

FATIGUE DE L'ACIER ET DÉTAILS CONSTRUCTIFS

Mladen LUKIC, Bruno CHABROLIN

Centre Technique Industriel de la Construction Métallique (CTICM)

1. INTRODUCTION – HISTORIQUE

Cela fait à peu près 20 ans que la CECM (Convention Européenne de la Construction Métallique, Comité technique TC6 – Fatigue) a publié ses « Recommandations pour la vérification à la fatigue des structures en acier » [12].

Elles ont largement inspiré la rédaction du chapitre « Fatigue » de l'ENV 1993-1-1 [7]. Ces deux textes comportaient une grille détaillée de classification de la résistance à la fatigue des détails constructifs.

La méthodologie est basée sur une approche de type PALMGREN-MINER n'utilisant que les variations de contrainte, du fait des contraintes résiduelles supposées omniprésentes dans les charpentes soudées.

Cependant, l'application aux ouvrages d'art montrait dans les années 1990 qu'il était utile d'apporter un certain nombre de précisions. C'est ce que fit le guide SETRA-CTICM-SNCF (« Ponts métalliques et mixtes – Résistance à la fatigue – Guide de conception et de justifications ») [10] :

- précisions sur certaines dispositions constructives ;
- chargement de fatigue français et lien avec l'ENV 1991-3 [6] ;
- coefficients de sécurité ;
- introduction des techniques de parachèvement des soudures ;
- spécificités des ponts-route et des ponts-rail.

Aujourd'hui, la norme EN 1993-1-9 [3] actualise l'ENV 1993-1-1

- par la prise en compte de détails plus nombreux dans la grille de classification, ce qui la rend opérationnelle pour des ouvrages variés (ponts, pylônes, cheminées, chemins de roulement, etc.) ;
- par la précision de l'utilisation des contraintes « au point chaud » également ;
- par un traitement revu de l'effet d'épaisseur, plus réaliste et moins défavorable, désormais souvent explicitement intégré à la classification ;
- et par un lien logique entre dimensionnement en fatigue et stratégie d'inspection des ouvrages (en relation avec le risque de rupture fragile, traitée dans l'EN 1993-1-10 [2]).

Cette actualisation résulte du retour d'expérience de l'ENV, pour tous les types d'ouvrages, ainsi que de l'examen attentif des travaux de l'IIW/IIS (Institut International de la Soudure).

On peut citer ici les « Recommandations pour la conception en fatigue des assemblages et des composants soudés » [11]. Les justifications de l'EN 1993-1-9 sont présentées dans un document de référence (background document) [14].

Il faut également citer dans l'EN 1993-2 [4] une annexe portant sur les dispositions constructives dans les dalles orthotropes, dans la mesure où le respect de ces dispositions évite la justification de la résistance à la fatigue sous l'effet des actions locales, et assure une conception adéquate vis-à-vis de la fatigue sous l'effet de la flexion générale.

Les principes utilisés sont basés sur l'emploi combiné de quatre concepts que sont :

- les cycles et étendues de contrainte ;
- les courbes de résistance à la fatigue ;
- la classification des assemblages ;
- l'endommagement par fatigue.

2. FACTEURS INFLUENTS

Dans le cas d'éléments de structure réels, il existe de très nombreux facteurs qui peuvent avoir une influence notable sur la durée de vie en fatigue. Le recensement de ces facteurs [1], groupés en un certain nombre de paramètres principaux, traduit d'une part la complexité des phénomènes de fatigue et, d'autre part la difficulté qu'il y a de connaître, pour chacun de ces facteurs, son importance sur l'endurance à la fatigue.

- **Les sollicitations :**
 - Etendue de contrainte ou de déformation
 - Séquence d'application des contraintes
 - Fréquence
 - Contrainte moyenne
 - Contraintes résiduelles
 - Etc.
- **Les propriétés des matériaux :**
 - Comportement contrainte-déformation du matériau
 - Dimension et forme du grain cristallin
 - Dureté
 - Composition chimique
 - Homogénéité micro-structurale (dislocations, impuretés, inclusions intergranulaires, etc.)
 - Etc.
- **La géométrie :**
 - Géométrie globale de l'élément de structure
 - Concentration de contrainte locale
 - Petites discontinuités visibles à l'œil nu (marques de fabrication, stries de meulage, piqûres de surface, défauts de soudage)
 - Effet d'échelle
 - Etc.
- **L'environnement :**
 - Corrosion
 - Température
 - Humidité
 - Fragilisation par hydrogène
 - Radiations
 - Etc.

Il est largement admis maintenant et par simplification que les facteurs les plus importants pouvant être retenus pour les justifications des détails de structure, sont :

- les nombres de cycles (N) ;
- les étendues de contrainte ($\Delta\sigma$ et $\Delta\tau$) ;
- la géométrie et l'exécution des détails.

En ce qui concerne l'EN 1993-1-9 [3] – à part les trois facteurs ci-dessus, pris en compte explicitement – sont aussi considérés, implicitement :

- Les imperfections géométriques et structurelles résultant de l'élaboration des matériaux et de l'exécution ;
- Toutes les nuances d'acier de structure, les aciers inoxydables et les aciers à résistance améliorée à la corrosion non protégés (sauf indication contraire dans les tableaux de catégories de détails) ;

- Les conditions atmosphériques normales, structures suffisamment protégées contre la corrosion et régulièrement entretenues ;
- Les matériaux conformes aux exigences de ténacité de l'EN 1993-1-10 [2] uniquement.

Par contre, ne sont pas considérés :

- Les traitements par parachèvement après soudage destinés à améliorer la résistance à la fatigue, excepté le détensionnement ;
- L'effet de la corrosion par l'eau de mer ;
- L'endommagement de la microstructure à haute température ($> 150\text{ }^{\circ}\text{C}$).

3. DES RÈGLES CALBRÉES EXPÉRIMENTALEMENT

3.1. Essais

Les règles sont fondées sur des résultats d'essais à la fatigue. Le détail de structure est soumis à des cycles d'étendues de contrainte $\Delta\sigma$ et $\Delta\tau$ d'amplitude constante. Il se ruine après un nombre N de cycles. Lorsque l'essai de fatigue porte sur une petite éprouvette, le nombre de cycles à la ruine s'identifie précisément par la rupture de celle-ci. Pour l'essai de fatigue sur grande éprouvette ou sur un élément de structure reproduisant les imperfections géométriques et structurelles résultant de l'élaboration des matériaux et de l'exécution, le nombre de cycles à la ruine est déterminé, selon les expérimentateurs, par référence :

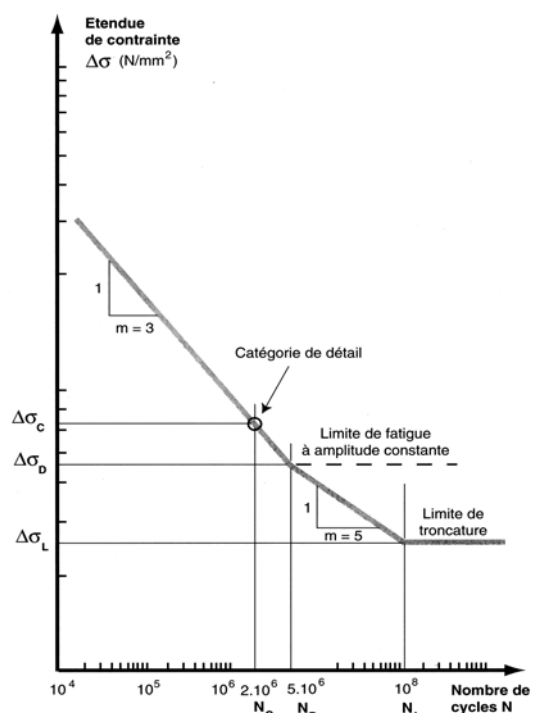
- Au début du stade de propagation lente de la fissuration, identifié soit par une fissure visible à l'œil nu, soit par l'accroissement significatif d'une déformation locale indiquée par une jauge de déformation située à proximité de la zone d'amorçage de la fissure ;
- A l'apparition d'une fissure traversante (progression d'une fissure de fatigue au travers d'une épaisseur et débouchante sur la surface) ;
- A l'atteinte d'un niveau de déformation de l'éprouvette incompatible avec la poursuite de l'application de la charge de fatigue ;
- Et plus rarement pour une grande éprouvette, à la rupture de celle-ci.

3.2. Bases de données

La géométrie et l'exécution des détails sont caractérisées par la notion de **catégorie de détail**. Chaque détail constructif est désigné par un nombre qui représente, en MPa, la valeur de référence $\Delta\sigma_c$ ou $\Delta\tau_c$ pour la résistance à la fatigue à 2 millions de cycles.

Différents essais permettent de tracer des courbes $\Delta\sigma$ et $\Delta\tau$ en fonction de N . Les essais montrent que la forme de ces courbes est toujours la même. Compte tenu de la dispersion des résultats de tels essais, on considère une courbe correspondant à une probabilité de non ruine de 95 %. Elles sont appelées courbes $\Delta\sigma$ - N et $\Delta\tau$ - N – ou courbes S- N , ou courbes de WÖHLER – et sont données en échelle bi-logarithmique (Figure 1).

Figure 1 – Courbe S- N ➤



Les courbes étant fondées sur les études expérimentales représentatives, par conséquent, elles englobent les effets [1] :

- des concentrations locales de contraintes dues à la géométrie du cordon de soudure,
- de la dimension et de la forme des discontinuités acceptables,
- de la direction de la contrainte,
- des contraintes résiduelles,
- des conditions métallurgiques,
- dans certains cas, des opérations de soudage et des procédés d'amélioration consécutifs.

La résistance à la fatigue pour les contraintes nominales est représentée par une série de courbes (Figure 2 et Figure 3), correspondant à des catégories de détails constructifs typiques [3].

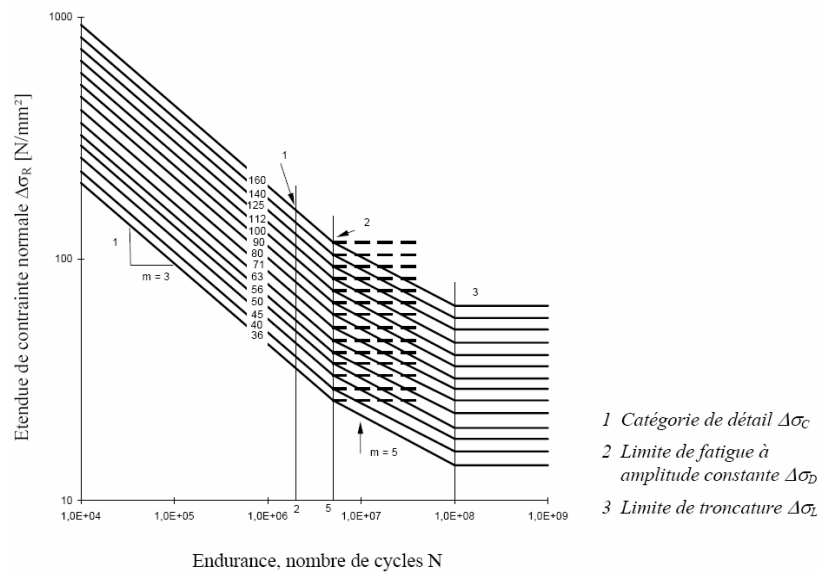


Figure 2 – Grille de courbes S-N pour les contraintes normales

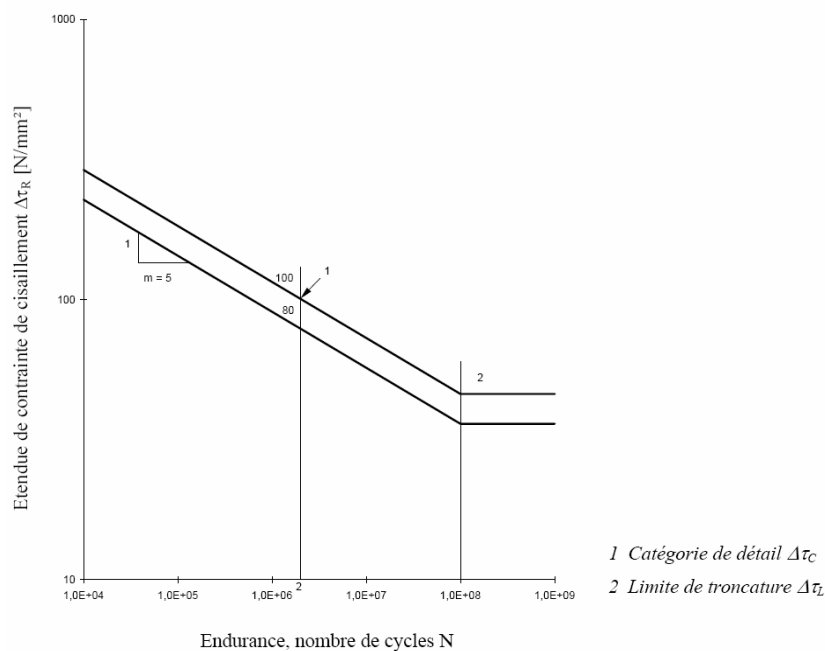


Figure 3 – Grille de courbes S-N pour les contraintes de cisaillement

3.3. Exploitation statistique

En fatigue, les résultats expérimentaux sont dispersés, l'étendue de la dispersion tend à être plus importante à bas niveau de contrainte / propagation lente de la fissure. Pour une évaluation statistique, une loi de distribution lognormale est le plus souvent considérée.

L'équation d'une courbe S-N peut être écrite de la façon suivante :

$$\log N_i = \log a + m \log \Delta \sigma_i \quad \text{ou} \quad N_i = a \Delta \sigma_i^m$$

Les résultats d'essais sont traités pour déterminer des **valeurs caractéristiques**. Celles-ci sont des valeurs avec une probabilité de 95 % de non rupture et un intervalle de confiance de 75 % pour cette détermination. Elles sont calculées à l'aide de la procédure suivante :

- Régression linéaire :
 - Calculer log de toutes les valeurs : étendue de contrainte $\Delta \sigma$ ou $\Delta \tau$ et le nombre de cycles à la ruine N ;
 - Calculer les exposants m et la constante $\log a$ par régression linéaire en prenant l'étendue de contrainte comme variable indépendante ;
 - Calculer la moyenne et l'écart type en utilisant la valeur de m obtenue ci-dessus ;
- Evaluation de la valeur caractéristique de la résistance à 2 millions de cycles.

Pour plus de détails sur le traitement des résultats d'essais, cf. [14].

4. UNE APPROCHE EXPLICITE DE LA ROBUSTESSE

4.1. Concepts de sécurité

Aux différents types d'utilisation en service correspondent différentes stratégies de conception. La stratégie de conception en fatigue adoptée est définie essentiellement par référence à la méthode d'analyse en fatigue, d'inspection et de surveillance en service, qui peuvent être mises en œuvre.

Les stratégies proposées par les **recommandations de l'IIW** [11] sont les suivantes :

- Conception pour une durée de vie infinie, où tous les chargements cycliques sont maintenus en dessous de la limite de fatigue ou du seuil de propagation. Aucune surveillance régulière en service n'est spécifiée ;
- Conception pour une durée de vie sécuritaire, basée sur l'hypothèse qu'initialement un joint soudé peut être considéré sans défaut. Aucune surveillance régulière en service n'est spécifiée ;
- Conception pour une rupture sécuritaire, basée sur la conception de la structure hyperstatique ou redondante. Aucune surveillance régulière en service n'est spécifiée ;
- Conception avec tolérance au dommage, basée sur l'hypothèse qu'il existe des fissures dont la taille correspond au seuil de détection de la méthode de contrôle non destructif utilisée. La durée de vie jusqu'à la rupture est calculée par la mécanique de la rupture. C'est à partir du nombre de cycles à rupture que l'on détermine les intervalles entre les contrôles successifs.

Par contre, selon **l'EN 1993-1-9** [3], la justification à la fatigue est conduite en utilisant l'une des deux méthodes seulement :

- La méthode de la tolérance de l'endommagement, ou
- La méthode de la durée de vie sûre.

Il convient d'appliquer la **méthode de la tolérance de l'endommagement** pour obtenir, avec une fiabilité acceptable, un comportement satisfaisant de la structure, à condition de mettre en œuvre pendant la durée de vie une procédure précise d'inspection et de maintenance pour détecter et remédier à l'endommagement par fatigue.

L'endommagement pris pour hypothèse est le quart de l'endommagement total déterminé conformément à l'EN 1993-1-9. Cette approche permet l'évaluation du nombre minimal de « périodes sûres » entre les inspections en service. Le nombre exigé n d'inspections en service est lié aux facteurs partiels γ_{Ff} et γ_{Mf} appliqués au dimensionnement à la fatigue, selon l'expression suivante [2] :

$$n = \frac{4}{(\gamma_{Ff}\gamma_{Mf})^m} - 1$$

où $m = 5$ s'applique pour les structures à longue durée de vie telles que les ponts.

La « période sûre » entre inspections en service peut également couvrir la totalité de la durée de vie de calcul.

Il convient d'appliquer la **méthode de la durée de vie sûre** pour obtenir, avec une fiabilité acceptable, un comportement satisfaisant de la structure sans compter sur la détection d'un endommagement par inspection régulière en service. Il convient d'employer la méthode de la durée de vie sûre lorsque la formation d'une fissure dans un élément pourrait conduire rapidement à la ruine de cet élément ou de la structure.

La **fiabilité requise** peut être obtenue comme suit :

a) **méthode de la tolérance de l'endommagement**

- choix de détails, matériaux et niveaux de contrainte conduisant, dans l'éventualité de l'apparition d'une fissure, à une vitesse de propagation faible et à une taille critique de fissure élevée ;
- présence de chemins alternatifs de transfert des charges ;
- mise en oeuvre de dispositifs d'arrêt de fissure ;
- choix de détails aisément inspectables durant les inspections périodiques.

b) **méthode de la durée de vie sûre**

- choix de détails et niveaux de contrainte conduisant à une durée de vie suffisante pour l'obtention d'un indice β égal à l'issue de la durée de vie à la valeur considérée aux états limites ultimes.

4.2. Risque de rupture

Un élément de structure doit être conçu en fonction d'une probabilité de survie adéquate. La probabilité de survie exigée dépend des paramètres suivants :

- Incertitudes et dispersion des données de fatigue utilisées pour l'évaluation ;
- Stratégie de sécurité adoptée ;
- Conséquences d'une rupture.

Le degré requis de sécurité est obtenu par l'application des coefficients partiels (de sécurité) adéquats.

Les incertitudes sur les données de fatigue utilisées pour l'évaluation peuvent être relatives aux chargements cycliques eux-mêmes. Ces incertitudes sont prises en compte en affectant les charges cycliques d'un coefficient de sécurité approprié, γ_F .

Les incertitudes peuvent aussi provenir du calcul de la résistance à la fatigue ou de l'endommagement, par exemple :

- De par la dispersion des données de résistance à la fatigue,
- De par la dispersion des résultats de validation des calculs d'endommagement.

Les données doivent être modifiées par l'application d'un coefficient de sécurité, γ_M . Dans le calcul de vérification à la fatigue, la résistance associée à la catégorie de détail doit donc être divisée par le coefficient de sécurité, γ_{Mf} .

4.3. Coefficients de sécurité

Le coefficient de sécurité qu'il faut appliquer dépend largement de critères comme :

- La stratégie de conception en fatigue adoptée ;
- Les conséquences d'une rupture ;
- L'expérience pratique dans le domaine d'application considéré.

4.3.1. Coefficient partiel de sécurité pour le chargement de fatigue, γ_{Ff}

Ce coefficient est précisé aux différentes parties des Eurocodes (Tableau 1).

Tableau 1 – Exemple de coefficients partiels de sécurité γ_{Ff}

Eurocode	γ_{Ff}
EN 1993-2 (ponts)	1,00
EN 1993-6 (chemins de roulement)	1,00
EN 1993-7 (tours, mâts et cheminées)	1,10 – 1,40

4.3.2. Coefficient partiel de sécurité pour la résistance à la fatigue, γ_{Mf}

Selon l'**ENV 1993-1-1** [7], ce coefficient dépend de la facilité d'accès pour l'inspection ou la réparation, et des conséquences d'une ruine éventuelle. En ce qui concerne ces conséquences de la ruine, deux cas peuvent se présenter (Tableau 2) :

- Eléments « redondants », c'est-à-dire que la ruine locale d'un élément constitutif n'a pas pour conséquence la ruine de la structure ;
- Eléments « non redondants », c'est-à-dire que la ruine locale d'un élément constitutif conduit rapidement à la ruine de la structure.

Tableau 2 – Coefficients partiels de sécurité γ_{Mf} d'après l'ENV

γ_{Mf}	Eléments redondants	Eléments non redondants
Assemblages accessibles	1,00	1,20
Accessibilité réduite	1,10	1,25

Toutes les valeurs pour γ_{Mf} exposés ci-dessus sont calculées en prenant $\gamma_{Ff} = 1,00$.

Pour en donner un exemple, dans le choix des coefficients partiels de sécurité γ_{Mf} , on considérera que, pour un pont bi-poutre :

- les poutres principales sont des éléments « non redondants » ;
- les cadres transversaux sur appui sont des éléments « non redondants ».

Les **recommandations de l'IIW** [11] proposent – à titre d'exemple – d'autres valeurs (Tableau 3).

Tableau 3 – Coefficients partiels de sécurité γ_{Mf} d'après l'IIW

Stratégie de conception	Conséquence d'une rupture : Pertes		
	Eléments de structure secondaires	Structure entière	Vies humaines
Rupture sécuritaire ou Tolérance au dommage	1,00	1,15	1,30
Durée de vie infinie ou Durée de vie sécuritaire	1,15	1,30	1,40

Enfin, en ce qui concerne l'**EN 1993-1-9** [3], l'Annexe Nationale peut fixer le choix de la méthode d'évaluation, la définition des classes de conséquences et les valeurs numériques de γ_{Mf} . Les valeurs de γ_{Mf} recommandées sont néanmoins données (Tableau 4).

Tableau 4 – Coefficients partiels de sécurité γ_{Mf} d'après l'EN

Méthode d'évaluation	Conséquence de la ruine	
	Peu importantes	Importantes
Tolérance de l'endommagement	1,00	1,15
Durée de vie sûre	1,15	1,35

5. UNE CLASSIFICATION MAITRISÉE

5.1. Tableaux actuels de détails

L'EN 1993-1-9 [3] prévoit une classification des détails réels rencontrés dans les constructions avec, pour certains, la prise en compte de leurs conditions d'exécution, pour établir la correspondance avec les catégories de détail des courbes de résistance à la fatigue et faciliter ainsi leur utilisation.

Les méthodes d'évaluation présentées dans ces règles font appel à des courbes de résistance à la fatigue pour

- des détails standards, en termes de contrainte nominale
- des configurations de base de soudures, en termes de contrainte géométrique.

Les règles de l'EN 1993-1-9 comportent dix tableaux indiquant les catégories de détail ($\Delta\sigma_c$ et $\Delta\tau_c$) pour les **contraintes nominales** et pour les détails constructifs courants :

- Tableau 8.1 pour les éléments non soudés et les assemblages avec fixations mécaniques ;
- Tableau 8.2 pour les sections reconstituées soudées ;
- Tableau 8.3 pour les soudures transversales bout à bout ;
- Tableau 8.4 pour les attaches et raidisseurs soudés ;
- Tableau 8.5 pour les joints soudés transmettant des efforts ;
- Tableau 8.6 pour les sections creuses ;
- Tableau 8.7 pour les noeuds de poutres à treillis ;
- Tableau 8.8 pour les dalles orthotropes – raidisseurs en auget ;
- Tableau 8.9 pour les dalles orthotropes – raidisseurs ouverts ;
- Tableau 8.10 pour les liaisons âme-semelle supérieure dans les poutres de roulement.

La Figure 4 ci-après donne la présentation des tableaux mentionnés ci-dessus.

En ce qui concerne les **contraintes géométriques**, l'Annexe B de l'EN 1993-1-9 donne quelques spécifications pour leur utilisation.

5.2. Quelques remarques concernant les détails constructifs conventionnels

Bien entendu, cette classification n'est pas encore parfaite, et devra encore être précisée ou complétée à l'avenir. Son application sera également plus précise lorsqu'on disposera d'une norme d'exécution donnant explicitement les niveaux de qualité requis pour les soudures soumises à la fatigue. Telle qu'elle est, la classification constitue un outil efficace mis à la disposition des concepteurs et des calculateurs.

A titre d'exemple, un recueil des principaux types de détails – rencontrés dans les ponts – est présenté sur la Figure 5 ci-après, avec les catégories de détail correspondantes selon l'EN 1993-1-9 (l'effet d'épaisseur étant traité au § 6).

Pour les détails 1 – 5 en acier à résistance améliorée à la corrosion, utiliser les catégories immédiatement inférieures.

Toutes les catégories de

(80)
a
(40)
Soudure à pleine pénétration de classe 1 ($\Delta\alpha$ dans l'élément attaché) ou
(36)
Soudure à pénétration partielle ou cordon d'angle ($\Delta\alpha$ dans le cordon)

(56)

$r > 150 \text{ mm}$
ou
(71)
 $w/3 > r > w/6$
ou
(50)
 $r < w/6$

(80) • $e < 0,2 b$
• pente $< 1/4$
ou
(90) • $e < 0,1 b$
• pente $< 1/4$
ou
(112) • cordon meulé
• pente $< 1/4$

(125)

(50)¹

(90)

(125)

(71)

$\ell \leq 50 \text{ mm}$ (80)
ou
 $50 < \ell \leq 80 \text{ mm}$ (71)
ou
 $80 < \ell \leq 100 \text{ mm}$ (63)
ou
 $\ell > 100 \text{ mm}$ (55)

¹ Note = catégorie de détail 50 avec limite de troncature calculée avec une courbe de résistance de pente unique -1/3.

9

5.2.1. Catégorie de détail la plus élevée

La **catégorie de détail 160**, la plus élevée qui existe, est atteinte par les produits provenant directement du laminage. Et dès qu'il y a oxydage, la catégorie de détail descend à 140 ou 125 suivant l'**état de surface** des bords. Ces valeurs représentent les limites supérieures de toutes les catégories de détail, presque jamais atteintes en pratique dans les ponts du fait de la présence des assemblages soudés.

5.2.2. Assemblage de l'âme avec une semelle

L'assemblage de l'**âme** d'une poutre **avec** une **semelle** par deux soudures longitudinales en cordons d'angle présente la plus élevée catégorie de détail de 125. Cette dernière nécessite que les cordons de soudure soient exécutés des deux côtés par soudure automatique sans arrêt ni reprise.

La conséquence de la présence d'une découpe semi-circulaire contournée par les cordons de soudure abaisse la catégorie de détail à 71. Ce « **trou de souris** », qui est une des dispositions classiques pour la soudure sur chantier de deux tronçons de poutres principales, présente une assez faible résistance à la fatigue, en raison de l'arrêt du cordon de soudure longitudinal âme-semelle.

5.2.3. Soudures bout à bout

Les soudures bout à bout sont de cordons transversaux à pleine pénétration permettant de rabouter, par exemple, **deux tronçons d'âme** ou **deux tronçons de semelle**. La catégorie de détail la plus élevée, 112, nécessite un meulage des cordons. Il peut être inutile d'imposer ce meulage si la catégorie de détail suivante, 90, est encore surabondante en raison de la présence éventuelle des autres assemblages qui présentent souvent une résistance à la fatigue inférieure.

Une **variation d'épaisseur ou de largeur** de tôle, avec la pente de raccordement classique à 1/4, n'entraîne aucune pénalisation supplémentaire pour tous ces assemblages. Sinon, il faut tenir compte des contraintes de flexion secondaires qui peuvent être importantes. La vérification à la fatigue se fera en majorant l'étendue de contrainte de calcul par un coefficient k donné par la relation :

$$k = 1 / \left(1 + \frac{6e}{t_1} \cdot \frac{t_1^{1.5}}{t_1^{1.5} + t_2^{1.5}} \right),$$

avec t_2 épaisseur de la semelle épaisse et t_1 épaisseur de la semelle mince. S'agissant de cordons de soudure transversaux, les catégories de détail doivent être pondérées par $(25/t_1)^{0.2}$ pour la prise en compte de l'effet de l'épaisseur, lorsque l'épaisseur t_1 dépasse 25 mm.

5.2.4. Assemblages courants ne transmettant pas d'effort

Les assemblages des **raidisseurs**, des **pièces de pont**, des **connecteurs**, sur l'âme ou les semelles des poutres entrent dans ce groupe. La classification est relative aux variations de contrainte dans la poutre (et non dans l'assemblage). Cette classification dépend de la discontinuité géométrique apportée par l'assemblage, qui crée une concentration de contrainte. Le niveau obtenu n'est jamais très bon avec les dispositions constructives usuelles ; ce sont donc ces assemblages, inévitables, qui vont limiter la résistance à la fatigue des poutres.

Les **attaches longitudinales** sont les plus nocives, et elles le sont d'autant plus que leur dimension l dans le sens longitudinal est plus importante : on descend à la catégorie de détail 56 pour $l > 100$ mm. Cette catégorie de détail sera celle des semelles de poutres au droit des appuis, du fait du soudage aux semelles des montants d'appui. Mais cette catégorie de détail n'est pas à pondérer par le facteur $(25/t)^{0.2}$. Les **attaches transversales** sont nettement moins pénalisantes, puisqu'elles sont en classe 90 (à pondérer par le facteur $(25/t)^{0.2}$). Un espace minimal de 10 mm doit être réservé entre le bord du cordon d'attache et le bord de la tôle support.

Les assemblages, tels que ceux d'une semelle supérieure de **pièce de pont** avec une semelle supérieure de poutre, entrent aussi dans ce classement. Disposé suivant la pratique courante, c'est à dire sans raccordement particulier, cet assemblage crée une forte discontinuité géométrique, pénalisée par la catégorie de détail 56 pour la semelle de la poutre. Pour améliorer la catégorie de cet assemblage, il faut atténuer la discontinuité géométrique en disposant des goussets circulaires de raccordement qui permettent une catégorie 71 ou 90 suivant leur rayon. Les zones soudées des congés de raccordement doivent être

meulées après soudage pour assurer un raccordement progressif. S'agissant de cordons de soudure longitudinaux, l'effet d'épaisseur n'est pas à prendre en compte.

En ce qui concerne les goujons, c'est la catégorie 90 dans laquelle ils sont classés.

5.2.5. Assemblages courants transmettant des efforts.

Il s'agit d'assemblages en croix ou en T tels que ceux fixant une **entretoise** ou une **pièce de pont** à une poutre ou à un montant, mais ici la classe est relative aux étendues de contraintes dans l'élément attaché, transmises à la poutre ou à l'élément principal à travers les soudures de l'assemblage.

Les soudures à **pleine pénétration** ou à **pénétration partielle** donnent à l'assemblage le classement en catégories 80-40, en fonction de la longueur d'attache et de l'épaisseur des éléments attachés. Les soudures **d'angle** doivent obligatoirement être partiellement pénétrées pour être classées en fatigue. Leur catégorie est alors seulement de 36. Cette catégorie s'entend pour les variations de contrainte évaluées dans la section de gorge des cordons. Par ailleurs, ces catégories 80-40 s'appliquent toujours pour les variations de contrainte évaluées dans l'élément attaché. Cette exigence s'applique en particulier aux soudures des montants verticaux sous les semelles supérieures des poutres principales et aux soudures des semelles de pièces de pont sur les semelles de poutre principales.

Le classement des **goujons** soudés pour les étendues de cisaillement dans la section nominale du goujon est donnée dans l'EN 1994-2 [5]. Il est à noter qu'une vérification en fatigue avec interaction entre le cisaillement dans le goujon et les contraintes normales dans la semelle doit être conduite.

5.2.6. Assemblages de poutres à treillis

Les courbes de résistance à la fatigue à utiliser pour les détails d'assemblage de profils creux de poutres à treillis ont une constante de pente unique $m = 5$.

5.2.7. Détails constructifs ne figurant pas dans la classification de l'EN 1993-1-9

Les **connecteurs en cornière**, utilisés surtout en France, ne figurent pas dans la classification de l'Eurocode. Pour éviter des arrêts de cordons très nocifs du point de vue de la fatigue et pour mieux reprendre les efforts de flexion il est conseillé de réaliser des cordons ceinturant complètement la cornière. La catégorie de détail à utiliser dans ce cas pour les semelles des poutres et pour les cordons est de 56. On ne vérifiera pas de critère d'interaction entre les contraintes normales dans la semelle supérieure et les contraintes tangentes dans la cornière.

Une autre lacune dans la classification concerne les **semelles additionnelles**. Beaucoup moins employées qu'autrefois grâce aux tôles de forte épaisseur, elles sont encore utiles dans certains cas. Leur point faible en fatigue est localisé à leur extrémité. L'EN 1993-1-9 ne considère explicitement qu'une disposition d'extrémité à bord droit, ce qui crée une forte discontinuité géométrique, et lui attribue les catégories inférieures à 56 pour les épaisseurs supérieures à 20 mm, couramment utilisées dans les ponts. En fait, les dispositions conseillées et qu'il faut impérativement utiliser avec un débardage d'extrémité à 1/4 apportent la catégorie de détail 56.

Par ailleurs, une telle classification ne peut pas inclure les détails soumis à des **contraintes complexes** ou **difficilement calculables**. Il est également évident qu'une classification de détails types ne peut pas tenir compte de **dispositions défectueuses**, entraînant des déformations locales importantes et répétées.

La vérification à la fatigue de tous les détails constructifs non compris dans les tableaux de classification doit être effectuée par la méthode fondée sur les étendues de **contrainte géométrique** et non plus nominale.

5.2.8. Ajustement de classification

Un point particulier concernant l'utilisation de ces tableaux de classification doit être signalé. Les résultats expérimentaux concernant certains types de détail constructif ne s'ajustent pas bien sur les courbes de résistance à la fatigue. Afin d'éviter toute condition non sécuritaire, ces détails sont classés dans la catégorie de détail immédiatement inférieure à celle que leur aurait conféré leur résistance à 2 millions de cycles.

Dans les tableaux, ces détails sont identifiés par un astérisque. Leur classification peut être augmentée d'une catégorie, à condition que l'on adopte des courbes modifiées de résistance à la fatigue dans

lesquelles la limite de fatigue sous amplitude constante soit prise égale à la résistance à la fatigue à 10 millions de cycles (Figure 6 et Figure 7).

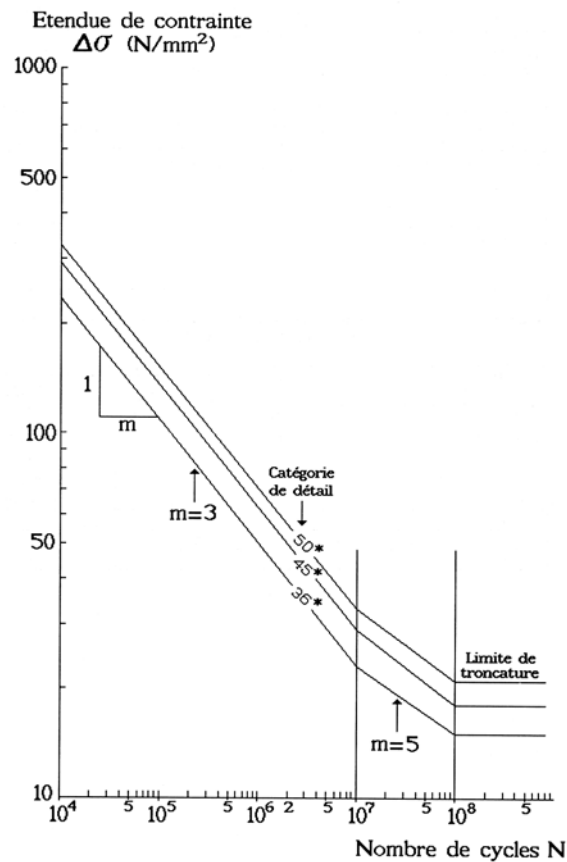


Figure 6 – Grille de courbes S-N pour les détails ajustés

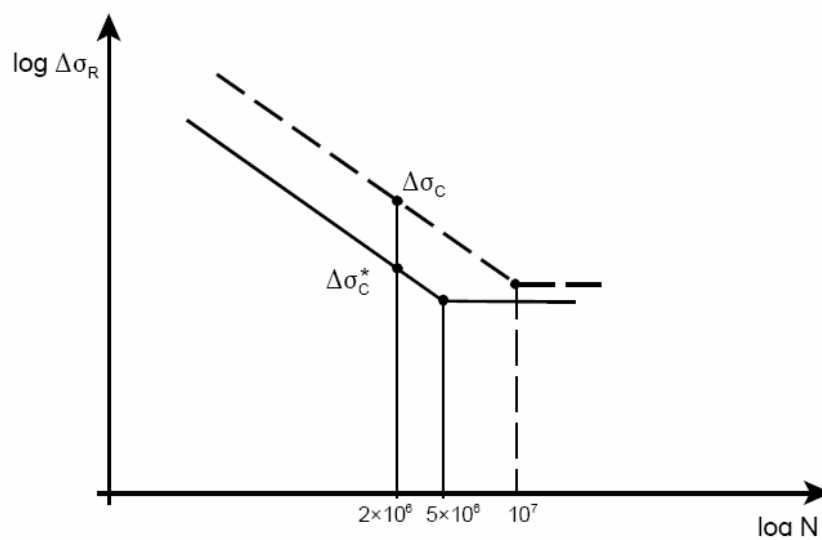


Figure 7 – Explication concernant les courbes S-N pour les détails ajustés

5.3. Evolution

De nouvelles courbes S-N peuvent toujours être proposées, avec l'arrivée de nouveaux résultats expérimentaux. Ainsi, le plus récent document de travail concernant les recommandations de l'IIW [13] propose les courbes qui présentent deux pentes, une de $m = 3$ et l'autre de $m = 22$ (Figure 8).

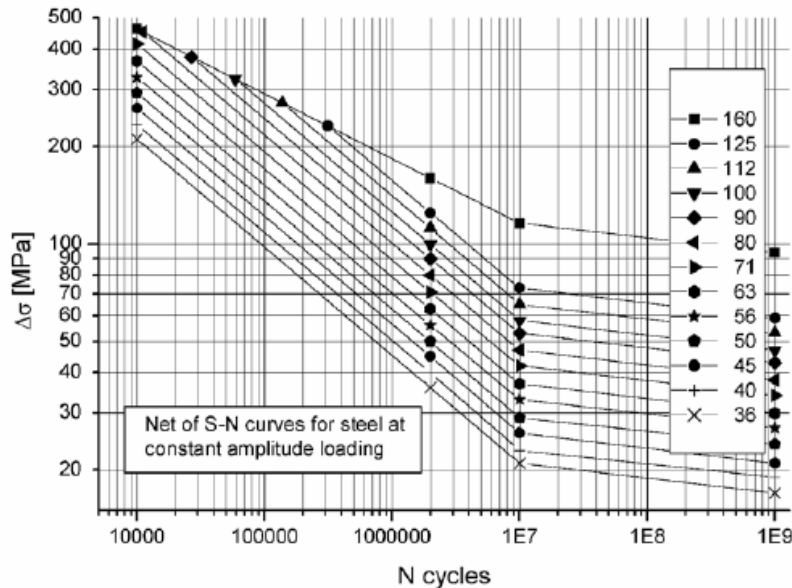


Figure 8 – Proposition de nouvelle grille de courbes S-N de l'IIW

Le document de référence pour l'EN 1993-1-9 [14] parle aussi de la possibilité de changer radicalement l'allure des courbes, en adoptant une limite de fatigue avec un nombre de cycles différent pour catégories de détail différentes (Figure 9).

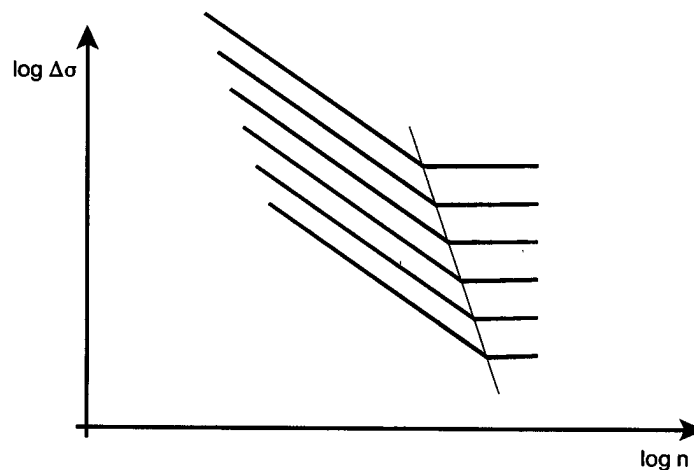


Figure 9 – Evolution possible de la grille de courbes S-N

5.4. Exemple

5.4.1. Attaches de raidisseurs transversaux

Pour ces attaches, l'ENV 1993-1-1 précisait la catégorie de détail en fonction de l'épaisseur de raidisseurs transversaux. L'EN 1993-1-9 – par contre – attribue les mêmes catégories, mais en fonction de la longueur de l'attache, c'est-à-dire de l'épaisseur de raidisseur augmentée par la projection de cordons de soudure sur la semelle.

5.4.2. Attaches de raidisseurs longitudinaux

En ce qui concerne ce type d'attaches, l'ENV 1993-1-1 attribuait les trois catégories de détail (80, 71 et 56) en fonction de la longueur de l'attache. L'EN 1993-1-9 donne un peu plus de précisions, car la classification se fait avec quatre catégories de détail (80, 71, 63 et 56).

6. QUELQUES CONSIDÉRATIONS PARTICULIÈRES

6.1. Exécution

Les catégories de détail ne sont valables que si les soudures respectent un niveau de qualité donné. Celui-ci sera défini dans une norme européenne ultérieure ; dans l'immédiat il fait référence à la classe de qualité 2 de la norme NF P 22-471 [9] ; des conditions complémentaires, comme par exemple la classe de qualité 1 de la norme NF P 22-471, sont exigées pour certains détails.

6.2. Effet d'épaisseur

Les recommandations de la CECM et l'ENV 1993-1-1 considéraient que pour des épaisseurs supérieures à 25 mm et pour des cordons de soudure transversaux, donc perpendiculaires à la direction de la contrainte normale, la résistance en fatigue diminue lorsque l'épaisseur augmente. Une correction sur la valeur de la résistance en fatigue devait être apportée en multipliant la catégorie de détail par le facteur $(25/t)^{0,25}$, où t est l'épaisseur de l'élément, en mm.

Par rapport aux textes antérieurs, l'EN 1993-1-9 clarifie les conditions dans lesquelles l'effet d'épaisseur s'applique :

- D'une part, l'exposant de la formule est passé de 0,25 à 0,20 ; la Figure 10 montre la différence entre les deux formulations.
- Et surtout, l'effet d'épaisseur ne s'applique plus sous cette forme pour nombre de détails constructifs dimensionnants en fatigue. Ainsi pour les attaches transversales ou longitudinales sur une membrure, l'effet d'épaisseur, antérieurement basé sur l'épaisseur de la membrure, est remplacé par un « effet des dimensions de l'attache » qui est beaucoup moins pénalisant pour les fortes épaisseurs de membrure (en rappelant que celles-ci peuvent atteindre 130 mm et plus en France). La résistance d'un plat transversal d'épaisseur usuelle est ainsi de 90 MPa quelle que soit l'épaisseur de la semelle sur lequel il est soudé.

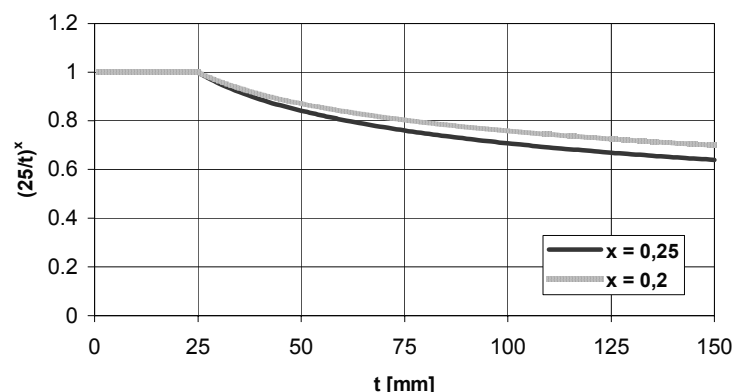


Figure 10 – Comparaison de l'effet d'épaisseur selon l'ENV et l'EN

6.3. Contraintes minimale et maximale

Le processus de soudage génère des contraintes résiduelles élevées. Vu que les soudures sont très présentes dans les structures réelles, l'expérimentation montre que le **rapport de contraintes** $R = \sigma_{\max} / \sigma_{\min}$ ne représente pas un facteur déterminant, pour cause de la présence de contraintes résiduelles.

Par contre, pour les détails non soudés ou soudés détensionnés, l'influence de la **contrainte moyenne** $\sigma_{\text{moy}} = (\sigma_{\max} + \sigma_{\min}) / 2$ sur la résistance à la fatigue peut être considérée en réduisant l'étendue de contrainte pour la vérification à la fatigue.

Cela n'est évidemment pas pratique à mettre en œuvre dans les projets, faute d'une combinaison de charges appropriée à l'état limite de fatigue.

6.4. Parachèvement

Dans le cas d'une **pièce lisse**, la fissure peut prendre naissance à partir de défauts microscopiques à l'échelle du grain, ou de défauts de bord dus à l'oxycoupage ou au perçage, par exemple. Dans le cas des **constructions soudées**, il existe toujours des défauts dus à la soudure : c'est plutôt à partir d'un cordon de soudure qu'une fissure peut s'amorcer. Des traitements de parachèvement peuvent permettre de retarder cette phase et, ainsi, d'améliorer considérablement la durée de vie.

De nombreuses techniques existent, mais on n'en présente ici que quatre [10], pouvant être séparées en deux groupes :

- Les traitements qui adoucissent la forme locale du cordon de soudure et éliminent les défauts de surface, tels que :
 - Meulage
 - Refusion TIG ;
- Les traitements qui introduisent des contraintes de compression là où sont présentes les contraintes de traction dues au soudage, tels que :
 - Grenaillage de précontrainte
 - Martelage.

Si des formulations quantifiées du gain de résistance ont déjà été proposées, voir par exemple [10], les méthodes du second groupe nécessitent d'appréhender le rapport R , ce qui rend leur utilisation peu pratique, pour les raisons déjà exposées au paragraphe précédent.

C'est sans doute pourquoi, pour le moment, ces techniques d'améliorations, sans être interdites, ne font pas l'objet de développements dans l'EN 1993-1-9.

7. CONCLUSION

Dans un certain nombre de cas, la fatigue peut devenir déterminante pour les dimensions et pour la conception même de la structure et/ou de ses détails.

Ci-dessous sont données quelques conséquences pour la conception et l'exécution des ponts :

- En ce qui concerne les ponts, la fatigue peut être dimensionnante pour les poutres principales des ouvrages de faible et moyenne portée ;
- L'épaisseur de la semelle inférieure (travée) et supérieure (zones proches des foyers) peut augmenter jusqu'à 20 % ;
- La conception de certains assemblages peut être entièrement revue, par exemple :
 - Liaisons entretoise-poutre (introduction des goussets circulaires)
 - Joints de chantier (suppression des trous de souris)
 - Soudures à pleine pénétration pour les assemblages sensibles à la fatigue ;

- L'exécution des travaux peut être influencée par les effets souhaités (introduction des dénivellations d'appui, par exemple).

Mais, il ne faut pas oublier qu'il peut être inutile d'imposer certaines prescriptions si une simple augmentation de l'épaisseur, par exemple, coûte moins cher et satisfait la vérification à la fatigue : tout est – au bout de compte – une question d'économie !

Si l'on tente de dresser un bilan provisoire, on constate :

- Que ces textes sont pour l'essentiel compatibles avec nos pratiques nationales en matière d'ouvrages d'art métalliques et mixtes, conçus pour une durée de vie de fatigue de 100 ans et plus sans dépendre a priori de la fréquence et de l'efficacité des inspections vis-à-vis de la détection d'éventuelles fissures de fatigue. Mais cela implique de conserver un vrai coefficient de sécurité en fatigue, ce qu'auraient tendance à éviter certains pays.
- Que de plus ils tendent à rendre possible, toutes choses égales par ailleurs, une légère réduction des épaisseurs maximales de tôles mises en œuvre dans les ponts à deux poutres sous chaussée (bipoutres). Ceci en particulier par un effet défavorable de l'épaisseur moins important, ce qui rend paradoxalement inutile d'augmenter cette épaisseur. Cette réduction a à son tour un effet favorable sur la résistance à la rupture fragile à basse température.

Cela étant, l'évaluation de la pertinence fine des règles de fatigue peut difficilement être conduite par rapport à une pathologie à peu près inexistante pour les ouvrages des 30 dernières années.

8. RÉFÉRENCES

- [1] Brozzetti J. et Hirt M.A. : Concepts de dimensionnement à la fatigue des ouvrages métalliques selon les recommandations de la CECM, Revue Construction Métallique, N° 1-1987.
- [2] EN 1993-1-10 : Eurocode 3 « Calcul des structures en acier » – Partie 1.10 : Choix des qualités d'acier (projet définitif), CEN, 2003.
- [3] EN 1993-1-9 : Eurocode 3 « Calcul des structures en acier » – Partie 1.9 : Fatigue (projet définitif), CEN, 2003.
- [4] EN 1993-2 : Eurocode 3 « Calcul des structures en acier » – Partie 2 : Ponts métalliques (projet définitif), CEN, 2003 (en anglais).
- [5] EN 1994-2 : Eurocode 4 « Calcul des structures mixtes acier-béton » – Partie 2 : Règles générales et règles pour les ponts (projet définitif), CEN, 2004.
- [6] ENV 1991-3 : Eurocode 1 « Bases de calcul et actions sur les structures » – Partie 3 : Charges sur les ponts dues au trafic, CEN, 1997.
- [7] ENV 1993-1-1 : Eurocode 3 « Calcul des structures en acier » et Document d'Application Nationale – Partie 1-1 : Règles générales et règles pour les bâtiments, Chapitre 9 : Fatigue (NF P 22-311-9), AFNOR, 1992.
- [8] Kretz T. : « Résistance à la fatigue dans ponts métalliques et mixtes », in Concevoir et réaliser les ponts métalliques et mixtes (Journées techniques sur les ouvrages d'art métalliques, Rouen, 12–14 octobre), pp. 210–225, ENPC (et OTUA–CETE Normandie-Centre), 1999.
- [9] NF P 22-471 : Construction Métallique – Assemblages soudés – Fabrication, AFNOR, 1984.
- [10] Ponts métalliques et mixtes, Résistance à la fatigue, Guide de conception et de justifications, SETRA (et CTICM–SNCF), 1996.
- [11] Recommandations pour la conception en fatigue des assemblages et des composants soudés (A. Hobbacher, ed.), CTICM (et IIS), 1996.
- [12] Recommandations pour la vérification à la fatigue des structures en acier (M.A. Hirt, ed.), CECM, 1987.
- [13] Recommendations for fatigue design of welded joints and components (A. Hobbacher, ed.), IIS, 2005.
- [14] Sedlacek G. et Stötzl J. : 1st Draft of the Background Document prEN 1993-1-9, RWTH, 2004.