

UNIVERSITE D'ALGER

2/76

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

Département Génie Chimique

THESE DE FIN D'ETUDES

SUJET :

Détermination d'un Domaine de Température
pour une déformation élevée sous faible
charge du P.M.M.A.

APPLICATIONS:

Conditions Optimales du Thermoformage du
polyméthacrylate de Méthyle

المدرسة الوطنية للعلوم الهندسية

— المكتبة —

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE
BIBLIOTHÈQUE

Proposée par :
Mr G. STONKOI
Docteur Ingénieur

Etudiée par :
Mme BOUTAROUK
Née BENHAMDI Fatiha

UNIVERSITE D'ALGER

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

Département Génie Chimique

THESE DE FIN D'ETUDES

SUJET :

Détermination d'un Domaine de Température
pour une déformation élevée sous faible
charge du P.M.M.A.

APPLICATIONS :

Conditions Optimales du Thermoformage du
polymethacrylate de Methylene

Proposée par :

Mr G. STONKOI

Docteur Ingénieur

Etudiée par :

Mme BOUTAROUK

Née BENHAMDI Fatiha

=====

ST-2 MON MARI

ST-2 M ES PARENTS

"- JE DEDIE CE TRAVAIL -"

=====

*** INTRODUCTION ***

Notre Etude consiste à déterminer un domaine de température : pour une déformation élevée sous faible charge d'un Thèrmoplastique.

Le Thèrmoplastique choisi est le Polyméthacrylate de Méthyle (P.M.M.A.), à cause de sa grande utilisation dans la Technique du Thermoformage.

Cette méthode de transformation présente l'avantage d'être facile à réaliser, nécessite peu d'appareillage sophistiqué, d'autre part ce polyméré, importé sous formes de plaques est assez courant sur le Marché Algérien ; dans ce sens l'extrapolation des résultats pourrait contribuer au développement de l'Industrie locale.

Nous aurons d'une part à faire une Etude Thèrmomécanique à partir de laquelle nous déterminerons le domaine de températures possibles pour cette transformation, d'autre part à établir les courbes contraintes déformation à différentes vitesses et températures de déformation.

* I. - E TUDE THEORIQUE *

A - GENERALITES

/_es Matières plastiques sont définies comme un grand groupe de matières solides composites en grande partie organique ; normalement à base de résines synthétiques ou de polymères d'origine naturelle modifiés et possédant une résistance mécanique appréciable. A un stade approprié de leur fabrication, la plupart des matières plastiques peuvent être coulées, moulées ou polymérisées directement en forme d'objets.

/_l'importance des matières plastiques n'échappe à personne. Les producteurs mondiaux agrandissent et modernisent leurs installations pour répondre à la demande croissante des matières plastiques. Les deux (2) principaux producteurs mondiaux ont été jusqu'en 1945 - Les U.S.A. & L'ALLEMAGNE.

/_n 1969 (I) Les données sont les suivantes :

En Millions de Tonnes.

U.S.A.	=	6,35
JAPON	=	4,5
R.F.A.	=	3,9
ITALIE	=	1,58
ANGLETERRE	=	1,35
FRANCE	=	1,306

En 1975 la consommation annuelle mondiale des plastiques a atteint 35 Millions de Tonnes.

Les Statistiques prévoient qu'en 1983 cette consommation serait du même ordre de grandeur que celle du fer.

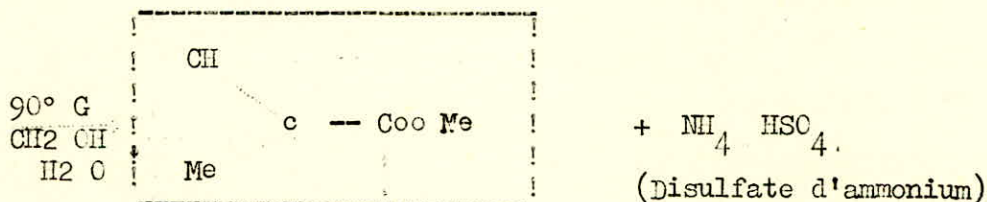
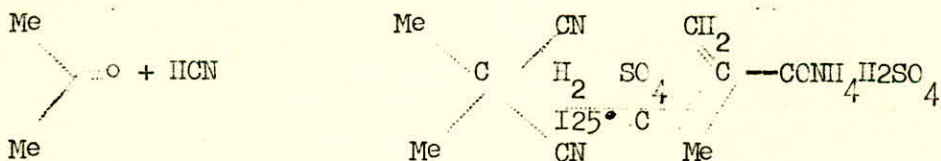
 - B - SYNTHESES ET PROCESSES DE POLYMERISATIONS
 DU METHACRYLATE DE METHYLE (M.M.A.)

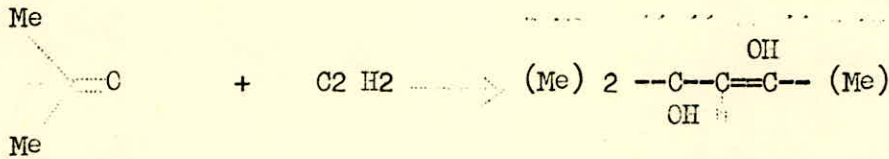
B. I SYNTHESE DU M.M.A.

ROWLAND H'ILLE 1927 (2) , I.C.I. , a étudié en détail le Méthacrylate de méthyle et sa polymérisation.

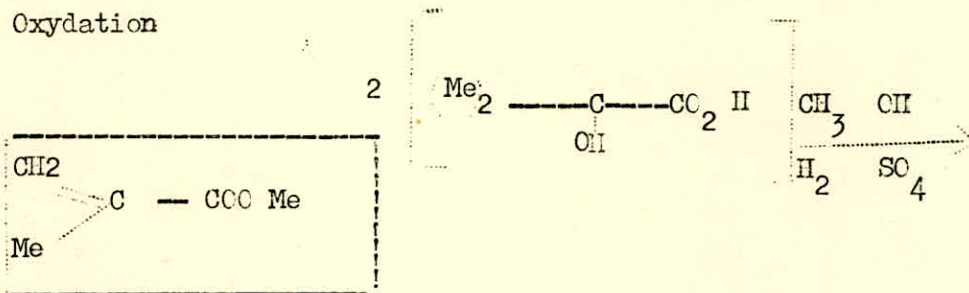
De son côté CRAWFORD (2), I.C.I. a mis au point un procédé industriel de fabrication du monomère.

La préparation du monomère se fait suivant les deux réactions suivantes :





Oxydation



Le Méthacrylate de Méthyle est soigneusement purifié par distillation dans des enceintes en cuivre pour éviter sa polymérisation prématurée.

Il peut être conservé à l'état monomère par addition de quantités adéquates d'inhibiteurs comme l'hydroquinone.

D.2 PROCÉDES DE POLYMERISATION

La polymérisation radicalaire conduit à des Structures différentes ceci en fonction du procédé d'obtention.

On connaît aujourd'hui cinq procédés de polymérisation.

- En Masse
- En Suspension
- En Emulsion
- En Solution
- En Granulés

B.2.I. POLYMERISATION EN MASSE :

/_e procédé consiste à faire le mélange du monomère exempt d'inhibiteur (par lavage à l'aide d'un alkali au paravant) avec un catalyseur soluble dans ce monomère (peroxyde de benzoyle), entre les plaques en verres d'une étuve maintenue à une température moyenne et laisser ainsi la polymérisation se produire.

/_a réaction étant exothermique, le problème est l'élimination de la chaleur dégagée au cours de celle-ci afin d'augmenter le débit de production d'une part et d'améliorer la qualité du produit.

/_n principe tous ces problèmes ont été résolus par différentes méthodes. Ce procédé nous permet l'obtention de barres de tubes coulés et des feuilles qui sont utilisées telles quelles ou formées après ramollissement par chauffage.

B. 2.2. POLYMERISATION EN SUSPENSION

Le processus est réalisé entre 100 & 130° c .

Le monomère est ajouté à l'eau puis réduit en fines gouttelettes par agitation. On ajoute un colloïde protecteur (l'alcool polyvinylique ou le polycrylate de sodium) afin d'éviter une coalescence éventuelle de ces gouttelettes lorsque la polymérisation est partiellement réalisée.

Le catalyseur utilisé est le peroxyde de benzoyle,

Le produit ainsi obtenu est sous formes de petites perles qui sont filtrées, lavées et séchées. Elles sont ensuite utilisées pour le moulage par injection ou par compression d'objets de petites dimensions (3).

B.2.3. - POLYMERISATION EN EMULSION

Le procédé se fait ainsi : on ajoute d'abord l'agent émulsionnant et un catalyseur soluble dans l'eau (H₂ O₂, K₂ S₂ O₈ (NH₄)₂ S₂ O₈) puis le monomère qui est dispersé par agitation. La polymérisation est réalisée par chauffage.

... / ...

/_es émulsions acryliques obtenues sont utilisées pour l'enduction du cuir et la fabrication de peinture à base d'eau.

D.2.4. POLYMERISATION EN SOLUTION :

/_e monomère est ajouté à un solvant organique (Toluène, Acétone, Acétate d'Ethyle), dans lequel le monomère et le polymère sont solubles le catalyseur utilisé doit également être soluble dans le solvant et pour cela on utilise des peroxydes organiques (Péroxyde de Benzoyle et Péroxyde de $\text{Lau} \cdot \text{yl}$).

∟ette méthode de polymérisation est très intéressante quand on veut obtenir un produit final à utiliser sous forme de solution, comme les adhésifs et les vernis, car le séchage du polymère est difficile et les degrés de polymérisation sont assez limités donc un poids moléculaire faible.

D.2.5. - POLYMERISATION EN GRANULES :

∟n utilise des petites quantités d'eau : et de lubrifiant et un catalyseur soluble dans l'eau ou dans le monomère. La polymérisation est effectuée dans un malaxeur puissant comportant un agitateur à lame, en forme de sigma. (2).

/n pétrissage continu du matériau pendant la polymérisation entraîne la formation de particules granulaires floconneuses.

*
*
C - MISE EN OEUVRE DU P.M.M.A. *
*

Compte tenu du fait que les opérations ultérieures de moulage et de formage sont profondément influencées par le mode de traitement de la matière, il importe d'accorder un maximum d'attention à la mise en oeuvre du polymère.


Comme la plupart des autres matériaux, les matières plastiques organiques enregistrent certaines modifications de leurs caractéristiques.


Les causes de ces modifications résident, d'une part dans la structure même de la substance macromoléculaire et d'autre part peuvent être dues à diverses influences extérieures; en particulier, aux températures élevées qui interviennent lors de la mise en oeuvre.


En général tous ces processus qui se déroulent à des vitesses variables, entraînent une altération des propriétés technologiques de la matière plastique et une diminution de la longévité des articles fabriqués


.../...


il ressort de ce qui précède que la connaissance de la façon de remédier à l'instabilité des matières plastiques est au moins aussi importante pour sa mise en oeuvre et ses applications pratiques, que sa production.

C.1. -  TABILISATION

ratiquement tous les polymères sont susceptibles de se dégrader physiquement ou chimiquement sous l'action directe de la chaleur, de la lumière et de l'oxygène et de l'ozone.

ette dégradation se manifeste par une perte de résistance, une érosion de surface, le garrichissement, le fendillement, une diminution de transparence.

Les tabilisants agissent pour limiter les processus de dégradation pouvant affecter les polymères.

Les sont les vieillissements au stockage, oxydation (par des catalyseurs métalliques), l'effet de la chaleur et de la lumière, fendillement dû à la flexion qui est accéléré par l'ozone) et aux agents atmosphériques.

C. 2 - LASTIFICATION

/_es plastifiants sont des semi-solvants peu volatils que l'on incorpore aux polymères, leur rôle est de diminuer les forces de liaisons entre les différentes chaînes macromoléculaires en créant des liaisons polymère-Plastifiant.

IL en résulte, une diminution de la température de transition vitreuse et une augmentation de l'aptitude à la déformation.

On peut ainsi passer par la plastification d'un plasto-
mère à un élastomère.

/_e fait que les plastifiants doivent être peu volatils, a conduit à l'utilisation de plastifiants de poids moléculaires de plus en plus élevés.

/_es plastifiants utilisés en pratique sont les sébacates de butyle ou de benzyle, le phtalate de butyle, de dioctyle, les phosphates de triphényle et de tricrésyl.

C. 3 - /_UBRIFICATION *****

/_a lubrification a pour rôle de faciliter l'écoulement, du polymère fondu dans des filières métalliques et les moules; ainsi que le démoulage du produit fini. Dans ce dernier stade on pulvérise sur la surface du moule une émulsion qui diminue l'adhésion du polymère sur le métal.

/_e choix du lubrifiant doit tenir compte du mode de transformation. Lors de l'extrusion et de l'injection la matière est soumise à une forte contrainte tant thermique que mécanique et l'addition d'un lubrifiant interne est dès lors de rigueur.

/_e cas que l'on a cité ci-dessus n'a pas une grande importance dans l'étude pour le P.M.M.A, car comme on le verra plus loin, les transformations d'extrusion et d'injection ne peuvent être utilisées pour le P.M.M.A, car la température de fusion est très proche de la température de dégradation.

/_es risques d'adhérences sont particulièrement notables lors de la fabrication de feuilles par calendrage, mais on peut y remédier en utilisant un lubrifiant externe.

C.4 - CHARGES :

Dans la mise en oeuvre du P.M.M.A, les charges sont rarement utilisées. Elles sont en général de nature minérale en prépondérance; et la proportion de charges organiques est assez faible.

.../...

/_l'addition de charges a pour but essentiel de réduire le prix de revient du produit et par la suite conférer des propriétés particulières aux articles finis.

C.5 - II COLORANTS :

/es colorants sont définis comme des produits chimiques organiques, synthétiques ou naturels, solubles dans la plupart des solvants courant tels que l'eau et l'alcool.

Ils possèdent une très bonne résistance à la décoloration et existent dans une grande gamme de couleurs.

/_a densité des colorants est normalement basse et ils se caractérisent en général par une faible absorption du plastifiant.

Pour le P.M.M.A., les colorants convenables sefaient des colorants solubles dans les hydrocarbures, des phtalocyanines.

*
D. - METHODES ET PARAMETRES DE TRANSFORMATION *
*****X

.../...

PAGE : 12

/_es poudres à mouler peuvent être extrudées, ou moulées.

/_es produits en P.M.M.A., sont travaillés soit à froid soit à chaud.

D.I - E X T R U S I O N :

E le procédé consiste à pousser le mélange uniformément chauffé et ramolli, par la vis de l'extrudeuse à travers une filière, et par la suite le refroidir.

/_a séquence fondamentale des opérations est la suivante :

- Plastification de la matière première granulaire.
- Dosage du produit plastifié à travers une filière qui le transforme à la forme et à la cote désirée.

a) - La partie alimentation : sert au transport du matériau de la trémie à la partie compression. Auparavant les granules sont réchauffés et préplastifiés.

b) - La partie compression: La diminution graduelle de la profondeur du filet de la vis provoque une compression en volume des granules en fusion et par voie de conséquence, élimine l'air qui est forcé en arrière à travers la partie alimentation.

c) La partie dosage : doser le polymère fondu à travers une filière à débit régulier afin d'éviter les pulsations.

/_a vis est d'habitude pourvue d'un noyau pour le chauffage à la vapeur ou le refroidissement à l'eau. La conception de la tête du fût est importante, en particulier dans le cas du P.M.M.A, et du P.V.C., et doit permettre un écoulement continu et régulier du matériau sans " points morts " où celui-ci peut stagner et se décomposer à cause de la surchauffe car le point de dégradation est proche de la température nécessaire à l'obtention d'une fluidité adéquate.

D.2. MOULAGE PAR INJECTION :

/_e principe est le suivant :

/_a résine en fusion est injectée dans un moule à deux matrices. Elle s'y solidifie en formant un objet qui est injecté par ouverture du moule. Dans ce procédé de transformation, la plastification s'opère dans un cylindre appelé " pot d'injection ", la mise en forme et la fixation, dans le moule. Une bonne fluidité de la matière mise en oeuvre est une condition impérative pour obtenir un moulage impeccable.

Contrairement à d'autres thermoplastiques, le P.M.M.A, à l'état de fusion possède une viscosité très élevée et fait preuve d'une instabilité thermique dans l'intervalle des températures requises pour l'injection.

Par suite des risques de décomposition, qui sont assez élevés pour le P.M.M.A, que pour d'autres thermoplastiques, le choix des conditions de travail est très limité .

D.3. - USINAGE A FROID :

La plupart des outils et machines employés pour le travail du bois et du métal conviennent à l'usinage des semi-produits en polyméthacrylate de méthyle. (ceci grâce à ces propriétés physiques remarquables).

Certaines précautions doivent être prises :

- Les outils doivent être tranchants et correctement réctifiés
- Le refroidissement soit à l'eau, soit à l'air comprimé de la pièce, pendant l'usinage afin d'éviter aux outils de s'user.


D.4 - THERMOFORMAGE :

. .. / ...

a) - Généralités : Les techniques de formage des matières plastiques sont de plus en plus utilisées dans des domaines assez variés.

/l'emballage des produits alimentaires ou des objets fait appel de plus en plus souvent à des bacs, des pots, des présentoirs ; ... , réalisés à partir de feuilles ou de plaques en matières thermoplastiques, mises en forme par formage.

/l'éclairage, les enseignes publicitaires, la décoration, l'ameublement , ont pris parti des caractéristiques de transparence des plaques en polyméthacrylate de méthyle et de polythyrène formées. Le génie chimique fait appel à des éléments en polyéthylène de haute densité ou en chlorure de polvinyle formés et associés par soudage, qui concurrencent avec les métaux et en particulier, les alliages inoxydables dans les applications anticorrosion.

 Dans tous les cas cités précédemment, il s'agit de transformer des semi-produits : plaques, feuilles, sans enlèvement de matière.

b) PRINCIPE :

Si nous examinons la courbe déformation en fonction de la température, nous observons trois zones pour lesquelles le matériau présente des comportements différents (voir plus loin détails sur la courbe thermomécanique).

Le formage est impossible à basse température.

A $TV \leq T \leq TF$ c'est le domaine du thermoformage.

A $T \geq TF$ c'est le domaine de l'extrusion et de l'injection.

La déformation de grande amplitude des flans est liée à une transformation affine à caractère entropique des macromolécules pelotonnées à l'intérieur de leur domaine statistiquement sphérique. Le procédé de formage s'effectuerait ainsi :

- Le matériau sera porté à une température

T Tel que $TV \leq T \leq TF$.

- Il sera déformé à l'aide des moyens que l'on verrait ultérieurement.

- Il sera refroidi jusqu'à une température $T \leq TV$

- L'objet conservera alors la forme qu'on lui aura imposé.

/) /us pouvons ajouter que si l'on réchauffe l'objet formé à une température du domaine caoutchoutique, il retrouvera exactement les dimensions et la forme du semi-produit, débarrassé éventuellement de toute tension interne préalable.

/_a réversibilité de la déformation nécessite généralement le maintien du flan de la périphérie de l'empreinte. D'autre part le formage des plastiques doit être suffisamment rapide pour que le matériau demeure caoutchoutique pendant toute la déformation.

/_a dernière phase du formage correspond au refroidissement de la pièce formée. Nous avons vu que le produit mis en forme devait être refroidi au dessous de la T_V ; faute de quoi il risquait de perdre en partie ou totalement sa déformation.

- CHAUFFAGE :

? /e chauffage des flans avant déformation, constitue une étape essentielle du Thermoformage. Nous distinguerons principalement deux méthodes, choisies en fonction des séries envisagées :

+ Le chauffage à l'aide de panneaux émetteurs d'infrarouge ou par conductibilité à partir de plaques chauffantes, pour les pièces donnant des moyennes ou des grandes séries.

.../...

PAGE : 18

+ Le chauffage en étuve à convection forcée ou par immersion dans un bain liquide avant de fixer le semi-produit sur le poste de formage. Ces systèmes sont utilisés dans le cas de réalisation de prototypes ou des petites séries.

/_a densité de chauffe dépend essentiellement du matériau et de la surface de la pièce.

/_ne des conditions primordiales de réussite est l'isothermie du flan, c'est à dire l'absence de pertes thermiques au contact du serre flan par exemple. Mais dans certains cas précis, on essaie d'obtenir des conditions hétérothermiques pour favoriser les déformations dans certaines régions et uniformiser en partie les variations d'épaisseurs.

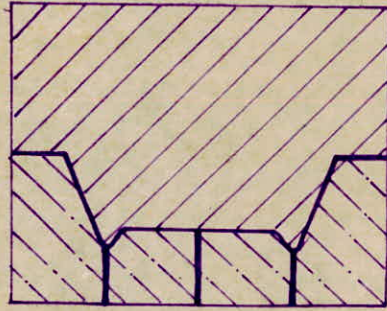
C. - PROCÉDES DE FORMAGE :

Ils existe de nombreux procédés de formage qui découlent de quatre méthodes de base, souvent combinées entre elles ce sont :

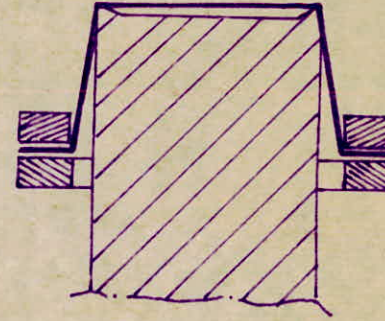
- L'emboutissage
- L'étirage
- Le soufflage
- L'aspiration

Fig: A

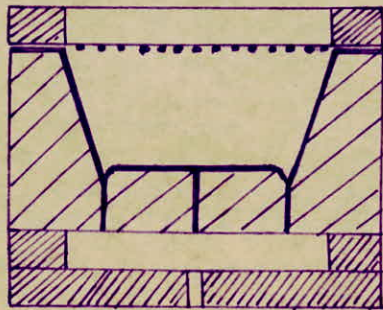
1) EMBOUTISSAGE



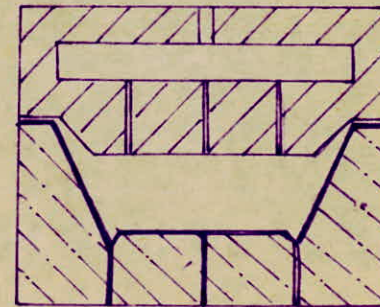
2) POINCONNAGE



3) ASPIRATION



4) Emboutissage et soufflage en moule



C.1. - METHODES THERMOMECHANIQUES :

Les techniques permettent des déformations de profondeur variable ; par emboutissage (Fig. A1) ou par étirage sur poinçon (Fig. A 2).

C.2. - METHODES THERMOPNEUMATIQUES :

Formage par aspiration (Fig. A3).

C.3. - METHODES MIXTES :

Lorsque les profondeurs de formage deviennent très importantes et que les variations d'épaisseurs des objets finis sont inacceptables, on a recours à des méthodes mixtes qui sont des combinaisons des méthodes précédents. Dans ce cas, le formage comprend plusieurs phases, sans refroidissement du flan; par exemple : - emboutissage puis soufflage en moule (Fig. A.4).

E. - PROPRIETES MECANQUES ET THERMOMECHANIQUES
DU PRODUIT

/es propriétés mécaniques des composés macromoléculaires sont d'une importance capitale quant au choix de leurs utilisations techniques.

/es phénomènes observés au cours de l'étude des propriétés, résultent de la superposition des propriétés suivantes :

- a) - l'élasticité pure : Le corps élastique idéal suit la loi de HOOKE à savoir que la déformation est proportionnelle à la contrainte.
- b) - La fluidité visqueuse : propriété d'un corps se déformant sous une très faible charge. Les corps présentent cette caractéristique, suivant la loi de NEWTON.
- c) - La plasticité vraie : un corps déformable ne peut l'être que par application d'une force supérieure à un seuil et conserve la forme acquise après suppression de la force. Suivant que la plasticité ou l'élasticité est la qualité prédominante on parlera de plastoélasticité ou de viscoélasticité.

/e diagramme fig. B représente la courbe déformation en fonction du temps d'un corps viscoélastique soumis à une charge constante et par la suite à une décharge.

/e diagramme met en évidence que le comportement global est la superposition.

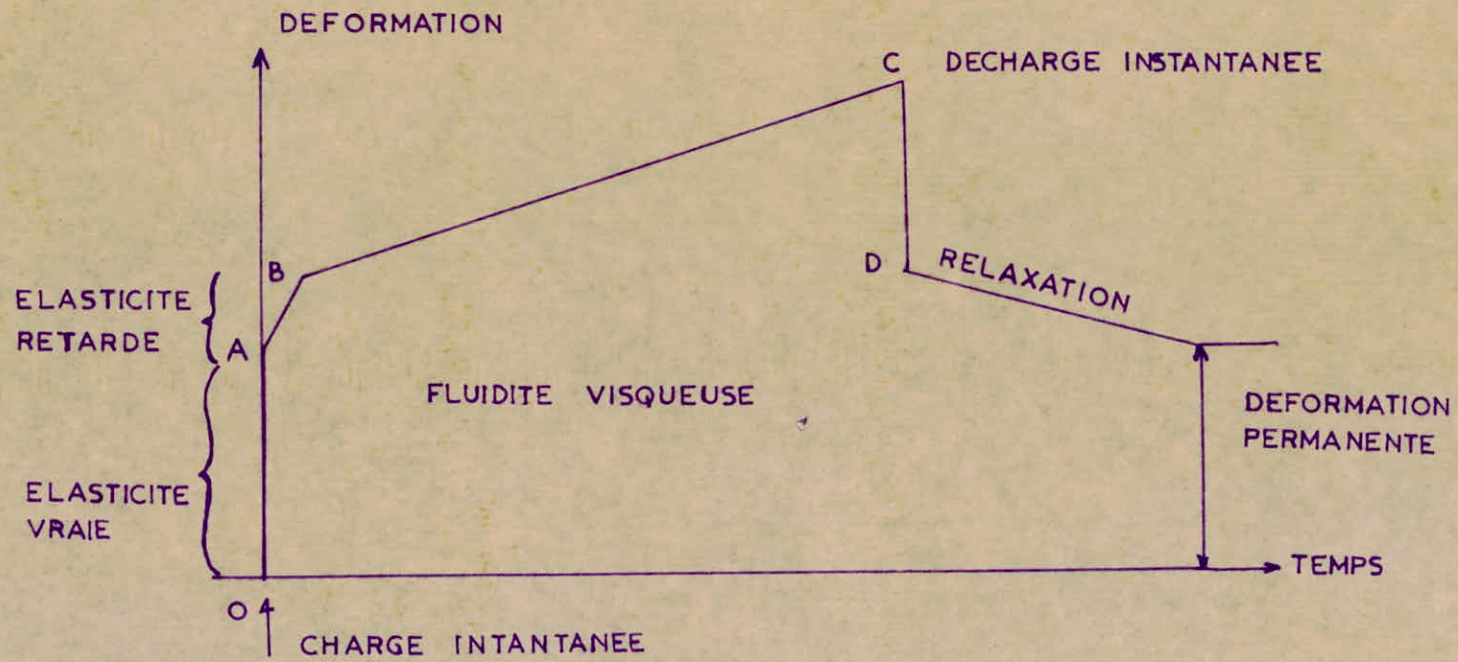


FIG. B (6)

- D'une élasticité vraie.
- D'une fluidité visqueuse.
- D'une élasticité visqueuse.

Le comportement mécanique des polymères ne peut être dissocié de leurs propriétés physiques. Au dessous de la température de transition vitreuse, les polymères sont des solides rigides, élastiques mais généralement fragiles ; leur rupture se produit à des allongement inférieur ou égal à 10 %.

Une température supérieure à la température de transition vitreuse ; le comportement dépend de la nature cristalline ou amorphe du polymère.

Pour les polymères cristallins, à des faibles allongements correspondent des propriétés élastiques suivies pour des allongements élevés d'un comportement plastique. La rupture se produisant à des allongements allant jusqu'à 500 % .

Par contre le polymère amorphe se présente sous la forme d'un solide souple et l'on observe une élasticité de faible module allant jusqu'à des allongements de 1 000 %. Dans ce dernier cas on parle d'élasticité caoutchoutique.

Il est à noter que le polymère amorphe n'est un élastomère qu'à une température supérieure à la température de transition vitreuse.

À des températures supérieures à la température de fusion des polymères cristallins, ou à la zone de fluidification des polymères amorphe, les composés macromoléculaires se comportent comme des liquides visqueux. Il y a une variation de ces propriétés en fonction de la durée d'application des efforts (Fig. C).

Sur la fig. C. nous constatons quatre domaines distincts :

- Le domaine A : correspondant aux temps courts (10^{-5} -s) et aux basses températures; aussi nous avons un module d'élasticité qui reste constant.

Dans ce domaine le polymère se comporte comme un solide rigide, élastiques mais fragile.

- Le domaine C : correspondant aux temps longs, le comportement du polymère dépend de la structure du polymère, de la même manière que pour les températures supérieures à la température de transition vitreuse. Ce domaine correspond à la zone d'élasticité caoutchoutique. Cette zone dépend de la masse moléculaire du polymère.

MODULE
D'ELASTICITE
EN Kg / Mm²

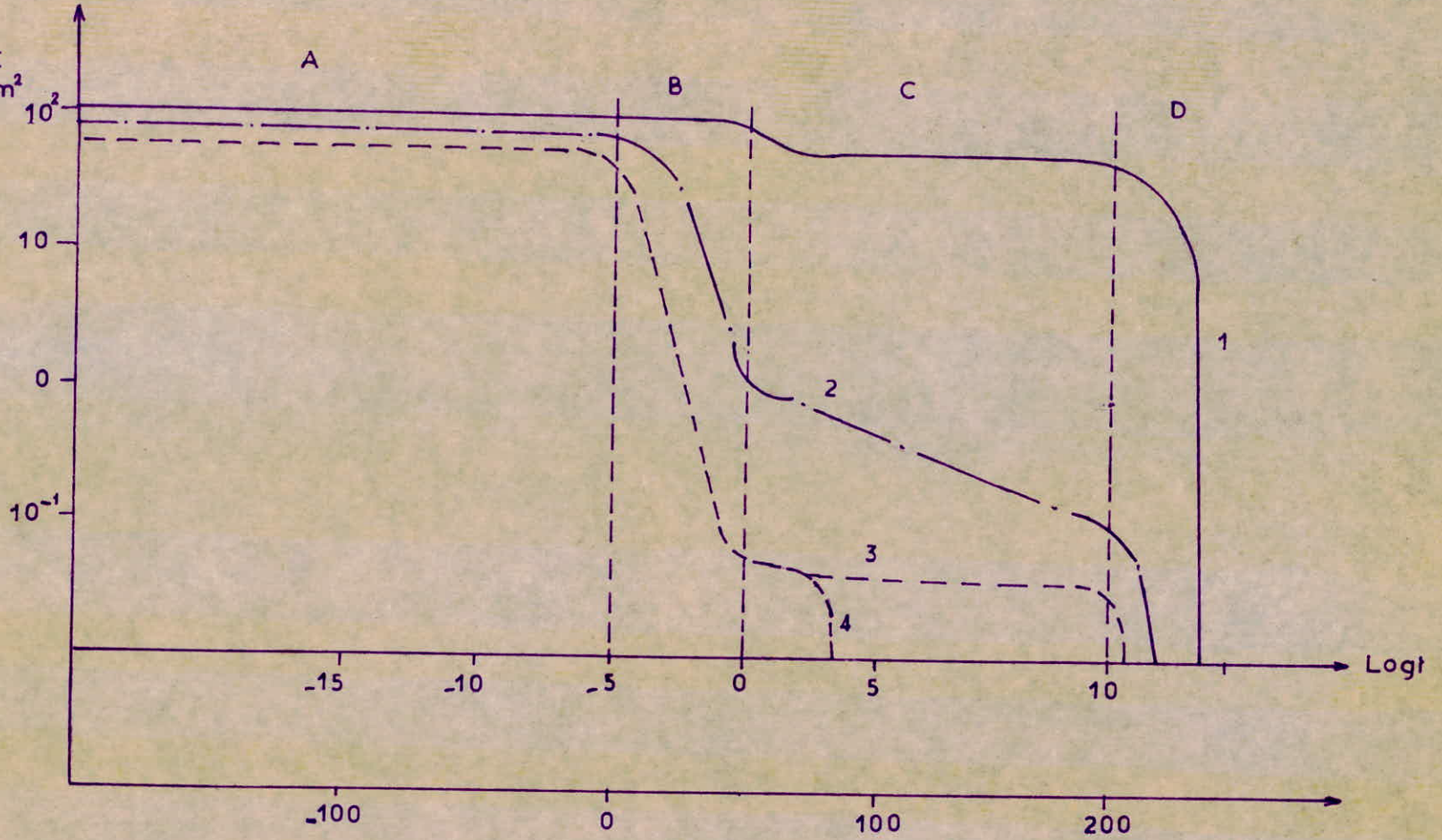


FIG. C (9)

- 1 : POLYMERE CRISTALLIN
- 2 // SEMI CRISTALLIN DE TAUX DE CRISTALLINITE PLUS FAIBLE
- 3 // AMORPHE DE MASSE MOLECULAIRE TRES ELEVEE
- 4 // // // MOLECULAIRE PLUS FAIBLE

Si la masse moléculaire est faible les durées d'application diminuent.

- Le domaine B : est la zone de transition. Les propriétés mécaniques dépendent considérablement de la durée d'application, ce sont les phénomènes viscoélastiques et l'allongement est fonction de la contrainte et du temps.

- Le domaine D, correspondant au comportement du polymère comme un liquide visqueux.

Le phénomène de viscoélasticité se manifeste par deux phénomènes caractéristiques.

- Le phénomène de relaxation qui correspond à la décroissance : avec le temps de la force de tension pour maintenir un allongement constant (Fig. D).

- Le phénomène de fluage qui se traduit par un accroissement avec le temps de l'allongement sous une force de tension constante (Fig. E).

Comme la durée d'application, la vitesse de sollicitation a une grande influence sur les propriétés mécaniques et thermomécaniques.

Quand la vitesse de la déformation. En traction par exemple, dépasse la vitesse de la relaxation, le fluage n'a pas le temps de se produire et la déformation est purement élastique. (Fig. F)(I2) .

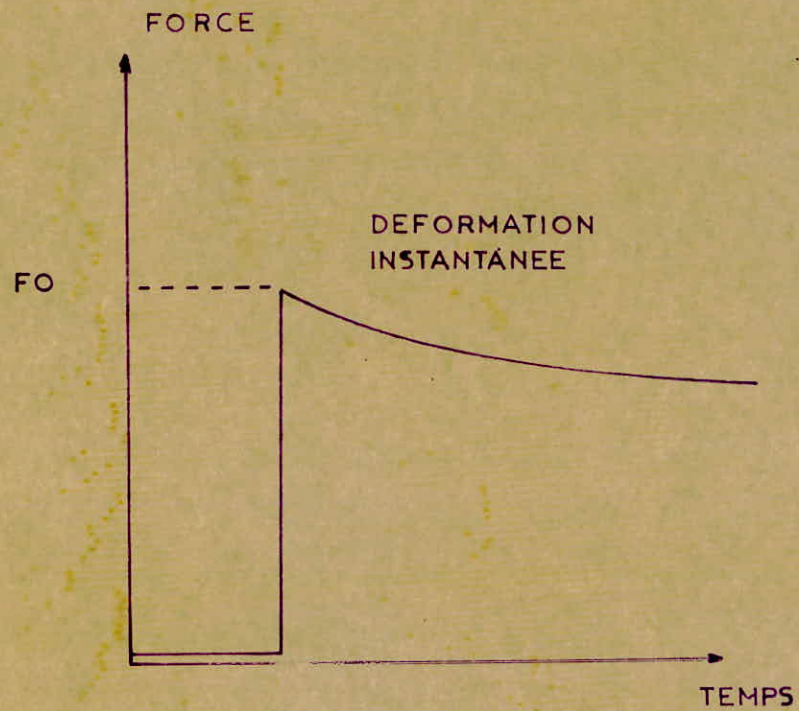


FIG. D COURBE DE RELAXATION

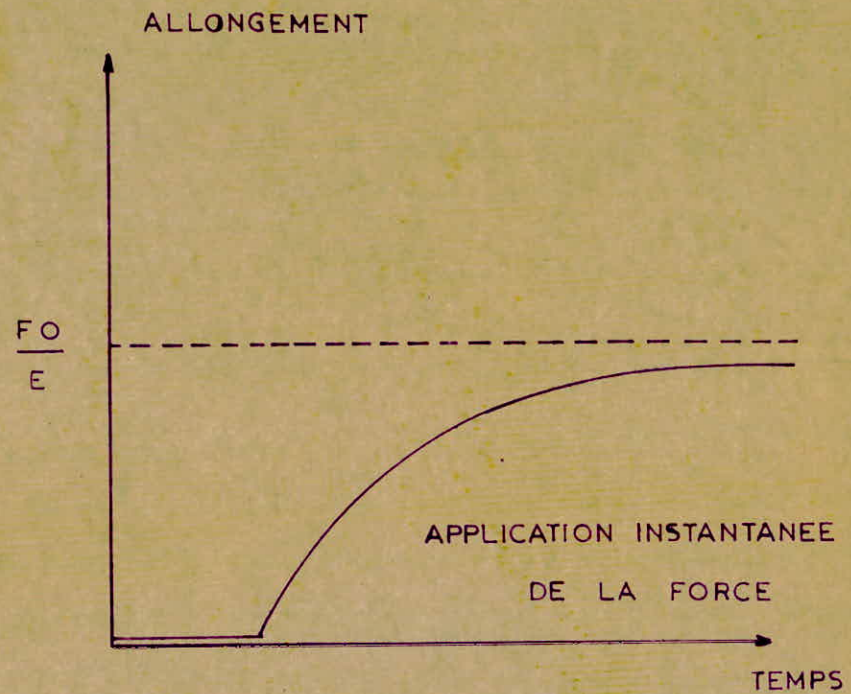


FIG. E COURBE DE FLUAGE

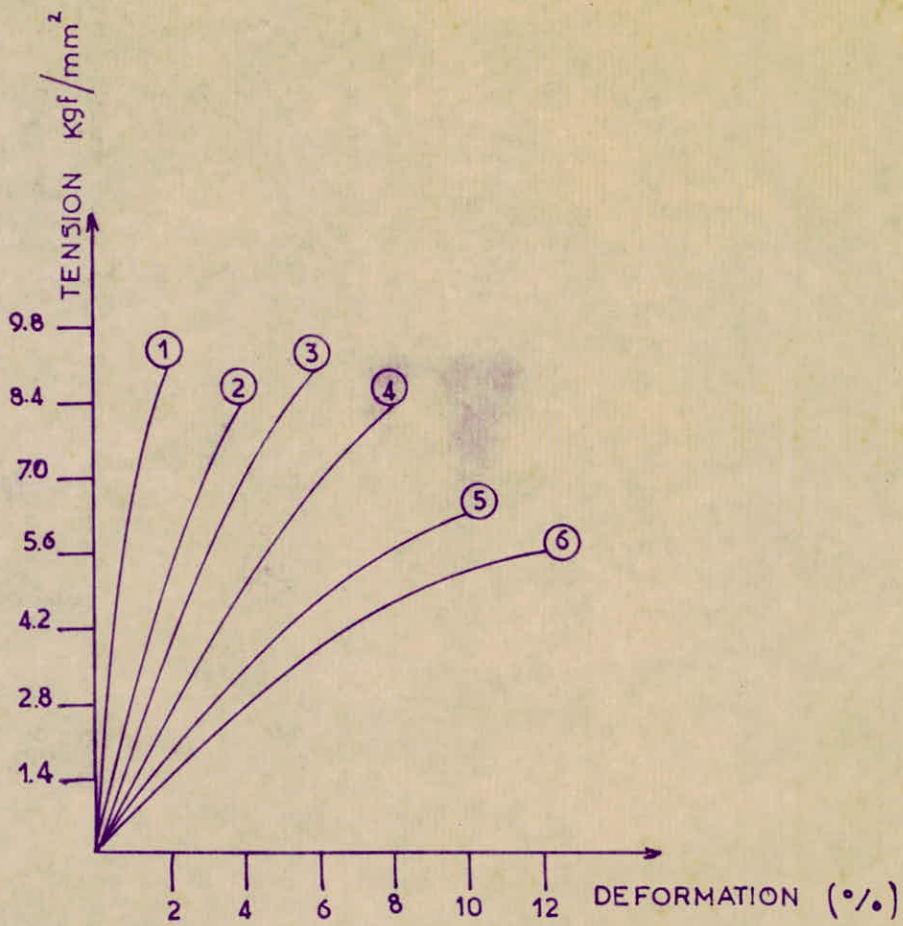


FIG. F REDUCTION DE LA VUSCOELASTICITE
EN FONCTION DE LA VITESSE
D'ETIRAGE DU P.M.M.A.

VITESSE EN CM / MIN	①	ELASTICITE PURE
	②	2,22
	③	1,32
	④	0,265
	⑤	0,0275
	⑥	0,0027


/// CONCLUSION :

Après avoir passé en revue, l'ensemble des propriétés mécaniques, nous allons, au cours de l'étude expérimentale, à travers l'objet de notre sujet, constater pratiquement les influences des différents paramètres (température, déformation, vitesse, contrainte, et structure du polymère.).

eci pour le cas d'un thermoplastique ;
le polyméthacrylate de méthyle.

Nous déterminons par la même et en fonction des moyens en notre possession, les conditions optimales pour le thermoformage du polymère sus cité.

 *
 * A. DESCRIPTION DE L' APPAREILLAGE *
 *

 Pour faciliter la compréhension de notre exposé, nous invitons le lecteur à regarder le schéma I ci-contre de la presse hydraulique : de marque OTTO WOLPERT - WERKE - 75 -

Sur cette presse il est possible de faire des essais à la compression, à la traction et à la flexion. Comme l'indique le schéma l'appareil est divisé en deux (2) blocs.

a) Un bloc de commande : qui est constitué par les éléments suivants :

- /_e moteur entraînant la pompe à l'huile.
- /_es boutons de réglage, de la pression d'huile, de la vitesse de déplacement des différents plateaux et des contre-poids.
- /_'enregistreur sur papier millimétré des résultats des essais.

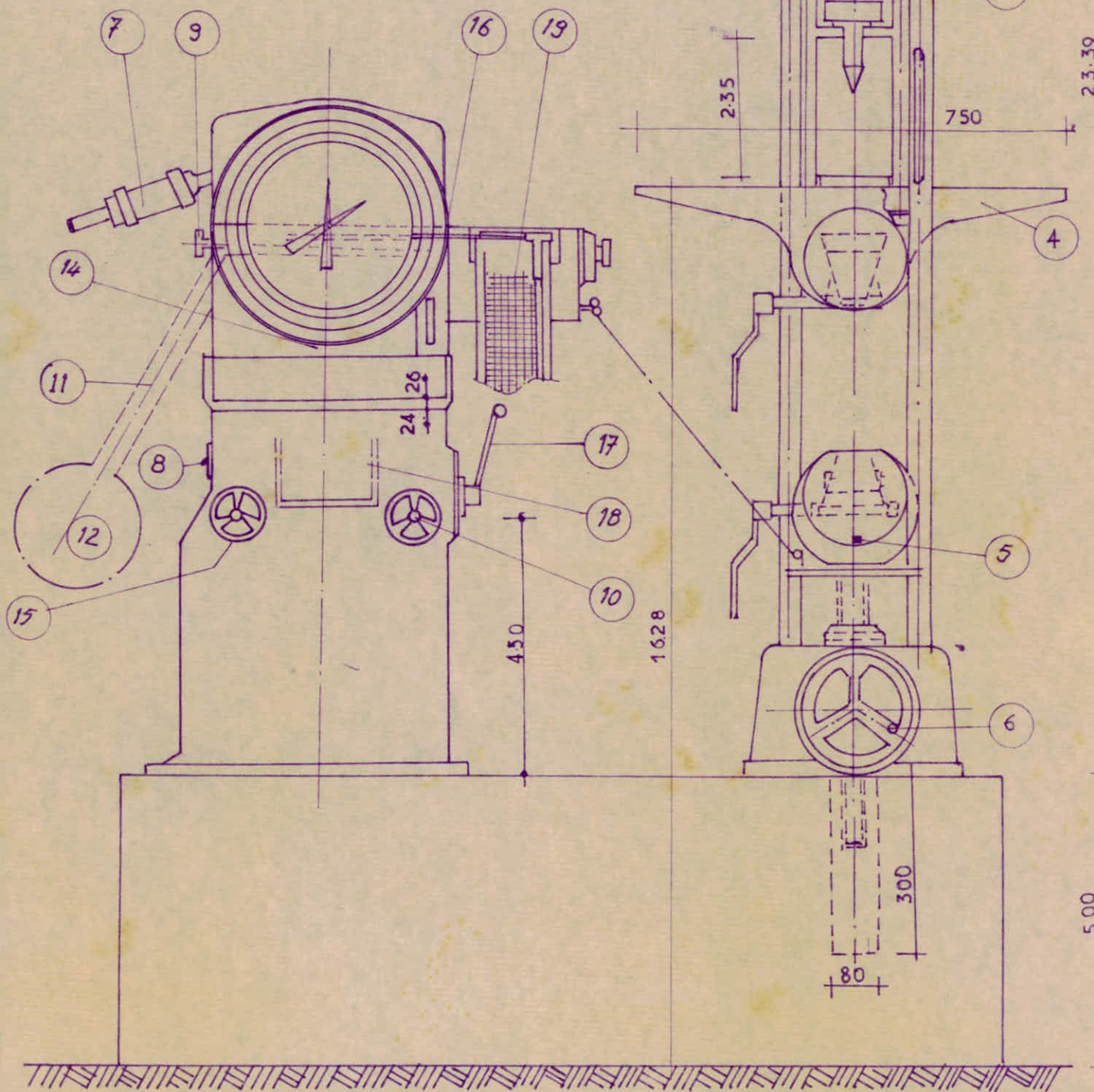
b) /_/n bloc d'essai : qui comporte :

- Des plateaux pour les essais à la compression et au cisaillement.
- Une table de flexion.

OTTO WOLPERT WERKE

U. 5

ech: 1/10



- Des machoires pour les essais à la traction

Les deux blocs sont reliés par un cablage électrique, un ensemble de tuyauteries, permettant la circulation de l'huile et enfin un système de treuil relié directement à l'enregistreur permettant d'enregistrer les courbes charges en fonction des déplacements des différents plateaux.

Il nous tenons à signaler d'ores déjà que la presse hydraulique n'a été utilisée jusqu'à ce jour qu'aux essais de traction sur éprouvettes en acier et d'essais à la compression sur éprouvettes en béton.

Devant le manque d'appareillage spécialisé pour des essais sur éprouvettes en matières plastiques nous avons dû utiliser cette presse.

De plus nous avons dû apporter certains aménagements afin d'adapter nos éprouvettes en P.M.M.A. à la machine.

Parmi les aménagements apportés nous signalerons principalement :

I) Aménagement de l'appareil en vue de l'essai à la traction :

Etant donnée la nécessité, de monter en température d'une part, et l'isothermie tout le long de l'éprouvette de l'essai d'autre part, nous avons confectonné le système suivant :

Le système consiste en un four cylindrique de \varnothing 100 et l = 110 mm en PYREX. La résistance de chauffe est constituée d'éléments métalliques enveloppées de Téflon.

L'ensemble four et résistance est recouverte d'amiante.

Le régime de température est réglé par un système à thyristors.

2) Aménagement de l'appareil pour l'essai à la flexion :

fin de respecter la norme NF-T50-001 de septembre 1972, nous avons dû préparer le dispositif donné par le schéma 2.

Le dispositif a été soudé sur la table de flexion de la presse hydraulique.

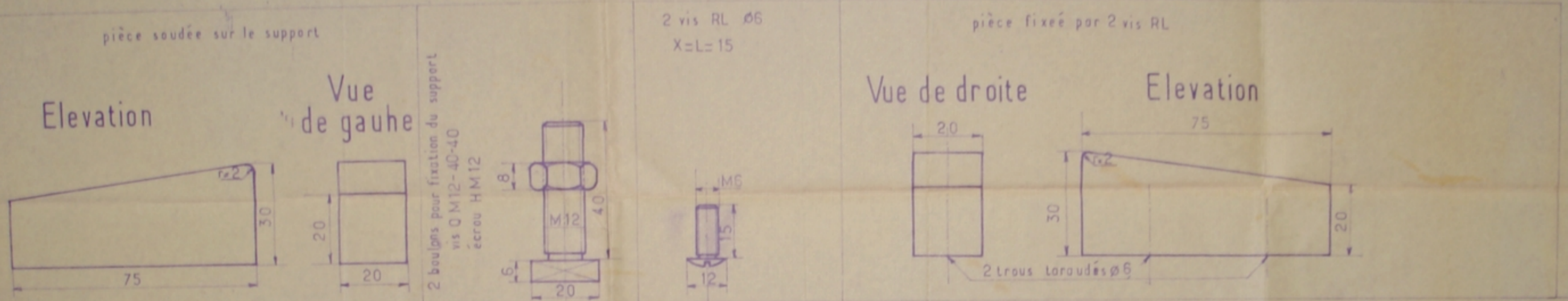
Le système de chargement de l'éprouvette en flexion a été confectonné dans les ateliers de l'Ecole conformément à la norme sus citée.

Conclusion : La presse hydraulique a été utilisée uniquement pour l'essai à la traction dont nous vous donnerons tous les résultats par la suite.

En ce qui concerne l'essai à la flexion, nous nous sommes contentés de faire des essais afin de comparer nos résultats avec la théorie et par la même tester la fidélité de l'appareil.

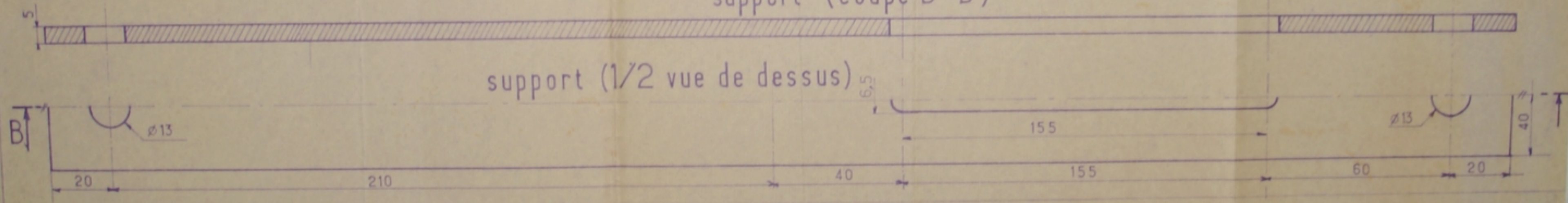
PC00276
 Avant p. 28

DISPOSITIF POUR L'ESSAI DE FLEXION (Matière: ACIER)



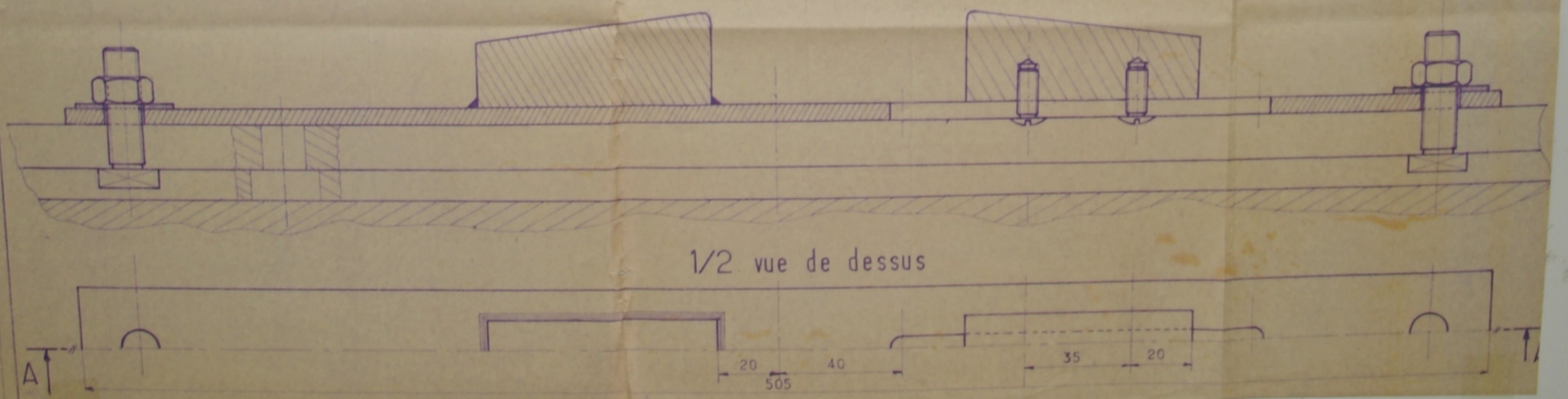
support (coupe B-B)

support (1/2 vue de dessus)



Coupe A-A

1/2 vue de dessus



 * B. - ESSAI DU TYPE VICAT-ET COURBE THERMOMECHANIQUE *
 *

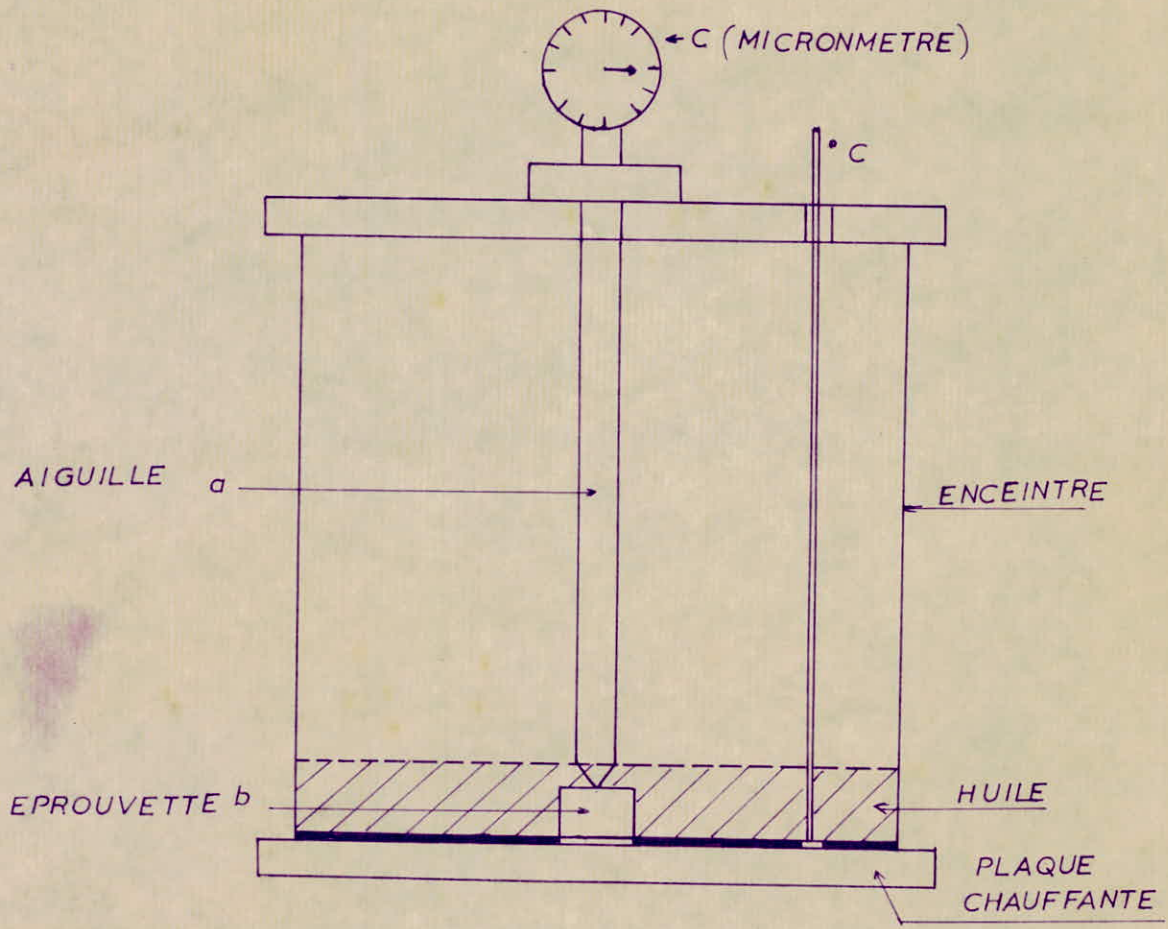
B. I Description de l'essai : (schéma3) c'est un essai à chaud sous charge constante. Le but est de déterminer sous charge constante, l'enfoncement de l'aiguille A, dans l'éprouvette B, en fonction de la température- Le chauffage est assuré par une plaque chauffante; une hauteur d'huile où est immergée l'éprouvette permet une bonne répartition de la température tout autour de l'éprouvette essai. L'ensemble aiguille, éprouvette est enfermée dans une enceinte. Un micromètre C permet de lire directement l'enfoncement; un thermomètre permet d'avoir les températures correspondantes.

B.2. COURBE THERMOMECHANIQUE :

a) Introduction :

Etant donné qu'un haut polymère n'est pas un matériau défini, il porte en lui tout son passé chimique et tous les traitements subis en transformation. Ainsi en faisant varier la nature et la proportion des adjuvants on modifie les propriétés physiques.

La présence de plastifiants influe beaucoup sur les propriétés mécaniques, du fait que dans un échantillon plastifié la température de transition vitreuse diminue énormément.



SCHEMA 3

Il faut noter ainsi que la complexité de la constitution des plastiques qui dépend des conditions de leur élaboration influe souvent de façon importante sur leurs propriétés pratiques.

Malgré le fait que nous ne connaissons pas les conditions d'obtention; la nature et les propriétés des adjuvants; de la matière ayant servi à confectionner nos éprouvettes, nous nous proposons dans une première étape de définir le domaine de température valable pour le thermoformage. A cet effet nous avons examiné les influences combinées de la température et des contraintes mécaniques et ceci grâce au pénétromètre VICAT.

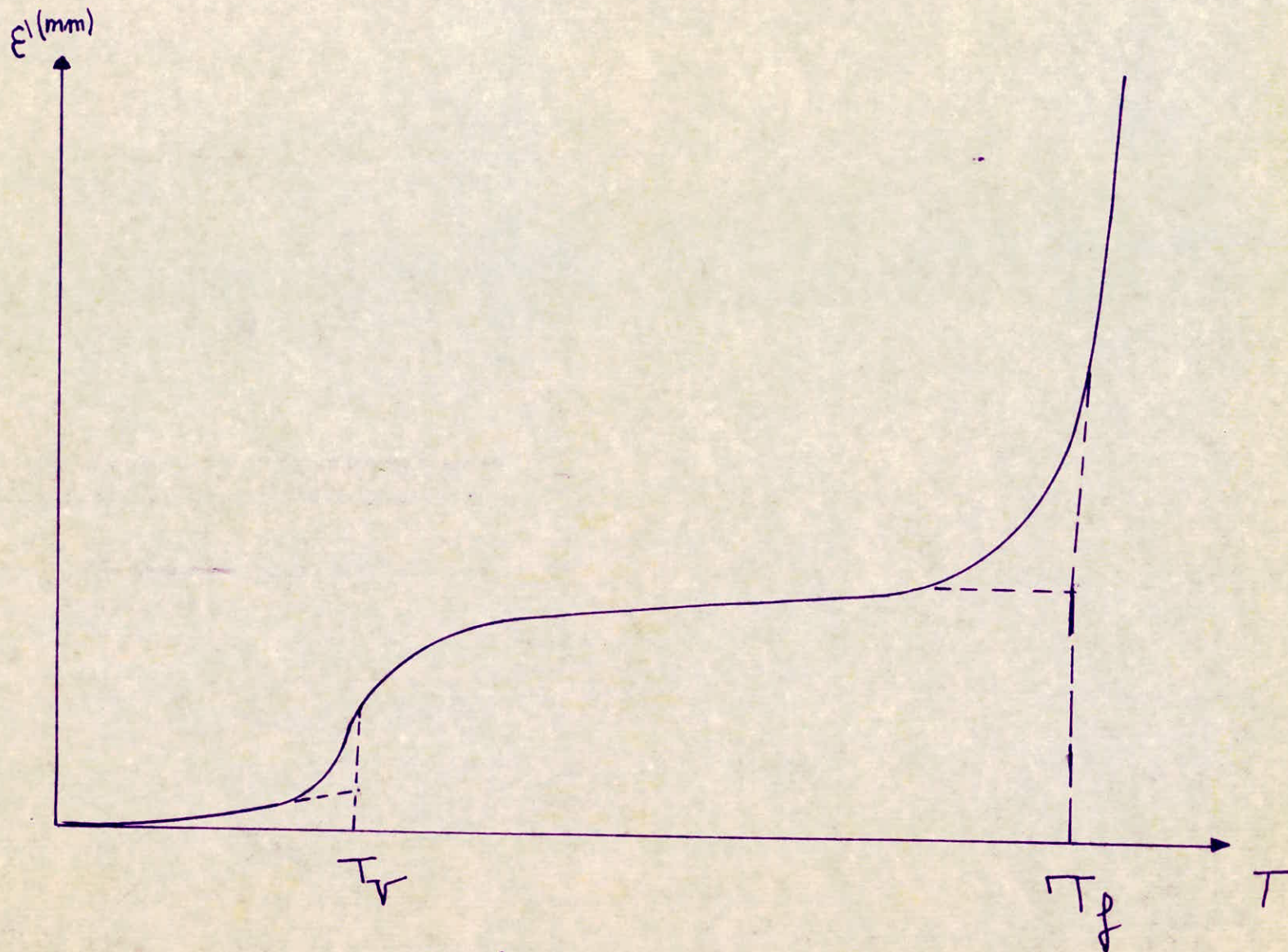
b) Etude de la courbe enfoncement en fonction de la température:

Théoriquement on a une courbe $\epsilon = f(T)$ de l'allure figurée sur le schéma 3.

Par rapport à l'échelle des températures nous pouvons dire que les thermoplastiques présentent trois (3) états distincts.

Ainsi aux basses températures, ils sont durs, possèdent de faibles allongements non élastiques mais demeurent néanmoins fragiles.

Dans les températures voisines du domaine des températures de transition vitreuse, les thermoplastiques sont élastiques et deviennent souples du fait de l'existence des mouvements internes; notamment des glissements des segments



schema 3

résultant d'un changement de la conformation des molécules.
Cet état représente le domaine adéquat pour le thermoformage.

En dessous de la température de transition vitreuse, les thermoplastiques manifestent soit des propriétés plastiques s'ils possèdent une grande cristallinité, soit des propriétés de haute élasticité s'ils sont amorphes.

La détermination de la température de transition vitreuse présente donc un intérêt technique important.

En effet cette température intervient directement dans le travail des matières plastiques et modifie leurs propriétés mécaniques.

Aux températures supérieures aux températures de fluidification, les thermoplastes deviennent très mous et finissent par devenir fluide. Dans ce cas ils ne sont transformés que sous pression élevée; nous citerons les méthodes à injection, extrusion et calandrage.

c) Résultats expérimentaux :

Nous avons effectué l'essai VICAT pour les charges 200g, 1kg et 2Kg dans toute la plage de températures afin de définir l'allure de la courbe et l'effet de charge sur la température de transition vitreuse.

Après la courbe fig. I, les résultats sont concluants.

$\epsilon' \cdot 10^2$ (mm)

COURBE $\epsilon' = f(T)$
à différentes charges

fig. I

2 kg

1 kg

200 g

400

350

300

250

200

150

100

50

0

20

30

40

50

60

70

80

90

100

110

120

130

140

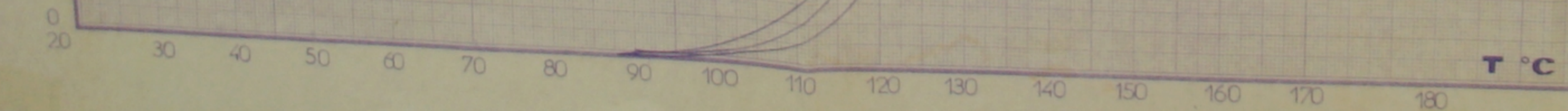
150

160

170

180

T °C



/_es résultats sont les suivants :

Le domaine de température de transition vitreuse est le suivant.

$$(T_v)_{2K\epsilon} = 106^{\circ}C \quad (T_v)_{1kg} = 110,5 \quad (T_v)_{200\epsilon} = 112^{\circ}C$$

)/ous remarquons que le TV augmente quand la charge diminue. Ce qui nous permet de dire que notre produit est légèrement plastifié, et nous permet par la même de définir le domaine de travail en vue du thermoformage à savoir :

$$106^{\circ}C \leq T \leq 165^{\circ}C$$

 * C. ESSAIS A LA TRACTION A DIFFERENTES TEMPERATURES *
 * ET A DIFFERENTES VITESSES. *

a) Introduction :

Parmi les différentes contraintes mécaniques, agissant isolement ou en association, auxquelles un matériau peut être soumis : traction, flexion, compression, torsion, etc..., nous nous intéresserons plus particulièrement à la traction. En effet cet essai est applicable à tous les matériaux souples ou rigides tout comme le cisaillement l'est

dans les méthodes par transformation par injection et extrusion.

Les diagrammes de traction sont en général très simples à interpréter.

1) L'état rigide, la courbe déformation - allongement est une droite.

2) L'état plastique, le diagramme est encore plus intéressant et montre les différentes propriétés du matériau (élasticité - viscoélasticité, plasticité).

En général nous ne nous limitons pas aux déformations élastiques ou viscoélastiques mais nous continuons jusqu'à la rupture, car les caractéristiques de rupture (allongement et charge de rupture) sont utiles à la connaissance de l'aptitude au formage et ce pour une déformation effectuée à chaud.

Les caractéristiques nous permettent par là même de déceler les éventuelles fentes ou vides et d'en étudier l'évolution au cours du vieillissement.

3) Nous nous limiterons pour notre étude aux conditions favorables pour le thermoformage du P.M.M.A.

b) Résultats expérimentaux :

Pour ces essais nous avons utilisé des éprouvettes planes en forme d'haltères dont la géométrie est voisine de celle des éprouvettes de la norme NF T51 - 034. Les dimensions sont données sur le schéma 4 .

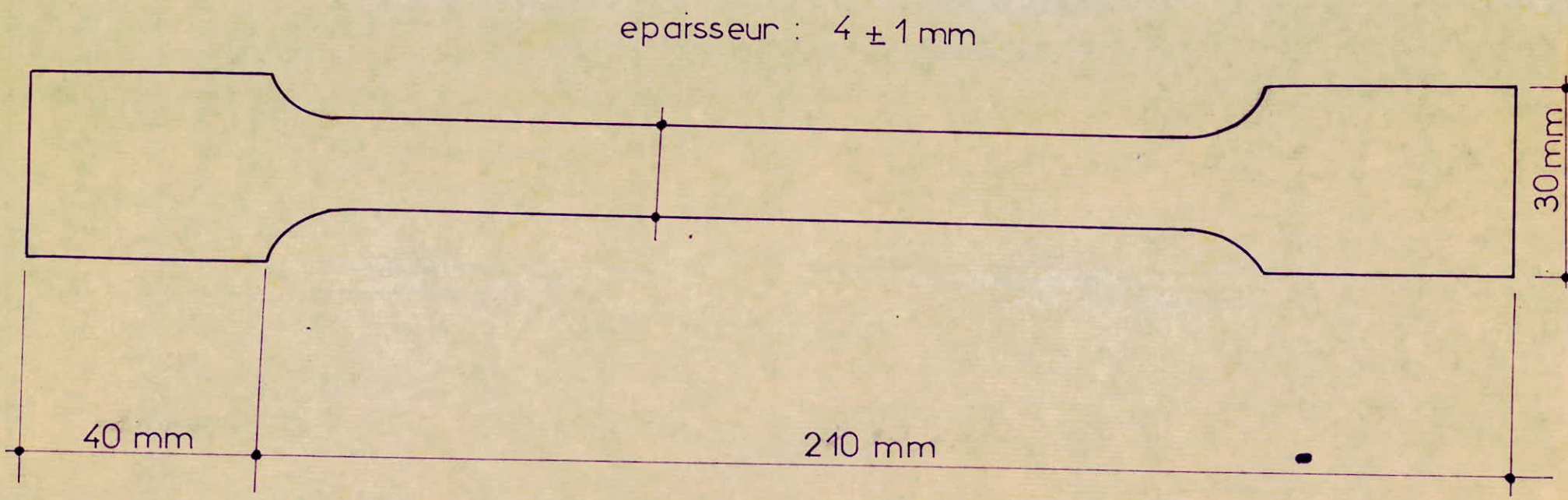
/_ l'éprouvette de géométrie définie est encastrée à ses deux extrémités aux deux mors de la presse hydraulique.

/_ un des mors est fixe; l'autre est mobile et est reliée à un système de lecture directe de l'allongement.

/_ l'éprouvette est soumise à des efforts de traction croissants. L'enregistrement de la force de traction et de l'allongement correspondant, appelé "courbe de traction", fournit un tracé caractéristique de la matière plastique.

Il est à noter que les contraintes sont exprimées par le rapport $\frac{F}{S_f}$ de la force sur la surface finale S_f .

⌈ Cependant nous ne pouvons pas mesurer directement S_f à cause de la réversibilité du matériau après décharge.



Schema 4

Si $S_0 = B_0 \cdot h_0$, L_0 et $S_x = B_x \cdot h_x$, L_x , sont respectivement la section et la longueur de référence avant et en cours d'essai sous l'action d'un effort F et si l'on admet que la densité du matériau reste constante, on peut écrire que : $V_x = V_0 \implies S_0 L_0 = S_x L_x$.

Nous définissons les quantités suivantes :

- Contrainte apparente : $\sigma_r = \frac{F}{S_0}$
- Contrainte réelle : $\sigma_r = \frac{F}{S_f}$
- Déformation relative : $\epsilon = \frac{L_f - L_0}{L_0}$

En supposant que la variation de l'épaisseur h est très petite devant la variation de L_0 , longueur ayant subi l'étirage, on peut déduire que :

$$d'où \quad \epsilon = \frac{L_f - L_0}{L_0} = \frac{L_f}{L_0} - 1 = \frac{S_0}{S_f} - 1$$

Le rapport d'étirage $r = \frac{L_f}{L_0} = \frac{S_0}{S_f} = 1 + \epsilon$

D'où nous tirons que :

$$\sigma_r^* = (1 + \epsilon) \sigma_r$$

Il est ainsi facile de transposer les courbes.

$$\sigma_r = f(\epsilon) \quad \text{en courbes} \quad \sigma_r^* = f(\epsilon).$$

\square) l'autre part le polymère est un matériau hétérogène, il est donc nécessaire pour la détermination d'une caractéristique d'effectuer plusieurs essais. Les résultats sont donnés sous forme de moyennes arithmétique. Les résultats de l'expérience sont consignés sur les tableaux I - 2 - 3 - 4 .

INTERPRETATION DES RESULTATS DE L'ESSAI A LA TRACTION DANS

LE DOMAINE DE HAUTE ELASTICITE.

Si nous examinons la figure II donnant les courbes contrainte - déformation à vitesse constante égale à 5 Cm/min et à différentes températures 120°C, 140C & 150C, nous constatons une augmentation de l'allongement à la rupture (ϵ_r) et une diminution de la contrainte à la rupture quand la température augmente.

Ceci s'explique par les modifications de la structure. L'évolution se fait d'un état $T_1 = 120^\circ \text{C}$ à un état $T_2 = 140$ ou 150°C , avec une décroissance de l'intensité des liaisons secondaires intermoléculaires. Il suffit donc d'avoir une contrainte relativement modérée pour provoquer la rupture après un grand allongement.

— TABLEAU N° 1 —

T° C	cm [√] mn	B mm	H mm	ΔL mm	L _o mm	F da N	σ _r kgf/cm ²	ε %	σ _r kgf/cm ²	tr (s)
120 ° C	1	14.12	3.84	136	55	8.03	15.1014	245	52.10	475
		14.78	4.20	120	50	7.786	12.794	240	43.50	422
		14.00	4.00	120	55	7.210	13.396	218	42.60	3.90
		14.90	4.20	130	55	8.091	13.184	236	44.30	423
	5	14.54	4.00	138	55	12.20	21.538	250.9	75.58	138
		14.24	3.82	180	55	10.00	18.740	327.27	80.078	145
		13.70	3.54	130	42	10.64	22.388	309.5	91.68	105
		14.20	3.86	135	40	9.35	17.394	337.5	76.10	124
	10	14.60	3.54	150	55	11.80	23.282	272.72	86.778	82
		14.82	4.12	175	55	13.82	23.095	318.18	96.58	94
		14.42	3.84	165	50	12.90	22.380	330	96.235	98
		14.32	4.10	175	40	9.55	19.771	437.5	106.27	93
		13.24	4.08	170	40	9.52	17.990	4.25	94.45	66
	15	14.22	3.68	210	250	14.83	28.9	321.059	121.8	68
		14.52	4.20	180	67	15.50	25.92	216.67	77.7	69
		14.00	3.74	195	90	15.25	29.22	246.67	92.53	74
		14.52	4.20	185	56	15.96	26.7	3.27	114.03	69
	20	14.32	3.90	190	83	18.10	32.962	2.285	108.28	55
		14.52	3.78	230	99	16.95	31.469	2.32	104.48	66
		14.32	4.12	2.25	99	19.35	33.486	226	108.3	64
		14.52	4.02	182	80	17.60	30.820	228	101.2	57
	30	14.52	4.02	210	100	24.40	43.477	210	134.78	45
		14.44	4.02	215	110	22.85	40.128	195.4	118.54	33
		14.20	4.02	180	105	22.45	40.062	171.4	108.73	39.6
		14.50	4.10	217	100	23.75	42.186	217	133.16	47

TABLEAU N° 3

T °C	$\frac{v}{cm/mn}$	B mm	H mm	ΔL mm	L_0 mm	F da N	σ_r kgf/cm ²	ϵ %	σ_r kgf/cm ²	t_r (s)
150 °C	1	14.58	3.74	92	32.5	4.75	8.932	282	34.122	2.85
		14.54	4.32	75	30	4.35	6.917	250	24.212	2.77
		14.82	4.12	85	34	5.50	9.143	250	32.000	2.65
		15.20	3.80	90	35	5.50	9.545	251.6	33.560	2.84
		14.58	3.90	95	40	4.20	7.043	236	23.664	2.48.6
	5	14.58	3.90	115	32	4.90	8.792	364.68	40.858	118
		14.18	3.74	130	34	5.25	9.869	383	47.666	128
		14.82	4.10	162	39	6.75	11.343	418.2	58.782	168.6
		15.10	3.24	157	39	5.30	11.055	404.2	55.741	165.2
		15.54	3.80	147	36	5.95	10.968	405	55.392	152
	10	15	3.80	162	36.50	7.90	14.115	443	76.644	90
		15	3.80	190	44.60	7.75	13.879	426	73.002	106.6
		14.54	3.70	147	36.75	7.25	13.704	400	68.520	79.8
		14.9	3.94	120	29.50	7.95	13.800	408	70.101	66
		15.5	3.84	97	27.50	8.50	14.647	352.7	66.306	55
	15	15.4	3.78	120	29.75	9.15	15.980	404	80.540	43
		14.46	4.12	85	25	9.75	16.705	340	73.504	34
		14.50	3.80	110	31.50	8.95	16.599	350	74.696	46
		15.00	4.00	142	37.55	9.55	16.239	378	77.622	49.8
	20	15.02	3.78	182	94	14.95	26.891	194	79.061	49.2
		15.16	3.48	195	94.5	15.40	29.787	206	81.150	55
		14.98	3.74	145	64.0	13.15	23.972	226	78.150	42.6
		14.88	4.08	167	62.3	13.60	22.832	268	84.022	49
30	14.50	3.44	1.85	98	15.05	30.724	1.887	88.761	36.6	
	15.50	3.68	1.80	95	17.65	31.565	1.89.5	91.380	36	
	15.48	3.74	1.95	103	17.40	30.581	1.89.3	88.472	39.4	
	15.32	3.74	1.90	103.7	16.75	29.8086	1.83.2	84.418	38	
	14.58	3.68	1.88	103	16.45	31.2715	1.82.5	88.342	36.6	

— TABLEAU N° 4 —

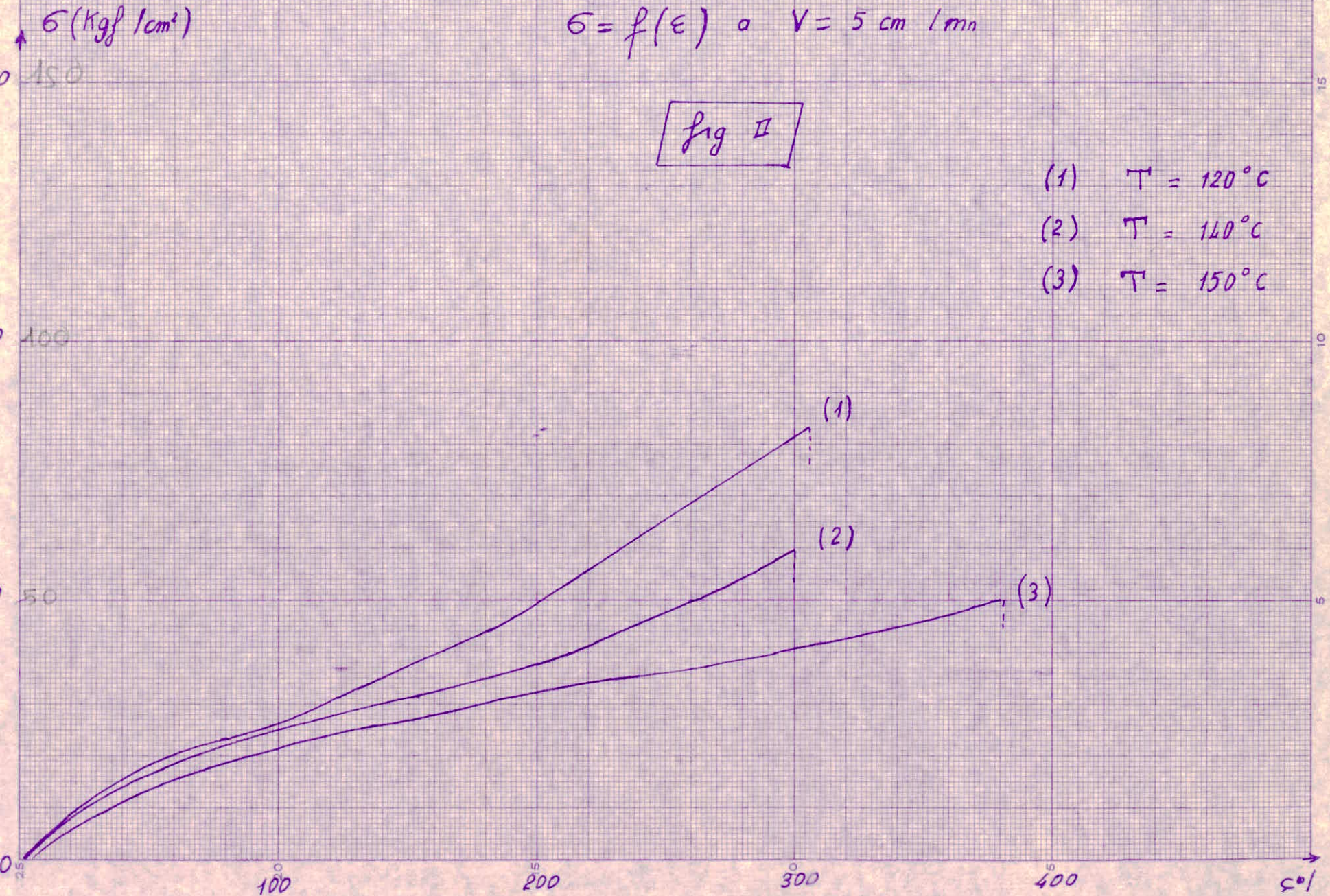
T	1/T	cm/mn ν	lg ν	ϵ %	σ_r kgf/cm ²	tr (s)	ln σ_r	ln tr
120	254.4510 ⁻⁵	1	0	233.6	45.604	427.5	3.82	6.05795
		5	0.699	324.2	81.4508	128	4.4	4.859
		10	1	356	96.3512	84.6	4.568	4.43793
		15	1.176	306	101.494	70	4.6227	4.24849
		20	1.30	228.5	107.77	60.5	4.74	4.10264
		30	1.477	198.45	123.9	41.15	4.819	3.7117
140	242.1310 ⁻⁵	1	0	245.2	38.86	314.25	3.65996	5.75
		5	0.699	3.62	59.7519	158.6	4.0902	5.06259
		10	1	369	83.7608	82.84	4.40796	4.4169
		15	0.176	336	88.2946	49.4	4.48068	3.89995
		20	1.30	202.55	93.69	44.3	4.53999	3.79098
		30	1.477	183.12	97.5144	36.82	4.58	3.6060
150	236.410 ⁻⁵	1	0	2.54	29.5179	293.2	3.38499	5.68085
		5	0.698	399	51.680	146.4	3.98	4.986
		10	1	406.2	70.8099	79.5	4.26	4.37575
		15	1.176	368.2	76.70	43.2	4.3399	3.76584
		20	1.30	224	83.0962	48.95	4.42	3.8908
		30	1.477	186.64	88.2346	37.33	4.48	3.61979

INFLUENCE DE LA TEMPERATURE

$$\sigma = f(\epsilon) \text{ a } V = 5 \text{ cm / mn}$$

fig II

- (1) $T = 120^\circ\text{C}$
- (2) $T = 140^\circ\text{C}$
- (3) $T = 150^\circ\text{C}$



II- n se limitant au cas de la traction, nous pouvons signaler encore l'importance de la vitesse de déplacement.

Nous avons travaillé dans la gamme de vitesses allant de 1 à 30 Cm/m.

Sur la figure III donnant la contrainte en fonction de l'allongement à $T = 120^{\circ}\text{C}$ et aux vitesses 15, 10, et 5 Cm/mn., nous avons pu conclure que : l'accroissement de la vitesse entraîne d'une part un accroissement de la contrainte de rupture et d'autre part l'allongement relatif augmenté jusqu'à une vitesse limite $V = 10 \text{ Cm/mn.}$ Au delà de $V = 15 \text{ Cm/mn.}$ la vitesse n'a plus une grande influence sur l'allongement. Ces conclusions ont pu nous orienter pour déterminer les conditions optimales du thermoformage, pour un allongement élevé sous faible charge.

Sur les courbes Fig. IV donnant $\epsilon_r = f(V)$, nous confirmons l'influence de la vitesse sur l'allongement relatif. Comme nous l'avons constaté sur la fig. III., ϵ_r augmente avec la vitesse jusqu'à une vitesse limite $V = 10 \text{ Cm/mn.}$

De plus sur la même figure nous remarquons que quelque soit la température l'influence de la vitesse est très faible à partir de $V = 20 \text{ Cm/mn.}$

INFLUENCE DE LA VITESSE $\sigma T = 120^{\circ} C$

$$\sigma = f(\epsilon)$$

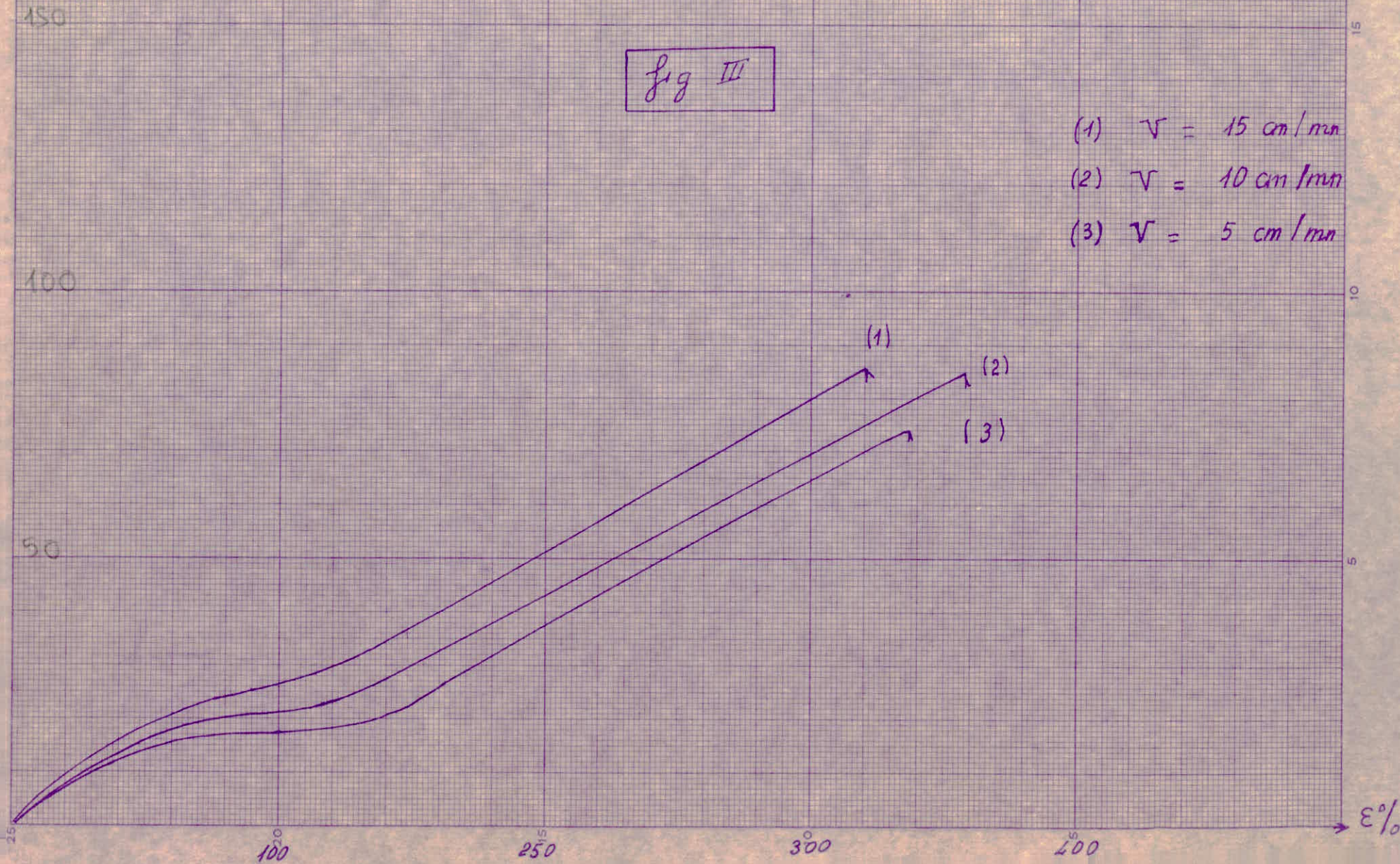
Fig III

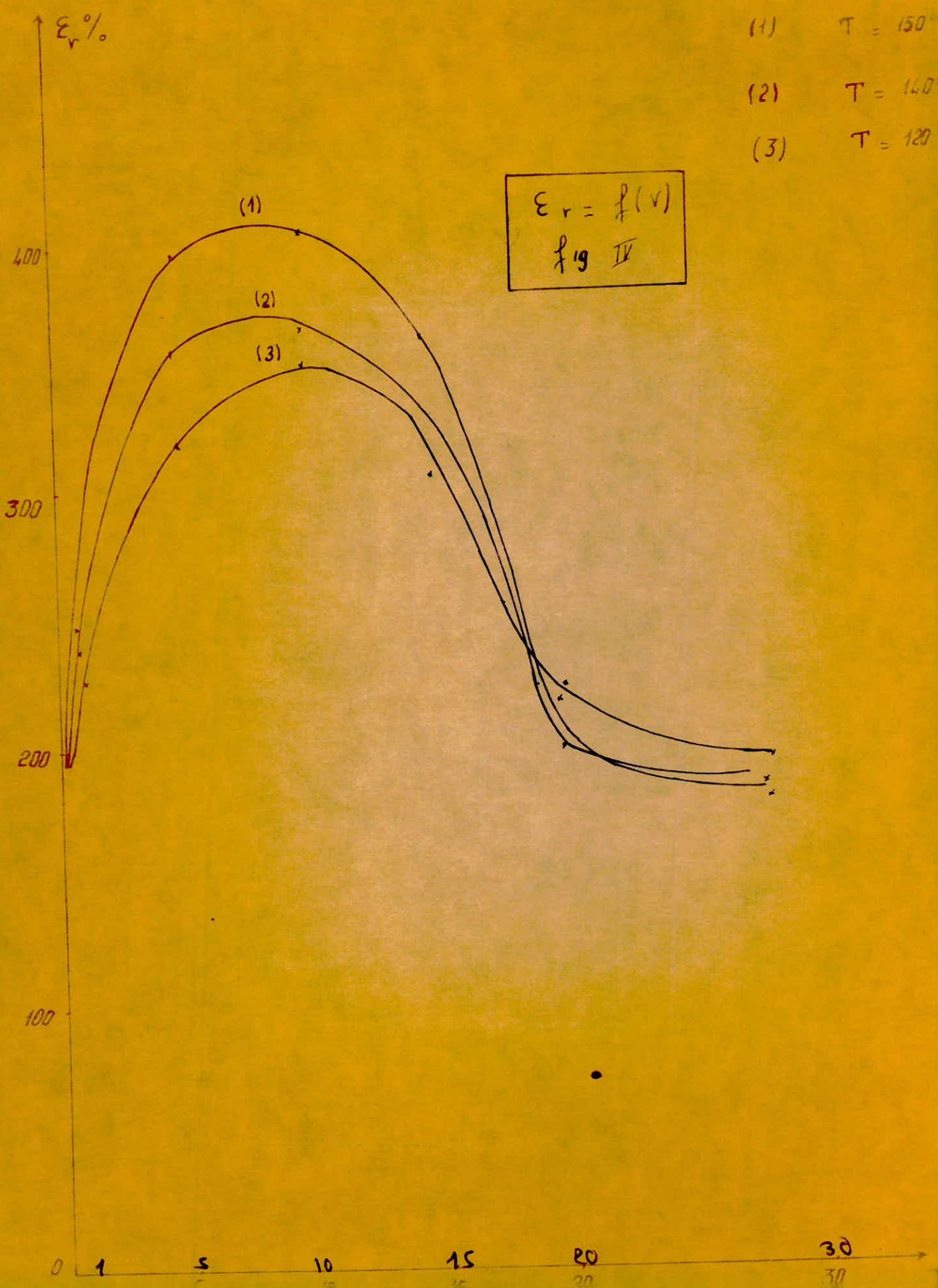
(1) $V = 15 \text{ cm/min}$

(2) $V = 10 \text{ cm/min}$

(3) $V = 5 \text{ cm/min}$

$\sigma \text{ kgf/cm}^2$





Donc on peut à priori conclure que pour le thermoformage les vitesses adéquates seraient $V = 1, 5, 10$ et 15 Cm/mn . De plus à $T = 150^\circ \text{ C}$. l'allongement est encore plus élevé, enfin pour une température donnée; l'allongement est identique pour $V = 5 \text{ Cm/mn}$. et $V = 15 \text{ Cm/mn}$.

[-] cet effet nous avons tracé les courbes contrainte en fonction de la vitesse à différentes températures Fig. \bar{V} .

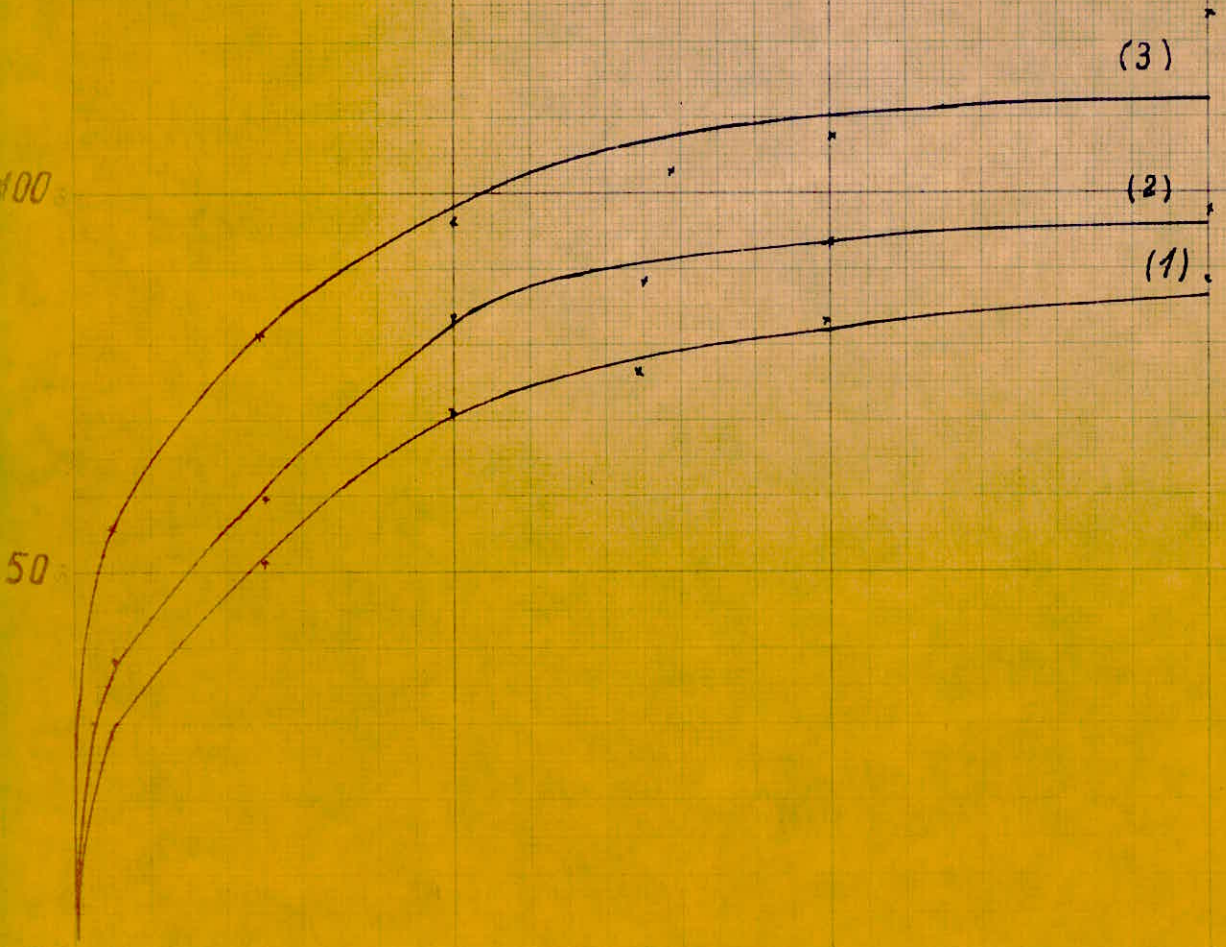
Sur la fig. V nous constatons que dans le domaine de vitesses 5 et 15 Cm/Mn , la contrainte augmente en fonction de la température - Donc en combinant les conclusions des courbes Fig. IV et V nous déduisons que les meilleures conditions seraient $V = 10 \text{ Cm/Mn}$ et $T = 150^\circ \text{ C}$. A ces valeurs correspond un allongement $\epsilon = 406 \%$. La valeur correspondante de la contrainte serait $\sigma_r = 70,810 \text{ Kgf/Cm}^2$. Etant donnée que la contrainte de travail doit être inférieure à σ_r . Au regard de la fig. IV nous avons pris comme domaine de contrainte celle correspondant au domaine de vitesse 5 - 10 Cm/mn , correspondant aux allongements de rupture de 399 et 406 % soit

51,080		70,810 Kgf/Cm2
V = 10 Cm/mn	T = 150° C.	
$\epsilon =$	406 %	

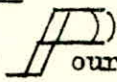
$\sigma_r \text{ Kgf/cm}^2$

- (1) $\tau = 150^\circ\text{C}$
- (2) $\tau = 140^\circ\text{C}$
- (3) $\tau = 120^\circ\text{C}$

FIGURE V
 $\sigma_r = f(\nu)$



REMARQUES :


 our déterminer le domaine de thermoformage nous avons dû tracer les courbes $\sigma = f(V)$ à $T = 120 - 140 - 150^{\circ}\text{C}$. et par la suite $\epsilon_r = f(V)$ - la raison d'avoir fait varier la vitesse au lieu de la température est dû au fait qu'au point de vue moyens pratiques on avait des possibilités d'avoir un nombre important de points expérimentaux et ce qui concerne la vitesse et uniquement trois (3) points pour la température.

CALCUL D'ERREURS :Données :

- Erreur sur la lecture de la température au centre du four
 $= \pm 1^{\circ}\text{C}$.

- La différence de lecture entre les points extrêmes du four
 $\Delta T = 2^{\circ}\text{C}$.

En effectuant l'essai, après un temps T , l'éprouvette sort du four, donc une partie de la longueur calibrée sera erronée.

La Température diminue de 5°C . pour des vitesses élevées (un temps cours).

Nous déduisons que l'erreur sur la température est $\Delta T = 8^{\circ}\text{C}$.

d'où $\frac{\Delta T}{T} = \frac{8}{150}$

$$T = (150 \pm 8) \cdot \text{C}$$

Erreur sur la lecture de l'allongement = ± 1 mm

$$\Delta (L - T) = 1 \text{ mm}$$

$$\Delta L_0 = 3 \text{ mm.}$$

$$\Delta t = 0,1$$

$$\Delta f = 0,2 \text{ daN} = 0,204 \text{ Kgf/Cm}^2$$

$$\Delta D = 0,01 \text{ mm}$$

$$\Delta h = 0,01 \text{ mm}$$

$$\sigma_r = \frac{F}{S} \text{ et } S = B.h.$$

$$\frac{\Delta S}{S} = \frac{\Delta B}{B} + \frac{\Delta h}{h} = \frac{0,01}{15} + \frac{0,01}{4} = \frac{0,19}{60}$$

$$\frac{\Delta \sigma_r}{\sigma_r} = \frac{\Delta f}{f} + \frac{\Delta S}{S} = \frac{0,204}{7,9} + \frac{0,19}{60} = 0,0289$$

Erreur relative de la contrainte de rupture apparente

$$\frac{\Delta \sigma_r}{\sigma_r} = 0,0289$$

$$\frac{\Delta \varepsilon}{\varepsilon} = \frac{\frac{\Delta (L - L_0)}{L} + \frac{\Delta (L_0)}{L_0}}{\frac{\Delta L}{L_0}} = \frac{\frac{1}{130} + \frac{3}{35}}{\frac{130}{35}}$$

$$\frac{\Delta \varepsilon}{\varepsilon} = 0,0251$$

$$\sigma_{r^*} = (1 + \varepsilon) \sigma_r$$

$$\frac{\Delta \sigma_r^*}{\sigma_r^*} = 2 \frac{\Delta \sigma_r}{\sigma_r} + \frac{\Delta \varepsilon}{\varepsilon}$$

$$\frac{\Delta \sigma_r^*}{\sigma_r^*} = 0,0829$$

CONCLUSION :

$$\Delta T = 8^\circ \text{C.}$$

$$\Delta \varepsilon = 10,19 \%$$

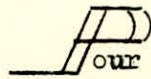
$$\Delta \sigma_r^* = 5,87 \text{ Kgf/Cm}^2$$

/_a contrainte que nous appliquons sur la plaque à transformer sera comprise dans l'intervalle.

$$51,080 \pm 5,87 < \sigma < 70,81 \pm 5,87 \text{ Kgf/ Cm}^2$$

/_a déformation relative sera calculé avec une erreur de $\pm 10,190 \%$

$$\varepsilon = (406 \pm 10,19) \%$$



pour élargir le domaine de notre étude, nous nous sommes basés sur la théorie de relaxation étudiée par ALEXANDROV (13) qui donne.

$$\tau = \tau_0 e^{\frac{U - \gamma \sigma}{RT}}$$

qui est largement utilisée pour décrire la dépendance de la durée de vie τ_r de la contrainte de rupture σ_r et de la température T .

$$\tau_r = \tau_0 e^{\frac{U - \gamma \sigma_r}{RT}}$$

où :

τ_r : durée de vie à la rupture.

τ_0 : est la période d'oscillation des atomes ou segments.

σ_r : contrainte à la rupture.

γ = coefficient caractérisant l'efficacité de la contrainte.

U : Énergie d'activation de la scission des liaisons.

R = constante des gaz parfaits.

T = Température.

Donc nous avons :

$$\ln \tau_r = \ln \tau_0 + \frac{U - \gamma \sigma_r}{R T}$$

La courbe $\ln \tau_r = f(\sigma_r)$ à différentes températures de la fig. VI nous donnerait comme ordonnée

à l'origine $\ln \tau_0 + \frac{U}{R T}$.

Cette valeur nous permet de trouver U , et de le comparer aux données bibliographiques.

De plus nous avons confirmé que les différentes droites

$\ln \tau_r = f(\sigma_r)$ à différentes températures concordent au point théorique τ_0 dont la valeur est 10^{-13} s.

L'énergie U trouvée par ces courbes est :

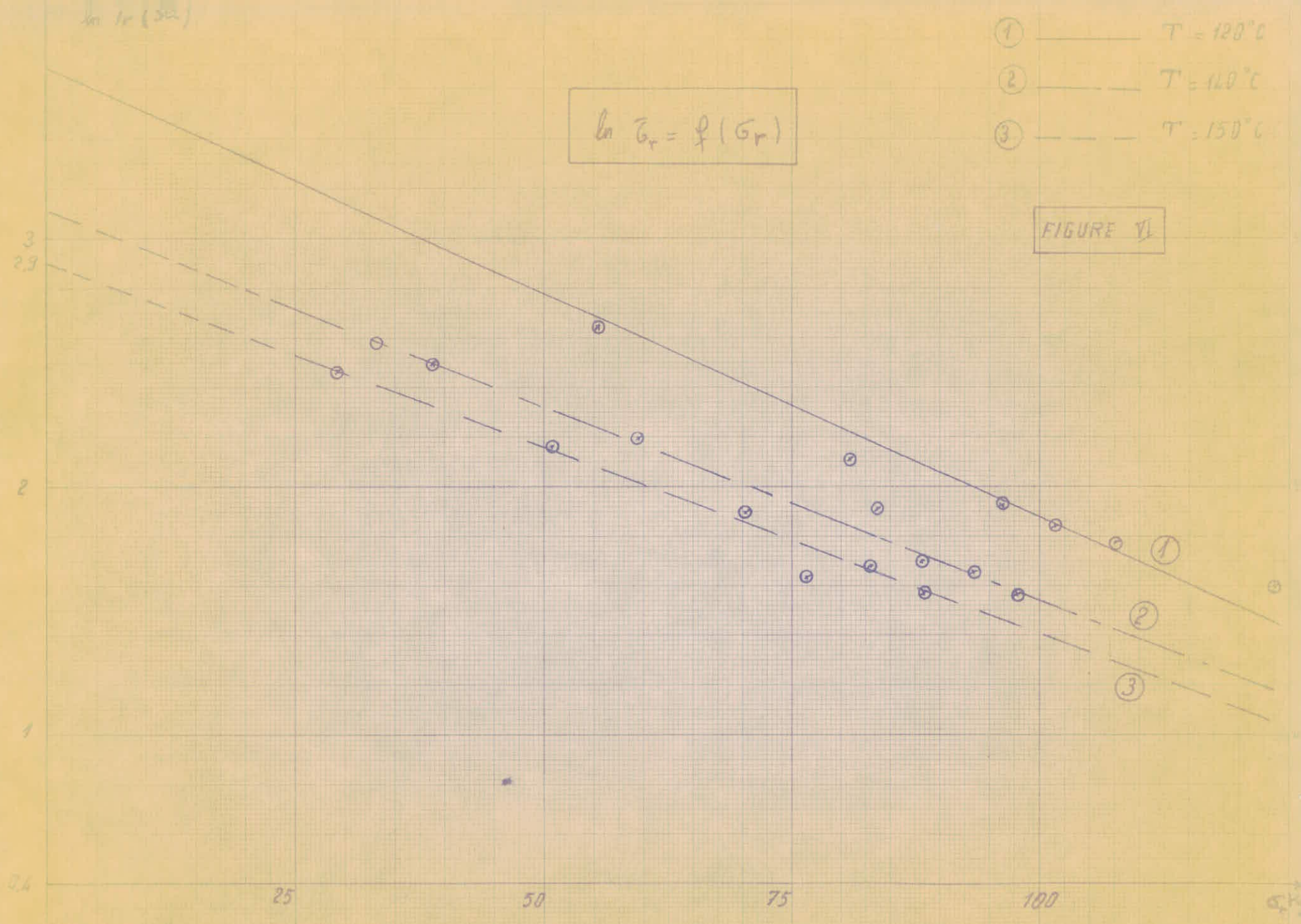
$U = 30,513 \text{ Kcal/Mole.}$



La valeur théorique est $U_t = 52 \text{ Kcal/Mole}$ (13). A la lumière de ces résultats, nous pouvons conclure qu'au cours de la rupture et aux températures supérieures à la température de transition vitreuse, les liaisons intramoléculaires ont été détruites.

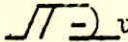
- ① ————— $T = 120^{\circ}\text{C}$
- ② ————— $T = 140^{\circ}\text{C}$
- ③ - - - - - $T = 150^{\circ}\text{C}$

$$\ln \bar{\sigma}_r = f(\sigma_r)$$

FIGURE 7





 ONCLUSION G E N E R A L E !

 u cours de ce travail nous avons pu approcher les conditions optimales pour le thermoformage, avec la précision qu'a pu nous fournir la presse hydraulique.


LES RESULTATS OBTENUS SONT :

$$T = (150 \pm 8) ^\circ C \quad ; \quad \varepsilon = (406 \pm 10,19) \%$$

$$51,08 \pm 5,87 \quad \angle \quad 70,81 \pm 5,87 \quad \text{Kgf/Cm}^2$$

$$V = 10 \text{ Cm/ Mn,}$$

l'épaisseur de l'éprouvette = (4 \pm 0,5) mm.

 e plus cette étude nous a permis une initiation à la recherche dans le domaine assez vaste des matières plastiques.

-----0000-----

 I B L I O G R A P H I E

- (1) - MATIERES PLASTIQUES - " QUE SAIS - JE " .
- (2) D.C. Miles J.H. BRISTON - TECHNOLOGIE DES POLYMERES.
- D U N O D (1968)
- (3) CHIMIE MACROMOLECULAIRE : MACROMOLECULES
SYNTHETIQUES - SOCIETE DES EDITIONS TECHNIP.
I F P - P . S I G W A L T .
- (4) FICHES TECHNIQUES. POUR PRODUIT BAYER. (1970)
- (5) FICHES TECHNIQUES. HOECHST (1968)
- (6) LES MATIERES PLASTIQUES. FABRICATION-TECHNOLOGIE.
J. GOSSOT . D U N O D
- (7) RESISTANCE DES MATERIAUX - CHARLES MASSIMET.
TOME I. - D U N O D -
- (8) THERMAL FLUCTUATIONS PATTERNS OF DEFORMATION
AND FAILURE . OF PLASTICS .
SB. RATNER . Y.U.I. BROKHIN, LO DUNINA
ET M.G. DODIN .
- (9) INTRODUCTION A LA CHIMIE MACROMOLECULAIRE PAR.
G. CHAMPETIER - L . MONNERIE . (MASSON & cie)

.../...

