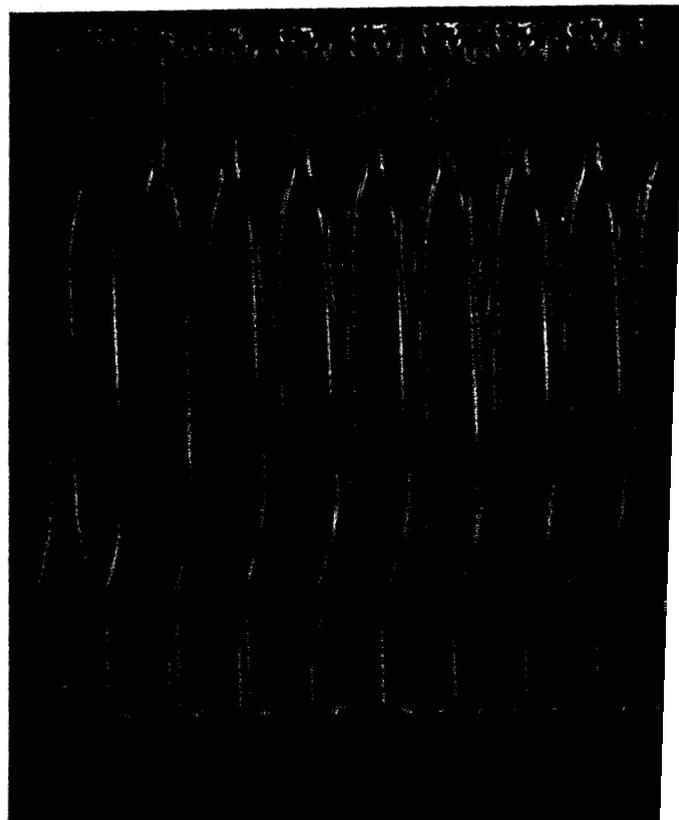
Eprouvettes avec une ligne de soudure

Temps de maintien croissant (12s, 13s, 14s, 15s, 16s, 17s, 18s, 19s, 20s)

AVANT LE PREMIER RECUIT



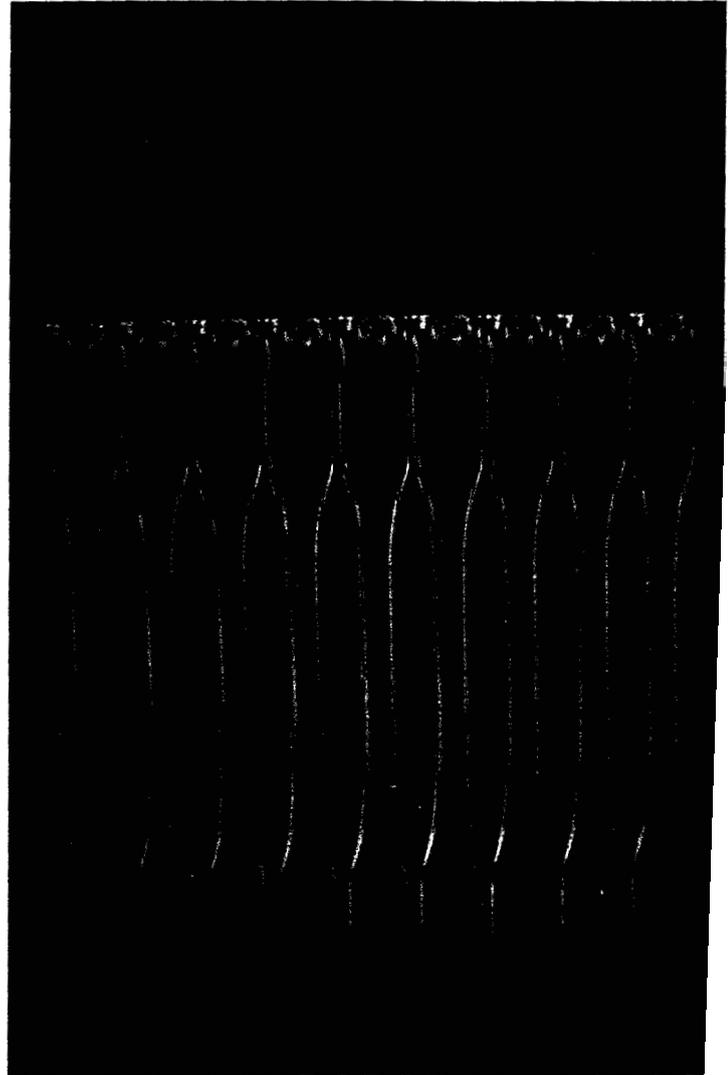
APRES LE PREMIER RECUIT



Niveau de pression croissant (-20%, -15%, -10%, -5%, 0%, 5%, 10%, 15%, 20%)  
Boucle fermée sur la pression du polymère

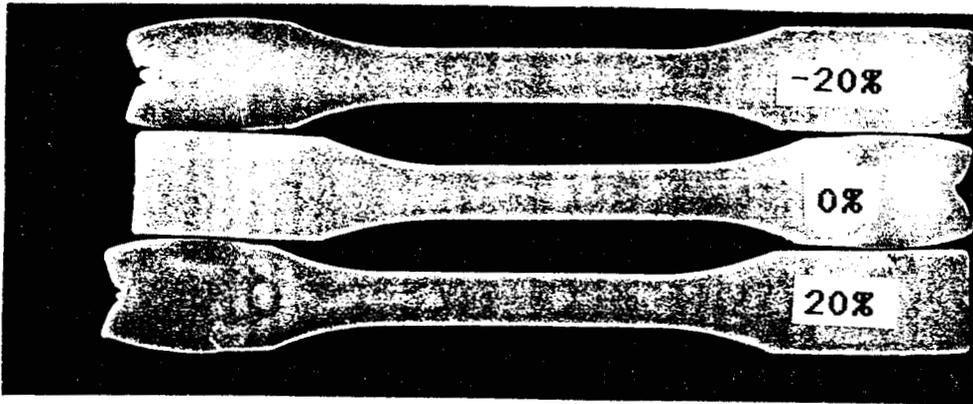
AVANT LE PREMIER RECUIT

APRES LE PREMIER RECUIT

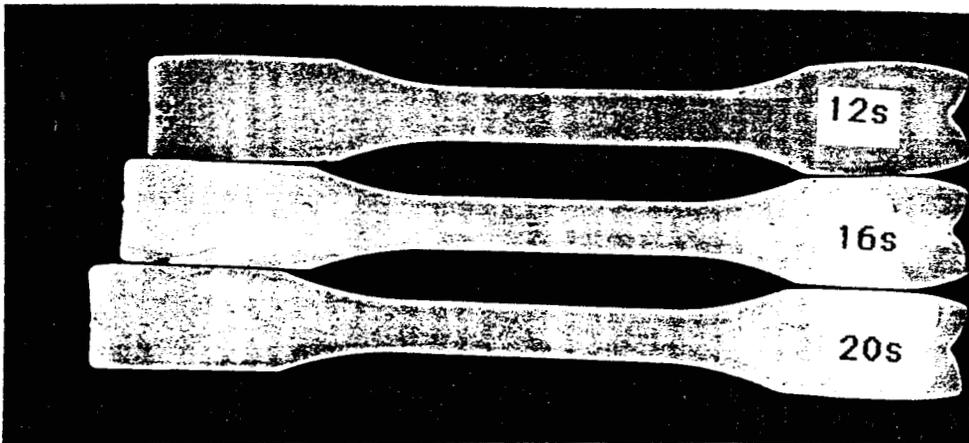


ALLURE DES EPROUVETTES APRES LE SECOND RECUIT

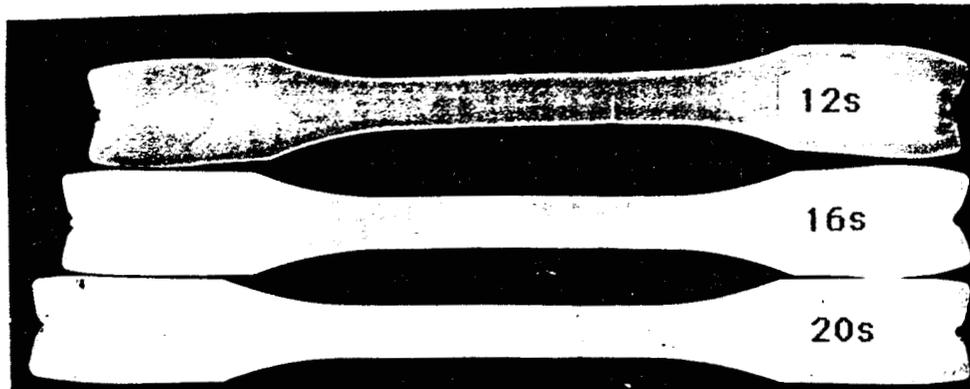
Régulation sur la pression du polymère  
Niveau de pression variable



Régulation sur la pression du polymère  
Temps de maintien variable



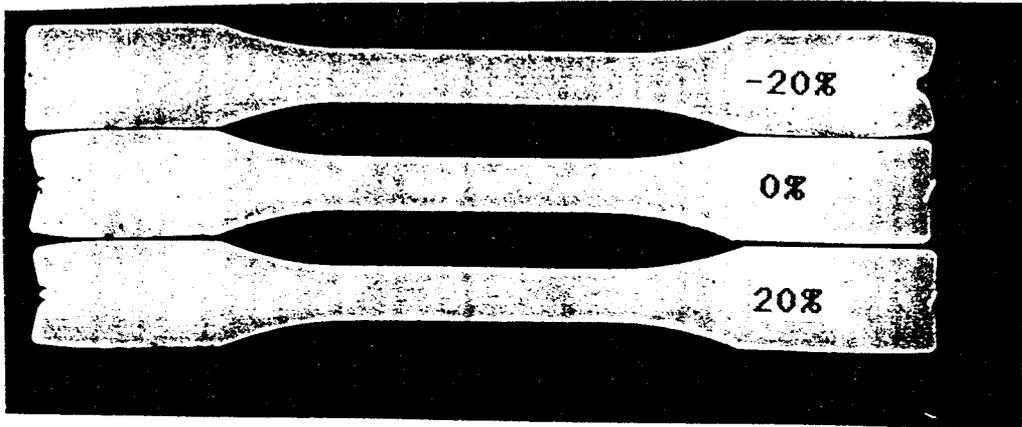
Régulation sur la pression du polymère  
Temps de maintien variable



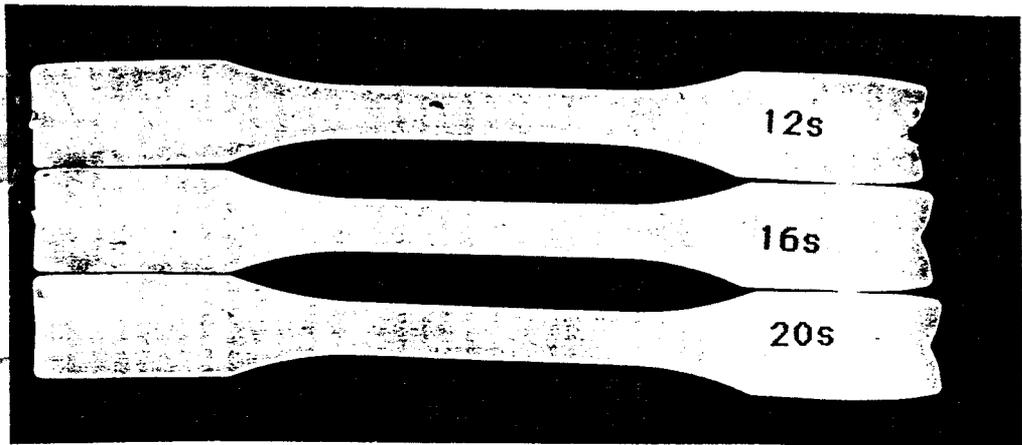
Eprouvettes avec ligne de soudure

ALLURE DES EPROUVETTES APRES LE SECOND RECUIT

Régulation sur la pression hydraulique  
Niveau de pression variable



Régulation sur la pression hydraulique  
Temps de maintien variable



Régulation sur la pression hydraulique  
Temps de maintien variable



Eprouvettes avec une ligne de soudure

REPertoire DES FIGURES
------------------------

Fig 1	Représentation schématique d'une presse à injecter	p 10
Fig 2	Unité de fermeture hydraulique	p 14
Fig 3	Unité de fermeture hydraulique à genouillère	p 15
Fig 4	Unité de fermeture mécanique	p 15
Fig 5	Unité de fermeture hydraulique ouverte/fermée	p 16
Fig 6	Système de plastification d'une extrudeuse	p 18
Fig 7	Vis d'extrusion à trois zones	p 18
Fig 8	Principe de la plastification par l'arrière du filet	p 21
Fig 9	Mouvement de la vis au cours de la plastification	p 23
Fig 10	Eléments complexes de vis de plastification	p 26
Fig 11	Fonctionnement du clapet anti-retour sur vis	p 30
Fig 12	Répartition des pressions au cours du remplissage	p 32
Fig 13	Circuit de transmission de la pression au cours de la phase de maintien	p 33
Fig 14	Fonctionnement du groupe d'injection	p 36
Fig 15	Relations entre les différentes phases de l'injection et la qualité de la pièce	p 42
Fig 16	Variations de la température de l'outillage	p 51
Fig 17	Gradient de température dans le polymère plastifié, après la première injection	p 53
Fig 18	Gradient de température dans le polymère plastifié, après la seconde injection	p 53
Fig 19	Gradient de température dans le polymère plastifié, en régime établi	p 54
Fig 20	Diagramme PVT d'un polymère cristallin (T, V)	p 56
Fig 21	Diagramme PVT d'un polymère amorphe (T, V)	p 56
Fig 22	Diagramme PVT d'un polymère cristallin (P, V)	p 57
Fig 23	Diagramme PVT d'un polymère amorphe (P, V)	p 57

Fig 24	Phénomènes mécanique et thermique pendant la phase d'injection	p 59
Fig 25	Superposition de deux diagrammes PVT établis à des taux de refroidissement différents	p 61
Fig 26	Schématisation d'un cycle d'injection dans un diagramme PVT	p 62
Fig 27	Schématisation d'un cycle d'injection dans un diagramme PVT	p 63
Fig 28	Principe de fonctionnement des modules de commande basés sur les diagrammes PVT	p 66
Fig 29	Cycle d'injection dans un diagramme PVT	p 73
Fig 30	Cycle d'injection dans un diagramme PVT	p 74
Fig 31	Cycle d'injection dans un diagramme PVT	p 76
Fig 32	Ensemble des moyens expérimentaux mis en place	p 79
Fig 33	Grappe d'éprouvettes	p 82
Fig 34	Schéma de l'ensemble de commande de la presse	p 84
Fig 35	Chaîne de mesure utilisée	p 85
Fig 36	Instabilités de pression à gain élevé	p 86
Fig 37	Evolution de pression avec un gain constant	p 87
Fig 38	Evolution de la section utile de l'empreinte (t)	p 89
Fig 39	Evolution de la section utile de l'empreinte (t + $\delta t$ )	p 89
Fig 40	Evolution de la température moyenne dans la pièce	p 90
Fig 41	Position de l'isotherme 130°C au cours du temps	p 93
Fig 42	Evolution du rapport des pertes de charge au cours du temps	p 94
Fig 43	Loi d'évolution de la pression en amont du seuil	p 94
Fig 44	Dispositif d'adaptation du gain et montage de commande séquentielle	p 96
Fig 45	Comparaison des lois de commande théorique et pratique	p 97
Fig 46	Courbe d'adaptation de commande obtenue avec le polymère amorphe	p 98
Fig 47	Evolution de pression obtenue avec une adaptation de gain	p 99
Fig 48	Enregistrements de pression nécessaires à l'étude de la réponse indicielle	p 100

Fig 49	Installation utilisée pour l'étude de la réponse indicielle	p 101
Fig 50	Réponse indicielle obtenue	p 102
Fig 51	Réponse indicielle et modèle de STREJC	p 104
Fig 52	Sous ensemble de pilotage complet du processus	p 106
Fig 53	Topologie de l'asservissement utilisé	p 107
Fig 54	Résultats obtenus en commande classique et en commande modifiée	p 108
Fig 55	Amélioration notoire du temps de maintien à pression constante	p 108
Fig 56	Chemin thermodynamique complet	p 114
Fig 57	Détail sur le point de passage en maintien	p 114
Fig 58	Passage tardif en pression de maintien	p 114
Fig 59	Passage précoce en pression de maintien	p 115
Fig 60	Premier cas : régulation en entrée de cavité	p 116
Fig 61	Second cas : régulation au fond de l'empreinte	p 117
Fig 62	Largeur de l'ISO 1 en fonction du temps, régulation de la pression au fond de l'empreinte	p 118
Fig 63	Largeur de l'ISO 1 en fonction du temps, régulation de la pression à l'entrée de l'empreinte	p 119
Fig 68bis	Evolution des pressions	p 124
Fig 64	Résultats obtenus par l'I.K.V. au cours d'une variation de la température du polymère	p 126
Fig 65	Résultats obtenus par nos soins au cours d'une variation de la température du fourreau	p 126
Fig 66	Evolution de la masse de l'ISO 1 en fonction de la température du fourreau	p 127
Fig 67	Description des variations imposées sur les paramètres d'entrée	p 131
Fig 68	Evolution du chemin thermodynamique moyen parcouru au cours des cycles d'injection	p 132
Fig 69	Identification de la relation masse barreau = fonction des conditions de maintien	p 133
Fig 70	Relation entre la masse des pièces injectées et le niveau de pression d'injection	p 134
Fig 71	Relation entre la longueur des pièces injectées et le niveau de pression d'injection	p 135
Fig 72	Relation Longueur=f(pression) en fonction de la température de l'outillage	p 135

Fig 72bis Représentation des lois pressions de maintien- température	p 136
Fig 73 Evolution de la pression hydraulique en fonction du temps de maintien	p 138
Fig 74 Evolution de la masse de l'éprouvette ISO 1 en fonction du temps de maintien	p 138
Fig 75 Evolution de la longueur de l'éprouvette ISO 1 en fonction du temps de maintien	p 139
Fig 76 Evolution de la largeur de l'éprouvette ISO 1 en fonction du temps de maintien	p 139
Fig 77 Evolution de l'épaisseur de l'éprouvette ISO 1 en fonction du temps de maintien	p 140
Fig 78 Mise en évidence du pic de pression hydraulique à la fin de la phase de maintien	p 142
Fig 79 Evolution de la masse et de la pression hydraulique en fonction du temps de maintien	p 143
Fig 80 Gradients de température présents dans un élément rectangulaire injecté	p 146
Fig 81 Etablissement des contraintes internes au cours du refroidissement de la pièce injectée	p 147
Fig 82 Répartition des contraintes en fonction de l'épaisseur	p 150
Fig 83 Position des échantillons qui sont extraits des éprouvettes	p 153
Fig 84 Montage des échantillons sur le dilatomètre	p 153
Fig 85 Ensemble des données exploitées avec la dilatométrie	p 155
Fig 86 Détail sur la relaxation des échantillons en dilatométrie	p 158
Fig 87 Retrait après recuit suivant la longueur des éprouvettes ISO 1	p 160
Fig 88 Retrait après recuit suivant la largeur des éprouvettes ISO 1	p 161
Fig 89 Retrait après recuit suivant l'épaisseur des éprouvettes ISO 1	p 162
Fig 90 Essais de dilatométrie dans trois directions	p 163
Fig 91 Evolution du coefficient de dilatation des diffé- rentes éprouvettes	p 165
Fig 92 Localisation de la ligne de soudure dans	

l'éprouvette	p 174
Fig 93 Comportement sous traction des différentes éprouvettes	p 184
Fig 94 Evolution de l'allongement à la rupture des éprouvettes (asservissement de la pression hydraulique)	p 187
Fig 95 Evolution de l'allongement à la rupture des éprouvettes (asservissement de la pression du polymère)	p 190
Fig 96 Evolution de la cristallinité du polymère	p 191
Fig 97 Allure générale des courbes efforts/déformations	p 193
Fig 98 Surface de rupture des éprouvettes avec ligne de soudure	p 194

