

3/76

EGOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT DE CHIMIE

2ex

THESE DE FIN D'ETUDES

COMPORTEMENT DU P.M.M.A. SOUS UNE CONTRAINTE DONNEE EN FONCTION DE LA TEMPERATURE ET DE LA VITESSE DE DEFORMATION - DOMAINE D'APPLICATION -

SOUTENUE DEVANT LA COMMISSION D'EXAMEN :

MM. M. ABADIE

- Maître de Conférence à l'U.S.T.A.

PRESIDENT
DU JURY

A. HAMITOU

- Maître de Conférence à l'E.N.P.A.

MEMBRES

Ph. CAILLAUD

- Maître-Assistant à l'Université d'ALGER.

DU

R. HAROUBIA

- Maître-Assistant à l'Université d'ALGER.

JURY.

الدرسة لوطنية للعلوم الهندسية
- المكتبة -

EGOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE
BIBLIOTHEQUE

PROPOSÉE PAR :

G. STONKOI

ETUDIÉE PAR :

M. SAHRAOUI

PROMOTION 1976

UNIVERSITE D'ALGER

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT DE CHIMIE

THESE DE FIN D'ETUDES

COMPORTEMENT DU P.M.M.A. SOUS UNE CONTRAINTE DONNEE EN
FONCTION DE LA TEMPERATURE ET DE LA VITESSE DE DEFORMA-
TION - DOMAINE D'APPLICATION -

SOUTENUE DEVANT LA COMMISSION D'EXAMEN :

MM.	M. ABADIE	- Maître de Conférence à l'U.S.T.A.	PRESIDENT DU JURY
	A. HAMITOU	- Maître de Conférence à l'E.N.P.A.	MEMBRES DU JURY.
	Ph. CAILLAUD	- Maître-Assistant à l'Université d'ALGER.	
	R. HAROUBIA	- Maître-Assistant à l'Université d'ALGER.	

PROPOSÉE PAR :

STONKOI

ETUDIÉE PAR :

M. SAHRAOUI

PROMOTION 1976

A MES PARENTS

A MA FEMME ET MON FILS DJALEL
AVEC TOUT MON AMOUR

A MES FRERES ET SŒURS
A TOUS MES PROCHES PARENTS ET AMIS

- A Monsieur G. STONKOT pour tous les conseils qu'il nous a prodigués au cours de nos travaux.

- Au Président et aux Membres du JURY.

- A Monsieur T. Rabah, Laborantin au Département de Génie-Civil, pour toute son aide.

-O-O-O-O-O-O-O-O-O-O-O-

I - INTRODUCTION -

Ces dernières années ont été le témoin du développement de nombreux polymères. En effet, nous assistons à un bond prodigieux de la consommation des matières plastiques au niveau de tous les secteurs de l'industrie et de la vie courante ; les statistiques montrent que nous sommes encore loin d'avoir atteint les chiffres souhaités.

Dans l'industrie de transformation les polymères ne sont jamais utilisés purs mais mélangés à d'autres constituants (les adjuvants, les charges) soit pour diminuer le prix de revient, soit pour stabiliser ou colorer ces polymères.

Aussi pour définir un polymère, il faut connaître sa composition et son mode d'obtention.

En effet, selon les caractéristiques physico-chimiques du polymère c'est à dire :

- température de fragilité
- température de transition vitreuse
- température de fusion
- température de dégradation etc...

Ce dernier sera apte à être formé selon l'une ou l'autre des différentes méthodes de transformation existantes, car chacune de ces dernières à ses propres paramètres de transformation.

- la moulabilité
- déformabilité
- la vitesse de chauffe
- la vitesse de formage etc...

Une fois l'objet obtenu, il y sera prélevé des éprouvettes qui seront soumises à des essais mécaniques ceux-ci seront caractérisés surtout par :

- la déformation à la rupture
- la contrainte à la rupture

LE PMMA est un exemple type des matières plastiques aptent à être thermoformées, nous l'avons pris non pas comme une matière à étudier, mais simplement comme un modèle à travers lequel nous essayerons de définir le thermoformage.

Nous serons ainsi amenés à déterminer la durée de service de la pièce thermoformée, nous vérifierons nos résultats par l'énergie d'activation, calculée à partir de nos essais, mécaniques. Celle-ci sera comparée à l'énergie d'activité déterminée par la méthode thermogravimétique.

I - OBTENTION DU POLYMETHYLE - METHACRYLATE (PMMA) -

I.1. Introduction -

Le point de départ de l'histoire de monomères acryliques remonte à 1843, lorsque l'acide acrylique fut obtenu pour la première fois par synthèse. En 1865 Frankland et Duppa préparèrent le méthacrylate d'éthyle.

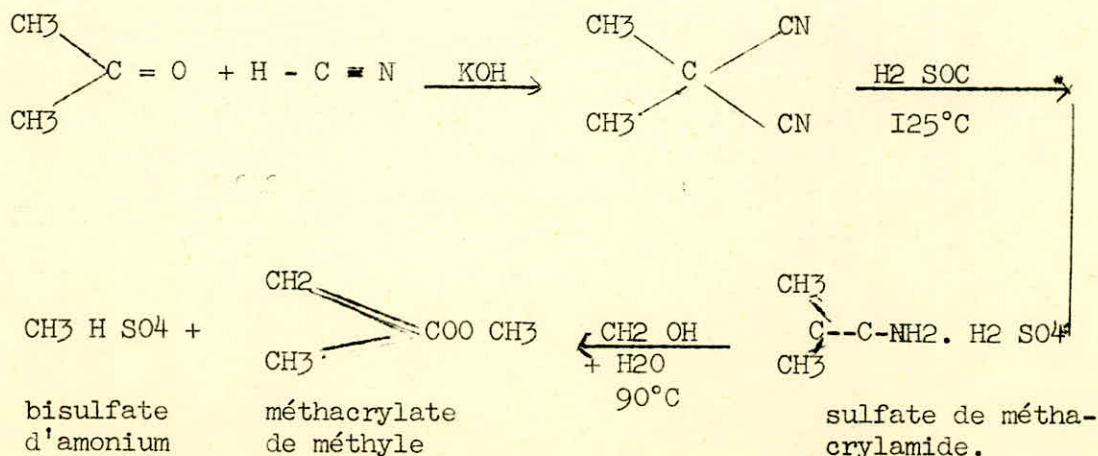
Déjà vers 1900, la plupart des acrylates courants étaient préparés en laboratoire.

En 1927 Rohm et Haas fabriquaient industriellement le premier polymère acrylique : l'acrylate de polyméthyle. Il servait essentiellement à fabriquer des vernis et enduits de surface.

Après 1927 Rouland Helle de la "Impérial chimical "industrie" étudia en détail le méthacrylate de méthyle et sa polymérisation tandis que Grawford (I.C.I.) mis au point un procédé économique de fabrication du monomère.

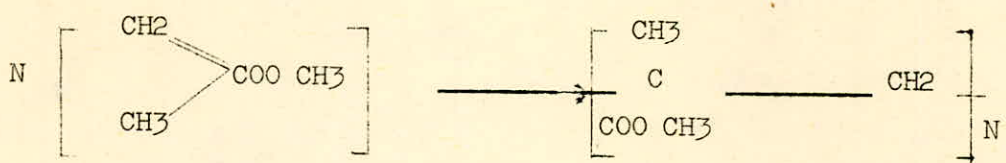
I.2. Synthèse du PMMA -

I.2. a) le méthacrylate de méthyle le plus important des esters méthacryliques est un liquide bouillant à environ 100°C. La préparation industrielle est réalisée suivant le schéma suivant :



Pour conserver le monomère il faut ajouter un inhibiteur de polymérisation (hydroquinone, diphénylamine).

I.2. b) le PMMA est obtenu par polymérisation du méthacrylate de méthyle monomère suivant le schéma:



I.3. Procédés de polymérisation du méthacrylate de méthyle -

I.3.1. Introduction -

Les polyméthyle méthacrylate se différencient les uns des autres par :

- le procédé d'obtention : polymérisation ou suspension
- " émulsion
- " masse
- " solution

- la longueur moyenne des chaînes caractérisée par l'indice de viscosité.

⊕ Les caractéristiques mécaniques des produits finis augmentent avec la longueur des chaînes des polymères.

⊕ Les températures nécessaires à la transformation du PMMA croissent également avec l'augmentation de l'indice de viscosité.

I.3.2. Procédés de polymérisation du méthacrylate de méthyle -

La polymérisation des méthacrylates peut s'effectuer suivant quatre (4) méthodes fondamentales.

I.3.2. a) Polymérisation en suspension -

l'amorceur de la réaction est le peroxyde de benzoyle et la température de réaction est située entre 100° et 130°C. On prépare ainsi des granulés qui sont ensuite utilisés pour le moulage par injection ou par compression pour former des objets de petites dimensions mais la transparence des objets ainsi réalisés n'est pas très bonne.

I.3.2. b) Polymérisation en masse -

Cette technique est très utilisée pour le méthacrylate de méthyle, pour la fabrication de joncs, de tubes et surtout de feuilles. Ces dernières sont ensuite utilisées telles quelles ou formées ensuite après ramalissement par chauffage.

C'est sans doute ce procédé qui nous intéresse pour le thermoformage.

Pour empêcher la polymérisation pendant la manipulation et le stockage, le monomère contient d'habitude un inhibiteur de réaction telle que l'hydroquinone. On l'éliminera avec une alcali.

Un problème se pose à cause de la très basse viscosité du monomère de méthacrylate de méthyle qui tend à couler des coquilles. Ce problème a pu être surmonté en procédant comme suit :

Avant de verser le monomère dans les coquilles, on l'épaissit pour lui donner la consistance d'un sirop en le chauffant en présence de peroxyde de benzoyle à très faible pourcentage ne dépassant pas 0,5 %, pendant quelques minutes, tout en agitant. On refroidit ensuite à la température ambiante. Le sirop ainsi obtenu : le prépolymère peut être conservé sans inconvénient en atmosphère refroidies.

I.4. Charges - Adjuvants -

I.4.I. Les charges -

Les charges sont utilisées pour améliorer ou modifier des caractéristiques en vue d'obtenir un effet déterminé.

Mais très souvent elles sont utilisées uniquement dans le but de réduire le prix de revient du produit fini.

Les charges peuvent se diviser grosso-modo en charges minérales et charges organiques.

I.4.I. a) Charges Minérales -

Ces charges offrent certains avantages par rapport aux charges organiques, mais à plusieurs points de vue, les types de charges sont complémentaires. Leurs principaux avantages par rapport aux charges organiques résident en ce qu'elles confèrent une plus grande résistance à la chaleur, à l'eau et à l'électricité. Elles possèdent également une meilleure stabilité dimensionnelle.

Comme charges minérales nous citerons :

- le verre : il est transparent, dur, résistant à la chaleur et possédant une résistance théorique élevée par rapport aux matières plastiques.

- le mica : utilisé comme charge, il donne d'excellentes propriétés électriques, quoique malheureusement il n'est pas mouillé par les résines et l'obtention de produits moulés homogènes est par conséquent difficile.

- la silice : ce corps augmente la résistance à la chaleur et améliore les caractéristiques électriques du polymère sans augmenter sa densité.

- l'amiante : les pièces moulées à partir de polymères chargés d'amiante ont une excellente résistance à la chaleur et une faible absorption d'eau, mais elles ont une densité élevée.

I.4.1. b) Charges organiques -

Nous nous contenterons de citer comme exemple :

- le papier de cellulose : ce type de charge est bon marché mais il rend le démoulage difficile. On a pu obtenir des pièces moulées d'une résistance exceptionnelle au choc mais dont l'absorption d'eau est élevée.

- les flocons de coton : le coton sert à améliorer la résistance au choc des pièces moulées et diminue leur retrait au moulage.

- le tissu en morceaux

I.4.2. Les adjuvants -

Les adjuvants sont utilisés dans un but bien précis. Ils sont utilisés soit pour faciliter la transformation soit pour plastifier ou stabiliser soit pour colorer.

Nous décrirons dans ce chapitre les différents adjuvants utilisés.

I.4.2. a) Les plastifiants -

Les plastifiants sont des semi-solvants non volatils que l'on incorpore aux polymères. Leur rôle est de diminuer les liaisons bipolaires entre les différentes chaînes moléculaires. Il en résulte une diminution de la température de transition vitreuse et une augmentation de l'aptitude à la déformation.

Cependant, suivant ce traitement physique : la plastification on peut passer d'une catégorie à une autre, à savoir d'un plastomère à un élastomère.

Les principaux plastifiants du PMMA sont :

- les sabacates de butyle ou de benzyie
- les phosphates de triphenyle
- les phosphates de tricrésyl

I.4.2. b) Les stabilisants -

Tous les polymères sont susceptibles de se décomposer en particulier sous l'action de la chaleur, de la lumière, de l'oxygène de l'air et surtout de l'ozone.

Les stabilisants à la chaleur sont toujours indispensables. Ils agissent bien entendu pour limiter le vieillissement des plastiques dû à une élévation de la Température.

Comme la transformation industrielle des hauts polymères se fait à haute température, l'addition de stabilisants évite aussi la thermodégradation. Ils limitent aussi l'action de l'oxygène. Les stabilisants sont ajoutés dans la proportion de 0,5 à 5 %.

I.4.2. c) les lubrifiants et agents de démoulage -

Leur rôle est de faciliter l'écoulement du polymère fondu à travers des filières métalliques dans les moules. Ils permettent aussi le décollage et le démoulage du produit fini des moules.

On pulvérise sur la surface du moule une émulsion qui diminue l'adhérence du polymère sur le métal.

exemple de lubrifiant interne :

- acides gras comme l'acide stéarique

exemple d'agent de démoulage :

- huile de silicone
- cire de carnauba.

I.4.2. d) Les colorants -

Les colorants peuvent se définir comme des produits chimiques organiques synthétiques naturels qui sont solubles dans les solvants courants tels que alcool et eau.

Ils possèdent une bonne résistance à la décoloration et existent dans une grande gamme de couleur. Ils possèdent cependant certains inconvénients, notamment une stabilité thermique assez basse.

Généralement le pigment est fourni en mélange dans un polymère solide à une grande concentration, puis l'ensemble est dilué en ajoutant du polymère pur. Cette méthode présente l'avantage d'être propre et facile à manipuler mais elle est assez coûteuse.

I.5. Conclusion -

le polyméthyle méthacrylate est un thermoplastique présentant une structure en chaîne linéaire

aussi, le PMMA va présenter une courbe thermomécanique complète avec une température de vitrification et une température de fusion.

II. METHODES DE TRANSFORMATION -

Les matériaux polymères et les méthodes de transformation sont très liés.

En effet, suivant la nature du polymère, les poudres à mouler peuvent être moulées soit par injection, soit par extrusion, soit moulées par compression soit par coulée etc...

Le polyméthyle méthacrylate peut être travaillé soit à froid (usinage) soit à chaud.

II. I. Il existe une méthode qui consiste à remplir des coquilles avec un prépolymère. Ce dernier est obtenu par la méthode décrite au chapitre I.3.2. b. à la polymérisation en masse.

Une fois les coquilles remplies on les met dans un four à environ 45°C pendant 12 à 40 heures (selon l'épaisseur de la feuille). L'air à l'intérieur du four est maintenu en circulation de façon à dissiper la chaleur dégagée pendant la polymérisation, la viscosité augmente et empêche ainsi le monomère en excès de circuler librement. On élève par conséquent la température à environ 90° enfin que la feuille soit **uite**.

La dernière étape de ce procédé consiste à sortir la feuille de la coquille, on la recuit dans un four à 140°C environ pour éliminer toute contrainte résiduelle et on la refroidit ensuite lentement.

II. 2 - Usinage -

l'Usinage se fait surtout sur des feuilles de PMMA.

./.

En effet grâce à ses propriétés physiques remarquables, la plupart des outils et machines employés pour le travail du bois et du métal conviennent à l'usinage des semi-produits en PMMA.

Toutefois, certaines précautions doivent être prises, à savoir:

- les outils doivent être tranchant et correctement rectifiés.
- refroidissement soit à l'eau soit à l'air comprimé de la pièce pendant l'usinage afin d'éviter la surchauffe et le collage de petits morceaux sur l'outil.
- la vitesse de coupe de l'outil ne doit pas être trop grande.

A chaud les produits en PMMA peuvent être travaillés soit par formage soit par emboutissage. Ce dernier est facile, mais ne peut être assez profond car la feuille de PMMA manque d'élasticité et se déchire.

II.3.- Moulage par injection -

Le moulage par injection du PMMA se fait par des machines et des moules classiques. Un séchage préalable de la poudre à mouler avant le moulage à 85°C pendant 2 à 3 heures est recommandé car la poudre à mouler a tendance à absorber l'humidité. Ce séchage permettra un rythme de travail assez rapide (10 à 30° par pièce) la température de moulage se situe entre 150 et 170°C sous une pression de 1200 à 1500 Kg/CM².

II. 4 - Extrusion -

L'extrusion du PMMA conduit à la production des feuilles.

En particulier celles de très grandes dimensions ; la longueur étant pratiquement illimitée. Il est possible de fabriquer par ce procédé des feuilles d'épaisseur uniforme, exempte de tensions résiduelles, de défauts de surface et présentant une "brillance" uniforme. Le refroidissement ne doit pas être trop rapide, sinon des lignes de charges apparaîtront à travers la feuille. La première série de cylindres de réception doivent être propres et leur surface parfaitement lisse. La température à ce niveau doit être comprise entre 38 et 35°C.

II. 5 - Moulage par compression -

Il est utilisé pour l'obtention de plaques épaisses et des pièces de grandes dimensions.

II. 4. THERMOFORMAGE -

II.4.I. Introduction -

La thermoplasticité du PMMA est utilisée pour l'amener à des formes plus ou moins complexes en partant de feuilles ou de plaques.

Chauffé à 130 - 160°C, le PMMA se ramollit et prend une consistance caoutchouteuse. On peut alors lui donner une grande variété de formes à l'aide d'un outillage approprié.

Après refroidissement, il reprend sa rigidité initiale en conservant la forme qui lui a été donnée. Inversement, lorsqu'une pièce galbée ne présente pas la forme voulue, elle peut être réutilisée car, par simple chauffage, on peut lui rendre sa forme plane primitive débarrassée éventuellement de toute tension interne préalable.

Les techniques de formage des matières plastiques sont de plus en plus couramment utilisées dans des domaines de plus en plus nombreux.

Le formage présente des analogies évidentes avec l'emboutissage des métaux en feuilles ; de telle sorte que la terminologie qui lui a été consacrée est très fortement affectée par cette filiation apparente.

Cette similitude dans les deux techniques est plus superficielle que profonde et un examen plus détaillé montre que les différences structurales des matériaux qu'elles transforment respectivement, entraînent des divergences fondamentales sur les plans rhéologiques, thermiques et technologiques.

Les formes que l'on peut espérer réaliser dans les deux cas sont tout à fait similaires ; les techniques admettent qu'il s'agisse de métaux ou de plastiques, les mêmes limitations liées à la profondeur du formage.

II.4. 2 - Principe -

Le formage va donc être effectué de la façon suivante :

- le matériau sera porté à la température de formage
- il sera déformé en mettant en oeuvre des moyens qui seront examinés plus loin.
- il sera refroidi jusqu'à une température inférieure à la température de transition vitreuse du matériau. Il faut maintenir constants les efforts de formage pendant le refroidissement. L'objet conservera alors la forme qui lui aura été imposée.

REMARQUES -

Si on considère le formage des métaux et des plastiques on peut déduire de ce qui précède, des différences technologiques importantes.

En effet, le formage des plastiques se fait couramment, après chauffage du flan, qui n'est pas indispensable pour les métaux. De plus quelques daN.cm^{-2} suffisent pour former les plastiques, alors que le seuil critique d'écoulement plastique des métaux atteint plusieurs dizaines de daN. mm^{-2} .

Les forces de formage résultantes seront évidemment sans commune mesure.

D'autre part, la réversibilité de la déformation nécessite généralement le maintien du flan à la périphérie de l'empreinte.

Enfin, le formage des matières plastiques doit être suffisamment rapide pour que le matériau soit caoutchoutique, toute la déformation, pendant

II. 4.3. - Chauffage -

Le chauffage des flans, avant déformation, constitue une des phases essentielles du thermoformage. En effet, le temps nécessaire à l'obtention de la température optimale de formage, représente suivant le cas, 50 à 80 % de la durée totale du cycle. Un chauffage rapide augmente la cadence et diminue le coût de la mise en oeuvre.

On distingue principalement deux méthodes de chauffage, choisies en fonction des séries envisagées. Les pièces donnant lieu à de moyennes et à de grandes séries seront chauffées au dessus de l'empreinte à l'aide de panneaux émetteurs d'infra-rouge ou par conductibilité, à partir de plaques chauffantes. Par contre, dans le cas de la réalisation de prototypes ou de petites séries, on chauffe en étuve à convection forcée ou par immersion dans un bain liquide, avant de fixer le semi-produit sur le poste de formage. La vitesse de mise en température est une fonction des caractéristiques physiques et dimensionnelles de la pièce ainsi que de celles du dispositif de chauffage et des pertes éventuelles par conduction, convection et rayonnement.

La densité de chauffe dépend essentiellement du matériau et de la surface de la pièce. Une 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.

II.4.4. - Procédés de formage -

Il existe de nombreux procédés de formage, qui découlent de quatre (4) méthodes de basse, souvent combinées entre elles :

II. 4.4. a) Méthodes thermomécaniques -

Ces techniques permettent des déformations de profondeurs variables, par emboutissage (fig.1) ou étirage sur poinçon (fig.2)

Le plus souvent, l'utilisation de poinçons ou de matrices incomplets (fig.3) autorisent de plus grandes déformations, en limitant les pertes thermiques, de plus, on obtient avec ces outillages simplifiés de très bons états de surface.

II. 4.4. b) Méthodes thermopneumatiques -

Impossible dans le cas des métaux, le formage par aspiration (fig.6) ou soufflage (fig.7), en moule complet ou incomplet, peut être utilisé, compte tenu des faibles efforts demandés par la déformation d'une matière thermoplastique chauffée.

Ces techniques nécessitent un matériel peu coûteux et d'utilisation simple.

II.4.4. c) Méthodes mixtes -

Lorsque les profondeurs de formage deviennent trop importantes et que les variations d'épaisseurs des objets finis sont inacceptables, ou a recours à des méthodes mixtes, qui sont des combinaisons des méthodes précédentes.

Dans ce cas, le formage comprend plusieurs phases exemple : sans refroidissement du **flan** : emboutissage puis soufflage en moule (fig.8) ; soufflage, poinçonnage et aspiration en retour sur poinçon (fig.9)

II. 4.5. - Refroidissement et démoulage -

Le refroidissement à la fin du formage doit être rapide, pour éviter le gauchissement de la pièce. Cela conduit à des retraits plus faibles, mais à des tensions internes plus importantes.

On peut augmenter la vitesse de refroidissement par vaporisation d'eau, par soufflage d'air comprimé ou par circulation d'eau froide dans des canaux ménagés dans l'épaisseur du moule.

Après démoulage, les pièces doivent être retouchées à leur périphérie.

II.4.6 - Conception des pièces et des moules -

Les efforts mis en jeu étant relativement faibles, on peut utiliser de nombreux matériaux pour réaliser des moules ; leur état de surface doit être correct, pour conférer aux pièces finies un aspect convenable. On utilise couramment : le plâtre, le bois, les alliages légers, l'acier, les stratifiés pour les petites séries et pour les pièces dont les tolérances ne sont pas strictes.

Il faut ménager dans tous les moules des événements d'échappement de **petit** diamètre ($\leq 0,5$ mm) pour évacuer l'air emprisonné entre le flan formé et le moule.

Les coefficients de dilatation des matières plastiques sont généralement dix (10) fois supérieurs à ceux des métaux, aussi les dépuilles doivent être importantes, pour faciliter le démoulage.

REMARQUES-

Lors du formage, l'épaisseur des plaques varie et cette variation dépend du procédé de formage.

Le soufflage ou l'aspiration libre ou en moule peut provoquer un affaiblissement important de l'objet fini dans les parties les plus éloignées du serre-flan (fig. 10). Par contre, le poinçonnage amincit les parties latérales, car la pièce se refroidit au contact du poinçon et se déforme peu. C'est pour ces raisons que l'on combine ces deux (2) méthodes, afin de régulariser au maximum les épaisseurs sur les objets finis.

II. 4.7 - CONCLUSION -

En dessous de la température de transition vitreuse on peut thermophormer des pièces aux dimensions et aux géométries relativement modestes. Cette méthode, appelée plutôt forçage, nécessite de grandes pressions pour palier au déficit de l'énergie thermique.

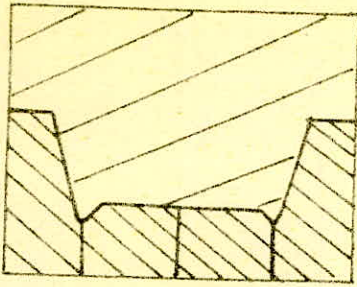


Fig. 1- Emboutissage

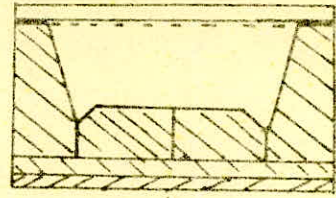


Fig. 6- aspiration

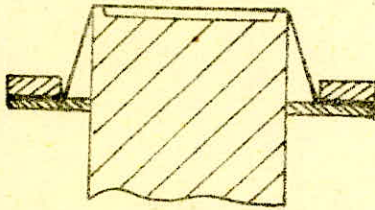


Fig. 2- Poissonnage

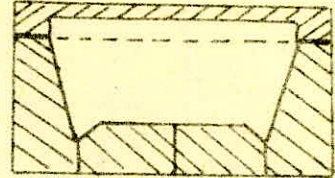


Fig. 7- soufflage

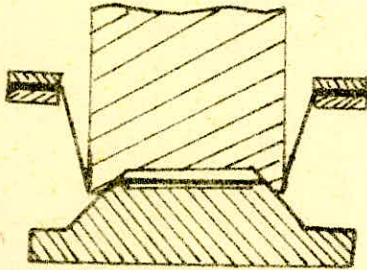


Fig. 3- Emboutissage par poinçons et matrices incomplètes -

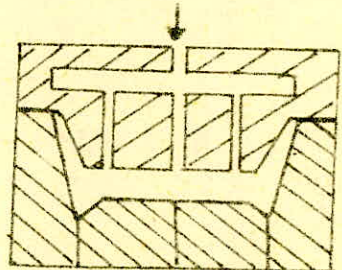


Fig. 8- Emboutissage et soufflage en moule

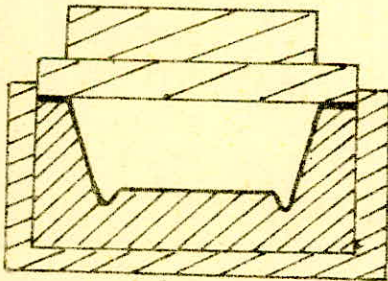


Fig. 4- Emboutissage sur caoutchouc -

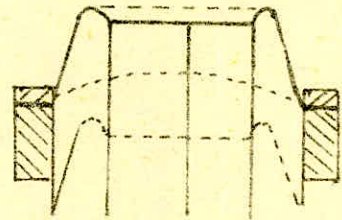


Fig. 9- soufflage - poinçonnage et aspiration en retour sur poinçon

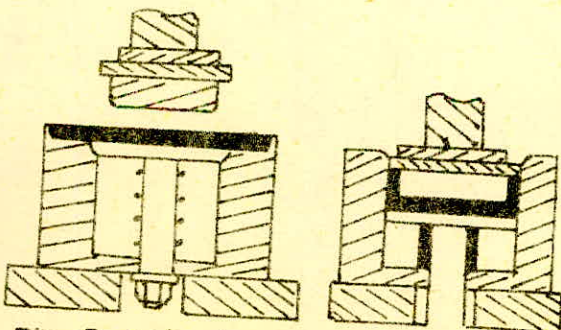


Fig. 5- Emboutissage et découpage de FLAN.



Fig. 10- VARIATION d'épaisseur par soufflage ou aspiration libres -

III- PARAMETRES DE TRANSFORMATION.

- 49 -

III-I-moulabilite

C'est une caracteristique relative d'un materiau vis a vis d'autres materiaux.

En effet, si nous comparons deux materiaux: un materiau qu'on utilise et l'autre comme reference il faut trouver les moyens pour etudier les caracteristiques qui sont applicables pour les materiaux, pour l'objet determine et pour le processus de transformation: (tout ceci doit etre execute dans les conditions optimales de transformation).

III-2-EXAMEN DE L'OBJET.

L'examen de l'objet nous determinera le facteur de forme de l'objet. ce dernier caracterise:

- la longueur parcourue par le flux de matiere.
- La direction relative imposee a ce flux.
- La variation d'epaisseur et de section.

III-3-FLUIDITE

Cette caracteristique peut etre definie par une grandeur qui est l'inverse de la viscosite.

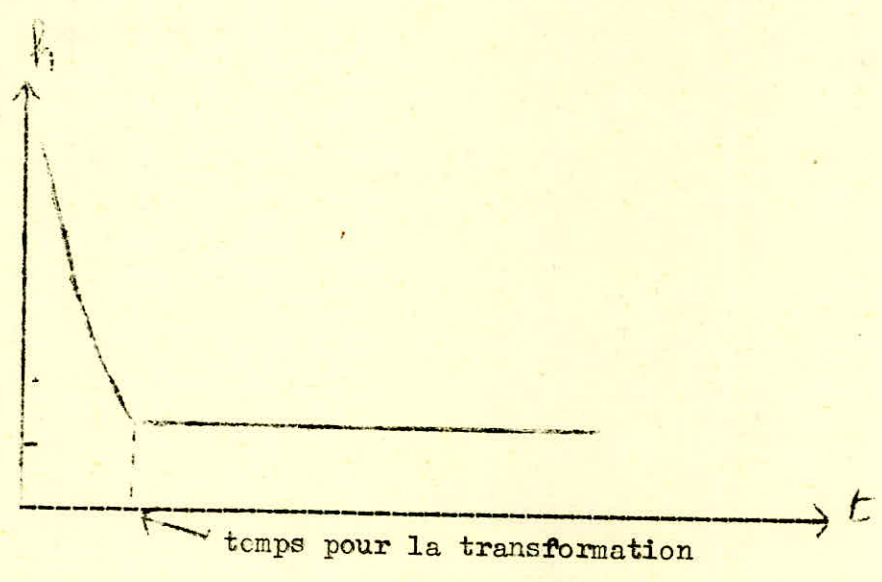
Dans la mise en oeuvre elle depend de la temperature, de la pression et de la composition de matiere (% de plastifiant et de charge).

III-4- TEMPS DE TRANSFORMATION.

La methode copcirt determine le temps de transformation consiste a mesurer l'epaisseur du disque obtenu entre deux plateaux (methode mise au point aux USA).

On met une masse entre deux plateaux, on comprime puis on mesure la distance h entre les deux plateaux. En effet la repartition de la masse est liee a h .

Quand le phenomene de durcissement est termine on a $h = f(t) = \text{constante}$. D'où le temps de la transformation.



III-5- TEMPS DE CHAUFFAGE.

On peut augmenter le temps chauffe en ajoutant des plastifiants.

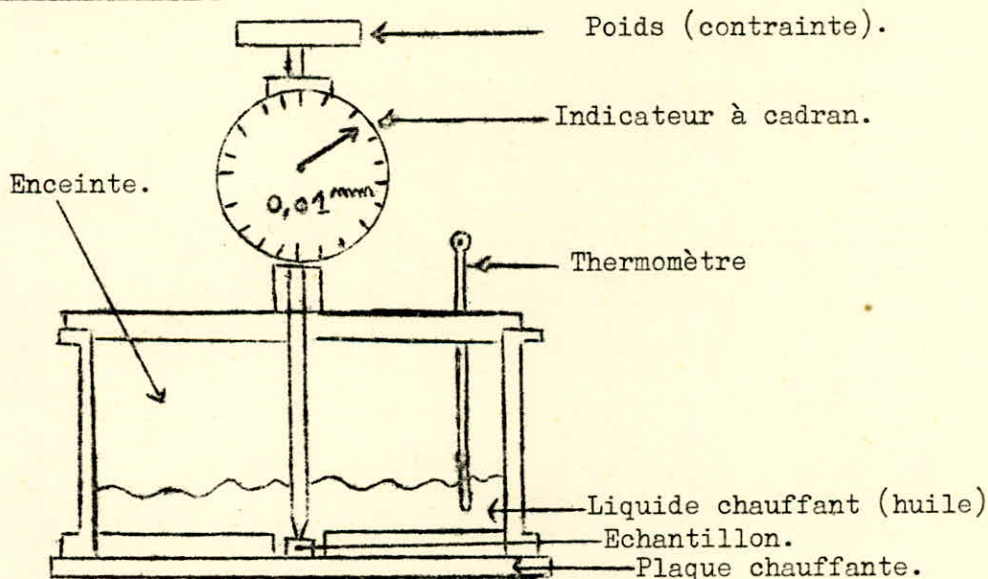
COURBE THERMOMECHANIQUE POUR LA DETERMINATION DE LA TEMPERATURE DE
TRANSITION VITREUSE :

Les éprouvettes sur lesquelles nous avons travaillé ont été découpées dans des feuilles de PMMA importées. N'ayant aucune donnée sur la composition, la nature des charges et des adjuvants et la nature et la quantité de plastifiant, nous avons essayé de donner une étiquette à ces éprouvettes en déterminant le domaine de transition vitreuse.

THEORIE :

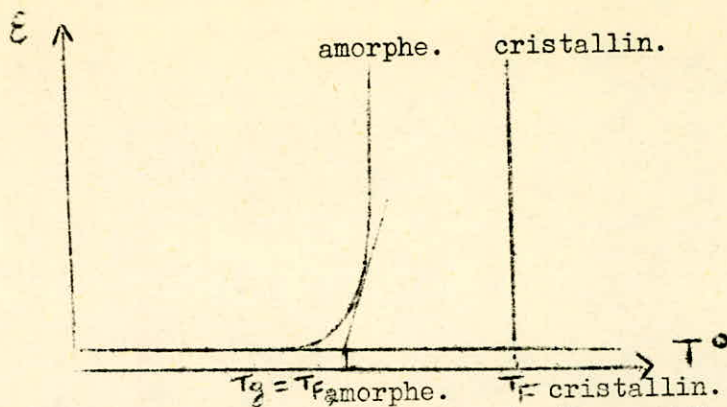
Pour différencier un gaz, d'un liquide et d'un solide, on utilise une méthode dite "thermomécanique" qui est l'action combinée de la mécanique et de la température. Cette expérience est réalisée grâce à un appareil du type VICA existant dans nos Laboratoires.

Description de l'appareil.



Sous une charge constante on mesure la déformation de l'échantillon en fonction de la température. Pour les solides la déformation ne dépasse pas 5% (liaison -C-C-). Ceci correspond à l'orientation vers une même direction des déplacements, à partir d'une certaine température, la somme des déplacements devient un déplacement total, l'énergie de cohésion est alors égale à l'énergie externe et la température enregistrée est appelée Température de vitrification ou de transition vitreuse T_g

.../...



Thermodynamiquement les corps amorphes n'ont pas d'état solide, en effet la distance entre deux molécules n'est pas constante, donc l'énergie de cohésion n'a pas une valeur fixe et la température de fusion n'est pas nette.

Pour les corps cristallins, au contraire, la distance entre deux molécules est constante ; donc l'énergie de cohésion ne varie pas et la température de fusion est bien définie.

Dans le cas des polymères on parlera de déplacement de segment. Le segment est le résultat de l'indépendance du mouvement de tronçon d'une chaîne à cause de la souplesse, c'est-à-dire que s'il y a mouvement de segment, il y a existence d'un polymère indépendamment de la composition de chaîne, de la nature des atomes et de la méthode de préparation (polymérisation, polycondensations copolymérisation).

La grandeur du segment est liée à la souplesse d'une chaîne.

En effet si on pose :

N = degré de polymérisation du polymère.

N_s = degré de polymérisation du segment.

- Si la souplesse est grande $N_s \longrightarrow 1$: les caractéristiques du polymère sont meilleures.

- Si la souplesse est petite $N_s \longrightarrow N$: caractéristiques moins bonnes.

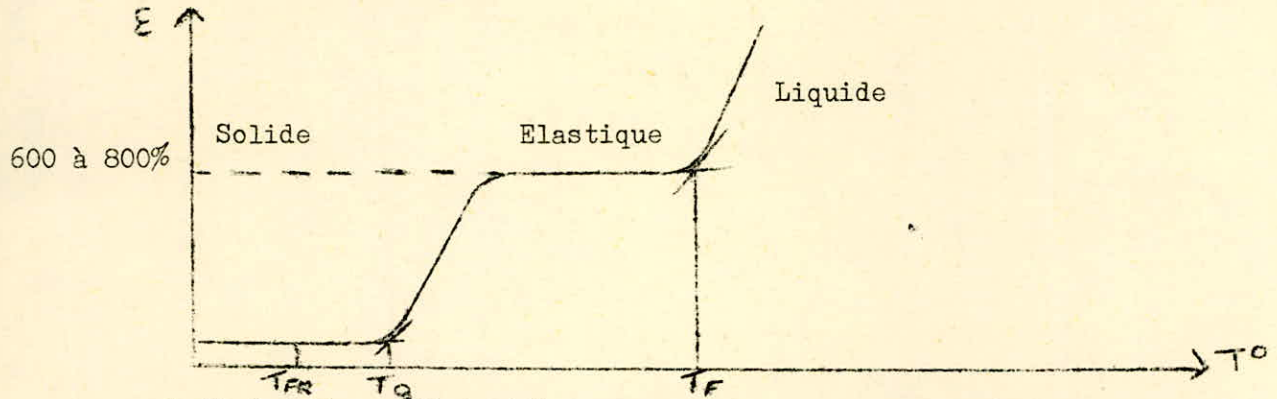
donc $1 < N_s < N$

.../...

REMARQUE :

Si $N_s > N \implies$ on a une substance ordinaire.

Les polymères ont 3 états physiques comme nous pouvons le voir sur le diagramme suivant :



* Si $T < T_{FR}$ c'est l'état rigide qui est le plus général dans les polymères réticulés et irréguliers. Il est caractérisé par l'absence de mouvement dans les macromolécules. Dans un essai de traction classique la déformation est réversible jusqu'à la rupture. Les allongements de rupture sont relativement possibles et voisins de 5 %.

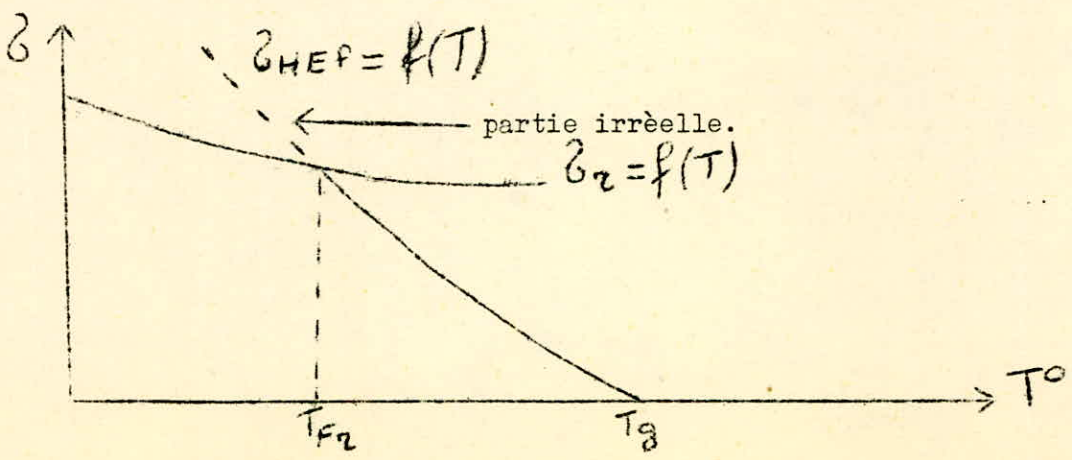
* Variation de la contrainte en fonction de la température

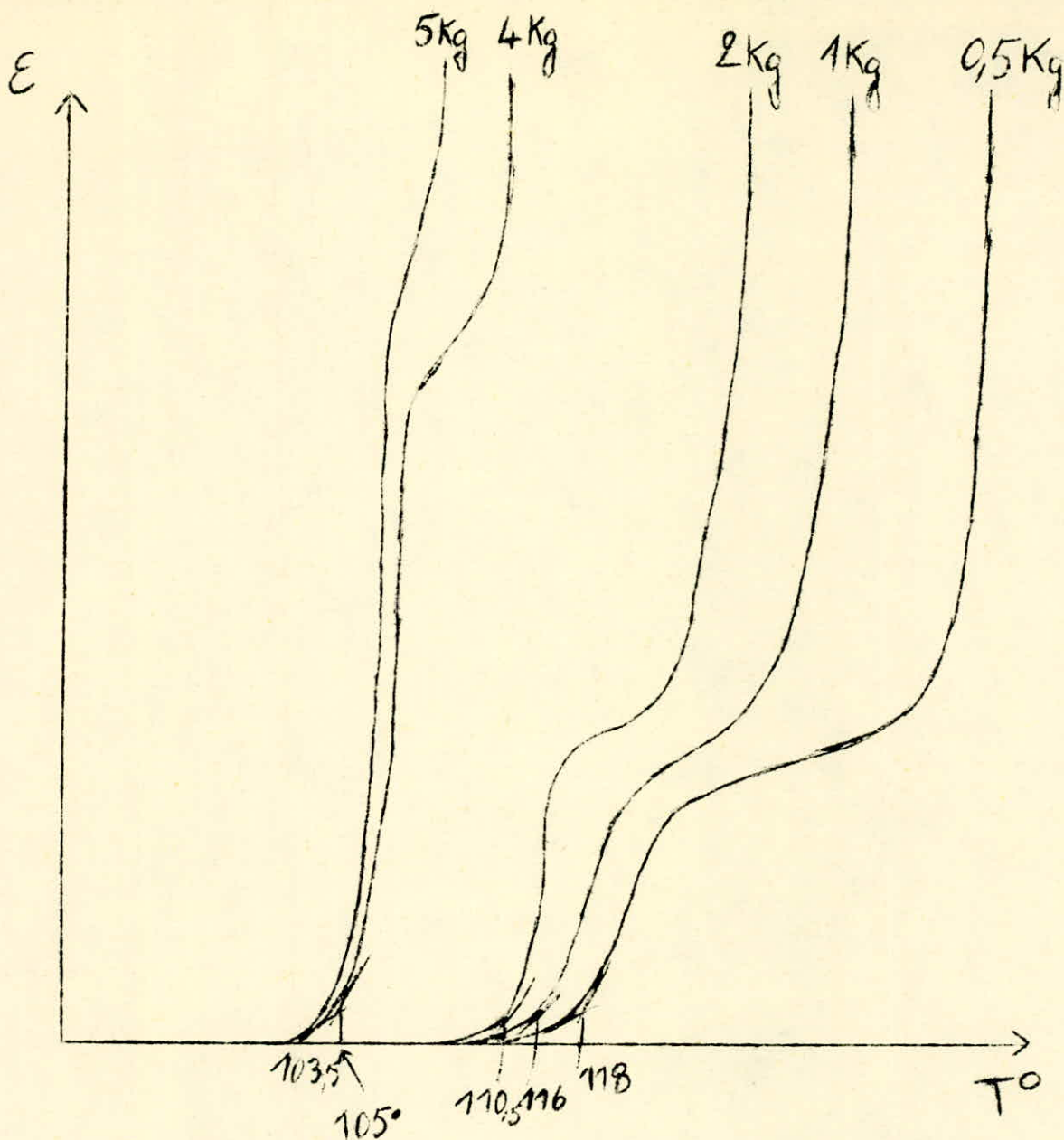
Soient :

σ_r = Contrainte de résistance.

σ_{HEF} = Seuil de haute élasticité forcée.

L'intersection des 2 courbes donne la température de fragilité obtenue lorsqu'il y a rupture sans déformation. Jusqu'à la température T_g on a un état caractérisé par une déformation faible, constante et réversible : c'est l'état solide.





COURBE THERMOMECHANIQUE EXPERIMENTALE.

RESULTATS

$$T_g 5kg = 103^{\circ}5$$

$$T_g 4kg = 105^{\circ}$$

$$T_g 2kg = 110^{\circ}5$$

$$T_f 5kg = 137^{\circ}$$

$$T_f 4kg = 138^{\circ}$$

$$T_f 2kg = 163^{\circ}$$

$$T_g 1kg = 146^{\circ}$$

$$T_f 1kg = 165^{\circ}$$

$$T_g 0,5kg = 118^{\circ}$$

$$T_f 0,5kg = 172^{\circ}5$$

* A la température T_g ou température de vitrification ou de transition vitreuse, le polymère devient souple du point de vue du mouvement interne, c'est-à-dire que l'énergie est suffisante pour déplacer les segments.

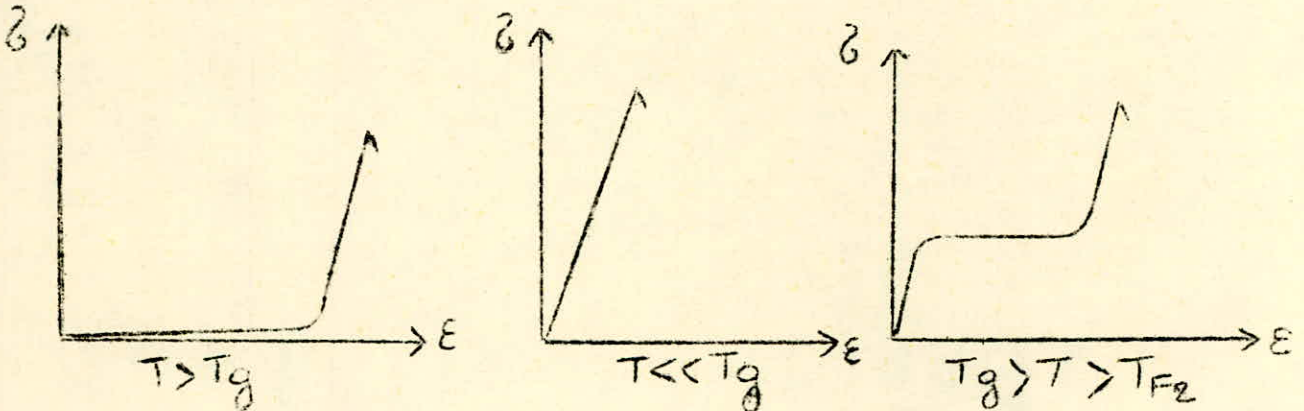
$$RT_g = \underbrace{RK_1 \cdot T}_{\text{action de la } T^{\circ}} + \underbrace{RK_2 F}_{\text{action mécanique.}}$$

R = constante des gaz

La température réelle T est donc inférieure à la température de vitrification.

Mais on peut minimiser cet écart de température en diminuant la force mécanique F.

La courbe de variation $H f = f(T^{\circ})$ montre que pour $T \ll T_g$ le seuil de haute élasticité est très élevé, c'est à dire qu'il n'y a pas de déformation du solide, mais que pour T_g , le seuil est nul donc la déformation est grande : on a alors 3 types de courbes :



On a donc entre T_g et T_f un état intermédiaire appelé état élastique. Cet état a des caractéristiques à la fois du solide et du liquide, car la déformation est constante, élevée et réversible.

à $\epsilon = 600$ à 800% les corps ordinaires ne sont pas réversibles car il y a rupture des chaînes.

* A la température de fusion T_f , on a un état caractérisé par une déformation énorme mais pas réversible. Cet état est analogue à l'état liquide des molécules ordinaires, mais si pour ces dernières l'écoulement se fait par déplacement de la molécule entière, pour les polymères on a un écoulement segmentaire ou l'énergie d'activation est inférieure à l'énergie totale.

V. Essais mécaniques -

V.I. - Introduction -

Les matières plastiques, comme tous les matériaux, peuvent être caractérisées par leurs propriétés mécaniques.

Elles ont une masse volumique faible, généralement comprise entre 1 et 1,7 kg/dm³, un pouvoir d'isolement électrique et calorifique élevé, une bonne souplesse et une assez grande élasticité. Tout ceci se traduit par une dureté et un module d'élasticité plus faible que pour les métaux.

V. 2 - Théorie de déformation des polymères -

Les phénomènes observés lors de l'étude des propriétés mécaniques des matières plastiques sont complexes. Ils résultent de propriétés telles que :

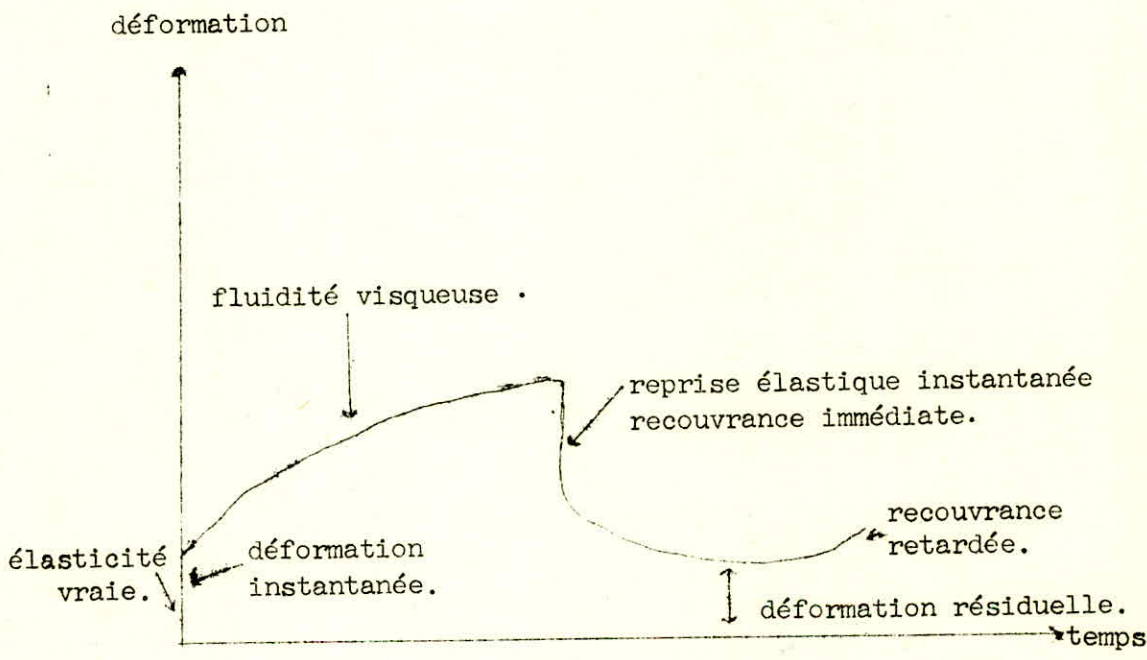
- l'élasticité pure : le corps élastique idéal suit la loi de Hooke
- la plasticité vraie : c'est la propriété selon laquelle un corps déformable ne peut l'être que par application d'une force supérieure à un seuil et conserve la forme acquise après suppression de la force.

Selon que la plasticité ou l'élasticité sera la qualité dominante, on parlera de plastoélasticité ou de viscoélasticité.

Aussi le diagramme de déformation d'un corps viscoélastique soumis à une charge constante, en fonction du temps, puis à une décharge permet de mettre en évidence que son comportement global est la superposition de :

- une élasticité vraie.

- une fluidité visqueuse : la déformation est proportionnelle au temps.
- une élasticité visqueuse : la déformation est réversible dans le temps, mais il subsiste une déformation permanente.



Les matières plastiques peuvent, selon le cas, être assimilées aux corps viscoélastiques ou plastoélastiques.

Il faudra aussi noter que l'importance du temps et de la température sur les propriétés mécaniques des matières plastiques est primordiale.

En effet, les conditions dans lesquelles un essai mécanique est réalisé doivent être parfaitement définies : vitesse et temps d'application de la contrainte, vitesse de charge, température etc...

exemple :

Un essai de résistance à la traction ne donne pas le même résultat si la vitesse à laquelle il est effectué varie et à fortiori la température. Une étude comparative des essais effectués nous permettra de préciser par la suite si cette affirmation se justifie ou non.

En faisant varier la nature et la proportion des adjuvants, on modifie l'aspect extérieur, la masse volumique, l'usinage etc....

Ainsi, la présence des plasfiants influe beaucoup sur les propriétés mécaniques du fait que dans une matière plastique très plastifiée la température de transition vitreuse diminue beaucoup. Il faut aussi noter que la complexité de la constitution des plastiques, qui dépend des conditions de leur élaboration, influe souvent de façon importante sur leurs propriétés pratiques.

Aussi, ne connaissant pas les conditions d'obtention, la nature et les proportions des adjuvants de la matière qui a servi à faire nos éprouvettes, nous nous sommes astreint dans un premier stade à définir au moins le domaine de variation de la température de transition vitreuse (cf. partie expérimentale) pour expliquer les résultats obtenus car toute matière plastique de qualité commerciale déterminée à des caractéristiques qui présentent une dispersion parfois importante.

V. 3 - Techniques de mesure des différentes caractéristiques mécaniques -

Les essais mécaniques se rapprochent beaucoup de ceux que l'on fait subir aux métaux, mais les métaux et les matières plastiques ne se comportent pas de la même manière.

En effet, sous une contrainte donnée, les métaux se déforment instantanément et lorsque la contrainte cesse, reprennent leur état initial. Le cycle est parfaitement réversible et peut être répété en principe indéfiniment. ./.

De plus la déformation est proportionnelle à l'effort exercé (loi de Hooke). Cette propriété nous permettra de faire des essais préalables sur éprouvettes en acier. Ces essais nous permettront d'étalonner l'appareil et de trouver la vitesse de charge.

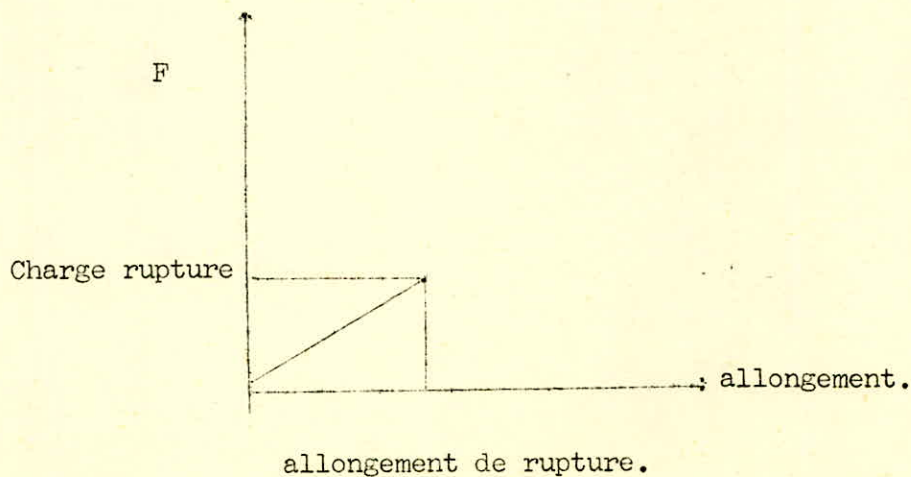
V. 3 - a) Notions sur la résistance à la traction -

La résistance à la traction se mesure sur des éprouvettes en forme d'~~ha~~altères pour les matières plastiques.

Les têtes de cette éprouvette sont fixées dans les mors d'un dynamomètre (appareil "TESTWELL" cf. schéma en annexe). L'éprouvette est soumise à des efforts de traction croissants.

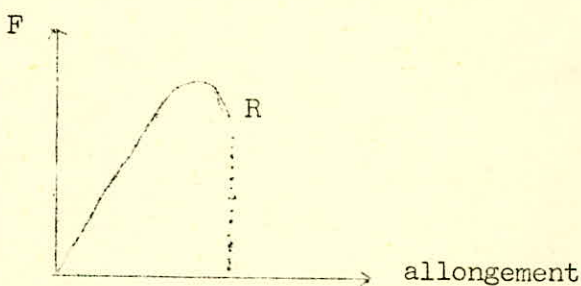
L'enregistrement de la force de traction et de l'allongement correspondant appelée courbe de traction fournit un tracé caractéristique, suivant que la plastique est rigide ou souple, c'est à dire à réseau tridimensionnel (thermodurcissable) ou non (thermoplastique).

exemple : thermodurcissable -



Le tracé est sensiblement linéaire mais la pente varie avec le logarithme de la vitesse de traction (réf.)

- Exemple thermoplastique -



à température ambiante les thermoplastiques sont rigides. La courbe d'abord linéaire s'arrondit avant la rupture. (réf.).

La valeur de l'effort au point R permet de calculer la charge de rupture. Le résultat s'exprime en Kgf/cm² ou en Neuwtons/cm². C'est l'effort maximum rapporté à la section initiale de l'éprouvette.

V. 3 b) - Notions de résistance à la flexion -

La déformation des matières plastiques dépend étroitement de la durée d'application de la contrainte et de la vitesse d'application : d'où l'intérêt de cette détermination. La résistance à la flexion se mesure sur des éprouvettes en forme de barreaux lisses.

Schéma du dispositif de flexion : voir figure ci-jointe :

Ce dispositif n'existant pas nous avons procédé à sa fabrication dans l'atelier des métaux. Les dimensions portées sur ce dispositif correspondent à celles citées par les normes AFNOR que nous avons prises comme bases pour nos calculs.

La flexion est une déformation complexe qui résulte de la superposition de :

- la traction
- la compression
- le cisaillement

En effet la partie supérieure de l'éprouvette est soumise à un effort de compression, la partie inférieure à un effort de traction.

La rupture va se produire suivant le plan médian vertical par compression des fibres supérieures et déchirement des fibres inférieures.

Ce phénomène met en évidence la répartition non linéaire des contraintes dans l'épaisseur de l'éprouvette : les plastiques ne suivent pas la loi de Hooke, aussi le calcul correct de la résistance à la flexion est défini par les normes AFNOR et ASTM :

La contrainte à la flexion sera calculée selon la formule :

$$\sigma_f = \frac{3 FD}{2 bh^2}$$

σ_f = contrainte de flexion

F = effort appliqué au centre de l'éprouvette.

D = portée entre appuis

b = largeur de l'éprouvette

h = hauteur de l'éprouvette

V. 4 - Module d'élasticité -

Nous savons que l'élasticité est caractérisée par la réversibilité de la déformation selon le sens dans lequel évolue la contrainte.

Le module d'élasticité est le rapport de la variation de l'effort à la variation relative de la déformation élastique qu'il produit :

$$\frac{F}{S} = E \frac{L' - L}{L} \quad \text{d'où} \quad E = \frac{F/S}{\frac{L' - L}{L}} = \frac{F/S}{\frac{\Delta L}{L}}$$

F = effort appliqué exprimé en Kgf ou en Neuwton

S = section en mm² ou cm²

E = module d'élasticité en Kgf/mm² ou Kgf/cm² (où en N/mm² ou N/cm².)

L = longueur initiale en mm ou cm

L' = longueur après application de la charge.

La valeur obtenue pour E n'a de signification que lorsqu'elle est mesurée dans la zone élastique, donc pour des déformations très faibles. C'est pourquoi la vitesse de déformation est en rapport avec l'épaisseur de l'échantillon.

VI-PROBLEMES TECHNIQUES.

---Nous avons travaillé sur une presse hydraulique de marque: "TESWELL" conçue pour les essais sur du béton et sur l'acier (voir figure). Aussi avons nous rencontré beaucoup de difficultés pour lire, avec précision, la force et l'allongement. Nous avons donc fait beaucoup d'essais préliminaires aussi bien sur des éprouvettes en P.M.M.A que sur des éprouvettes en acier pour étalonner l'appareil.

--- Les éprouvettes de P.M.M.A ont été fabriquées par usinage. Les problèmes majeurs que nous avons rencontré sont les suivants :

- * Les dimensions n'ont pas été respectées.
- * Le sens dans lequel les éprouvettes ont été découpées n'est pas toujours le même.
- * Les feuilles dans lesquelles les éprouvettes ont été découpées n'ont pas toujours été les mêmes. On suppose même que les éprouvettes ont été découpées dans des chûtes d'où la différence d'épaisseur et peut être même de matière.

--- Nous avons ainsi conçu un four pour travailler à différentes températures. Pour stabiliser la température, nous avons utilisé un variac car nous n'avons pas pu avoir un régulateur de température.

--- L'appareil de flexion(voir figure) a été fabriqué au Département Mécanique.

VII. - DUREE DE SERVICE OU DUREE DE VIE :

VII.1. - INTRODUCTION :

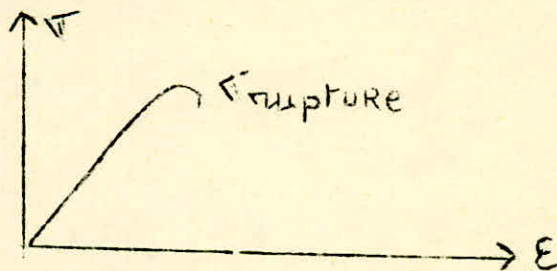
Pour décrire ensemble des résultats, nous avons plusieurs façons de faire. En effet nous pouvons tracer toutes les courbes $\sigma_{rupture} = f(\text{déformation})$ à différentes températures et à différentes vitesses. Nous pouvons aussi tracer les courbes $\text{déformation} = f(\text{vitesse})$ à différentes températures etc...

Après cela nous devons superposer toutes ces courbes pour pouvoir interpréter les résultats de nos essais.

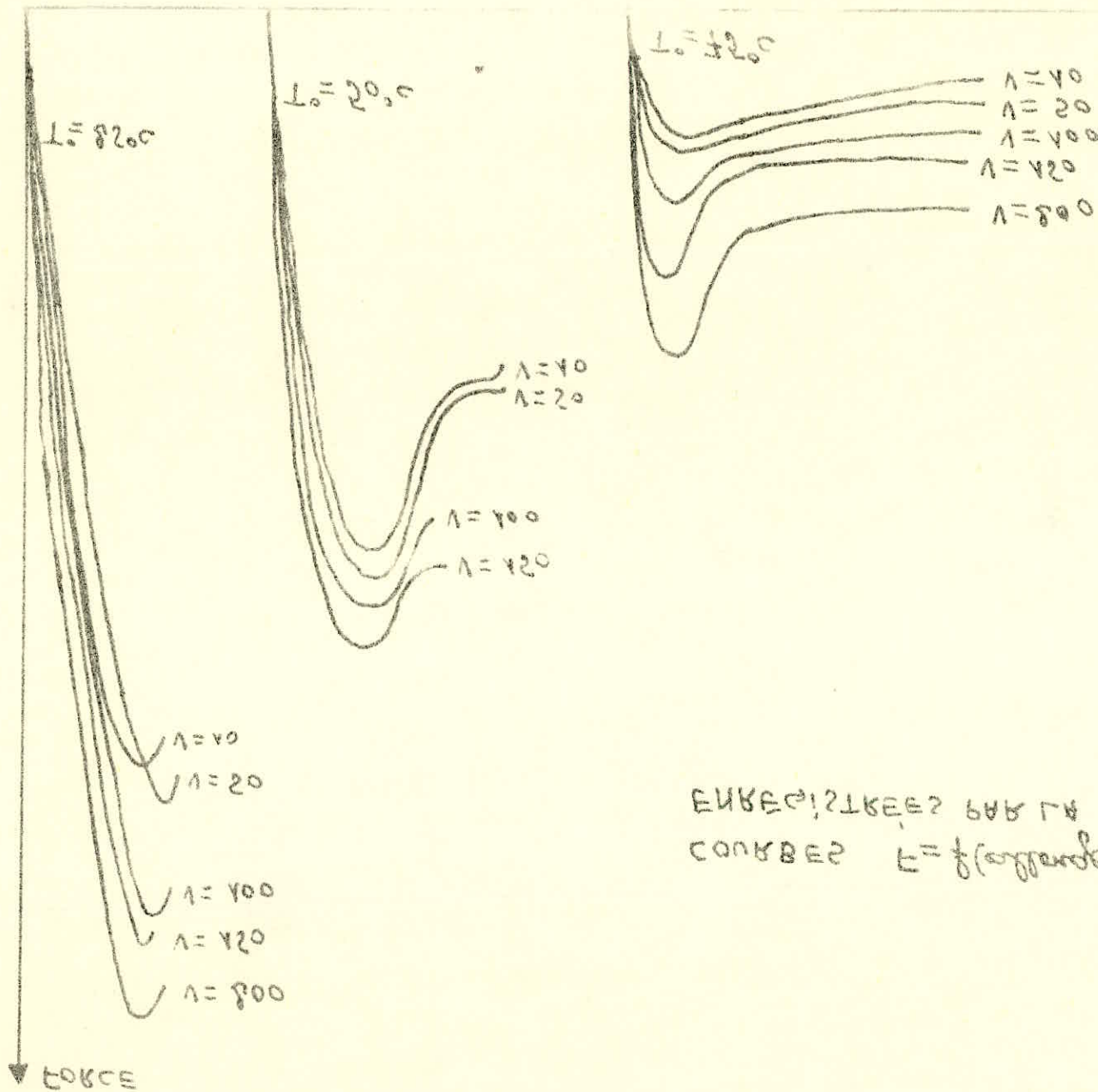
Plutôt que d'utiliser cette méthode, nous avons considéré la durée de service pour décrire nos résultats.

VII.2. - NOTIONS SUR LA DUREE DE SERVICE :

La durée de service est basée sur le critère de BAILY de la rupture. En effet l'expérience montre que, si nous mesurons le déplacement d'un corps produit par une force croissant graduellement, ce déplacement commence par varier pratiquement proportionnellement à la force, puis qu'il croît plus rapidement jusqu'à rupture : figure ci-dessous



Cette rupture est atteinte en un temps t qui peut être très grand : c'est le fluage. BAILY propose de remplacer cette contrainte croissante dans le temps par une contrainte constante dans le temps. Cette contrainte constante dans le temps provoquera la rupture en un temps plus court. On peut représenter la contrainte croissante par une somme de petites contraintes σ_i ; et à chaque σ_i correspond un temps Δt_i et $\sum \Delta t_i = t$, c'est-à-dire que la somme des Δt_i nous donne le temps de rupture.



ENKED! 2TKEE? BAB ΓW WACHINE.
 CONKBEE? $E = f(\text{συγγενικοτητα})$

De plus à chaque σ_i correspond une durée de service $\tau(\sigma_i)$ et la somme des $\tau(\sigma_i)$ nous donne la durée de service $\tau(\bar{\sigma})$ et $\sum \frac{\Delta E_i}{\tau(\sigma_i)} = 1$ c'est-à-dire $\int_0^{\tau} \frac{dE}{\tau(\sigma(t))} = 1$ c'est le critère de BAILY.

On a $\tau = Ae^{-\alpha \sigma}$

VII.3. - METHODE DE CALCUL :

Nous avons d'abord le critère de BAILY.

$$\int_0^{\tau} \frac{dE}{\tau(\sigma(t))} = 1 \quad \text{avec } \tau = \text{durée de service} \\ = A e^{-\alpha \sigma}$$

$$\sigma = \omega t_r$$

σ = contrainte de rupture.

ω = vitesse de charge programmée par la machine.

t_r = temps de rupture.

nous obtenons donc :

$$\int_0^{\tau} \frac{dE}{\tau(\sigma(t))} = \int_0^{\tau} \frac{dE}{A e^{-\alpha \sigma(t)}} = \int_0^{\tau} \frac{dE}{A e^{-\alpha \omega t}} = 1$$

changement de bornes :

$$\tau = A e^{-\alpha \omega t_r} \Rightarrow \ln \frac{\tau}{A} = -\alpha \omega t_r$$

$$t_r = \frac{1}{\alpha \omega} \ln \frac{A}{\tau}$$

-36-

$$\int_0^{\infty} \frac{1}{\alpha w} \ln \frac{A}{\tau} \frac{dt}{A e^{-\alpha w t}} = \frac{1}{\alpha w} \cdot \frac{1}{A} \left[e^{\alpha w t} \right]_0^{\infty} \ln \frac{A}{\tau}$$

$$= \frac{1}{\alpha w} \cdot \frac{1}{A} \left[e^{\alpha w \frac{1}{\alpha w} \ln \frac{A}{\tau}} - 1 \right] = \frac{1}{\alpha w} \cdot \frac{1}{A} \left[\frac{A}{\tau} - 1 \right]$$

$$\Rightarrow \frac{1}{\alpha w} \cdot \frac{1}{A} \left[\frac{A}{\tau} - 1 \right] = 1$$

$$\Rightarrow \boxed{\frac{1}{\tau} - \frac{1}{A} = \alpha w}$$

et comme $\tau \ll A$ nous avons :

$$\boxed{\frac{1}{\tau} = \alpha w}$$

on se propose de calculer maintenant la contrainte constante σ qui remplace la contrainte croissante. nous avons :

$$\frac{1}{\tau} = \alpha w \Rightarrow -\ln \tau = \ln \alpha w$$

$$\sigma: \tau = A e^{-\alpha \sigma} \Rightarrow \ln \tau = \ln A - \alpha \sigma$$

$$\Rightarrow \alpha \sigma = \ln A - \ln \tau = \ln A + \ln \alpha w$$

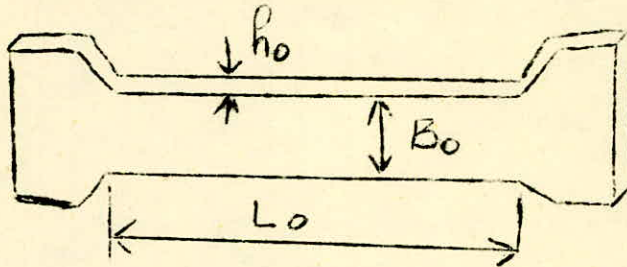
$$= \ln \alpha A + \ln w$$

$$\Rightarrow \boxed{\sigma = \frac{\ln \alpha A}{\alpha} + \frac{1}{\alpha} \ln w}$$

On remplace ainsi tous les phénomènes provoqués par une série de contraintes σ_i par les phénomènes provoqués par une contrainte constante σ .

Il est à noter que les phénomènes restent les mêmes.

VII.4. - CALCUL DU TAUX DE DEFORMATION :



Nous considérons que la masse reste constante avant et après l'essai de traction.

soit V_0 = volume avant la traction de la partie calibrée.

$$\Rightarrow V_0 = B_0 \cdot L_0 \cdot h_0.$$

soit V_x = Volume après la traction de la partie calibrée.

$$\Rightarrow V_x = B_x \cdot L_x \cdot h_x.$$

la masse étant constante $\Rightarrow V_x = V_0$.

or : L_x est mesurée.

$$V_0 = V_x = \text{connu} = L_0 \cdot B_0 \cdot h_0.$$

si nous considérons que la variation de l'épaisseur est très petite devant L_0 , nous pouvons alors considérer, avec une bonne approximation que :

$$h_0 = h_x.$$

ce que nous donne :

$$B_x = \frac{V_x}{L_x \cdot h_x} = \frac{V_0}{L_x \cdot h_0} = \frac{L_0 \cdot B_0 \cdot h_0}{L_x \cdot h_0}$$

d'où :

$$B_x = \frac{L_o \cdot B_o}{L_x}$$

c'est-à-dire :

$$B_x = \frac{L_o}{L_x} \cdot B_o = K_x \cdot B_o.$$

$$\frac{L_o}{L_x} = \text{taux de déformation} \neq \text{constante.}$$

VII.5. - CALCUL DE LA CONTRAINTE APPARENTE RAPPORTÉE A LA SECTION INITIALE :

soit S_o la section initiale.

soit F la force nécessaire pour rompre l'éprouvette.

La contrainte apparente rapportée à la section initiale est la suivante :

$$\sigma_{app} = \frac{F}{S_o}$$

VII.6. - CALCUL DE LA CONTRAINTE REELLE :

Soit S_x la surface de rupture.

$$S_x = h_x \cdot B_x = h_o \cdot B_x = h_o \frac{L_o}{L_x} B_o$$

$$= h_o \cdot K_x \cdot B_o.$$

ce qui nous donne :

$$S_x = K_x \cdot h_o \cdot B_o.$$

$$\text{or : } h_o \cdot B_o = S_o.$$

d'où nous aurons :

$$\sigma_{réelle} = \frac{F}{S_x} = \frac{F}{K_x \cdot S_o} = \frac{1}{K_x} \cdot \frac{F}{S_o}.$$

c'est-à-dire :

$$\sigma_{réelle} = \frac{1}{K_x} \cdot \sigma_{app.}$$

.../...

VII.7. - DESCRIPTION DES RESULTATS EXPERIMENTAUX A L'AIDE DE LA THEORIE DE LA DUREE DE SERVICE :

Comme nous l'avons déjà cité, la théorie de la durée de service est basée sur :

- critère de BAILY : $\int_0^{\tau} \frac{d\tau}{\tau(\sigma(t))} = 1$

- $\tau = A e^{-\alpha \sigma}$

- $\tau = \tau_0 e^{\frac{U_0 - \delta \sigma}{RT}}$

VII.7.a) - DETERMINATION DES COEFFICIENTS A et . :

On considère $\tau = A e^{-\alpha \sigma}$

puis nous traçons $\log \tau = f(\sigma)$.

(voir graphe n° 1).

nous obtenons ainsi α et A.

VII.7.b) - VERIFICATION DU COEFFICIENTS :

Nous avons :

$$\tau = A e^{-\alpha \sigma} \quad \text{et} \quad \tau = \tau_0 e^{\frac{U_0 - \delta \sigma}{RT}}$$

de ces deux relations on tire.

$$\alpha = \frac{\delta}{RT} \Rightarrow \ln \alpha = \ln \frac{\delta}{R} - \ln T$$

d'où : $\ln \alpha = f(\ln T)$ (voir graphe n° 2).

Nous obtenons ainsi une droite.

Or nous connaissons la valeur de α à 20° C (elle a été donnée par Mr. TAGUER). Aussi nous plaçons cette valeur sur notre graphe et nous remarquons que cette valeur correspond bien à celle que nous trouvons en extrapolant notre droite à 20° C

Nous vérifions ainsi que les valeurs trouvées pour α à 25° C, α à 50° C et α à 75° C sont précises.

VII.7.c) - VERIFICATION DU COEFFICIENT A :

Nous avons.

$$\tau = A e^{-\alpha \sigma}$$

$$\tau = \tau_0 e^{\frac{U_0 - \gamma \sigma}{RT}}$$

Ces 2 relations nous donnent :

$$\ln A = \ln \tau_0 + \frac{U_0}{R} \frac{1}{T}$$

d'où

$$\ln A = f\left(\frac{1}{T}\right)$$

nous avons τ_0 = temps de relaxation des atomes

c'est une constante connue.

Nous traçons $\ln A = f\left(\frac{1}{T}\right)$ et nous obtenons une droite (les valeurs de A ont été trouvées d'après le graphe n° 1).

Nous prenons la valeur de A donnée par TAGUER à 20° C. Nous remarquons qu'elle ne correspond pas à la valeur que nous trouvons en extrapolant à 20° C.

Or d'après l'équation $\ln A = \ln \tau_0 + \frac{U_0}{R} \frac{1}{T}$, nous savons que la courbe expérimentale et la courbe théorique doivent se couper au point $\tau_0 = 10^{-12}$, ainsi nous pouvons trouver A pour chaque température. D'après la courbe théorique et ces valeurs de A sont corrigées.

VII.7.d) - INTERPRETATION DES COURBES :

Nous avons α , nous avons A corrigé, nous pouvons calculer la durée de service $\tau = A e^{-\alpha \sigma}$, σ = contrainte constante quelconque.

C'est-à-dire : à chaque contrainte constante, nous pouvons calculer la durée de service .

Or cette contrainte constante peut être calculée par :

$$\sigma_i = \frac{\ln \alpha A}{\alpha} + \frac{1}{\alpha} \ln w$$

Comme notre machine ne programme pas w (w = vitesse de charge), nous prenons une contrainte constante égale à σ rupture puisque τ peut être calculée pour n'importe quelle contrainte constante.

Nous traçons $\text{Log } \tau = f(\sigma_2)$.

— Nous considérons trois (3) contraintes constantes σ_i^*

$$(\sigma_1^* = 2,5, \sigma_2^* = 4, \sigma_3^* = 6)$$

— Chacune de ces contraintes coupe les courbes $\text{Log } \tau = f(\sigma_2)$ en 3 points $\log \tau_1, \log \tau_2, \log \tau_3$, pour chaque température.

— Nous traçons $\log \tau_i = f\left(\frac{1}{T^{\circ}\text{K}}\right)$ car $\tau = \tau_0 e^{\frac{U_0 - \sigma \sigma}{RT}}$
 $= \tau_0 e^{\Delta U / RT}$

Les pentes de ces droites nous donnent $\Delta U / R$

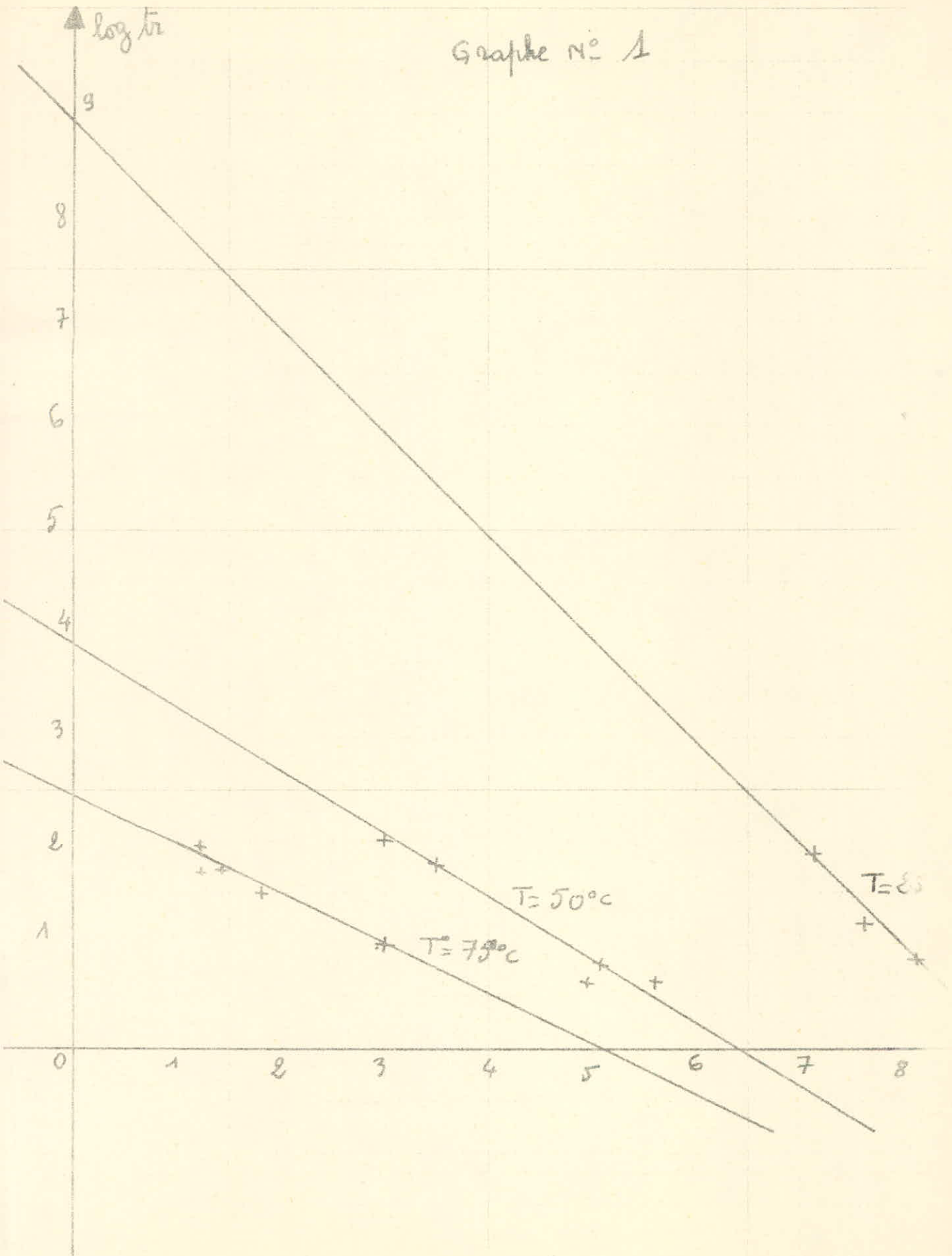
— Nous traçons maintenant $\frac{\Delta U}{R} = f(\sigma_i^*)$, nous extrapolons

à $\sigma_i^* = 0$ et nous trouvons U_0 = énergie d'activation de rupture.

Nous trouvons $U_0 = 48 \text{ KCal/mole}$.

D'après cette valeur nous pouvons dire que ce sont les liaisons chimiques qui ont été responsables de la cassure.

Graphique N° 1



$\ln \alpha$

Graphique no 2.

1

valeur d'après TAGUER.
à 20°C est à dire
 $\alpha = 3,147$

0,1

0

1

2

3

4

5

$\ln T^{\circ}C$

+

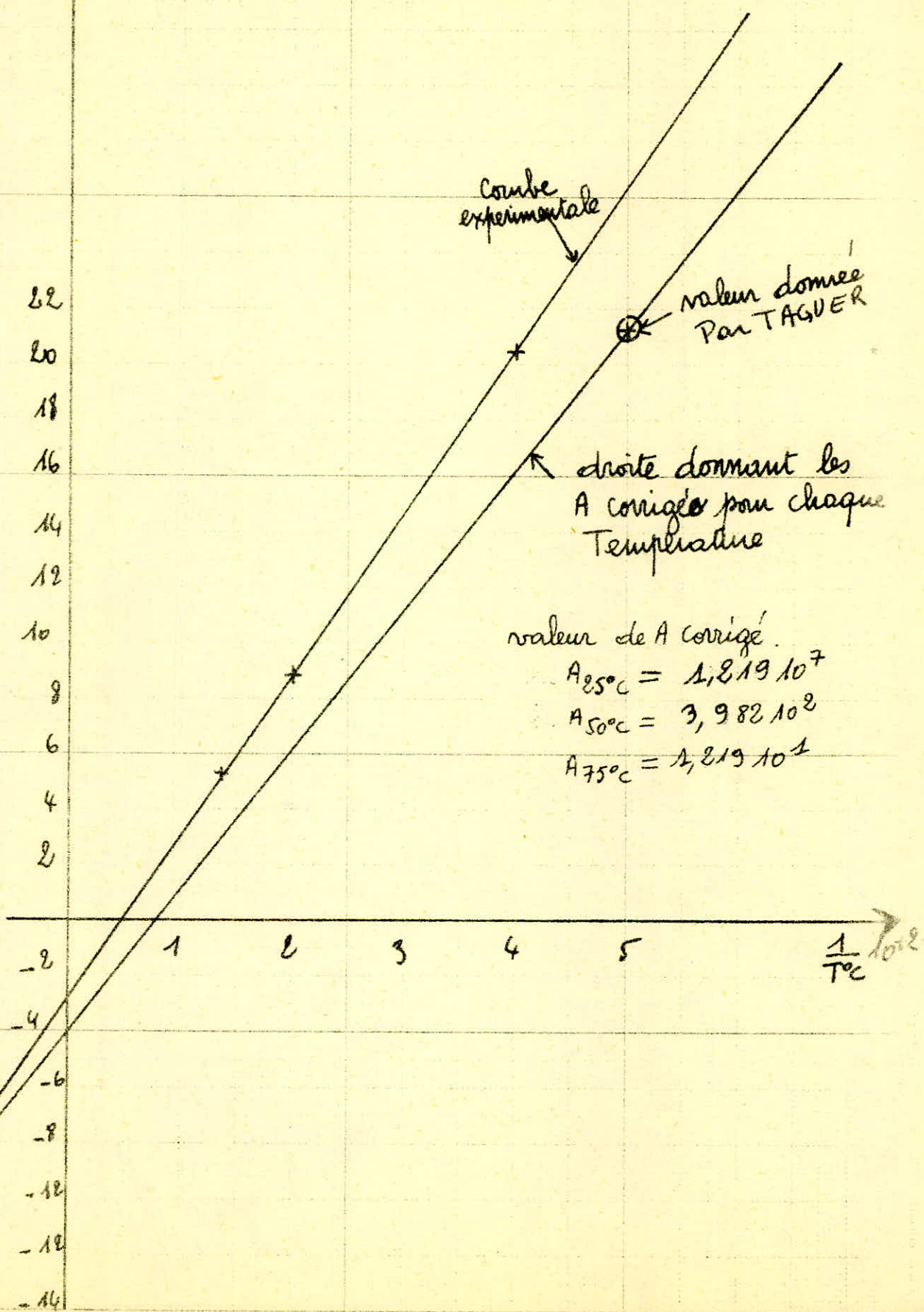
+

+

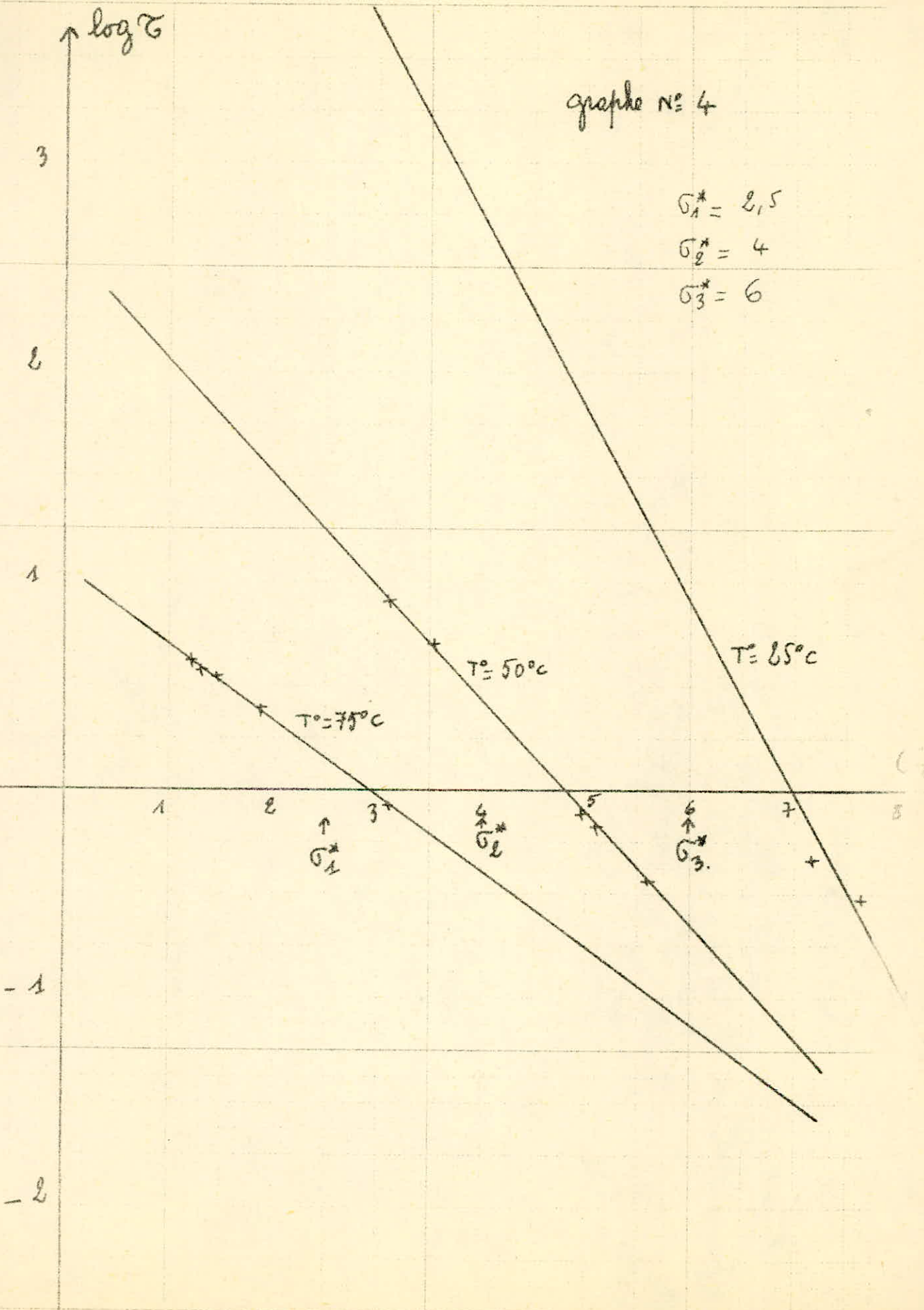
+

graphe N°3

$\ln A$



valeur de A corrigé.
 $A_{25^\circ\text{C}} = 1,819 \cdot 10^7$
 $A_{50^\circ\text{C}} = 3,982 \cdot 10^8$
 $A_{75^\circ\text{C}} = 1,819 \cdot 10^9$



log τ

graph n° 5

1

2

2,7

3,09

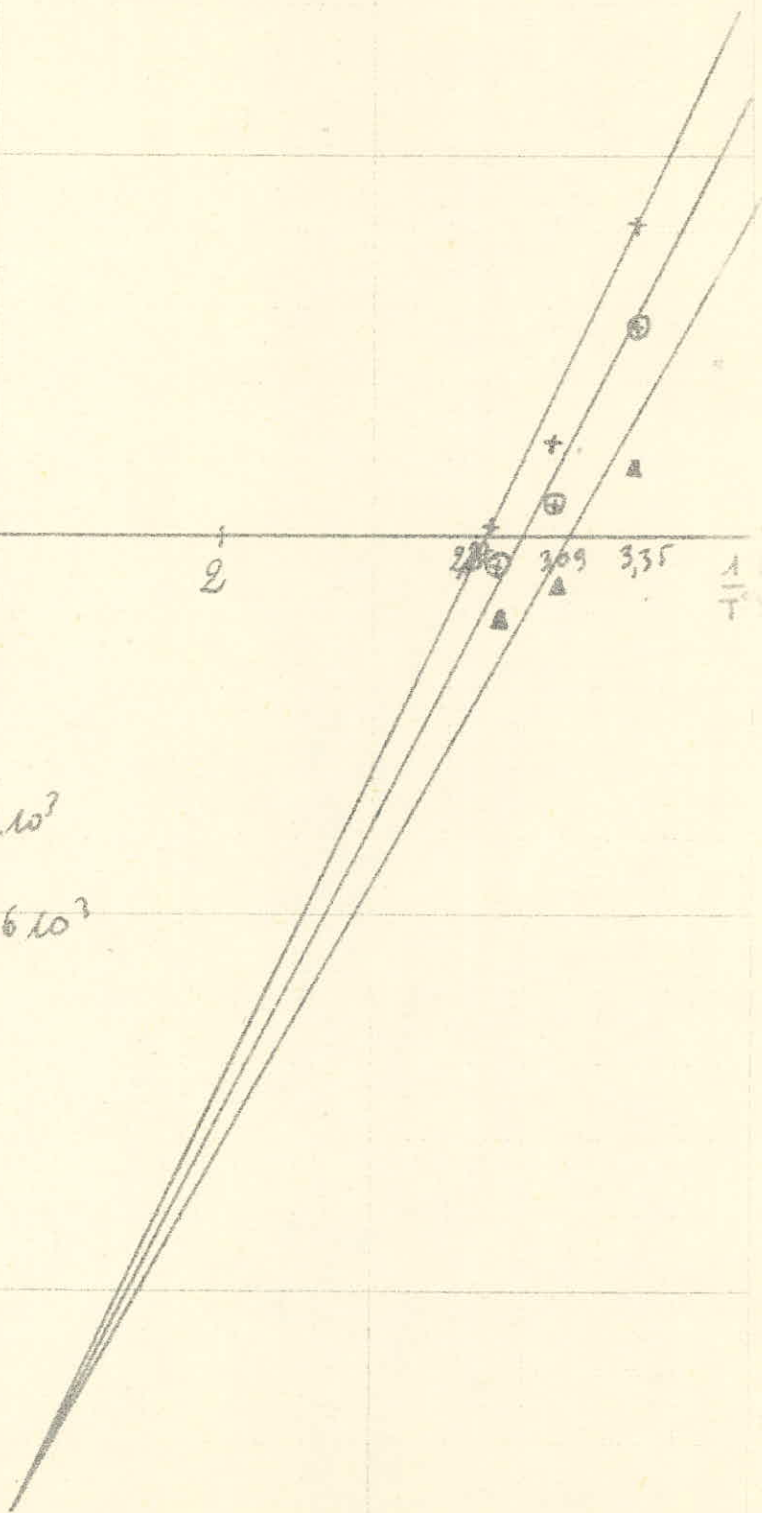
3,35

$\frac{1}{T}$

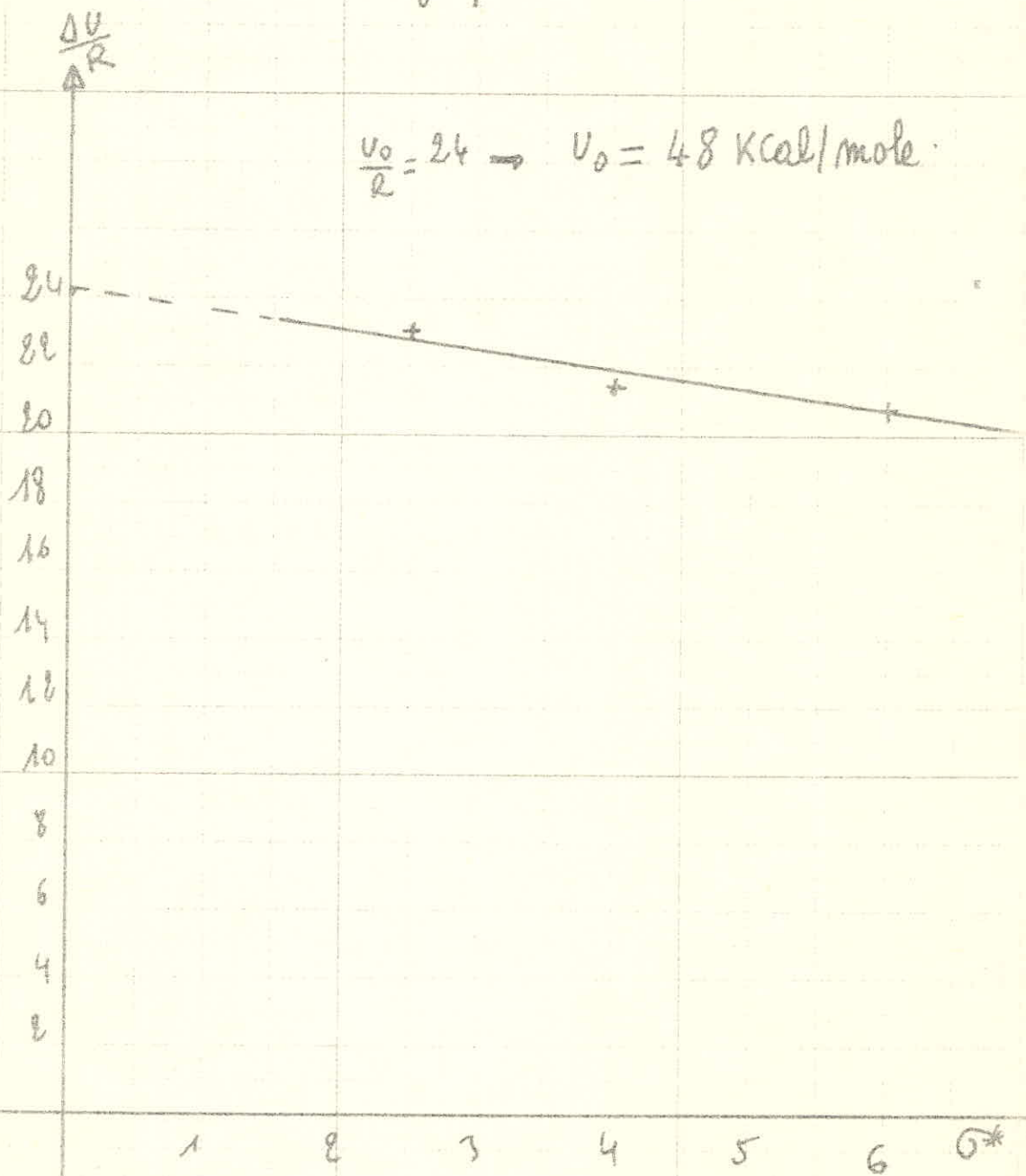
$$\frac{\Delta U_1}{R} = 23 \cdot 10^3$$

$$\frac{\Delta U_2}{R} = 21,41 \cdot 10^3$$

$$\frac{\Delta U_3}{R} = 20,746 \cdot 10^3$$



graphe N° 6



VII.7.e) - COMPARAISON DES RESULTATS OBTENUS POUR L'ENERGIE D'ACTIVATION :

Données bibliographiques :

	U ₀ CALCULEE D'APRES LES ESSAIS MECANIQUES.	U ₀ THEORIQUE
TEFLON	76 KCal/mole	75 KCal/mole
POLYPROPYLENE	58 KCal/mole	56 KCal/mole
P.V.C.	32 KCal/mole	35 KCal/mole
POLYCAPROAMIDE	44 KCal/mole	45 KCal/mole

CONCLUSION GENERALE.

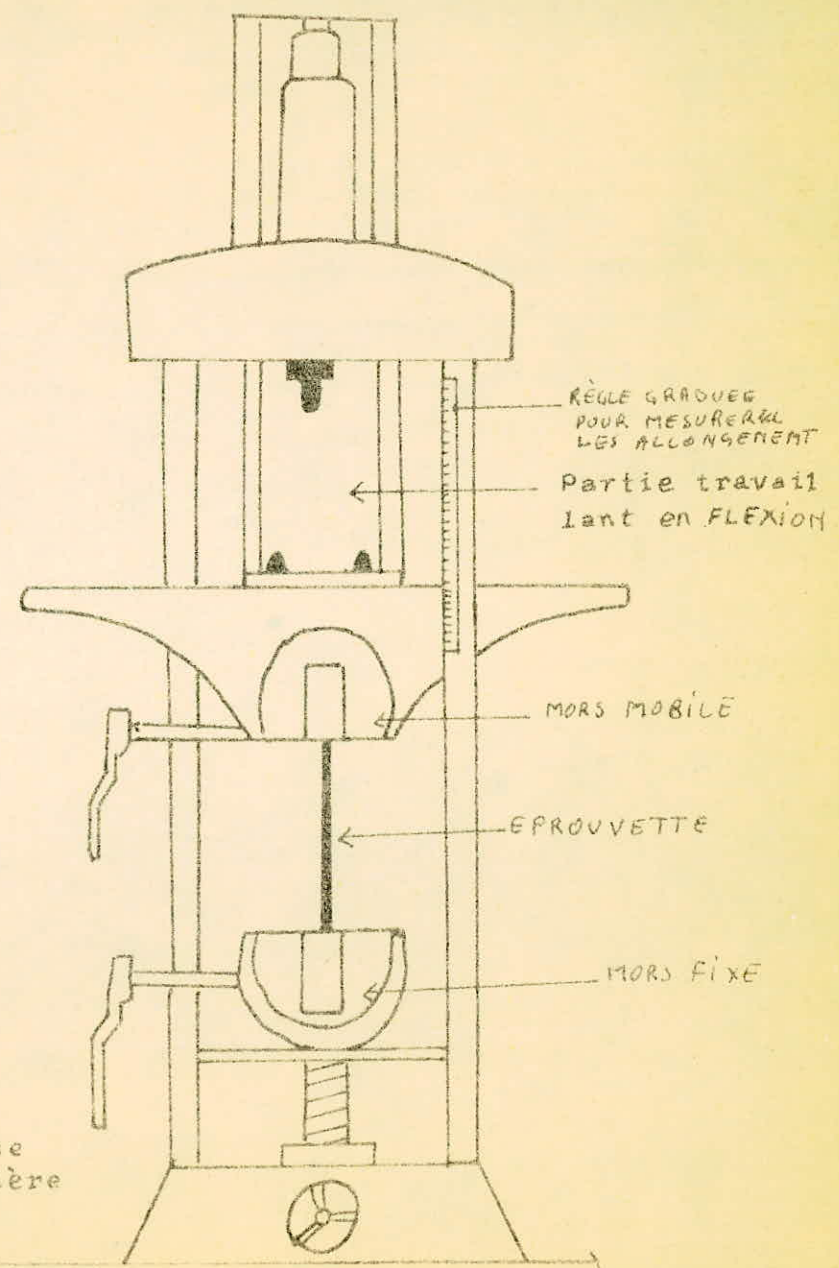
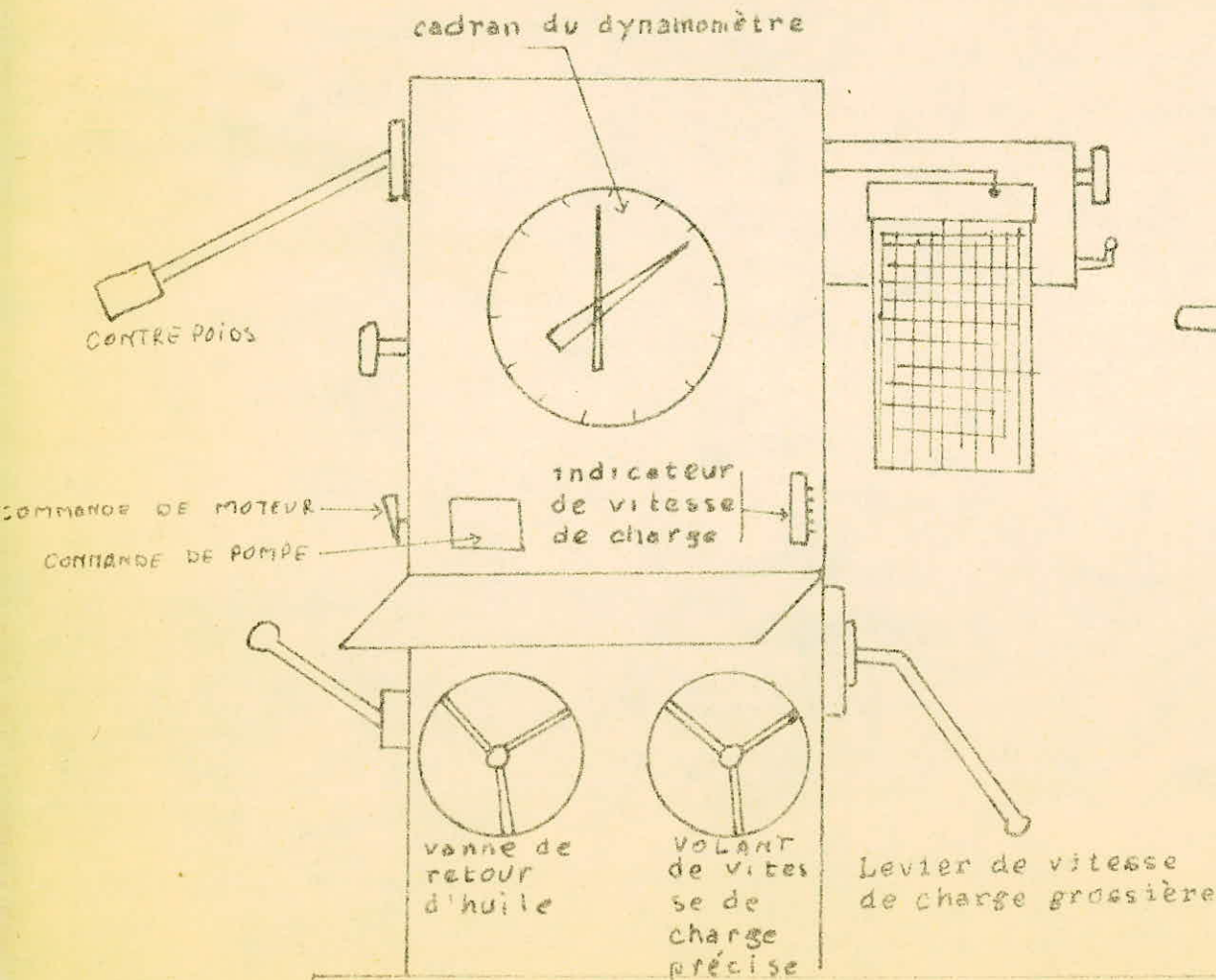
NONS POUVONS DIRE QUE NOUS AVONS ATTEINT NOTRE BUT CAR NOUS POUVONS DEFINIR PAR CETTE METHODE LES CONDITIONS DE TRANSFORMATION DU PMMA ET PREVOIR LA DUREE DE SERVICE(DUREE DE VIE) de LA PIECE OBTENUE.

CETTE METHODE A AUSSI L'AVANTAGE DE DEFINIR RAPIDEMENT ET SANS UTILISATION D'UN APPAREILLAGE SOPHISTIQUE ET COUTEUX LES CONDITIONS DE TRANSFORMATION ET LA DUREE DE SERVICE DE N'IMPORTE QUEL POLYMERE.

PARTIE PRATIQUE

Presse hydraulique.

"TESTWELL"



SOCLE

VALEURS MOYENNES DES RESULTATS EXPERIMENTAUX

A TEMPERATURE 25° C

VITESSE	REELLE	log	log
10	7,1457	-0,350	1,7686
50	7,634	-0,548	1,1665
100	8,0767	-0,9907	0,85
150	8,62	-1,534	0,698
200	8,485	-1,379	0,445

VALEURS MOYENNES DES RESULTATS EXPERIMENTAUX

TEMPERATURE 50° C.

V	REELLE	log	log
10	3,11	+0,9	2, 018
50	3,51	+0,68	1,784
100	5,1	-0,19	0,845
150	5,6	-0,46	0,6874
200	4,99	-0,13	0,624

VALEURS MOYENNES DES RESULTATS EXPERIMENTAUX

A TEMPERATURE 75°C

VITESSE	reelle	log	log
10	1,233	+0,62	1,99
50	1,464	+0,53	1,71
100	1,262	+0,612	1,67
150	1,865	+0,377	1,505
200	3,08	-0,084	0,903

B	h	CHARGE	VITESSE	F	V SEC	$\bar{v} = \frac{\sum FD}{\sum Ft}$
14,8	9,6	200	10	98,5	40	10 Kgf/mm ²
14,82	9,2	"	50	70	13	"
14,84	9,5	"	100	99	5	"
14,5	9,4	"	150	102,5	6	"
14,7	9,5	"	200	104	1	"
14,7	9,6	500	10	134	48	11
14,4	9,4	"	50	132	12	11,7
14,6	9,5	"	100	137	7	12
14,52	9,2	"	150	123	4	11
14,6	9,5	"	200	140	3	12
14,8	9,6	1000	10	133	55	11
14,4	9,6	"	50	132	10	11,24
14,74	9,54	"	100	122	6	10
14,76	9,6	"	150	132	5	10,98
14,5	10	"	200	150	4	12,21

résultats expérimentaux à $T^{\circ} = 25^{\circ}C$.

N°	Vitesse	B	R	F <small>une en part</small>	ΔL	L <small>en mm</small>	temp	Gapp	ϵ	K _{ex}	Gnielle	L ₀	log tr
1	10	13,5	4	376,2	9	159	68	7,07	0,06	0,943	7,49	150	4,832
2	10	14,32	4,28	400	11	161	52	6,526	0,073	0,931	7,004	150	4,716
3	10	13,5	4,70	420	11	161	60	6,619	0,073	0,931	7,105	150	4,778
4	10	14	4,38	399	11	161	56	6,507	0,073	0,931	6,984	150	4,748
5	50	14	3,78	372	9	159	17	7,020	0,06	0,943	7,44	150	4,83
6	50	14,12	3,66	388	8	158	14	7,507	0,053	0,949	7,908	150	4,146
7	50	13,7	3,54	376	8	158	13	7,750	0,053	0,949	8,166	150	4,114
8	50	13,5	4,00	375	8	158	15	6,666	0,053	0,946	7,022	150	4,146
9	100	14,64	4,00	450	9	159	7.5/10	7,680	0,06	0,943	8,145	150	0,875
10	100	14	3,90	420	8	158	7	7,690	0,053	0,949	8,102	150	0,845
11	100	14,20	4,70	430	8,5	158,5	7	7,570	0,056	0,946	7,999	150	0,845
12	100	14	4,26	450	8	158	7	7,653	0,053	0,949	8,061	150	0,845
13	150	14,72	3,52	435	7	157	5	8,395	0,0466	0,955	8,787	150	0,698
14	150	14,12	3,94	450	7	157	5	8,130	0,0466	0,955	8,509	150	0,698
15	150	13,5	4,12	456	7,5	157,5	5	8,198	0,05	0,952	8,6078	150	0,698
16	150	14	3,97	455	7	157	5	8,186	0,0466	0,955	8,568	150	0,698
17	200	14,74	4,20	497,5	7,5	157,5	3	8,036	0,05	0,952	8,43	150	0,477
18	200	14	3,80	437,5	7	157	3	8,226	0,0466	0,955	8,607	150	0,477
19	200	14,50	4	465	8	158	3	8,017	0,053	0,949	8,044	150	0,477
20	200	14,77	4	465	8	158	3	8,017	0,053	0,949	8,044	150	0,477

résultats expérimentaux à $T^{\circ} = 50^{\circ}C$

N°	V	B	h	F	DL	L ₀	L _∞	t ₁	δ _{app}	ε	K _∞	G _{max}	log. t ₁
1	10	14,24	4,20	170	13	112	125	102	2,842	0,116	0,896	3,172	2
2	10	13,9	3,72	140	16	112	128	104	2,707	0,1428	0,875	3,094	2,01
3	10	14,24	3,92	150	17	112	129	102	2,687	0,1517	0,868	3,095	2
4	10	14,25	3,8	145	17	112	129	104	2,677	0,1517	0,868	3,084	2,01
5	50	14,6	3,94	168	17,5	112	129,5	58	2,920	0,1562	0,864	3,3768	1,763
6	50	14,68	4,20	189,5	16,5	112	128,5	58	3,073	0,1473	0,8716	3,526	1,763
7	50	14,18	3,48	152,5	18	112	130	62	3,09	0,1607	0,8715	3,587	1,792
8	50	14,8	4,17	190	17	112	129	60	3,078	0,1517	0,868	3,546	1,819
9	100	14,06	4,08	280	8	112	120	65	4,811	0,0714	0,931	5,154	0,845
10	100	13,98	3,54	240	8	112	120	65	4,869	0,0714	0,933	5,196	0,845
11	100	14,34	4,28	286	8,5	112	120,5	65	4,659	0,0758	0,929	5,0135	0,845
12	100	14,00	4,5	290	8	112	120	65	4,603	0,0714	0,933	4,932	0,845
13	150	13,94	3,74	267	10	112	122	5	5,12	0,0893	0,918	5,5785	0,6989
14	150	14,58	4,32	320	10	112	122	4. ^{5/10}	5,08	0,0893	0,918	5,534	0,6532
15	150	13,94	3,78	279	8	112	120	5	5,29	0,0714	0,9333	5,673	0,6989
16	150	14,6	4,30	322	9	112	121	5	5,129	0,0803	0,9256	5,541	0,6989
17	200	14,46	3,64	240	8	112	120	4	4,55	0,0714	0,9333	4,885	0,6
18	200	13,8	3,68	250	8	112	120	4	4,923	0,0714	0,933	5,274	0,6
19	200	14,32	3,66	222	10	112	122	5	4,235	0,0893	0,918	4,6113	0,6989
20	200	14	3,46	232	8	112	120	4	4,203	0,0714	0,9333	5,100	0,6

résultats expérimentaux à $T^{\circ} = 100^{\circ}C$

N ^o	V	B	R	F	DL	L ₀	L _m	α	σ _{app}	E	K _{inc}	Grainelle	long _{tr}
1	10	14,44	3,94	9	120	110	230	90	0,158			0,331	4,954
2	10	14,18	3,86	10	123	85	208	95	0,183			0,447	4,977
3	10	14,28	4,20	8	139	90	229	98	0,1334			0,339	4,99
4	10	13,94	3,96	9	117	90	207	95	0,164			0,3779	4,97
5	50	14,6	4,12	15,3	170	100	270	68	0,254			0,69	4,832
6	50	14,12	4,20	21	130	80	210	60	0,354			0,93	4,778
7	50	13,82	3,64	12	145	80	225	62	0,235			0,66	4,792
8	50	13,66	3,94	17	150	80	230	64	0,316			0,91	4,806
9	100	14,10	3,66	20	170	85	225	64	0,387			1,163	4,806
10	100	14,56	4,08	22	145	75	220	61	0,370			1,088	4,785
11	100	13,94	3,58	18	175	80	255	65	0,361			1,128	4,812
12	100	14	3,69	20	165	90	255	62	0,387			1,096	4,792
13	150	14,42	4,20	18	185	85	270	58	0,297			0,909	4,763
14	150	14	4	17	180	90	270	59	0,303			0,9858	4,77
15	150	13,9	4,2	17,5	185	80	265	52	0,299			0,918	4,716
16	150	14,2	4,3	16	185	85	270	54	0,289			1,161	4,73
17	200	14,24	3,88	17	180	65	245	42,5	0,301			1,093	4,628
18	200	14	4	17,5	175	70	245	42	0,312			1,168	4,623
19	200	13,9	4,20	18	192	65	247	40	0,308			1,167	4,611

BIBLIOGRAPHIE
○○○○

- 1- GUL.V.E structure et resistance mecanique
des polymeres:Ed chimie.
moscou,URSS (1971)
- 2- TAGUER.A.A physico-chimie des polymeres
Ed;chimie,moscou,URSS(1968)
- 3- BAILY.L. J.mod.Plast.
- 4-BAILY.L. J.Glass.Ind.
- 5-JOURKOV.S.N. Problemes de la resistance mecanique
des corps solides.Academie des sciences.UR
- 6-JOURKOV.S.N. Rapports des l'academie des sciences de UR
- 7-GOUSSOT.J. Les matieres plastiques fabrication et
technologie Ed; DUNOD
- 8- CHAUSSIN.C. Plastiques Ed. DUNOD
- 9-MASSONNET.C. Resistance des materiaux. Ed. DUNOD.

