

Prof. F. CAMPUS

**ÉTUDES EXPÉRIMENTALES DU FLUAGE  
ET DE LA RELAXATION DES ACIERS  
A LA TEMPERATURE ORDINAIRE**

**1ère Partie - Limites de fluage et de relaxation**

**2ème Partie - Fluage et relaxation aux tensions élevées**

Estratto dai Rendiconti e Pubblicazioni  
del Corso di Perfezionamento per le costruzioni in cemento armato  
Vol. V

**TTT**

**1954**

**LIBRERIA EDITRICE POLITECNICA**

**GESARE TAMBURINI**

**M I L A N O**

Via Pascoli, 55 - Via Manzoni, 50

# ÉTUDES EXPÉRIMENTALES DU FLUAGE ET DE LA RELAXATION DES ACIERS A LA TEMPERATURE ORDINAIRE

Prof. F. CAMPUS

*Conferenza tenuta il 26 marzo 1953*

## IÈRE PARTIE

### LIMITES DE FLUAGE ET DE RELAXATION

#### 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.

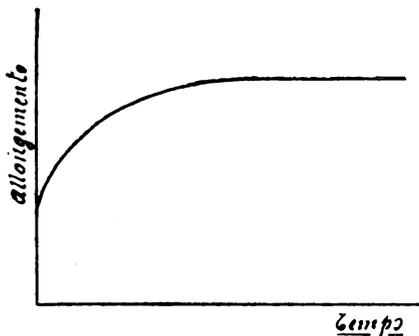


Fig. 1

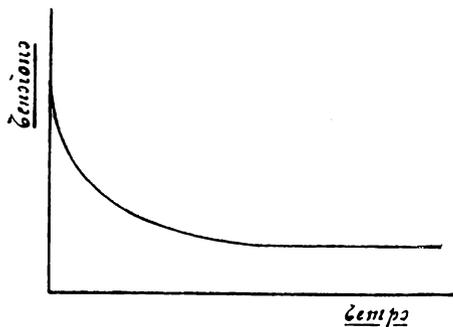


Fig. 2

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.

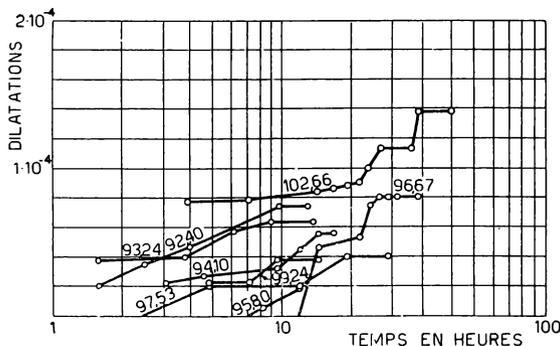


Fig. 3

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

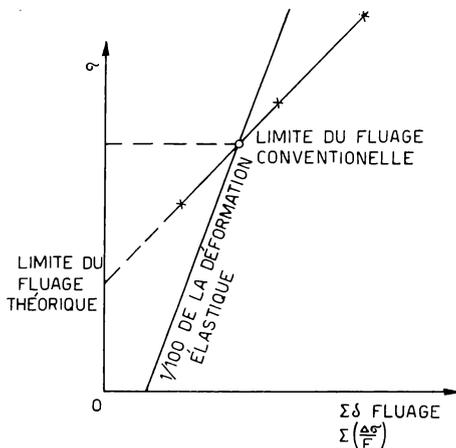


Fig. 4

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 21 fils d'acier au carbone étirés 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 sensibilité de  $1 \times 10^{-5}$  (longueur de la base 1000 mm), au moyen d'un élastimètre 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 1/100<sup>e</sup> 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 supérieur 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 kg/mm<sup>2</sup>/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 en 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 Kg/mm<sup>2</sup>/sec.

#### IV. — DISPOSITIF DES MESURES DE FLUAGE ET DE RELAXATION ET CONDITIONS DES ESSAIS.

##### A) *Equipment 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 m × 5,7 m × 3,8 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 « BEK-SO » d'une sensibilité de  $\frac{1}{2}$  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 d'enregistrement 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.

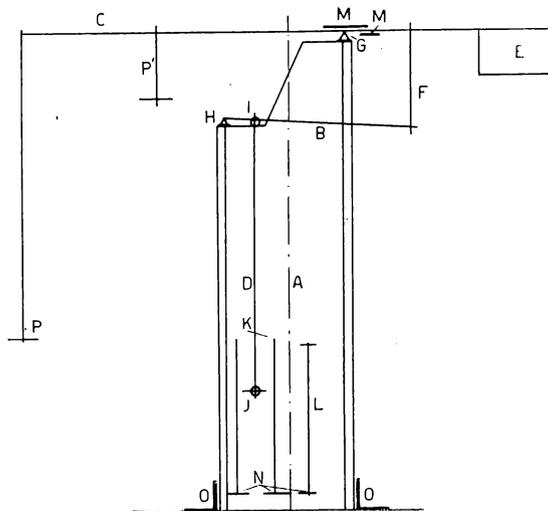


Fig. 5

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 1900 mm à 900 mm.

La charge est constituées 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* est formé 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 un 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/mm<sup>2</sup>. 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 au 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'entaillures.

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

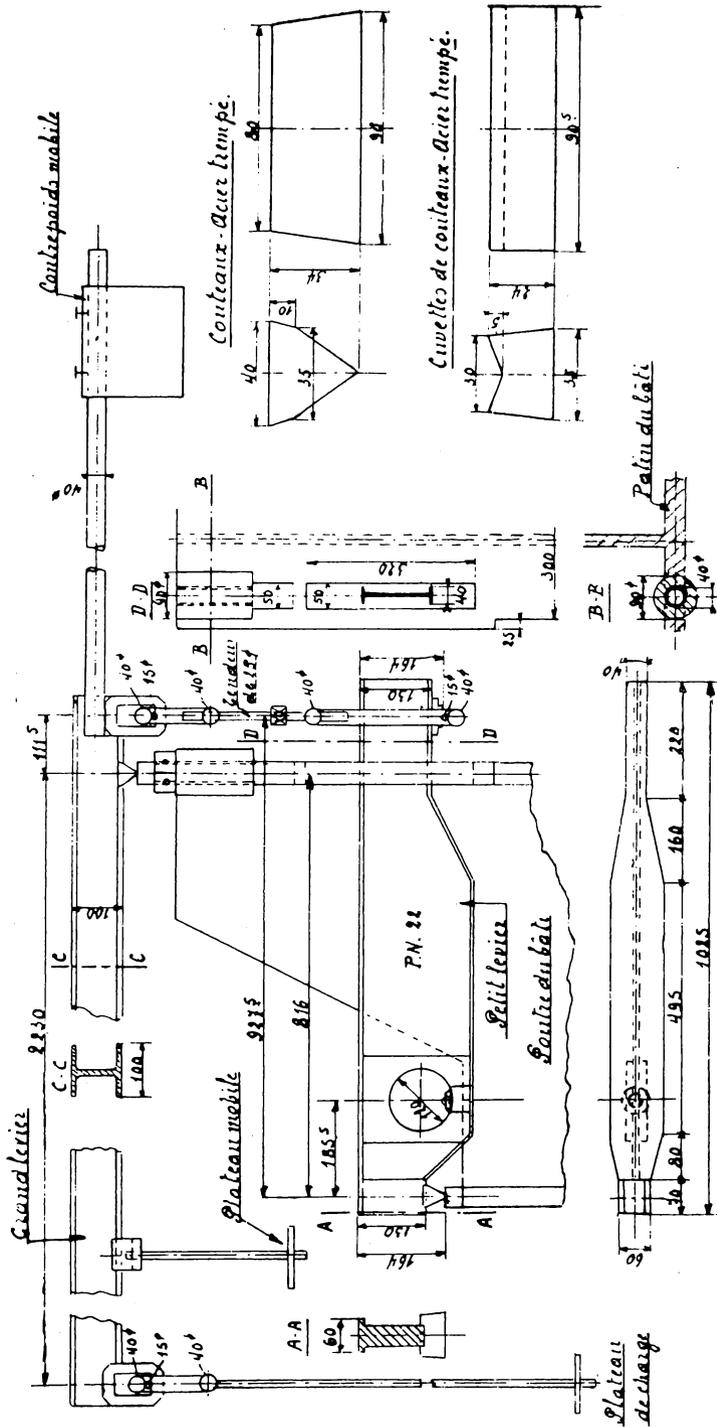


Fig. 6 - Détails de la machine de fusage

plateau de charge jouant de 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 kg/mm<sup>2</sup> à 5 kg/mm<sup>2</sup>. 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 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  $1 \times 10^{-6}$ .

5) Le décalage du grand levier provoque une 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, garantes 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.

Pour les dilatations, c'est

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

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

$\frac{d (\Delta l)}{\Delta l}$  dépend de l'importance même de  $\Delta l$ , 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 ( $\Delta l$ ) 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, ( $\Delta l$ ) 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  $d(\Delta l)$  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 exclu.

La limite d'erreur pour les tensions est

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

Pour  $dF$  nous pouvons admettre 1 kg 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; il peut atteindre 5% pour les fils et les barres laminées, 2% pour 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.

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 M. 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 propor-

tionnalité théorique très basses, inférieurs aux valeurs techniques communément admises. Elles résultent de l'emploi d'un extensomètre certes assez sensible mais qui n'ambitionne dépendant 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.

Il est juste d'invoquer aussi 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. MOTT (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 inférieure 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 l'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 pro-

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. § 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 qu'à 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 regarder 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  $\sigma$  la tension initiale et  $\delta$  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  $\Sigma \frac{\Delta\sigma}{E}$  en fonction des tensions initiales successives. L'intersection de cette courbe extrapolée avec l'axe des  $\sigma$  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. - RESULTATS.

### A) *Hétérogénéité des échantillons.*

Comme nous l'avons indiqué au § I, 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  $\sigma_i^f$  soit théorique, soit conventionnelle, et pour ordonnées les valeurs de la limite de relaxation  $\sigma_i^r$ .

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

$$\sigma_m^f = \frac{\sum \sigma_i^f}{n} \qquad \sigma_m^r = \frac{\sum \sigma_i^r}{n}$$

Les écarts quadratiques moyens relatifs aux deux axes de référence sont

$$a_{\sigma_f}^2 = \frac{\sum (\sigma_i^f - \sigma_m^f)^2}{n} \qquad a_{\sigma_r}^2 = \frac{\sum (\sigma_i^r - \sigma_m^r)^2}{n}$$

On définit le coefficient de corrélation par

$$r = \frac{\sum (\sigma_i^f - \sigma_m^f) (\sigma_i^r - \sigma_m^r)}{\sqrt{\sum (\sigma_i^f - \sigma_m^f)^2 (\sigma_i^r - \sigma_m^r)^2}}$$

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  $\pm 1$ , dans le cas d'une relation linéaire.

Si pour différents intervalles de  $\sigma_f$  on prend les valeurs moyennes de  $\sigma_r$ , on obtient la ligne de régression de  $\sigma_r$  en  $\sigma_f$

qui est

$$\sigma_r = r \frac{a \sigma^r}{a \sigma^f} \sigma_f .$$

De même, la ligne de régression de  $\sigma_f$  en  $\sigma_r$  est

$$\sigma^f = r \frac{a \sigma^f}{a \sigma^r} \sigma^r .$$

La loi de répartition est,

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

dans laquelle  $h^2 = A \sigma^{f2} + 2 B \sigma^f \sigma^r + C \sigma^{r2}$  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

$$\iint f(\sigma^f \sigma^r) d\sigma^f d\sigma^r = 1.$$

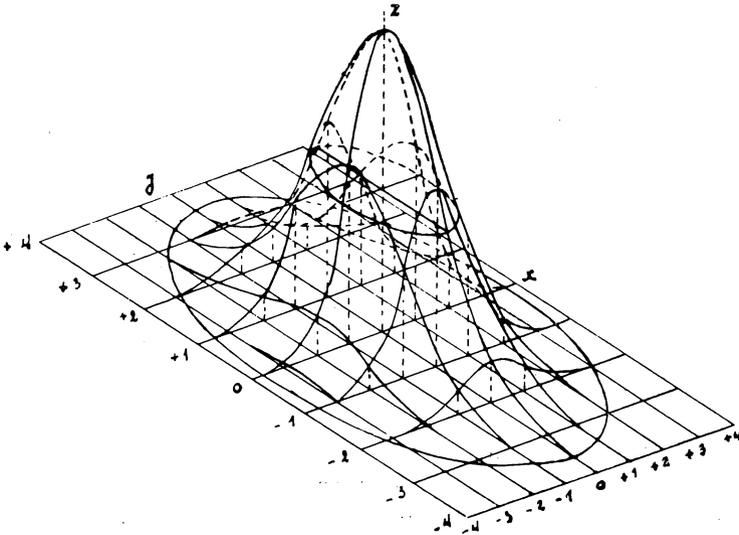


Fig. 7

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  $A$ ,  $B$ ,  $C$

$$A = \frac{1}{a \sigma^f (1 - r^2)} \qquad C = \frac{1}{a \sigma^r (1 - r^2)}$$

$$B = \frac{-r}{a \sigma^f a \sigma^r (1 - r^2)}$$

on a également

$$N = \frac{1}{a \sigma^f a \sigma^r \sqrt{1 - r^2}} \qquad \text{et} \qquad \text{tg } 2\alpha = \frac{2B}{A - C}$$

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  $2h a \sigma^f$ , le côté parallèle à  $0 - \sigma^r$  vaut  $2h a \sigma^r$ .

b) *Corrélation statistique entre les limites théoriques de fluage et de relaxation.*

Nombre des essais  $n = 33$

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

Coordonnées du centre de gravité:

$$\sigma_m^f = 33,82$$

$$\sigma_m^r = 32,08$$

Ecart quadratique moyen:

$$a \sigma^f = 16,39$$

$$a \sigma^r = 14,566$$

Coefficient de corrélation:

$$r = 0,96877$$

L'équation de l'ellipse est:

$$0,0605 \sigma^f - 0,13196 \sigma^f \sigma^r + 0,0766 \sigma^r = 12,477$$

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

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

Valeurs des demi-axes de l'ellipse

$$a = 77,28$$

$$b = 5,264$$

Rectangle circonscrit:

longueur du côté parallèle à l'axe 0 —  $\sigma^f = 115,7$

longueur du côté parallèle à l'axe 0 —  $\sigma^r = 102,90$ .

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

Nombre des essais  $n = 66$

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

Cordonnées du centre de gravité:

$$\sigma_m^f = 35,312$$

$$\sigma_m^r = 34,63$$

Ecart quadratiques moyens:

$$a \sigma^f = 16,12$$

$$a \sigma^r = 16,18$$

Coefficient de corrélation:  $r = 0,949$

Ligne de régression  $\sigma^r$  en  $\sigma^f$ :

$$\sigma^r = 0,949 \frac{16,18}{16,12} \sigma^f = 0,953 \sigma^f$$

Ligne de régression  $\sigma^f$  en  $\sigma^r$ :

$$\sigma^f = 0,949 \frac{16,12}{16,18} = 0,945 \sigma^r$$

L'équation de l'ellipse est:

$$0,0385 \sigma_f^2 - 0,0726 \sigma^f \sigma^r + 0,0382 \sigma_r^2 = 12,477$$

$$\operatorname{tg} 2 \alpha = -242$$

$$2 \alpha = -89^\circ 45'$$

$$\alpha = -44^\circ 53', \alpha = 45^\circ 7'$$

Demi-axes de l'ellipse:

$$a = 79,60$$

$$b = 12,86$$

Rectangle circonscrit:

Longueur du côté parallèle à 0 —  $\sigma^f = 56,94 \times 2$

Longueur du côté parallèle à 0 —  $\sigma^r = 57,15 \times 2$

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 systé-

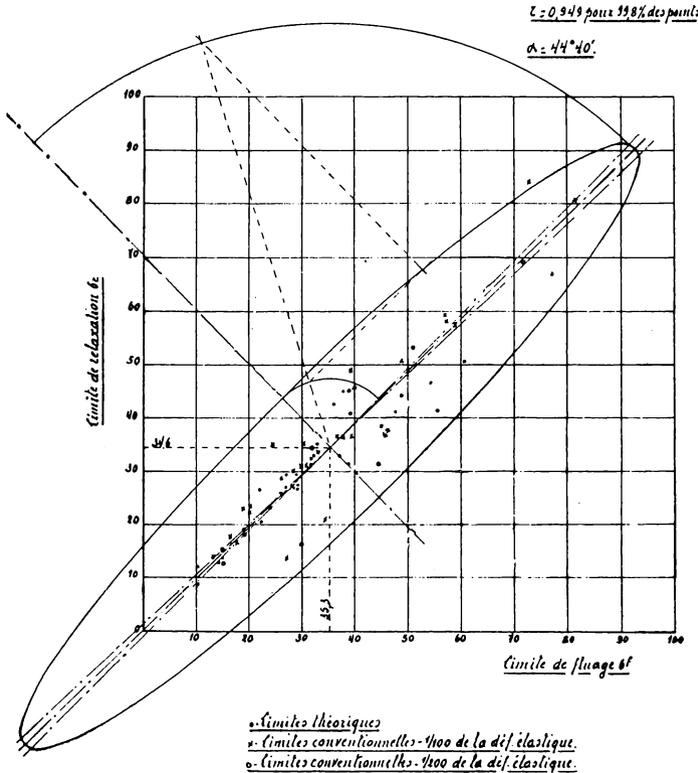


Fig. 8 - Corrélation statistique entre les limites de fluage et de relaxation.  
Nombre des essais: 66

matique, non accidentelle, entre ces deux limites, on se rend bien compte qu'il eut 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 un diagramme.

On a indiqué en  $\text{kg/mm}^2$

- 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 quelque exceptions, il est possible de généraliser cette observation (fig. 9).

*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 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.

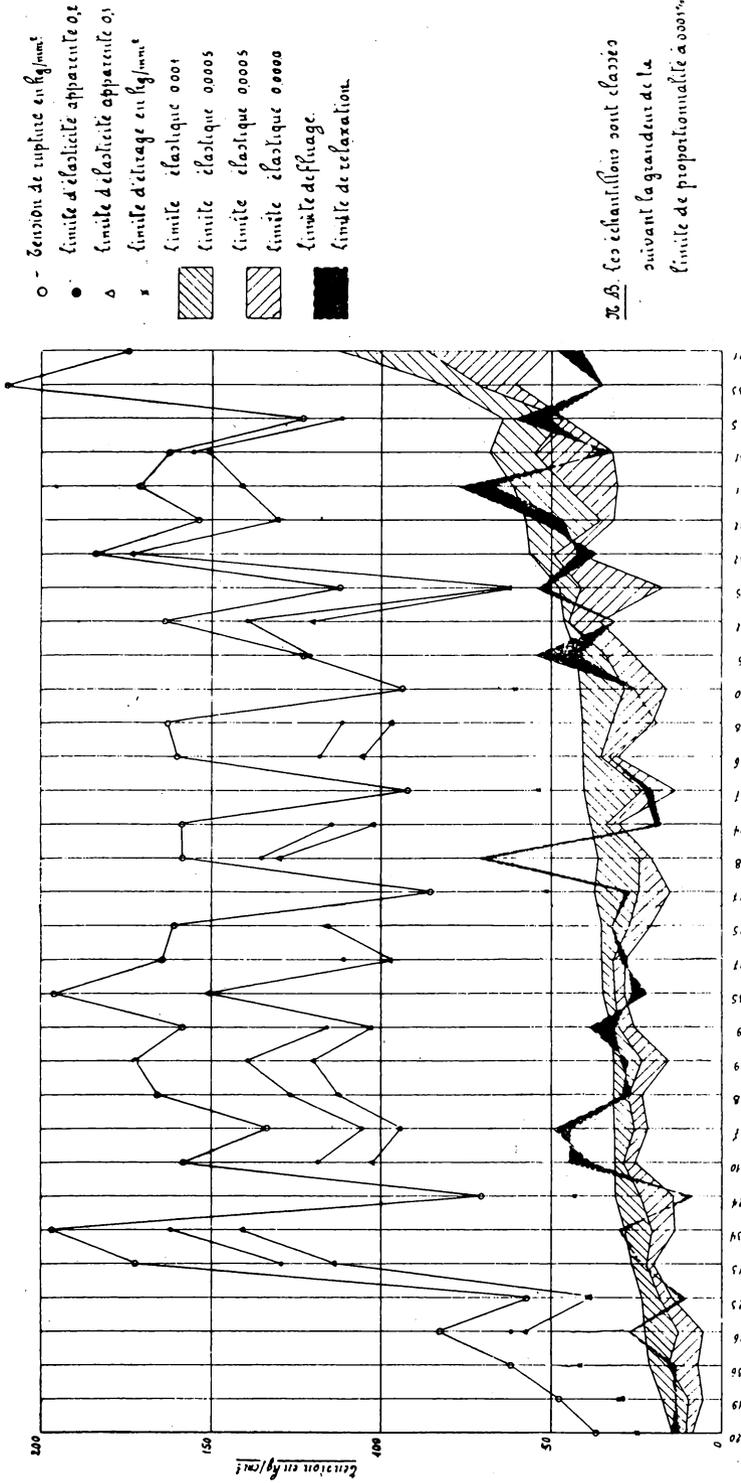


Fig. 9 Comparaison entre les limites de fluage et de relaxation et les caractéristiques des essais de courte durée

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 ou inférieure 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 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. CRUSSARD et B. JAOUËL (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'Hermitte, que nous proposons d'appeler « tension critique de fluage » (§ 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 structurelles. 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 en 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 GENERALES.

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.

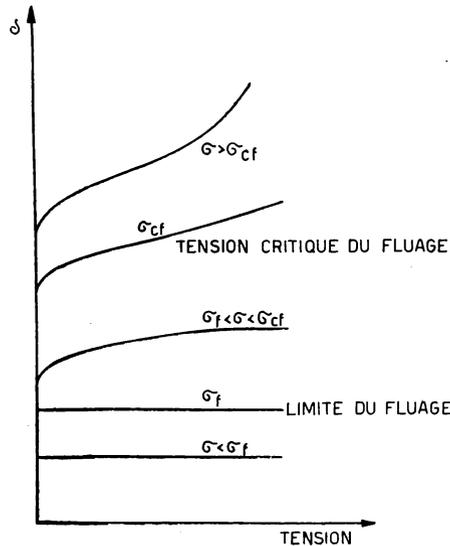


Fig. 10

Les courbes de fluage en fonction du temps peuvent avoir des formes particulières suivant le mode d'application des tensions. Dans les cas où ces dernières sont appliquées à une vitesse normale (1 kg/mm<sup>2</sup>/sec) l'ensemble des courbes pour des tensions diverses forme une famille qui possède certaines propriétés particulières (fig. 10).

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 être la cause de rupture même pour une durée illimitée d'action.

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.

# ÉTUDES EXPÉRIMENTALES DU FLUAGE ET DE LA RELAXATION DES ACIERS A LA TEMPERATURE ORDINAIRE

Prof. F. CAMPUS

*Conferenza tenuta il 26 marzo 1953*

## 2ÈME PARTIE

### FLUAGE ET RELAXATION AUX TENSIONS ÉLEVÉES

#### VIII. - NATURE DES ESSAIS.

Si on caractérise le fluage par un diagramme représentant en fonction du temps l'allongement croissant pris par une éprouvette maintenue 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, entièrement justifiée pour les très faibles valeurs du fluage, n'est admissible que sous réserve dans le cas du fluage à tension élevée. Néanmoins, suivant les conventions admises dans les essais de fluage, nous conserverons dans notre étude, cette façon pratique de représentation du phénomène. D'ailleurs, dans les cas des essais de fluage des fils tréfilés soumis à une tension initiale atteignant 0,8 de la limite élastique à 0,2% d'allongement permanent ( $0,8 \sigma_e$  et 2) majoré de 12%, les contractions transversales sont à peine mesurables, mais nous pensons qu'il ne faut pas pour autant perdre de vue leur influence sur la valeur du fluage.

La durée des essais de fluage a été préalablement fixée à 700-800 heures afin de ne pas trop prolonger le temps et le coût des expériences. Dans un cas seulement et à titre d'information, l'essai a été poursuivi pendant 2000 heures.

Le fluage s'est stabilisé après 700-800 heures dans le cas de barres d'acier doux, demi-dur et dur, même pour les tensions initiales dépassant la limite d'étirage. Pour les fils tréfilés, on a observé la stabilisation complète du fluage après 700-800 heures aux tensions de 0,6 de la résistance limite  $0,6 \sigma_r$ . Par contre, nous avons constaté que pour les fils tréfilés soumis à une tension atteignant  $0,8 \sigma_{e2} + 12\%$ , la durée de 700-800 heures n'est pas suffisante pour atteindre la stabilisation complète du fluage, néanmoins, au bout de ce temps, la vitesse de fluage a diminué considérablement.

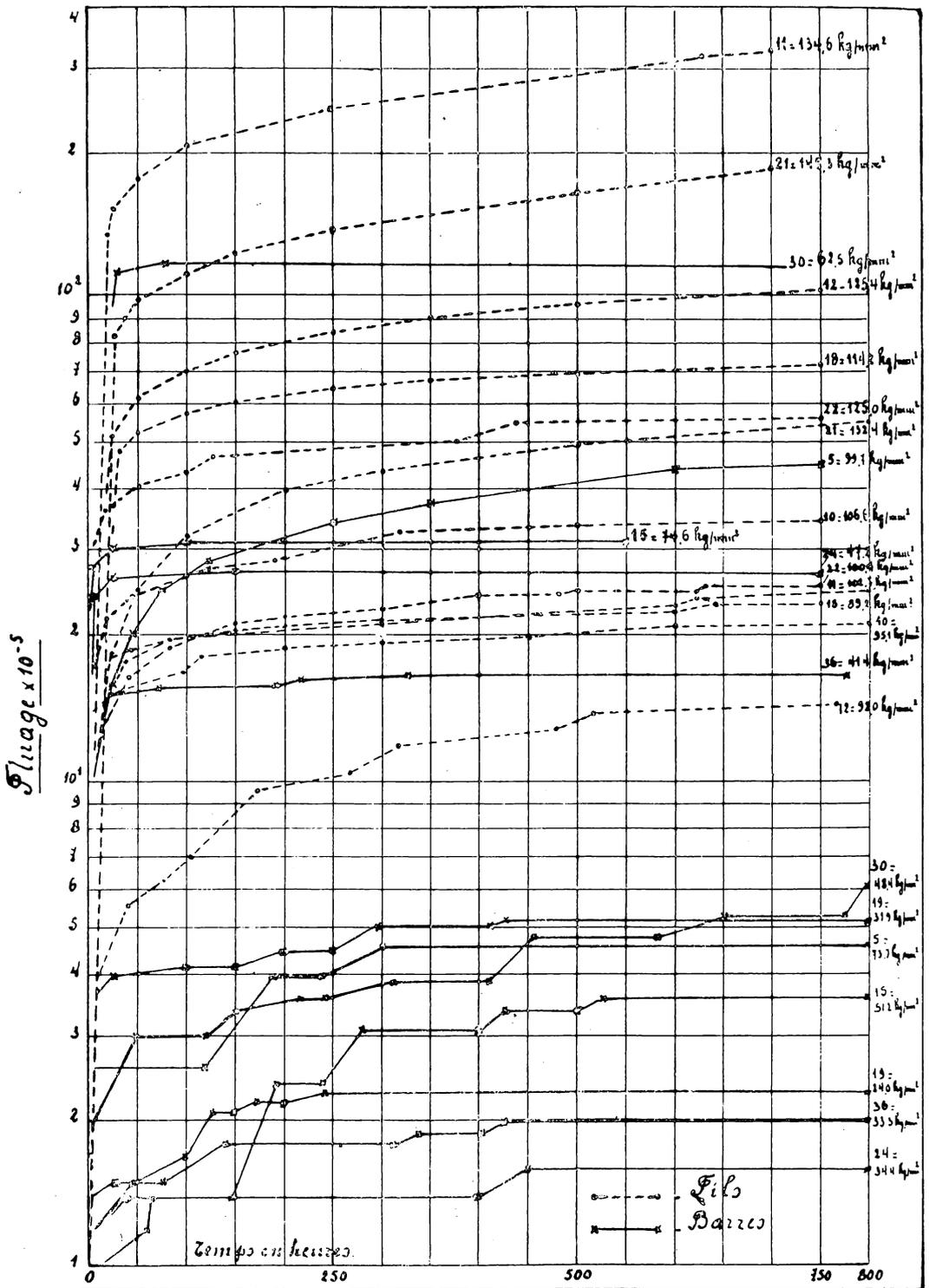


Fig. 11 - Fluage à tension élevée



$\beta$ ) la relation entre les essais de courte durée et les essais de fluage;

$\gamma$ ) la relation entre le fluage et le relaxation.

Pour la deuxième partie, nous avons conservé sensiblement les mêmes conditions d'essai que celles qui ont été adoptées pour la première partie, en particulier pour la précision des mesures et les conditions de climatisation.

#### IX. — NATURE DES ECHANTILLONS.

Parmi les 37 échantillons de qualités différentes qui étaient à notre dispositions on a choisi pour les essais relatés ci-après: les barres portant les numéros

5, 15, 30, 24, 36, 19 et  
les fils 21, 11, 22, 18, 10, 12.

Les numéros figurent sur les planches 11 et suivantes.

Les mêmes produits ont été utilisés pour les essais de fluage et de relaxation.

#### X. — FLUAGE A TENSION ELEVEE.

##### 1) *Choix des tensions d'essai.*

La première question qui se pose dans ce genre d'essai est la valeur de la tension qu'il convient d'appliquer. Comme cela a été souligné dans le rapport concernant la première série de recherches, nos essais ont été effectués scientifiquement en tenant compte du point de vue technique et industriel et c'est dans cet esprit que nous avons choisi pour les tensions d'essai, les contraintes que l'on rencontre pratiquement.

Selon l'Association Belge de Standardisation - Rapport n. 15, édition de 1944, on adopte pour la tension maximum admissible la plus petite des deux valeurs 0,6 de la résistance limite  $0,6 \sigma_r$  et  $0,8 \sigma_{e2}$  soit 0,8 de la limite élastique à 0,2%. De plus, dans un ouvrage en béton précontraint, on permet une majoration de tension fixée à 12%, pour tenir compte de la chute de tension causée par le fluage du béton, le glissement des fils aux ancrages et la relaxation d'armature. Selon ces bases, nous avons choisi les tensions pour nos essais de fluage. Pour les barres d'acier présentant une limite d'étirage, on a généralement adopté comme tension la plus basse  $0,8 \sigma_{e1}$ , et comme tension la plus élevée  $0,6 \sigma_r + 12\%$ , de manière à dépasser généralement la limite d'étirage.

## 2) *Mode opératoire.*

Les essais de fluage ont été effectués au moyen des machines à leviers conçues spécialement dans ce but et dont la description se trouve dans la première partie. Le fluage a été mesuré au moyen de l'extensomètre décrit.

L'éprouvette étant placée sous une tension préalable très basse, on a adapté l'élasticimètre dont la base de mesure pour tous les essais a été de  $1000 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$ . La sensibilité de lecture est de 2 millièmes de mm, donc la précision atteint  $2 \times 10^{-6}$ . Avec une vitesse de mise en charge de  $0,5-1,0 \text{ kg/mm}^2/\text{sec}$ , on soumet la barre à sa tension de fluage. Après avoir fait les lectures d'allongement instantané (environ 10 secondes), on décharge complètement l'éprouvette et on mesure le raccourcissement, d'où la déformation permanente. Ensuite avec la même vitesse de mise en charge ( $0,5-1,0 \text{ kg/mm}^2/\text{sec}$ ), on porte à nouveau l'éprouvette à sa tension initiale de fluage. On considère comme début de fluage, l'instant où on fait la lecture de la longueur de l'éprouvette amenée définitivement à sa tension de fluage.

Pour chaque essai, on a noté le temps nécessaire pour amener la barre à la tension prévue. Les lectures d'allongement de fluage sont faites après avoir ramené le grand levier dans sa position horizontale (le contrôle en est fait au moyen d'un niveau de précision) et aux intervalles de temps suivants: 5, 15, 30 minutes, 1, 2, 4, 8, 24 heures et ensuite toutes les 24 heures. Les intervalles du temps ainsi choisis ont permis de tracer correctement les courbes de fluage. Après 700-800 heures d'observation, on décharge l'éprouvette et on mesure sa longueur à l'état déchargé; ensuite, durant environ 100 heures, on observe la réactivité, c'est-à-dire le raccourcissement de la barre déchargée en fonction du temps.

## 3) *Résultats des essais.*

Les courbes d'allongement de fluage en fonction du temps ont été reproduites à la planche récapitulative 11. On peut faire les remarques suivantes à propos des différentes nuances d'aciers:

### *α) barre d'acier traité: (n. 5)*

Le fluage, à une tension égale  $0,6 \sigma'$ , est faible:  $4,6 \times 10^{-5}$ , il n'augmente plus après 800 heures. Si la tension initiale est de  $0,8 \sigma_{e2}$  majorée de 12%, le fluage atteint  $45,5 \times 10^{-5}$  et n'est guère terminé après 800 heures, sa vitesse entre 700-800 heures atteint encore  $2,0 \times 10^{-5}$  par 100 heures. Sous la tension de  $73,7 \text{ kg/mm}^2$ , l'allure de la courbe de fluage est très discontinue et analogue à celle des barres d'acier non-traité (voir  $\beta$  ci-après). Sous la tension de  $99,7 \text{ kg/mm}^2$ ,

l'allure de la courbe de fluage est beaucoup plus régulière et progressive; elle est analogue à celle des fils.

*β) Barres d'aciers doux, demi-dur et dur :*

Pour une tension égale à  $0,8 \sigma_{e1}$ , le fluage est généralement négligeable, les courbes sont assez discontinues. De ce fait, si la stabilisation semble le plus souvent atteinte après 500 heures, elle ne l'est pas toujours sûrement après 700 heures (p. ex. n. 30). Pour une tension initiale de  $0,6 \sigma^r$  majorée de 12%, dépassant le palier d'étirage, le fluage est important mais la stabilisation complète est atteinte en général très rapidement. La vitesse de fluage après 700 heures est sensiblement nulle. Les courbes de fluage sont généralement très régulières d'autant plus que l'acier est plus dur. L'acier le plus doux (n. 19) présente le plus de discontinuité.

*γ) Fils tréfilés:*

Pour une tension égale à  $0,6 \sigma^r$ , le fluage est de l'ordre de  $25 \times 10^{-5}$ . La stabilisation semble atteinte après 800 heures. Pour une tension égale à  $0,8 \sigma_{e2}$  majorée de 12%, la durée du fluage devient plus longue et sa valeur très importante peut atteindre  $310 \times 10^{-5}$  après 800 heures. La vitesse entre 700-800 heures varie de  $0,2$  à  $0,8 \times 10^{-5}$  par 100 heures.

L'allure des courbes de fluage est généralement assez continue, sauf pour le fil n. 12 sous la tension de  $92 \text{ kg/mm}^2$  et pour le fil 22 sous la tension de  $125 \text{ kg/mm}^2$ .

## XI. — RELAXATION À TENSION ÉLEVÉE.

*1) Choix des tensions d'essai.*

Pour pouvoir comparer les essais de fluage et de relaxation à tension élevée, nous avons choisi comme tension initiale des essais de relaxation la plus grande de deux tensions adoptées pour les essais de fluage.

*2) Mise en charge.*

Les essais de relaxation ont été effectués au moyen des machines à leviers conçues spécialement pour les essais de fluage et munies du système de blocage qui permet de mesurer avec précision la diminution de charge en fonction du temps lorsqu'un allongement constant est imposé à une éprouvette. On a fait la description du système utilisé dans la première partie. La constance de la longueur de l'éprouvette au cours de l'essai est vérifiée par l'élasticimètre décrit ci-dessus (§ III, 2). L'éprouvette étant placée sous une tension préala-

ble très basse, on a adapté l'élasticimètre. Puis avec une vitesse de mise en charge de 0,5-1,0 kg/mm<sup>2</sup>/sec, on a soumis la barre à sa tension initiale de relaxation. Après avoir fait les lectures d'allongement, ce qui demande 10 secondes environ, on décharge complètement l'éprouvette et on mesure la déformation permanente. Ensuite, avec la vitesse de mise en charge utilisée précédemment, on porte à nouveau l'éprouvette à sa tension initiale de relaxation.

On considère comme début de la relaxation, l'instant où on mesure pour la première fois la charge nécessaire pour obtenir le décalage du grand levier de son point de fixation. Pour chaque essai, on a noté le temps nécessaire pour soumettre la barre à la tension prévue.

Les lectures de relaxation sont faites aux intervalles de temps suivants: 5, 15, 30 minutes, 1, 2, 4, 8, 24 heures et par la suite toutes les 24 heures. Les intervalles de temps ainsi choisis ont permis de tracer correctement les courbes de relaxation.

Après 700-800 heures de relaxation, on décharge complètement l'éprouvette et on mesure sa longueur à l'état déchargé. Ensuite, durant environ 100 heures, on observe la réactivité, c'est-à-dire l'augmentation de tension qui est nécessaire en fonction du temps pour maintenir constante la longueur de l'éprouvette qu'elle a prise aussitôt après décharge. Cette réactivité est exprimée en % de la tension initiale de l'essai de relaxation.

### 3) *Résultats des essais.*

Les courbes de la tension décroissante, exprimée en pourcents de la tension initiale d'essai en fonction du temps, sont reproduites à la planche récapitulative 12.

Analogiquement aux essais de fluage, on peut faire les remarques suivantes à propos du comportement à la relaxation des différentes nuances d'acier:

#### *α) barre d'acier traité (n. 5):*

Pour une tension initiale de  $0,8 \sigma_{e2} + 12\%$ , la relaxation atteint 4,4%. Elle est forte pendant les premières 15 minutes (2,1%), augmente régulièrement jusqu'à 400 heures pour atteindre une vitesse de 0,1% par 100 heures dans les dernières 100 heures d'essai (650-750 heures).

#### *β) barres d'aciers doux, demi-dur et dur:*

Portée à une tension initiale de  $0,6 \sigma' + 12\%$  dépassant le palier d'étirage, la barre 19 atteint presque la totalité de sa relaxation en un quart d'heure, pour rester ensuite quasi constante durant l'essai.

La barre 24 atteint 3% de relaxation après une heure, se stabilise au cours des premières 200 heures, puis elle reste presque invariable durant l'essai. La barre 30 atteint 3,1% de relaxation après la première heure d'essai. Sa relaxation croît régulièrement au cours des 600 heures et atteint une vitesse de 0,1% par 100 heures au cours des dernières 100 heures d'essai. Pour la barre 36, la relaxation atteint 5,4% après une heure, 7,2% après 800 heures et semble se stabiliser ensuite. Pour la barre 15, la relaxation atteint 2,4% après la première heure, puis croît régulièrement et atteint une vitesse de 0,1% par 100 heures au cours des dernières 100 heures.

*γ) fils tréfilés:*

Pour une tension égale à  $0,8 \sigma_{e_2}$  majorée de 12%, la relaxation atteint environ 7-9%, avec une vitesse de 0,1 à 0,2% par 100 heures au cours des dernières 100 heures d'essai. L'acier n. 11 fait exception; sa relaxation dépasse 15% et n'est pas stabilisée; sa vitesse de relaxation est encore relativement élevée après 750 heures. On remarquera que toutes les courbes de relaxation ont une allure régulière et qu'elles tendent toutes vers une stabilisation plus rapide que les courbes de fluage; la majeure partie de la relaxation se produit assez rapidement.

## XII. — RELATIONS ENTRE LES LIMITES DE FLUAGE ET LE FLUAGE À TENSION ÉLEVÉE.

Si sur un diagramme, on porte en ordonnées les tensions de fluage et en abscisses les différentes valeurs de fluage obtenues au cours des essais, on obtient une courbe appelée « fluage sous tension progressive ». Les diagrammes de fluage sous tension progressive croissante sont représentés sur la planche 13. Les courbes ont été relevées pour les 12 nuances d'acier choisies pour les essais de la deuxième partie. Après examen des courbes, on peut y distinguer quatre groupes:

*α) fils tréfilés (aciers n. 11, 12, 10, 18, 21, 22).*

Les courbes de fluage sous tension progressivement croissante ont des allures analogues. A partir de la limite de fluage, que l'on peut confondre avec la limite de proportionnalité, les diagrammes montent fortement et s'incurvent pour des tensions comprises entre 0,6 de la résistance limite et 0,8 de la limite d'élasticité conventionnelle, puis ils s'aplatissent et deviennent parfois presque parallèles à l'axe des abscisses. L'allure de ces courbes nous renseigne d'une façon assez précise sur les tensions que l'on peut appliquer sans craindre de dépasser une certaine valeur du fluage. On remarque cependant que si l'on considère des tensions diverses, l'ordre de classement des fils

selon le fluage est très variable. Cela provient notamment de ce que certains fils, qui ont des limites de fluage très basses, fluent cependant relativement peu aux tensions élevées (p. ex. 10 et 22). cependant que des fils à limite de fluage élevée, tels le n. 21 et surtout le 11, fluent très considérablement aux tensions élevées.

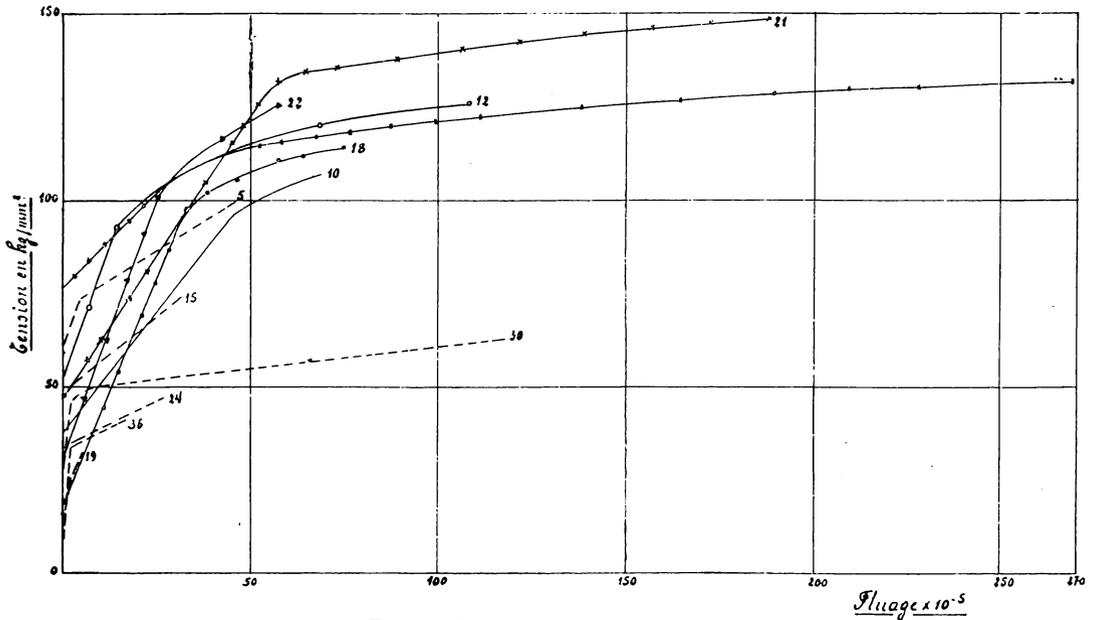
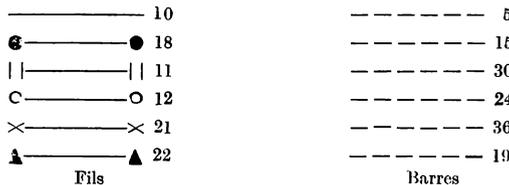


Fig. 13 - Fluage en fonction des tensions



β) barre d'acier traité (n. 5)

La courbe de fluage à tension progressivement croissante de la barre d'acier traité possède une allure propre, qui correspond à la fois à une limite de fluage élevée et à un fluage relativement faible aux fortes tensions.

γ) barre d'acier dur (n. 15)

Il n'y a presque pas de fluage jusqu'à la limite d'étirage, puis il augmente régulièrement avec les tensions des essais. La limite de fluage est assez haute et le fluage aux tensions élevées relativement faible; sa durée est aussi relativement courte.

δ) *barres d'aciers doux et demi-dur* (n. 19, 24, 35, 30):

Pour les aciers doux et demi-dur, le fluage jusqu'à 0,8 de la limite d'étrépage est très faible et atteint au maximum la valeur  $10 \times 10^{-5}$ , puis il augmente assez rapidement, surtout pour le n. 30.

Comparativement avec les fils tréfilés, la durée de fluage est courte.

En conclusion, on peut remarquer que la limite de fluage n'a guère de signification pour le fluage sous les tensions de service, sauf quand elle est élevée, c'est-à-dire pour les aciers durs naturels et les aciers traités.

### XIII. — RELATION ENTRE LES DEFORMATIONS PERMANENTES OBTENUES DANS DES ESSAIS DE COURTE DUREE ET LE FLUAGE À TENSION ÉLEVÉE.

Comme il a été signalé dans la première partie, un des buts principaux des essais était d'établir si possible une relation entre les essais de courte durée et les essais de fluage. Le programme proposé dans ce but, comprenait des essais préliminaires destinés à mettre en évidence les propriétés mécaniques des éprouvettes habituellement déterminées par les essais de courte durée. On opère toutefois d'une manière plus précise, plus analytique et plus détaillée que dans les essais habituels.

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 0,5-1,0 kg/mm<sup>2</sup>/sec, par paliers successifs d'environ 1/25-1/15 de la limite élastique, ce qui représente à peu près 5-10 kg/mm<sup>2</sup>. Le cadran gradué de la machine de traction permet d'augmenter pratiquement la charge d'un quantum arrondi p. ex. 200, 250, 500 kg. L'arrêt nécessaire pour faire la lecture des allongements totaux demande environ 10-20 sec. Ensuite, on effectue la décharge complète à la même vitesse et on fait également en 10-20 sec. la lecture des déformations résiduelles instantanées après déchargement. On procède ensuite à une nouvelle mise sous tension pour une charge majorée d'un quantum défini ci-dessus.

C'est ce caractère détaillé des essais préliminaires qui a permis de tracer les diagrammes figurant à la planche 14 et qui rendent nettement visible la relation entre les essais de courte durée et les essais de fluage, particulièrement en ce qui concerne les déformations permanentes.

De plus, cette forme de représentation confirme ce qui a été établi dans la première partie, à savoir que la limite de fluage est confondue avec la limite de proportionnalité.

En effet, la droite tracée par deux points ayant pour ordonnées

les déformations permanentes correspondant aux tensions des essais de fluage et pour abscisses les dilatations de fluage pour les mêmes tensions, passe par l'origine. C'est-à-dire que là où il n'y a pas de déformation permanente, il n'y a pas de fluage, les sensibilités des mesures étant bien entendu les mêmes.

De plus, on peut constater que les allongements résultant du fluage, jusqu'à une tension initiale d'essai de  $0,6 \sigma_e$  et  $2$  majorée de  $12\%$ , sont proportionnels aux déformations permanentes. Ceci est très net dans le cas des fils tréfilés dont la limite élastique est très élevée et aussi pour l'acier traité n. 5, qui ne possède de palier d'étirage.

On peut en tirer une conclusion importante à savoir qu'un seul essai de fluage effectué pour une tension initiale de  $0,8 \sigma_e + 12\%$  peut nous renseigner très exactement sur toutes les grandeurs du fluage aux tensions inférieures. Dans ce but, il suffit de faire un essai précis de courte durée pour nous renseigner sur les valeurs des déformations permanentes en fonction des tensions et un essai de fluage pour une tension de  $0,8 \sigma_e + 12\%$ . On trace alors un diagramme qui a pour abscisses les allongements de fluage et pour ordonnées les déformations permanentes. En joignant par une droite le point expérimental à l'origine, on peut prévoir les déformations de fluage pour toutes tensions inférieures. La proportionnalité des déformations permanentes instantanées et différées est certes remarquable, autant que l'identité de leur seuil de limite inférieure qu'elle confirme. Elle donne beaucoup de poids à la présomption que le mécanisme de ces déformations permanentes est le même. Les glissements différés agiraient suivant les mêmes plans que les glissements instantanés. Il appartient aux micro-observations de vérifier cette hypothèse.

Faute d'information, nous nous abstenons d'extrapoler, en prolongeant la droite vers les tensions supérieures au point expérimental. Un nombre suffisant d'essais permettrait peut-être d'établir des éléments pour calculer l'inclinaison de la droite, ce qui permettrait de se renseigner sur les valeurs de fluage au moyen d'un essai de courte durée. Dans l'état actuel des recherches, ce n'est pas encore possible. L'inclinaison très variable des droites de la planche 14 correspond à la remarque faite au § précédent sur l'allure très variée des courbes de fluage sous tension progressive.

#### XIV. — RELATIONS ENTRE LE FLUAGE ET LA RELAXATION. — RÉDUCTION DE LA COURBE DE RELAXATION À PARTIR D'UNE COURBE DE FLUAGE.

Si l'on connaît une courbe expérimentale de fluage pour une tension donnée et la fonction qui lie le fluage aux déformations perma-

No: d'acier	Si	Fluage	Déformations permanentes instantanées dans l'essai	
			decomité d'acier	Fluage Relaxation
21	132,4	56,0	1,0	5,1
	148,5	158,0	51,4	23,0
11	102,1	25,8	2,1	2,2
	134,6	311,4	55,9	59,0
22	100,4	25,2	55,0	50,0
	125,0	51,5	111,9	115,0
15	89,1	23,0	30,0	34,0
	114,4	14,8	115,0	131,5
10	95,1	21,5	13,5	11,1
	106,6	34,8	119,0	115,0
12	91,0	14,6	1,9	8,0
	125,4	106,1	58,5	60,0
5	113,1	4,6	4,9	5,9
	99,1	145,4	-	8,9

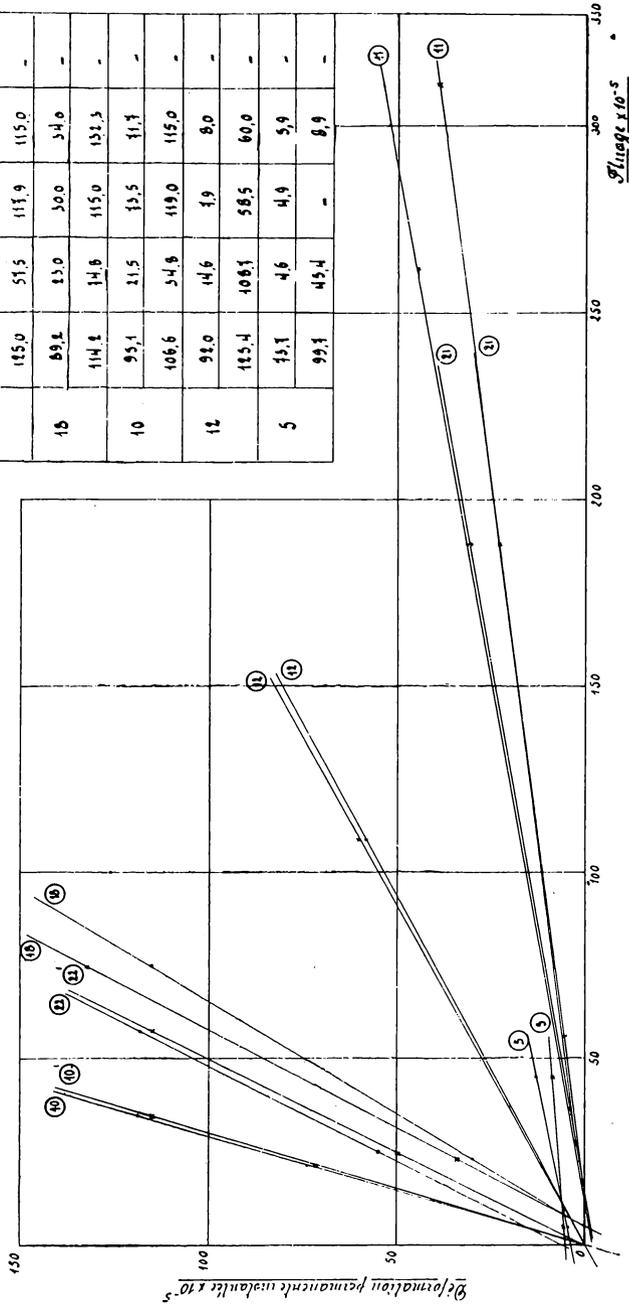


Fig. 14 - Relation entre les déformations permanentes instantanées et de fluage



pas perdre de vue que:

a) la relaxation et le fluage ont été mesurés sur des éprouvettes différentes, ce qui fait intervenir la dispersion matérielle;

b) dans l'expérience, le début de fluage n'est pas exactement pris au même temps que le début de la relaxation et la relaxation a beaucoup d'importance dans les premiers instants;

c) la relation entre les déformations permanentes instantanées et le fluage résulte aussi des essais sur des éprouvettes différentes et la planche montre qu'il y a une certaine dispersion;

d) les courbes expérimentales du fluage et de relaxation sont nécessairement affectées de certaines erreurs.

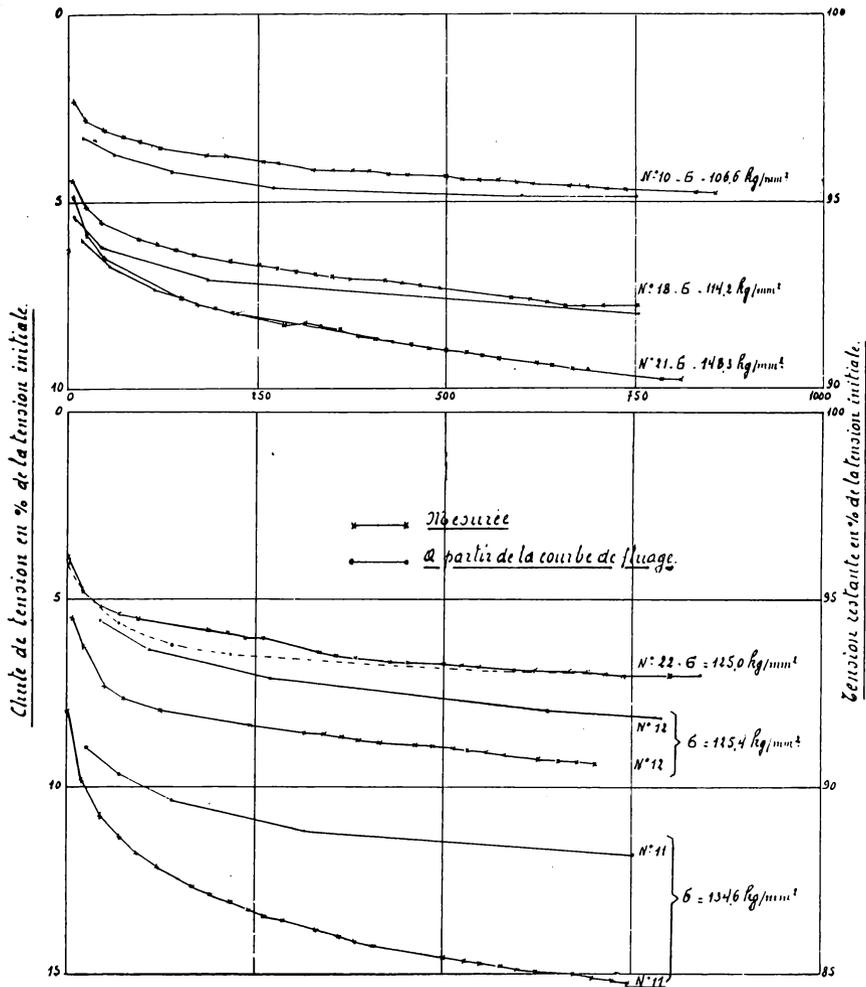


Fig. 16 - Relaxation

Après mise en évidence de tous ces facteurs qui sont des sources d'écart entre la courbe de relaxation établie à partir d'une courbe expérimentale de fluage et la courbe expérimentale de relaxation, on ne peut que constater la petitesse relative des écarts indiqués aux planches 15 et 16.

#### XV. - CONCLUSIONS PARTICULIÈRES ET GÉNÉRALES.

Les essais de fluage et de relaxation à tension élevée ont mis en évidence des différences considérables entre les aciers. Dans cette étude, nous nous bornerons à les constater et à les commenter. Il dépendra d'essais détaillés d'identification, de rechercher des explications d'ordre métallurgique ou structural à ces constatations.

Le fluage et la relaxation sont généralement plus élevés pour les fils tréfilés à haute résistance que pour les aciers ordinaires.

Cette conclusion est bien visible aux planches 11, 12 et 17.

L'acier n. 30 fait exception pour le fluage sous une tension de  $0,6 \sigma_r + 12\% = 62,5 \text{ kg/mm}^2$ . Il faut toutefois tenir compte du fait que sa limite d'étirage est de  $60,5 \text{ kg/mm}^2$ , une partie de la déformation permanente instantanée a sans doute été confondue avec la déformation de fluage.

L'acier dur n. 15, dont la résistance limite est de  $111 \text{ kg/mm}^2$ , a un comportement exceptionnellement favorable. Pour ce type d'acier la limite élastique conventionnelle de 0,1 et de 0,2% de déformation permanente est plus élevée que la limite d'étirage. Le fluage après 700 heures à la tension  $0,8 \sigma_{el}$  est négligeable ( $3,6 \times 10^{-5}$ ) et la déformation permanente  $1,5 \times 10^{-5}$  est très petite. Après 800 h., sous une tension de  $0,6 \sigma_r + 12\%$ , le fluage atteint  $31,2 \times 10^{-5}$  et on a obtenu une stabilisation complète déjà après 200 heures. La relaxation sous la même tension initiale est la moins grande de toutes les nuances d'acier essayées et atteint 3,5% de la tension initiale. Le réactivité est particulièrement grande. L'acier traité n. 5 a aussi un comportement très remarquable. Ces deux aciers semblent très propres à l'usage sous des tensions permanentes élevées. Les six barres d'acier se sont d'ailleurs comportées en fluage et en relaxation d'une manière très favorable (sous la réserve déjà indiquée du fluage du n. 30 sous la tension de  $62,5 \text{ kg/mm}^2$ , trop voisine de la limite d'étirage). Cette bonne tenue des aciers à limite d'étirage et leur stabilisation rapide peuvent être des conséquences de l'écrouissage et du vieillissement naturel.

Pour la tension initiale de  $0,8 \sigma_{e2} + 12\%$ , les valeurs du fluage et de relaxation des fils tréfilés sont très différentes; il en est de même des déformations permanentes correspondantes.

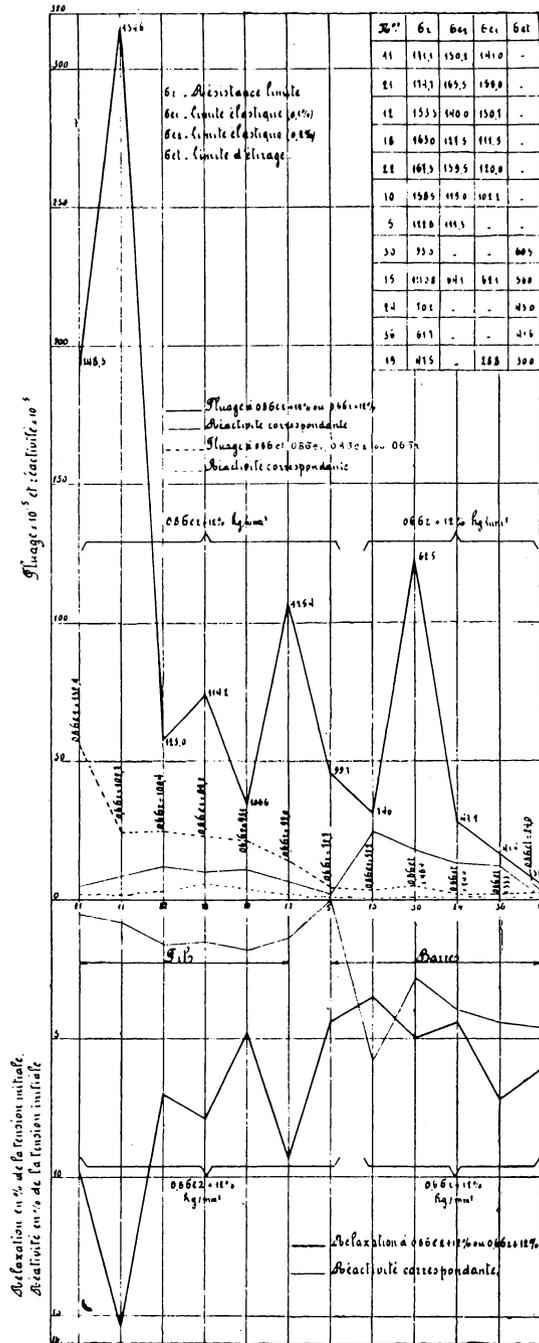


Fig. 17 - Fluage, relaxation et réactivités correspondantes

La différence est bien visible aux planches 1, 12 et 17. L'aire hachurée à la planche 14 représente la dispersion entre les mesures de déformations permanentes pour les mêmes tensions, dans les cas des essais de courte durée et dans le cas du fluage pour les différentes éprouvettes de même nuance d'acier. Les deux raisons principales de cette dispersion sont l'hétérogénéité des éprouvettes et la vitesse de mise en charge y compris le temps nécessaire pour faire la lecture. Il est probable qu'elle pourra être diminuée en fixant très strictement le mode de mise en charge.

Suivant l'allure des diagrammes tension-allongement, on peut diviser les fils tréfilés en deux groupes représentés schématiquement aux figures 18 *a* et *b*.

Pour le groupe *a*)  $0,6 \sigma^r$  est relativement peu inférieur à  $0,8 \sigma_{e2}$  et  $\sigma_r > \frac{\sigma_{e2} + \sigma_{e1}}{2}$  tandis que pour les fils du groupe *b*)  $\sigma_{e1} \cong \sigma_{e2}$  et  $0,6 \sigma^r < 0,8 \sigma_{e2}$   $\sigma^r$  est peu supérieur à  $\frac{\sigma_{e1} + \sigma_{e2}}{2}$ .

La limite élastique  $\sigma_{e2}$  des fils appartenant au groupe *a*) est généralement inférieure à la limite élastique  $\sigma_{e2}$  des fils appartenant au groupe *b*). Cette différence permet de réaliser des tensions plus élevées pour les fils du groupe *b*), mais on peut remarquer que le fluage en est aussi plus important, bien que les déformations permanentes instantanées soient moins élevées.

Acier n.	$\frac{0,8 \sigma_{e2}}{0,6 \sigma_r}$	$\frac{\sigma_{e2}}{\sigma_{e1}}$	$\frac{\sigma_r}{\frac{\sigma_{e2} + \sigma_{e1}}{2}}$	FLUAGE sous $0,8 \sigma_{e2}$ + 12%	DÉFORMATION permanente instantanée	Relaxation kg/mm <sup>2</sup>
<i>Groupe a</i>						
10	1,25	1,17	1,43	$35,1 \times 10^{-5}$	$115 \times 10^{-5}$	5,11
18	1,305	1,15	1,36	$74,8 \times 10^{-5}$	$132,3 \times 10^{-5}$	8,96
22	1,39	1,16	1,29	$57,5 \times 10^{-5}$	$115,0 \times 10^{-5}$	8,75
<i>Groupe b</i>						
21	1,58	1,05	1,08	$188,0 \times 10^{-5}$	$23 \times 10^{-5}$	14,55
12	1,52	1,07	1,12	$108,7 \times 10^{-5}$	$60 \times 10^{-5}$	11,66
11	1,47	1,07	1,17	$311,4 \times 10^{-5}$	$39 \times 10^{-5}$	20,42

La relaxation des fils du groupe *b* est aussi la plus grande.

Il semble que les fils les plus économiques soient ceux qui permettent de réaliser les plus grandes tensions tout en conservant un fluage et une relaxation faibles, tandis que les déformations perma-

nentes instantanées, qui sont les parties instantanées des fluages peuvent être éliminées immédiatement au cours de la mise en charge ou par une opération préalable.

M. Y. GUYON (11) admet que la précontrainte et la sécurité à la fissuration sont d'un prix d'autant moins élevé que le prix du *kilogramme limite élastique* est plus bas, seulement Y. GUYON admet que le fluage, la relaxation et les déformations permanentes instantanées sont égaux pour les différentes nuances d'aciers ou qu'il diffèrent très peu.

Si on observe la planche 13 où les fluages sont indiqués en fonction des tensions pour les différentes nuances d'acier, il saute aux yeux qu'on ne peut pas dire d'avance quel type d'acier est le meilleur, car cela dépend de conditions imposées. Si le cahier des charges d'un projet limite la tension à appliquer et la grandeur du fluage ou de la relaxation, on peut choisir d'après les essais la nuance d'acier qui remplira ces conditions tout en étant la moins coûteuse.

Par exemple, pour  $\sigma = 120 \text{ kg/mm}^2$ , les fils n. 21 et 22 donnent le même fluage, on peut donc choisir le moins coûteux. Si on voulait réaliser une tension de  $80 \text{ kg/mm}^2$  et limiter le fluage à  $10 \times 10^{-5}$  au maximum, on serait obligé de faire appel au fils n. 11 ou 12, parce que les fils n. 21 et 22 ne conviennent pas dans ces conditions.

D'après cela, l'économie d'un projet rend souhaitable de connaître en détail les particularités des divers matériaux.

Pour différents fils, on peut indiquer les intervalles dans lesquels le fluage est minimum aux tensions les plus élevées (planche 13).

Fluage $10 \times 10^{-5}$	$\sigma \text{ kg/mm}^2$	Acier n.
0-14	78-91	11
14-28	91-104	12
28-48	104-120	22
48-100	120-140	21

On peut faire des remarques analogues en relaxation. Ce qui compte dans ce cas est la tension finale. La planche 12 montre que le fil 22, tendu initialement à  $125 \text{ kg/mm}^2$ , donne une tension finale supérieure à celle du fil n. 11, tendu initialement à  $134,5 \text{ kg/mm}^2$ . Il en est pratiquement de même du fil 12 (tension initiale  $125,4 \text{ kg/mm}^2$ ). Seul le fil 21 se montre supérieur en relaxation.

## XVI. — RÉSUMÉ.

1. Le fluage et la relaxation diffèrent suivant la qualité d'acier. Pour l'acier ordinaire, mi-dur et dur, ils sont relativement moins grands que ceux des fils tréfilés. Même après avoir dépassé la limite

d'étirage, le fluage et la relaxation des aciers ordinaires, mi-dur et dur sont peu importants et assez rapidement stabilisés.

2. Pour les constructions utilisant l'acier soumis à des tensions permanentes élevées, la qualité d'acier la plus favorable est celle qui pour la tension imposée possède la relaxation (ou le fluage) la moins grande. La représentation du fluage en fonction des tensions montre que pour les qualités des aciers que nous avons étudiées, il n'y en a pas qui soient meilleures que les autres, mais qu'il existe des intervalles dans lesquels un certain type est supérieur.

3. Pour des aciers qui n'ont pas de palier d'étirage, nous avons constaté une relation linéaire entre les essais de courte durée et les essais de fluage. Elle confirme l'identité pratique des limites de fluage — relaxation et de proportionnalité. Elle permet de connaître toutes les valeurs de fluage pour les tensions comprises entre la limite de fluage (limite de proportionnalité) et la tension d'un essai de fluage, après une étude de courte durée des déformations permanentes instantanées et un essai de fluage à tension élevée.

4. Il a été établi une construction permettant de tracer la courbe de relaxation à partir d'une courbe expérimentale de fluage. Il a été vérifié que ces courbes théoriques de relaxation à partir d'une courbe expérimentale de fluage, sont assez voisines des courbes expérimentales de relaxation pour les mêmes tensions initiales.

5. La construction de la courbe de relaxation à partir d'une courbe expérimentale de fluage ouvre la voie pour l'étude de comportement des aciers dans les circonstances où les deux phénomènes peuvent se manifester, comme il peut se passer en réalité dans une construction.

Selon cette voie, on peut également suivre l'effet de surtensions initiales et leur influence sur le fluage et la relaxation.

6. Sous des tensions élevées, mais qui ne dépassent pas la plus petite des valeurs  $0,8 \sigma$  e 2 ou  $0,6 \sigma_s$ , les courbes de fluage montrent encore des discontinuités notables. Celles-ci ne se marquent plus qu'exceptionnellement lorsque les tensions limites précitées sont majorées de 12%; on remarque que le fluage et la relaxation de certains fils ont alors une tendance à croître très fortement.

7. Pour les fils étirés et pour les barres d'acier sans palier d'étirage, la limite élastique conventionnelle à 0,2% n'a pas de signification pour le fluage et la relaxation. Les caractéristiques principales sont la résistance à la rupture et le fluage où la relaxation sous les tensions prévues en service (12).

8. Le palier d'étirage, lorsqu'il existe, exerce une influence notable sur le fluage et la relaxation; il introduit une discontinuité dans ces phénomènes. L'étude en est poursuivie.

9. La limite de fluage ou de relaxation, qui à une signification mécanique très caractéristique comme généralisation de la limite de proportionnalité, n'a d'influence pratique sur le fluage et la relaxation que lorsqu'elle est très élevée. Elle n'en a aucune lorsqu'elle est basse.

### 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. SMET, *Un nouveau système d'ancrage des armatures de précontrainte. Le système Franki-Smet*. « La Technique des Travaux », nn. 11-12. 1951.

[3] R. L'HERMITE, *L'expérience et les théories nouvelles de la résistance des matériaux* 2<sup>a</sup> édition, Dunod, Paris. 1945.

[4] A. MC CANCE, *The plastic behaviour of solids* « Fourth Hatfield Memorial Lecture. The Journal of the Iron and Steel Institute », november 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, R. JACQUEMIN, *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-M. EUDIER, *Théorie et expériences du fluage et de la relaxation des polycristaux*. « Revue de Métallurgie », n. 1, 1950.

[10] CH. CRUSSARD-B. JAOUËL, *Contribution à l'étude de la forme des courbes de traction des métaux et à son interprétation physique*. « Revue de Métallurgie », n. 8. 1950.

[11] Y. GUYON, *Béton précontraint*. Ed. Eyrolles. Paris. 1950.

[12] F. LEVI-G. PIZZETTI, *Fluage, plasticité, précontrainte*. Ed. Dunod, Paris. 1951.

---

N.B. - Ces études ont été faites sous les auspices du Comité Belge pour l'étude du fluage des métaux à la température ordinaire, avec l'appui de l'Institut pour l'encouragement à la Recherche Scientifique dans l'industrie et l'agriculture, à Bruxelles.