Zeitschrift: Ingénieurs et architectes suisses
Band: 112 (1986)
Heft: 4

Artikel: Concepts du dimensionnement à la fatigue
Autor: Smith, Ian F.C. / Hirt, Manfred A.
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-75968

Nutzungsbedingungen
Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation
L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use
The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 10.12.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Concepts du dimensionnement à la fatigue

par Ian F. C. Smith et Manfred A. Hirt, Lausanne

Le présent article[1] met en évidence la complexité du problème de la fatigue des éléments de structure et décrit quelques caractéristiques particulières d'éléments de structure soudés. Un document de la CECM traduisant ces caractéristiques en des recommandations pour le projeteur est présenté. En conclusion, l'examen de quelques nouveaux développements montre la tendance et des changements futurs dans les concepts de dimensionnement à la fatigue.

1. Introduction

La majorité des dommages qui se produit dans les éléments de structure peut être attribuée à la fatigue [1][2]. Des fissures de fatigue peuvent apparaître dans des avions, des bateaux, des ponts, des châssis de voitures, des grues, des ponts roulants, des éléments de machines, des turbines, des enceintes de réacteurs, des oléoducs, des plates-formes maritimes, des tours de transmission, des mâts et dans des cheminées. Des sollicitations en fatigue peuvent être engendrées par des charges de trafic ou des charges variables dues à l'effet de vagues, du vent, de cycles de pression, de vibrations ou des changements de température. L'endommagement par fatigue débute généralement par le développement lent de petites fissures qui s'amorcent à partir d'entailles aiguës ou de défauts préexistants semblables à des fissures. Pour des pièces usinées, une grande partie de la durée de vie de fatigue est nécessaire pour la formation et la croissance de fissures microstructurales; cette durée est connue sous le nom de période d'amorçage de fissure. Le processus de fatigue se termine lorsque la fissure a atteint une longueur suffisante pour amener la ruine de la structure. La figure 1 montre un processus de fissuration typique, dû à la fatigue, dans un élément de structure soudé.

Des recherches sur la fatigue sont effectuées à plusieurs niveaux. Plus de trente revues scientifiques de réputation internationale présentent des articles sur la fatigue; deux d'entre elles traitent uniquement de ce sujet. Des centaines d'autres publications commerciales présentent des rapports sur des essais de fatigue. La tendance à l'utilisation de matériaux à plus haute résistance dans le but de rendre les constructions plus légères entraîne une augmentation des sollicitations de fatigue susceptibles de causer des dommages. Cet état de fait nécessite une activité de recherche plus intense. Il semble cependant que dans certains domaines le fossé entre le chercheur et le projeteur s'agrandit. Les approches de dimensionnement proposées par les experts sont nombreuses et contradictoires. Ainsi, suivant les recommandations ou les codes utilisés, la durée de vie calculée pour un assemblage soudé dans un pont peut être différente d'un facteur dix. Des normes ou des recommandations concernant la fatigue ont été établies dans presque chaque pays industrialisé. Des experts se rencontrent régulièrement dans l'espoir de réduire le fossé entre les travaux scientifiques et les calculs de projets. Il est heureux que les recherches récentes sur l'acier de construction n'aient pas abouti à de nouvelles complications, mais plutôt à d'importantes simplifications. Cela a permis une harmonisation internationale, jamais vue à ce jour, pour les procédures de dimensionnement à la fatigue.

2. Fatigue d'éléments de construction

2.1 *Contraintes*

Bien que les sollicitations aient une grande influence sur la durée de vie, leurs variations réelles ne sont souvent pas connues. L'amplitude de contrainte (ou différence de contraintes $\Delta\sigma$) est le paramètre le plus important (fig. 2). Si la variation de contrainte n'est pas constante, mais change en fonction du temps, le problème doit être étudié à l'aide de

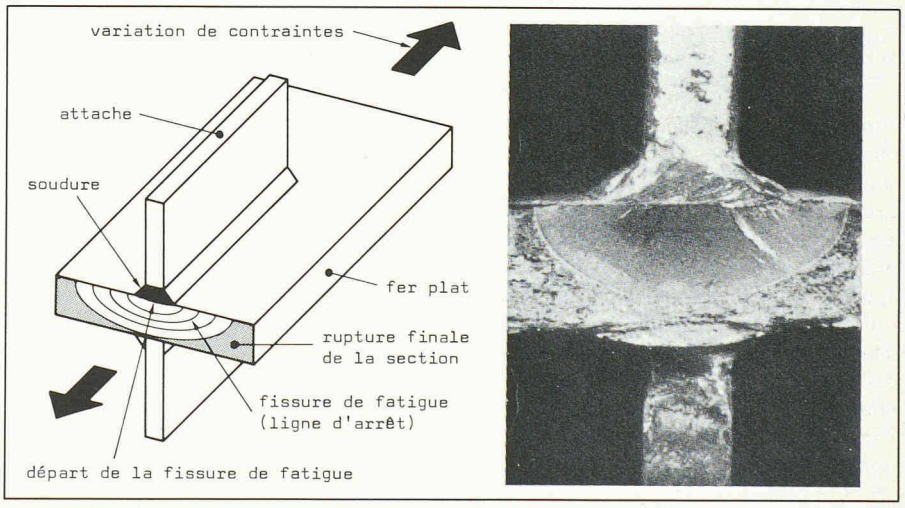


Fig. 1. — Représentation schématique et photographie d'une fissure de fatigue due à la présence d'une attache soudée.

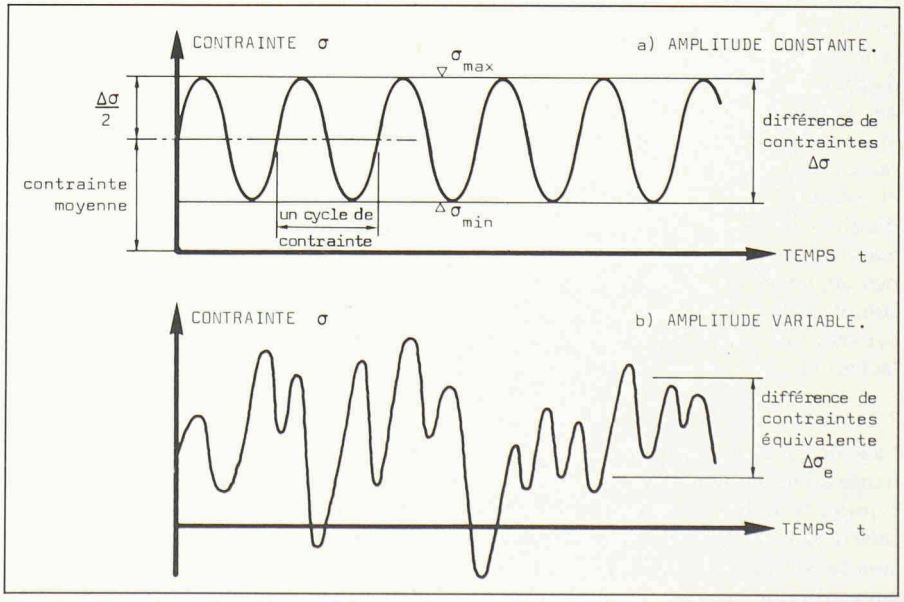


Fig. 2. — Paramètres déterminants des contraintes pour le calcul à la fatigue.

[1] Cet article est une traduction légèrement modifiée de « Fatigue Design Concepts » paru dans les *Periodica AIPC*, volume 4/1984, S-29/84. La traduction française a été assurée par M. A. Golay de l'Association internationale des ponts et charpentes (AIPC).

[2] Les chiffres entre crochets renvoient à la bibliographie en fin d'article.

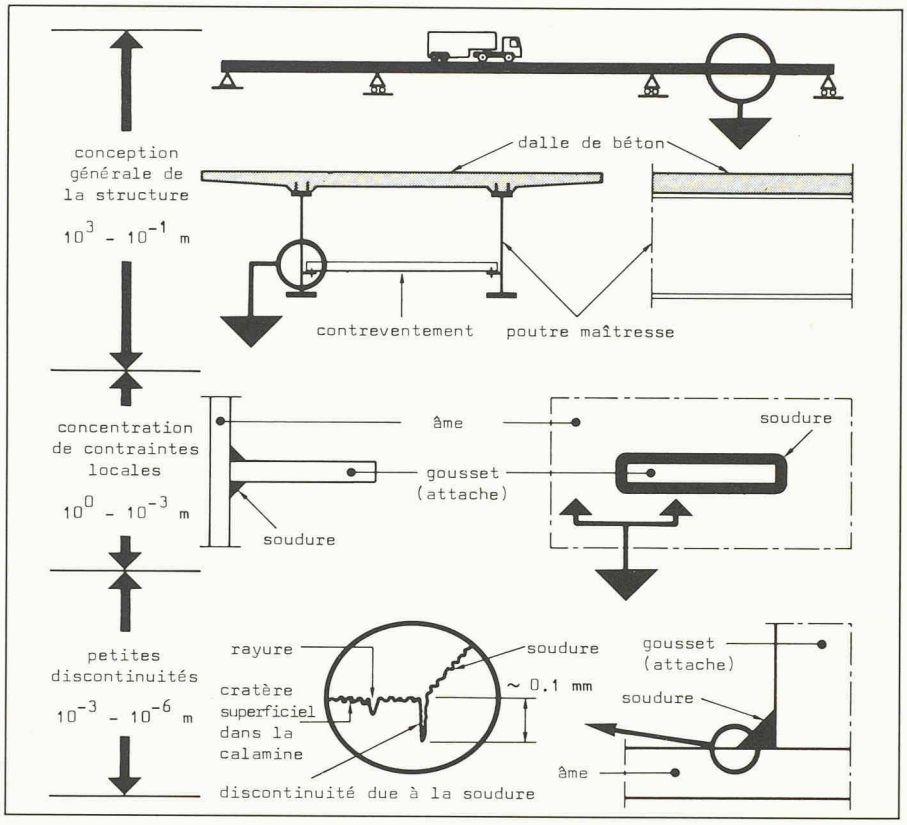


Fig. 3. — Caractéristiques géométriques résultant de la conception générale de la structure, de la concentration de contraintes locales et de petites discontinuités.

concepts d'amplitude variable et l'ordre chronologique des variations de contrainte peut jouer un rôle important.

Lorsque la sollicitation entraîne de grandes déformations plastiques dans l'élément, la fissuration par fatigue est alors appelée fatigue oligocyclique. Les amplitudes de contrainte doivent alors être abandonnées au profit des amplitudes de déformation, afin d'obtenir une bonne relation avec la durée de vie.

Parmi les autres paramètres, il faut mentionner la valeur moyenne des contraintes et le niveau des contraintes résiduelles. En outre, lorsque le matériau est soumis à l'action d'un phénomène dépendant du temps, tel que le fluage ou la corrosion, la fréquence des cycles de contrainte devra être prise en considération. L'importance de ces paramètres dépend du cas particulier de sollicitations de fatigue considéré. Il existe, par exemple, certaines situations de fatigue où les contraintes moyennes appliquées et les contraintes résiduelles n'ont pas d'influence. Dans d'autres cas, par exemple lorsque les contraintes moyennes appliquées sont des contraintes de compression, les contraintes résiduelles peuvent influencer la durée de vie d'un facteur supérieur à dix.

2.2 *Géométrie*

La géométrie de la structure est déterminante quant au lieu et au moment de la rupture par fatigue. L'influence de la géométrie se manifeste sur trois niveaux : la conception générale de la structure, les concentrations locales de contraintes et les petites discontinuités (fig. 3). Les deux premiers niveaux sont essentiellement le fruit du travail du projeteur, tandis que le dernier, les petites discontinuités, est généralement lié aux processus de fabrication et de contrôle.

La conception générale de la structure comprend le choix des éléments structurels, le dimensionnement de l'épaisseur des tôles, l'emplacement des ouvertures (comme les trous d'homme, par exemple) et l'orientation des éléments de la structure. Ces paramètres sont similaires à ceux qui sont régis par les méthodes classiques de la statique et de la résistance des matériaux. L'amplitude de contrainte se détermine à l'aide des caractéristiques géométriques de la structure et de ses sections.

Des concentrations locales de contraintes sont créées par certains détails de construction tels que les assemblages soudés, les trous pour les boulons ou les attaches. Ces détails amplifient l'effet des sollicitations appliquées, car ils sont un obstacle à une répartition uniforme des contraintes. Une simple attache pour fixer une échelle, soudée à un élément porteur, peut réduire la durée de vie de l'élément d'un facteur supérieur à dix. L'effet d'une concentration de contraintes est analogue à celui d'un rocher dans le lit d'une rivière. La présence de l'obstacle provoque autour du rocher un accroissement de la vitesse de l'eau, supérieure à la moyenne, tout comme un trou pour un boulon provoque des contraintes supérieures à celles qui existent dans une même tôle mais sans trou. Relevons cependant que les concentrations locales de contraintes peuvent être aussi bien dues à un apport qu'à une diminution de matière.

Des amplitudes de contrainte élevées, ainsi que des concentrations de contraintes sévères, entraînent une plastification locale du matériau, même si tout le reste de la structure se comporte de façon élastique. Il se forme donc des zones de déformation plastique cyclique. Dans le cas où la fissure de fatigue est de dimension plus petite que la zone plastique qui l'entoure, la fissure peut se développer beaucoup plus rapidement que si elle se trouvait entourée d'un matériau à l'état élastique. Dans ce cas une analyse fondée sur des critères de déformations spécifiques ou une approche énergétique du problème peut être mieux appropriée que les théories élastiques.

Parmi les petites discontinuités, il y a lieu de mentionner les cratères dus à la corrosion, les rayures de surface, les marques d'usinage ou de meulage, les fissures et les défauts dus à la soudure, tels que porosités, caniveaux, inclusions de laitier, manque de pénétration et de fusion. De petites discontinuités sont présentes dans presque toutes les structures porteuses. Leur présence délimite généralement l'endroit précis de la rupture par fatigue ; leurs dimensions et formes peuvent réduire la durée de vie à un degré tel qu'une rupture par fatigue est certaine au cours de la période d'exploitation de la structure. Souvent, de petites discontinuités se trouvent à des endroits de concentration de contraintes locales (fig. 3), là où la contrainte locale autour des discontinuités peut être supérieure à cinq fois la valeur de la contrainte moyenne appliquée.

2.3 *Propriété du matériau*

Parmi les propriétés importantes du matériau, il y a lieu de mentionner la composition chimique, la relation contrainte-déformation spécifique, la dimension du grain, l'homogénéité et les discontinuités microstructurales. L'acier et l'aluminium ne se comportent pas de la même manière sous des sollicitations de fatigue, car ils ont des propriétés physiques de matière très différentes. Même leur réseau cristallin est différent.

De nombreuses propriétés du matériau dépendent de la composition chimique. Lorsque cette dernière est similaire pour différents matériaux, plusieurs autres propriétés sont également similaires et, de ce fait, les différences dans le comportement à la fatigue peuvent être petites. C'est souvent le cas pour des aciers de construction de moyenne et basse résistance.

2.4 *Environnement*

Les effets dus à l'environnement sont par exemple donnés par la corrosion et le fluage. La fatigue sous corrosion ou fluage du métal est complexe et très mal connue. Heureusement, la combinaison d'une sollicitation de fatigue et d'un

environnement hostile est relativement rare. Si elle se présente, le problème ne peut être contourné que si une protection adéquate est possible. Il est donc nécessaire de poursuivre des recherches sur la résistance à la fatigue des éléments non protégés.

La liste des paramètres relatifs à la fatigue mentionnés ci-dessus n'est pas exhaustive. Même si la moitié des paramètres seulement interviennent dans un problème spécifique, un calcul précis de la durée de vie peut s'avérer difficile. Une indication de l'effet relatif des paramètres peut être obtenue par l'estimation de la part de la durée de vie dépendant de la formation et de la croissance d'une fissure de fatigue jusqu'à une longueur supérieure à environ 5 diamètres de grain (0,05 à 0,25 mm). En général, les propriétés du matériau et les effets de l'environnement influencent davantage les petites fissures que les grandes. Lorsque la durée de vie est essentiellement régie par la croissance de fissures de fatigue dont la dimension est supérieure à 5 diamètres de grain, le calcul à la fatigue devient moins compliqué. C'est souvent le cas des structures métalliques soudées; quelques approximations importantes sont présentées dans le chapitre suivant.

3. Fatigue de structures métalliques soudées

Dans de nombreuses structures modernes, il n'est pas possible d'éviter des assemblages soudés. Les avantages économiques d'un assemblage soudé par rapport à une construction rivetée sont connus depuis plus de quarante ans. Certaines industries (par exemple celles utilisant des réacteurs à haute pression) n'auraient même jamais existé sans assemblages soudés.

La présence d'une attache soudée dans une structure peut cependant introduire des complications pour le calcul à la fatigue. La figure 4 présente quelques-uns des plus importants facteurs supplémentaires auxquels il faut prêter attention. La quantité de chaleur apportée localement par le processus de soudage induit des contraintes résiduelles locales et une structure métallurgique complexe près de la zone de fusion de la soudure. Des discontinuités dans la soudure sont inévitables et une déformation des tôles, des défauts d'ajustage ou d'alignement sont difficiles à éviter. La géométrie de la soudure peut aussi entraîner des concentrations de contraintes très élevées. Il faut cependant noter que les effets de ces facteurs supplémentaires permettent quelques approximations bienvenues sans introduire des imprécisions excessives dans le calcul à la fatigue.

Des contraintes résiduelles de traction voisines de la limite élastique existent près des soudures et à l'endroit même où se trouvent les zones potentielles d'amorçage de fissures de fatigue. Les contraintes résiduelles doivent être ajoutées à la contrainte appliquée pour compléter l'analyse des contraintes. Il en résulte que chaque charge appliquée produit une amplitude de contraintes dont la valeur moyenne est élevée, sauf dans des cas où une déformation plastique permet une certaine relaxation. De ce fait, des sollicitations de compression peuvent même provoquer, près des soudures, à cause de la présence des contraintes résiduelles, une amplitude de contrainte en traction. En plus, un mauvais ajustage ou un mauvais alignement peuvent introduire des contraintes supplémentaires de traction. Ces contraintes supplémentaires au voisinage des soudures peuvent être si élevées que la durée de vie n'est pratiquement pas influencée par la valeur moyenne de la contrainte appliquée; seule l'amplitude des contraintes importe.

La présence de discontinuités dans la soudure simplifie dans une grande mesure l'analyse à la fatigue. Ces discontinuités peuvent être très aiguës, avec un rayon d'extrémité inférieur à cinq microns. La part de la durée de vie totale nécessaire à la formation d'une fissure de fatigue à partir de telles discontinuités est très faible. La durée de vie est alors presque entièrement donnée par la croissance de la fissure.

Des discontinuités critiques peuvent être beaucoup plus grandes que les grains aux sites d'amorçage des fissures. L'existence de ces discontinuités de surface réduit également l'importance d'un environnement moyennement corrosif, tel que l'air et la pluie. Elles diminuent aussi l'importance des propriétés du matériau et permettent de conclure que le type d'acier de construction ne joue pas un grand rôle pour la résistance à la fatigue.

Ainsi, l'état de contraintes existant près des sites de fissuration renforce l'hypothèse de la non-dépendance de la contrainte moyenne et du type d'acier. Cet état de contraintes est caractérisé par des concentrations de contraintes à gradients très élevés. Du fait de ces gradients, la dimension de la zone plastique, créée par la concentration de contraintes, se limite à de faibles valeurs. Pour certains assemblages soudés, l'étendue de la zone plastique cyclique a été estimée à moins de 0,1 mm pour une différence de contraintes de l'ordre de la contrainte de calcul statique admissible du matériau [2].

Une zone plastique très confinée a deux conséquences: premièrement, elle empêche la relaxation des importantes contraintes résiduelles de traction; deuxièmement, elle supprime (pour une grande plage de limites élastiques ou de types d'aciers) toute influence sur la dimension de la zone plastique cyclique, dimension qui détermine la vitesse de croissance des fissures. Ces deux conditions sont nécessaires pour qu'aussi bien le type d'acier que la contrainte moyenne ne jouent pas de rôles essentiels en ce qui concerne la durée de vie.

Des résultats d'essais sur des assemblages soudés ont permis de vérifier ces approximations. Un grand nombre d'essais effectués dans de nombreux pays a confirmé cette indépendance par rapport

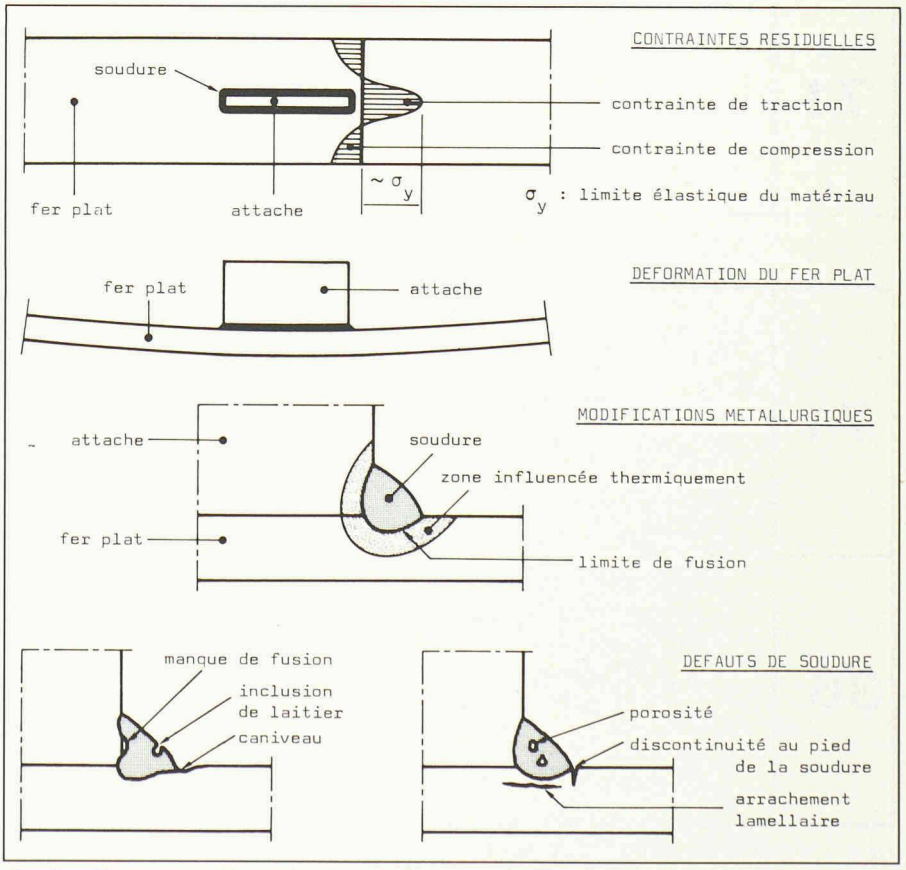


Fig. 4. — Facteurs supplémentaires à considérer pour des attaches soudées.

TABLE B2.1 : NON-WELDED DETAILS

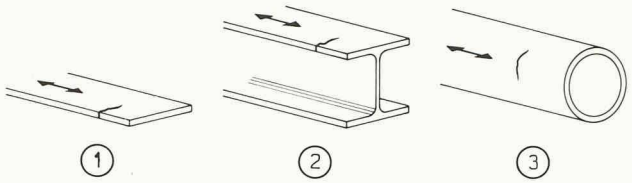
DETAIL CATEGORY	CONSTRUCTIONAL DETAILS	DESCRIPTION
160		Rolled and extruded products (1) Plates, flats. (2) Rolled sections. (3) Seamless tubes (see Appendix E). Requirements for details (1) to (3) : - Sharp edges, surface and rolling flaws to be improved by grinding.

TABLE B2.2 : WELDED BUILT-UP SECTIONS

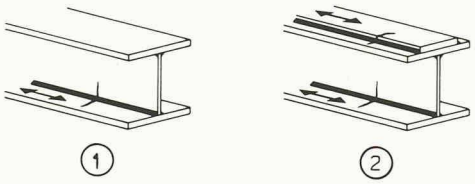
125		Continuous longitudinal welds (1) Automatic butt welds carried out from both sides. Category 140 may be used if the welds are shown to be free of detectable discontinuities, see Appendix B3. (2) Automatic fillet welds. Cover plate ends should be verified using Table B2.5, detail (5). Requirements for details (1) and (2) : - No stop-start positions.

TABLE B2.4 : WELDED ATTACHMENTS (non-load-carrying welds)

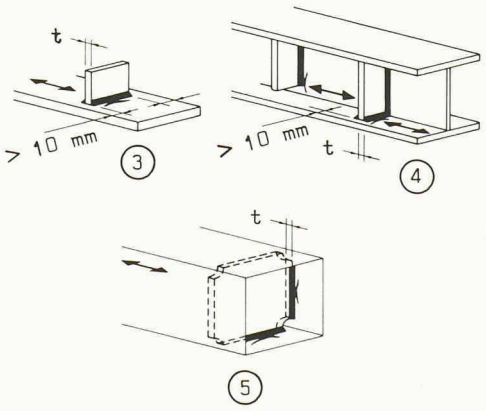
80	t ≤ 12 mm		Transverse attachments (3) The end of the weld more than 10 mm from the edge of the plate. (4) Vertical stiffeners welded to a beam or plate girder. The stress range should be calculated using principal stresses if the stiffener terminates in the web. (5) Diaphragms of box girders welded to the flange or web.
71	t > 12 mm		

TABLE B2.5 : WELDED CONNECTIONS (load-carrying welds)

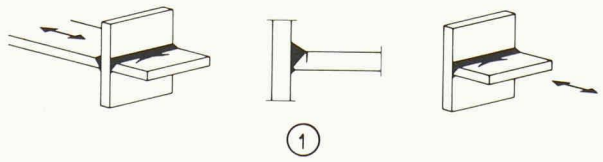
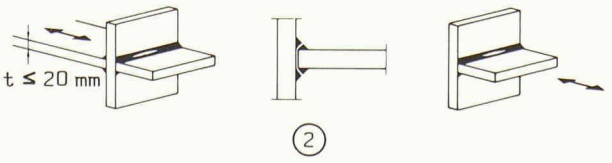
71		Cruciform joints (1) Full penetration weld. Inspected free of detectable discontinuities, see Appendix B3. (2) Fillet welded connection. Two fatigue assessments are required. Firstly, root cracking is evaluated by determining the stress range in the weld throat area, Category 36*. Secondly, toe cracking is evaluated by determining the stress range in the load-carrying plates, Category 71. Requirements for details (1) and (2) : - The maximum misalignment of the load-carrying plates should be less than 15 % of the thickness of the intermediate plate.
36		

Fig. 5. — Détails constructifs types répertoriés dans la Recommandation CECM [11] (cette référence n'existe actuellement qu'en langue anglaise).

à la contrainte moyenne et au type d'acier [1] [3] [4]. Des études récentes d'assemblages soudés donnent également un support théorique à ces approximations [1] [2] [5] [6].

4. Harmonisation des concepts de dimensionnement à la fatigue

Les normes, les codes et les recommandations pour le calcul à la fatigue des constructions métalliques soudées ont été simplifiés ces dernières années; ces modifications ont été les bienvenues chez les ingénieurs projeteurs qui, pour la plupart, sont peu au courant du comportement à la fatigue. Il a été possible de reprendre le concept de la différence de contraintes développé à l'origine par Wöhler, en Allemagne, avant 1870 [7]. Plusieurs codes nationaux ont suivi ce renouveau dès les années 1970, c'est-à- dire un siècle plus tard [4] [8] [9].

Le fait que la résistance à la fatigue ne dépend pas du type d'acier permet une approche plus générale que la simplification des codes nationaux. Les résultats de fatigue obtenus pour différents types d'acier, dans divers pays, peuvent être combinés en une source d'informations internationale, pour une formulation universelle de recommandations de fatigue. De telles recommandations présentent des avantages importants, en particulier pour des contrats internationaux. C'est dans cet esprit de rationalisation et d'harmonisation que l'AIPC a organisé à Lausanne, Suisse, en 1982, un Colloque international sur la «Fatigue des constructions en acier et en béton» [10].

Une des organisations intéressées à une harmonisation internationale, la Convention européenne de la construction métallique (CECM) a entrepris dès 1978 un travail sur de nouvelles recommandations de dimensionnement à la fatigue. L'objectif général de ces recommandations [11] est la préparation d'un concept général pour le dimensionnement de structures métalliques à la fatigue, telles que ponts, bâtiments et autres structures utilisant des détails constructifs similaires. Une information est donnée en particulier à propos de la résistance à la fatigue de détails constructifs, des charges de fatigue, de la sécurité, des contrôles en service et de l'entretien et, dernièrement, de nouveaux développements dans la fiabilité, la mécanique de rupture, des méthodes d'amélioration et de la méthode dite de la «contrainte au point chaud» (hot spot stress). Ces différents sujets sont abordés ci-après.

4.1 *Résistance à la fatigue de détails de construction*

Une partie importante de la plupart des recommandations est constituée par le chapitre traitant de la résistance à la fatigue de détails. Dans les Recommandations CECM, ces détails sont groupés en plusieurs tableaux dont la figure 5 donne un extrait de quelques détails types. La direction des contraintes est indiquée par des flèches et les sites de fissuration probables sont également montrés. Souvent, plusieurs éléments existent dans une structure et, par conséquent, il y a plus d'une catégorie de fatigue à considérer. Le calcul à la fatigue doit donc être effectué pour chaque cas. La catégorie de fatigue est définie par la résistance à la fatigue à $2 \cdot 10^6$ cycles, afin de s'aligner sur la pratique courante de nombreux pays.

Si la soudure doit transmettre des sollicitations d'un élément à l'autre, la durée de vie à la fatigue est plus faible. L'attache soudée du détail 3 (Table B 2.4) n'est pas soumise directement à la sollicitation. Une faible partie seulement de la contrainte passe par l'attache; il n'y a pas de sollicitation extérieure appliquée directement à l'attache. Par contre, les détails 1 et 2 (Table B 2.5) présentent un transfert direct de la sollicitation. Il apparaît clairement que la liaison avec cordons d'angle est à éviter lorsqu'un dimensionnement à la fatigue s'avère nécessaire. Ce genre de représentation graphique guide le projecteur vers les détails présentant une résistance élevée à la fatigue et facilite ainsi un bon raisonnement et une bonne conception du détail.

La figure 6 donne les courbes de résistance à la fatigue. Avec une échelle doublement logarithmique, la relation entre la différence de contraintes et le nombre de cycles de contraintes est donnée par des droites parallèles équidistantes de pente $-1/m$. Pour un nombre de cycles inférieur à $5 \cdot 10^6$, la pente constante m est de 3. Cette valeur est conservatrice pour les catégories de fatigue supérieures. La résistance à la fatigue est cependant rarement critique pour ces détails et la commodité du dimensionnement avec des pentes égales justifie cette approximation, en particulier pour les calculs du cumul des dommages.

La limite de fatigue sous amplitude constante est fixée à $5 \cdot 10^6$ cycles. La résistance à la fatigue correspondant à cette limite représente la différence de contraintes qui, pour une amplitude constante, conduit à une durée de vie infinie. En cas de contraintes d'amplitudes variables, la limite de fatigue peut se situer en deux points. Le premier correspond à la limite de fatigue sous amplitude constante; il n'est valable que si aucune différence de contraintes ne dépasse cette limite. Le second point, correspondant à la limite de fatigue conventionnelle («cut-off limit» en anglais), s'applique pour tous les autres cas; elle est fixée à 10^8 cycles pour tous les détails. Entre ces deux limites, la pente constante m a pour valeur 3 ou, en option, 5.

Certains détails ne se comportent pas exactement comme le décrit la figure 6. Une semelle avec un plat de renfort présente, par exemple, une limite de fatigue sous amplitude constante proche de 10^7 cycles. Afin d'éviter que de telles situations non conservatrices ne se produisent, quelques détails sont classés dans des catégories légèrement inférieures à celles requises eu égard à leur résistance à la fatigue à $2 \cdot 10^6$ cycles.

Il a été possible d'obtenir un accord international en fixant d'abord l'ensemble des droites de fatigue puis en leur appliquant ensuite seulement les types de détails. Cette procédure a permis d'abréger de longues discussions entre représentants de différents pays dont les codes nationaux ne différaient que de quelques pour-cent. Cela explique aussi le grand nombre de courbes; l'écartement des lignes n'a aucune signification en ce qui concerne le degré de précision. Dans la plupart des pays, on devrait se contenter

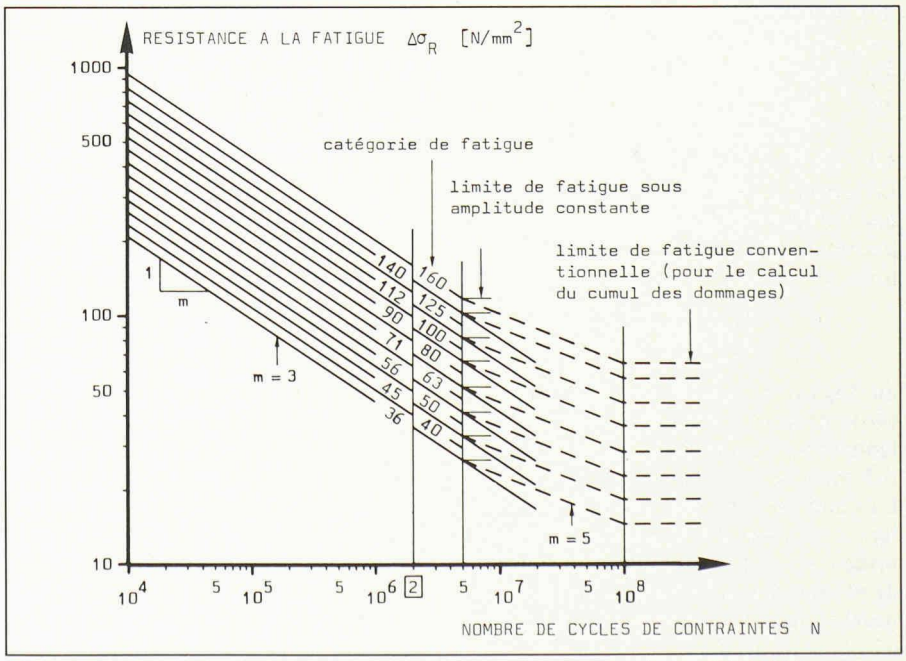


Fig. 6. — Courbes de résistance à la fatigue proposées par la recommandation CECM [11] correspondant à la valeur moyenne moins deux écarts types.

de travailler avec la moitié du nombre de ces lignes seulement.
Tous les paramètres importants, discutés dans les chapitres 2 et 3 de cet article, sont compris dans les trois paramètres: différence de contraintes, nombre de cycles et catégorie de détail constructif. La contrainte moyenne et le type d'acier n'ont pas besoin d'être considérés dans le calcul. Cependant, il faut tenir compte de quelques limites. Lorsque la différence de contraintes maximale dépasse 1,5 fois la limite élastique, la rupture de fatigue devient un problème qui est traité de façon plus précise par les concepts de la fatigue oligocyclique.
En outre, ces règles s'appliquent uniquement aux types d'acier ayant une limite élastique inférieure à 700 N/mm² pour une température maximale de 150 °C et des détails dont la protection contre la corrosion est adéquate. D'autres recherches seront nécessaires pour étudier des applications pratiques au-delà de ces limites.

4.2 *Charges de fatigue*

Les courbes de résistance à la fatigue sont destinées à être utilisées pour des charges réelles; elles ne devraient pas être ajustées pour tenir compte de charges fictives ou idéalisées. C'est pourquoi les courbes restent valables pour des applications spéciales (telles que les cheminées) pour autant qu'une estimation raisonnable des charges soit faite. Il faut noter que le nombre de cycles de contraintes résultant de la charge de fatigue dépend de l'élément pris en considération. Par exemple, des éléments courts supportant un tablier de pont peuvent subir un nombre de cycles de contraintes 100 fois plus grand que les poutres principales. Les variations dans l'amplitude des contraintes sont prises en compte par la méthode de comptage dite «rain-flow counting» [12] et par la règle de Miner [13]. Cela conduit à une différence de contraintes équivalente $\Delta\sigma_e$ comme indiqué schématiquement dans la figure 2 et décrite dans [14].

4.3 *Sécurité*

Le concept de sécurité à la fatigue implique l'utilisation d'une équation similaire à celle utilisée dans les concepts d'états limites:

$$\frac{\Delta\sigma_R}{\gamma_m} \geq \gamma_s \, \Delta\sigma_e,$$

où $\Delta\sigma_R$ est la résistance à la fatigue, $\Delta\sigma_e$ est la différence de contraintes équivalente et γ_m, γ_s sont des facteurs de sécurité partiels.
La valeur de $\Delta\sigma_R$ (obtenue à partir de la figure 6) comprend de façon implicite un niveau de sécurité. En effet, les courbes de résistance à la fatigue ne sont pas des courbes moyennes, mais correspondent à la valeur moyenne moins deux écarts types. Ainsi, au cas où les charges sont connues de façon précise et n'ont pas de distribution statistique, le calcul à la fatigue aura un degré de confiance statistique de 95% si les facteurs de sécurité γ_m et γ_s sont égaux à un. Cependant, le niveau réel d'incertitude dépend de l'information utilisée pour la charge. Des charges de fatigue exactes sans variation statistique représentent une approximation qui n'existe qu'en laboratoire.
Les facteurs de sécurité partiels permettent au projeteur de contrôler de façon plus précise le niveau réel de sécurité. Un indice de fiabilité peut également être introduit pour représenter numériquement le niveau général d'incertitude admis.

4.4 *Contrôle en service et entretien*

Contrairement à beaucoup d'autres états limites, la fiabilité d'un comportement satisfaisant de la structure sous charges de fatigue ne peut pas être absolument garantie lors de la construction. Un contrôle pendant l'utilisation est donc recommandé pour tous les détails qui ont été dimensionnés à la fatigue. Les assemblages qui provoqueraient la ruine de toute la structure sous l'effet de la fatigue ne sont pas recommandés, quels que soient les critères de contrôle. Même si la ruine générale est peu probable, les assemblages qui ne permettent pas un contrôle périodique – ou qu'avec de grandes difficultés – sont à éviter.
Il faut aussi souligner que des indications doivent être données pour la réparation de structures fissurées. Le soudage ne devrait pas être utilisé pour la réparation de fissures de fatigue, car la soudure de réparation pourrait introduire des fissures ou des défauts aussi graves que la fissure de fatigue elle-même; des plaques boulonnées représentent souvent la solution adéquate. La durée de vie restante doit alors être calculée avec les méthodes de la mécanique de rupture.

4.5 *Etat actuel des recommandations internationales*

Il est de première importance que l'Europe ne soit pas inondée par une multitude de normes et recommandations différentes, élaborées par divers groupes et organisations. La tâche des ingénieurs projeteurs, travaillant au pays ou à l'étranger, doit être simplifiée. Un moyen d'atteindre cet objectif est de se limiter à un seul jeu de règles.
Le projet des Recommandations de la CECM a reçu une approbation générale de la part de nombreux groupes nationaux et internationaux. En plus des pays représentés par des membres et des observateurs invités, une étroite coopération avec des comités internationaux a été maintenue. Il s'agit de l'Eurocode (EC3), de l'Institut international de la soudure (IIS) [15], de l'Organisation internationale de normalisation (ISO), de la Communauté européenne du charbon et de l'acier (CECA) et de l'Union internationale des chemins de fer (UIC).
Le travail se poursuit en vue d'une harmonisation avec d'autres groupes nationaux et internationaux, comprenant entre autres la Fédération européenne de la manutention (FEM) et le Comité international des cheminées industrielles (CICIND).

5. Nouveaux développements

La construction de structures inhabituelles et les changements de philosophie dans le dimensionnement ont conduit à plusieurs nouveaux développements dans la procédure de calcul de la fatigue au cours des vingt dernières années. Cette évolution est un défi permanent aux groupes intéressés à une harmonisation internationale. Parmi les sujets les plus importants, il faut mentionner la mécanique de la rupture, les méthodes dites «hot spot stress», les traitements d'amélioration, les concepts de sécurité, les charges de fatigue, la fatigue des structures en béton et l'évaluation des structures existantes.
Une analyse par *la mécanique de la rupture* offre une possibilité d'évaluer une structure fissurée. L'analyse a permis de trouver des explications utiles pour des ruptures fragiles dans les structures de bateaux et d'avions, il y a déjà plus de quarante ans. Au cours des vingt dernières années, les principes de la mécanique de la rupture ont été développés afin de décrire la propagation des fissures de fatigue. Ces concepts sont, par conséquent, utiles dans la détermination de l'importance des défauts de fabrication [16], de la durée des intervalles de contrôles [6], et de la durée de vie restante d'un élément fissuré [17]. L'analyse classique des structures, basée sur les méthodes de la résistance des matériaux, ne peut pas être utilisée pour ce type de problèmes. Les concepts de la mécanique de la rupture ne devraient être utilisés qu'en complément des méthodes de dimensionnement à la fatigue présentées dans les chapitres précédents, et ne devraient pas les remplacer. D'autres applications de ces concepts débouchent sur l'étude paramétrique de certains détails (effet de l'épaisseur des plaques, de la longueur d'attache, etc.) ou de détails non considérés dans les courbes de fatigue. Les précautions à prendre pour l'extrapolation à de grandes structures soudées et des directives relatives au domaine de validité de la mécanique de la rupture sont données dans la référence [11].
La méthode dite du «hot spot stress» présente un moyen d'analyse de structures compliquées, telles que cadres fabriqués à l'aide d'éléments tubulaires de grandes sections. Une analyse classique n'est en général pas suffisamment adaptée à de telles structures. La méthode dite du «hot spot stress» définit une concentration de contraintes géométriques, à l'endroit potentiel d'amorçage de la fissure,

fondée sur les contraintes s'exerçant à une certaine distance du point considéré. Ces contraintes éloignées sont extrapolées jusqu'au «point chaud» (hot spot), par exemple au pied de la soudure. Des techniques particulières, comme les éléments finis, la photoélasticité ou des essais sur modèle, doivent être utilisées pour déterminer la concentration de contraintes géométriques.

Lorsque la concentration de contraintes est connue, la différence de contraintes correspondante est calculée (elle n'existe pas en réalité au «hot spot»), et le projeteur se réfère à la courbe 90 de la figure 6. Ainsi, l'avantage d'une relation simple de la différence de contraintes est maintenu. De plus amples détails sont donnés dans [18] et les quelques précautions qui sont à prendre également indiquées dans [11] et [19].

Les *traitements d'amélioration* de certains détails constructifs permettent au projeteur de se baser sur une résistance à la fatigue supérieure. Ces méthodes ne sont à appliquer que lorsque des détails plus favorables, tels que ceux donnés dans la partie supérieure de la figure 5, ne peuvent être utilisés. D'autres applications comprennent l'amélioration de défauts de fabrication ou le renforcement de structures existantes.

La plupart des traitements d'amélioration modifient soit le degré de sévérité des discontinuités aux endroits potentiels de fissuration, soit la distribution des contraintes résiduelles, soit une combinaison des deux. Ces traitements d'amélioration typiquement utilisés à ce jour sont le recuit de détente, le meulage, le martelage ou le grenaillage. La durée de vie peut être augmentée par un facteur 10 avec l'emploi de méthodes appropriées, mais l'amélioration ne peut pas toujours être prédite quantitativement; elle dépend du type de détail, de la résistance de l'acier et des conditions de fabrication [20]. Il faut aussi relever que la valeur d'un traitement donné ne dépend pas seulement de sa capacité d'améliorer la durée de vie mais aussi de son coût, de ses possibilités de mise en œuvre et de sa facilité à permettre une assurance de qualité. En outre, la présence de charges provoquant des pointes de sollicitations élevées ainsi que la corrosion peuvent annuler l'amélioration escomptée. En général, des essais sont nécessaires afin de justifier le dimensionnement, et son emploi devrait être restreint à des applications spéciales jusqu'à ce qu'une meilleure information soit disponible.

Les *concepts de sécurité* modernes comprennent l'utilisation d'un indice de fiabilité β, lequel représente numériquement le niveau de certitude requis pour le calcul à la fatigue. Ainsi la définition d'un objectif de fiabilité pour une application donnée permet de définir un indice de fiabilité et par conséquent de déterminer les valeurs minimales des facteurs de sécurité partiels. Plusieurs formulations pour l'indice de fiabilité ont été proposées dans la littérature. L'équation la plus adéquate dépend de la relation existant entre la charge et la résistance, et du type de leur distribution statistique. La référence [21] donne un excellent résumé des variantes et la référence [11] présente une proposition simplifiée pour le dimensionnement de structures à la fatigue.

Théoriquement, l'emploi d 'un indice de fiabilité permet un dimensionnement consistant pour chaque détail de tous les éléments d'une structure. Cependant, les connaissances limitées concernant les charges de fatigue ne permettent l'utilisation de l'indice de fiabilité que dans un nombre restreint de problèmes de fatigue. Il est donc nécessaire d'intensifier la recherche qui se poursuit dans ce domaine [10].

La *charge de fatigue* est un sujet qui nécessite un effort important si l'on veut réaliser une harmonisation internationale.

Pratiquement, chaque pays utilise une approche différente. Les modèles de charges de fatigue simplifiés, qui se composent des charges de service utilisées pour le dimensionnement statique et des facteurs de réduction, présentent cependans des similarités remarquables entre plusieurs pays. Le succès de cette harmonisation aura pour conséquence une clarification importante dans ce sujet compliqué. Déjà, certains codes récents [8] [9] présentent des concepts de dimensionnement à la fatigue qui vont plus loin que la définition des courbes de résistance à la fatigue; des charges réalistes sont utilisées pour le calcul à la fatigue. Il faut noter qu'il peut en résulter un dimensionnement très conservateur lorsque les charges ultimes sont utilisées dans les calculs à la fatigue.

Des fissures de fatigue dans les *structures en béton* n'ont été identifiées et considérées comme importantes que récemment. Les structures en béton peuvent présenter des fissures de fatigue des armatures, des câbles de précontrainte et torons (particulièrement aux zones d'ancrage ou aux joints) et du béton lui-même. De plus, la résistance à la fatigue d'éléments à précontrainte partielle peut être bien inférieure à celle d'éléments totalement précontraints, soumis aux mêmes charges. Cela est tout particulièrement valable pour les éléments courts utilisant des matériaux à très haute résistance.

Dans le passé, les structures en béton n'ont pas subi de dommages dus à la fatigue, vraisemblablement du fait de l'utilisation de règles de dimensionnement statiques conservatrices. Cependant, les philosophies modernes de dimensionnement et un domaine d'applications plus large tendent à réduire le niveau de sécurité relatif aux nouvelles structures en béton [22]. A l'avenir, des problèmes de fatigue semblent inévitables avec le vieil-

Bibliographie

[1] Gurney, T. R.: *Fatigue of welded structures.* Cambridge University Press, Cambridge, U.K. (1979).

[2] Smith, I. F. C.: *Fatigue crack growth in a fillet welded joint.* PhD thesis, Cambridge University (1982).

[3] Hirt, M. A., Ben, T. Y. and Fisher, J. W.: *Fatigue strength of rolled and welded steel beams,* J. Struct. Div. ASCE 97 (1971), pp. 1897-1911.

[4] Fisher, J. W.: *Bridge fatigue guide.* American Institute of Steel Construction, New York (1977).

[5] Maddox, S. J.: *Fracture mechanics applied to fatigue of welded structures.* Welding Institute conference on fatigue of welded structures, Brighton (1970).

[6] Rolfe, S. T. and Barsom, J. M.: *Fracture and fatigue control in structures.* Prentice Hall, Englewood Cliffs, N. J. (1977).

[7] Wöhler, A.: *Über die Festigkeitsversuche mit Eisen und Stahl.* Z. Bauw. Jg XX, Berlin (1870).

[8] Norme SIA 161: *Constructions métalliques.* SIA, Zurich (1979).

[9] British standard BS 5400: *Steel, concrete and composite bridges,* Part 10: Code of practice for fatigue. BSI, London (1980).

[10] *Fatigue des structures en acier et en béton.* Rapport AIPC 37, AIPC, Zurich (1982).

[11] *Recommendations for the fatigue design of steel structures.* Convention européenne de la construction métallique, Bruxelles (1985).

[12] Matsuishi, M. and Endo, T.: *Fatigue of metals subject to varying stress.* Paper presented to the Japanese Society of Mechanical Engineers, Japan (March 1968).

[13] Miner, M. A.: *Cumulative damage in fatigue.* J. of Applied Mechanics 12 (1945), pp. 159-164.

[14] Hirt, M. A.: *Neue Erkenntnisse auf Gebiet der Ermüdung und deren Berücksichtigung bei der Bemessung von Eisenbahnbrücken.* Bauingenieur 52 (1977), pp. 255-262.

[15] *Design recommendations for cyclic loaded welded steel structures.* Welding in the World 20 (1982), pp. 153-165.

[16] *Guidance on some methods for the derivation of acceptance levels in fusion welded joints,* PD 6493. BSI, London (1980).

[17] Fisher, J. W.: *Fatigue and fracture in steel bridges.* John Wiley and Sons, New York (1984).

[18] Wardenier, J.: *Hollow section joints.* Delft University Press, The Netherlands (1982).

[19] *Offshore installations: Guidance on design and construction.* Department of Energy, HMSO, London (1984).

[20] Smith, I. F. C. and Hirt, M. A.: *A review of fatigue strength improvement methods.* The Canadian Journal of Civil Engineering 12 (1985), pp. 166-183.

[21] Thoft-Christensen, P. and Baker, M. J.: *Structural reliability theory and its applications.* Springer-Verlag, Berlin (1982).

[22] Thielen, G.: *Reflections on the presentation of fatigue in design codes.* Rapport AIPC 37, AIPC, Zurich (1982), pp. 25-27.

[23] Hirt, M. A.: *Remaining fatigue life of bridges.* Rapport AIPC 37, AIPC, Zurich (1982), pp. 113-129.

[24] *Entretien, réparation et modification des ponts.* Rapports AIPC 38 et 39, AIPC, Zurich (1982).

lissement de ces structures récentes; l'apparition très probable de ces difficultés a encouragé une activité plus intense de recherche. Plusieurs articles de la référence [10] ont contribué au développement des connaissances et à la compréhension du phénomène de fatigue dans les structures en béton.

Des méthodes permettant d'évaluer *la durée de vie restante des structures existantes* deviennent de plus en plus nécessaires car le nombre de structures en service au-delà de leur période d'exploitation prévue croît de façon exponentielle chaque année. Cette tendance correspond au boom de la construction des ponts, qui a débuté il y a plus de cent ans. Il n'existe que peu de structures qui doivent être remplacées lorsqu'elles atteignent leur durée de vie prévue, car celle-ci n'a jamais été définie de façon scientifique, et, dans beaucoup de cas, elle résulte de considérations politiques ou économiques. La plupart des structures sont capables de supporter des charges de fatigue bien au-delà de leur période d'exploitation retenue.

D'une façon générale, les charges antérieures, le comportement statique et dynamique actuel, l'influence des modifications de la structure depuis sa mise en service et les zones de fissures éventuelles sont mal connus. L'évaluation devrait commencer par des hypothèses simples et conservatrices pour se développer ensuite pas à pas vers une approche plus détaillée, jusqu'à ce qu'une décision acceptable puisse être prise concernant l'avenir de la structure [23]. Un récent symposium de l'AIPC à Washington, aux Etats-Unis, avait pour objet l'évaluation des structures de ponts [24].

6. Remarques finales

La rupture par fatigue dans des éléments de structures porteuses dépend d'un grand nombre de paramètres. Les effets d'une attache soudée sur la résistance à la fatigue d'un élément de structure peuvent cependant être évalués sans considération des paramètres de contrainte moyenne et du type d'acier. Ces caractéristiques, particulières aux structures métalliques, ont conduit de nombreux groupements internationaux à une formulation de règles de dimensionnement simplifiées. Les règles ainsi développées recouvrent l'ensemble du processus de dimensionnement, du choix des détails constructifs, de la détermination de la charge de fatigue et des conditions imposées pour la fabrication jusqu'au contrôle en service. Il est nécessaire de poursuivre les recherches et l'harmonisation pour les traitements d'amélioration, les procédures de la mécanique de la rupture, l'approche par la méthode du «hot spot stress», l'analyse de fiabilité, les charges de fatigue, les structures en béton et finalement les méthodes d'évaluation de la durée de vie restante des structures existantes.

Remerciements

Cet article est basé sur la recherche réalisée à l'ICOM-Construction métallique de l'Ecole polytechnique fédérale de Lausanne et sur l'activité du Comité technique 6 «Fatigue» de la Convention européenne de la construction métallique. Les auteurs remercient les membres et invités du Comité technique 6 pour leurs contributions au cours des six dernières années, ainsi que le Fonds national suisse de la recherche scientifique qui finance une grande partie de la recherche fondamentale à l'ICOM dans le domaine de la fatigue. Des remerciements vont également aux personnes qui ont aidé à une bonne mise en forme de cet article, en particulier M. Bez de l'ICOM et M. Steinhauer du département des matériaux de l'EPFL.

Adresse des auteurs:
Ian F. C. Smith
Dr ès sc. techn., ing. dipl. SIA
Manfred A. Hirt, professeur
Dr ès sc. techn., ing. dipl. EPFZ/SIA
ICOM – Construction métallique
Ecole polytechnique fédérale
de Lausanne
1015 Lausanne

Bibliographie

Etude de cas de fissurations dans des ponts métalliques

par *John W. Fischer.* – Un vol. A4 (21 × 29,7 cm), 272 pages avec de nombreuses illustrations, broché. Edité par ICOM – Construction métallique, EPFL, 1015 Lausanne, 1985. En vente chez l'éditeur; prix (y compris frais d'expédition): Fr. 50.– (Suisse), Fr. 100.–(étranger).

Cette version française de l'ouvrage du professeur Fisher[1] est due à l'initiative méritoire de son collègue Jean-Claude Badoux, qui dirige l'Institut de construction métallique de l'EPFL et a suscité cette traduction. Grâce à cet ouvrage, une somme considérable d'expérience et de connaissances acquises en Amérique du Nord dans le domaine du comportement des ponts métalliques est désormais aussi accessible aux ingénieurs peu familiarisés avec la langue anglaise.

La fatigue et la rupture de tels ouvrages sont loin de constituer des sujets purement académiques: l'ouvrage présente l'examen détaillé de vingt-deux cas de fissurations survenues tant sur des ponts-rails que sur des ponts-routes et dont certaines ont même conduit à des ruptures.

On sait combien est complexe, pour l'ingénieur non averti, l'approche du phénomène de la fatigue: il ne se laisse pas maîtriser avec la seule aide de l'analyse mathématique, du fait du grand nombre de paramètres concernés ainsi que de l'influence d'éléments qualitatifs tels que par exemple le dessin des éléments de structure.

De plus, on englobe sous le terme générique de fatigue des comportements fort divers et d'origine variée, ce qui ne contribue certes pas à la compréhension immédiate des phénomènes impliqués. Si l'approche par la pratique est peut-être la plus efficace, il faut saluer une démarche permettant de tirer parti sans frais de l'expérience des autres avant d'être confronté soi-même à de fort désagréables problèmes.

Le caractère de bombe à retardement présenté par la fatigue justifie une attention particulièrement aiguë au stade de la conception des ouvrages d'art. Les guides actuellement disponibles pour le projeteur, comme par exemple les recommandations de la Convention européenne de la construction métallique, sont certes utiles, mais l'étude de cas concrets les complète de façon particulièrement didactique. A cet égard, l'ouvrage de John Fisher présente une valeur didactique inestimable, par l'analyse détaillée, abondamment documentée par l'illustration, qu'il présente sous forme immédiatement accessible au praticien. L'analyse mathématique est limitée au minimum; traitée d'abord dans une brève introduction, elle donne pour chaque ouvrage examiné les valeurs numériques effectives. On ne saurait donc être plus concret!

Le lecteur familiarisé avec la fatigue des structures lira avec un plaisir véritable un ouvrage aussi clair et concluant. Pour autant, ce dernier saura aussi intéresser l'ingénieur de la pratique et lui permettra d'élargir ses connaissances dans un domaine dont on lui avait rarement facilité l'accès, il faut bien le reconnaître, et que l'utilisation toujours plus rationnelle des matériaux interdit d'ignorer. Ce livre a donc sa place attitrée dans la bibliothèque de l'ingénieur et du constructeur.

Jean-Pierre Weibel

[1] *Fatigue and Fracture in Steel Bridges,* John Wiley & Sons, Inc., éditeurs, 1984.

Pour une informatique consciente

par *Pierre-Gérard Fontolliet.* – Un vol. 16 × 24 cm, 270 pages, 10 illustrations, figures et tableaux. Editions Presses polytechniques romandes, 1015 Lausanne, 1985. Prix: Fr. 25.– (broché).

L'informatique influence non seulement notre activité professionnelle, mais aussi et toujours plus notre vie privée et familiale. Au-delà de sa fonction d'outil, incontestablement utile et puissant, elle implique un profond défi, voire une menace, à notre mode de vie et de pensée. La révolution informatique n'est-elle pas aussi culturelle? Nous en sommes à la fois les témoins et les acteurs, consciemment ou non. Cet ouvrage, qui rassemble les textes présentés lors d'un cours organisé par l'Université populaire de Lausanne, est une invitation à la réflexion individuelle et commune sur l'enjeu humain, socio-culturel et philosophique que représente le phénomène informatique. Il s'adresse à tous ceux qui se sentent concernés par cette évolution et n'exige aucune connaissance préalable ni en informatique, ni en sciences humaines.

Comme personne ne saurait prétendre à une compréhension globale de tous les impacts de l'informatique, plusieurs personnalités apportent leur éclairage particulier sur le sujet, en guise d'introduction à une approche interdisciplinaire aussi large et ouverte que possible.

CAD/CAM Handbook

par *Eric Teicholz.* – Un vol. relié 22,5×28,5 cm, 432 pages avec 240 illustrations, Editions McGraw-Hill Book Company, New York, 1985. Prix: 174 francs.

La conception assistée par ordinateur (CAO, en anglais CAD = Computer-aided Design) et la production assistée par ordinateur (CAM = Computer-aided Manufacturing), que l'on peut regrouper sous le terme d'informatique graphique, connaissent actuellement un développement