

UNIVERSITÉ DE LIÈGE
COURS DE CONSTRUCTION DU GÉNIE CIVIL

N° 55

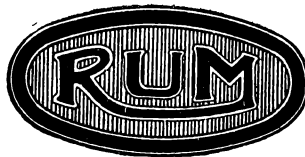
LA LIMITE DE FLUAGE DES ACIERS A LA TEMPÉRATURE ORDINAIRE

PAR

F. CAMPUS

Professeur à l'Université de Liège
Directeur des Laboratoires d'Essais des Constructions du Génie Civil

Extrait de la *Revue Universelle des Mines*
(9^e Série, tome III, n° 12 — 1947)



LIÈGE
H. VAILLANT-CARMANNE, S. A., IMP. DE L'ACADÉMIE, 4, PLACE ST-MICHEL, 4

1947

17877

LA LIMITE DE FLUAGE DES ACIERS A LA TEMPÉRATURE ORDINAIRE ⁽¹⁾

par F. CAMPUS,

Professeur à l'Université de Liège.

Directeur des Laboratoires d'Essais des Constructions du Génie Civil

Résumé. — De nouveaux procédés de construction utilisant l'acier soumis à des tensions permanentes élevées attirent actuellement l'attention sur les déformations lentes des aciers sous tension constante à la température ordinaire. Le fluage est d'ailleurs intéressant à étudier du point de vue de la connaissance scientifique des matériaux. L'auteur expose un dispositif et une méthode de détermination de la limite de fluage dont il donne la définition et la signification. Une autre manifestation des déformations lentes est la diminution de tension sous

déformation constante, qui est appelée relaxation pour la distinguer du fluage sous tension constante. Des dispositifs pour la détermination de la limite de relaxation sont décrits. Les dispositifs et méthodes sont discutés, notamment au point de vue de leur précision. Quelques résultats sont indiqués et commentés. L'étude effectuée avec la collaboration de la S. A. John Cockerill et avec l'appui de l'I. R. S. I. A. a permis de dégrossir le problème et permet d'aborder la phase des essais statiques.

I. — Dispositif d'essai pour les mesures de fluage sous tension constante

1. — Description. — La mesure des déformations est effectuée au moyen d'un élasticimètre réalisé dans les ateliers de nos laboratoires. Il mesure le déplacement relatif de deux sections transversales d'une barre cylindrique soumise à un effort de traction longitudinal. Pour corriger tout effet accidentel d'excentricité de cet effort,

l'appareil détermine les déplacements relatifs de deux groupes de trois points situés, dans les plans des deux sections transversales, aux sommets d'un

triangle équilatéral dont le centre est sur l'axe de l'éprouvette. A cet effet, deux étriers sont serrés sur la barre, qu'ils embrassent par des couteaux définissant les contours des sections transversales (fig. 1). L'étrier supérieur porte trois micromètres

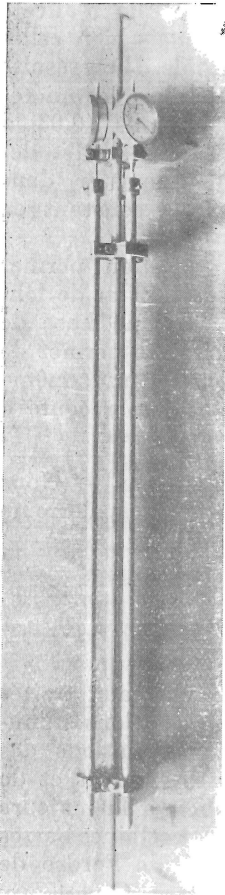


Fig. 1

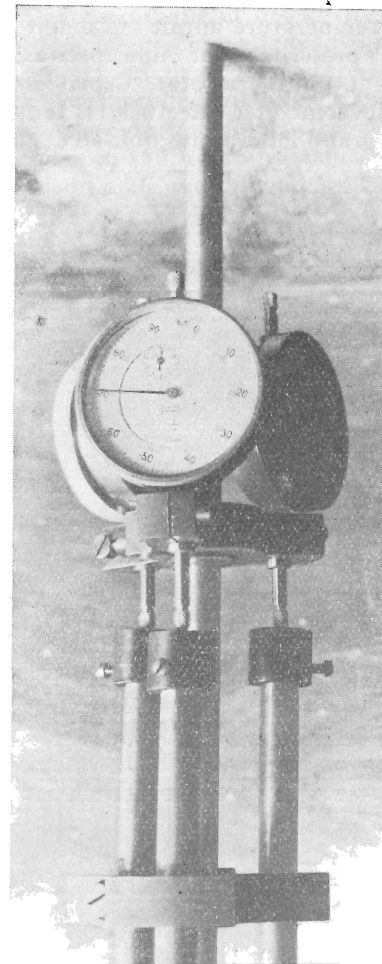


Fig. 2

à cadran (fig. 2) dont les palpeurs s'appuient sur les extrémités supérieures de trois barres identiques à la barre essayée et dont les extrémités inférieures sont pincées dans l'étrier inférieur (fig. 1). En dessous de l'étrier supérieur se trouve un troisième étrier fixé sur la barre essayée et dans lequel coulissent sans frottement les trois barres de l'élasticimètre.

(1) Communication faite le 11 juin 1947 à l'Association Belge pour l'Essai des Matériaux, à Bruxelles.

Nous avons, dans les essais déjà effectués, opéré sur des fils étirés de 5 mm de diamètre et des barres d'acier spécial de 12 mm de diamètre. Ces éprouvettes étaient mises sous tension constante dans une machine de traction Amsler de 20 tonnes, de grande hauteur, à commande électrique et dynamomètre pendulaire avec cadran de 400 mm de diamètre et équipée d'un dispositif de maintien automatique de charge constante.

Le montage de l'élasticimètre le rend indifférent aux variations de température uniformes dans des limites modérées. Comme il importe de faire les déterminations dans des conditions de température bien définies, par exemple entre 15° et 20° C, nous avons prévu tout d'abord d'envelopper l'éprouvette avec son élasticimètre d'une boîte en matériaux isolants (fibre de bois comprimée), dans laquelle la température aurait été maintenue entre les limites prescrites par une petite résistance chauffante et un thermostat. Cependant, comme les essais devaient être effectués en toutes saisons dans notre grand laboratoire qui, en 1946 et même

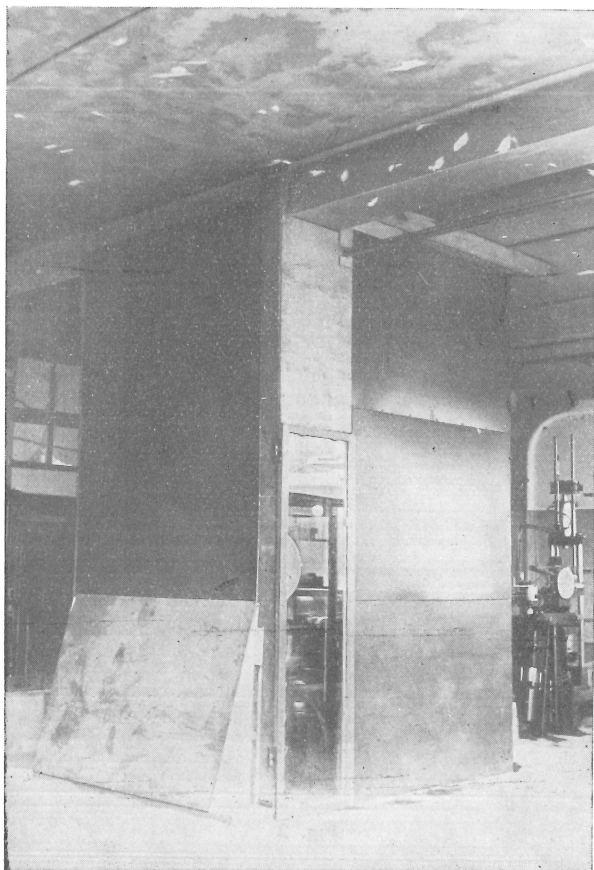


Fig. 3

encore actuellement est en réparation, non chauffé et mal clôturé, nous avons préféré envelopper toute la machine d'une cabine à température quasi constante. Le chauffage en est réalisé par un radiateur électrique à sept résistances indépen-

dantes de 1 kW chacune et 3 lampes de 150 W, servant à l'éclairage lors des mesures et au réglage de la puissance de chauffe par échelons de 0,5 kW. La température réalisée a été toujours de 20° C, à moins d'un degré près (fig. 3).

Nous avons opéré nos essais sur une longueur de 700 mm, en raison de la longueur des barres qui nous étaient fournies et qui mesuraient 1 m. Dans ces conditions, nous avons opéré avec des micromètres au 1/100^e de mm, permettant l'estimation de 1/1000^e. Une division des micromètres correspond à un allongement spécifique de $\frac{1}{70.000} = 0,00014285$ ou 0,0014285 %; on peut estimer le dixième de cet allongement. Une division correspond en régime élastique à une tension d'environ 0,3 kg/mm². Cette sensibilité est suffisante. Celle du dynamomètre de la machine de traction permet la lecture des efforts à 10 kg près.

Le dispositif du maintien automatique de charge constante produit en réalité une très petite variation de la charge de part et d'autre de la valeur imposée, inférieure à 1/1000^e de sa valeur. Elle n'affecte pas les lectures au dynamomètre mais bien celles de l'élasticimètre qui est plus sensible. Il en résulte une oscillation permanente des aiguilles des micromètres, de l'ordre de 1 à 2 microns (0,03 à 0,06 kg/mm²). Cette oscillation élimine l'effet des petits frottements qui pourraient exister dans l'élasticimètre et assure un contrôle constant de son parfait fonctionnement.

La machine de traction en question permet d'essayer des barres ayant jusqu'à 1,50 m de longueur, ce qui permet d'opérer sur une base de 1200 mm au maximum. L'élasticimètre permet de réduire la longueur de mesure à 200 mm, même moins éventuellement; on aurait alors recours à des micromètres au 1/1000^e de mm.

2. — Discussion des conditions d'essai. — Nous croyons pouvoir éliminer comme causes d'erreurs les effets :

- a) des variations de température;
- b) d'excentricité de l'effort;
- c) de courbure du barreau.

Nous avons surtout essayé des barreaux traités thermiquement. En dépit des précautions minutieuses prises pour limiter les déformations des barres au cours des traitements thermiques et de la rectification soignée pour éliminer la majeure partie des déformations inévitables, certaines barres ont conservé une légère courbure, de l'ordre de 1 mm de flèche sur 1 m de longueur. Quant aux fils, fournis en rouleaux, ils avaient une forte courbure initiale.

La longueur l de mesure peut être appréciée à moins de 1 mm près. L'erreur relative maximum sur la dilatation

$$\delta = \frac{(\Delta l)}{l} \quad \text{est} \quad \left[\frac{d\delta}{\delta} = \frac{\delta(\Delta l)}{(\Delta l)} + \frac{(dl)}{l} \right]$$

Par exemple, pour :

$$l = 700 \text{ mm} \quad dl = 1 \text{ mm} \quad \frac{dl}{l} = \frac{1}{700}$$

$$l = 1200 \text{ mm} \quad dl = 1 \text{ mm} \quad \frac{dl}{l} = \frac{1}{1200}$$

$$l = 200 \text{ mm} \quad dl = 0,5 \text{ mm} \quad \frac{dl}{l} = \frac{1}{400}$$

Quant à $\frac{d(\Delta l)}{(\Delta l)}$, il varie selon l'importance de la lecture. (Δl) résulte de la différence de deux lectures, initiale et finale. Nous admettons que $d(\Delta l)$ est la somme des erreurs fortuites des deux lectures. Si l'on admet $d(\Delta l) = 0,01 \text{ mm}$, on a, pour :

$$\Delta l = 50 \quad 100 \quad 200 \quad 250 \quad 300 \text{ centièmes de mm.}$$

$$\frac{d(\Delta l)}{(\Delta l)} = \frac{1}{50} \quad \frac{1}{100} \quad \frac{1}{200} \quad \frac{1}{250} \quad \frac{1}{300}$$

Si (Δl) était égal à 0,002 mm (micromètres au $\frac{1}{1000}$ de mm), $\frac{d(\Delta l)}{(\Delta l)}$ serait cinq fois moindre. On peut admettre que la dilatation δ est toujours mesurée avec une erreur inférieure à 2%, le plus souvent inférieure à 1%.

En ce qui concerne la tension, $\sigma = \frac{4F}{\pi D^2}$

$$\frac{d\sigma}{\sigma} = \frac{dF}{F} + \frac{2dD}{D}$$

Si nous admettons $dF = 10 \text{ kg}$, pour :

$$F = 1000 \quad 2000 \quad 5000 \quad 10.000 \quad 20.000 \text{ kg.}$$

$$\frac{dF}{F} = \frac{1}{100} \quad \frac{1}{200} \quad \frac{1}{500} \quad \frac{1}{1000} \quad \frac{1}{2000}$$

Pour dD , la question est plus délicate. Il est certain que les barres et les fils ne sont pas rigoureusement cylindriques. Nous l'admettons cependant, car relever les écarts de forme par des mesures multiples ou même relever le diamètre moyen par pesée compliquerait beaucoup les opérations. Dans ces conditions, nous croyons qu'on ne peut guère être certain du diamètre à moins de 0,1 mm près. Dès lors, pour :

$$D = \quad 5 \quad 10 \quad 15 \quad 20 \text{ mm}$$

$$\frac{2dD}{D} = \quad 0,04 \quad 0,02 \quad 0,0133 \quad 0,01.$$

L'imprécision la plus grande porte donc sur la mesure de la tension et provient surtout du diamètre, élément qui paraît à première vue le plus simple à mesurer.

Dans le cas des fils de 5 mm, l'erreur sur la tension peut atteindre l'ordre de 5%. Dans le cas des barreaux de 12 mm, elle est inférieure à 2%.

3. Appréciation critique et possibilités. — Le matériel décrit employé dans les conditions indiquées a donné toute satisfaction. Il a fonctionné sans arrêt pendant des périodes de plusieurs

semaines, sans aucun incident. Seules des pannes de courant peuvent l'affecter.

Lorsque, prochainement, les locaux des laboratoires seront entièrement réparés, on abandonnera le système de la cabine thermostatique et on protégera les éprouvettes des variations de température par les boîtes thermostatiques initialement prévues.

L'inconvénient pratique du dispositif employé jusqu'à présent est l'immobilisation de longue durée d'une machine de traction, ce qui n'est possible que si le laboratoire dispose d'un grand assortiment de machines.

Il provoque une usure accélérée du matériel par le fonctionnement ininterrompu du moteur et des pompes pour le maintien de la charge constante. Cependant, le fonctionnement est excellent, ainsi que nous l'avons indiqué et nous pensons qu'il est préférable que les machines travaillent, au risque de s'user, plutôt que de rester inactives et d'exiger un entretien sans rendement utile. Dans cet esprit, nous envisageons de faire des essais de fluage sur notre machine de 100 tonnes à maintien de charge constant (jusqu'à 36 mm de diamètre) et sur notre machine de 50 tonnes équipée de même (jusqu'à 25 mm de diamètre). Trois dynamomètres supplémentaires avec pompes et dispositifs de maintien de charge constante nous permettent au besoin, avec notre collection de vérins de 20, 30 et 50 tonnes, de multiplier le nombre de barres en essai simultanément sous tension constante. Enfin, nous disposons encore de deux machines de traction de 10 tonnes, qui seront prochainement pourvues de dispositifs de maintien automatique de charge constante et d'une machine à poids de 10 tonnes, que notre Collègue, M. Ch. Massonnet, chargé du cours de résistance des matériaux, veut bien mettre à notre disposition. Nous avons d'ailleurs dès 1944 envisagé la construction d'une batterie de machines à leviers et poids, de 5 et de 10 tonnes de capacité. La pénurie de matériaux ferreux en a empêché la réalisation. Ces machines à poids peuvent être réalisées pour des longueurs variables d'éprouvettes. Il importe que la mordache inférieure soit réglable, afin de pouvoir maintenir le levier de charge au voisinage de l'horizontal au fur et à mesure du fluage.

II. — Limite de fluage des aciers à la température ordinaire

4. Signification, définition et méthode de détermination. — Avec le concours de la S. A. John Cockerill, représentée par M. Herbiet, chef des Laboratoires de cette Société, et M. Coheur, agrégé de l'Université de Liège, directeur du Centre Belge de Métallurgie physique, nous avons entrepris une recherche concernant la limite de fluage des aciers à la température ordinaire. Elle a été favorisée d'une subvention de l'I.R.S.I.A. (voir rapport annuel de cet Institut pour l'exercice 1945). L'étude métallurgique est réservée à nos collaborateurs ci-dessus nommés; nous nous bornons

dans cette communication aux résultats des essais mécaniques. Ils ont été effectués au moyen du dispositif décrit, spécialement créé pour cette étude. Le premier but de la recherche était de préciser la signification de la limite de fluage, d'en établir la définition et une méthode de détermination adéquate. Ces résultats sont acquis. Le mode opératoire est le suivant.

La barre est tendue sous une tension constante, autant que possible inférieure mais voisine à la limite de fluage.

On maintient cette tension pendant un temps assez long, mais qui pour les premières charges ne dépasse généralement pas 120 à 144 heures, jusqu'à ce que le fluage éventuel soit stabilisé ou que l'on admette qu'il n'y en a pas. Le premier fluage ne se manifeste souvent qu'après une durée de cet ordre. On élève alors la tension d'un ou deux kg/mm^2 et on recommence l'opération précédente, jusqu'à ce que le fluage soit stabilisé et ainsi de suite.

On note le fluage final pour chaque palier de tension. On trace ensuite un diagramme sur lequel on porte en ordonnées les tensions et en abscisses, à une échelle assez grande, les *fluages cumulés* correspondants. On réunit les points correspondants par une courbe. Nous définissons son intersection avec l'axe des ordonnées comme *limite de fluage absolue ou théorique* (fig. 4).

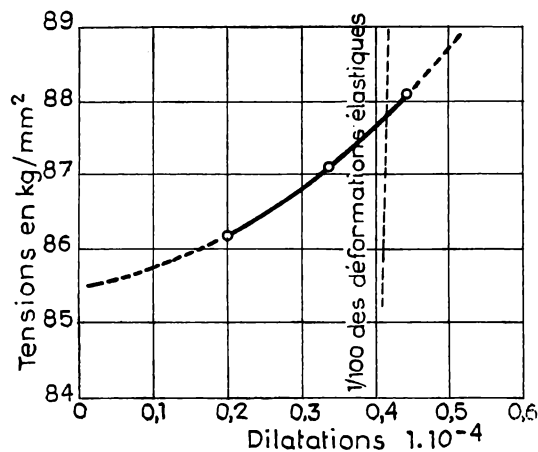


Fig. 4

On peut objecter à cette définition que la limite est obtenue nécessairement par extrapolation de la courbe; elle sera d'autant plus exacte que le premier point de la courbe est plus voisin de l'axe des ordonnées.

Pour écarter cette objection, nous définissons comme *limite de fluage conventionnelle* l'intersection de la courbe avec une droite oblique correspondant à 1% de la déformation élastique sous la tension correspondante. Ce point est défini sans extrapolation. Le plus souvent, cette limite diffère peu de la précédente (fig. 4).

5. Examen critique. — On peut objecter à la méthode que l'on n'est pas certain d'avoir laissé

chaque tension appliquée pendant un temps assez long pour que tout le fluage se soit produit. En d'autres termes, si on avait laissé les tensions appliquées plus longtemps, le fluage aurait encore pu croître.

Le fluage est assez discontinu sous l'effet des tensions voisines de la limite (fig. 5). Lorsque la tension augmente, il devient plus continu (fig. 6), mais il tend tout de même à se stabiliser après un

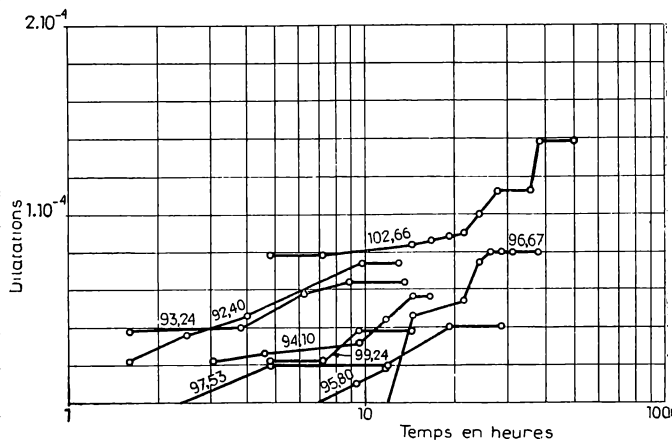


Fig. 5

certain temps, du moins dans les cas que nous avons examinés, en ne dépassant pas la limite de fluage de plus de 15 à 20%.

Il est dans la nature des choses qu'au voisinage de la limite de fluage, le temps après lequel se produit le premier fluage soit assez long, mais on peut pallier à l'objection par la croissance progressive de la tension jointe à la considération du fluage cumulé. Le fluage, très faible d'ailleurs, qui n'aurait pas eu le temps de se produire sous une tension donnée sera très probablement compris dans le fluage sous la tension immédiatement supérieure.

La pratique de l'essai sur des aciers d'un type déterminé engendre rapidement une perception routinière du phénomène qui donne, pensons-nous, une précision suffisante à la définition de la limite conventionnelle, sinon à celle de la limite théorique.

Une autre objection est la suivante. En opérant par paliers successifs de tension sur une même barre, on écroûte celle-ci et on l'altère, d'autant plus que la durée d'essai est plus grande (vieillessement naturel). Il est cependant beaucoup plus simple d'opérer sur une seule barre. Comme on opère dans un domaine de faible variation totale de tension (quelques kg/mm^2) en dessous de la limite apparente d'élasticité, l'écroûissage et le vieillissement doivent être très faibles et les écarts qui peuvent en résulter doivent être inférieurs aux écarts pouvant provenir de l'hétérogénéité de la matière si on opère sur plusieurs barres soumises successivement à une seule des tensions échelonnées.

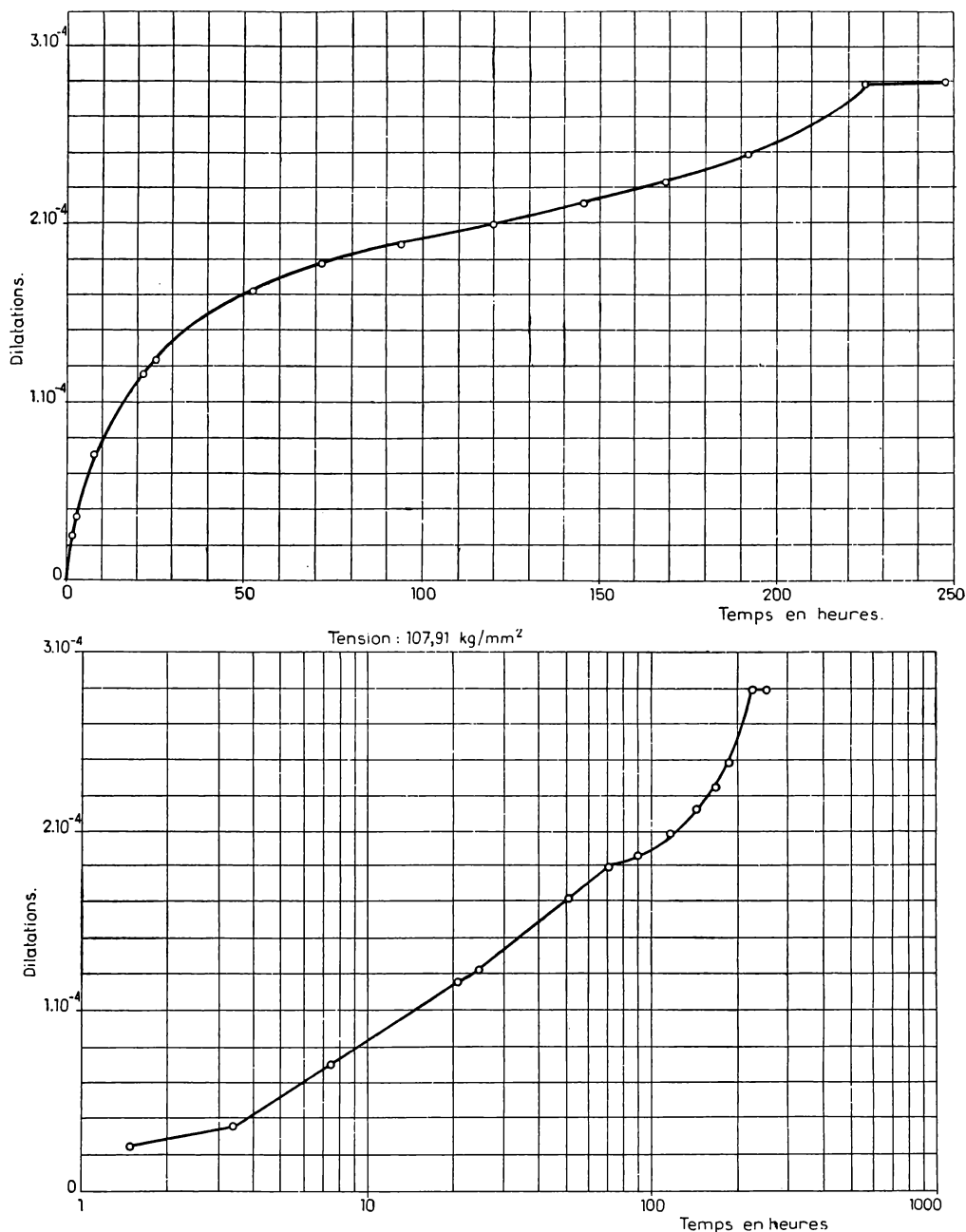


Fig. 6

Pour de l'acier doux, la limite de fluage théorique a été déterminée par les deux méthodes et les deux valeurs trouvées sont très voisines. L'écart est encore moindre pour la limite conventionnelle de fluage (voir plus loin).

Nous pensons, en conclusion, que la méthode est valable pour toutes les nuances d'acier, depuis l'acier doux ordinaire jusqu'aux aciers alliés et traités et pour les fils étirés. Toutes les mesures de déformations, aussi bien immédiates que différées, comportent trois lectures :

- a) initiale sous charge nulle ;
- b) finale sous charge ;
- c) finale après décharge complète.

De la sorte, on est certain d'observer en tous cas la totalité des déformations immédiates ou différées et de séparer en toutes circonstances les déformations réversibles et les déformations permanentes.

6. Observations diverses. — En ce qui concerne les écarts entre les barreaux soumis aux essais, on peut chercher à les déceler par une empreinte superficielle, par exemple la dureté Vickers. Comme il s'agit de déformations, nous préférons soumettre les barreaux à une tension très inférieure à la limite de proportionnalité et déterminer de la sorte le module de Young.

Nous recevons généralement des lots de six

barreaux réputés identiques. On emploie comme barreaux de comparaison de l'élasticimètre les trois dont les valeurs de E présentent le plus d'écart de la moyenne. On en trouve généralement au moins trois dont les valeurs de E sont très voisines; elles servent aux essais.

Dans le premier essai, cette précaution n'avait pas été prise et, par hasard, un des trois barreaux essayés avait une valeur de E quelque peu différente de celle des deux autres avec une différence concomitante entre les tensions de rupture.

Il est tout naturel de chercher à établir une corrélation entre la limite de fluage théorique ou conventionnelle et les caractéristiques ordinaires des aciers : limite de proportionnalité, limite apparente d'élasticité, limite de rupture. Si une telle corrélation existe, elle ne pourra être établie qu'après un grand nombre d'essais statistiques. Des quelques essais qu'il nous a été donné de faire, il résulte déjà que cette corrélation variera avec la nature et le traitement des produits.

D'une manière générale, nous trouvons utile, pour nous orienter en vue de la détermination de la limite de fluage par la méthode indiquée ci-dessus, de procéder au préalable, au moyen de l'élasticimètre décrit, au relevé d'un diagramme de traction ordinaire mais de grande sensibilité, sous tension croissante, avec retour à zéro après chaque échelon de tension, de manière à mettre en évidence les déformations permanentes. On relève ainsi avec assez de précision la limite conventionnelle de proportionnalité (fixée à la première déformation permanente sensible, généralement inférieure à 0,001%, éventuellement 0,0005%); la limite apparente d'élasticité conventionnelle (fixée à une déformation permanente de 0,2%), enfin naturellement la limite de rupture et l'allongement moyen de rupture, ainsi que la striction, relevés à la manière ordinaire. Voici quelques résultats comparatifs.

Acier	E (kg/mm ²)	R _p (kg/mm ²)	R _e (kg/mm ²)	R _r (kg/mm ²)	A%	R fl. th. (kg/mm ²)	R fl. conv. (kg/mm ²)
705 (I)	20.460	36	138,5	150,5	6,25	—	—
id. (III)	21.400	—	—	140,48	—	91,9	92,5
908	21.600	37,5	139	146,19	3,2	85,6	87,8
505 S	21.800	45,8	139,5	150,75	3,75	88	93,8
805	21.200	35,8	97,5	120,78	4	61,5	62
Acier doux	20.700	23	24,7	39,4	35,6	22,4 (22,9)	23
Fil d'acier	19.700	31	114	150,5	7	13 (17)	20

N. B. — L'allongement moyen de rupture est rapporté à une distance entre repères égale à dix fois le diamètre du barreau.

La figure 7 reproduit le diagramme de traction ordinaire relatif au barreau I de l'acier marqué 705, en indiquant toutefois à part les déformations élastiques (ou réversibles) et les déformations permanentes instantanées. Dès 36 kg/mm² apparaissent des déformations permanentes.

La limite apparente d'élasticité à 0,2% est beaucoup plus haute (138,5 kg/mm²) et, comme elle est très supérieure à la limite de fluage, on voit qu'elle n'a guère de signification et qu'elle pourrait diminuer sensiblement si on considérait

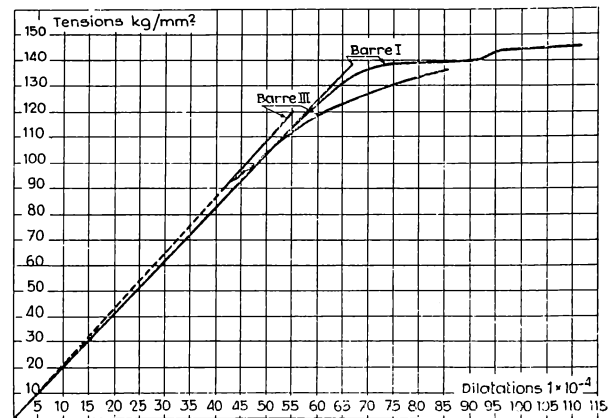


Fig. 7

les déformations permanentes non pas dites instantanées mais finales, après fluage total sous la tension considérée.

Pour le même acier, on a tracé sur la même figure, pour le barreau III, le diagramme des déformations réversibles et celui des déformations permanentes, dont celles comprises entre 92,40 et 102,66 kg/mm² tiennent compte du fluage. Pour les tensions supérieures, il s'agit des déformations permanentes instantanées. Néanmoins, ce diagramme diffère sensiblement d'allure de celui des déformations permanentes instantanées du barreau I.

On remarque aussi, d'après la figure 7, que le diagramme ordinaire de traction, tel que celui du barreau I, ne donne aucune indication sur la valeur de la limite de fluage. Les courbes de déformations, tant totales que réversibles, ne présentent aucune discontinuité ni changement d'allure jusqu'à la tension de 110 kg/mm². Aucune des deux courbes n'est rigoureusement une droite, mais les courbures sont si faibles et si régulières jusqu'à des tensions

nettement supérieures à la limite de fluage que le tracé de la courbe dérivée par exemple, qui indique des valeurs légèrement et régulièrement décroissantes de $\frac{d\sigma}{d\delta}$ ne présente aucun point singulier à la limite de fluage.

Les barreaux I et III ont des valeurs de E assez différentes (20.460 et 21.400 kg/mm²), ce qui n'a été reconnu qu'après l'essai. C'est ce qui a incité

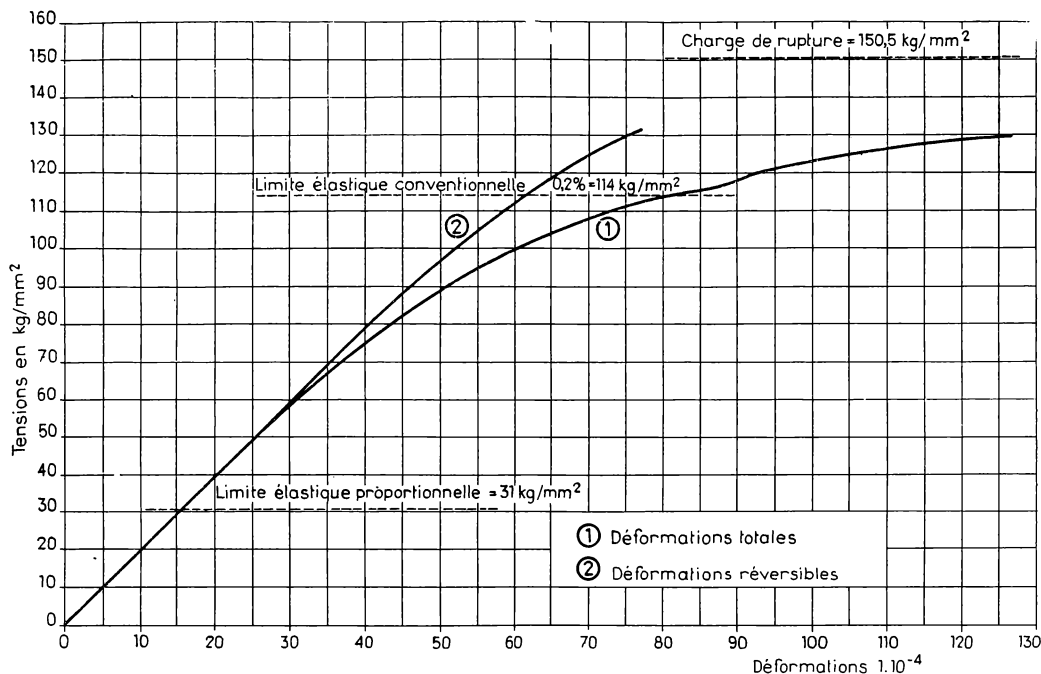


Fig. 8

à prendre la précaution indiquée plus haut pour le triage des barres. La différence se manifeste aussi sur les résistances à la rupture (voir tableau précédent). C'est un indice des écarts que l'on peut trouver entre barreaux d'un même lot, cependant destinés à des essais, c'est-à-dire traités avec soin.

Signalons qu'un barreau II, de même acier 705 que le barreau I et ayant sensiblement le même module ($E = 20.640 \text{ kg/mm}^2$), a flué de $2,79 \cdot 10^{-4}$ sous $107,91 \text{ kg/mm}^2$ après 248 heures, ce qui fait 5,34% de la déformation élastique sous cette tension.

Pour l'acier doux, on remarque que la limite de fluage théorique est légèrement inférieure à la limite de proportionnalité, qui se confond pratiquement avec la limite de fluage conventionnelle. Pour cet acier, on a opéré par les deux moyens envisagés :

- une barre soumise à des tensions croissantes échelonnées, limite de fluage théorique $22,4 \text{ kg/mm}^2$;
- une barre distincte pour chaque tension, limite de fluage théorique $22,9 \text{ kg/mm}^2$.

Par les deux moyens, la limite de fluage conventionnelle est 23 kg/mm^2 . L'écart d'un peu plus de 2%, pour des barreaux différents, est dans les limites des écarts accidentels ; il confirme nos commentaires précédents et justifie la méthode du barreau unique.

La figure 8 reproduit le diagramme de traction d'un fil d'acier étiré de 5 mm ; la figure 9 divers diagrammes de fluage en fonction du temps. Sous une tension de 90 kg/mm^2 , après 360 heures environ, le fluage total était de $4,53 \cdot 10^{-4}$, soit environ 10% de la déformation élastique ($E = 19.700 \text{ kg/mm}^2$). Mais le fluage permanent était $3,17 \cdot 10^{-4}$, soit environ 7% de la déformation élastique. Il est en

effet apparu pour ce fil une diminution appréciable du fluage après décharge (fig. 10). De telle sorte que, selon que l'on se réfère aux courbes de fluage permanent ou de fluage total, on trouve à peu près comme limites de fluage théorique 13 ou 17 kg/mm^2 . En fait, dans cet essai, la limite a été déterminée avec une relative imprécision à cause de sa faible valeur. La figure 11 montre, pour ce fil, les distinctions à établir entre les diagrammes des déformations réversibles et totales, immédiates et définitives (après fluage).

Les barreaux en acier allié et traité présentent aussi le phénomène de la réversibilité d'une partie du fluage, mais aux tensions peu supérieures à la limite du fluage sous lesquelles nous avons opéré, cela correspond à une fraction de division seulement des micromètres, c'est-à-dire que le phénomène n'est pas mesurable.

Ces quelques exemples montrent l'intérêt d'essais de fluage multipliés effectués dans des conditions de grande sensibilité, en vue d'une meilleure connaissance des déformations sous l'effet des efforts, de l'étude des effets de divers traitements sur ces propriétés de déformation, enfin d'une mise en œuvre plus assurée sous des tensions élevées.

III. — Relaxation ou variation de tension sous déformation constante

7. Dispositif expérimental. — Si l'on impose à un barreau une déformation sous une tension initiale supérieure à la limite de fluage et que l'on maintienne cette déformation constante, le phénomène du fluage va se manifester sous la forme de la relaxation, c'est-à-dire de la diminution de la tension en fonction du temps, en tendant vers une limite. Cette forme du phénomène présente au point

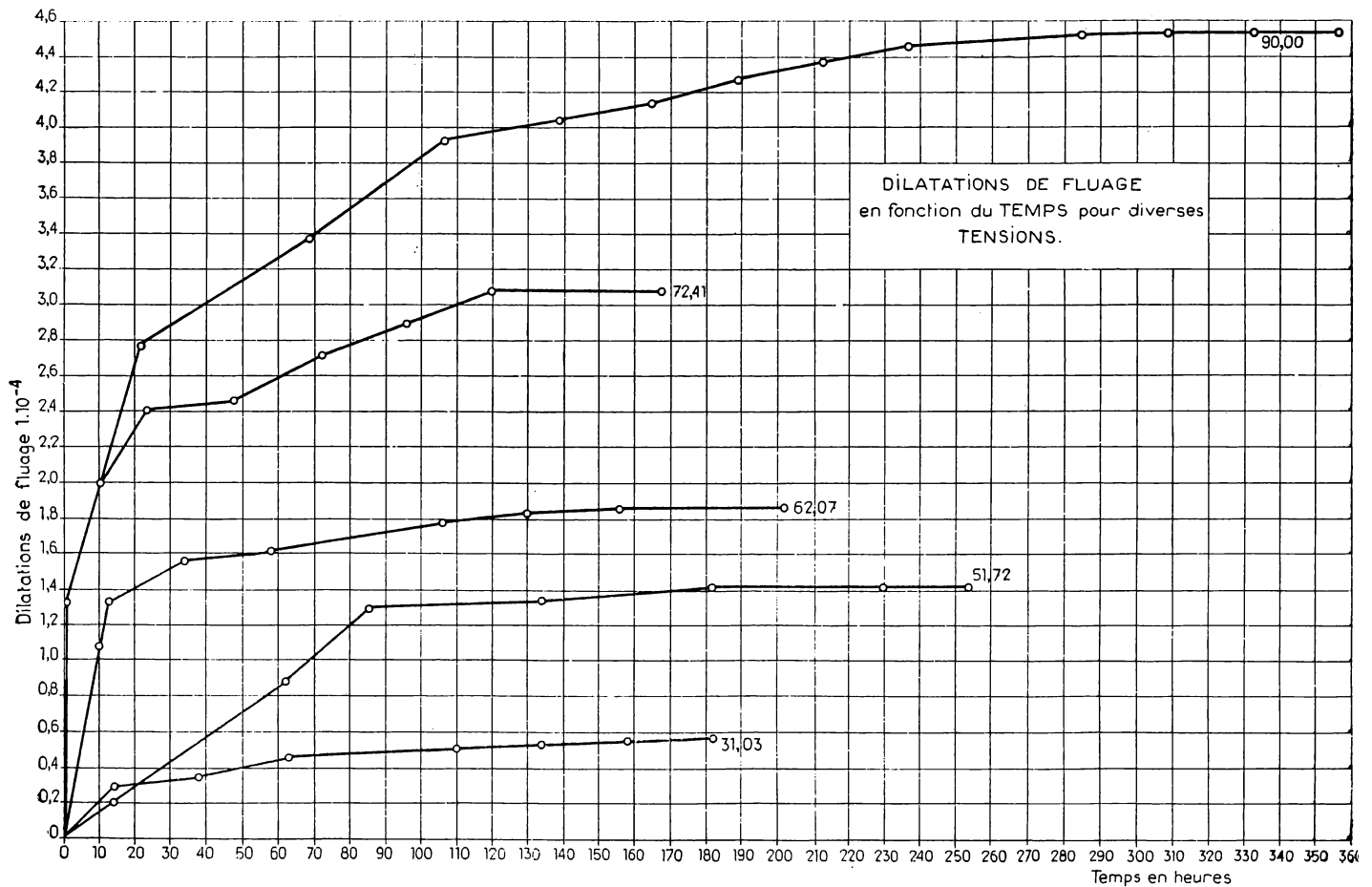


Fig. 9

de vue expérimental l'avantage de ne pas immobiliser une machine de traction pour une éprouvette et de pouvoir essayer simultanément un grand nombre d'éprouvettes, pendant une durée pratiquement indéfinie.

Notre chef de travaux, M. le Dr. R. Jacquemin, a réalisé le dispositif suivant pour des efforts allant jusqu'à 12 tonnes, ce qui convient pour des barreaux ayant jusqu'à 12 mm de diamètre.

La barre est enfilée dans un tube de 18 mm de diamètre intérieur et de 55 mm de diamètre extérieur, ayant une section environ 20 fois supérieure à celle de la barre.

Pour la facilité de montage, ce tube est divisé en tronçons, mécaniquement alignés. Les éprouvettes sont filetées sur 70 mm de longueur à une extrémité et 30 mm à l'autre. Le filet est obtenu par refoulement à chaud avant traitement thermique de la barre. Après traitement, le filet est rodé au moyen des écrous devant servir au blocage de la barre, qui sont ainsi automatiquement sans jeu sur le filet.

L'extrémité filetée de 70 mm est vissée dans une pièce engagée dans la tête d'amarrage d'une machine de traction. L'écrou de blocage de la tige à cette extrémité repose sur un plateau traverse par trois tiges disposées au sommet d'un triangle

équilatéral dont le centre est sur l'axe du barreau essayé. Par l'intermédiaire d'un plateau opposé analogue, attaché par une barre de traction à l'autre tête d'amarrage de la machine de traction, on peut mettre le barreau en essai sous traction dans son tube et l'y bloquer par ses deux écrous sous une déformation invariable, correspondant à une charge initiale connue, lue au dynamomètre de la machine de traction.

Après mise en tension, la barre bloquée dans son tube par ses deux écrous peut être conservée indéfiniment dans une chambre thermostatique. Périodiquement, on peut la remettre dans la machine de traction grâce au dispositif décrit et mesurer la traction qu'il faut appliquer pour décoller l'écrou de blocage du côté du long filet. Ceci peut se déceler par deux micromètres à cadran au 1/1000^e de mm fixés sur l'écrou de blocage du long filet. En fait, il a été constaté, par divers expérimentateurs, que l'effort correspondant au décollement pouvait être déterminé avec une précision suffisante par le desserrage de l'écrou de blocage sur le long filet. Pour un barreau de 12 mm de diamètre et de 1000 mm de longueur, le poids de l'éprouvette dans son tube avec ses écrous de blocage n'atteint pas 25 kg. Le dispositif peut être adapté à des barreaux de longueur et de diamètre

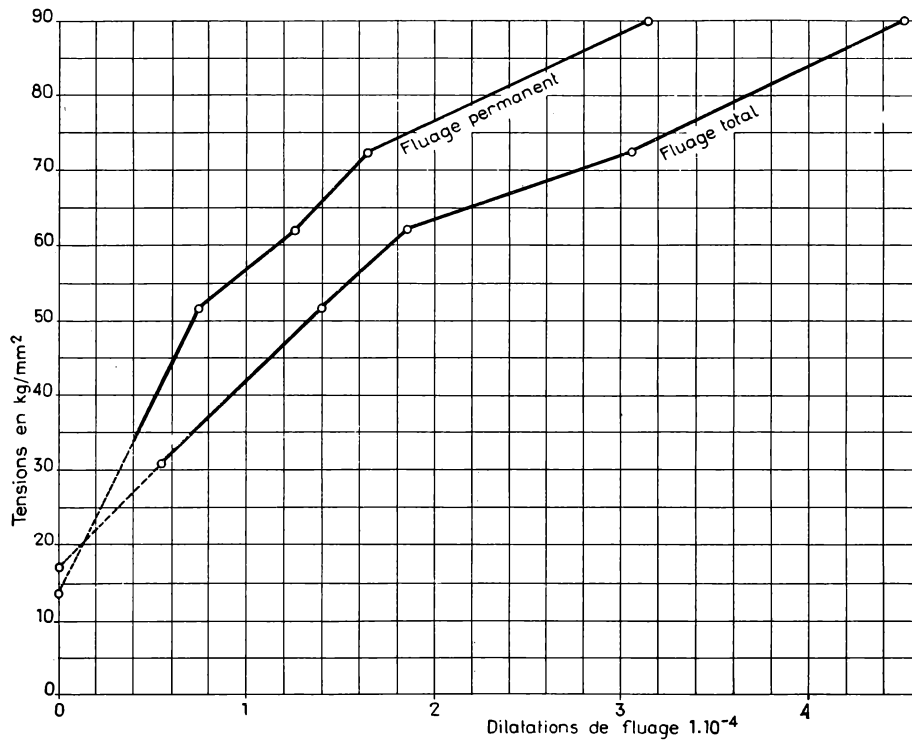


Fig. 10.

différents, ainsi qu'à des fils moyennant une fixation appropriée. Les figures 12 et 13 représentent le dispositif réalisé pour des barreaux de 12 mm.

8. Limite de relaxation. — Ce dispositif permet de déterminer une limite de relaxation en traçant, en fonction des tensions initiales, la courbe des pourcentages de relaxation stabilisés. On pourra

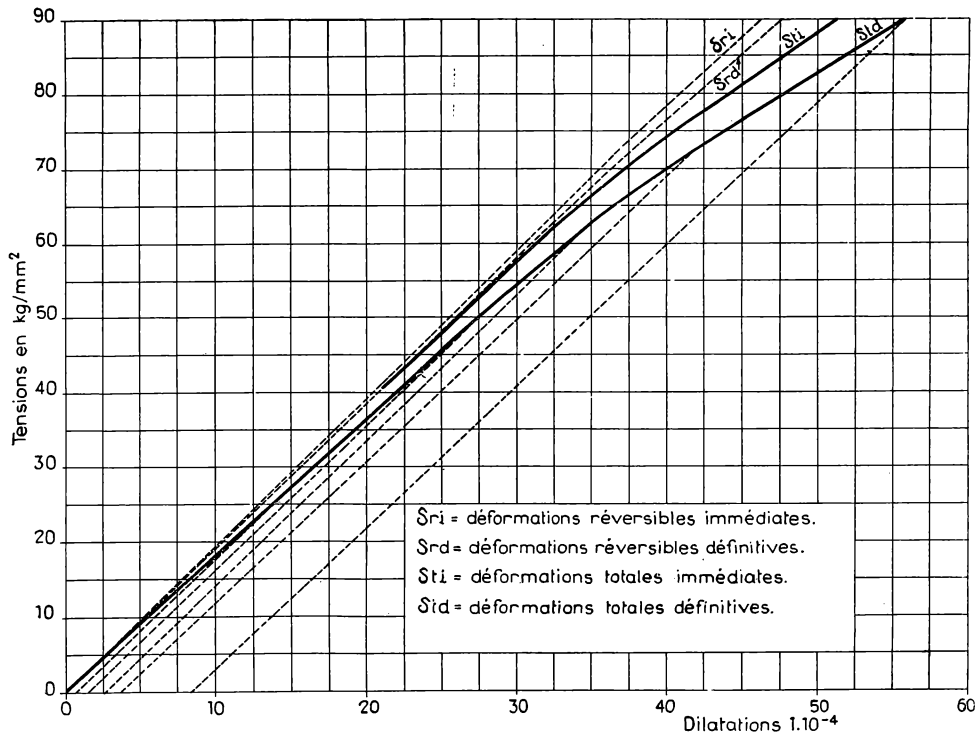


Fig. 11.

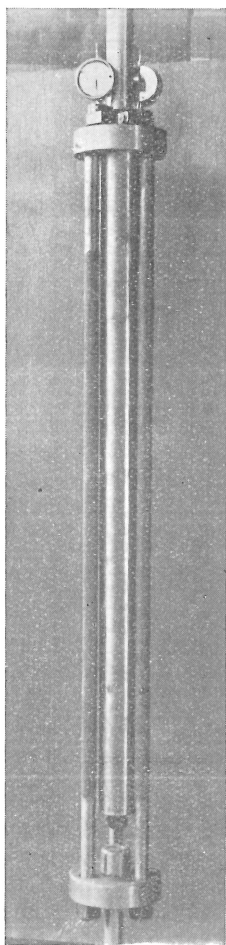


Fig. 12.

encore considérer une valeur absolue ou théorique et une valeur conventionnelle, définie par exemple par une relaxation de 1% de la tension initiale.

Nous n'avons pas déterminé les limites de relaxation, parce que nous n'avons pas eu les barreaux nécessaires à cet effet. Il n'est pas possible d'opérer sur le même barreau la détermination de la limite de fluage sous tension constante et la limite de relaxation, ni de faire ces déterminations sur des barreaux différents simultanément au moyen de la même machine. Il en résulte que la corrélation entre les deux limites sera affectée d'erreurs accidentelles, provenant notamment des variations de la matière.

La limite d'erreur de la mesure est assez particulière. Nous avons indiqué précédemment que la limite d'erreur relative sur la mesure des tensions est :

$$\frac{d\sigma}{\sigma} = \frac{dF}{F} + \frac{2dD}{D}$$

Une différence de tensions étant donnée par

$$\sigma_1 - \sigma_2 = \frac{4(F_1 - F_2)}{\pi D^2},$$

on a :

$$\frac{d(\sigma_1 - \sigma_2)}{\sigma_1 - \sigma_2} = \frac{dF_1 + dF_2}{F_1 - F_2} + \frac{2dD}{D}$$

ou :

$$\frac{d(\sigma_1 - \sigma_2)}{\sigma_1} = \frac{dF_1 + dF_2}{F_1} + \frac{2dD}{D} \frac{(\sigma_1 - \sigma_2)}{\sigma_1}$$

Pour les faibles différences $\sigma_1 - \sigma_2$, on a donc sensiblement :

$$\frac{d(\sigma_1 - \sigma_2)}{\sigma_1} = \frac{dF_1 - dF_2}{F_1}$$

En admettant $dF_1 = dF_2 = 10$ kg, pour $F_1 = 10.000$ kg, on aurait environ :

$$\frac{d(\sigma_1 - \sigma_2)}{\sigma_1} = 0,2\%$$

Cependant, il n'est pas certain que le mode opératoire prévu permette la sensibilité de 10 kg. Il n'est pas non plus certain que les mesures successives n'altèrent pas l'allongement constant.

Pour ces raisons, nous envisageons en dernier lieu de faire servir le tube de dynamomètre, en nous servant à cet effet de mesureurs de tensions très sensibles, les « strain-gages » américains, que nous ne connaissions pas en 1945, à l'époque où a été conçu l'appareil de relaxation. Depuis lors,

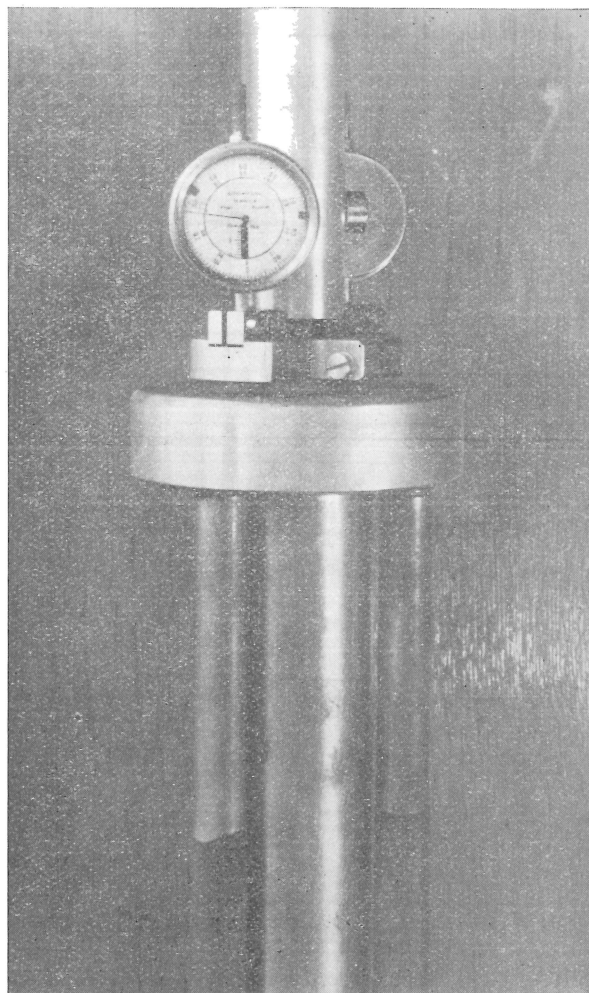


Fig. 13.

nous avons eu l'occasion de les essayer et il nous semble que leur emploi en laboratoire quasi-isotherme est permis pour des essais de longue durée. Ceci pourra d'ailleurs être contrôlé et les montages préparés pourront éventuellement être vieilliss artificiellement. On sait que la sensibilité des « strain-gages » est élevée et que les mesures sont faciles et rapides.

Nous envisageons de réduire la section des tubes éventuellement à 10 fois celle des barres, ce qui donnerait encore une rigidité suffisante avec une plus grande sensibilité et un notable allègement.

Trois « strain-gages » seraient disposés au sommet d'un triangle équilatéral dans une section transversale du tube et le système serait taré au moyen d'une machine sensible. Les tubes avec leurs barres tendues initialement seraient conservés dans des caisses quasi-thermostatiques et les lectures pourraient être faites aussi fréquemment que possible par simple connexion électrique des fils conducteurs relatifs à chaque appareil et dont les extrémités sortiraient en tableau à l'extérieur des caisses.

Cette disposition, dont la mise au point deman-

dera certes quelques études, nous paraît cependant devoir être très satisfaisante.

Nous ne pouvons manquer d'exprimer notre appréciation pour le concours que nous avons reçu de M. H. Herbiet, ingénieur, directeur des laboratoires de métallurgie de la S. A. John Cockerill, de M. P. Coheur, agrégé de l'enseignement supérieur, directeur du Centre belge de métallurgie physique, et tout particulièrement de M. le docteur R. Jacquemin, chef de travaux, qui a effectué dans des conditions très pénibles et avec un soin parfait, les mesures relatées dans cette communication.
