

ASSOCIAÇÃO INTERNACIONAL DE PONTES E ESTRUTURAS  
ASSOCIATION INTERNATIONALE DES PONTS ET CHARPENTES  
INTERNATIONAL ASSOCIATION FOR BRIDGE AND STRUCTURAL ENGINEERING  
INTERNATIONALEN VEREINIGUNG FÜR BRÜCKENBAU UND HOCHBAU

I a 2

**Fluage et relaxation des aciers à la température ordinaire**

**Creep and relaxation of steel at normal temperature**

**Kriechen und Entspannung des Stahls bei  
normaler Temperatur**

**Fluência e relaxação dos aços à temperatura normal**

•

F. CAMPUS  
Liège

•

V CONGRESSO · V CONGRES · V CONGRESS · V KONGRESS

Separata da «Publicação Final»  
Tirage à part de la «Rapport Final»  
Offprint from the «Final Report»  
Sonderdruck des «Schlussbericht

*PORTUGAL 1957*

Depuis une dizaine d'années nous avons entrepris, sous les auspices du Comité belge pour l'étude du fluage des matériaux aux températures ordinaires, subsidié par l'Institut pour l'encouragement de la recherche scientifique dans l'industrie et l'agriculture (I. R. S. I. A.), des recherches sur le fluage et la relaxation des aciers à la température ordinaire.

Il ne nous est pas possible, dans le cadre limité d'une contribution à la discussion de la Question I, a), d'esquisser même brièvement une relation de ces recherches. Nous renvoyons à ce sujet aux publications [1], [2], qui ont déjà été faites et dont la liste figure dans la bibliographie figurant *in fine*. Nous nous bornerons à attirer l'attention sur les caractères particuliers de la recherche et sur les conclusions les plus importantes et les plus nouvelles.

La raison de la recherche a été l'étude du comportement, de l'amélioration des qualités et des conditions de réception des armatures pour les constructions précontraintes, c'est-à-dire principalement des fils tréfilés et des barres laminées d'acier à très haute résistance. Mais nous avons jugé opportun d'inclure aussi dans le programme des barres d'acier laminé qui ne sont pas généralement utilisées pour la précontrainte, allant jusqu'aux barres à béton ordinaires en acier doux. Cette extension a été utile pour la compréhension du problème. Lorsque l'on étudie un phénomène dans un domaine limité, il est toujours intéressant d'en poursuivre l'étude en dehors des frontières de ce domaine, de part et d'autre, pour préciser la signification des observations. Dans le cas qui nous occupe, cette extension s'est révélée très utile aussi par les constatations nouvelles qu'elle a permis de faire et qui sont susceptibles de développements dans des questions étrangères à la précontrainte.

Un autre caractère général de nos recherches est que nous avons, dès le début et par principe, rapporté toutes les observations effectuées lors des essais de longue durée aux observations détaillées faites sur l'essai classique de traction de courte durée, les essais étant effectués dans tous

les cas suivant des modes opératoires bien définis. Toutes nos expériences ont été effectuées en traction simple, sur des éprouvettes relativement longues (1 mètre).

Une première conclusion générale est la suivante. Quelle que soit la durée de l'essai, la limite pratique inférieure des plus petites déformations permanentes discernables en est statistiquement indépendante. L'ordre de grandeur de ces plus petites déformations est de quelques millièmes ( $10^{-6}$ ). Cette limite est, dans l'essai de courte durée, désignée sous le nom de limite de proportionnalité. Nous avons établi que cette limite est statistiquement confondue avec la limite de fluage (sous tension constante) et avec la limite de relaxation (sous allongement spécifique constant). Nos recherches ont conduit à la détermination de cette limite pour de très nombreux types d'acier. Nous croyons intéressant de reproduire ci-après quelques résultats parmi beaucoup d'autres (Tableau n.° 1). Ils montrent que pour un grand nombre d'entre eux, la limite des plus petites déformations permanentes discernables est plus petite qu'on l'imagine souvent et inférieure aux tensions autorisées, même aux tensions de service. Les déformations permanentes limitées et rapidement stabilisées qui se produisent lors des épreuves d'ouvrages en acier ne sont donc pas dues uniquement au tassement des appuis et aux imperfections des assemblages. Le dépassement de cette limite est d'ailleurs sans danger tant que l'on reste dans le domaine des très petites déformations ne dépassant guère le cent-millième ( $10^{-5}$ ). La répétition des efforts rétablit d'ailleurs l'élasticité. Cette notion réelle s'ajoute à celle, tout aussi réelle, des tensions initiales ou résiduelles, pour donner une plus saine appréciation des méthodes de l'élasticité que les notions trop idéales de l'élasticité parfaite et de l'état initial non contraint ou état neutre

Lorsque les tensions dépassent nettement la limite de proportionnalité, les déformations permanentes immédiates et différées croissent, de manière cependant très variable selon les types d'acier. Ce que l'on a appelé la limite conventionnelle d'élasticité (à  $2 \cdot 10^{-3}$  de déformation permanente) apparaît aux essais de longue durée comme dépourvue de signification. On lui en avait cependant prêté une, puisqu'en Belgique et sans doute en d'autres pays, on a limité les tensions permanentes autorisées dans les armatures de précontrainte à une fraction de cette soi-disant limite, par exemple huit dixièmes (0,80). Par incertitude, on l'avait, du moins en Belgique, doublée d'une deuxième borne, à savoir six dixièmes (0,60) de la limite de rupture nominale. Cette disposition est beaucoup plus judicieuse, car il s'agit là d'une vraie limite, comme nous le montrerons plus loin.

Il y a naturellement une mention spéciale à faire des aciers ayant une limite apparente d'élasticité, c'est-à-dire un palier d'étirage (aciers doux et demi-durs). Comme ils ne sont guère usuels en précontrainte à l'état non écroui, nous en traiterons à part dans la suite. Bornons-nous à observer que lorsqu'ils ont été écrouis franchement au delà de la limite apparente d'élasticité, par exemple en vue de leur usage pour la précontrainte, ils ont des comportements comparables à ceux des aciers sans palier dont il a été question précédemment. Une constatation utile au sujet de ce comportement est la suivante. Entre la limite des plus petites déformations discernables et des tensions voisines des trois quarts de la

limite de rupture nominale, les déformations de fluage sous une tension déterminée sont proportionnelles aux déformations permanentes immédiates sous la même tension. Le coefficient de proportionnalité est très variable selon le type d'acier. La limite supérieure de validité de la propriété signifie simplement que la recherche n'a pas procédé au delà de cette limite; il n'a pas été établi que la relation ne soit pas valable au delà.

Cette propriété permet de déduire de la courbe des déformations instantanées en fonction des tensions, établie par un essai de courte durée, et de la courbe de fluage de longue durée sous une tension définie, le tracé des courbes de fluage sous n'importe quelle tension, dans les limites indiquées. Elle permet aussi dès lors, par une intégration aux différences finies, de tracer les courbes de relaxation à partir de n'importe quelle déformation permanente initiale. L'accord est satisfaisant entre les courbes expérimentales et les courbes tracées par la méthode de calcul graphique définie.

Sous des tensions constantes peu inférieures, égales ou supérieures à celles qui sont autorisées dans les ouvrages précontraints, le fluage devient sensiblement proportionnel au logarithme du temps  $(1 + t)$  après une durée initiale, variable selon les cas de quelques heures à quelques dizaines d'heures, rarement un petit nombre de centaines d'heures.

En général, on ne commettra guère d'erreur en acceptant une durée initiale de 50 heures à 100 heures. Il en résulte que si le fluage est modéré après ce temps et n'a augmenté après dix heures que de peu d'unités, sinon d'une fraction de  $10^{-5}$ , l'augmentation après plus de 125 ans n'aura guère que sextuplé, septuplé après plus de 1250 ans. Après ces durées, qui dépassent l'existence probable des ouvrages, le fluage pourrait donc être de l'ordre de quelques  $10^{-4}$ , ce qui est admissible. Les relaxations correspondantes sont de l'ordre de quelques multiples de 2 Kg/mm<sup>2</sup>.

On peut donc concevoir qu'il est ou qu'il sera possible de prévoir, avec une approximation suffisante, le fluage et la relaxation pendant la durée probable d'existence d'un ouvrage et, par conséquent, de contrôler suffisamment ces facteurs sur la base de quelques essais aisément praticables. Des développements non encore prêts à la publication sont en préparation à ce sujet.

Ces dernières remarques évoquent des préoccupations de sécurité et conduisent à poser la question de savoir à quel paramètre il faut rapporter la notion de sécurité. Ce n'est certes pas la limite apparente d'élasticité. Nous avons déjà indiqué que ce n'est pas non plus la limite conventionnelle d'élasticité à  $2 \times 10^{-3}$  de déformation permanente. C'est la limite de rupture nominale qui est à considérer. L'on pourrait craindre cependant que la longue durée d'application de la tension abaisse cette limite, notamment si l'on se réfère à la notion de «limite de fluage» énoncée par Monsieur R. L'HERMITE [3], qu'il ne faut pas confondre avec la limite de fluage définie en tête de cette contribution. Monsieur R. L'HERMITE propose d'appeler ainsi la tension la plus faible susceptible de provoquer la rupture si elle est appliquée en permanence. Nous l'appellerons «tension critique de fluage» pour la distinguer de la limite (inférieure) de fluage que nous avons définie.

Sans entrer dans les détails, nous croyons pouvoir affirmer qu'aux températures ordinaires, la tension critique de fluage est inférieure de

moins de 5 % à la limite de rupture nominale, déterminée par un essai à outrance. Eu égard à la dispersion, cet écart est négligeable. D'autre part, les ruptures différées se produisent après quelques dizaines de minutes ou à peine plus d'une heure. Après des durées plus longues, le vieillissement naturel intervient pour relever la limite de rupture de quelques % dans les aciers doux ou demi-durs, dans une moindre proportion mais encore décelable dans les fils tréfilés, malgré leur degré d'érouissage considérable. Il est donc vraiment permis de se rapporter à la limite nominale de rupture pour apprécier le danger de ruine ou la sécurité.

La limite apparente d'élasticité ou palier d'étirage des aciers est, on le sait, influencée par les conditions d'expériences, notamment par la rigidité de la machine d'essai et par la vitesse de mise en charge. Ce dernier facteur notamment influe sur l'écart entre les valeurs dites inférieure et supérieure de cette limite [4] [5]. Cette question n'entre pas dans le sujet et ne sera pas considérée plus avant. Bornons-nous à noter qu'il est établi que la limite élastique apparente peut être relevée fortement (jusqu'à la limite de rupture) par l'accroissement de la vitesse de mise en charge [6].

Il n'avait pas encore été remarqué qu'elle pouvait être abaissée sous l'effet d'une longue durée d'application des charges. C'est ce que nous avons constaté au cours d'essais de fluage et de relaxation sur des barreaux d'acier doux et demi-dur, après un érouissage préalable correspondant à un allongement permanent d'une fraction de la longueur du palier d'étirage (1/40e à 9/10e) [7] [8]. En fluage, il a été constaté des allongements considérables, éventuellement voisins de la longueur du palier d'étirage (c'est-à-dire de l'ordre de  $10^{-2}$ ), sous l'effet d'une tension inférieure de 10 à 20 % à la limite apparente d'élasticité. Pour des tensions supérieures à cette limite, ou pour des tensions inférieures sans amorçage préalable du palier, le fluage est de l'ordre de  $10^{-5}$ . Les grands allongements se produisent après une heure ou deux (ou davantage) et durent plusieurs heures, parfois quelques dizaines d'heures. En relaxation, si l'on applique une déformation permanente atteignant une fraction du palier d'étirage, maintenue ensuite constante, après un petit nombre d'heures, la tension est diminuée de 10 à 20 % par rapport à la limite apparente d'élasticité. Or, pour des tensions initiales inférieures ou supérieures à la limite apparente d'élasticité, la relaxation est insignifiante.

Le phénomène peut être répété tant que la somme des déformations permanentes cumulées n'atteint pas la longueur du palier d'étirage. L'allongement correspondant à ce palier se distingue donc du fluage ordinaire en-dessous ou au-dessus de la limite apparente d'élasticité comme s'il était d'une autre nature; la longueur du palier a donc de l'importance pour les phénomènes d'adaptation.

Le mot de limite est mal venu pour un élément qui peut subir de telles variations dans les deux sens; le mot allemand correspondant de «Grenze» encourt la même critique. Le terme anglo-saxon «yield point» y échappe.

Cet abaissement du palier d'étirage en fluage ou en relaxation a été établi pour la traction simple. Il faudrait vérifier s'il existe en flexion et en sollicitation composée. Cet abaissement pourrait avoir quelque inci-

dence sur les méthodes de calcul dites du régime plastique et du régime élasto-plastique, dès que les sollicitations subsistent pendant quelques heures.

En ce qui concerne la relaxation des tensions résiduelles, par exemple de soudure, nous avons conclu de l'insignifiance de la relaxation, lorsque les tensions initiales n'atteignent pas la limite apparente d'élasticité (2, b), que la relaxation des tensions de soudure est insignifiante en toute hypothèse. Nous jugions en effet, selon les idées répandues en matière de plasticité, que si la limite apparente d'élasticité était atteinte, celle-ci était ensuite maintenue sans diminution pendant l'étrirage.

Il se pourrait, d'après les nouvelles constatations relatées ci-dessus, qu'une relaxation de 10 à 20% soit possible dans le cas où les déformations empêchées atteindraient une fraction du palier d'étrirage. Cependant, comme les tensions de soudure peuvent créer des états de tension compliqués, cette possibilité demanderait une vérification expérimentale, qui n'est pas une chose simple.

TABLEAU 1

*Valeurs des limites de proportionnalité*

Repère de l'acier	Diamètre (mm)	R (Kg mm <sup>2</sup> )	R <sub>e</sub> (Kg mm <sup>2</sup> )	$\sigma_p$ 0,001 %	$\sigma_p$ 0,0005 %	$\sigma_p$ th %
P	10	35,8	25,2	12,10	11,0	10,00
20	15	36,8	24,9	14,15	10,4	8,49
Bb	10	40,2	29,3	12,00	10,5	9,50
19	15	47,5	30,0	17,80	9,8	5,60
23	16	56,8	39,3	23,60	18,6	14,90
36	19	61,7	41,6	21,20	15,8	7,00
S	12	64,1	48,5	20,00	19,0	17,50
24	15	70,2	43,0	31,12	24,0	14,20
B	25	70,44	45,1	30,80	22,6	15,00
16	15	83,2	—	22,60	13,1	5,70
		(84,9)*	(66,9)*			
27	16	85,2	51,5	37,30	24,9	15,00
A	15	88,3	61,7	36,00	27,0	17,00
37	20	92,1	53,7	40,20	23,5	13,40
30	20	93,0	60,5	41,20	28,2	16,60
15	15	111,08	—	47,50	41,5	17,00
5	15	122,8	—	64,20	46,2	—
7	9	133,6	—	31,44	25,8	—
9	7	158,5	—	32,75	30,1	26,00
40	5	158,5	—	85,00	78,0	35,00
18	5	163,0	—	41,00	32,8	20,40
38	7	165,4	—	65,00	52,0	35,00
21	5	174,7	—	112,00	86,5	50,90
34	3	196,6	—	28,30	21,0	14,00
33	2,5	209,8	—	81,5	71,0	61,10

\* Valeurs indiquées par le fournisseur.

TABLEAU 2

*Ruptures différées*I. — *Acier doux P.* Diamètre des éprouvettes polies ( $7 \pm 0,01$ ) mm.

Tension (Kg.mm <sup>2</sup> )	Rupture	Observations
37,80	instantanée	
37,68	après 2 minutes	
37,42	après 1 minute	
36,90	après 31 minutes	
36,64	après 25 minutes	
36,38	après 55 minutes	
36,12	pas de rupture	après l'essai de durée, les éprouvettes sont rompues sous 41 Kg/mm <sup>2</sup>
36,00	après 96 heures	

II. — *Acier demi-dur S.* Eprouvettes comme ci-dessus.

Tension (Kg mm <sup>2</sup> )	Rupture	Observations	
61,84	instantanée	Une autre éprouvette n'est pas rompue après deux ans. Après l'épreuve de durée, elle est rompue sous 63,39 Kg/mm <sup>2</sup> .	
61,19			
60,97			
60,25			après 10 minutes
60,00			après 22 minutes
60,00			après 27 minutes
59,77	après 16 minutes	après l'épreuve de durée, les éprouvettes sont rompues sous 64,44 Kg/mm <sup>2</sup>	
59,34	après 63 minutes		
58,70	pas de rupture		
58,06	après 96 heures		

III. — *Fil tréfilé 40*, à l'état brut, diamètre nominal de 5 mm.

Tension (Kg mm <sup>2</sup> )	Rupture	Observations
158,59	instantanée	La tension de rupture instantanée du fil rompu après 19 min. est 158,07 Kg/mm <sup>2</sup> . Le fil non rompu après 1 an est ensuite rompu sous 159,78 Kg/mm <sup>2</sup> .
157,00	5 fils rompus instantanément	
	1 fil rompu après 19 m. 1 fil non rompu après 1 an	

## BIBLIOGRAPHIE

1. F. CAMPUS — *Limite de fluage des aciers à la température ordinaire* (Revue universelle des Mines, Liège, 15 décembre 1947).
2. F. CAMPUS — *Etudes expérimentales du fluage et de la relaxation des aciers à la température ordinaire.*
  - a. Comptes-Rendus de recherches de l'Irsia, n.° 11, Bruxelles, juillet 1953.
  - b. Bulletin C. E. R. E. S., Liège, tome VI, 1953.
  - c. Estratto dei Rendiconti et Pubblicazioni del Corso di Perfezionamento per le costruzioni in cemento armato, Milano, Vol. V, 1954.
3. R. L'HERMITE — *L'expérience et les théories nouvelles de la résistance des matériaux* (Dunod, Paris, 2<sup>e</sup> éd. 1945.)
4. E. A. DAVIES — *The effect of the speed of stretching and the rate of loading on the yielding point of mild steel* (Journal of applied Mechanics, n.° 12, 1938).
5. F. K. G. ODQUIST & C. SCHAUB — *The yield point of mild steel at non homogeneous and compound stress distributions* (Transactions of the Royal Institute of Technology, Stockholm. n.° 34, 1950).
6. M. P. WHITE — *On the impact behavior of a material with a yield point* (Journal of applied Mechanics, New-York, n.° 1, 1949).
7. F. CAMPUS & K. GAMSKI — *Abaissement de la limite apparente d'élasticité des aciers par fluage après une amorce d'écrouissage (à la température ordinaire).*
  - a. C. R. Acad. des Sciences, Paris, T. 241, 28 novembre 1955.
  - b. Revista de la Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Madrid, Tomo XLIX, Cuaderno 4<sup>o</sup>
8. F. CAMPUS & K. GAMSKI — *Abaissement de la limite apparente d'élasticité des aciers par fluage après une amorce d'écrouissage (à la température ordinaire). Effet sur la relaxation.* (C. R. Acad. des Sciences, Paris, T. 242, 13 février 1956).

## R É S U M É

Il est rendu compte, d'une manière très succincte, des résultats d'essais de fluage et de relaxation effectués à la température ordinaire sur des éprouvettes d'acier de natures très diverses, allant de l'acier doux aux fils tréfilés les plus durs. Diverses notions sont définies (limite de fluage et de relaxation, tension critique de fluage) et rattachées aux notions correspondantes de l'essai de traction simple de courte durée (limite de proportionnalité, tension de rupture). Il existe une proportionnalité entre les déformations permanentes instantanées et le fluage, qui varie avec la nature de l'acier. Enfin, pour les aciers possédant un palier d'étirage, le fluage et la relaxation permettent un abaissement appréciable de la limite apparente d'élasticité (Yield point, Streckgrenze).

## S U M M A R Y

A brief account is given of the results of creep and relaxation tests, performed at normal temperature, on test bars made of different kinds of steel, from mild steel to the hardest wire-drawn steel strands. Several notions are defined (creep and relaxation limit, critical creep stress) and related to the corresponding notions of the short time tensile test



(limit of proportionality, tensile strength). Between the instantaneous permanent deformations and creep there is a ratio, that varies with the type of steel. In the particular case of steel with a yield point, creep and relaxation allow yield point to be greatly lowered.

#### ZUSAMMENFASSUNG

Es wird auf eine sehr gedrängte Art und Weise Rechenschaft abgelegt über die Resultate der Kriech- und Entspannung versuche von sehr verschiedenartigen Probekörpern aus Stahl bei normaler Temperatur. Geprüft wurde der ganze Bereich von weichem Stahl bis zum härtesten gezogenen Draht. Verschiedene Begriffe haben sich dabei als charakteristisch erwiesen (Kriechgrenze und Entspannungsgrenze, kritische Kriechspannung) und können auf die entsprechenden Begriffe des einfachen Zugversuches von kurzer Dauer zurückgeführt werden (Proportionalitätsgrenze, Bruchspannung). Es besteht eine Proportionalität zwischen den bleibenden Deformationen aus kurzzeitiger Belastung und dem Kriechen, die mit der Natur des Stahles variiert. Weiter erlaubt das Kriechen und die Entspannung für Stahlsorten, die im Spannungs-/Dehnungsdiagramm eine Streckgrenze aufweisen, eine nennenswerte Senkung der Streckgrenze.

#### RESUMO

Relata-se, resumidamente, os resultados de ensaios de fluência e de relaxação efectuados à temperatura normal com barretas de aço de diversas qualidades, desde o aço macio aos mais duros fios trefilados. Definem-se várias noções (tensão crítica de fluência) que se relacionam com as noções correspondentes do ensaio de tracção simples de curta duração (tensão de proporcionalidade, tensão de rotura). Existe uma proporcionalidade entre as deformações permanentes instantâneas e a fluência que varia com a natureza do aço. Para os aços que apresentam um patamar de estiragem, a fluência e a relaxação permitem um abai-xamento apreciável do limite aparente de elasticidade.