

LIMITES DE FLUAGE ET DE RELAXATION DES ACIERS
A LA TEMPERATURE ORDINAIRE

Par F. CAMPUS
Directeur du Laboratoire d'Essais des Constructions du Génie
Civil et d'Hydraulique Fluviale de l'Université de Liège

LIMITES DE FLUAGE ET DE RELAXATION DES ACIERS

A LA TEMPERATURE ORDINAIRE

I - Généralités.

On caractérise le fluage par un diagramme représentant l'allongement croissant en fonction du temps d'une éprouvette sous charge constante (fig. 1).

On admet que la tension reste invariable durant l'essai, ce qui revient à négliger toute contraction transversale. Cette hypothèse est entièrement justifiée pour les très faibles valeurs du fluage, presque nulles, correspondant à notre notion de limite de fluage.

La relaxation est caractérisée par un diagramme représentant la tension décroissante en fonction du temps (fig. 2) d'une éprouvette de longueur invariable.

En ce qui concerne le fluage, il a été constaté (1) qu'il est discontinu (fig. 3) sous l'effet de tensions faibles, voisines de la limite de fluage définie dans la note et reprise plus loin. (1)

Cette observation importante conduit à admettre que la courbe de fluage en fonction du temps possède pour ces tensions une asymptote parallèle à l'axe des temps. Ceci permet de tracer une courbe des allongements de fluage en fonction des tensions, (fig. 4) ou plutôt des allongements cumulés, ainsi qu'il sera indiqué plus loin.

De cette façon dans notre étude, tout en nous fondant sur les modes de représentation des phénomènes des figures 1 et 2, nous en avons déduit le système de représentation du fluage et de relaxation sous charge progressive de la fig. 4. D'autre part, il a été constaté et signalé (1) une réversibilité partielle de l'allongement de fluage et ce fait a été confirmé par d'autres expérimentateurs.

Il n'existe pas une théorie propre de la relaxation.

Ce phénomène est considéré comme le fluage à longueur constante, sous tension variable.

Cependant dans la pratique courante, on a le plus souvent affaire à cette forme de fluage, d'où l'un des buts principaux de notre étude, rechercher s'il existe une corrélation entre les deux phénomènes et tout d'abord entre la limite de fluage et la limite de relaxation. L'autre but principal est la recherche d'une corrélation entre ces deux limites et les caractéristiques mécaniques déduites des essais de courte durée.

Nous avons exécuté les essais suivants :

- a) essais préliminaires,
- b) détermination de la limite de fluage,
- c) détermination de la limite de relaxation.

Les essais ont été effectués sur des échantillons de natures diverses, de diamètres différents et provenant de fabrications courantes.

Les essais préliminaires sont destinés à mettre en évidence :

- 1) les propriétés mécaniques des éprouvettes usuellement déterminées par les essais de courte durée, mais en opérant d'une manière plus précise, plus analytique et plus détaillée que dans la routine normale ;
- 2) l'hétérogénéité éventuelle des éprouvettes de même nature.

Le caractère détaillé et analytique particulier des essais préliminaires est nécessaire à la recherche d'une corrélation entre les propriétés mécaniques déduites des essais de courte durée et les limites de fluage ou de relaxation. Il a effectivement permis le succès de cette recherche.

Nos recherches ont été effectuées scientifiquement mais suivant une conception technique et industrielle.

La précision des mesures a été choisie préalablement comme il est indiqué dans la note (1) ; ce point sera repris plus loin.

II - Nature des échantillons.-

Les essais ont porté sur 20 fils d'acier au carbone étiré à froid, de 7, 6, 5, 4, 3 et 2,5 mm de diamètre nominal et sur 16 barres d'aciers de compositions diverses et traités thermiquement de manières différentes, constituant une gamme assez étendue de qualités ; les diamètres en étaient de 12, 15, 16, 19 et 20 mm.

III - Conditions des essais préliminaires et résultats obtenus.-

Les essais préliminaires ont été organisés en vue de déterminer les éléments suivants :

- 1) Le module d'élasticité moyen, à partir d'un lot de 10 éprouvettes au minimum.
- 2) La limite élastique dite absolue, c'est-à-dire correspondant à la plus petite déformation permanente décelable.
- 3) La limite élastique proportionnelle

- a) pour une déformation permanente de 0,0005 %,
 - b) pour une déformation permanente de 0,001 %.
- 4) La limite élastique conventionnelle
- a) pour une déformation permanente de 0,1 %,
 - b) pour une déformation permanente de 0,2 %.
- 5) La tension de rupture.
- 6) L'allongement de rupture : mesuré entre repères distants de
- a) 10 diamètres,
 - b) 5 diamètres.
- 7) La striction.
- 8) Les diagrammes des déformations en fonction des tensions
- a) jusqu'à la rupture,
 - b) jusqu'au delà des limites de proportionnalité en distinguant les déformations élastiques et les déformations permanentes.

Les essais ont été effectués à la machine AMSLER de 20 tonnes, au régime de 2 à 20 tonnes suivant le diamètre des éprouvettes.

La température ambiante était voisine de 21°C.

Les mesures de déformations ont été effectuées avec une précision de 1×10^{-5} (longueur de la base 1000 mm), au moyen d'un élastocimètre réalisé dans les ateliers de nos laboratoires et déjà décrit dans notre note (1). Nous en rappelons succinctement la description.

Deux étriers sont serrés élastiquement sur l'éprouvette cylindrique, qu'ils embrassent par des couteaux annulaires dont l'espacement détermine la longueur initiale de mesure. L'un des étriers porte trois micromètres à cadran au 1/100e de mm, dont les palpeurs s'appuient sur les extrémités de trois barres de même nature que l'éprouvette. Les autres extrémités de ces barres sont pincées dans l'autre étrier et guidées à frottement doux par un troisième étrier fixé sur l'éprouvette à proximité du premier. Les micromètres sont disposés aux trois sommets d'un triangle équilatéral dont le centre est sur l'axe de l'éprouvette. Les résultats indiqués plus loin montrent que la sensibilité de cet extensomètre est supérieure à celle des appareils d'usage technique courant. Cependant nous n'avons pas poursuivi en l'élaborant des qualités d'hypersensibilité, mais plutôt de fidélité et de commodité.

Ce dernier facteur n'est pas négligeable dans des recherches de cette nature, mais constitue un grand garant de précision pratique.

Les mesures des déformations en fonction des tensions ont été exécutées de la manière suivante. La mise en charge s'effectue à la vitesse de $0,5 = 1 \text{ Kg/mm}^2/\text{sec}$. L'arrêt nécessaire pour faire la lecture des déformations totales demande environ 30 sec. Ensuite on effectue la décharge à la même vitesse et on effectue en 30 sec. également la lecture des déformations résiduelles instantanées après déchargement. On procède ensuite à une nouvelles mise en charge et ainsi de suite.

Avant tous essais, on déterminait le module d'élasticité par une mise en charge unique de toutes les éprouvettes de même nature et on les classait d'après les valeurs obtenues. On choisissait pour les essais préliminaires et les essais de fluage et de relaxation les éprouvettes dont les modules d'élasticité avaient les valeurs les plus voisines de la moyenne. Lorsque la dispersion était grande, l'essai détaillé de détermination des déformations en fonction des tensions était répété sur des éprouvettes dont les modules d'élasticité étaient les plus voisins de la moyenne.

Pour les essais de traction jusqu'à rupture, on a opéré suivant les prescriptions de la norme NBN 117/1950. La vitesse de la machine était réglée de manière que la charge unitaire croisse uniformément d'une quantité maximum de $1 \text{ Kg/mm}^2/\text{sec}$.

IV - Dispositif des mesures de fluage et de relaxation et conditions des essais.-

A/ Equipement thermostatique de la salle des essais.

La salle des essais est emprise sur un grand local de l'étage inférieur du bâtiment, chauffé par chauffage central. Elle est complètement à l'abri d'une modification de température extérieure. Les dimensions actuelles de la salle sont $6 \text{ m} \times 5,7 \text{ m} \times 3,8 \text{ m}$. Les cloisons doubles sont constituées de plaques de matériaux isolants, de 2 cm d'épaisseur chacune, l'épaisseur totale est de 12 cm. La salle n'a pas de fenêtres ; l'éclairage artificiel est assuré par des tubes fluorescents. L'entrée se fait par un sas dont les portes doubles ont la même constitution et la même épaisseur que les cloisons.

Les pertes de chaleur sont compensées par l'apport de calories provenant de six éléments chauffants de 500 W, placés sur deux parois parallèles à des hauteurs différentes.

Les éléments chauffants sont connectés à un thermostat "BEKSO" d'une sensibilité de $1/2$ degré. Des écrans formés de plaques d'éternit protègent les machines des radiations directes et un ventilateur électrique produit un brassage d'air uniformisant la température dans la salle.

Un contrôle permanent de la température est réalisé par un appareil enregistreur électronique "BROWN" d'une sensibilité de 0,2 degré et

à périodicité de contrôle de 2 min.

La température est en outre contrôlée indépendamment par l'opérateur au moyen d'un thermomètre à mercure dont la sensibilité est de 0,2 degré, suspendu au milieu de la salle à mi-hauteur des éprouvettes.

Diverses expériences de contrôle ont établi la nécessité de précautions aussi considérables pour les essais de détermination des limites de fluage et de relaxation mettant en jeu des fluages quasi nuls, et cela malgré la faible sensibilité thermique du type d'extensomètre employé. L'installation a donné pleine satisfaction.

B/ Type de machine adopté.

Le prototype de la machine de fluage a été construit entièrement dans les ateliers de nos laboratoires. Trois autres machines ont été fabriquées aux Ateliers DONNAY, S.A. à Herstal sans modifications notables. Nous disposons donc de 4 machines doubles, réalisant 8 postes de mesure indépendants, avec équipement complet pour les essais de fluage et de relaxation. Le principe de la machine est schématisé à la figure 5 pour chaque poste.

L'éprouvette (D) est fixée verticalement et maintenue d'une part par un ancrage supérieur (I) suspendu librement au levier (B), d'autre part par un ancrage inférieur (J) mobile, guidé par des vis (K). Le volant (L) permet, par l'intermédiaire d'un système d'engrenages (N), de déplacer verticalement l'ancrage inférieur (J). La distance entre les deux ancrages peut ainsi varier de 1000 mm à 900 mm.

La charge est constituée par des poids placés sur un plateau (P') mobile ou (P) suspendu à l'extrémité du grand levier (C). Elle est amplifiée suivant le cas de 10 à 100 fois grâce à un système de deux leviers (B) et (C).

La position horizontale du levier (C) est réglée par l'intermédiaire d'une vis (F) ; elle est contrôlée au moyen d'un niveau d'approximation (M') et d'un niveau de précision (M).

Les couteaux de support (H) et (G) sont placés sur les ailes du bâti (A). Le contrepoids (E) réglable permet d'assurer la position horizontale du levier (C) non chargé. Des cornières (O) assurent la stabilité transversale de l'ensemble. Les quatre machines sont placées côte à côte et forment un groupe compact.

C/ Détails de la machine (fig. 6).

a) Le bâti fermé d'une poutre Grey Din n° 85 (850/300 - âme 19 mm, ailes 36 mm, poids 291,7 Kg/m courant).

Le poids total du bâti est de 780 Kg. Cette masse élevée constitue une sécurité contre les actions extérieures pouvant provoquer des vibrations accidentelles de la machine et une garantie contre toute déformation.

D'autre part, elle contribue à assurer une stabilité thermique élevée, par la grande masse calorifique.

b) Le petit levier réalise une amplification de l'effort égale à 5. Il possède une forme soigneusement étudiée, rigide et économique. Il se compose d'une poutrelle PN - 22 renforcée au droit des supports et à l'emplacement du porte-mordaches supérieur. Le jeu entre la face latérale du porte-mordaches supérieur, prenant appui par une bille sur le petit levier et l'âme du bâti, est suffisant pour éviter tout frottement, même dans le cas où l'éprouvette provoquerait une légère rotation des mordaches.

c) Le grand levier est constitué d'une poutrelle D.I.N. n° 10 et réalise une amplification variable suivant le cas, de 2 à 20. Sur une barre de 40 mm de diamètre soudée à l'extrémité, on a placé un contrepoids mobile pesant environ 60 Kg. La liaison entre le grand et le petit levier est réalisée par une vis de 25 mm de diamètre, dont le pas est de 2 mm. Cette vis est suspendue par des billes. Une charge de 200 Kg sur le plateau produit avec l'amplification maximum, une tension dans le levier qui ne dépasse pas 5 Kg/mm². Dans ces conditions, toute possibilité de déformation permanente du levier est évitée même dans les cas les moins favorables.

d) Le système d'appui et de suspension est constitué de couteaux et de billes, de manière à réduire autant que possible les frottements tout en assurant la stabilité des leviers dans le sens transversal et sous les efforts maxima. L'emplacement des couteaux et des billes ainsi que leurs dimensions sont donnés à la figure 6. Les couteaux sont trempés et de forme correcte, de telle sorte que la sensibilité des machines est grande.

e) L'ancrage est formé par deux demi-mordaches cylindriques logées dans des porte-mordaches cylindriques dont les axes convergent légèrement vers l'éprouvette. Elles pincent les éprouvettes sur une longueur de 80 mm. Pour des échantillons de diamètre inférieur à 5 mm, nous nous sommes servis de demi-mordaches en acier traité, sans rainure axiale, entaillées à 45 degrés aux pas d'un millimètre. Pour les éprouvettes de 5 mm de diamètre ou plus, nous avons utilisé des demi-mordaches munies d'une rainure axiale, elle-même pourvue d'entailles.

La forme cylindrique des mordaches leur permet de pivoter légèrement dans leur logement et d'éliminer ainsi une torsion initiale résiduelle, existant éventuellement dans les éprouvettes prélevées sur des bobines de fil.

Aux extrémités des éprouvettes, on forge une tête pour empêcher les glissements.

Pour les échantillons de fil de 5 mm de diamètre, nous nous sommes également servis d'ancrages du système Franki-Smet, qui nous ont été fournis par Monsieur SMET. Dans ce système, l'extrémité du fil est calée dans une encoche soigneusement dimensionnée (2) au moyen d'une clavette en acier spécial.

Il nous a donné des résultats très satisfaisants.

f) Les résistances passives,

Il est à remarquer que l'influence des frottements devient proportionnellement d'autant plus grande que la charge diminue. Pour en réduire l'importance, nous avons utilisé le plateau de charge supplémentaire mobile, pour diminuer le coefficient d'amplification pour des fils de diamètre égal ou inférieur à 4 mm. D'autre part, l'influence des frottements est encore réduite grâce aux légères oscillations du plateau de charge jouant le rôle d'un pendule à basse fréquence. Ce mouvement régulier du plateau est entretenu grâce à un moteur électrique à basse tension. Les variations de tensions dans l'éprouvette qui en résultent, ne provoquent pas plus de $1,0 \times 10^{-6}$ d'allongement au maximum. La note (1) faisait déjà état d'une légère variation vibratoire de charge ayant un effet analogue.

D/ Mode opératoire pour la détermination de la limite de fluage.

En général, pour déterminer les limites de fluage, nous avons été guidés par nos essais préliminaires.

L'éprouvette étant placée sous une tension préalable très basse, on a monté l'élasticimètre décrit au paragraphe III. Après un délai de 16 à 20 heures environ, pour l'équilibrage thermique, on augmente la charge pour mettre le fil sous une tension voisine de la limite de proportionnalité amenant une déformation permanente de 0,001 %.

La première lecture est alors faite à l'élasticimètre entre 3 et 5 minutes environ après le début de la mise en charge. Cet instant est considéré comme le zéro pratique du fluage. Chaque lecture d'allongement pour une charge intermédiaire demande environ 30 à 60 sec.

Dans le cas où aucun fluage ne s'est produit pendant les premières 24 heures de sollicitation, on augmente la charge de $2,5 \text{ Kg/mm}^2$ à 5 Kg/mm^2 . Si, au contraire, on observe pendant le même temps un fluage plus grand que 1/100 de la déformation élastique, il est nécessaire de changer l'éprouvette et de recommencer l'essai sous une tension moins élevée.

Dans le cas où, après les premières 24 heures, nous avons observé un fluage de l'ordre de 0 à 1/200 de la déformation élastique, nous avons continué les observations pendant 120 à 166 heures. Après cette période de stabilisation, nous avons augmenté la charge. La position horizontale du levier est maintenue horizontale durant tout l'essai.

E/ Mode opératoire pour la détermination de la limite de relaxation.

On poursuit l'étude du phénomène de relaxation au moyen des mêmes machines que l'essai de fluage. Cette recherche est effectuée sur des éprouvettes provenant des mêmes aciers que ceux dont on s'est servi pour la détermination des limites de fluage.

Les allongements initiaux des éprouvettes correspondant à une tension déterminée sont mesurés à l'aide de l'élasticimètre décrit au paragraphe III. Après avoir produit dans la barre la tension prévue, voisine de la limite de proportionnalité de 0,001 %, on bloque la position du grand levier par rapport au bâti, réalisant ainsi la longueur constante de l'éprouvette. Le calage s'effectue au moyen d'un dispositif conçu dans notre laboratoire pour ces essais de relaxation ; il est relié à un contact électrique à courant alternatif à basse tension.

La constance de la longueur de l'éprouvette en cours d'essai est vérifiée par l'élasticimètre fixé sur l'éprouvette.

Entre 3 à 5 minutes après le début du chargement, on fait la première lecture de la longueur et en même temps on détermine la première charge nécessaire pour obtenir le décalage du grand levier de son point de fixation. On constate de la même manière dans la suite la diminution avec le temps, de la charge nécessaire pour obtenir le décalage.

F/ Discussion des conditions d'essai.

La discussion de l'erreur relative maximum

a) sur la déformation ;
b) sur la tension a été donnée dans la note (1), qui établit que l'imprécision la plus grande porte sur la mesure de la tension et provient surtout de l'irrégularité du diamètre et de la section transversale des éprouvettes.

Dans nos essais, nous croyons pouvoir éliminer comme causes d'erreurs les effets :

- 1) des variations de température,
- 2) de l'excentricité de l'effort,
- 3) de la courbure permanente de l'éprouvette,
- 4) du glissement dans les ancrages,
- 5) du frottement.

Les remarques suivantes sont utiles pour l'appréciation des conditions d'essai.

- 1) Le mode opératoire pour la détermination de la limite de relaxation est analogue à celui employé pour déterminer la limite de fluage.
 - 2) Le principe de la méthode opératoire pour déterminer la limite de relaxation est basé sur le moment du décalage indiqué déjà dans la note (1), toutefois employé d'une manière différente et avec une amplification qui augmente la sensibilité. C'est d'ailleurs un avantage d'employer la même machine pour déterminer les deux limites de fluage et de relaxation.
 - 3) L'observation de l'instant de décalage est facile, rapide et précise.
 - 4) Le décalage du grand levier de son point d'appui provoque un allongement inappréciable de l'éprouvette, c'est-à-dire de moins de 1×10^{-6} .
 - 5) Le décalage du grand levier provoque son inclinaison non observable avec un niveau de grande précision, d'une sensibilité de 0,0075 mm/m.
 - 6) La charge nécessaire pour obtenir le décalage est pesée à un gramme près.
 - 7) Trois essais répétés révèlent une dispersion du poids nécessaire pour provoquer le décalage variant entre 0 et 10 grammes au maximum.
 - 8) Dans les essais de fluage, le glissement de l'éprouvette dans l'ancrage provoque l'inclinaison des leviers, facilement corrigéable.
 - 9) Dans les essais de relaxation, le glissement dans les ancrages produit une chute de tension, résultant d'un léger raccourcissement de l'éprouvette décelable à l'élasticimètre monté sur l'échantillon.
Il peut être facilement corrigé, de préférence par le calcul.
- Au total, nous avons systématiquement recherché une grande robustesse du matériel et une grande simplicité des méthodes opératoires, garantissant de la sûreté et de la bonne fin de recherches systématiques. Elles ont aussi facilité la mise au point indispensable du matériel et des méthodes.
- 10) Les limites d'erreurs accidentelles ont été discutées dans la note précitée (référence bibliographique n° 1).

Pour les dilatations, c'est

$$\frac{d \delta}{\delta} = \frac{d \ell}{\ell} + \frac{d(\Delta \ell)}{\Delta \ell}$$

$$\frac{d \ell}{\ell} \text{ est certes inférieur à } \frac{1}{1000} \quad (\ell = 1000 \text{ mm}).$$

$\frac{d(\Delta \ell)}{\Delta \ell}$ dépend de l'importance même de $\Delta \ell$, que nous avons très largement estimée à 0,01 mm (une division de cadran). Ceci conduit à une très faible limite d'erreur pour les essais de fluage proprement dit, pour lesquels ($\Delta \ell$) s'élève à un nombre considérable de centièmes de mm, de même que pour les essais préliminaires (diagrammes des déformations en fonction des tensions). Pour les déterminations des limites de fluage et de relaxation, ($\Delta \ell$) est petit par définition, la limite d'erreur semble donc pouvoir devenir élevée. Mais les erreurs réelles ne le sont pas, en raison des précautions prises, qui font que $d(\Delta \ell)$ doit être beaucoup plus petit. Les corrélations dont il sera question plus loin établissent la modicité des erreurs accidentelles, car elles exigeraient pour être possibles un caractère systématique de ces erreurs, qui est exclus.

La limite d'erreur pour les tensions est

$$\frac{d \sigma}{\sigma} = \frac{d F}{F} + \frac{d \omega}{\omega}$$

Pour dF nous pouvons admettre 1Kg au maximum d'amplification, de telle sorte que $\frac{dF}{F}$ est toujours inférieur à $\frac{1}{1000}$.

Nous avons indiqué déjà que $\frac{d \omega}{\omega}$ est par contre, pour des produits industriels, l'élément qui donne lieu à la plus grande imprécision, qui peut atteindre 5% sur les fils et les barres laminées, 2% sur les barres mécanisées.

Il est possible de décupler la sensibilité des extensomètres par l'emploi de micromètres à cadran au millième de mm. Dans l'intérêt même de la bonne fin des essais, nous avons renoncé à y recourir, cette sensibilité majorée étant de nature à rendre les essais beaucoup plus incertains et capricieux, en dépit des précautions d'installation et d'opération qui ont été décrites. Nous pensons que ce point de vue, qui relève de l'appréciation professionnelle de l'expérimentateur, est justifié par les résultats.

V - Limites de fluage et de relaxation.

A/ Définitions.

Nous croyons utile de rappeler notre définition de ces limites, telle qu'elle a été exposée dans notre note précitée (réf. Bibl. n° 1).

Nous appelons limites de fluage et de relaxation les tensions en dessous desquelles ne se produisent pas de fluage ni de relaxation. Cette définition est totalement différente de celle que Mr. R. L'HERMITE donne (3) d'une autre "limite de fluage", qu'il y aurait lieu d'appeler "tension critique de fluage", nous y reviendrons plus loin.

Notre définition implique que les limites de fluage et de relaxation ont une existence. Cela est contesté, surtout d'une manière théorique (4). La vieille loi de Hooke si familière commence à être battue en brèche ; on lui reconnaît un domaine de moins en moins étendu (5).

Nous avons nous-même relevé des valeurs de limites de proportionnalité théorique très basses, inférieures aux valeurs techniques communément admises. Elles résultent de l'emploi d'un extensomètre certes assez sensible mais qui n'ambitionne cependant pas, sous ce rapport, ainsi qu'il est dit plus haut, à des records d'hypersensibilité. Dans un travail antérieur (6), nous écrivions : "... si l'on imagine une série d'appareils de sensibilité croissante, ils réaliseront un pouvoir séparatif toujours croissant certes, mais jamais suffisant pour qu'on puisse dire avec assurance que tel point correspond à la limite de proportionnalité". L'extrapolation théorique permet de formuler l'hypothèse que la limite d'élasticité est nulle ; il doit dès lors en être de même des limites de fluage et de relaxation. Mais on ne peut attendre de l'expérience qu'elle le prouve, car l'infinie sensibilité des appareils nécessaires à une telle démonstration entraînerait des erreurs accidentelles certes considérables.

Mais il est juste d'invoquer des études théoriques qui postulent l'existence d'une limite élastique et, par conséquent, permettent aussi la conception d'une limite de fluage ou de relaxation. M. de Courcel écrit : "La déformation transcristalline se manifeste seulement à partir d'une certaine tension au-dessous de laquelle les déformations sont élastiques" (7).

Or, le fluage de l'acier à la température ordinaire se produit en dessous de la température dite "d'équicohésion" et résulte donc de déformations transcristallines. Telle est aussi l'opinion de N.F. MOIT (leçon faite à l'Université libre de Bruxelles le 23 Septembre 1947) (8). Le fluage en question est appelé "transitoire" (transient creep) par cet auteur. P. LAURENT et M. EUDIER (9) font état d'une limite élastique des polycristaux, la justifient par la théorie de la consolidation d'interaction et déduisent de cette théorie l'existence d'une limite in-

férieure de la charge de relaxation, qui correspond naturellement aux notions de limite de fluage et de limite de relaxation définies plus haut.

Nous ne croyons pas qu'il soit oiseux d'évoquer très sommairement ces considérations théoriques, parce qu'elles permettent de mieux préciser notre point de vue, plus pragmatique.

Quoiqu'il en soit de l'existence théorique des limites de fluage et de relaxation, notre recherche n'a pas le but philosophique de les établir. Plus modestement, elle se propose seulement de reconnaître s'il existe des tensions en-dessous desquelles les déformations de fluage et de relaxation sont très faibles, inférieures par exemple à un faible pourcentage de la déformation élastique correspondante. C'est ce que nous appelons les limites de fluage et de relaxation conventionnelles, notions conformes à celles des limites conventionnelles de proportionnalité, d'élasticité, de rupture, etc. Il est naturellement plus facile de mettre éventuellement de telles limites en évidence, dans un but purement technique et sans inférence théorique. Les déterminations de ces limites sont aussi beaucoup plus sûres que celles de limites théoriques ou absolues, qui ne peuvent être obtenues que par extrapolation.

B/ Déterminations.

Selon les considérations qui précèdent, nous déterminons les limites précitées comme suit.

Pour la limite de fluage, l'éprouvette est mise en tension sous une charge permanente progressive. La première charge est voisine de la limite de proportionnalité, mais inférieure (cfr. Par. IV = D), ne donnant lieu à aucun fluage. La charge est alors majorée par paliers jusqu'à ce que de très légères déformations de fluage soient observées. Les charges sont maintenues jusqu'à ce que ces déformations soient arrêtées. Elles sont appliquées en nombre tel que l'on dispose des allongements de fluage sous trois ou quatre tensions peu supérieures à la limite. On trace alors, en fonction de ces tensions la courbe des fluages cumulés, c'est-à-dire que pour chacune des tensions, on considère la somme des fluages qui se sont produits sous cette tension et aussi sous les tensions inférieures. Cette courbe est nécessairement croissante avec la tension et plus régulière que la courbe des fluages isolés (fig. 4).

L'intersection de cette courbe avec l'axe des tensions, obtenue par extrapolation, donne une valeur approximative de la limite de fluage théorique. Cette notion peut faire l'objet de réserves.

L'intersection de la courbe avec les droites de 0,5% ou de 1% de la déformation élastique indique la limite conventionnelle. Ce point est assuré, les dispositions étant prises pour qu'il soit encadré par des points expérimentaux.

Pour apprécier cette méthode, il ne faut pas perdre de vue que l'on opère au voisinage de la limite. Les déformations permanentes sont donc très petites et n'entraînent pas de modifications structurales ni métallurgiques appréciables. Le recours aux fluages cumulés a pour effet de pallier les conséquences d'une durée éventuellement insuffisante de maintien d'un palier de chargement, encore que de grandes précautions soient prises à cet égard pour apprécier la stabilisation du fluage. Nous croyons la méthode réellement efficace, du point de vue principe autant qu'en raison des résultats.

Pour déterminer la limite de relaxation, il est apparu, lors des essais de mise au point, qu'il est nécessaire comme pour le fluage de recourir à une courbe d'effets cumulés. Or, il n'a pas de sens physique de recourir à une cumulation de proportions de relaxation, comme on pourrait être tenté de le faire. Il y a d'ailleurs sous ce rapport un écueil. Si l'on se fixe un pourcentage défini de relaxation pour déterminer la valeur de la limite conventionnelle, comme l'erreur relative augmente lorsque la charge diminue, on peut trouver que la proportion de relaxation ne diminue pas avec la charge. Il n'est pas alors possible de définir une limite de relaxation, dont le mode de mesure (cfr. § IV = E) implique toujours une variation de charge, si légère soit-elle. La détermination de la limite de fluage est exempte de cette difficulté.

Pour l'éviter, il suffit de considérer l'essai de relaxation comme un essai de fluage à longueur constante sous tension variable, en considérant qu'au voisinage de la limite, cette variation de tension est faible et négligeable vis à vis de la tension même. Dès lors, on peut raisonner et opérer comme suit. Soient σ la tension initiale et ϵ l'allongement constant correspondant. Lorsque la tension est devenue $\sigma - \Delta\sigma$, l'allongement de fluage correspondant est $\frac{\Delta\sigma}{E}$, sous tension quasi-constante. On poursuit l'expérience jusqu'à stabilisation de $\frac{\Delta\sigma}{E}$ et on la répète sous charge initiale progressive. On trace ensuite la courbe des fluages cumulés $\sum \frac{\Delta\sigma}{E}$ en fonction des tensions initiales successives. L'intersection de cette courbe extrapolée avec l'axe des σ définit, comme pour le fluage, la limite théorique ou absolue de relaxation. Son intersection avec les droites de 0,5 % ou 1% de la déformation élastique définit la limite conventionnelle de relaxation.

Par cette méthode, la détermination de la limite de relaxation n'est guère plus compliquée que celle de la limite de fluage.

VI - Résultats.-

A/ Hétérogénéité des échantillons.-

Comme nous l'avons indiqué au § 1, nous croyons pouvoir caractériser l'hétérogénéité des éprouvettes destinées aux essais de fluage au moyen des essais préliminaires, en mesurant le module d'élasticité jusqu'à la limite de proportionnalité (0,001 % de déformation permanente).

Les mesures du module d'élasticité étant effectuées pour chaque nuance d'acier sur dix éprouvettes au minimum, on en a déterminé l'écart probable, exprimé en pourcents de la valeur moyenne du module d'élasticité.

On peut remarquer que l'écart probable ainsi exprimé est moins élevé lorsqu'il s'agit de fils tréfilés, que dans le cas de barres, ce qui peut être prévu. Dans un cas seulement sa valeur se montre assez élevée pour un fil, mais il s'agit d'un fil de 2,5 mm de diamètre et peut-être la précision de la machine de traction est elle insuffisante (machine de 20 tonnes au régime de 2 tonnes).

Généralement pour le fil tréfilé, l'écart probable exprimé en pourcent de E_m ne dépasse pas 1,5 %, tandis que pour les barres (brutes de laminage), sa valeur atteint 3,87 % au maximum.

B/ Corrélation statistique entre les limites de fluage et de relaxation.-

a) Généralités.

Rappelons sommairement les principes de la corrélation statistique.

Construisons un diagramme ayant pour abscisses les valeurs de la limite de fluage σ_f , soit théorique, soit conventionnelle, et pour ordonnées les valeurs de la limite de relaxation σ_r .

Nous pouvons admettre que ces deux valeurs obéissent chacune séparément à la loi de Gauss. C'est en somme la généralisation de la loi de Gauss dans le cas de deux paramètres. La courbe de Gauss est remplacée par une surface de probabilité. Les coordonnées du centre de gravité du système de points obtenus sont données par

$$\sigma_f = \frac{\sum \sigma_f^2}{n} \quad \sigma_r = \frac{\sum \sigma_r^2}{n}$$

Les écarts quadratiques moyens relatifs aux deux axes de référé-

rence sont

$$a_{\sigma_f}^2 = \frac{\sum (\sigma_{if} - \sigma_{mf})^2}{n} \quad a_{\sigma_r}^2 = \frac{\sum (\sigma_{ir} - \sigma_{mr})^2}{n}$$

On définit le coefficient de corrélation par

$$r = \frac{\sum (\sigma_{if} - \sigma_{mf}) (\sigma_{ir} - \sigma_{mr})}{\sqrt{\sum (\sigma_{if} - \sigma_{mf})^2 (\sigma_{ir} - \sigma_{mr})^2}}$$

La valeur de r est le rapport du produit d'inertie pris par rapport à des parallèles aux axes passant par le centre de gravité à la moyenne géométrique des moments d'inertie du système de points par rapport aux mêmes axes.

Le coefficient de corrélation est une mesure de la relation existant entre les deux variables ; il est égal à ± 1 , dans le cas d'une relation linéaire.

Si pour différents intervalles de σ_f on prend les valeurs moyennes de σ_r , on obtient la ligne de régression

σ_r en σ_f qui est

$$\sigma_r = r \frac{a_{\sigma_r}}{a_{\sigma_f}} \sigma_f$$

De même, la ligne de régression de σ_f en σ_r est

$$\sigma_f = r \frac{a_{\sigma_f}}{a_{\sigma_r}} \sigma_r$$

La loi de répartition est,

$$f(\sigma_f, \sigma_r) = \frac{N}{2\pi} e^{-\frac{1}{2} h^2}, \text{ dans laquelle}$$

$h^2 = A \sigma_f^2 + 2 B \sigma_f \sigma_r + C \sigma_r^2$ représente pour différentes valeurs de h^2 des ellipses homothétiques situées dans divers plans horizontaux (fig. 7).

La constante N est déterminée par la condition que

$$\iint f(\sigma_f, \sigma_r) d\sigma_f d\sigma_r = 1.$$

Les ellipses représentant la surface peuvent définir des probabilités différentes correspondant à divers pourcentages de points. Les tables de Pearson permettent facilement de trouver les valeurs de h correspondant aux pourcentages désirés.

Ainsi, on peut déterminer les paramètres A, B, C

$$A = \frac{1}{a \sigma_f (1 - r^2)} \quad C = \frac{1}{a \sigma_r (1 - r^2)}$$

$$B = \frac{-r}{a \sigma_f a \sigma_r (1 - r^2)}$$

on a également

$$N = \frac{1}{a \sigma_f a \sigma_r \sqrt{1 - r^2}} \quad \text{et} \quad \text{tg } 2 \alpha = \frac{2 B}{A - C}$$

Une ellipse ainsi obtenue est inscrite dans un rectangle dont le centre coïncide avec le centre de gravité du système de points, dont les côtés sont parallèles aux axes de référence. Les points de tangence du rectangle et de l'ellipse sont les points d'intersection des lignes de régression et de l'ellipse.

Le côté du rectangle parallèle à $0 - \sigma_f$ mesure $2 h a \sigma_f$, le côté parallèle à $0 - \sigma_r$ vaut $2 h a \sigma_r$.

b) Corrélation statistique entre les limites théoriques de flange et de relaxation.-

Nombre des essais $n = 33$

pour 99,8 % de points $h = 3,53226$

Coordonnées du centre de gravité : $\sigma_{m^f} = 33,82$
 $\sigma_{m^r} = 32,08$

Écarts quadratiques moyens : $a \sigma_f = 16,39$
 $a \sigma_r = 14,566$

Coefficient de corrélation : $r = 0,96877$

L'équation de l'ellipse est :
 $0,0605 \sigma_f^2 - 0,13196 \sigma_f \sigma_r + 0,0766 \sigma_r^2 = 12,477$

$\text{tg } 2 \alpha = 8,196$

$$\alpha = 41^{\circ}32'$$

Valeurs des demi-axes de l'ellipse

$$a = 77,28$$

$$b = 5,264$$

Rectangle circonscrit :

$$\begin{array}{l} \text{longueur du côté parallèle à l'axe } \sigma_f = 115,7 \\ \text{longueur du côté parallèle à l'axe } \sigma_r = 102,90 \end{array}$$

c) Corrélation statistique entre les limites de fluage et de relaxation y compris les limites théoriques et conventionnelles.-

$$\begin{array}{l} \text{Nombre des essais } n = 66 \\ \text{pour } 99,8\% \text{ de points } h = 3,53226 \end{array}$$

Coordonnées du centre de gravité :

$$\sigma_m^f = 35,312 \qquad \sigma_m^r = 34,63$$

Ecart quadratique moyen :

$$a_{\sigma_f} = 16,12 \qquad a_{\sigma_r} = 16,18$$

Coefficient de corrélation : $r = 0,949$

Ligne de régression σ_r en σ_f :

$$\sigma_r = 0,949 \frac{16,18}{16,12} \sigma_f = 0,953 \sigma_f$$

Ligne de régression σ_f en σ_r :

$$\sigma_f = 0,949 \frac{16,12}{16,18} \sigma_r = 0,945 \sigma_r$$

L'équation de l'ellipse est :

$$0,0385 \sigma_f^2 - 0,023 \sigma_f \sigma_r + 0,0382 \sigma_r^2 = 12,477$$

$$\operatorname{tg} 2\alpha = 76,6$$

$$2\alpha = 89^{\circ}10'$$

$$\alpha = 44^{\circ}35'$$

$$\operatorname{tg} \alpha = 0,9523$$

Demi-axes de l'ellipse :

$$a = 79,60$$

$$b = 12,86$$

Rectangle circonscrit :

$$\text{Longueur du côté parallèle à } O - \sigma_f = 56,94 \times 2$$

$$\text{Longueur du côté parallèle à } O - \sigma_r = 57,15 \times 2$$

On constate que dans les deux cas considérés, les coefficients de corrélation sont très voisins de l'unité, ce qui permet de conclure que statistiquement et pratiquement la limite de fluage est égale à la limite de relaxation (fig. 8).

Comme nous l'avons remarqué au chapitre précédent, on peut estimer que l'hétérogénéité des échantillons est relativement petite. La dispersion limitée, trouvée entre les limites de fluage et de relaxation est imputable aux erreurs accidentelles des mesures.

On n'est pas surpris de l'identité des limites de fluage et de relaxation. Comme nous l'avons indiqué au § V, il s'agit de modalités différentes du même phénomène. Il est certes nécessaire d'établir cette identité par l'expérience plutôt que d'en faire un postulat rationnel. Cependant, si l'expérience avait établi une différence systématique, non accidentelle, entre ces deux limites, on se rend bien compte qu'il eût été difficile d'en donner une explication plausible, alors que l'identité des deux limites, correspondant à des fluages pratiquement nuls, est au contraire tout-à-fait satisfaisante pour l'esprit. Outre ce résultat, la corrélation a aussi comme avantage de permettre l'appréciation de la valeur pratique des méthodes et de leur précision, compte tenu de l'hétérogénéité matérielle inévitable.

C/ Comparaison entre les limites de fluage et de relaxation et les caractéristiques des essais.-

Nous avons comparé les caractéristiques mécaniques des aciers trouvées lors des essais préliminaires, ainsi que les limites de fluage et de relaxation.

Les valeurs correspondant aux divers échantillons ont été portées en ordonnées sur le diagramme.

On a indiqué en Kg/mm^2

a) la tension de rupture,

- b) la limite élastique à 0,2% de déformation permanente,
- c) la limite élastique à 0,1% de déformation permanente,
- d) la limite d'étirage,
- e) la limite de proportionnalité à :

0,001% de déformation permanente,
 0,0005% de déformation permanente,
 0,0000% de déformation permanente,

- f) la limite de fluage,
- g) la limite de relaxation.

A partir de cette échelle de comparaison, on a constaté que les limites de fluage et de relaxation sont voisines des limites de proportionnalité et, à part quelques exceptions, il est possible de généraliser cette observation.

D/ Essais complémentaires.

Selon le paragraphe précédent, pour 85 pourcents environ des essais, les limites de fluage et de relaxation sont voisines de la limite de proportionnalité.

Cependant dans quelques cas, elles sont différentes. Lorsque la limite de fluage est inférieure à la limite de proportionnalité, on peut mesurer la valeur du fluage correspondant à la limite de proportionnalité. Dans les cas où la limite de fluage est supérieure à la limite de proportionnalité, on peut indiquer la valeur de la déformation permanente correspondant à la limite de fluage. Tout cela non seulement lorsque la limite de proportionnalité théorique est assez différente de la limite de proportionnalité conventionnelle mais encore là où elles sont très voisines.

Ainsi nous pouvons toujours relier certaines limites conventionnelles de fluage à une limite de proportionnalité conventionnelle déterminée au moyen d'essais de courte durée.

Pour compléter nos essais, nous avons effectué les recherches suivantes :

a) Détermination de la valeur du fluage correspondant à la limite de proportionnalité lorsque cette dernière est plus élevée que la limite de fluage ;

b) détermination de la valeur de la déformation permanente correspondant à la limite de fluage, lorsque cette dernière est plus élevée que la limite de proportionnalité.

Les résultats obtenus permettent de tirer une conclusion importante.

La valeur du fluage correspondant à la limite de proportionnalité, lorsque cette dernière est plus élevée que la limite de fluage, ne dépasse pas 0,025 de la déformation élastique calculée au moyen de module d'élasticité moyen.

Elle est d'ailleurs généralement plus faible.

La valeur de la déformation permanente correspondant à la limite de fluage, lorsque cette dernière est plus élevée que la limite de proportionnalité à 0,001% de déformation permanente, ne dépasse pas 0,004%. Elle est d'ailleurs généralement moins importante ; par suite de la dispersion, elle est parfois même égale à 0,001%.

C'est pourquoi on peut sans grande erreur admettre que les limites de fluage et de relaxation conventionnelles sont toujours voisines de la limite de proportionnalité.

Si les notions de limites de fluage et de relaxation, telles que nous les avons définies, présentent certes un réel intérêt, la détermination de leur valeur conventionnelle n'exige pratiquement pas, par le fait qu'il s'agit de limites, une rigueur considérable. Techniquement, on peut être satisfait pour la définition de la valeur conventionnelle de la limite de fluage et de relaxation, de savoir que cette limite correspond à un fluage qui n'est qu'un faible pourcentage de la déformation élastique. Il semble que sous ce rapport il n'y ait pas d'inconvénient à admettre jusque 2,5% de la déformation élastique ou même davantage.

Peut-être serait-il excessif d'admettre que l'assimilation de la limite conventionnelle de fluage avec une limite de proportionnalité à 0,004% de déformation permanente, mais sur la base de considérations statistiques et aussi de caractère pratique, il est permis de croire que l'on pourrait convenir de caractériser la limite de fluage et de relaxation par une certaine limite de proportionnalité, par exemple à 0,002%, ceci sous toutes réserves quant à la valeur numérique. Cette suggestion est faite dans l'esprit ci-dessus quant à la signification de la limite conventionnelle de fluage et de relaxation, simplement dans le but de permettre le recours à des essais de courte durée, susceptibles d'être normalisés facilement pour l'usage industriel.

Cette conclusion est aussi satisfaisante du point de vue rationnel. Nous avons vu en effet (§ V) qu'il n'y a pas de différence de nature entre les petites déformations immédiates et celles qui sont différées. On peut dès lors se représenter que, à partir de la limite théorique ou absolue d'élasticité, de petits glissements soient possibles sous l'effet d'un léger supplément de tension. On peut concevoir que ce supplément soit insuffisant pour produire une déformation immédiate, mais

qu'elle se produise si le temps d'application est suffisant. Mais cette déformation pourrait devenir immédiate moyennant un léger accroissement supplémentaire de tension. Il se pourrait aussi que le premier supplément de tension soit suffisant pour produire immédiatement tous les glissements possibles, de telle sorte que la durée d'application ne les augmente pas, cependant qu'un léger accroissement supplémentaire de tension fasse naître des glissements différés. Ces raisonnements sont évidemment licites au voisinage de la limite, qui présente elle-même une certaine dispersion, étant liée aux imperfections accidentelles de la matière. Somme toute, la connexité entre la limite de proportionnalité et les limites de fluage et de relaxation ne fait que généraliser et préciser le concept de la limite élastique vraie, domaine de transition plutôt que limite absolue d'étendue nulle au sens mathématique. Cette conception est certes satisfaisante au point de vue technique et pratique.

Il est intéressant, à ce point de vue, de rapprocher des considérations du § V les opinions de deux chercheurs français, MM. Ch. Crusard et B. Jaoul (10). Ne prenant en considération que les déformations non élastiques, les auteurs définissent trois zones :

1) Une très courte et linéaire, pour laquelle la résistance à la déformation est due aux joints qui bloquent les glissements qui se produisent dans les grains.

2) Après une transition, une deuxième région, parabolique, où interviennent les grains et les joints (glissements correspondants de part et d'autre des joints, dislocations dans les grains aux environs des joints).

3) Après une nouvelle transition, une troisième région parabolique à écrouissage intracristallin, dû à la fragmentation des cristaux, par polygonisation ou pliage. Selon les auteurs, la transition entre les deux derniers stades est voisine de la "limite de fluage à froid", au moins pour un Al à 99,99%. Les auteurs écrivent : "Cette coïncidence n'est pas surprenante, puisque le fluage s'accompagne d'une polygonisation poussée du métal ; il y a donc une grande analogie entre les deux modes de déformation - fluage à charge constante et allongement à vitesse imposée - au delà du point de transition".

Il semble d'après cette citation, que les auteurs ont une conception de la limite de fluage à froid analogue à la nôtre et différente de celle de M. L'Hermite, que nous proposons d'appeler "tension critique de fluage" (voir § VII).

Plus loin, les auteurs assimilent pour les aciers doux

- 1) la première zone à l'intervalle entre la limite de proportionnalité et la limite élastique supérieure ;

- 2) la deuxième zone au palier d'étirage ;
- 3) la troisième zone à la période de consolidation par écrouissage.

D'après cela, la limite de fluage à froid de l'acier doux pourrait se situer au niveau de la limite élastique supérieure, dont on sait que la valeur est d'ailleurs très variable. Or, nous avons constaté que la limite de fluage se situe nettement à la limite de proportionnalité. Pour les fils étirés, fortement écrouis, la transposition est sans doute plus complexe. Mais, sous réserve de différence de définition, l'hypothèse de la limite de fluage à froid au niveau de la deuxième transition semble difficilement acceptable, certes pour les aciers sous toutes leurs formes. En fait, le fluage commence, comme les allongements à vitesse imposée, dès la limite de proportionnalité. Si l'on se réfère aux opinions rappelées au § V et assignant à la limite de fluage une valeur quasi nulle, on remarque que les trois ordres de grandeur envisagés sont nettement différents. Les deux extrêmes sont fondés sur des hypothèses déduites d'études structurales. Il en résulte qu'il y a assez bien d'incertitudes, sinon de contradictions dans le domaine de leurs conclusions. Cela se comprend aisément et ne constitue pas une critique de cette science encore mal assurée parce que les expériences y sont complexes, délicates, encore peu nombreuses et qu'elles exposent au danger des généralisations hâtives. C'est pourquoi les méthodes macroscopiques et statistiques de la science classique de l'essai des matériaux, qui ont un caractère intégral et synthétique, conservent leur raison d'être. Elles ne sont pas en conflit, ne peuvent pas être en conflit avec les expériences de la physique des états condensés de la matière. Elles attendent les explications qu'elles ne peuvent procurer elles-mêmes, mais les études structurales ne peuvent pas sans dévier entièrement de leur but prétendre évincer les essais classiques des matériaux.

VII - Observations générales.

Tenant compte des expériences relatées plus haut et des études de divers auteurs (cfr. index bibliographique) nous pouvons formuler un certain nombre de réflexions sur les problèmes du fluage et de la relaxation aux températures ordinaires.

Les déformations de fluage sont de caractère élasto-plastique ; elles sont partiellement réversibles. La partie permanente qui résulte de la formation de plans de glissement, a les caractères des déformations plastiques.

Nous sommes obligés d'admettre que, lors du fluage, les déformations d'allongement sont accompagnées de contractions latérales et que ces dernières sont probablement partiellement réversibles, dans la même proportion que les allongements.

Les courbes de fluage en fonction du temps peuvent avoir des for-

mes particulières suivant le mode d'application des tensions. Dans les cas où ces dernières sont appliquées à une vitesse normale ($1 \text{ Kg/mm}^2/\text{sec}$) l'ensemble des courbes pour des tensions diverses forme une famille qui possède certaines propriétés particulières (fig. 9).

Pour des tensions plus petites que la limite de fluage, il n'y a évidemment pas d'allongements en fonction du temps, plus exactement ils sont insignifiants. Pour les tensions supérieures à la limite de fluage, le phénomène d'allongement en fonction du temps se développe et tend asymptotiquement vers une valeur finie. Le fluage se montre assez discontinu sous l'effet de tensions voisines de la limite.

C'est bien ce qui est observé par notre mode opératoire.

A partir d'une certaine valeur de la tension, l'asymptote cesse d'être parallèle à l'axe du temps, l'éprouvette s'allonge indéfiniment jusqu'à la rupture. Cette tension appelée parfois limite de fluage (5) peut être considérée comme la limite physique ou inférieure de rupture. Pour distinguer nettement cette valeur de la limite de fluage définie dans notre étude (1), nous proposons de l'appeler "tension critique de fluage".

Il est important de connaître la tension critique de fluage puisque aucune contrainte inférieure ne peut pas être la cause de rupture, même pour une durée illimitée.

Il est d'ailleurs possible que la tension critique de fluage diffère peu de la tension de rupture, néanmoins c'est elle qui doit être la base de la sécurité des ouvrages en béton précontraint.

Comme on peut l'imaginer, l'étude expérimentale de recherche de la tension critique de fluage doit être difficile, surtout si l'on tient compte des défauts accidentels de matière, qui entraînent parfois la rupture sous des tensions inférieures à la tension initiale de mise en service. Cependant, on peut concevoir sa détermination pour des éprouvettes sans défauts.

Dans ce but, nous nous proposons de tracer une courbe de fluage sous tension progressivement croissante, comparable à celle qui a été définie pour l'étude de la limite de fluage. On ne peut évidemment plus opérer sur une même barre, puisqu'au delà de la limite apparente d'élasticité, l'écroutissement et le vieillissement ne peuvent plus être négligés. Ceci complique beaucoup les conditions d'expérience.

Les déformations totales de fluage en fonction des tensions représentées par cette courbe se décomposent en déformations permanentes et en déformations réversibles, immédiates et différées. Or, le rapport entre les déformations permanentes et réversibles doit croître avec les tensions. Il est nul à la limite de fluage et doit croître indéfiniment

vers la tension critique de fluage.

Le rapport entre les déformations de fluage ainsi décomposées peut être représenté en fonction des tensions. La courbe prendra probablement une allure caractéristique au voisinage de la tension critique.

Une corrélation entre la tension critique de fluage et la charge de rupture par traction, ainsi qu'une comparaison entre la courbe de déformations de fluage en fonction des tensions et la courbe usuelle des allongements en fonction des tensions définie dans nos essais préliminaires (§ III) peuvent éventuellement suggérer de remplacer les essais de fluage par des essais de courte durée, soit par l'essai normal de courte durée, soit par des essais de fluage de durée limitée.

Les essais relatés ci-dessus ont été effectués pour le Comité Belge pour l'étude du fluage des métaux aux températures ordinaires, sous les auspices de l'Institut pour l'Encouragement de la Recherche Scientifique dans l'Industrie et l'Agriculture.

F. CAMPUS, le 7/8/1952.

INDEX BIBLIOGRAPHIQUE

- 1.- F. CAMPUS La limite de fluage des aciers à la température ordinaire. Communication faite le 11.6.1947 à l'Association Belge pour l'Essai des Matériaux à Bruxelles.
Revue Universelle des Mines, n° 12 - 1947.

 - 2.- U. SMIET Un nouveau système d'ancrage des armatures de précontrainte. Le système Franki-Smet.
La Technique des Travaux, N° 11-12 de 1951.

 - 3.- R. L'HERMITE L'expérience et les théories nouvelles de la résistance des matériaux, 2e édition, 1945.

 - 4.- A. Mc CANCE The plastic behaviour of solids (Fourth Hatfield Memorial Lecture - The Journal of the Iron and Steel Institute - Novembre 1949).

 - 5.- A. JAQUEROD La loi de Hooke est-elle une loi limite ? (Revue de Métallurgie N° 2, Février 1951).

 - 6.- F. CAMPUS - R. DANTINNE Appareil pour déterminer les efforts qui, dans une éprouvette soumise à la traction, amènent le début des déformations permanentes perceptibles. (Revue Universelle des Mines, n° 5, 1943).

 - 7.- M. de COURCEL Le fluage (La Métallurgie et la Construction Mécanique, N° 11, Novembre 1951).

 - 8.- N. F. MOTT L'incidence des imperfections de structure sur les propriétés physiques des métaux soumis à des sollicitations. (Revue Universelle des Mines N° 8, 1950).

 - 9.- P. LAURENT et M. EUDIER Théories et expériences du fluage et de la relaxation des polycristaux (Revue de Métallurgie N° 1, 1950).

 - 10.- CH. CRUSSARD - B. JAOU Contribution à l'étude de la forme des courbes de traction des métaux et à son interprétation physique. (Revue de Métallurgie, N° 8, 1950).
-

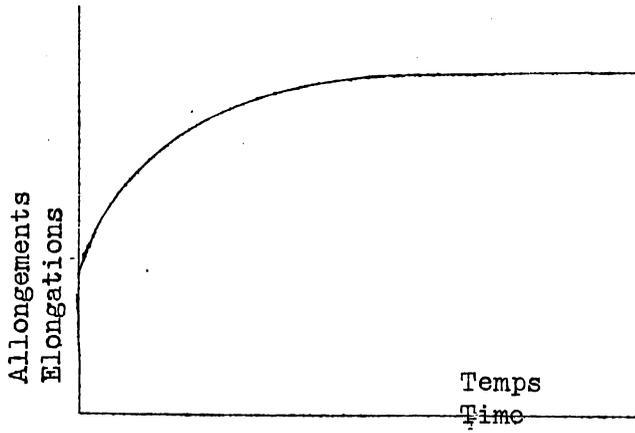


Fig. 1

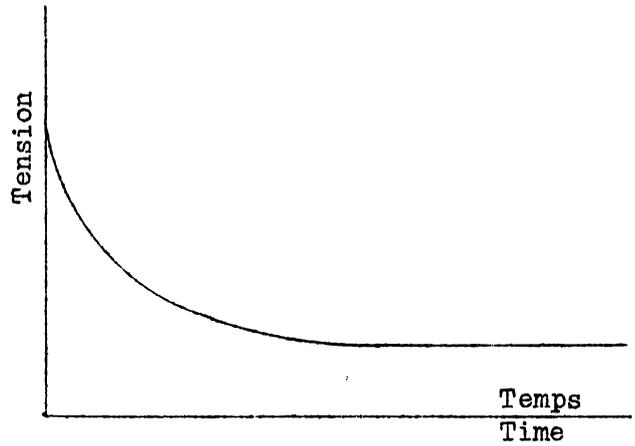


Fig. 2

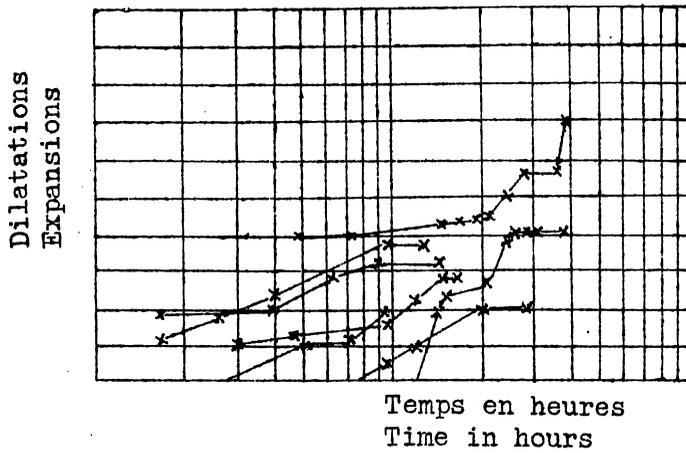


Fig. 3

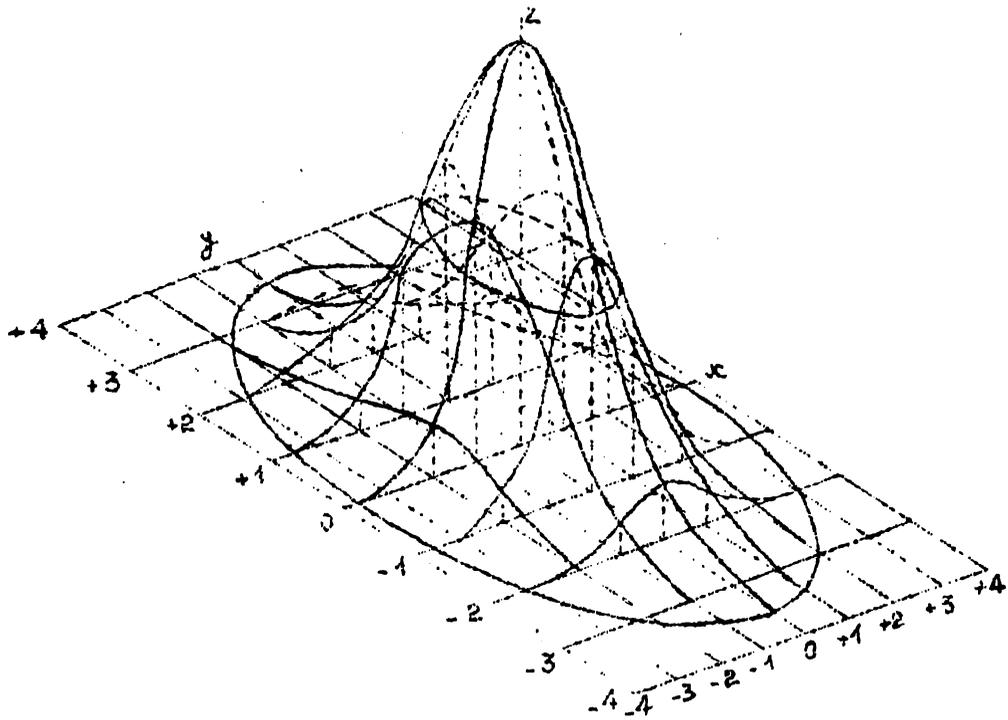
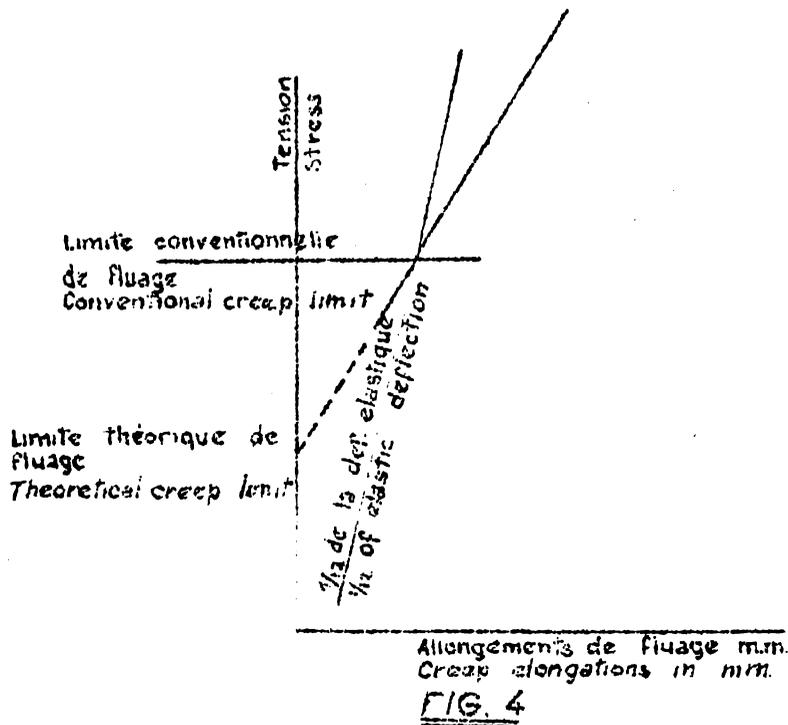


FIG. 7



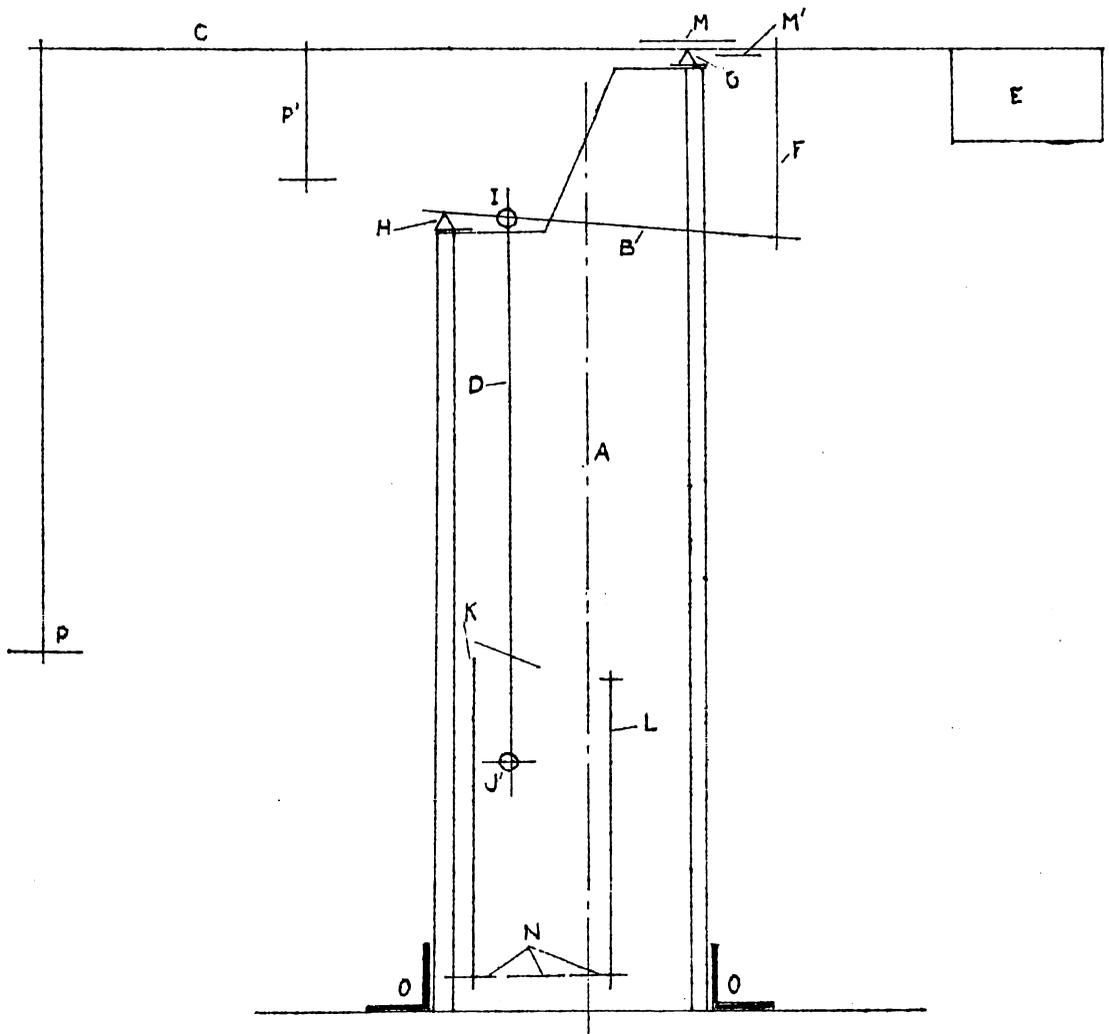
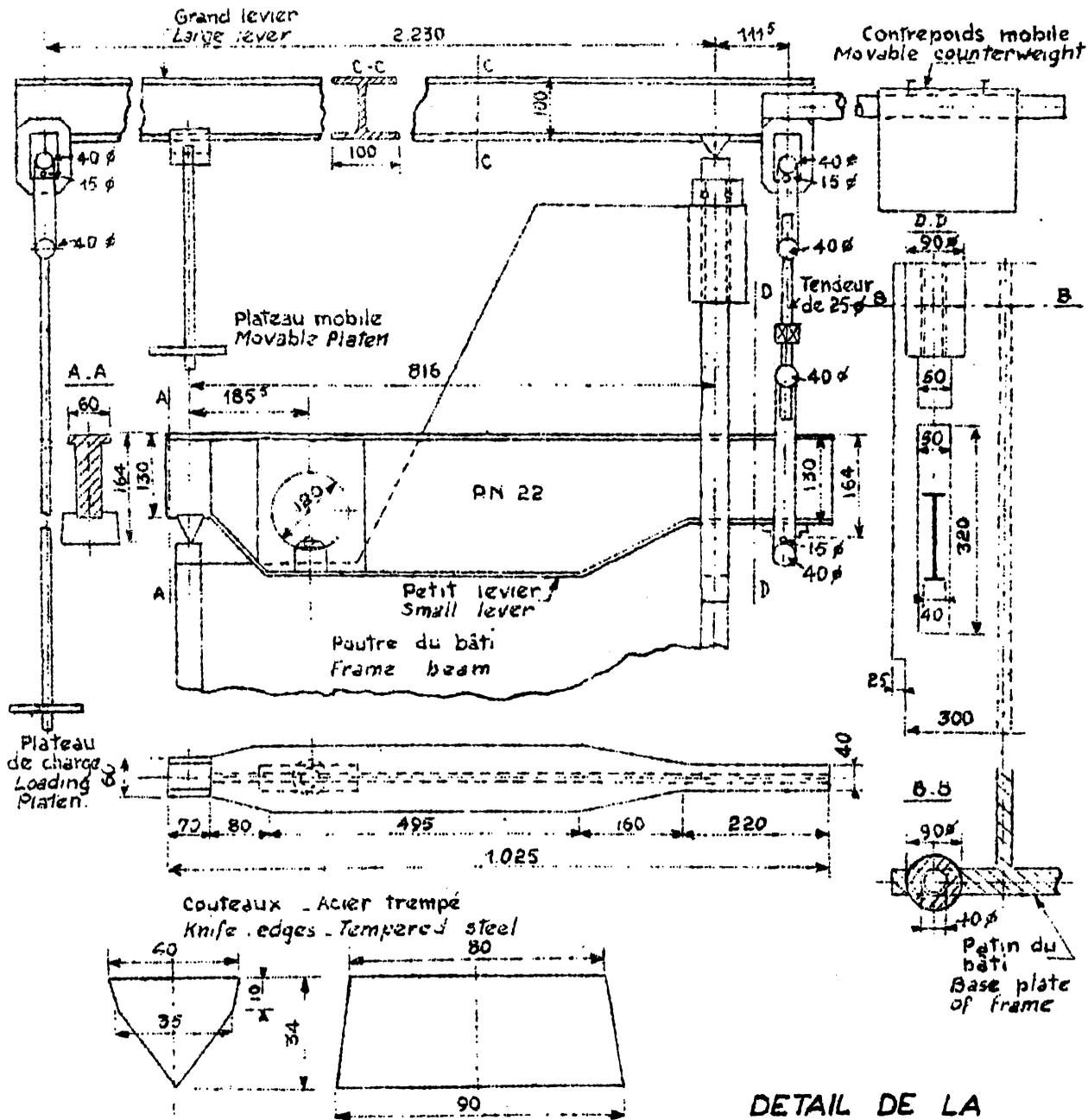
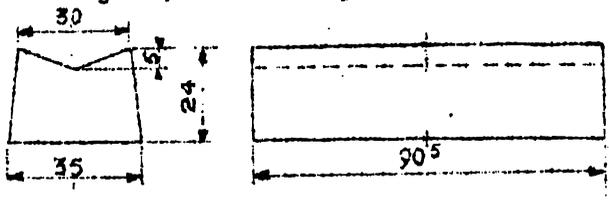


Fig. 5



Cuvettes de couteaux. Acier trempé
Troughs for knife edges - Tempered steel



DETAIL DE LA
MACHINE DE FLUAGE
DETAIL OF
CREEP MACHINE

FIG. 6

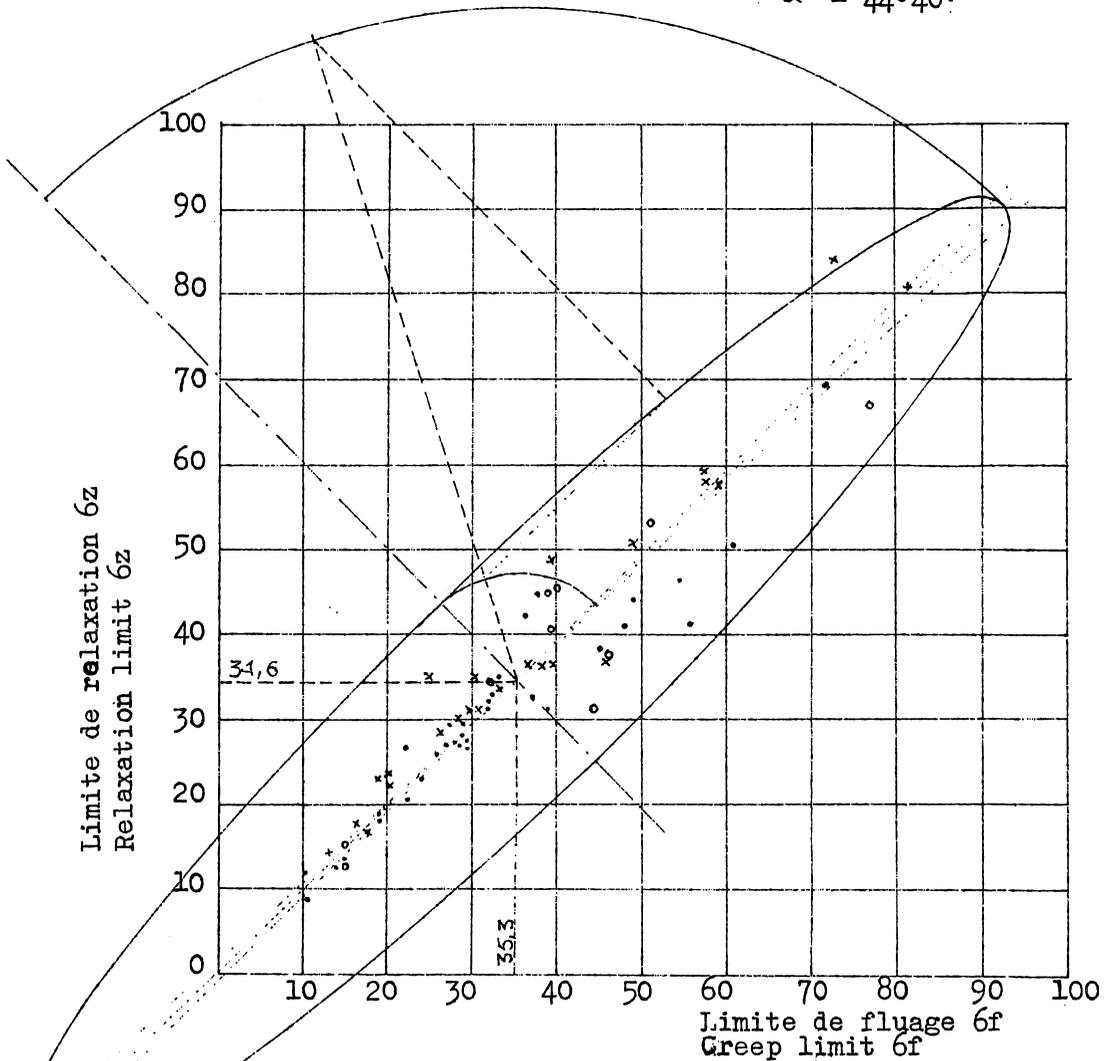
CORRELATION STATISTIQUE ENTRE LES LIMITES DE
FLUAGE ET DE RELAXATION

STATISTICAL CORRELATION BETWEEN CREEP
AND RELAXATION LIMIT

NOMBRE DES ESSAIS:66
NUMBER OF TESTS :66

$r = 0,949$ pour 99,8% des points
 $r = 0,949$ for 99.8% of points

$\alpha = 44^{\circ}40'$



- Limites théoriques
Theoretical limit
- * Limites conventionnelles 1/100 de la def. elast.
Conventional limits 1/100 of elastic deflection
- Limites conventionnelles 1/200 de la def. elast.
Conventional limits 1/200 of creep deflection

FIG. 8

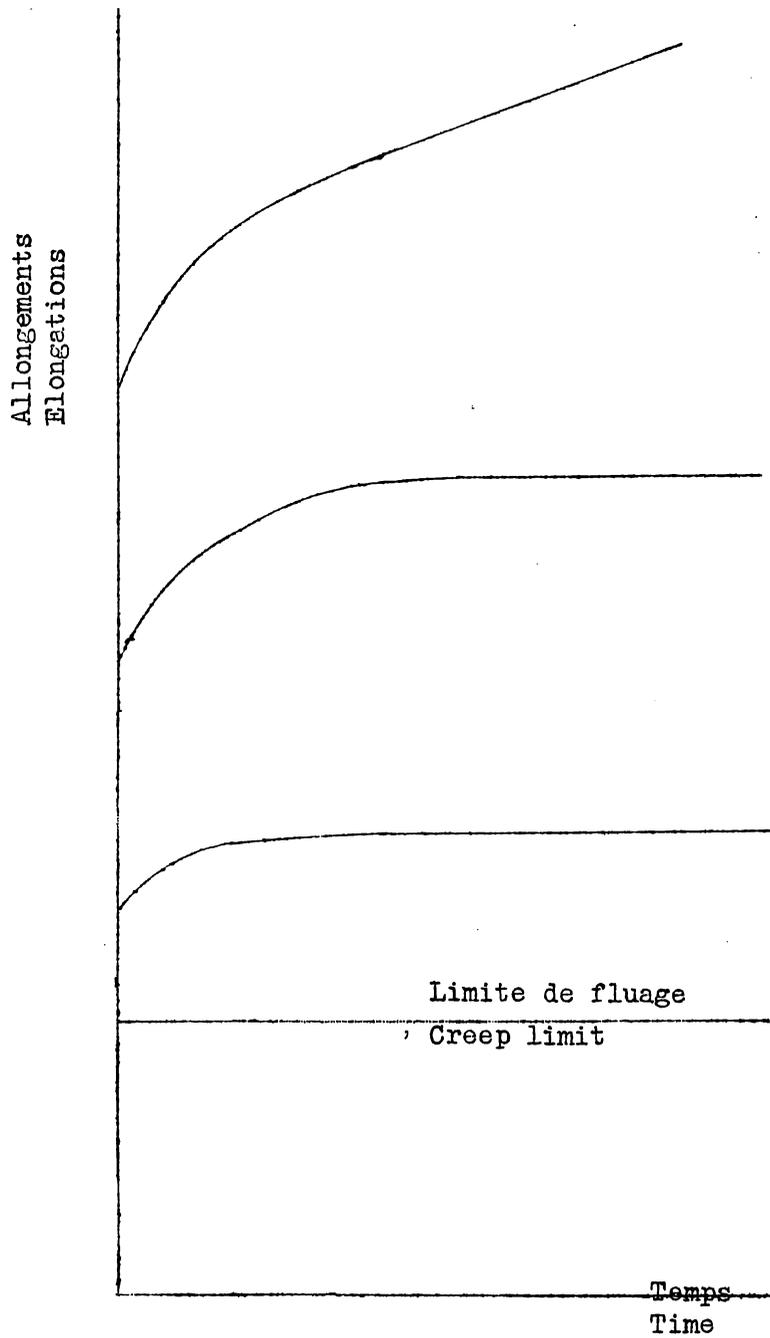


Fig. 9