



1977

2 E 1

PROMOTION



JANVIER
1977

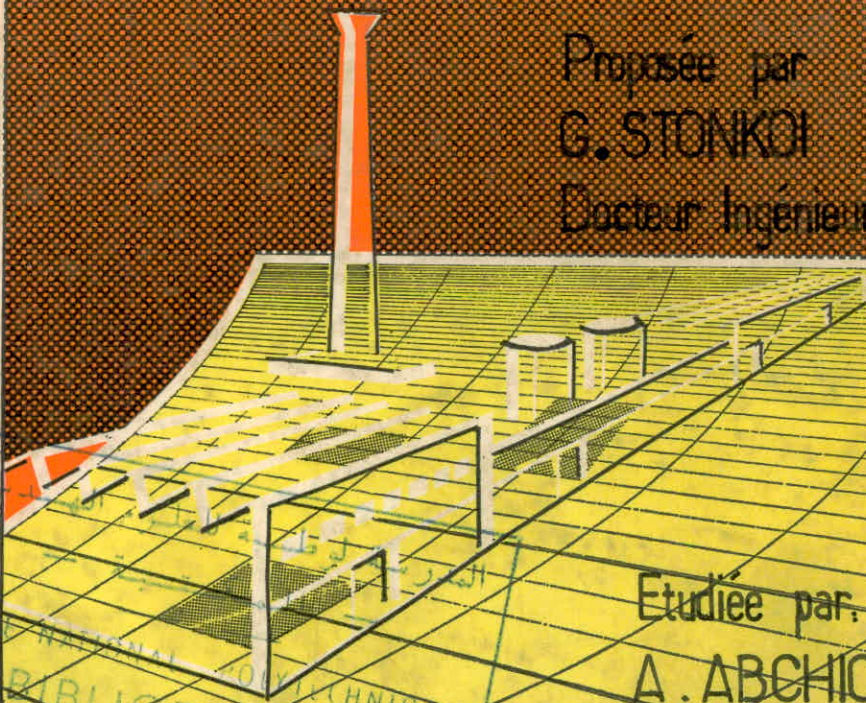
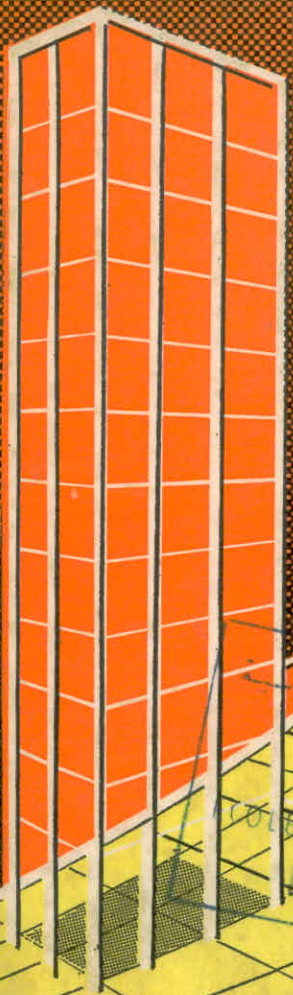
SUJET

Etude expérimentale des propriétés
mécaniques du polyméthacrylate de
méthyle - PMMA -
Applications à sa transformation

THÈSE DE FIN D'ÉTUDES

Proposée par
G. STONKOI
Docteur Ingénieur

Étudiée par
A. ABCHICHE



BIBLIOTHÈQUE

Pierce

انسي رن

SUJET

Etude expérimentale des propriétés
mécaniques du polyméthacrylate de
méthyle - PMMA -
Applications à sa transformation

JANVIER
1977

THESE DE FIN D'ETUDE

présentée devant la commission d'examen :

membres du jury

Mr	ABBADIE	président et maitre de conférence	USTA
{	Mr	HARROUBIA	docteur ingénieur
	Mr	HAMITOU	maitre de conférence à l'ENPA
	Mr	STONKOI	docteur ingénieur

Proposée par STONKOI

Etudiée par ABCHICHE

.....
REMERCIEMENTS.
.....

Mes plus vifs remerciements

-à MONSIEUR STONKOI pour son aide toute son aide et son devouement.

-et à tous ceux qui d'une façon ou d'une autre ont contribué à la réalisation de ce travail .

en particulier ALLER M^d ARIZKI ,ABCHICHE FARID et KACI.

-M^{rs} ABADIE ,HARROUBIA,HAMITOU m'ont fait l'honneur de faire partie de mon jury. Qu'ils trouvent ici l'expression de ma profonde gratitude.

-il serait enfin vain de citer tous ceux qui ont contribué à ma formation.

Aussi je remercie l'ensemble du corps enseignant et tous mes camarades étudiants.

.....

SOMMAIRE.
.....

-INTRODUCTION
.....

* ETUDE THEORIQUE.

*GENERALITES
.....

I/ PROPRIETES MECANIQUES DES POLYMERES.

1/ proprietes physiques

2/ definition du caractere mecanique des plastiques.

3/ caracteristiques mecaniques statiques.

II/ PROPRIETES MECANIQUES DU PMMA.

1/ generalites

2/ caracteristiques

3/ comportement mecanique

4/ transformation

~~XXXXXX~~

III/ THEORIE UTILISEE

* ETUDE EXPERIMENTALE

1/ essais effectues

2/ dispositif experimental

3/ resultats

4/ conclusions.

.....

-o- INTRODUCTION -o-

Le développement de la chimie macromoléculaire a donné lieu à de nouveaux matériaux qui se distinguent nettement des matériaux traditionnels.

Dans le but de caractériser et de déterminer les propriétés de ces matériaux dits "plastiques", des études et théories vont se multiplier durant ces dernières années.

Dans le cadre de notre étude on s'intéresse aux propriétés mécaniques des polymères solides.

Ce domaine d'étude étant lui-même assez vaste on se limitera principalement à décrire le comportement mécanique des matières plastiques en fonction des paramètres : - température, vitesse, tension et temps, ceci, en se basant sur l'étude expérimentale de l'essai de traction réalisé sur des éprouvettes de polyméthacrylate de méthyle pris comme exemple et en s'appuyant sur les résultats théoriques connus. Nous cherchons ensuite à exploiter ces résultats aux problèmes posés par la transformation des plastiques et principalement au thermoformage du P.M.M.A.

DONNEES'
.....

THEORIQUEES'
.....

- GENERALITES -

- Si au début du siècle l'industrie des matières plastiques n'était considérée que comme une industrie mineure ne pouvant avoir de véritables débouchés industriels importants, de nos jours elle connaît un essor de plus en plus considérable et son champ d'application ne cesse de s'étendre à tous les domaines.

En effet les matières plastiques sont maintenant mêlées à notre vie de façon si intime au point que certains vont même jusqu'à dire, qu'après avoir connu successivement l'âge de la pierre, puis l'âge du bronze et du fer, l'humanité vient d'entrer dans l'ère des plastiques.

Ces plastiques sont définis comme des matériaux dont la matière de base est en général un mélange de macromolécules ou de hauts polymères organiques ou semi-organiques à caractère résineux résultant le plus souvent d'une réaction naturelle ou artificielle de polymérisation ou de polycondensation.

Leur structure particulière formée de molécules géantes leur confèrent des propriétés totalement différentes de celles des matériaux traditionnels.

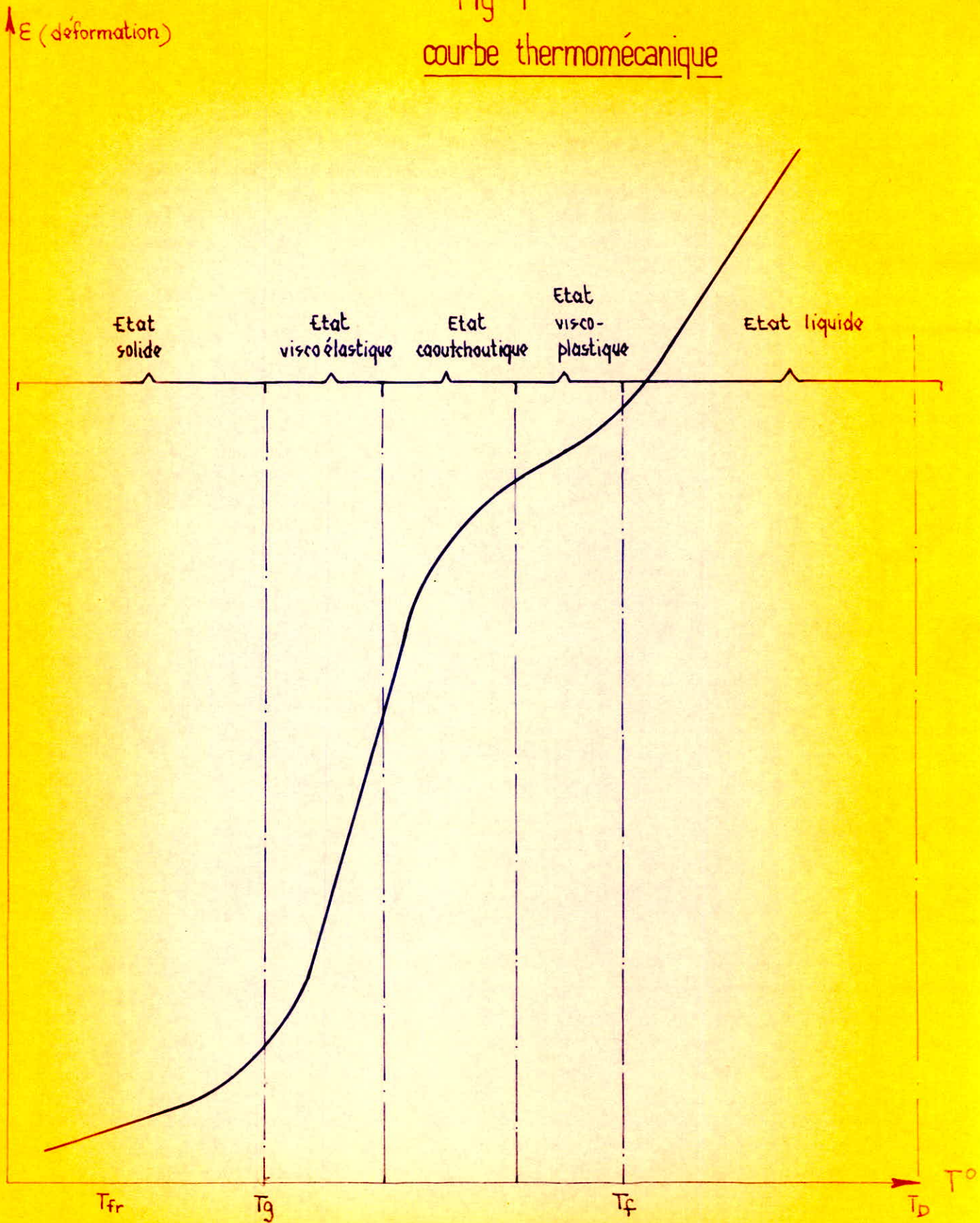
En effet l'étude des propriétés des produits polymériques on montre que celles-ci dépendent dans une grande mesure des facteurs suivants :

- Degré de polymérisation.
- Structure des chaînes macromoléculaires
- Nature des liaisons de la chaîne.
- Cristallinité.
- Condition de polymérisation.
- Nature et composition du polymère.
- Méthode de mise en oeuvre.

Aussi l'étude complète d'un matériau plastique devrait -elle suivre le schéma classique suivant :

- Synthèse
- Caractérisation.
- Etude des propriétés mécaniques.
- Mise en oeuvre.
- Détermination des caractéristiques de l'objet fini.

Fig 1
courbe thermomécanique



Parmi toutes les propriétés aux-quelles on s'intéresse dans le cadre de la caractérisation d'un matériau plastique (mécaniques, électriques, thermiques, acoustiques, etc...), celles qui sont les plus à considérer sont en général les propriétés thermo-mécaniques.

En effet dans le cas des plastiques celles-ci présentent un double intérêt important.

a) - Elles déterminent le comportement du produit fini dans le cadre de son utilisation pratique en fonction des divers facteurs extérieurs (tension, température, temps, vitesse).

b) - Elles permettent de déterminer les conditions de transformation de ce matériau.

.../...

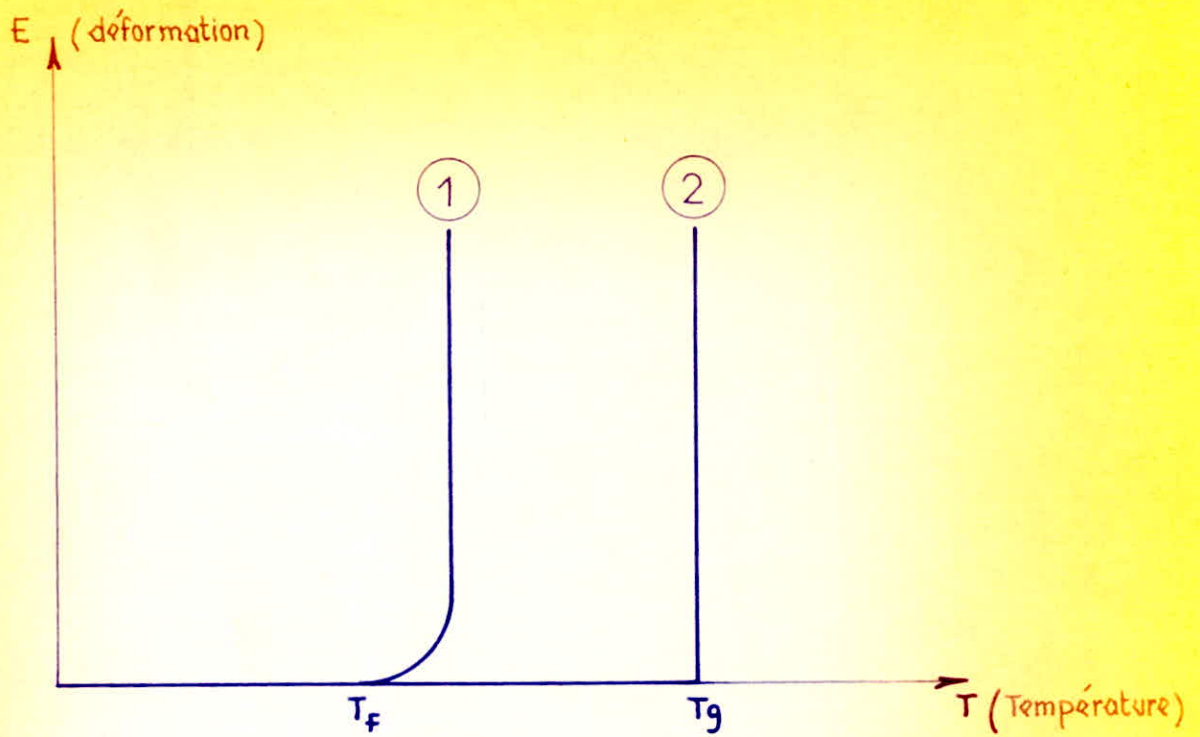


Fig.2 . Courbe allongement · température

- ① cas d'un polymère amorphe
- ② cas d'un polymère cristallin

I. 1 - PROPRIETES PHYSIQUES.

Comme pour les corps traditionnels les propriétés mécaniques des produits polymériques sont étroitement liées à leurs propriétés physiques et en particulier à leur état physique.

- a) Divers états des polymères : si les corps ordinaires ne peuvent présenter que 3 états physiques (Solide, liquide, gaz) les polymères peuvent par contre présenter d'autres états qui leur sont spécifiques.

La méthode la plus simple qui permet de mettre en évidence ces états est la méthode tempo-mécanique qui suit l'évolution de la déformation en fonction de la température sous charge constante.

Dans le cas des polymères linéaires nous obtenons le cas complexe où tous les états sont représentés : Nous obtenons alors la courbe représentée par la figure n° 1.

On y distingue :

- Les températures suivantes :

* Température de fragilité (T.Fr).

* Température de transition vitreuse (Tg). c'est la température à partir de laquelle le polymère n'est plus dur et cassant.

* Température de fusion (Tf).

* Température de thermodegradation (Td).

- Les zones des différents états :

* L'état solide : caractérisé par l'absence des mouvements des macromolécules.

* L'état visco-plastique : c'est l'état dans lequel les mouvements de vibration et de rotation permettent des déplacements limités sans cohésion avec d'autant plus de facilité que l'on élève la température.

* L'état caoutchouteux caractérisé par une déformation importante mais réversible. L'élévation de la température permet aux macromolécules des mouvements importants.

* L'état visco-élastique caractérisé par une partielle réversibilité de la déformation.

* L'état pseudo-liquide - analogue à l'état liquides des corps ordinaires mais si pour ces derniers l'écoulement se fait par déplacement de la molécule entière, pour les polymères on a un écoulement segmentaire.

.../...

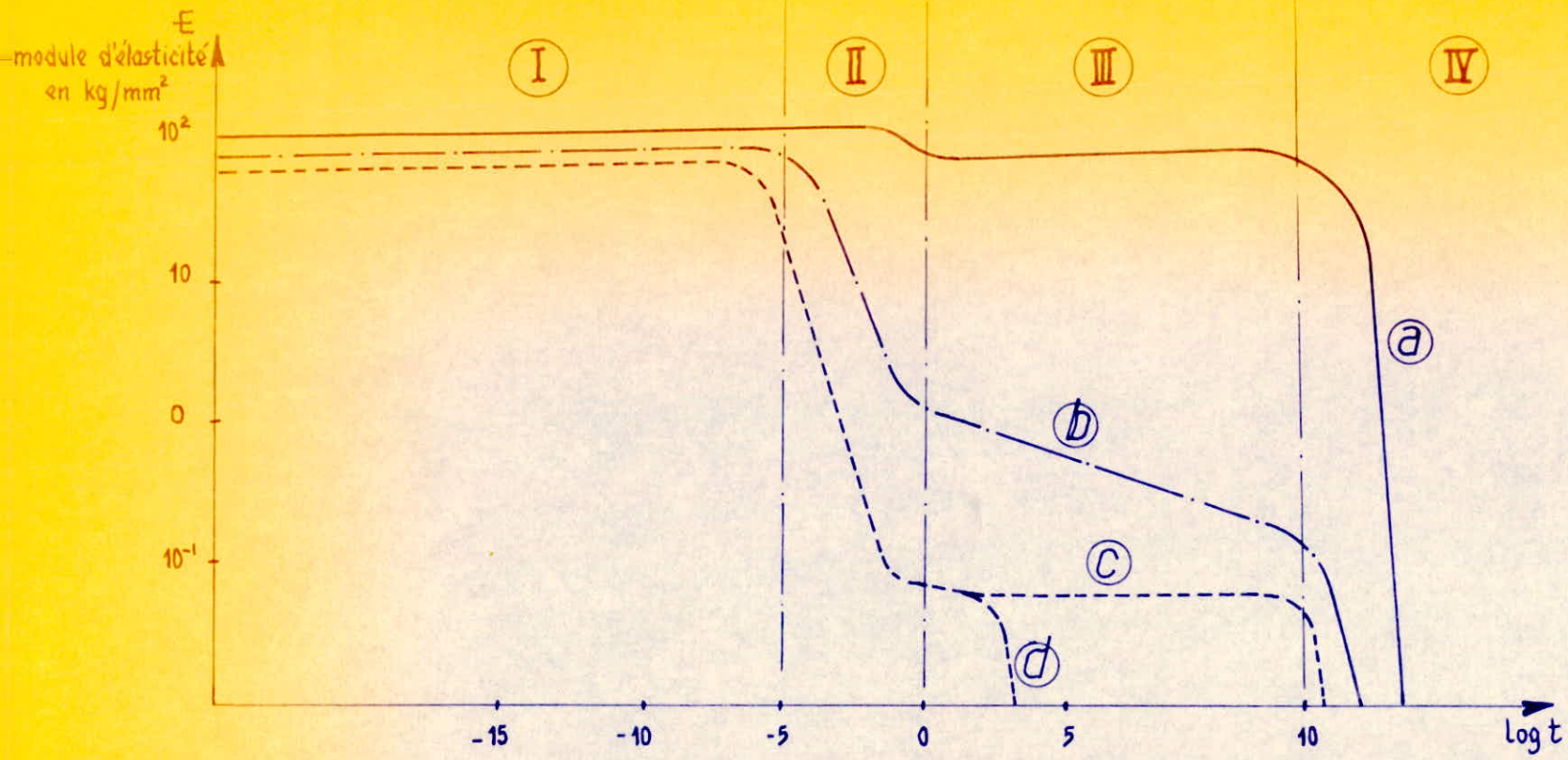


Fig. 3

- (a) Polymère cristallin
- (b) = semi cristallin de taux de cristallinité plus faible
- (c) = amorphe de masse moléculaire très élevée
- (d) = " " " " " plus faible

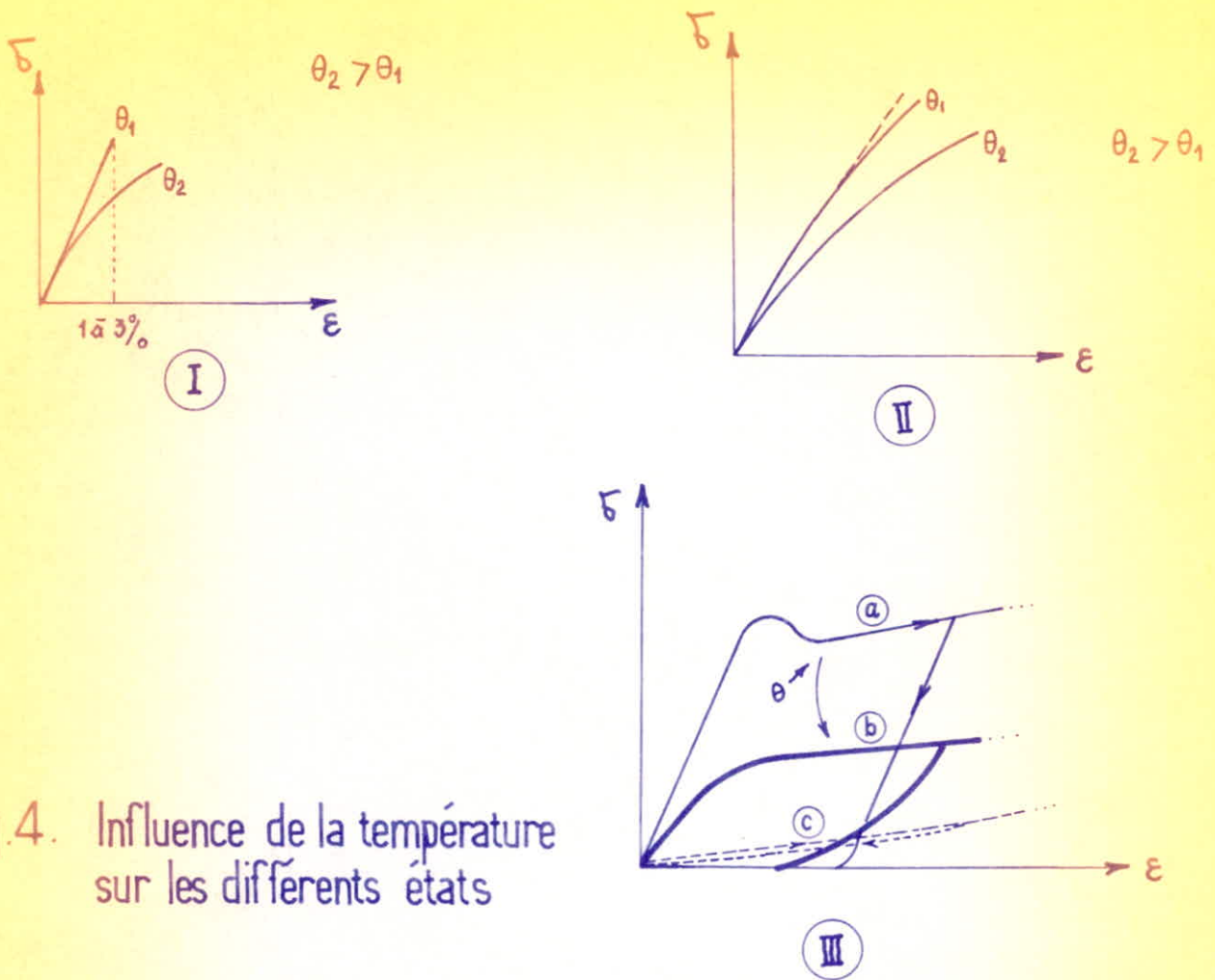


Fig.4. Influence de la température sur les différents états

courbe I	Déformation contrainte d'un thermorigide
courbe II	thermoplastique rigide
courbe III	thermoplastique non rigide

a	plastique
b	plasto élastomérique
c	élastomère

Ces états dépendent grandement de la température et de la contrainte mécanique, de la vitesse ou du temps d'application de la contrainte.

Les paramètres comme l'humidité ou la dégradation par oxydation peuvent aussi intervenir dans certains cas.

Thermodynamiquement les corps amorphes n'ont pas l'état solide; car la distance entre deux molécules n'est pas constante; il en résulte que l'énergie de cohésion n'a pas de valeur fixe et la température de fusion n'est pas bien définie.

Ce qui n'est pas le cas des polymères cristallins pour lesquels la distance entre deux molécules est par contre constante, l'énergie de cohésion ne varie donc pas et la température de fusion est alors bien définie. (Voir Fig. N° 2).

Une autre façon de mettre en évidence ces différents états est représenté par la figure n° 3, en tenant compte de la nature du polymère.

On y distingue 4 Zones :

- Zone I : Correspondant aux basses températures où le module d'élasticité reste constant.

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

- Zone II : C'est la zone de transition visco élastique la déformation et l'allongement sont fonction de la contrainte et du temps.

- Zone III : Ce domaine correspond à la zone d'élasticité caoutchoutique. Elle est fonction de la structure du polymère et de sa masse moléculaire.

- Zone IV : C'est la zone correspondant à l'état liquide visqueux.

b) Influence de la température sur ces états (voir ci-joints Fig. N° 4).

I- 2) DEFINITION DU CARACTERE MECANIQUE DES PLASTIQUES

Soumettons une éprouvette de "plastique" à un essai de traction ou de compression uniaxial sous charge constante en fonction du temps et enregistrons par un moyen approprié la déformation résultante.

On observe sur l'enregistrement une évolution de cette déformation en fonction du temps.

La même expérience effectuée sur deux autres matériaux l'un supposé purement visqueux, donc obéissant à la loi de Newton $\frac{d\epsilon}{dt} = \dot{\epsilon}$ et l'autre supposé purement élastique donc obéissant à la loi de Hooke $\sigma = E \epsilon$

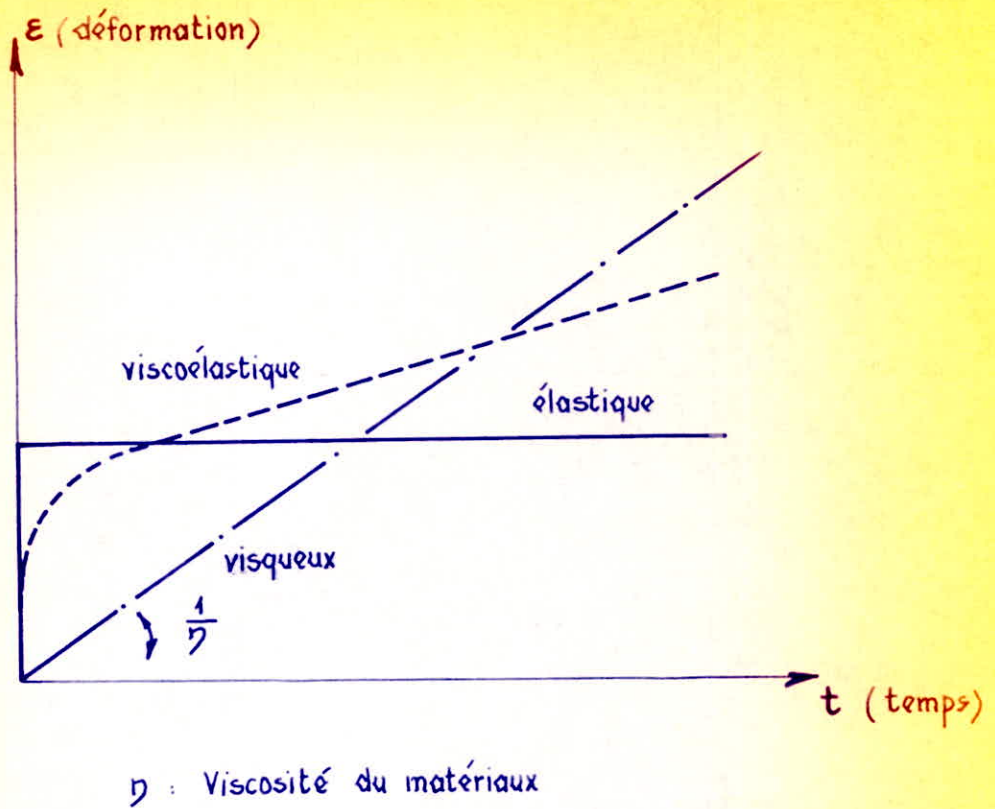


Fig . 5 . Mise en évidence du caractère mécanique du plastique

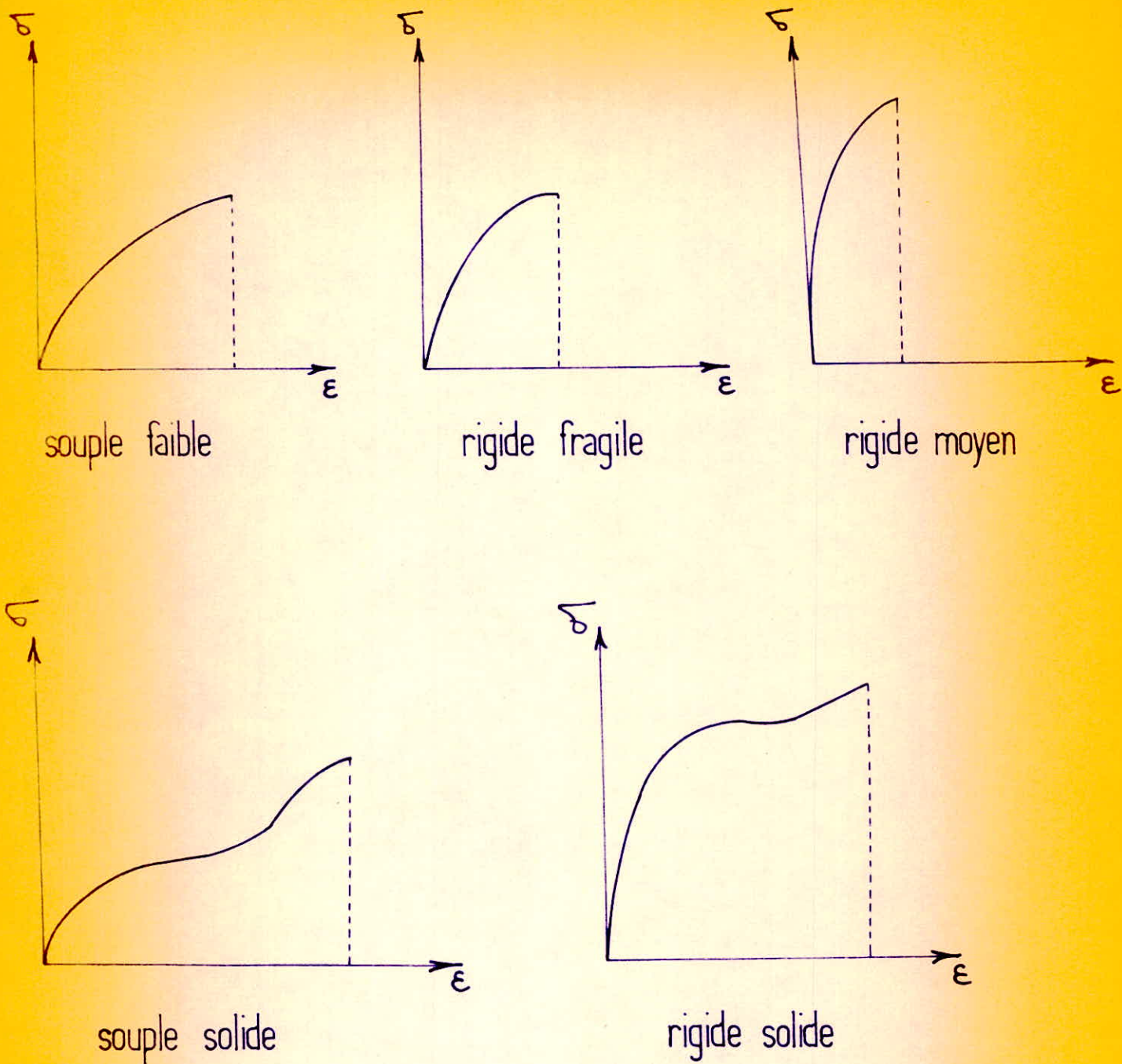


Fig . 6

Différentes formes de courbes contrainte-allongement

On observe une déformation proportionnelle au temps dans le premier cas et constante dans le second.

La fig. n° 5 qui illustre l'évolution de la déformation en fonction du temps dans chacun de ces cas nous permet de conclure en première approximation que les plastiques ont à la fois un caractère élastique et visqueux.

On remarque en particulier que ces 2 paramètres apparaissent partiellement d'une façon indépendante aux limites.

- Élasticité pure instantanée au début de l'application de la contrainte.

- Viscosité pure après un long temps.

En fait le comportement mécanique des plastiques résulte de la superposition des propriétés suivantes:

- Élasticité pure : un corps élastique idéal suit la loi de Hooke : la déformation est proportionnelle à la contrainte

$$\sigma = E \epsilon \quad \left\{ \begin{array}{l} \sigma : \text{Contrainte} \\ \epsilon : \text{Déformation} \end{array} \right.$$

Avec E : module d'élasticité du plastique.

- Viscosité pure : un corps visqueux idéal est un corps dont la déformation en fonction de la contrainte suit la loi de Newton.

$$\frac{d\epsilon}{dt} = \dot{\epsilon}$$

- Plasticité vraie, Dans ce cas la déformation ne peut se faire que par application d'une force supérieure à un seuil et la forme acquise est conservée après suppression de la contrainte.

Le plastique peut être à prédominance élastique ou visqueux. on parlera alors suivant le cas de visco-élasticité ou de plasto-élasticité.

I - 3. CARACTERISTIQUES MECANQUES STATIQUES.

a) Essais mécaniques.

Un matériau peut être soumis à des contraintes diverses pouvant agir isolément ou en association. (Flexion, traction, torsion, compression, cisaillement etc...).

Pour étudier les caractéristiques mécaniques d'un matériau on est amené à réaliser des essais normalisés faisant intervenir ces différentes contraintes. Mais généralement on s'intéresse plus particulièrement à l'essai de traction, ceci, pour différentes raisons.

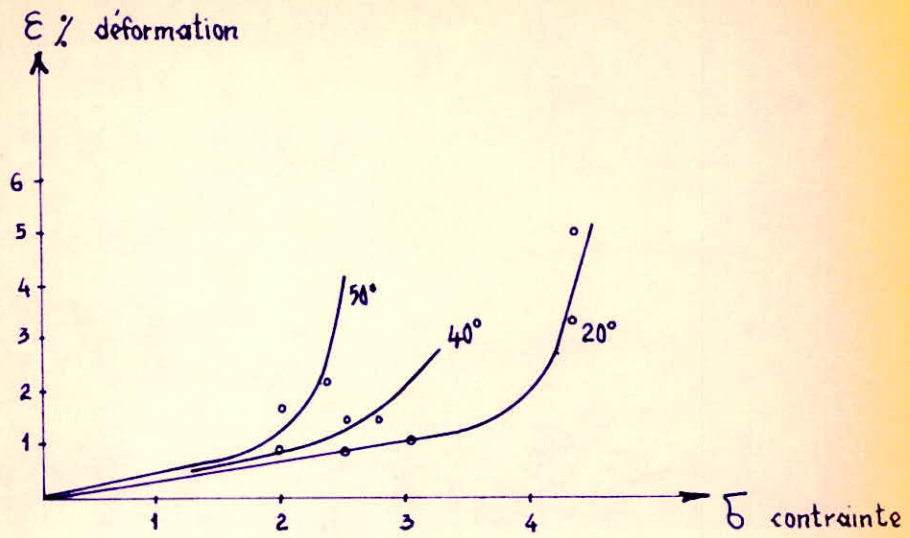


Fig. 7. Courbes de fluage du PVC à différentes températures.

- 1 - Cet essai est applicable à tous les matériaux souples ou rigides.
- 2 - L'éprouvette de traction étant un parallélépipède ou un cylindre dont toutes les sections droites sont également sollicitées.

3 - Le diagramme de traction est celui dont l'interprétation est la plus simple et la plus caractéristique; dans l'état plastique il met en évidence les différentes propriétés du matériaux :

- Elasticité, visco-élasticité, plasticité.

4 - En général on ne se limite pas à la déformation élastique et visco-élastique mais on va jusqu'à la rupture.

En effet l'allongement et la charge de rupture sont fort utiles à connaître pour préjuger de l'aptitude au formage, par une déformation effectuée le plus souvent à chaud.

5 - Enfin cet essai révèle les points faibles, fentes, vides, inclusion etc... et leur évolution au cours du vieillissement.

Suivant la nature du matériau utilisé on peut avoir des courbes contrainte - déformation d'allures diverses représentées par les graphiques de la Fig. N° 6.

L'effet des différentes contraintes (traction, compression, flexion etc...) dépend de la valeur de ces contraintes du temps ou de la vitesse d'application de ces contraintes et de la température.

Ceci peut se traduire par la relation:

$$\epsilon = f(\sigma, t, T)$$

si l'on appelle σ la contrainte, t le temps, T la température pendant l'essai qui provoque la déformation ϵ .

Ainsi en maintenant constants deux paramètres on peut être ramené à étudier deux cas importants qui caractérisent le comportement du matériau et qui sont définis de la façon suivante :

- Si $T^0 =$ constante, $\sigma =$ constante alors $\epsilon = f(t)$:

c'est le phénomène du fluage.

- Si $T^0 =$ Constante, $\epsilon =$ constante alors $\sigma = f(t)$

c'est le phénomène de relaxation.

b) Etude du fluage des matières plastiques .

- Le phénomène du fluage est défini comme étant la croissance continue en fonction du temps de la déformation sous une charge constante.

Ce phénomène est très étudié surtout quand il s'agit de plastiques destinés aux applications techniques plus exigeantes ou le matériau est soumis à

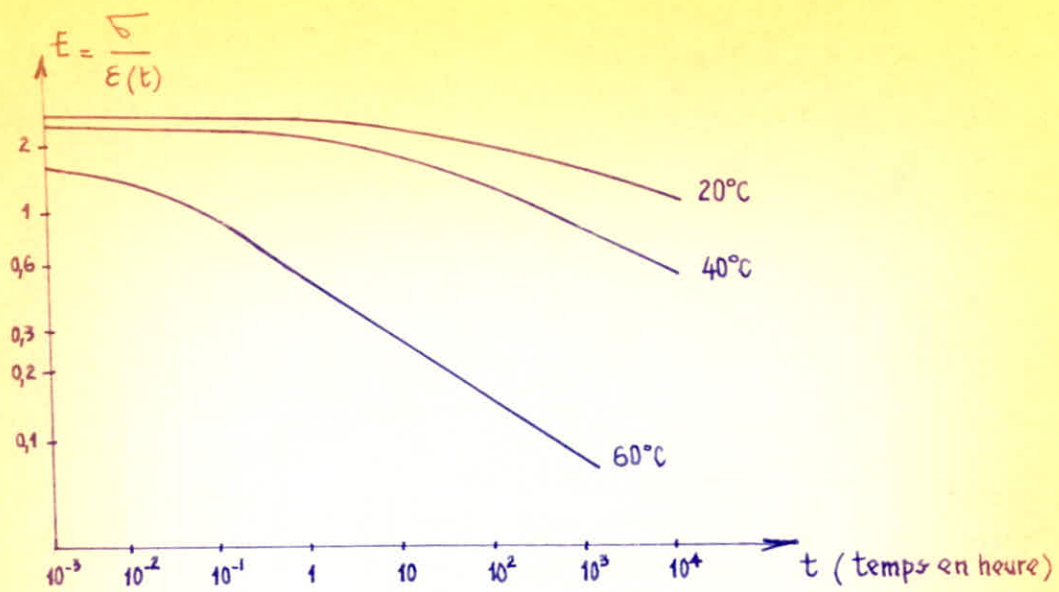


Fig.8 . Fluage du PVC .
 Module d'élasticité apparent du PVC en fonction
 du temps à 3 températures . pour une contrainte
 $\sigma = 10 \text{ mN/m}^2$

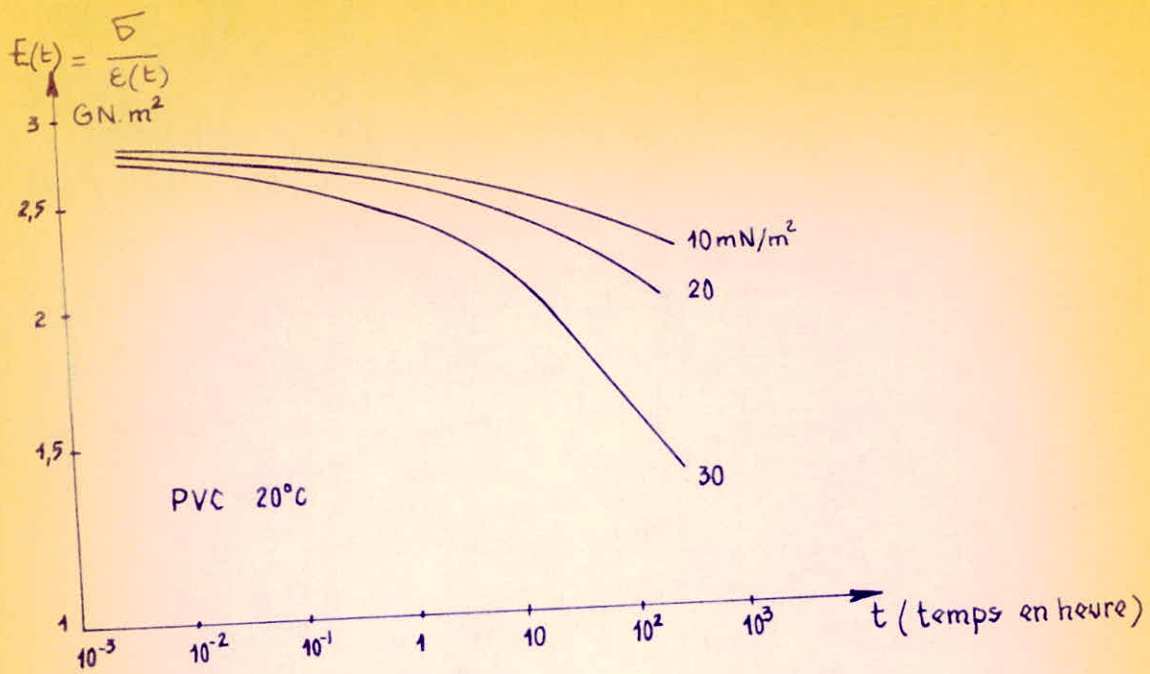


Fig 9 . Fluage du PVC.
 Module d'élasticité apparent du PVC en fonction du
 temps à 3 niveaux de tension .

des tensions importantes pendant de longues durées de service.

De plus l'étude du fluage est devenu également une base pour caractériser en général le comportement à la déformation des plastiques.

Les plastiques étant visco-élastiques, leur comportement lors de la déformation dépend fortement de la manière dont on applique la charge ou opère la mise sous tension.

Ainsi pour les échantillons plastiques essayés à différentes vitesses de traction, ce n'est pas le résultat d'un seul essai d'élévation de contrainte qui peut caractériser le comportement du plastique mais une courbe pour chaque vitesse d'essai.

Le fluage peut être illustré en traçant la déformation en fonction du temps mais aussi au moyen du module d'élasticité apparent (contrainte constante divisée par la déformation) en fonction du temps.

Un exemple de ces courbes est représenté par les graphes des figures suivantes :

La figure N° 7 illustre le fluage du P.V.C rigide à différentes températures et contraintes.

Pour la figure n° 8 le fluage du P.V.C est illustré en représentant la variation du module d'élasticité apparent en fonction du temps et ce, pour trois températures différentes.

La figure n° 9 illustre par contre le fluage du P.V.C à trois niveaux de tension.

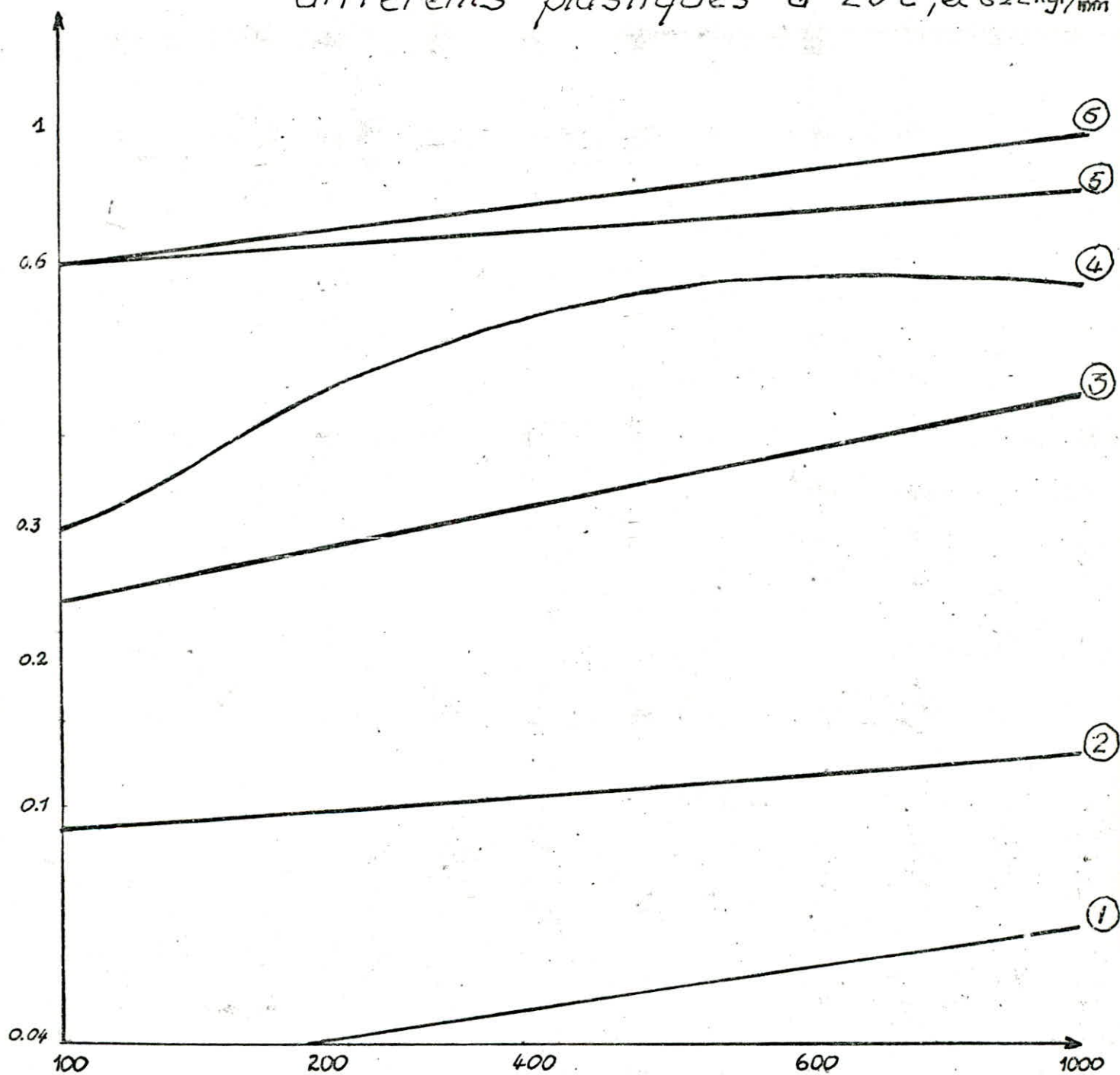
Ainsi ces courbes mettent en évidence le phénomène du fluage et l'influence de la température et de la tension sur ce phénomène.

En particulier elles montrent que la température et le temps sous charge sont entièrement des valeurs comparables entre elles en ce qui concerne leur influence sur la déformation.

On remarque également qu'un accroissement de charge a une influence pareille à un accroissement de la température c'est à dire un déplacement de la courbe de fluage réduite vers des temps plus courts.

Fig. 10.

Fluage comparé de
différents plastiques à 25°C, et $\sigma = 2 \text{ kgf/mm}^2$



1. Phenoplaste-mica
2. Phenoplaste-amiante
3. Phenoplaste-Farine de bois
4. Polyvinylacetochlorure
5. Polystyrene
6. P.M.M.

En principe les thermorrigides à charge minérale plient moins que les thermoplastes dont le fluage est le plus faible dans l'état rigide.

Ainsi à titre d'exemple le diagramme de la fig. 10 montre le fluage comparé de différents matériaux pour des expériences faites à 25° C sous une contrainte de 2 Kgf/cm².

Ces expériences conduisent au classement suivant :

- 1er) Phenoplaste-mica.
- 2°) Phenoplaste-amiante.
- 3°) Phenoplaste-farine de bois.
- 4°) Polyvinylacétate.
- 5°) Polystyrène.
- 6°) P.M.M.

Enfin le fluage ne présente en général pas un comportement linéaire et peut conduire à la rupture du matériau; d'où l'intérêt pratique que présente son étude.

C- Phénomène de relaxation.

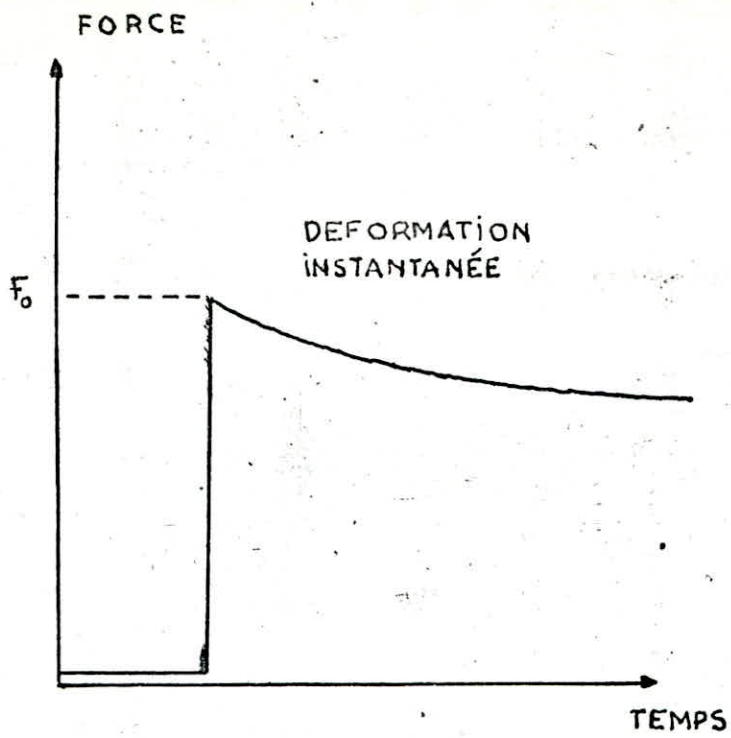
Ce phénomène correspond à la décroissance au cours du temps de la force de tension pour maintenir un allongement constant.

Les fig. 11. et 12 illustrent ce phénomène.

d) Influence de quelques facteurs sur les caractéristiques mécaniques.

- Influence de la nature du polymère

Produits Caractéristiques	Thermorrigides			Thermo-plastiques				
	P.F.	M.F.	E.P.	P.S.	P.M.A.	PA/PE	PVC	
E	500	700	400	300	280	150	60	40
σ_T (daN/mm ²)	5,5	8	7	4	7	9	3	8
σ_c (daN/mm ²)	25	30	12	10	8	8	-	12
E_T (%)	1,0	0,5	5	0,7	4	5-10	10	8



COURBE DE RELAXATION

Fig. 11

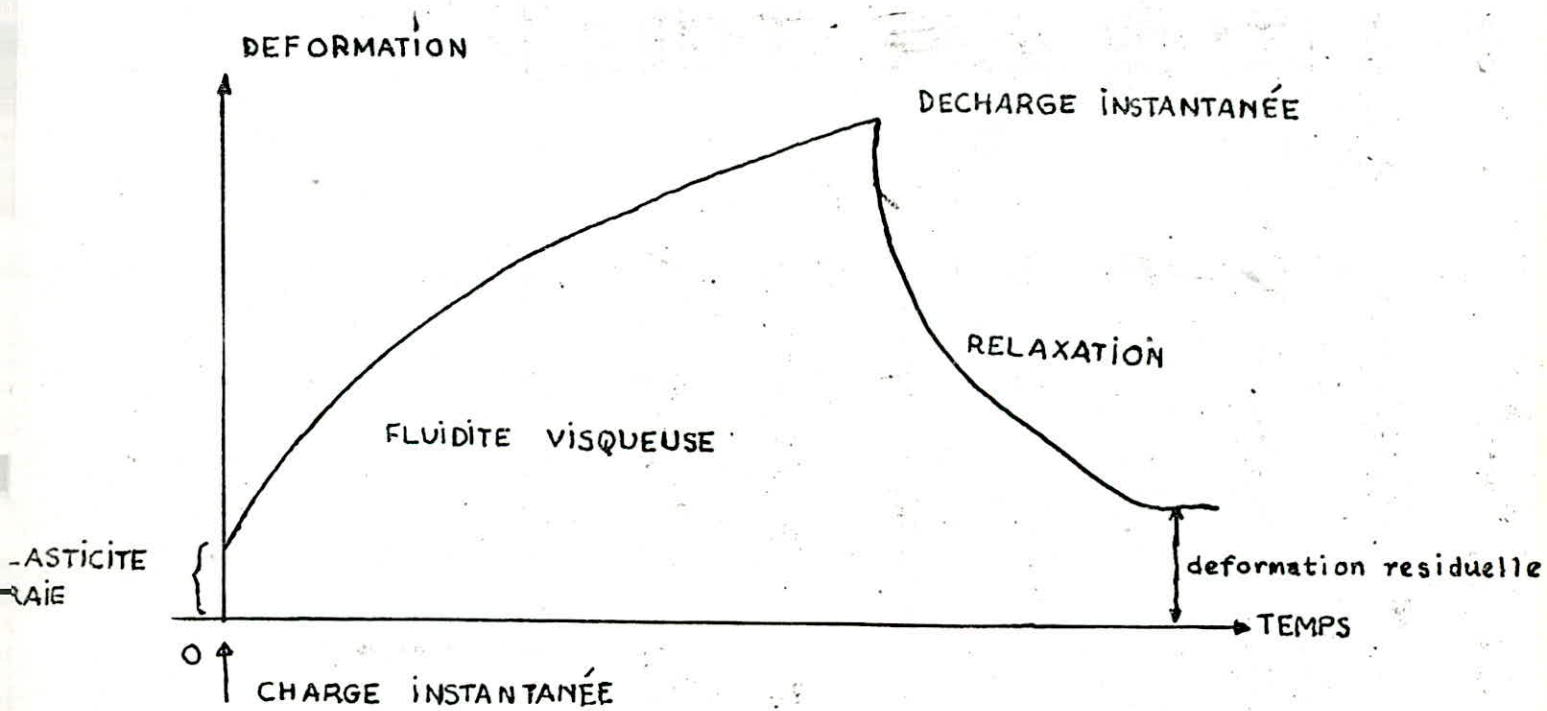


Fig. 12

E: Module d'young.

σ_T et σ_C respectivement contrainte de rupture et en compression.

ϵ_T Allongement de repture

On remarque une différence notable entre les thermorigides et les termo-plastiques.

Pour les thermorigides les liaisons intramoléculaires qui assurent la cohésion de l'ensemble sont chimiques et donc peu affectées par la température de sorte que toutes leurs caractéristiques mécaniques varient peu en fonction de la température.

- Influence de l'orientation et cristallinité;
- L'orientation augmente considérablement le contrainte de rupture en traction, mais elle diminue l'allongement à la rupture .
- Influence de la vitesse de déformation.

Quant on augmente la vitesse de déformation dans l'état plasto-élastique on détermine la manifestation de l'élasticité pure et atténue celle de la visco-élasticité.

Ainsi par exemple un matériau rigide tel que le P.M.M légèrement plastifié présente une rigidité croissante quand la vitesse de traction augmente.

En général la contrainte de rupture semble croître comme le logarithme de la vitesse de déformation.

.../...

II. Propriétés mécaniques du polyméthacrylate de méthyle .

- GENERALITES :

Le polyméthacrylate de méthyle est la matière plastique obtenue par polymérisation à partir du monomère correspondant le méthacrylate de méthyle.

Cette matière est thermo-plastique, car elle se ramollit chaque fois qu'elle est portée à une température suffisante.

Ce plastique est surtout connu dans la vie courante sous le nom de plexiglas que l'on peut définir comme une matière "ayant la limpidité du cristal sans en avoir la fragilité".

Industriellement on prépare d'abord le méthacrylate de méthyle sous forme liquide transparent à la température normale répondant à la composition:

puis par l'adjonction d'un catalyseur et sous l'action de la chaleur (et même parfois de la pression) on réalise la polymérisation en provoquant l'ouverture des doubles liaisons dans les molécules monomères et leur réaction entre elles pour former le polyméthacrylate de méthyle.

La polymérisation peut s'effectuer soit dans un moule à parois lisses (cas des feuilles) soit en suspension dans un liquide (cas des perles en émulsion).

II. 2. CARACTERISTIQUES .

A titre indicatif nous donnons ci-après quelques caractéristiques du P.M.M.A. en prenant comme référence la feuille transparente de ce polymère comportant 5% de plastifiant (proportion la plus courante).

- Propriétés physiques.

* Densité à 20° C : 1,18.

* Absorption d'eau au maximum 0,2% après 24h à 20°C.

- Propriétés thermiques.

* Point de ramollissement : 75 à 80° c (Supérieur à 100° c pour la qualité non plastifiée).

- Caractéristiques mécaniques.

* Résistance à la traction 6 à 7 Kgf /mm².

- * Résistance à la flexion 10 à 12 Kgf/mm².
- * Dureté Brinél : 17,9 avec bille de 5 mm.
- * Module d'élasticité 285 Kg/mm².

II. 3. COMPORTEMENT MECANIQUE DU P.M.M.A.

Le polyméthacrylate de méthyle étant thermo-plastique il va donc présenter toutes les caractéristiques du comportement thermo-mécanique des thermo-plastiques décrites précédemment.

En particulier il va présenter :

- Une courbe thermo-mécanique complète avec les différents états représentés sur la fig. N° 1.
- Le phénomène de fluage dont le comportement est analogue aux autres matières thermo-plastiques.

Le Docteur Ingénieur H. Schmidt a consacré une étude au fluage des thermoplastiques et en particulier à celui du P.M.M.A.

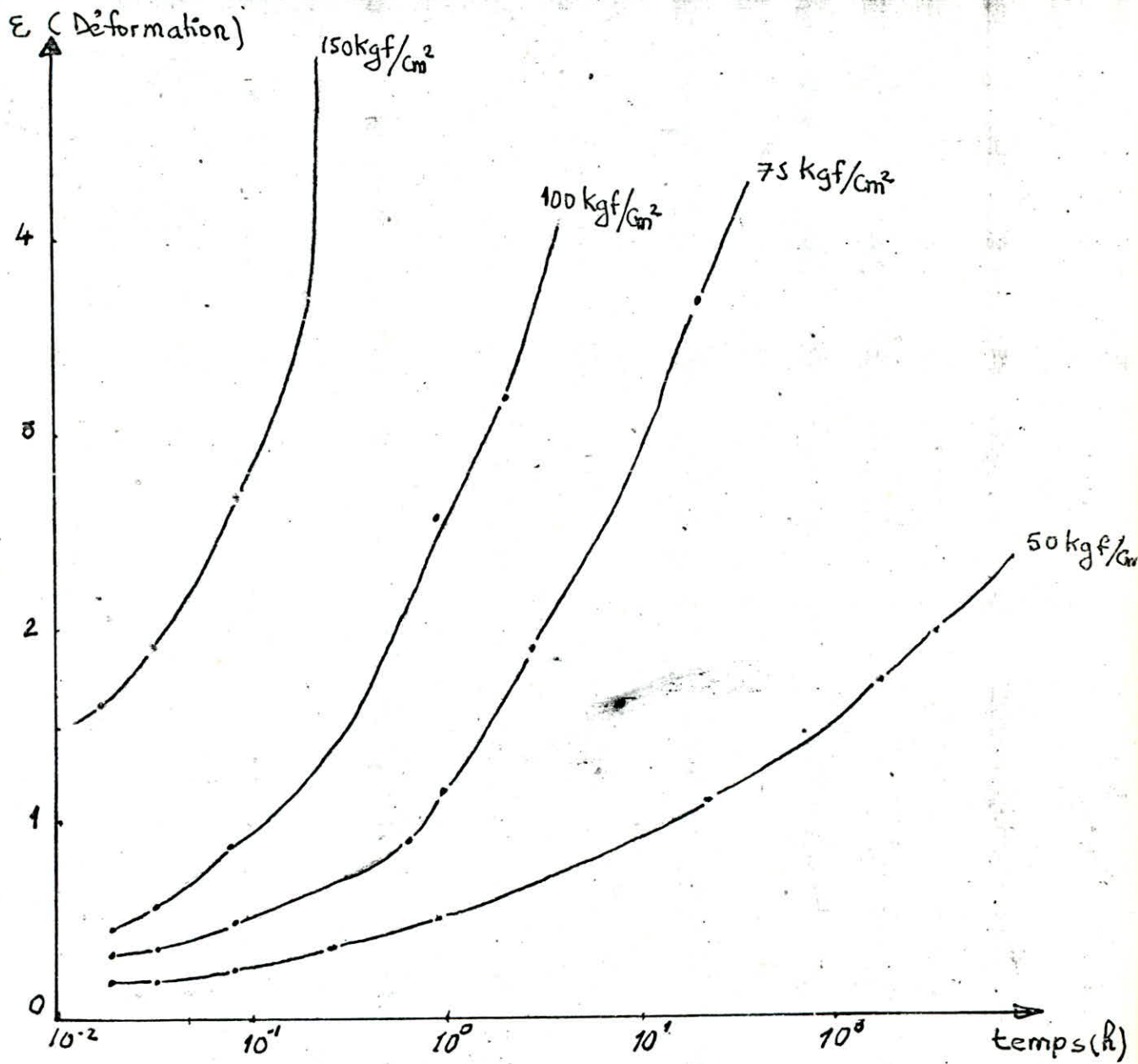
On peut y relever les points suivants de ses conclusions.

- Les zones de fluage se forment perpendiculairement à la direction de l'allongement.
- Les tensions mono et biaxiales déterminent les mêmes déformations exprimées par une valeur de seuil ϵ_f qui diminue avec l'augmentation de la durée de la charge et qui, pour de longues durées tend vers une valeur inférieure limite $\epsilon_f \approx$.

Dans le cas du P.M.M.A. et des thermo-plastiques en général

- En dessous des déformations se rapportant aux zones de fluage les allongements sont réversibles.
- La formation des zones de fluage est seulement possible pour de grandes vitesses de déformation.
- Les zones de fluage apparaissent dans les échantillons exempts d'orientation et de tension propre.

Fig. n° 13.



Courbe de fluage du PMMA à 100°C
pour différentes contraintes

Pour le P.M.M.A. étiré les allongements critiques sous charge de longue durée augmentent dans la direction de l'orientation.

La fig. n° 13 montre un exemple de courbe de fluage du P.M.M.A. sous différentes contraintes à 100° C.

L'influence de la vitesse sur le comportement mécanique du P.M.M.A. est illustré par la fig. N° 14 celle-ci montre que le fluage n'a pas le temps de se produire quand la vitesse de la déformation dépasse la vitesse de la relaxation; la déformation est alors purement élastique.

II.4. TRANSFORMATION DU P.M.M.A.

Pour illustrer le comportement mécanique des matières plastiques nous avons choisi de réaliser des essais sur des éprouvettes de polyméthacrylate de méthyle qui est assez représentatif tant du point de vue de ses propriétés que de ses applications pratiques.

Ces éprouvettes ont été découpées d'une plaque plastique de ce plastique, se présentant donc comme un semi-produit pouvant éventuellement subir d'autres transformations. (Thermo-formage par exemple).

Cette plaque est donc elle-même le résultat d'un processus comprenant notamment.

- La polymérisation.
- Et sa mise en oeuvre sous forme de semi-produit en plaque ou en feuilles.

On sait qu'au niveau de la synthèse même du polymère plusieurs facteurs peuvent influencer sur les caractéristiques thermo-mécaniques du produit fini à obtenir.

Ces caractéristiques sont également modifiées lors de la mise en oeuvre du produit.

Ces modifications sont dues à l'influence de plusieurs facteurs extérieurs intervenant lors de la transformation.

Parmi celles-ci on peut citer:

- L'apport d'un adjuvant quelconque tel que charges, plastifiants, colorants et stabilisants.

- Les facteurs tels que les températures élevées intervenant lors de la mise en œuvre.

D'une façon générale tous les processus qui se déroulent à des vitesses variables entraînent une alteration des propriétés technologiques du matériau d'où une diminution de la longévité des articles fabriqués.

a) Influence des adjuvants sur les propriétés mécaniques.

Généralement les polymères ne sont jamais utilisés purs mais mélangés à d'autres constituants (les adjuvants) dont le rôle est

- soit d'améliorer les caractéristiques du produit.
- soit de le colorer ou le stabiliser.
- soit de diminuer son prix de revient.

Les adjuvants pouvant être utilisés sont :

* Les plastifiants dont le rôle est :

- d'abaisser les températures de mise en œuvre.

- Ils améliorent la flexibilité du matériau; d'où diminution de la température de transition vitreuse et augmentation de l'aptitude à la déformation.

Les plastifiants généralement utilisés sont; les sebaçates de butyle ou de benzyle, les phtalates de butyle, de dioctyle de triphényle et tricresyl.

* les stabilisants: ils ont pour rôle d'inhiber les réactions de dégradation (par U.V. ou intempéries).

Les principaux stabilisants utilisés sont :

- Les sels d'acide organique: les stéarates et les dorates .
- Les organométalliques : le maliate d'étain dibutyle.
- Les huiles, telles que l'huile de soja ou de ricin.

*) Les lubrifiants introduits dans les poudres à mouler pour faciliter l'écoulement dans les moules.

*) Les colorants et pigments : dont le rôle est de conférer une couleur désirée aux polymères.

*) Charges et produits de renforcement;

Ils modifient profondément les propriétés d'un plastique :

Fig. 14

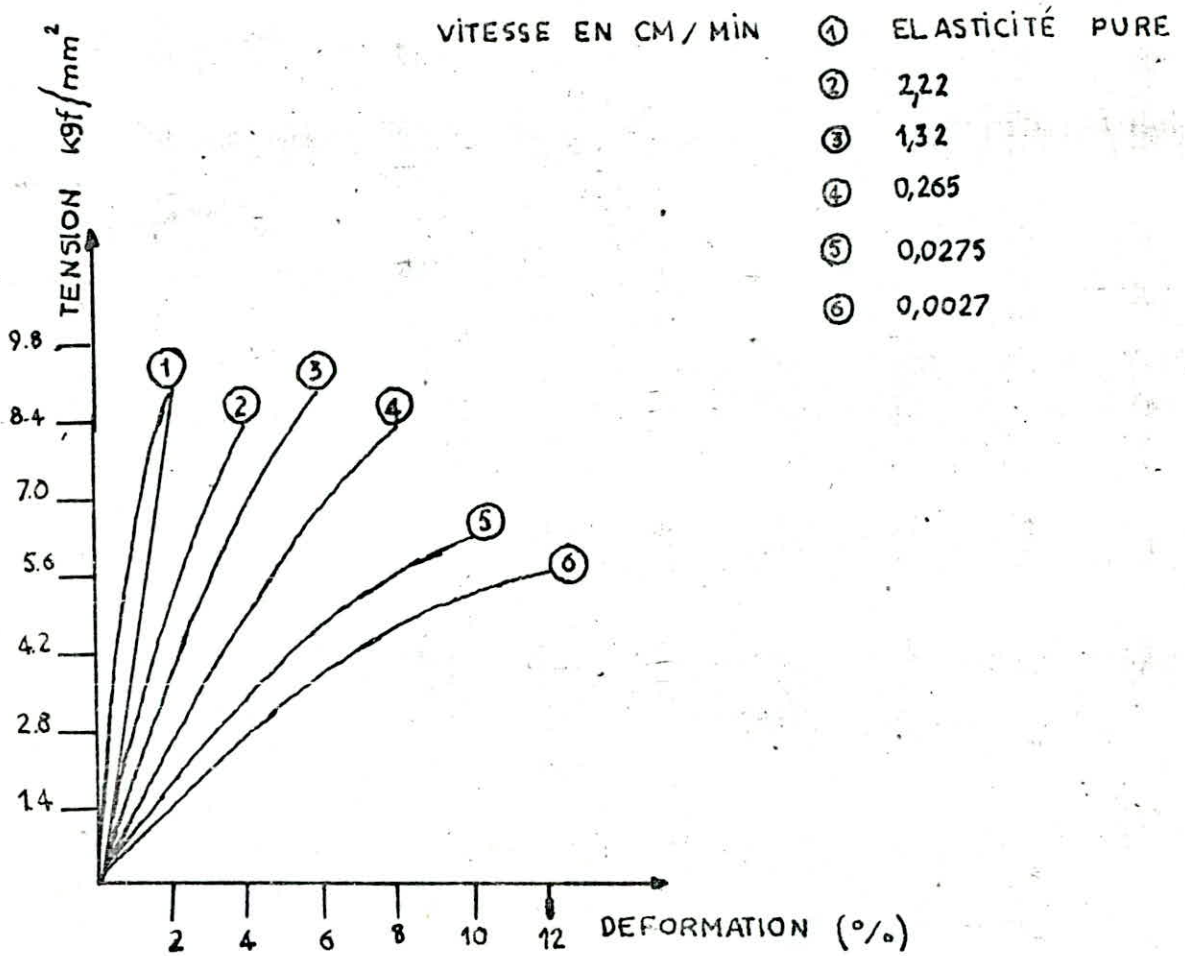


FIG. 14

Influence de la vitesse sur le comportement
du P.M.M.A.

-Ils améliorent généralement la dureté superficielle, la stabilité dimensionnelle, la rigidité et la résistance mécanique du matériau.

On peut utiliser :

- Des charges granulés qui peuvent être des charges minérales, métalliques ou organiques.
- Des charges fibreuses telles que les fibres synthétiques de polyamide.

b) Transformation du P.M.M.A.

Le P.M.M.A. obtenu après polymérisation peut se présenter sous forme de plaques, feuilles ou poudres.

Le P.M.M.A. sous forme de poudres, peut être transformé soit par extrusion, moulage ou calandrage.

1 - L'EXTRUSION :

C'est le procédé de transformation qui conduit à la formation de feuilles de P.M.M.A., en continu.

Le procédé comprend 3 opérations principales :

- Préparation de la matière à extruder où on réalise en particulier la plastification de la matière granulaire.
- Le mélange préalablement chauffé et ramoulu est injecté à travers une filière.
- Refroidissement lent pour éviter l'apparition de lignes de charges sur la feuille fabriquée.

2.- Le calandrage :

- Ce procédé conduit également à la formation de feuilles. Il consiste à faire passer le matériau ramoulu par la chaleur entre deux ou plusieurs cylindres.

3.- LE MOULAGE :

- Il conduit à la fabrication de plaques de P.M.M.A.
- Moulage par compression.

Ce procédé consiste à former l'objet en exerçant sur la poudre à mouler portée à haute température, une pression.

- Moulage par injection :

La résine en fusion est injectée dans un moule à deux matrices.

L'objet se forme par solidification dans le moule. Il est ensuite éjecté par ouverture du moule.

Notons que la poudre doit être préalablement séché à 85° C pendant 2 à 3 minutes.

La température de moulage se situe entre 150 et 170° C sous une pression de 1200 à 1500 Kgf/cm².

4.- LE THERMOFORMAGE DU P.M.M.A.

- Principe :

A froid le P.M.M.A en feuilles ou en plaques se travaille comme les métaux légers.

Mais dans ces conditions se mise en oeuvre la plus utilisée et la plus spectaculaires et qui est propres aux thermo-plastiques, est le formage à chaud. (ou thermo-formage).

Chauffé à 150 - 160°, le P.M.M.A présenté sous forme de semi-produit en feuilles ou plaques, se ramoulit 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 tout en conservant la forme qui lui a été donnée.

- D'une façon générale le thermoformage d'un matériau plastique comporte trois opérations.

a) Porter le matériau à transformer à une température T tel que:

$$T_g < T < T_f$$

b) Assurer la déformation à l'aide des moyens appropriés.

c) Assurer le refroidissement jusqu'à une température $T < T_g$.

Notons que pour des pièces simples on peut réaliser le thermoformage à basse température et que les pièces compliquées nous obligent à travailler à température relativement élevée correspondant au domaine de haute élasticité.

Le chauffage s'effectue généralement dans des étuves à circulation d'air chaud. Mais on utilise également le chauffage par I.R.

- Procédés de thermoformage utilisés :

Suivant la forme à obtenir et les moyens utilisés on distingue les procédés de formage à chaud suivants :

1°) Galbage simple des formes développables ou approchantes (voir figure n° 15).

• La feuille chaude est simplement posée sur la forme ou moule.

2°) ASPIRATION :

- La feuille chaude est maintenue sur les bords du moule par coince-ment entre celui-ci et une couronne serre-flan.

La dépression créée dans le moule assure sa déformation (voir Fig.16).

3°) SOUFFLAGE A L'AIR COMPRISE :

- Ce procédé est utilisé quand la pression d'aspiration n'est pas suf-fisante. (Voir Fig. 17).

4) Emboutissage ou étirage en Forme :

- Ce procédé s'apparente à l'emboutissage des métaux en feuilles par poinçon et matrice.

La figure 18 montre, le principe de ce procédé.

5°) Methodes combinées :

Pour les pièces très compliquées deux ou plusieurs de ces procédés simples peuvent être combinés.

Conclusion :

- Tous ces procédés de transformation sont basés sur la déformation assurée par la combinaison de la température et de la pression.

Comme de plus les problèmes de la transformation font intervenir le facteur rentabilité donc le facteur temps, ou vitesse on peut donc dire qu'en définitive la transformation met en jeu les 4 Facteurs suivants :

- Déformation
- La pression
- La température T
- Le temps (ou la vitesse) t.

Or nous avons vu que ce sont ces mêmes paramètres qui caractérisent le comportement mécaniques des plastiques.

Ceci explique, donc bien le lien étroit qui existe entre d'une part les caractéristiques du comportement mécanique des plastiques et d'autre part la détermination des conditions de leur transformation.

C'est ainsi que généralement les unités de transformation des matériaux plastiques sont dotées de laboratoires d'essais mécaniques qui assurent les meilleures conditions de transformation.

III THEORIE UTILISEE

1. Theorie de la durée de service (ou durée)

Nous avons vu que le comportement mécanique d'un plastique peut être décrit par une relation de la forme

$$\epsilon = f(\sigma, t, T)$$

- ou σ : la contrainte appliquée
- t : temps d'application de la contrainte
- T : la température à laquelle on réalise la déformation -
- ϵ : la déformation résultante

Pratiquement pour décrire le comportement d'un plastique on nous sommes ramenés à déterminer l'évolution des courbes telles que

$$\begin{aligned} \sigma_{rupt} &= f(\epsilon) \text{ pour différentes } T^{\circ} \\ \text{ou } \epsilon &= f(\text{vitesses}) \text{ à différentes } T^{\circ} \\ &\text{etc.} \end{aligned}$$

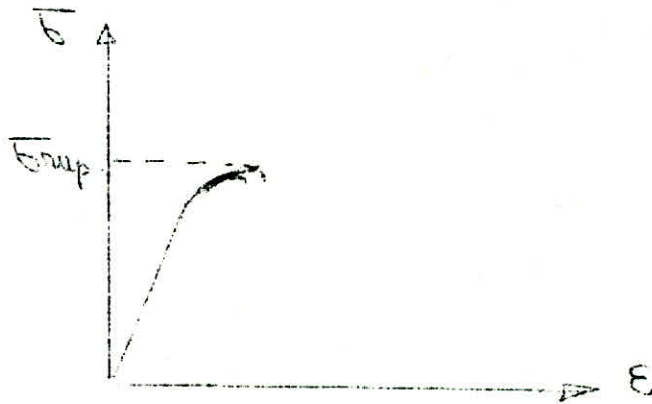
Et c'est la combinaison des différentes courbes ainsi obtenues qui nous permettent de décrire le comportement mécanique du matériau -

Cette façon de procéder présente l'inconvénient d'être très fastidieuse et pénible.

C'est pour cela que nous avons choisi de nous servir d'utiliser la théorie dite de durée de service ou durée de vie.

Notion sur la durée de service: Principes de Bailey.

L'expérience montre que si nous mesurons le déplacement d'un point d'un corps produit par une force croissante graduellement, celui-ci commence par croître proportionnellement à la force, puis croît plus rapidement jusqu'à la rupture.



Cette rupture peut être atteinte pour un temps plus ou moins grand correspondant au phénomène de fluage déjà fini précédemment -

Bailey a établi l'expression de ce temps de rupture en remplaçant la contrainte croissante dans le temps par une contrainte constante dans le temps et qui provoquera la rupture en un temps plus court -

on peut considérer la contrainte croissante dans le temps comme étant la somme de petites contraintes constante σ_i et à chaque σ_i correspond un temps Δt_i tel que $\sum \Delta t_i = t = \text{temps de rupture}$

Par ailleurs à chaque σ_i correspond une durée de service $\tau(\sigma_i)$ et $\sum \tau(\sigma_i) = \tau(\sigma)$ qui est la durée de service

$$\text{et } \sum \frac{\Delta t_i}{\tau(\sigma_i)} = 1 \Rightarrow \int_0^{\tau} \frac{dt}{\tau(\sigma(t))} = 1.$$

C'est cette dernière relation qui constitue le critère de Barry Barry. Pour une température donnée nous obtenons grâce à ce critère, une relation liant la durée de service à la contrainte.

En effet, pour une température T donnée

$$\int_0^{\tau} \frac{dt}{\tau(\sigma(t))} = 1.$$

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

les constantes A et α dépendent de la nature du matériau et de la température.

D'autre part la contrainte de rupture est liée au temps de rupture par la relation.

$$\sigma_r = \omega t_r \text{ avec } \sigma_r: \text{ contrainte de rupture}$$

ω : vitesse de charge programmée par la machine
 et t_r : temps de rupture

- Principe de Bailly

$$\int_0^{\tau} \frac{dt}{\tau(\tau(t))} = 1$$

Ce principe peut s'écrire en tenant compte de ce qui précède, $\int_0^{\tau} \frac{dt}{A e^{-\alpha \omega t}} = 1$ (1)

en effectuant le changement de variables définie par $\tau = A e^{-\alpha \omega t}$.

$$\Rightarrow \ln \frac{\tau}{A} = -\alpha \omega t$$

$$\text{d'où } t = \frac{1}{\alpha \omega} \ln \frac{A}{\tau}$$

(1) devient alors :

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

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

$$\text{D'où } \frac{1}{\tau} - \frac{1}{A} = \alpha \omega$$

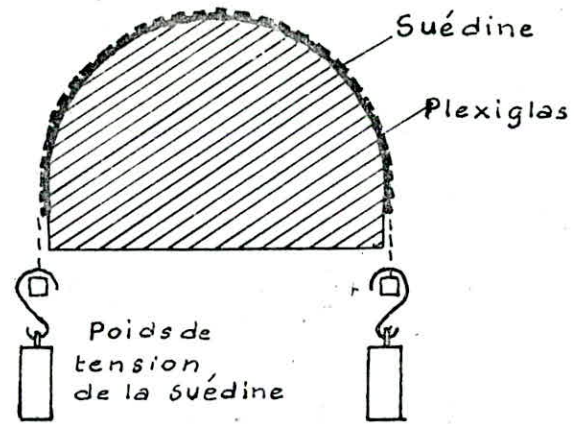
$$\text{Comme } \frac{1}{\tau} \ll A \Rightarrow \frac{1}{\tau} \approx \alpha \omega$$

Calcul de la constante τ qui a le même effet que la constante croissante

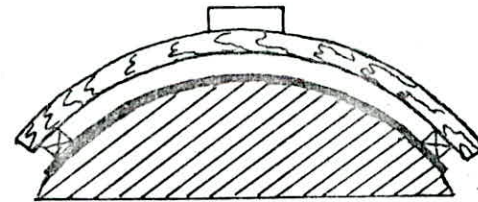
De la relation $\frac{1}{\tau} = \alpha \omega$ on tire

$$\Rightarrow \ln \frac{1}{\tau} = \ln \alpha \omega$$

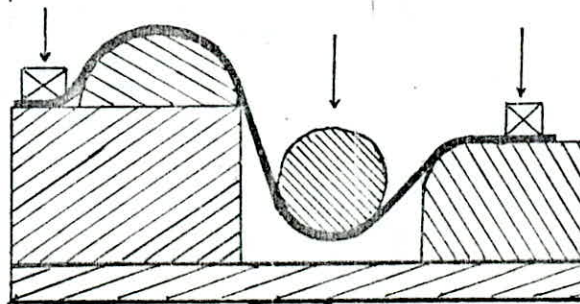
Figure 15.



Ⓐ - Galbage simple de Plexiglas en feuille, sur la forme, à l'aide d'un tissu de suédine tendu.

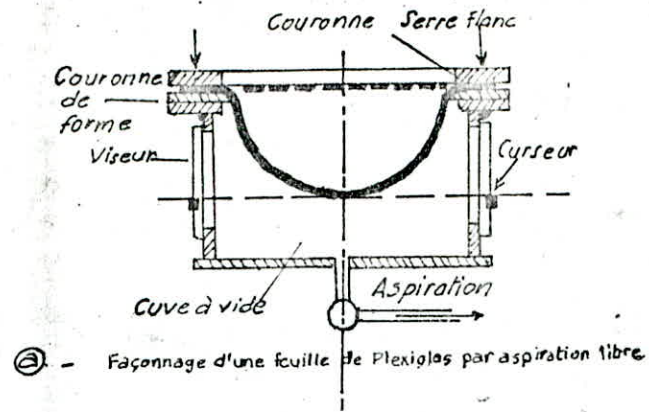


Ⓑ - Galbage simple sur la forme, avec cadre périphérique.

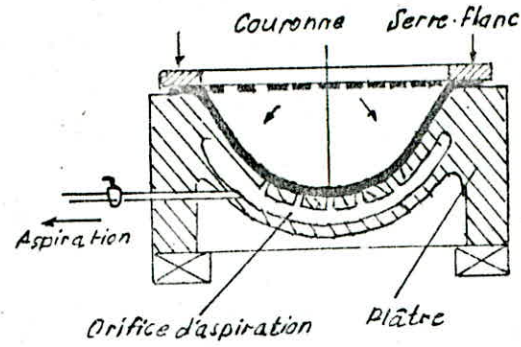


Ⓒ - Galbage simple de pièces ne comportant que des génératrices rectilignes.

Figure 16.

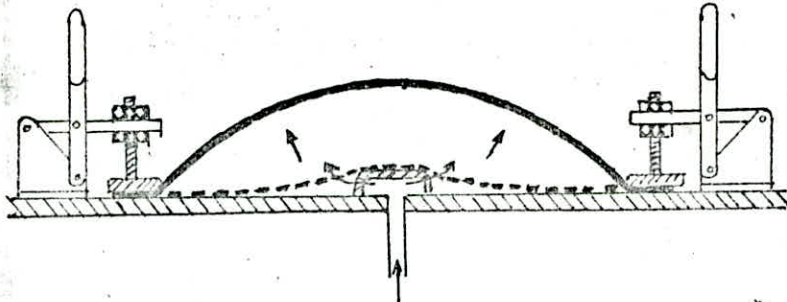


Ⓐ - Façonnage d'une feuille de Plexiglas par aspiration libre.

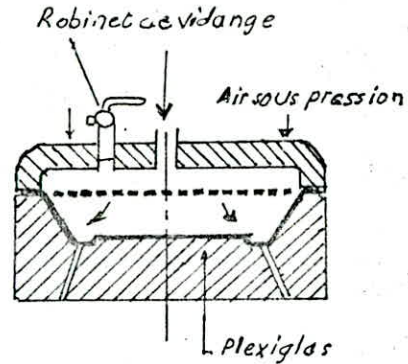


Ⓑ - façonnage d'une feuille de Plexiglas par aspiration en moule.

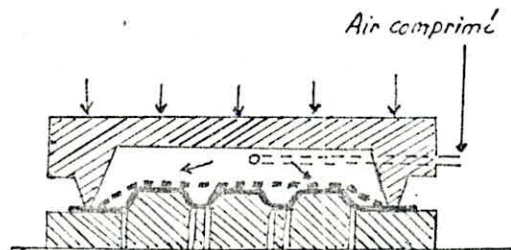
Figure 17



Ⓐ - Façonnage d'une feuille de Plexiglas par soufflage à l'air comprimé. Soufflage libre.

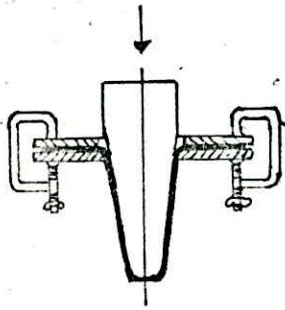


Ⓑ - Façonnage d'une feuille de Plexiglas par soufflage à l'air comprimé. Soufflage sur moule femelle (ou négatif).

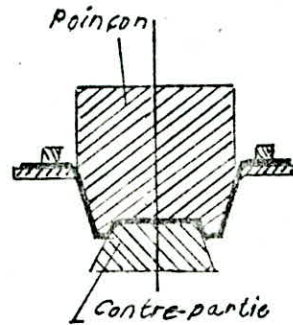


Ⓒ - Façonnage d'une feuille de Plexiglas par soufflage à l'air comprimé. Soufflage sur moule mâle (ou positif).

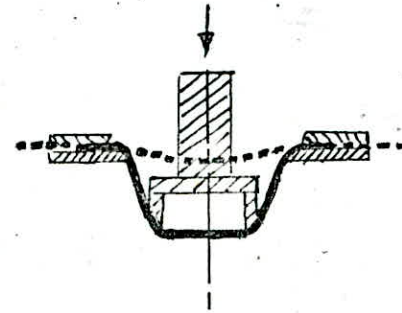
Figure 18



- Ⓐ - Emboutissage ou étirage en forme d'une feuille de Plexiglas avec poinçon et matrice. La matrice est une simple couronne.



- Ⓑ - Emboutissage ou étirage en forme d'une feuille de plexiglas avec poinçon. La matrice n'existe que sous forme de contre-partie.

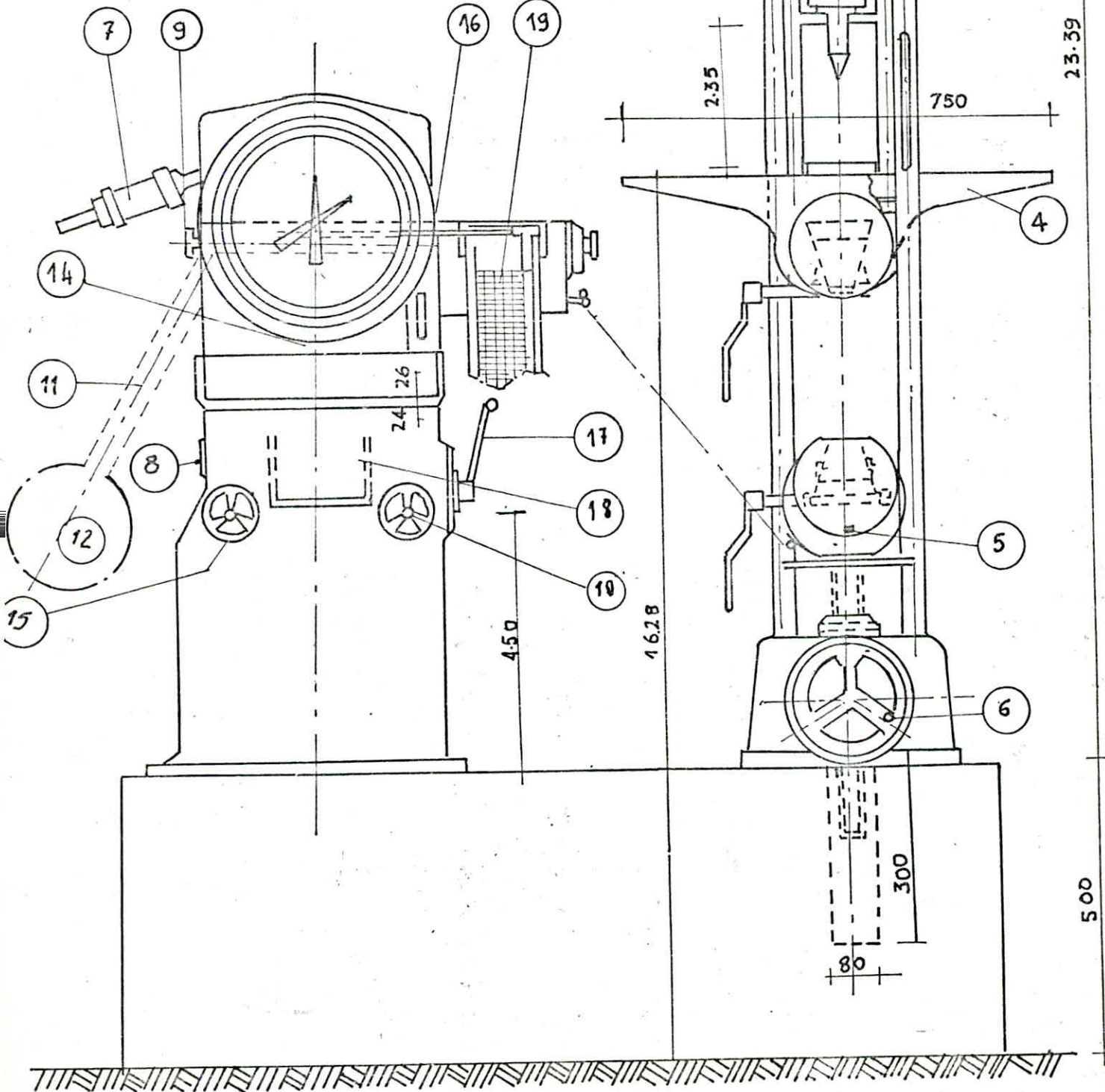


- Ⓒ - Emboutissage d'une feuille de Plexiglas avec poinçon évidé.

OTTO WOLPERT WERKE

U. 5

ech: 1/10



-- / LEGENDE --

- 1) TRAVERSE SUPERIEURE
- 2) COLONNE DE TRA CTION
- 3) APPUIS DE FLEXION ET COMPRESSION
- 4) PLATEAU DE COMPRESSION.
" DE FLEXION
- 5) TETE D'AMARRAGE INFERIEURE
- 6) VOLANT A MAIN
- 7) CONTRE - POIDS
- 8) COMMUTATEUR
- 9) VALVE DE RETOUR DE PENDULE
- 10) VOLANT A MAIN POUR COMMANDE DE PRECISION DE LA VITESSE
- 11) TIGE DE PENDULE
- 12) POIDS DU PENDULE
- 13) CYLINDRE DE MESURE
- 14) TUYAU D'HUILE DE FUITE
- 15) VOLANT A MAIN POUR DE RETOUR DE PENDULE
- 16) LECTURE DE LA VITESSE D'ESSAI
- 17) LEVIER DE LA COMMANDE
- 18) CUVETTE A HUILE
- 19) ENREGISTREUR

23.

Comme $\tau = A e^{-\alpha \sigma} \Rightarrow \ln \tau = \ln A - \alpha \sigma$
 $\Rightarrow \alpha \sigma = \ln A - \ln \tau = \ln A + \ln A \omega$

$$\text{D'où } \left[\tau = \frac{\ln A}{\alpha} + \frac{1}{\alpha} \ln \omega \right]$$

Pour décrire entièrement le comportement mécanique le principe que nous venons de définir est insuffisant à lui seul.

Aussi pour tenir compte d'autres paramètres nous avons également utilisé la relation de Jourkov qui exprime la dépendance du temps de rupture, de la résistance mécanique du matériau utilisé.

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

- $\left\{ \begin{array}{l} U_0 : \text{Energie d'activation} \text{ (Kcal/Mole)} \\ \sigma : \text{Charge en Kgf/cm}^2 \\ \delta : \text{Facteur de structure} \end{array} \right.$
 (Amorph ou cristallin)

Le but que l'on se fixe dans le cas de notre étude expérimentale est de déterminer pour le polyméthacrylate de méthyle, et dans les conditions expérimentales choisies, de définir la relation liant le temps de rupture à la contrainte.

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

Ceci, en déterminant pour chaque température les

Comme d'autre part nous disposons des deux relations

$$\left\{ \begin{array}{l} \tau = A e^{-\alpha E} \quad (1) \\ \tau = \tau_0 e^{\frac{U_0 - \delta E}{RT}} \quad (2) \end{array} \right.$$

nous tirons une troisième relation

$$\text{qui est } \alpha = \frac{\delta}{RT}$$

$$\text{D'où } \ln \alpha = \ln \frac{\delta}{R} - \ln T$$

Cette relation nous permettra de vérifier les valeurs de α trouvées en les comparant à la valeur donnée par Taguer à 20°C.

De la même façon les valeurs de A peuvent être vérifiées en utilisant la relation

$$\ln A = \ln \tau_0 + \frac{U_0}{R} - \frac{1}{T} \quad \text{tirée de (1) et (2)}$$

et la valeur de A à 20°C donnée par TAGUER

Notons que τ_0 est une constante dépendant de la nature du matériau utilisé; elle est définie comme étant le temps de relaxation des atomes.

Par ailleurs dans le cas des polymères et contrairement aux matériaux traditionnels la rupture est assurée par la rupture des liaisons chimiques et c'est à dire de liaison C-C. Car pour les copolymères l'énergie intermoléculaire est supérieure à l'énergie intramoléculaire ; alors que nous avons le cas contraire dans le cas de matériaux classiques.

La relation $\tau = \tau_0 e^{\frac{U_0 - \Delta U}{RT}}$

montre que si nous représentons $\ln \tau = f\left(\frac{1}{T}\right)$ nous obtenons des droites dont les pentes nous donnent $\frac{\Delta U}{R}$ pour des constantes données.

L'exploitation à contrainte nulle devant nous donner la valeur de ΔU_0 ce qui nous permet - tra de vérifier que la rupture est bien due aux liaisons chimiques.

ETUDE
.....

EXPERIMENTALE
.....

I. ESSAIS EFFECTUÉS

En vue de répondre au but initial que l'on s'est fixé dans le cadre de cette étude, nous avons catégorisé une série d'expériences comprenant :

A. Essai de type Vicat. (Courbe thermomécanique)

Cet essai a été réalisé dans le but de :

- a) Caractériser l'échantillon de polyméthacrylate de méthyle utilisé.

En effet c'est cet essai que l'on peut déterminer les températures de transition vitreuse et de fusion du matériau plastique.

- b) Définir le domaine de température de transformation du P.M.A. utilisé.

Cet essai a été réalisé sous différentes charges ce qui permet de déterminer l'influence de ces dernières sur la température de transition vitreuse T_g .

B. Essai de traction.

Pour définir l'influence de la température, de la température de déformation et contrainte, nous avons réalisé des essais de traction sur des éprouvettes en forme d'algues.

Ces mêmes essais nous permettent également d'exploiter les théories de durée de service et la relation de Jourkov.

DISPOSITIFS

EXPERIMENTAUX

Dispositif expérimental utilisé

I. Pour l'essai Vicat:

Le dispositif utilisé dans ce cas est un pénétromètre de type Vicat qui comprend

- Un cylindre creux au fond duquel est prévu l'emplacement de l'échantillon à étudier.
- Un bon thermomètre pour suivre la température.
- Une aiguille qui s'enfonce dans l'échantillon au fur et à mesure que celle-ci est portée à des températures de plus en plus élevées, est reliée à un micromètre qui permet de suivre l'enfoncement de l'aiguille en fonction de la température.
- l'échantillon baigne dans de l'huile qui assure une répartition uniforme de la température.

II. Pour l'essai de traction

Pour cet essai nous avons utilisé une presse hydraulique de marque OTTO WOLPERT WERKE (voir ci-jointe). Conçue normalement pour des essais pour béton et acier ce qui comprendrait la précision de nos résultats vu que l'ordre de grandeur des mesures effectuées sont bien plus comparables.

Pour ces essais nous avons utilisé des éprouvettes planes en forme d'halles, dont le grandeur est la même de celle des éprouvettes de la norme NF T 51-034.

Les dimensions exactes de ces éprouvettes sont relevées sur les tableaux de mesure.

Pour l'étude de ces essais en fonction de la température on nous avons été amené à concevoir le système suivant composant :

- Un four cylindrique en céramique de ϕ 90 mm et longueur $l = 100$ mm.

La substance chauffante est enroulée sur le cylindre et recouverte d'amiante.

Les températures sont programmées grâce à un thermostat un système à thyristors.

qui ne permettait une précision que de l'ordre de 5°C .

Conclusion : Le dispositif utilisé ne respecte pas d'une façon générale les conditions de norme et de précision qui exigeraient ces essais -

Aussi notre objectif en faisant cet étude se résume - t. elle a essayé d'approcher les prévisions théoriques.

De plus les essais mécaniques d'une façon générale ne nous donnent que des résultats statistiques. Ce qui nous a amené à réaliser plusieurs essais et à en choisir les ceux dont les résultats sont les plus caractéristiques.

RESULTS

RESULTATS :

I. Courbe thermomécanique :

(voir graphe n° 1)

Nous avons réalisé cet essai pour des charges de 0, 0,5, 1, 4, 5 kg)

Les résultats regroupés sur le graphe n° 1 permettent de faire les conclusions suivantes

- Les températures de transition vitreuses obtenues dépassent 100°C

Ceci nous permet de conclure que le polyméthacrylate de méthyle utilisé **est pas** plastifié

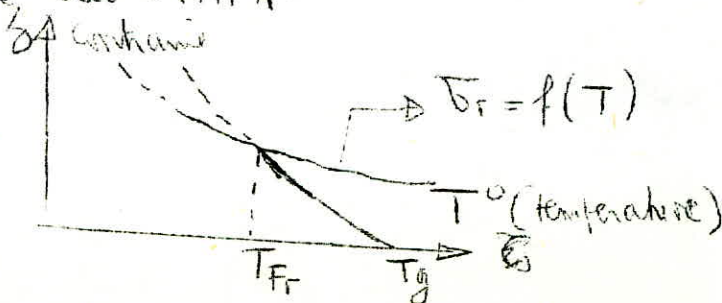
- Les mêmes températures diminuent en fonction de la charge.

et nous avons représentés sur le graphe n° 2 l'évolution de la constante δ (g/mm^2) en

fonction de T_g .

avec δ définie comme étant le rapport de la charge à la section S de l'aiguille du pénétrateur vicat.

Notons que pour cette courbe, la connaissance de la constante de résistance en fonction de la température $\sigma_r = f(T)$ nous permettrait de définir déterminer la température de fragilité du PMMA.



- Nous remarquons également que l'on peut distinguer sur cette courbe thermomécanique tous les états prévus par la théorie.

Enfin dans le cadre de l'application à la haute fréquence, on peut dire que le domaine de température qui a choisi expérimental est défini par :

$$95^{\circ} < T < 180^{\circ} \text{C}$$

Pour le thermoformage il faudra refroidir au dessous de 95°C .

II. Pour les essais de traction :

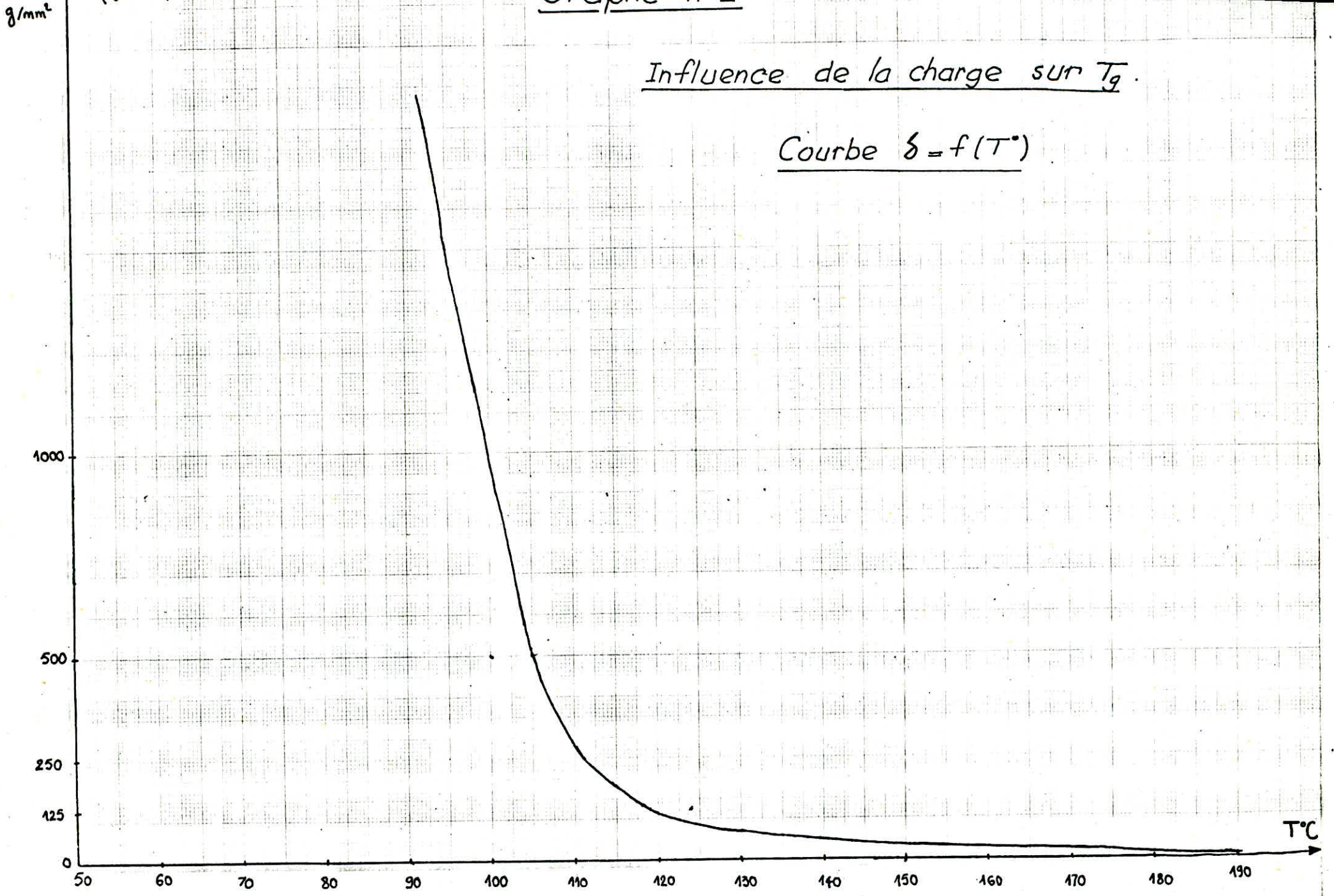
les résultats sont consignés sur les tableaux numérotés de 2 à 6.

- Le graphique n° 3 illustre l'influence de la vitesse et on remarque que les courbes $\sigma^* = f(\epsilon \%)$ sont décalées vers le bas haut quand on augmente la vitesse.
- Par contre le graphique n° 4 met en évidence l'influence de la température pour une vitesse de 50 cm/min . Dans ce cas les courbes $\sigma = f(\epsilon \%)$ sont décalées vers le bas quand la température augmente.
- Le graphique n° 5 représente la courbe $\ln \sigma_r = f(\sigma)$ et nous donne les valeurs de α et β pour chaque température. Ces valeurs sont consignées sur le graphique.
- Les graphes n° 6 et n° 7 permettent nous montrent que les valeurs trouvées pour A et α pour deux à différentes températures peuvent être considérées comme constantes pour les conditions expérimentales.
- Enfin les graphes n° 8 et 9 permettent de vérifier que la rupture des éprouvettes du PMM est bien due à la rupture des liaisons chimiques C-C puisque nous trouvons $\Delta U_0 \approx 46 \text{ kcal/mole}$ et que la théorie prévoit pour le PMMA un ΔU_0 de même ordre de grandeur (calculé avec $45 \rightarrow 50 \text{ kcal/mole}$).

Chapitre 11.2

Influence de la charge sur T_g .

Courbe $\delta = f(T)$



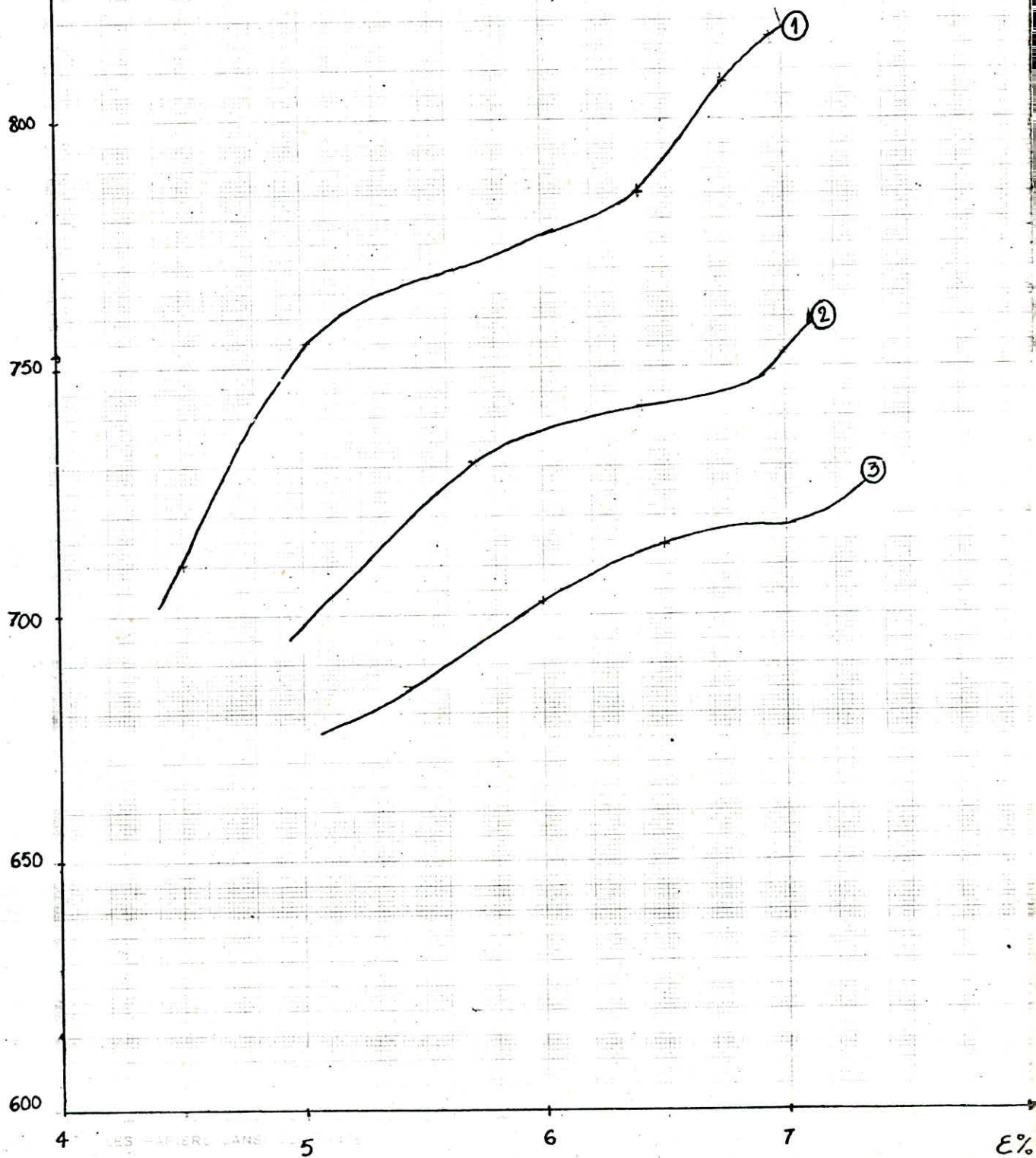
σ^*
(kgf/cm²)

Influence de la vitesse

Courbes $\sigma^* = f(\epsilon\%)$

- ① → $V = 50 \text{ cm/mn}$
- ② → $V = 10 \text{ cm/mn}$
- ③ → $V = 5 \text{ cm/mn}$

GRAPHE n° 3

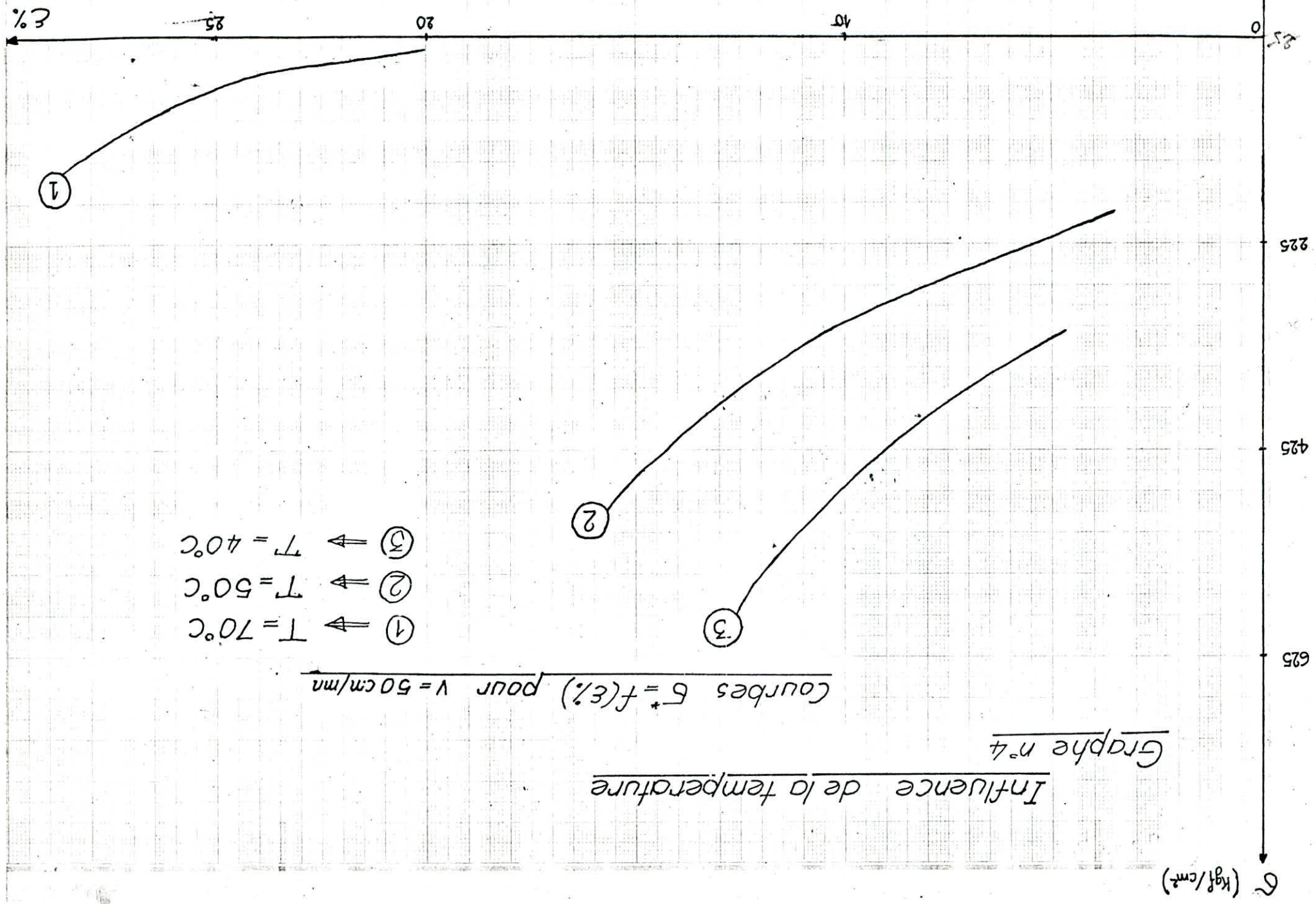


Influence de la température

Grappe n°4

Courbes $\epsilon^* = f(\epsilon\%)$ pour $v = 50 \text{ cm/min}$

- ① $\rightarrow T = 70^\circ\text{C}$
- ② $\rightarrow T = 50^\circ\text{C}$
- ③ $\rightarrow T = 40^\circ\text{C}$



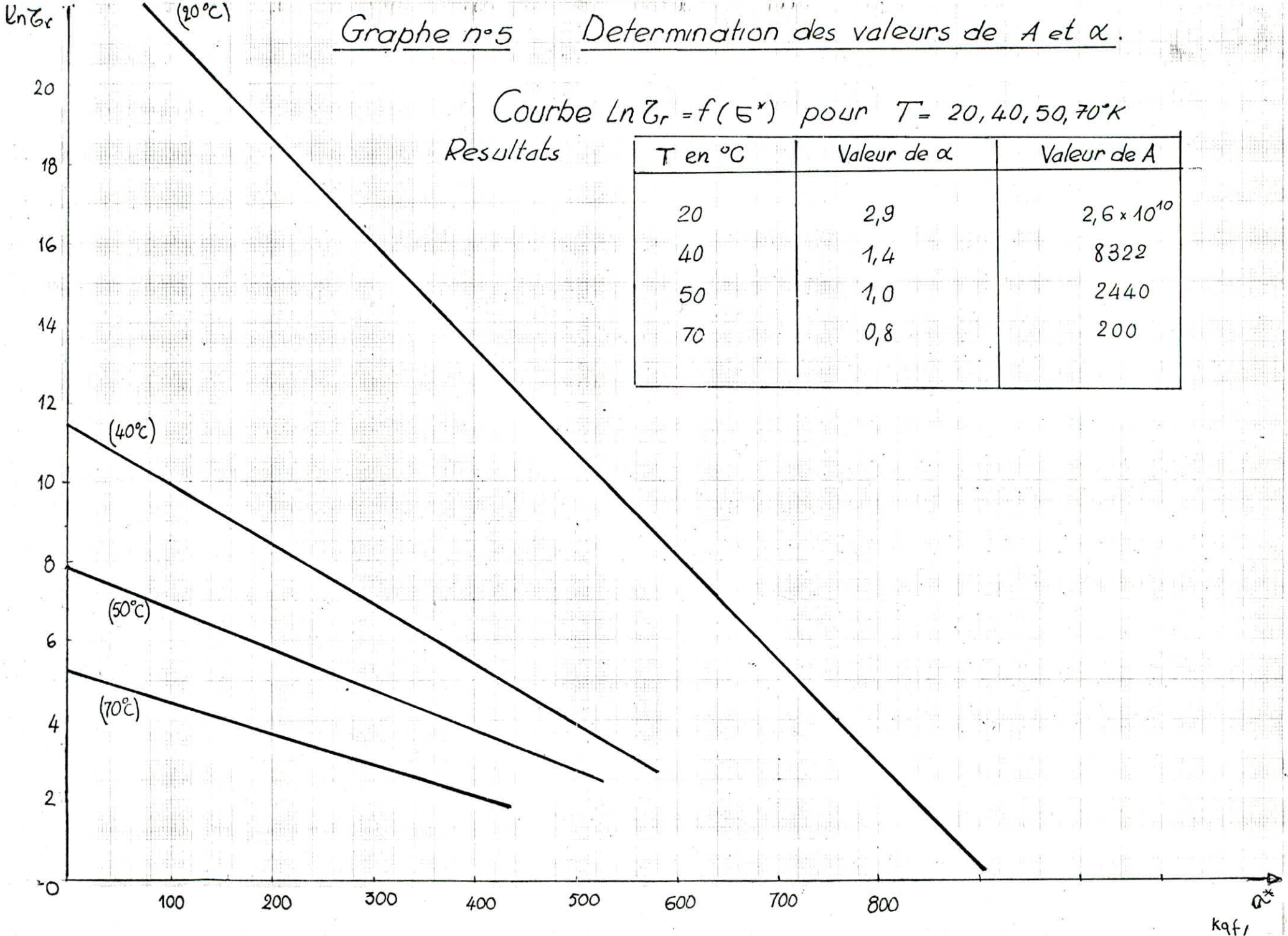
Graphe n°5

Determination des valeurs de A et α .

Courbe $\ln Z_r = f(\epsilon^*)$ pour $T = 20, 40, 50, 70^\circ K$

Resultats

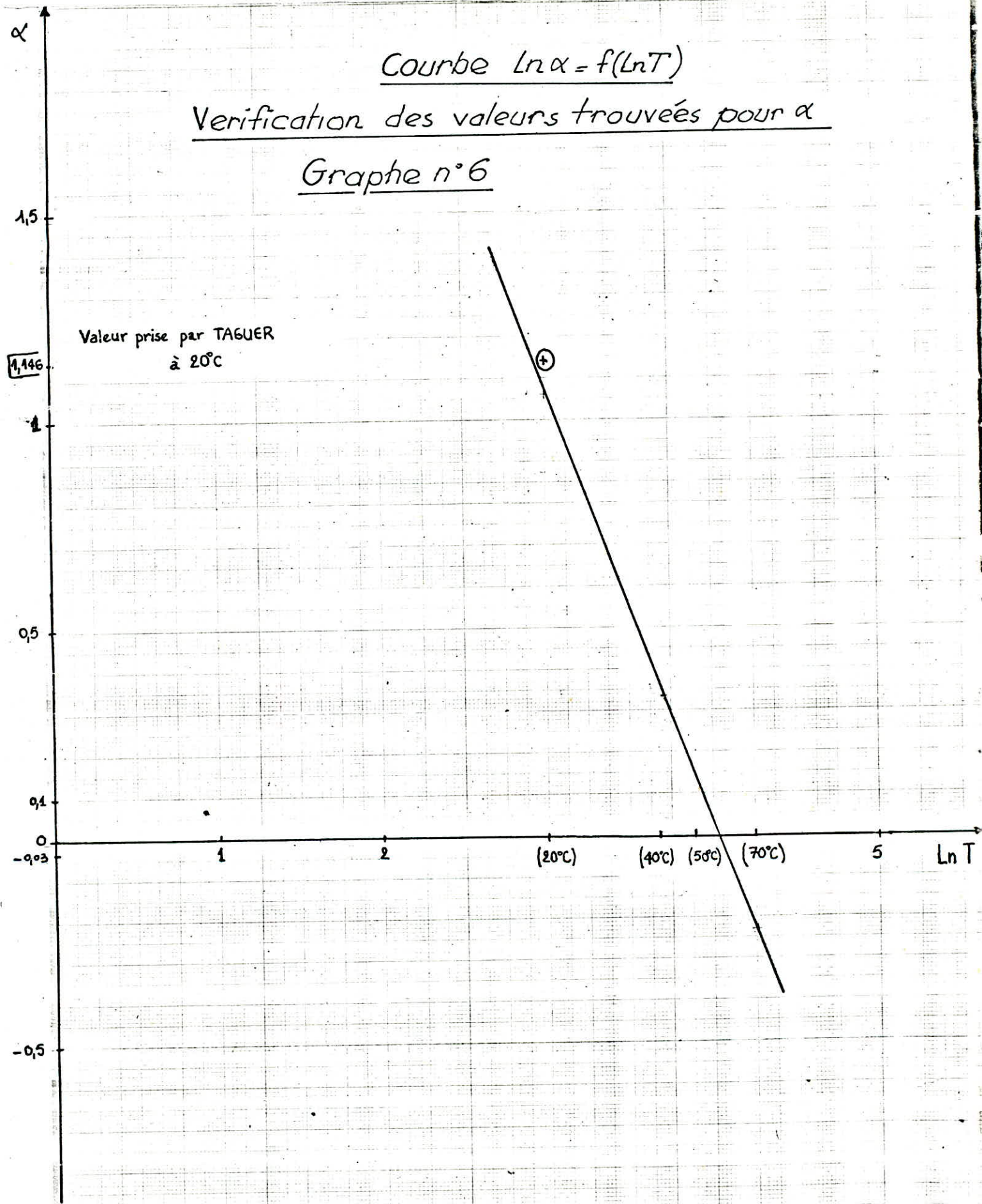
T en °C	Valeur de α	Valeur de A
20	2,9	$2,6 \times 10^{10}$
40	1,4	8322
50	1,0	2440
70	0,8	200



Courbe $\ln \alpha = f(\ln T)$

Verification des valeurs trouvées pour α

Graphe n°6



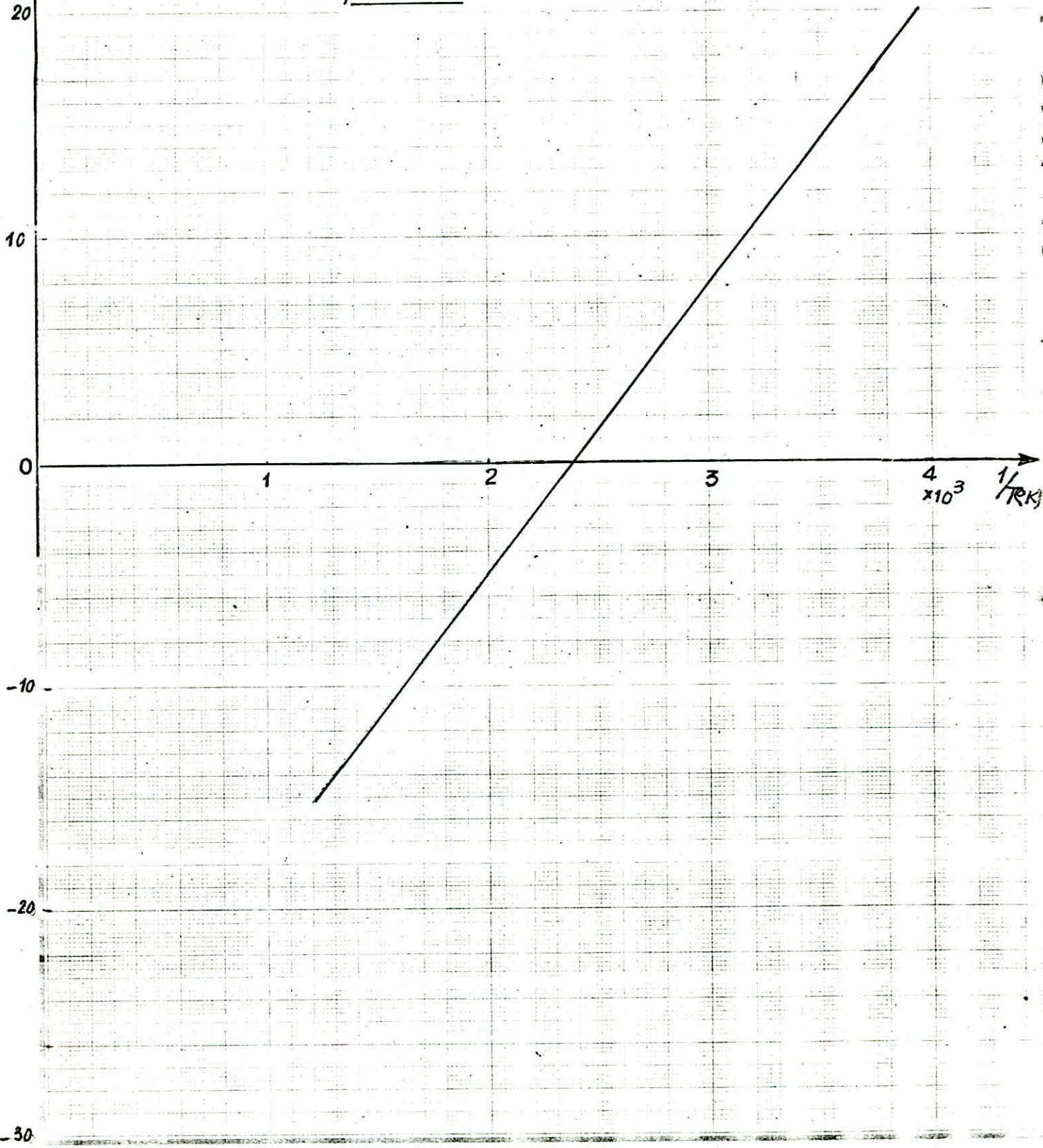
30 $\ln A$

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

Graph n° 7

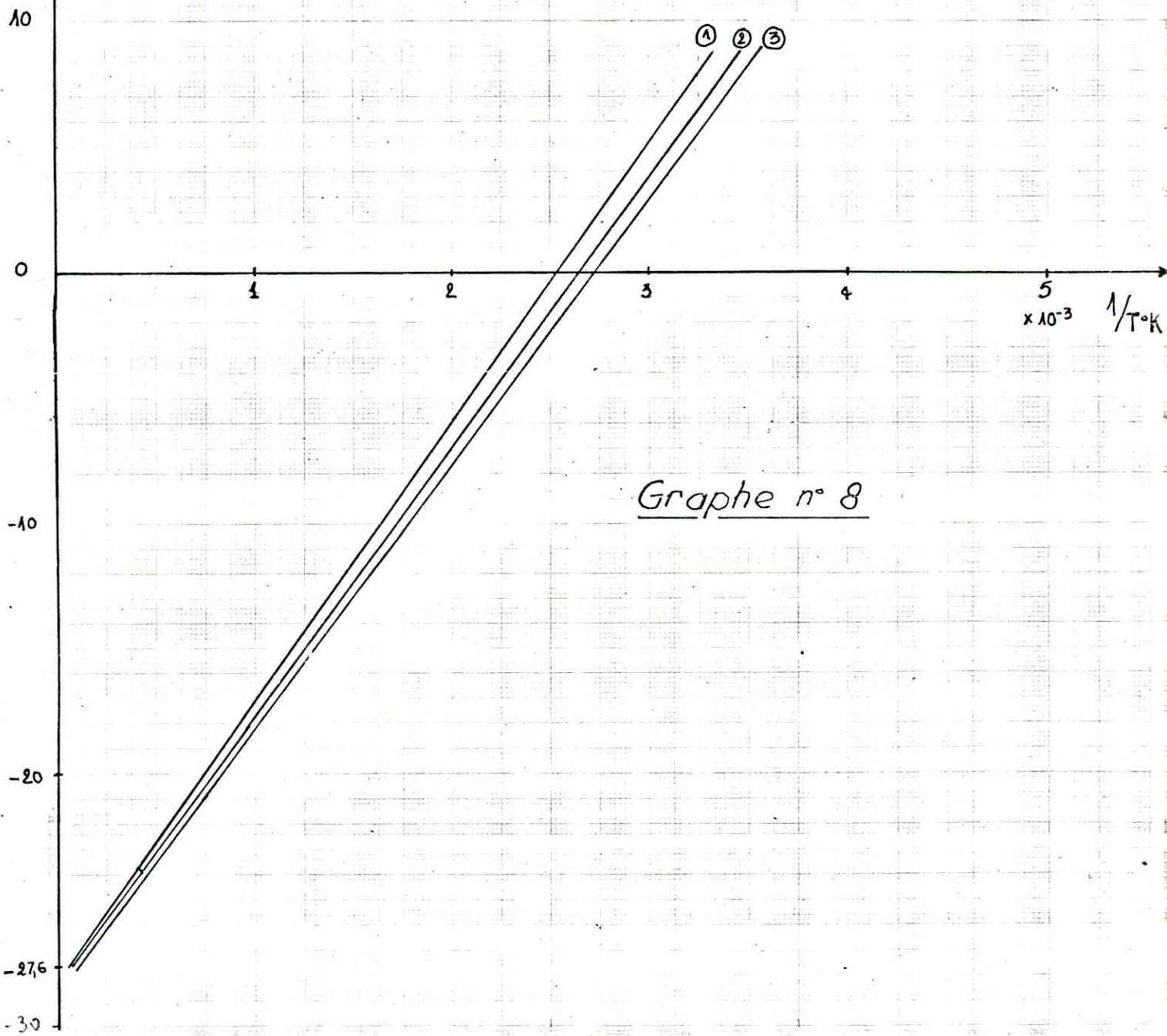
Verification des valeurs trouvées
pour A

valeur de A d'après
Taguer.



Determination de $\frac{\Delta U}{R}$ pour $\sigma^* = 2, 3$ et 4 kgf/mm^2

		Pentes	
①	→ $\sigma^* = 2 \text{ kgf/mm}^2$	→	$\frac{\Delta U_1}{R} = 22 \cdot 10^3$
②	→ $\sigma^* = 3 \text{ kgf/mm}^2$	⇒	$\frac{\Delta U_2}{R} = 19 \cdot 10^3$
③	→ $\sigma^* = 4 \text{ kgf/mm}^2$	⇒	$\frac{\Delta U_3}{R} = 21,5 \cdot 10^3$



Graphe n° 8

$\frac{R}{\times 10^3}$

Détermination de ΔU_0

Courbe $\frac{\Delta U}{R} = f(\sigma^*)$

Par extrapolation : $\frac{\Delta U_0}{R} = 23,2 \times 10^3 \Rightarrow \Delta U_0 = 46,4 \text{ Kcal/Mole}$

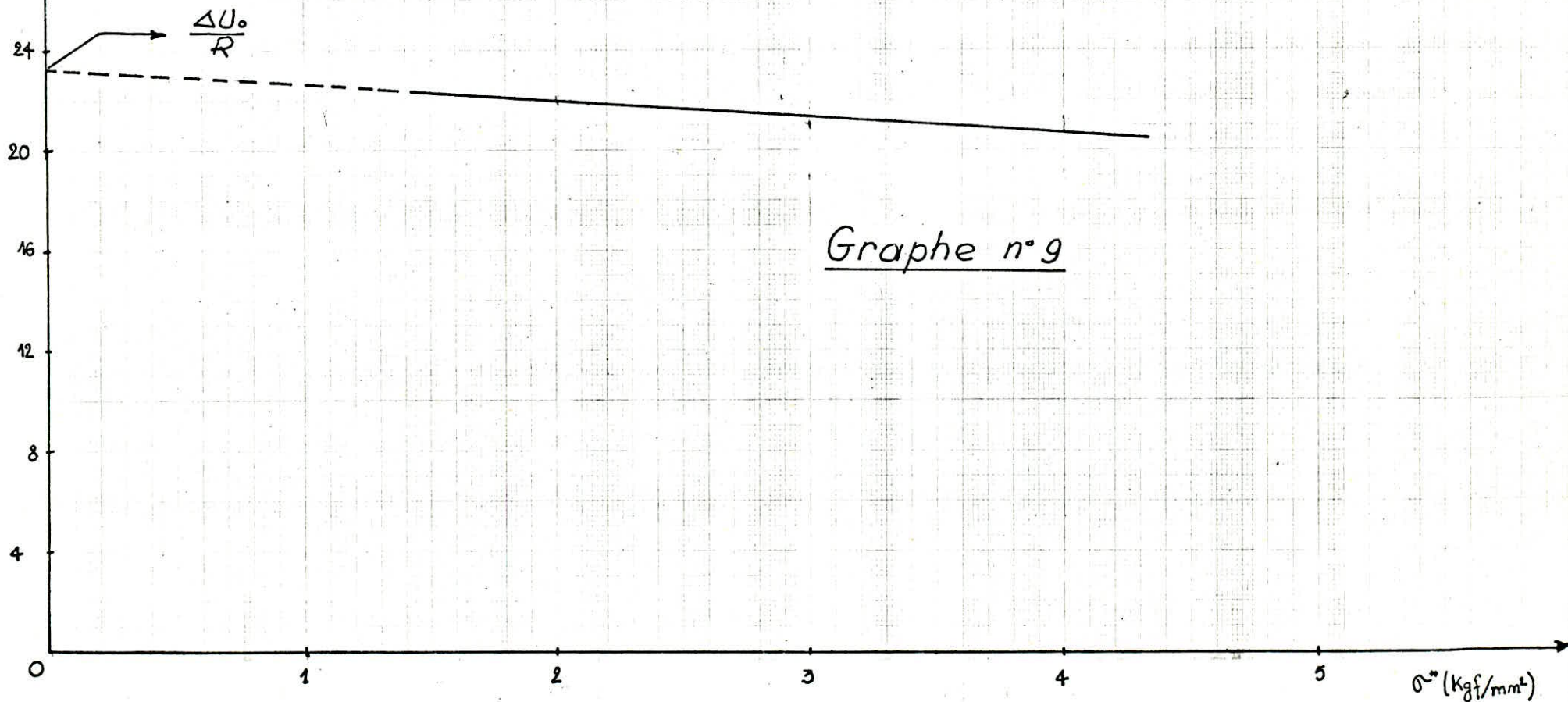


Tableau de valeurs des courbes thermomécaniques expérimentales $\epsilon = f(T)$

Charge 1 kg Vitesse de chauffe : 2°C/mn				Charge 2 kg Vitesse de chauffe 2°C/mn					
$\epsilon \cdot 10^{-2} \text{mm}$	T °C	$\epsilon \cdot 10^{-2} \text{mm}$	T °C	$\epsilon \cdot 10^{-2} \text{mm}$	T °C	$\epsilon \cdot 10^{-2} \text{mm}$	T °C	$\epsilon \cdot 10^{-2} \text{mm}$	T °C
2	83	310	160	10	82	294	134,5		
8	96	335	162	12	84	302	136		
12	101	350	163	15	86	310	137,5		
18	105	370	164	20	90	320	139		
30	108	390	165	24	92,5	340	142		
40	110	420	166	36	98,5	362	144		
70	113,5	450	167	45	100,5	380	146		
150	117,5	480	168	70	104,5	408	148		
180	120	544	168,5	85	106	420	149		
190	121,5	550	169	108	108,5	440	151		
204	125	570	169,2	120	109	472	152,5		
232	130	600	169,5	156	111	500	153,5		
222	138	620	169,7	180	112,5	530	155		
230	142			210	114,5	550	155,5		
250	150			234	116,5	580	156,5		
254	151			250	119,5	610	157		
280	156			272	127,5	640	157,5		
292	158			284	131,5				

TABLEAU N° 2

$T_{en}^{\circ}C$	V cm/m	Charge (Kg)	h en mm	b en mm	ΔL en mm	L_0	F en daN	σ (kgf/cm ²)	σ^* (kgf/cm ²)	ϵ %	σ_r	$L_n \sigma_r$
20	50	1	4.01	14.82	10	155	441	756.75	808.02	6.77	49	3.9
			3.95	14.90	11	158	440	762.47	815.56	6.96	40.5	3.7
			4.00	14.71	8	159	415	718.95	755.13	5.03	54	4.0
			4.10	14.95	10	156	443	737.71	785.07	6.41	30	3.4
			4.10	14.85	7	155	406	679.34	700.43	4.51	90	4.5
	10	1	3.98	15.01	11	158	410	700.40	749.18	6.16	58	4.06
			4.08	14.80	11	156	408	688.7	737.32	7.05	66	4.18
			3.90	14.94	8	157	384	672.60	706.72	5.12	69	4.23
			3.95	14.94	9	156	400	692	731.5	5.13	72	4.27
			4.00	15.05	10	157	412	697.60	742.32	6.41	74	4.30
	5	1	4.02	14.98	11	156	396	671.26	718.30	7.00	30	4.38
			4.05	14.95	8.6	159	386	649.43	685.50	5.49	76	4.33
			3.85	14.91	7	156	353	626.90	654.50	4.40	62	4.12
			3.87	15.02	7	160	352	617.66	644.69	4.37	75	4.31
			4.03	14.29	8	158	357	631.92	663.92	5.06	79	4.36

TABLEAU n° 3

T(°C)	V cm/min	Charge (kg)	h mm	δ(mm)	ΔL en mm	L ₀	F en daN	σ kgf/cm ²	σ* (kgf/cm ²)	ε %	τ _r	Ln τ _r
70	50	1	4.01	14.97	35	158	20	35.39	43.23	22.15	134.	4.9
			4.00	15.00	40	155	31	53.73	67.60	25.80	115.5	4.75
			3.98	14.98	39	160	24	42.21	52.5	24.37	148.5	5.00
			4.02	14.99	34	157	20	35.34	43.00	21.65	181.	5.2
			3.97	15.01	43	159	42	73.21	93.02	27.04	99.5	4.6
	10	1	3.98	15.00	67	160	27	46.66	66.12	41.87	165.5	5.11
			4.00	15.02	69	158	23	39.70	57.05	43.67	148.5	5.00
			4.02	14.99	70	157	18	31.57	45.66	44.58	145.5	4.98
			3.99	14.98	72	160	16	28.41	41.20	45.00	87.5	4.47
			3.97	15.00	65	157	17	30.57	43.00	40.62	131.5	4.88
	5	1	4.01	15.00	72	155	14	24.71	36.05	45.85	148.5	5.00
			4.02	14.98	74	158	19	25.39	37.52	47.74	151.5	5.02
			3.97	14.99	70	160	14	32.69	47.52	44.74	150	5.01
			4.00	15.01	75	160	17	29.43	43.24	46.87	156.	5.05
			3.98	15.00	77	158	12	21.65	32.21	48.73	141.	4.95

TABLEAU n° 4

Ten ^{°C}	v (cm/mm)	charge (kg)	h (mm)	b (mm)	ΔL (mm)	L ₀ (mm)	F (daN)	σ (kgf/cm ²)	σ* (kgf/cm ²)	ε %	Gr	Ln Gr
50	50	1	3.98	15.01	17	155	169	289.27	321	10.90	121,51	4.80
			4.00	15.01	19	158	190	324.03	363	12.02	68,03	4.22
			3.95	15.00	20	156	198	341.24	385	12.82	61,50	4.12
			4.02	14.98	18	160	178	302.92	337	11.25	84,78	4.44
			4.01	14.99	17	162	163	277.84	307	10.56	135.60	4.91
	10	1	4.00	15.02	22	156	152	259.27	295.24	14.10	55	4.00
			3.98	15.02	24	153	156	266.66	308.5	15.68	61,5	4.12
			4.02	14.99	23	160	175	297.26	340	15.62	90.0	4.5
			4.03	14.97	29	156	151	255.75	303.3	18.50	56.	4.03
			3.98	14.98	21	156	162	277.80	315.20	13.46	73.7.	4.3
	5	1	4.05	14.98	29	154	132	223.00	265.00	18.83	68	4.22
			3.97	14.98	32	158	148	253.80	305.21	20.25	99,5	4.60
			4.00	15.00	30	152	141	239.72	287.04	19.73	91	4.51
			4.02	15.02	33	155	150	253.88	309.00	21.71	116,7.	4.76
			3.97	15.01	31	154	190	325.09	390.54	20.12	94.5	4.55

TABIEAU n° 5

T_{en}°	Ven α_{en}	h (mm)	h (mm)	b (mm)	ΔL (mm)	L_0 (mm)	F (daN)	G (kgf/cm ²)	G^* (kgf/cm ²)	E_0	τ_r	$Ln \tau_r$
40	50	1	4.02	15.02	15	152	264	446.17	490.20	9.8	62.	4.13
			4.00	14.95	18	153	261	463.63	518.18	11.76	167.	5.12
			4.05	14.96	14	155	239	403.56	440.02	9.03	134	4.9
			4.00	15.00	13	156	220	374.21	405.40	8.33	110	4.7
			3.97	15.02	15	155	237	405.73	445.00	9.67	50	3.91
	10	1	4.01	15.05	19	156	221	374.58	420.21	12.17	40,5	3.70
			3.95	14.98	20	153	217	384.75	435.05	13.07	49,5	3.90
			4.00	14.97	19	154	226	358.75	403.02	12.33	68.	4.22
			4.02	15.01	22	156	212	352.31	402.00	14.10	110	4.7
			4.02	14.95	18	156	214	364.75	406.17	11.53	121,5	4.8
	5	1	3.98	15.07	26	156	203	346.71	404.50	16.66	122,7	4.81
			4.05	15.04	20	154	211	354.21	400.22	12.98	41.	3.72
			3.98	14.96	23	158	207	345.08	395.32	14.55	100,5	4.61
			4.00	15.03	21	156	197	335.08	380.19	13.46	131,5	4.88
			4.00	15.00	25	157	189	321.28	372.45	15.92	106.7	4.67

TABLEAU n° 6.

σ_r^* (kgf/cm ²)	T° C	T° K	1/T° K	ln σ_r	$\Delta U/R$
200	20	293	0.00341	3.7	22.10 ³
	40	313	0.00319	5.8	
	50	323	0.00309	8.5	
	70	343	0.00291		
300	20	293	0.00341	2.9	21
	40	313	0.00319	4.8	
	50	323	0.00309	7	
	70	343	0.00291		
400	20	293	0.00341	2.1	21.2
	40	313	0.00319	3.8	
	50	323	0.00309	5.5	
	70	343	0.00291		

CONCLUSION GENERALE

Au cours de ce travail nous avons pu approcher un bon nombre de résultats importants dont les applications pratiques sont hâtes aussi importantes.

Par ailleurs cela nous a donné l'occasion de nous initier à un domaine de recherche très vaste et égoûtement d'une très grande importance surtout dans le cas de notre pays où la chimie des polymères est amenée à prendre dès un essor considérable -

.....
REMERCIEMENTS.
.....

Mes plus vifs remerciements

-à MONSIEUR STONKOI pour son aide toute son aide et son devouement.

-et à tous ceux qui d'une façon ou d'une autre ont contribué à la réalisation de ce travail .

en particulier ALLEX M^d ARBIZKI , ANCHICHE FARID et KACI.

-M^{rs} AMADIE , HARROUNIA, HANITOU m'ont fait l'honneur de faire partie de mon jury. Qu'ils trouvent ici l'expression de ma profonde gratitude.

-il serait enfin vain de citer tous ceux qui ont contribué à ma formation.

Aussi je remercie l'ensemble du corps enseignant et tous mes camarades étudiants.

.....

