

# Fatigue des structures métalliques et en béton: à propos d'un congrès international à Lausanne

Autor(en): **Weibel, Jean-Pierre**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Ingénieurs et architectes suisses**

Band (Jahr): **108 (1982)**

Heft 6

PDF erstellt am: **19.09.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-74644>

## **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

## **Haftungsausschluss**

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

# Fatigue des structures métalliques et en béton

## A propos d'un congrès international à Lausanne

par Jean-Pierre Weibel

L'Association internationale des ponts et charpentes (AIPC) organise sous le patronage de l'ASCE, du CEB et de la CECM un séminaire international consacré aux problèmes de la fatigue des structures, qui aura lieu à l'Ecole polytechnique fédérale de Lausanne du 24 au 26 mars prochain<sup>1</sup>. La fatigue des matériaux est un sujet peu familier aux ingénieurs civils, bien qu'elle pose des problèmes ardues aux ingénieurs mécaniciens depuis plus d'un siècle et soit la cause de trop nombreuses catastrophes.

Le premier article ci-dessous tente d'expliquer pourquoi le phénomène de la fatigue ne peut pas être négligé dans le domaine du génie civil, alors que le second expose un cas particulier.

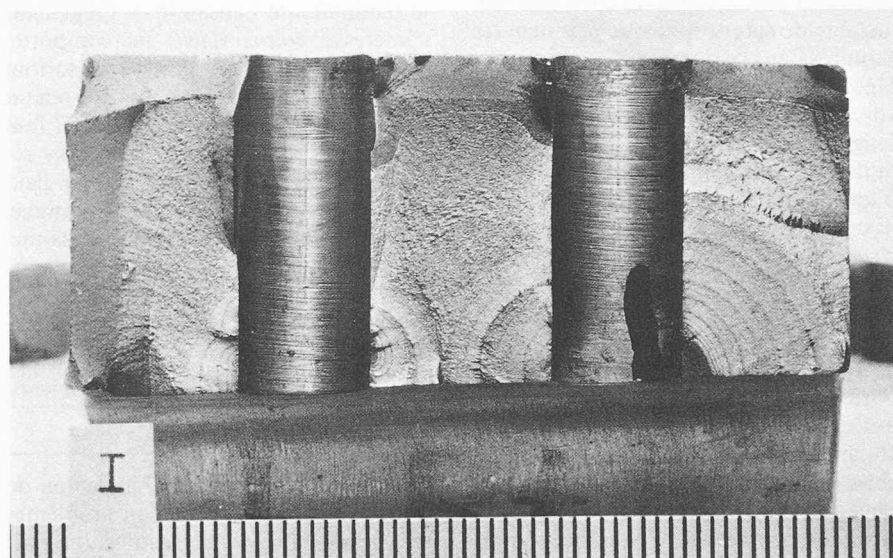


Fig. 1. — Semelle de longeron: rupture en fatigue. On remarque les stries qui marquent la propagation des fissures, jusqu'à ce que la section soit insuffisante pour reprendre les charges de service. Echelle: environ 1.9:1. (Photo LFEM)

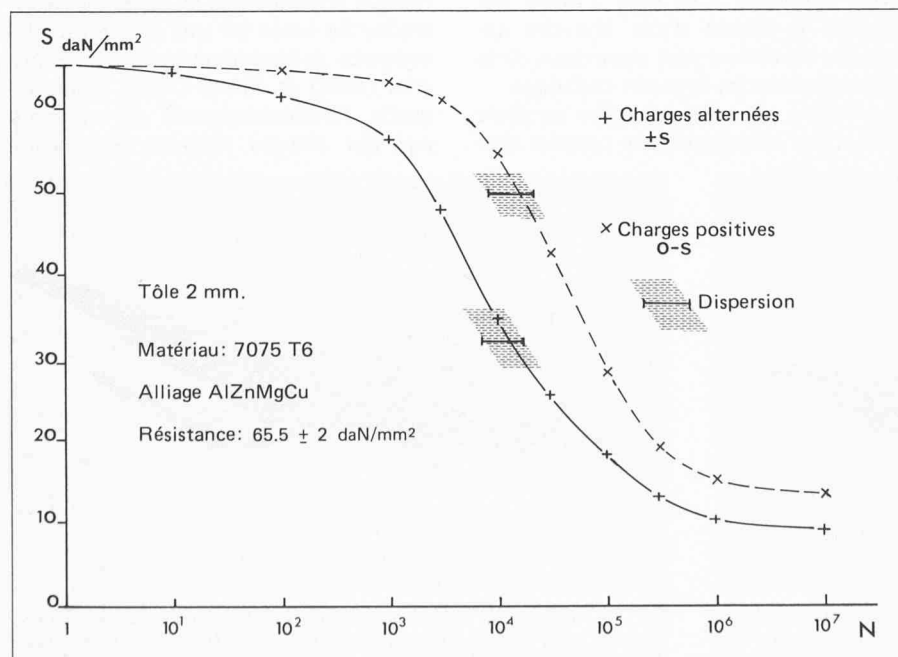


Fig. 2. — Exemple de courbes de Wöhler.

## Qu'est-ce que la fatigue des matériaux?

Ce phénomène n'est pas encore suffisamment connu pour que puissent être décrits et prévus ses mécanismes, aucun modèle physique satisfaisant n'ayant été proposé jusqu'à présent. Décrivons-le donc à travers ses effets: il peut être défini comme le comportement par lequel une rupture sous des charges répétées se produit à une valeur inférieure à la résistance statique. Si la fatigue concerne surtout les métaux et les alliages métalliques, elle n'est pas inconnue pour d'autres matériaux.

Une rupture en fatigue est le résultat d'un endommagement progressif: après une première phase non visible et mal connue, une fissure se produit puis se propage; la ruine intervient en général lorsque la section restée intacte est insuffisante pour les charges de service (fig. 1).

Les premiers travaux systématiques sur la fatigue sont ceux de Wöhler, qui, confronté à des ruptures d'axes de wagons de chemin de fer, a essayé d'établir une relation entre le nombre de charges appliquées et la charge de rupture correspondante (fig. 2). La courbe de Wöhler présente un caractère expérimental et non analytique; elle constitue le résultat d'un grand nombre d'essais. Hélas, les particularités de ces essais influencent les valeurs d'une façon telle qu'elles compromettent sérieusement leur utilisation pour la prédiction du comportement d'une pièce ou d'une structure.

Les raisons de telles restrictions sont à chercher dans le très grand nombre de paramètres intervenant dans le comportement à la fatigue. Ces facteurs relèvent de quatre groupes:

- caractéristiques du matériau (résistance, élasticité, composition chimique, etc.);
- caractéristiques de la structure (dessin, assemblages, système statique, etc.);
- particularités liées à la fabrication (état de surface, tolérances dimensionnelles ou dans les procédés, p.ex.);
- contraintes (mécaniques, thermiques, chimiques).

Le grand nombre d'influences et leurs innombrables interactions expliquent que les expériences faites pour un objet déterminé, dans des conditions définies, ne peuvent servir que dans une faible mesure pour d'autres applications. Il convient en outre de remarquer que des éléments qualitatifs, tels que le dessin des pièces ou le choix des assemblages, jouent un rôle primordial.

<sup>1</sup> La responsabilité de l'organisation est assurée par l'Institut de construction métallique de l'EPFL (prof. Jean-Claude Badoux).



Fig. 3. — Cet avion Curtiss Condor de Swissair s'est abattu le 27 juillet 1934 près de Tuttlingen (Wurtemberg) à la suite de la rupture en fatigue d'un hauban reliant aile et moteur.

(Photo Swissair)

### La fatigue dans le génie civil

S'il est évident que des véhicules sont soumis de façon presque permanente à des charges répétées de grande amplitude, tout comme les machines de toute sorte, l'importance de la fatigue pour les ouvrages d'art ne s'impose pas de premier abord.

Pourtant, on se préoccupe dans le monde entier des risques dus à la fatigue dans le domaine du génie civil, comme le démontre notamment la participation de plusieurs centaines d'ingénieurs et de constructeurs au séminaire de Lausanne. L'utilisation de méthodes d'analyse des contraintes de plus en plus précises (grâce à l'avènement de l'ordinateur: pensons aux éléments finis) et des considérations d'ordre économique de plus en plus pressantes ont conduit à une utilisation toujours plus poussée des matériaux utilisés. Ce que les constructeurs d'avions ont dû faire depuis longtemps pour diminuer le rapport poids propre/charge utile, les ingénieurs civils sont aujourd'hui contraints de le faire également: tirer parti au maximum des propriétés des matériaux mis en œuvre.

Si les constructeurs d'avions ont connu très tôt (fig. 3) des ennuis graves, c'est

d'une part parce qu'ils travaillent avec des facteurs de sécurité faibles (1,5 à 1,4) et d'autre part à cause du caractère inélectable de catastrophe que prennent les ruptures dans ce domaine.

Une des raisons, pour les ingénieurs civils, de se pencher sur le problème de la fatigue réside dans la constatation hélas mille fois répétée que la démonstration d'une sécurité suffisante à la rupture statique ne constitue nullement la garantie d'un comportement satisfaisant à la fatigue. Le sort tragique des avions De Havilland Comet (fig. 4) le prouve. Premier avion de ligne à réaction mis en service, ce type satisfaisait aux exigences des normes. Pourtant, deux accidents survenus dans des circonstances identiques le 10 janvier et le 8 avril 1954, aboutissant chaque fois à la chute en Méditerranée sans que les équipages puissent annoncer quoi que ce soit, ont été expliqués par une rupture en fatigue du fuselage. L'apparition et la propagation d'une fissure au coin d'un hublot a conduit dans les deux cas à l'éclatement du fuselage sous la pression interne; les modifications apportées à ce type d'avion ont marqué le départ d'une nouvelle approche, infiniment plus rigoureuse, de la sécurité contre les ruptures en fatigue.

Ces leçons ont aussi été utiles au génie civil. C'est évidemment au premier chef

la construction métallique qui a assimilé les expériences recueillies par les chercheurs de l'aéronautique.

Le caractère spécifique des travaux de recherche rend ces derniers pratiquement inaccessibles à l'ingénieur et au constructeur. Le premier document d'accès facile leur permettant la réalisation d'ouvrages plus sûrs est constitué par la norme SIA 161 «Constructions métalliques» (1979). Les directives claires et apparemment simples qui y sont données sont en réalité le résultat d'un travail de synthèse considérable. Nous verrons que les problèmes de fatigue peuvent être traités avec certaines simplifications, à condition de savoir exactement quelle est l'influence de ces simplifications et les limites dans lesquelles elles peuvent être appliquées.

Outre les éléments de conception et de dimensionnement — sur lesquels est axé le séminaire de Lausanne — l'ingénieur s'intéresse *nolens volens* au comportement des ouvrages en service, surtout s'ils n'ont pas été conçus en tenant compte de la fatigue! A ce sujet, il faut être conscient de ce que des effets secondaires du point de vue statique peuvent jouer un rôle important en fatigue. Parmi les exposés présentés à Lausanne, il en est plusieurs qui traitent de cet aspect éminemment pratique de la surveillance et de la réparation des ouvrages.

### Quelles simplifications?

On se préoccupe depuis longtemps de simplifier le traitement des problèmes de fatigue en se concentrant d'une part sur les paramètres essentiels et d'autre part en élaborant des relations simples entre eux, avec un degré de succès variable.

La relation la plus simple entre les charges appliquées et la durée de vie attendue est basée sur une hypothèse, développée indépendamment par Palmgren (1924) et Miner (1945), selon laquelle *l'endommagement du matériau par des charges répétées est linéaire*

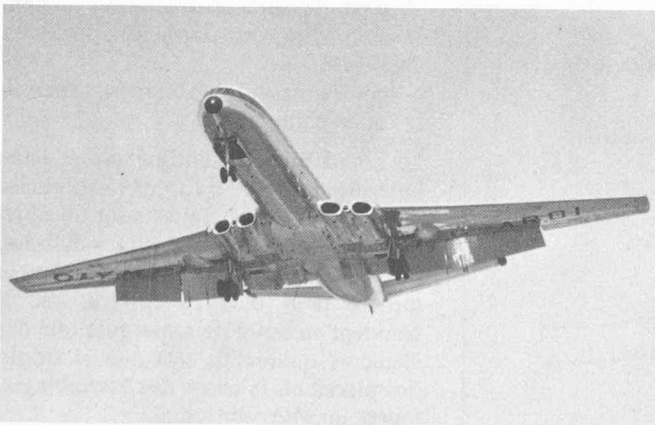


Fig. 4. — L'analyse complète de la structure et d'importantes modifications, consécutives à deux accidents, ont demandé plus de quatre ans jusqu'à ce que le De Havilland Comet (ici le modèle IV) puisse reprendre du service en toute sécurité.

(Photo J.-P. Weibel)



Fig. 5. — Danger de la conception Safe Life: un avion du type Vickers Viscount a été victime d'une rupture d'aile, à fin 1968. De légers défauts de fabrication d'un élément de longeron ont raccourci considérablement la durée de vie effective de cette pièce.

(Photo J.-P. Weibel)

jusqu'à la rupture. La critère de rupture est dès lors d'une simplicité fascinante:

$$\sum_i \frac{n_i}{N_i} = 1$$

où  $n_i$  = nombre de cycles de charges d'amplitude  $i$

$N_i$  = nombre de cycles de charges d'amplitude  $i$  à la rupture

$N_i$  se déduit de la courbe de Wöhler (fig. 2). Si l'on sait que la courbe dépend dans une très large mesure des conditions dans lesquelles elle a été relevée — la figure 2 montre bien cette dépendance —, on n'aura encore touché qu'une des imperfections de la règle de Palmgren-Miner. En effet, l'expérience a prouvé que la rupture pouvait intervenir pour des valeurs  $\sum \frac{n_i}{N_i}$  comprises entre 0,2 et plus de 10! C'est dire que l'application de cette règle peut aussi bien conduire à d'intempestifs surdimensionnements qu'à des sous-dimensionnements absolument catastrophiques. Si l'on rencontre toutefois encore fréquemment la règle de Palmgren-Miner dans la littérature, c'est faute d'une meilleure relation aussi simple.

Faute de pouvoir aborder la fatigue de façon globale, les travaux des chercheurs se sont spécialisés sur divers aspects. Nous ne parlerons pas ici de la phase précédant l'apparition de fissures, bien qu'elle soit déterminante pour la durée de vie d'une structure. Elle est mal connue et son importance est relativisée par les difficultés pratiques qu'il y a de détecter une fissure dès sa naissance.

La seconde phase de l'endommagement, soit la propagation des fissures, est bien mieux connue et il existe des méthodes permettant de l'analyser avec précision, grâce à l'utilisation de la *Fracture Mechanics*. En tenant compte des propriétés du matériau, des dimensions et des formes de l'objet ainsi que des contraintes, il est possible de calculer la propagation des fissures et particulièrement la vitesse de propagation. Cette méthode est basée sur des considérations énergétiques; elle permet notamment de calculer la *longueur critique* d'une fissure, au-delà de laquelle cette dernière se propage spontanément, sa croissance contribuant à diminuer l'énergie totale dans la zone considérée. Les méthodes d'analyse dans ce domaine, exploré dès 1920 par Griffith, ont été considérablement affinées et permettent notamment de tenir compte des phénomènes plastiques sur le front de la fissure.

### Problèmes de sécurité

Comment garantir la sécurité en ce qui concerne la fatigue? Une voie consisterait à dimensionner l'objet de telle façon que la sécurité statique soit assez élevée pour éliminer les problèmes de fatigue.

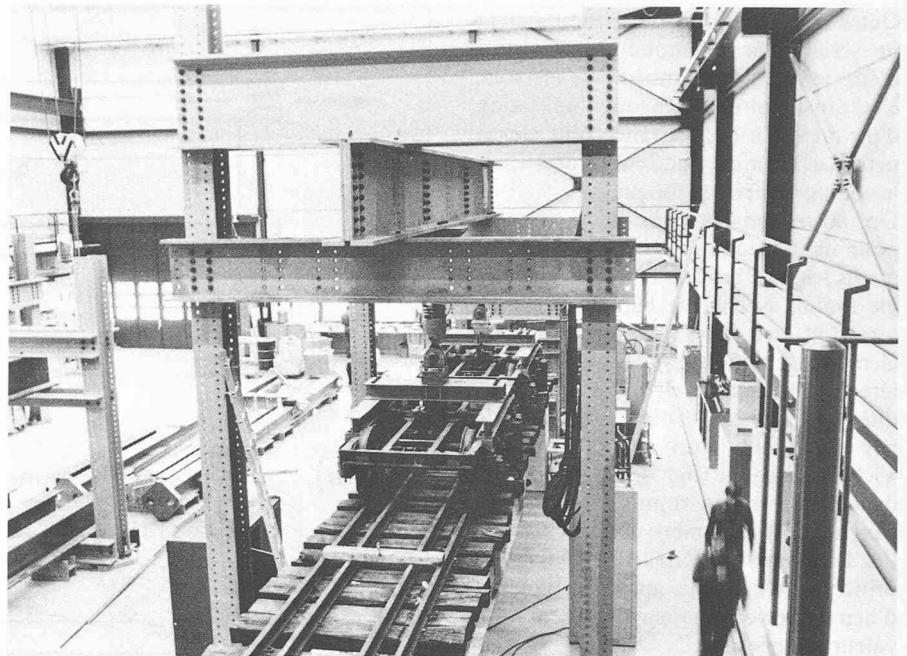


Fig. 6. — Essai en fatigue sur un pont-rail en vraie grandeur avec simulation des charges réelles, effectué à l'EPFL par les spécialistes de l'ICOM. Un bogie de wagon à voie étroite sert à l'introduction des charges. (Photo ICOM)

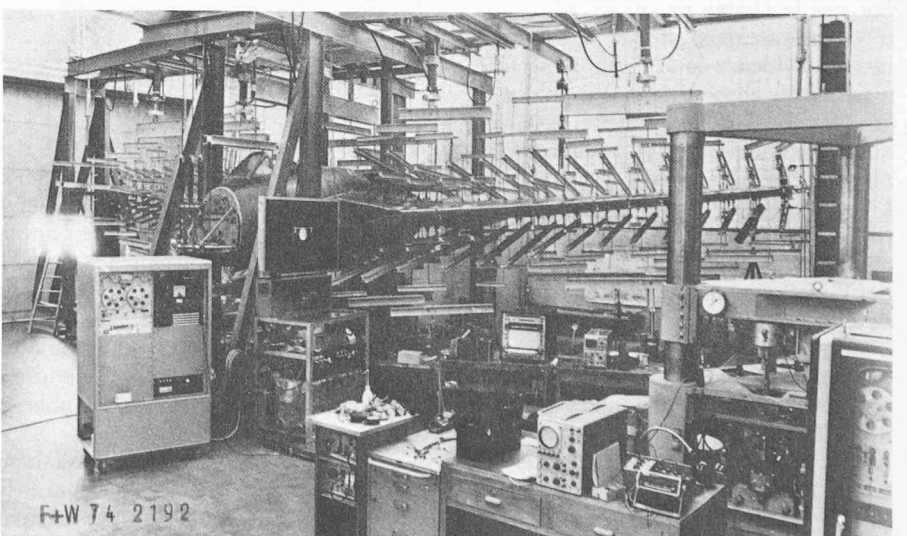
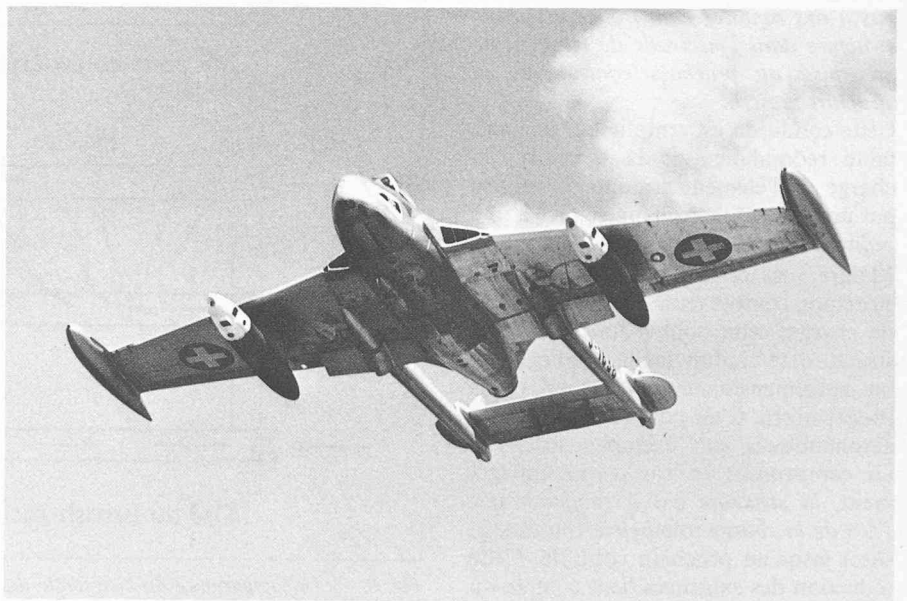


Fig. 7. — La simulation au sol, à un rythme accéléré, des charges agissant en vol sur un avion exige une installation complexe. Le simulateur de fatigue de la Fabrique fédérale d'avions d'Emmen permet de tenir compte de charges aussi complexes que celles résultant du largage des réservoirs, de la consommation de combustible ou survenant lors de l'atterrissage d'un DH-112 Venom (en haut). (Photos F + W Emmen)

Outre le fait qu'un tel dimensionnement ne serait guère économique, il risque d'être le fait de raisonnements erronés: c'est ainsi, par exemple, que l'utilisation d'un matériau de résistance plus élevée peut parfaitement conduire à détériorer le comportement en fatigue.

Un autre moyen consiste à calculer pour une structure — ou pour les éléments les plus critiques — une durée de vie limite, au-delà de laquelle la structure doit être retirée du service ou les éléments critiques remplacés. Le caractère problématique de cette approche, dite *Safe Life* en aviation, est démontré par l'accident d'un avion de ligne Vickers Viscount (fig. 5), victime en vol de croisière de la rupture de son aile gauche, le 31 décembre 1968 en Australie. La semelle inférieure du longeron principal avait cédé après un nombre d'heures de vol inférieur d'un quart à la valeur estimée sûre...

Le principe dit *Fail Safe* est infiniment plus réaliste, puisqu'il admet que se produisent des fissures.

Il exige toutefois qu'elles ne conduisent pas à des ruptures catastrophiques de la structure dans l'intervalle de temps compris jusqu'au prochain contrôle de la structure prescrit.

Cette condition est remplie par une certaine redondance de la structure: la charge de l'élément critique est reprise par un élément de rechange, grâce à une redistribution des contraintes.

Malgré une conception adroite de la structure, compte tenu des différents cas de charge, cette double fonction de la structure se traduit inévitablement par un surdimensionnement et un poids propre accru. C'est pourquoi les normes aéronautiques, par exemple, acceptent un compromis: en cas d'endommagement, la structure n'a à supporter que 75% de la charge admissible (ou charge sûre) jusqu'au prochain contrôle. Cette réduction des exigences tient compte du fait que la charge maximale admissible n'est que rarement atteinte en service et met en évidence le fait que la sécurité n'est jamais absolue dans le domaine de la fatigue. On ne saurait atteindre qu'une probabilité de rupture assez faible pour être acceptable.

L'application de ce principe ne répond pas à de seuls critères numériques: la qualité d'une construction et la justesse des hypothèses constituent des éléments de première importance, comme le montre la figure 4. Des effets secondaires, en l'occurrence la rigidité de la structure perpendiculairement au plan de l'élément critique, ont faussé la répartition des contraintes imaginée par les staticiens pour le cas d'une rupture de la semelle de longeron.

Pourtant, la méthode *Fail Safe* s'est révélée comme un excellent outil pour l'amélioration de la sécurité à la rupture, également en présence de surcharges statiques imprévues.

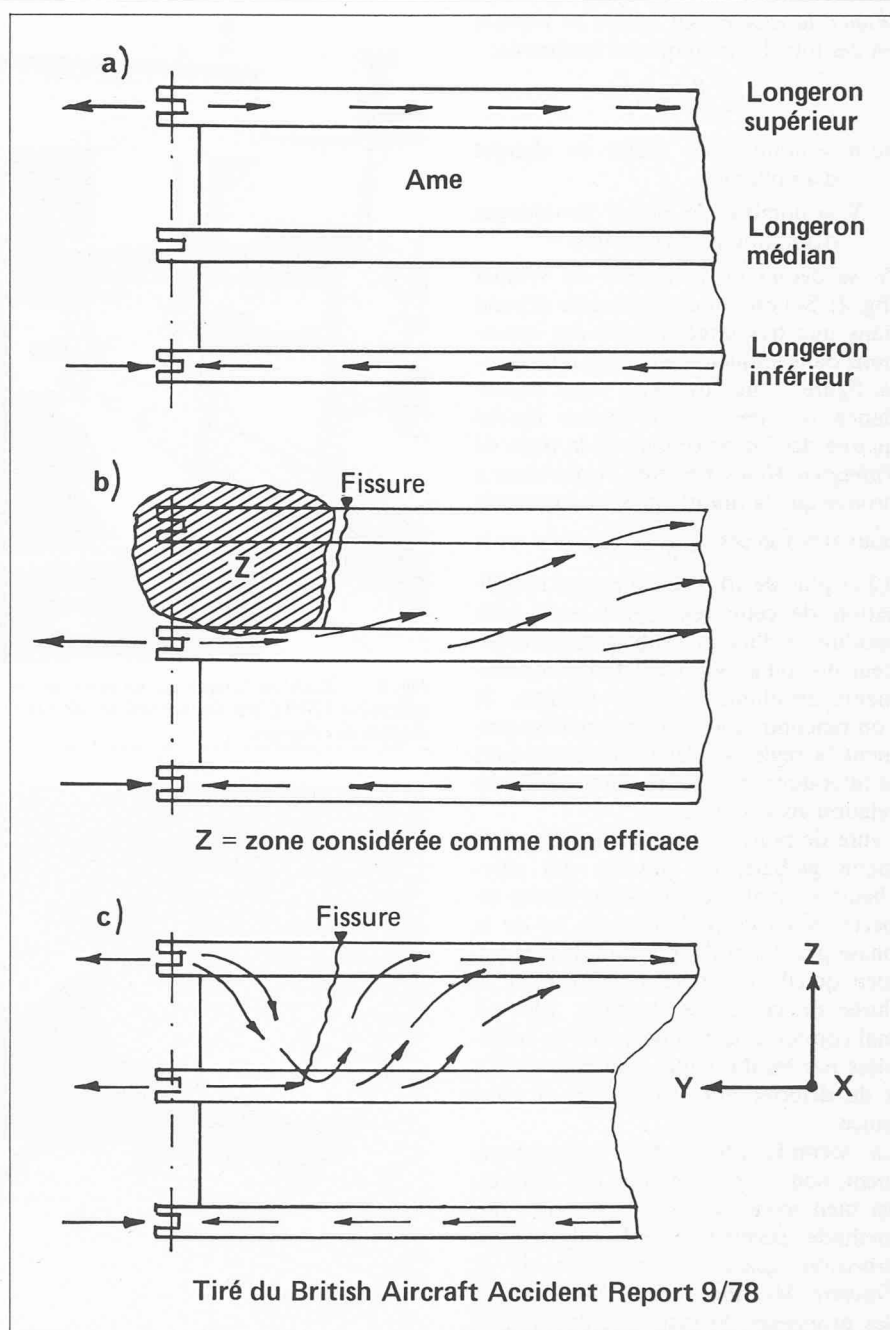


Fig. 8. — De l'importance du bien-fondé des hypothèses utilisées pour la conception *Fail Safe*: l'empennage ci-dessus s'est rompu en vol.

### Les charges

Toutes les méthodes d'analyse des contraintes ou de calcul des probabilités de rupture sont tributaires de connaissances exactes sur les charges appliquées: cas de charge, fréquence d'application, variations ultérieures. Ce qui est vrai à un moment donné peut être infirmé par des influences pas toujours évidentes: charge par essieu, modification d'itinéraires, par exemple, pour le cas d'ouvrages d'art.

La pratique s'est généralisée de démontrer la sécurité et le comportement à la fatigue de véhicules ou de structures par des essais en vraie grandeur, au cours desquels sont appliquées les charges de service (fig. 6 et 7), sauf évidemment pour des ouvrages de très grandes dimensions.

Des essais comme celui montré par la figure 6 ne permettent évidemment pas de vérifier la durée de vie d'un ouvrage destiné à être mis en service, mais il livre d'utiles enseignements pour la conception et le dimensionnement d'ouvrages analogues.

Les moyens importants nécessités par ces essais doivent être en rapport avec la fiabilité des données de base. C'est dire que les charges doivent être connues avec précision, aussi bien en ce qui concerne leur amplitude et leur répartition que du point de vue statistique. Le spectre de charge d'un ouvrage est la synthèse de ces éléments, en quelque sorte le *curriculum vitae*.

L'essai illustré par la figure 7 a dû être répété, par suite d'une modification dans l'utilisation du type d'avion en cause: les nouvelles manœuvres exécutées par les pilotes ne modifiaient pas

seulement le moment de l'apparition de dommages de fatigue, mais également le type et l'endroit des dégâts!  
C'est là une situation concevable dans le cas d'un ouvrage d'art: qu'on songe aux projets de construction de nouvelles lignes de tramway ou plus simplement à l'introduction de nouveaux types de véhicules.

**Conclusion**

La conscience et la compréhension des problèmes de fatigue ne sont pas le seul

apanage des ingénieurs mécaniciens. La construction et l'exploitation d'ouvrages d'art toujours plus efficaces du point de vue de l'utilisation des matériaux doivent s'appuyer sur de solides connaissances dans le domaine de la fatigue.

Des travaux de recherche comme ceux conduits à l'Institut de construction métallique de l'EPFL contribuent de façon tangible à l'avancement de l'art de la construction. Le séminaire de Lausanne sur le comportement en fatigue des structures métalliques et en béton armé

apportera, notamment par l'intense échange d'information qu'il favorise, de nouvelles impulsions pour les chercheurs et des bases mieux assurées pour les constructeurs.

Jean-Pierre Weibel

Cet article a été rédigé grâce aux documents fournis par l'ICOM et la Fabrique fédérale d'avions d'Emmen.

# Comportement à la fatigue des poutres mixtes préfléchies<sup>1</sup>

par G. Firquet, Bruxelles

**Les poutres mixtes préfléchies, judicieusement présollicitées lors de leur fabrication, présentent l'avantage que les amplitudes de variation des contraintes sous charges variables y sont beaucoup plus faibles que dans les poutres non présollicitées. Par une analyse de l'évolution des contraintes dans chacun de ces deux types de poutres, on montre l'incidence de cette réduction sur la résistance à la fatigue. La description de deux essais en laboratoire et l'analyse du comportement des poutres d'un ouvrage réel étaient l'argumentation alors que la conclusion montre l'économie obtenue par l'emploi de ce type de poutres.**

**1. Introduction**

Dans le début des années 1950, lors des recherches en vue de la mise au point d'un nouveau type de poutres élancées associant l'acier et le béton, et bien qu'à cette époque le problème de la résistance en fatigue n'était pas encore à l'ordre du jour comme il l'est aujourd'hui, a été créée une poutre dont la résistance en fatigue dépasse largement celle des poutres mixtes déjà connues.

Le procédé de fabrication a permis d'obtenir une réduction sensible de la variation des contraintes tout en continuant à utiliser au maximum la capacité de l'acier utilisé.

Ce procédé consiste en une mise en charge d'un profilé métallique suivie de l'exécution du béton d'enrobage de sa semelle tendue, les charges appliquées n'étant relâchées qu'après durcissement de ce béton.

**2. Description du procédé**

La poutrelle nue, posée sur ses deux appuis d'extrémité, est soumise à des charges dont la position et l'intensité sont choisies de telle sorte que le diagramme des contraintes de traction à la fibre extrême tendue soit l'enveloppe de celui des contraintes de service (fig. 1).

<sup>1</sup> Exposé présenté au colloque AIPC « Comportement à la fatigue des structures métalliques et en béton », à Lausanne.

Dans cet état chargé, la semelle tendue de la poutre est enrobée de béton puis, lorsque le béton a atteint une résistance suffisante, les charges appliquées sont enlevées. La poutre revient partiellement vers sa position de départ tandis que le béton entourant sa semelle tendue se met en compression.

Après la mise en place de la poutre dans l'ouvrage, son enrobage est finalement complété par du béton entourant l'âme et par l'exécution d'une dalle collaborante au niveau de la semelle comprimée.

**Summary**

Composite beams properly preflexed during their fabrication offer the advantage that the range of stress variation under live loads is much smaller than in non-preloaded beams. The resulting effect on the fatigue resistance is shown by analysis of the development of stresses in both types of beam. This analysis is supported by the description of two laboratory tests and the examination of the behaviour of real beams in situ. The conclusion shows the economies made possible by these types of beams.

**3. Comparaison des évolutions des contraintes**

Dans l'exposé qui suit, nous nous référons à un cas concret: une poutre de pont route, en acier AE 355 D, qui servira à établir une comparaison au point de vue fatigue entre une poutre préfléchie et une poutre identique mais non présollicitée.

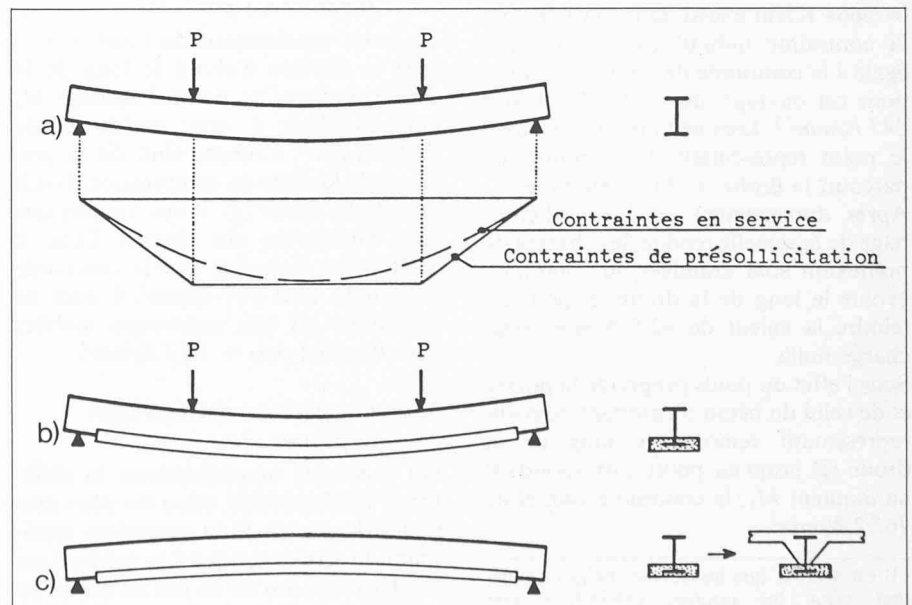


Fig. 1. — Principe de la poutre préfléchie.