

# ESSAIS DE FATIGUE DE JOINTS SOUDÉS DE RAILS

par F. CAMPUS,

Professeur à l'Université de Liège,

Directeur des Laboratoires d'essais des constructions du Génie Civil.

---

La Société Nationale des Chemins de Fer Belges est entrée résolument dans la voie de la soudure de joints de rails. Les raisons et les avantages de cette pratique ont été exposés récemment dans cette revue <sup>(1)</sup>. Une étude détaillée comprenant la description complète des installations et des opérations de soudure a été publiée <sup>(2)</sup> par M. E. Desorgher, ingénieur principal à la S.N.C.F.B.

La présente note est le compte rendu d'essais de fatigue qui ont été effectués au Laboratoire d'essais des constructions du Génie Civil de l'Université de Liège, à la demande de la S. N. C. F. B. et dont les résultats principaux ont été reproduits dans l'étude de M. Desorgher, parmi un ensemble d'autres essais effectués par la Société elle-même à son banc d'épreuve de Malines.

La S. N. C. F. B. a adopté la soudure électrique par étincelage, consistant à porter les bouts à souder à l'état de fusion par une succession d'étincelles, puis à les refouler l'un dans l'autre. Pour les rails neufs destinés aux voies principales, ces soudures sont recuites à 875° C en une durée de 50 minutes.

Les essais étaient destinés à établir les résistances comparatives à la flexion pulsatoire des rails ordinaires, des rails soudés non recuits et des rails soudés recuits. A cet effet, des coupons d'environ 1,20 m de longueur, comportant éventuellement un joint soudé de l'un ou l'autre type en leur milieu,

ont été soumis à des essais de flexion pulsatoire sous l'effet d'une charge pulsante centrale, agissant donc dans le plan même de la soudure. Les appuis étaient distants de 90 cm. La valeur minimum de la charge pulsante a été fixée à 5 tonnes; la charge maximum était variable.

L'essai consistait à déterminer pour chaque rail le nombre de répétitions provoquant la rupture, sans dépasser toutefois trois millions. Il ne paraît pas, à première vue, indifférent pour la rupture par flexion pulsatoire que la tension maximum soit une extension ou une compression. Pour cette raison, les essais de fatigue ont été opérés dans deux positions relatives des rails par rapport au sens de flexion, de manière à avoir le bourrelet tendu ou comprimé.

**Essais préalables de flexion statique.** — On a déterminé au préalable, par des essais statiques et au moyen d'extensomètres de Huggenberger, la répartition des tensions élastiques de flexion suivant les 2 fibres extrêmes (fig. 1) et dans la section médiane la plus sollicitée (fig. 2). La charge de 25 tonnes (30—5) était appliquée au milieu du patin, le bourrelet reposant sur les deux appuis. On a pu relever des tensions sur toute la longueur du bourrelet. Sur le patin, on a dû rester écarté de part et d'autre du dispositif d'application de la charge centrale et, dans la section transversale médiane, on n'a pu mesurer les tensions jusque sur la fibre extrême du patin, mais seulement dans son voisinage.

On a reporté, sur les diagrammes des figures 1 et 2, les points représentant les tensions mesurées, leurs diagrammes figuratifs et les diagrammes

---

<sup>(1)</sup> R. Campus. — La modernisation de la voie ferrée. *R. U. M.*, décembre 1937.

<sup>(2)</sup> E. Desorgher. — La soudure des rails à la Société Nationale des Chemins de Fer Belges. *Bulletin de l'Association internationale du Congrès des chemins de fer* (janvier 1938). Voir aussi J. Ridet. — Applications de la soudure. 13<sup>e</sup> *Congrès international des chemins de fer*, Paris 1937.

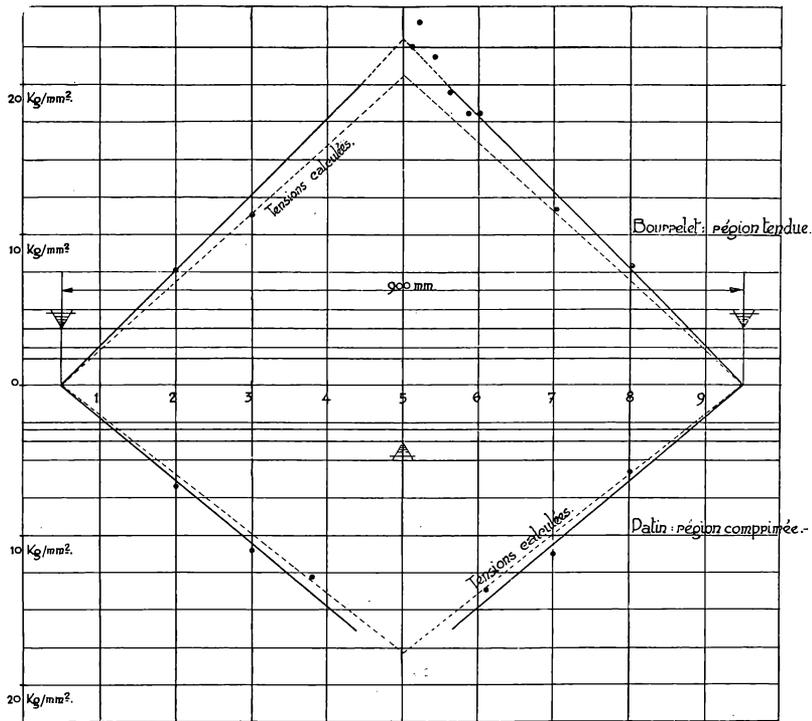


Fig. 1.

conformes au calcul de la résistance des matériaux. Eu égard aux dimensions très courtes de la pièce, et au cas de charge, il n'est pas surprenant qu'il y ait des discordances. Dans le patin, sous la charge centrale, il est probable notamment qu'il y ait des surtensions de compression. Le même phéno-

unique les deux sens de flexion.

On a admis pour le calcul la valeur de  $I = 2197 \text{ cm}^4$ , donnant pour le bourrelet  $I/v = 274,6 \text{ cm}^3$  (3). La tension maximum se produit dans le bourrelet et, pour le dispositif expérimental défini, peut s'exprimer par  $0,82 P \text{ kg/mm}^2$ ,  $P$  étant la valeur en tonnes de la charge centrale. Les mesures de tension ont été faites sur un rail non soudé.

En vue d'éclairer l'interprétation de l'essai de fatigue, il importait d'avoir une idée de la limite élastique de flexion des divers types de rails. La notion est mal définie. On a cherché à l'apprécier par des mesures de flèches de flexion poursuivies jusqu'au stade de la déformation permanente. Les flèches ont été mesurées au milieu de chaque rail, à l'aide d'un fleximètre au 1/100 mm, par rapport à une droite passant par deux points situés au droit des appuis extérieurs à la hauteur de l'axe neutre. La charge a été élevée progressivement

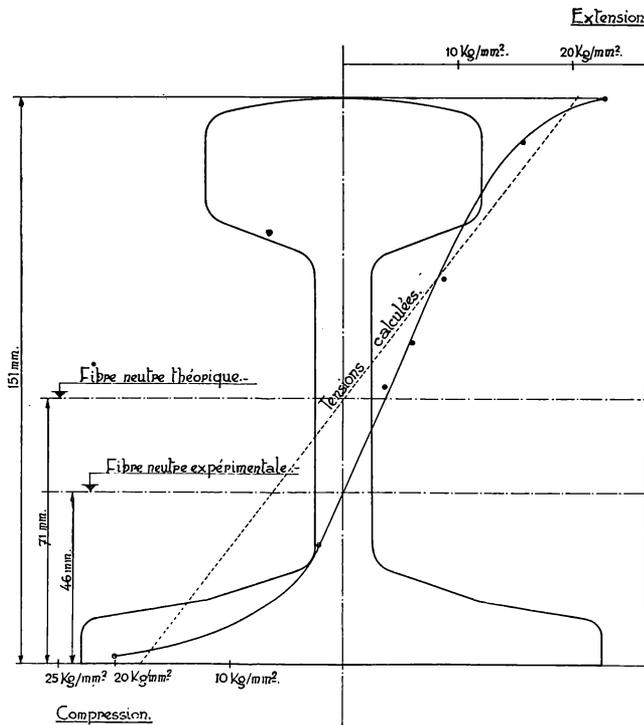


Fig. 2.

(3) Cette valeur de  $I$  n'a pas été déterminée par calcul direct, mais par une mesure de l'inclinaison des bouts des rails lors des essais de flexion statique. La mesure a été faite au moyen de clinomètres très sensibles lors d'un essai préliminaire. Pour cette mesure, on a admis  $E = 20.500 \text{ kg/mm}^2$ . Une détermination ultérieure a donné  $E = 20.400 \text{ kg/mm}^2$ . Pour déterminer  $I/v$  on a admis la position théorique de l'axe neutre définie par la S. N. C. F. D'après une note de celle-ci, la valeur théorique de  $I$  serait d'ailleurs  $2030 \text{ cm}^4$  pour le rail du profil de  $50 \text{ kg/m}$ . En utilisant cette valeur pour le calcul des tensions, la concordance avec les valeurs mesurées (fig. 1) serait presque parfaite. La variation des valeurs de  $I$  sera considérée plus loin.

une première fois à 59 tonnes, puis ramenée à zéro, puis augmentée au delà de 59 tonnes et enfin ramenée à zéro. La figure 3 indique les diagrammes de variation des flèches en fonction des charges et les déformations permanentes lorsque le bourrelet est en tension.

Les courbes des rails pleins (c'est-à-dire non soudés) se superposent pratiquement à celles des rails soudés traités (recuits). Celles des rails soudés non traités (bruts) dénotent une flexibilité légèrement plus grande. Les coefficients de proportionnalité pour les parties droites initiales des trois diagrammes sont identiques. On a admis comme limite élastique la limite de proportionnalité appréciée d'après les diagrammes.

Les charges correspondantes sont :

environ 41 tonnes pour le rail plein.  
 » 36 » » » soudé non traité.  
 » 42 » » » soudé traité.

La figure 4 reproduit les mêmes diagrammes pour le cas du patin tendu. Ces diagrammes présentent des anomalies. Le coefficient de proportionnalité pour le rail plein et le rail soudé non traité est le même que ci-dessus ; pour le rail soudé traité, il est sensiblement plus faible. La première branche du diagramme relatif au rail soudé non traité se superpose parfaitement à celle qui lui correspond dans la figure 3 ; il n'en est pas de même pour les deux autres rails. Ces différences doivent être accidentelles.

Les limites élastiques relevées sont :

60 tonnes pour le rail plein.  
 40 » » » soudé non traité.  
 42 » » » soudé traité.

Ces essais préalables attirent déjà l'attention sur l'irrégularité des rails. Ceux-ci étaient de provenances diverses. Parfois les deux parties constitutives d'un rail soudé étaient de provenances différentes.

Eu égard à la dispersion constatée dans les essais de fatigue, on a contrôlé sur 16 rails les poids, les longueurs et les valeurs de EI, ces dernières en se basant sur les formules de la résistance des matériaux relatives aux angles de flexion au droit des appuis et en les mesurant au moyen de clinomètres Stoppani très sensibles. On a déduit les sections transversales des poids et longueurs, en admettant un poids spécifique de 7800 kg/m<sup>3</sup>. On a trouvé comme section moyenne 64,105 cm<sup>2</sup>. Cette section répond exactement au poids de 50 kg par mètre de rail.

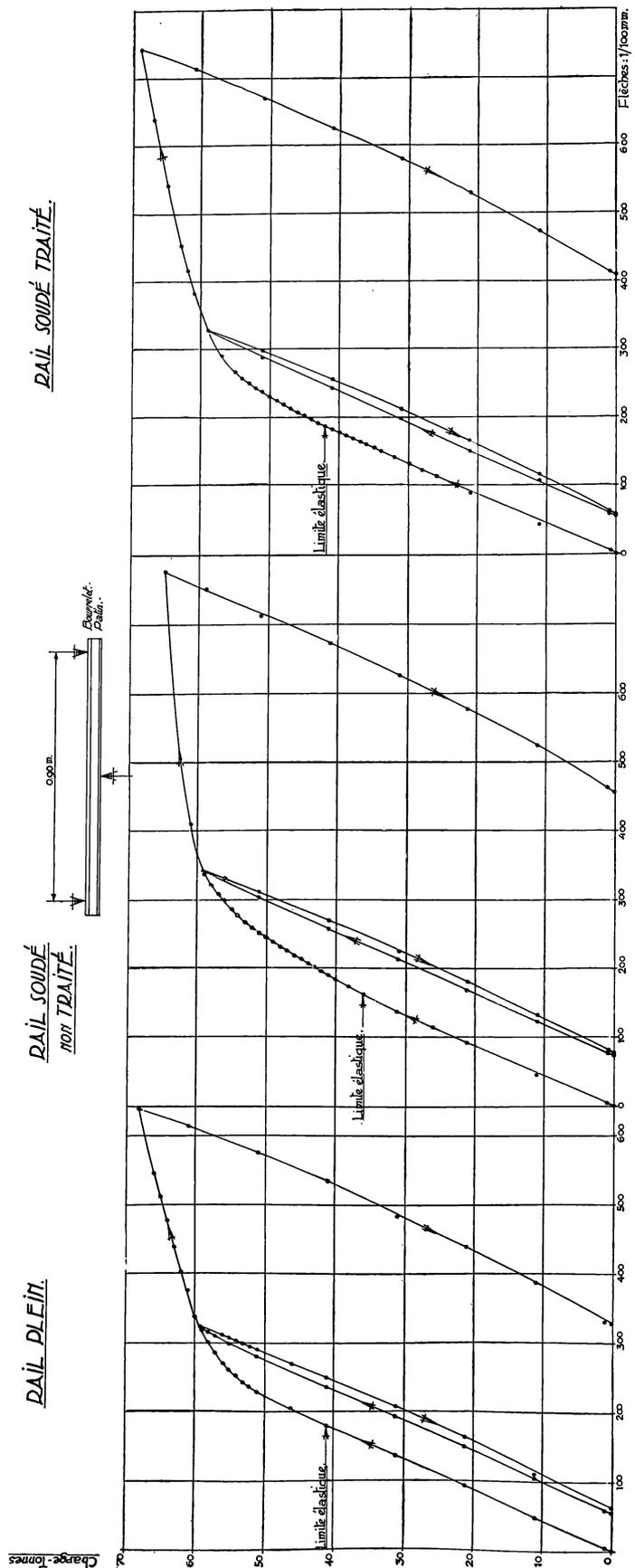


Fig. 3.

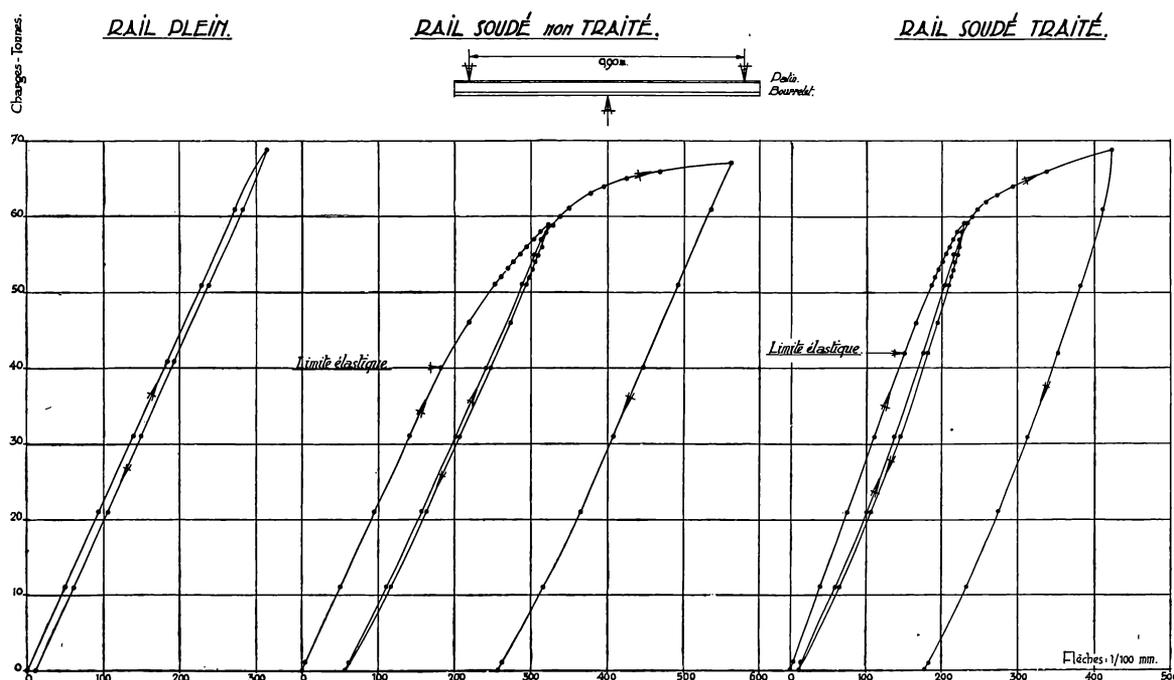


Fig. 4.

Les écarts maxima sont de  $-0,590$  et  $+0,798$ , donc inférieures à  $1,25\%$ . La valeur moyenne de  $EI$  pour 16 rails (1 plein et 15 soudés) est :  $4,732 \times 10^9 \text{ kg} \times \text{cm}^2$ . Les écarts maxima sont respectivement :  $-0,354$  et  $+0,241$ , ou environ  $-7,5\%$  et  $+5\%$ . D'après cette valeur moyenne de  $EI$  et la valeur probable de  $E$ , égale à  $20.500 \text{ kg/mm}^2$ , la valeur moyenne de  $I$  serait  $2.310 \text{ cm}^4$  environ, valeur sensiblement supérieure à celles indiquées précédemment (4).

**Machine et dispositif d'essai.** — Les essais de flexion pulsatoire ont été effectués dans la machine de traction Amsler de 100 tonnes, de 2,25 m d'écartement entre têtes. Elle est pourvue d'un pulsateur de  $170 \text{ cm}^3$  de capacité de pulsation. La charge maximum de pulsation peut s'élever jusqu'à 80 tonnes si les déformations sont assez faibles pour ne pas dépasser la capacité précitée. Les fréquences sont de 250, 350, 500 et 700 pulsations par minute ; elles sont choisies selon la charge, pour éviter un échauffement excessif de l'huile. Celle-ci doit d'ailleurs être d'abord réchauffée par une mise en train à faible charge. Le pulsateur porte un premier manomètre indiquant la charge minimum réglable.

Le pulsateur consiste en une pompe qui refoule de l'huile dans le cylindre du pot de presse suivant

(4) Il est à noter que ces valeurs de  $I$  résultent indirectement de mesures d'inclinaison, par application des formules de la résistance des matériaux. Eu égard au cas de sollicitation : pièce courte, charges concentrées, l'application de ces formules introduit vraisemblablement une erreur systématique.

Les observations visent moins la valeur réelle, dont la signification est assez conventionnelle, que la dispersion des valeurs.

Les rails étaient d'ailleurs de provenances diverses.

un rythme d'allure sinusoïdale et fait ainsi varier la charge à la fréquence indiquée, entre le minimum fixé et un maximum réglable par le volume de pulsation et qu'indique un second manomètre. Lorsque l'éprouvette se rompt, la charge s'annule et la machine s'arrête automatiquement. Un compteur de tours indique le nombre de pulsations. On arrête l'essai lorsque la rupture ne s'est pas produite après un certain nombre de millions de pulsations (dans l'essai en question : 3 millions).

La machine n'était équipée que pour la traction ou la compression, non pour la flexion. Une poutre provisoire de flexion avait été confectionnée en assemblant deux poutrelles double-té par des plaques au moyen de soudure et de boulons. On lui avait donné une rigidité multiple de celle des rails. Elle a donné lieu à beaucoup de déboires. Finalement un tronçon de poutrelle à larges ailes D. I. R. 32 (gracieusement offert par les usines de Differdange) a été raboté convenablement, renforcé par des nervures soudées et adapté à la tête fixe de la presse. Cette poutre, dont l'aspect se marie parfaitement avec celui de la machine Amsler, a donné toute satisfaction. A titre de précaution, on a ajouté à la machine un limiteur de flexion arrêtant la marche en cas de flexion excessive, pour éviter que le rail fléchi ne puisse venir en contact avec la poutre. Celle-ci porte, à 45 cm de part et d'autre de l'axe, des appuis cylindriques en acier doux, épousant le profil du bourrelet dans le cas où ce dernier est tendu, ou s'appuyant sur toute la largeur du patin dans le cas contraire. La charge est transmise au rail par un couteau arrondi, s'appuyant sur toute la largeur du patin ou épousant la forme du bourrelet. Toutes ces pièces spé-

ciales pour l'essai ont été usinées au laboratoire. Il faut en excepter le rabotage de la poutre de flexion. Le couteau est fixé sur la tête mobile qui se déplace le long de deux vis attachées par un croisillon au piston de la presse, lesquelles transmettent de la sorte les charges pulsantes.

Pour tous les rails, la charge minimum a été invariablement de 5 tonnes. La charge maximum atteinte au cours de l'essai a été de 61 tonnes. Eu égard aux déformations importantes qui se produisent dans la flexion, la capacité maximum de pulsation a été pratiquement atteinte pour cette charge. Ceci montre l'intérêt de réduire au minimum la flexion propre de la poutre de support et explique la parfaite condition de marche de la machine équipée de sa poutre de flexion définitive D.I.R.32. La fréquence a été de 250 ou de 500 au-dessus et en dessous de 47 tonnes; on a même pu faire à la fréquence de 500 un des derniers essais à 50 tonnes, la machine étant alors tout à fait bien en main après 35 essais réguliers et 1 essai préliminaire. On admet généralement que la fréquence n'a pas d'influence définie sur le nombre de répétitions entraînant la rupture<sup>(5)</sup> (voir les essais 7-500, 8-250 et 9-500 pour une charge maximum de 45 tonnes). On peut se demander si cette opinion ne doit pas être comprise comme suit, que l'influence de la fréquence est entièrement masquée par la dispersion des résultats, due aux caractères accidentels des pièces. Des observations récentes sur la machine du laboratoire semblent prouver que la fréquence a effectivement un effet sur les efforts développés par la machine. Ce point est à l'étude et débordé du sujet de la présente note. Il suffit d'indiquer que les charges extrêmes citées sont celles indiquées par les manomètres de la machine, mais que les limites effectives sont probablement plus écartées.

Le dispositif expérimental a donné satisfaction. Il n'a présenté qu'un léger inconvénient : la fixation de la poutre de flexion à la tête fixe de la machine, à grande hauteur au dessus du sol du laboratoire. Un échafaudage démontable, léger et stable, en tubes et échelles métalliques U. T. M. et madriers, spécialement combiné pour les machines élevées du laboratoire (notamment pour la presse de flambage de 500 tonnes et 6 mètres de hauteur) a pallié à cette petite incommodité.

**Résultats des essais.** — 47 essais réguliers et comparables ont été effectués sur 18 rails pleins, dont 14 bourrelet tendu et 4 patin tendu, 15 rails soudés non traités, dont 11 bourrelet tendu et

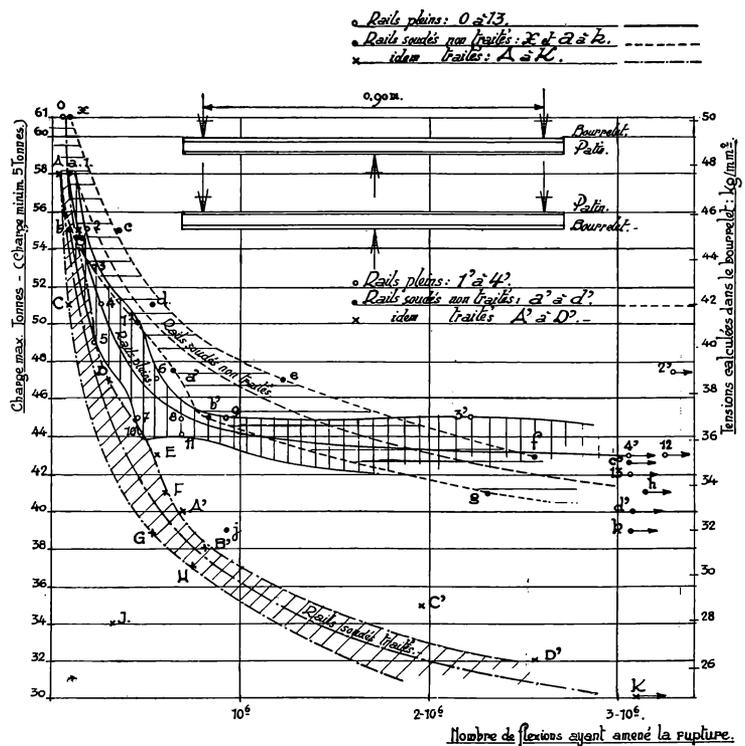


Fig. 5.

4 patin tendu, enfin 14 rails soudés et traités, dont 10 bourrelet tendu et 4 patin tendu. Les figures 5 et 6 représentent les courbes de Woehler en coordonnées ordinaires et semi-logarithmiques. Ces courbes ont été tracées d'après les résultats des essais bourrelet tendu (35 points) et patin tendu (12 points) qu'on se groupent convenablement. On peut en conclure qu'apparemment le sens de flexion est indifférent pour la limite d'endurance à la flexion pulsatoire.

Cependant, il y a une différence importante dans le phénomène de rupture selon que la tension maximum est une extension ou une compression. Dans les essais a' et 2', de même que dans un essai préliminaire de rail plein, bourrelet comprimé, ce dernier ne s'est pas rompu, mais s'est fissuré dans le bourrelet. Ces fissures, de dimensions non négligeables, n'empêchaient pas le maintien de la charge maximum. Dans le cas de l'essai a', la fissure n'a pas empêché que le nombre de pulsations dépassât 3 millions. Il s'agissait d'une fissure fine qui fut constatée après l'essai. Dans l'essai préliminaire (portée 1 m, pulsation de 5 à 52 tonnes, fréquence 250) trois fissures se sont formées dans le bourrelet sous les deux couteaux transmettant la charge totale, distants de 0,075 m de part et d'autre du milieu du rail (moment uniforme dans la zone centrale). La fissure 1 est apparue après 4.300.000 pulsations, la 2<sup>e</sup> après 5.200.000 et la 3<sup>e</sup> après 6.600.000. L'essai a été arrêté après 8.856.000 pulsations, les fissures s'étant propagées jusqu'à quelques millimètres des faces inférieures du bourrelet (fig. 7). Ces fissures sont nettement

<sup>(5)</sup> Abhängigkeit der Wechselfestigkeit des Stahles von der Lastwechselfrequenz. Z. V. d. I., 5 décembre 1936.

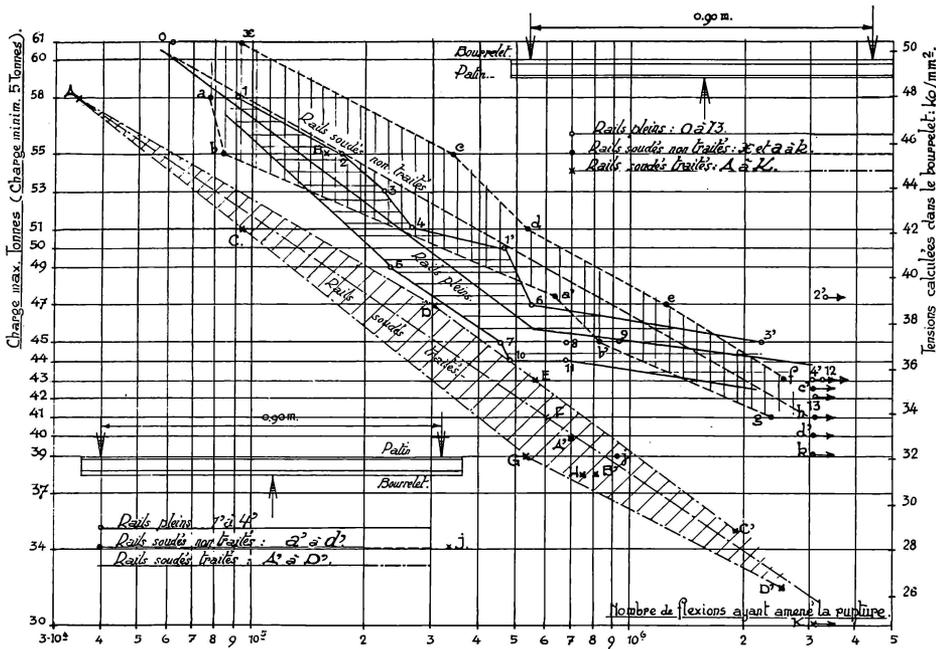


Fig. 6.

ouvertes après l'essai, quoique le rail présente une légère flexion permanente dont la concavité est du côté du bourrelet.

La formation de ces fissures n'empêche pas le rail de continuer à fonctionner comme un ressort parfait insensible à la fatigue. Elles révèlent une

plus haut. La grande dispersion n'a rien d'exceptionnel pour des essais de ce genre. Elle ne peut guère s'expliquer par des différences massiques et élastiques, quoiqu'il y ait une certaine irrégularité dans les rails. Elle résulte des structures propres individuelles des rails essayés, soudés ou non soudés, c'est-à-dire de leurs tares ou qualités inconnues. Cela est bien prouvé par l'essai D' (rail soudé traité) dont la rupture oblique s'est amorcée à 20 cm de la soudure dans un défaut de structure du patin (révélé par la cassure), passe ensuite par un trou foré dans l'âme à 12 cm environ de la soudure, et se termine dans le bourrelet à 5 cm de la soudure (fig. 8). La rupture est localisée dans une zone de moments très inférieurs au maximum. La présence d'un défaut ou d'un trou a donc, au point de vue de l'endurance, une action plus grande que celle

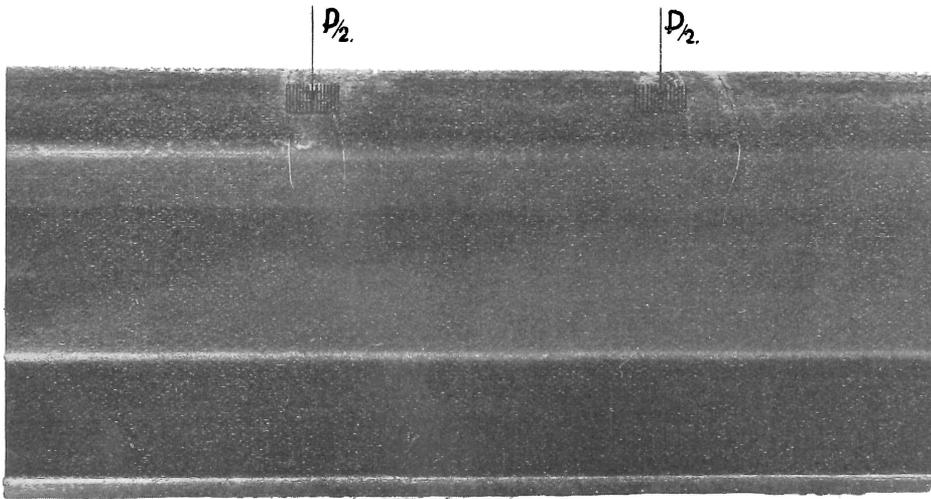


Fig. 7.

déformation permanente locale prononcée ; elles sont ouvertes sous la charge minimum et fermée sous la flexion maximum. Elles correspondent donc à des ruptures par traction dans la zone comprimée de flexion. Cela ne peut provenir que de déformations permanentes de compression, dues aux fortes tensions locales de compression dans la région d'application de la charge centrale. Lors du déchargement, il

affaiblissante nettement d'une soudure.

En dehors des formes spéciales de fissures ou de ruptures décrites ci-dessus, les autres ruptures complètes ou quasi complètes ont été tantôt régulières, tantôt irrégulières, fréquemment dans le milieu sous la charge, fréquemment en dehors. Pour les rails soudés, les ruptures se sont produites

en résulte des extensions importantes dont la répétition finit par engendrer des fissures. Au fur et à mesure de la formation de ces fissures, les tensions résiduelles disparaissent et le système redevient élastique lorsque toute la zone écrouie est fissurée. Un pareil processus transforme en quelque sorte un essai d'endurance aux efforts pulsatoires en un essai d'endurance aux efforts alternés.

D'une manière générale, l'essai était plus commode bourrelet tendu que patin tendu.

Cependant les résultats des essais patin tendu, ont été réguliers ainsi qu'on l'a remarqué

fréquemment dans le plan de soudure, fréquemment en dehors, à des distances souvent voisines de 2 cm mais atteignant jusqu'à 10 cm. Les cassures ont un aspect cristallin rugueux non fibreux et sans apparence de déformation latérale (striction). On a remarqué que les rails formés de bouts de

mois environ, compte tenu de l'exécution des poutres de flexion provisoire et définitive des difficultés de mise en train et de mise au point de la machine, ce travail très dur constituant sa première course.

Ceci montre tout l'intérêt des pulsateurs pour les essais relatifs aux voies ferrées, notamment aussi pour les éclissages.

**En conclusion**, les résultats d'essais comparatifs de flexion pulsatoire de rails ordinaires et soudés électriquement établissent la qualité satisfaisante de ces soudures. Ces essais seuls ne suffisent cependant pas pour apprécier tous les aspects de la sécurité de ces soudures. L'étude de M. Desorgher rend compte des autres essais effectués par la S. N. C. F. B. et en commente les résultats.

D'autres sont en cours aux laboratoires de l'auteur. Il est probable que ces études ne représentent qu'une phase de début. Si la soudure des rails est destinée à se répandre, la question se pose de savoir quelles répercussions techniques et industrielles cette nouvelle pratique peut avoir, tôt ou tard sur la métallurgie de ces produits. Plus particulièrement, la question de l'opportunité du recuit des soudures et la manière d'y procéder nécessitent peut-être un supplément d'investigation.

Au point de vue spécial de la technique des laboratoires et de la résistance des matériaux et des soudures, les essais sont intéressants par leur ampleur leur puissance et leurs résultats. Le présent travail n'en constitue encore qu'un compte rendu provisoire à l'occasion des Journées de la Soudure. Une étude ultérieure plus développée et approfondie suivra, qui comportera les résultats des essais complémentaires entrepris aux laboratoires d'essais des constructions du génie civil de l'Université de Liège.

La mise en train de ces essais a été un travail important auquel MM. Dantinne et Jacquemin ont apporté toute leur compétence et beaucoup de dévouement. La mise au point a été assez longue, ensuite les opérations ont été réalisées sans incidents notables par les soins intelligents des pré-nommés.

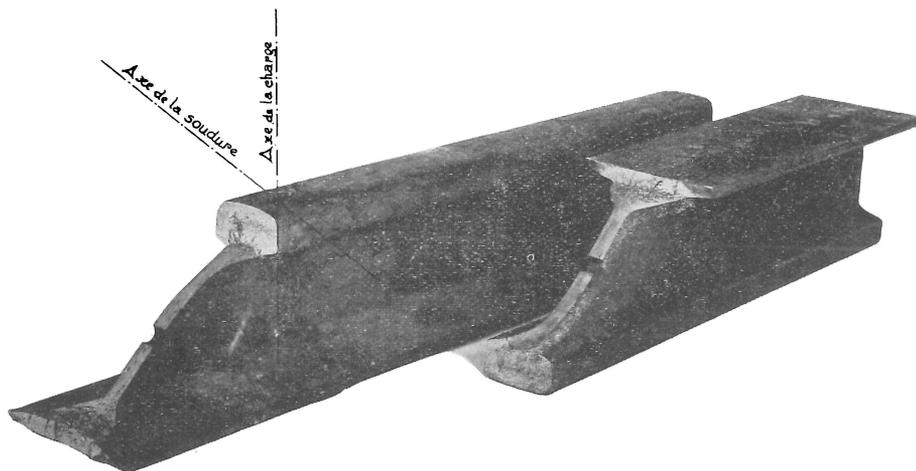


Fig 8.

provenances différentes soudés ensemble (J est le seul que l'on ait pu repérer sûrement) ont une endurance très déficiente. Il paraîtrait recommandable de souder entre eux autant que possible des rails de même provenance.

L'essai classe les rails, au point de vue de l'endurance, dans l'ordre :

- rails non soudés.
- rails soudés bruts ;
- rails soudés recuits.

En extrapolant le diagramme semi-logarithmique pour 10 millions de répétitions, M. Desorgher (*op. cit.*) estime que l'endurance des rails soudés bruts est égale à 0,85 de celle des rails non soudés. Ce rapport serait 0,57 pour les rails soudés recuits. Selon cet auteur, 10 millions de répétitions correspondent à peu près au nombre de sollicitations répétées par les essieux circulant sur une voie à grand trafic pendant la durée de la période normale de renouvellement des rails dans une telle voie (8 années). Il fait remarquer que la machine d'essai pulsatoire permet de totaliser cette sollicitation en quelques jours. Le nombre total de pulsations pour les 47 rails réguliers et l'essai préliminaire correspond à 105,5 journées de travail continu du pulsateur. La durée totale des essais préliminaires, principaux et accessoires a été effectivement de quatorze