ÉVALUATION DE LA DURÉE DE VIE EN FATIGUE D'UNE STRUCTURE MÉTALLIQUE

CONTEXTE

Le **phénomène de fatigue** désigne la dégradation progressive des structures soumises à des sollicitations fluctuantes, alternées et répétées, qui se traduit par l'apparition et le développement de fissures, endommageant ces structures et pouvant les amener à la ruine. Les fissures de fatigue se développent suivant trois grandes étapes : l'amorçage de la fissure, sa propagation et enfin la rupture brutale de la section résistante restante. L'échelle de durée est très différente entre chaque étape, depuis une durée très longue pour l'amorçage de la fissure jusqu'à une rupture quasi-instantanée.

En ouvrages d'art, le risque de fatigue concerne la charpente métallique des ouvrages métalliques (rivetés, boulonnés ou soudés), des ouvrages mixtes, des dalles orthotropes (en particulier les viaducs métalliques démontables) ainsi que les portiques, potences et hauts mâts (PPHM).

De nombreux facteurs peuvent avoir une influence notable sur la durée de vie à la fatigue des éléments. Pour un assemblage donné, il est largement admis par simplification que les facteurs les plus importants pouvant être retenus pour les justifications des ouvrages à la fatigue sont les étendues (variations d'amplitudes) de contraintes appliquées et le nombre de cycles subis.

Le nombre de cycles subis est directement relié aux sollicitations induites par les charges de trafic et, pour les structures qui y sont sensibles telles que les PPHM et les ouvrages mobiles, par les charges fréquemment variables comme celles du vent ou générées par les manœuvres, etc.

Les étendues de contraintes sont également liées à ces mêmes charges, mais elles dépendent aussi des dispositions constructives (classes de détail) et des éventuels défauts initiaux. Suivant le type de trafic sur l'ouvrage, les étendues de contraintes générées dans les assemblages seront différentes.

Les contraintes générées par les effets locaux (flexion locale, poinçonnement, etc.) peuvent être prédominantes par rapport aux contraintes générées par le comportement global de la structure (flexion, torsion, etc.).

L'évaluation de la durée de vie résiduelle d'un ouvrage existant vis-à-vis de la fatigue peut être envisagée :

– lorsque qu'une inspection détaillée a révélé l'existence d'une ou plusieurs fissures s'apparentant à des fissures de fatigue ;
– lorsqu'un ouvrage doit faire l'objet d'un programme de grosses réparations ;
– dans le cadre d'une démarche d'inspection ciblée des ouvrages métalliques au sein d'un patrimoine ;
– dans le cadre de l'étude préalable au passage répété de convois exceptionnels.

On soulignera qu'il demeure très difficile d'estimer la durée de vie résiduelle d'un ouvrage vis-à-vis de ce phénomène compte tenu de la sensibilité des résultats aux hypothèses retenues (précision des courbes de Wöhler, choix de la catégorie de détail à laquelle se rattache l'assemblage concerné, qualité de réalisation des soudures, méconnaissance de l'historique du trafic passé, etc.).

MÉTHODOLOGIE DU DIAGNOSTIC

ÉTAPE 1 ANALYSE DU DOSSIER DE L'OUVRAGE

Objectif : analyse préliminaire du risque vis-à-vis de la fatigue

On identifiera dans le dossier de l'ouvrage tous les éléments utiles au diagnostic :

– Renseignements généraux :
  – date de construction (un ouvrage construit avant le milieu des années 1980 est suspect),
  – hypothèses de calcul de dimensionnement (règles de calcul des ouvrages métalliques et mixtes et des assemblages, caractéristiques de l'acier, prise en compte de la fatigue dans les vérifications, catégories de détails considérées, niveau de trafic considéré pour la fatigue, etc.),
  – isostaticité ou hyperstaticité de la structure, redondance des éléments,
  – trafic supporté par l'ouvrage, sollicitations subies ;
– Exécution de la structure (plans, carnets de chantier, dossier qualité, etc.) :
  – dispositions constructives retenues pour les assemblages : on cherchera à classer les assemblages soudés et boulonnés sur la base de configurations proposées par la norme NF EN 1993-1-9 [9] et rappelées dans les documents [1] et [3] (figure 1) et pour les assemblages rivetés, on pourra utilement se reporter aux documents [10] à [15],
  – résultats des contrôles des assemblages et notamment des joints soudés,
  – fiches de non-conformité éventuelles et procédures de réparation.

ÉTAPE 1
ANALYSE DU DOSSIER DE L'OUVRAGE

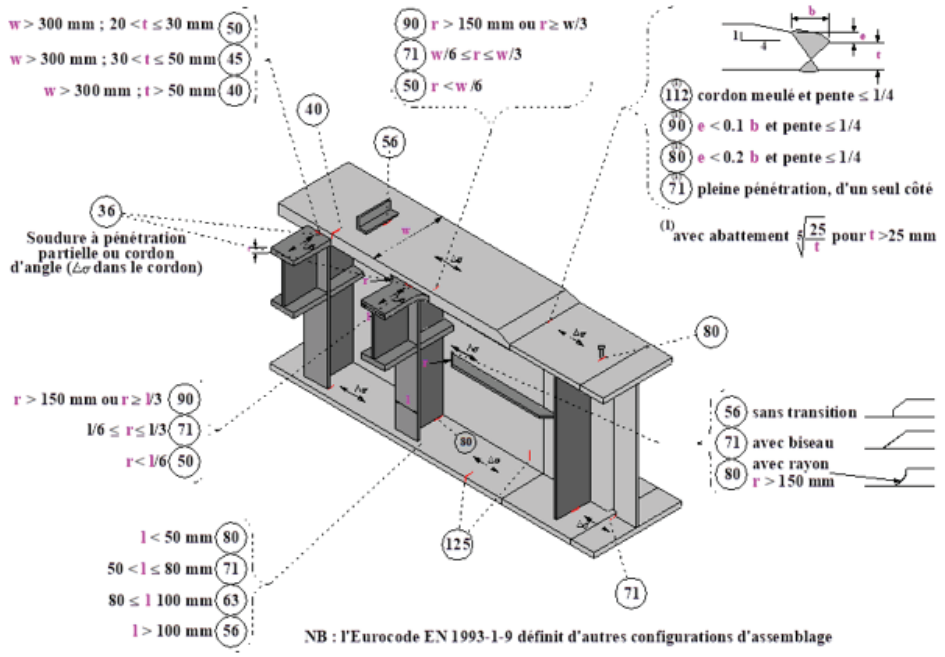


Figure 1 : Catégorie de détail des principaux assemblages dans les ponts métalliques et mixtes (Fascicule 33 de l'ITSEOA)

ÉTAPE 2
INSPECTION DÉTAILLÉE DE L'OUVRAGE

Objectifs : (1) détection d'éventuelles présences de fissures imputables à la fatigue et (2) confirmation des dispositions constructives d'éventuelles présences de fissures imputables à la fatigue

L'analyse préalable du dossier d'ouvrage aura permis d'identifier les zones les plus critiques vis-à-vis de la fatigue, zones qui feront l'objet d'un examen visuel attentif.

Les zones les plus sensibles au phénomène de fatigue sont :

– les zones où il y a une brusque variation géométrique et/ou du champ de contraintes ;
– les zones soumises à de nombreux cycles de sollicitation et où la variation de contraintes est importante ;
– les assemblages soudés lorsque les dispositions constructives sont inadaptées, le détail d'assemblage le plus sensible étant le cordon frontal perpendiculaire à la direction des efforts, ou lorsque les cordons de soudure sont mal réalisés ; la fissuration s'amorce généralement dans la zone de transition entre le cordon de soudure et le métal de base. Ces zones de soudure sont des points critiques dus à leur sensibilité aux concentrations de contraintes et aux contraintes résiduelles ;
– les zones rivetées des ouvrages anciens, notamment celles en fer puddlé.

Pour les ponts routiers, les principaux cas de désordres concernent les augets des dalles orthotropes (fissure à la liaison auget / tôle de platelage et fissure à la liaison auget / pièce de pont). Plusieurs cas de fissures de fatigue, favorisées par de mauvais détails d'assemblage et/ou une qualité de soudure médiocre (par exemple le manque de pénétration des soudures) sont également recensés sur des structures métalliques orthotropes (dalle de roulement, tôle de fond de caisson). On a également constaté quelques cas pour des poutres treillis.

Dans les structures rivées et boulonnées (tout particulièrement pour les ponts ferroviaires), les désordres se localisent souvent au niveau des assemblages de liaison entre les différents éléments (longerons / pièce de pont, pièces de pont / poutres principales, diagonales sur gousset dans un pont à poutres latérales) de même que dans les sections où il y a une discontinuité d'éléments entraînant une mauvaise transmission des efforts. La fissuration en fatigue s'amorce généralement dans les angles rentrant des découpes ou à partir des trous pour les rivets ou boulons.

ÉTAPE 3
ÉVALUATION PRÉLIMINAIRE EN FATIGUE ET AUSCULTATION

3.1 - Évaluation préliminaire en fatigue

Objectifs : (1) évaluation de la vulnérabilité de l'ouvrage vis-à-vis de la fatigue et (2) identification des assemblages les plus sollicités

Il s'agit soit d'examiner la note de calculs à la fatigue d'origine pour identifier les assemblages les plus sollicités (étendues de contraintes maximales) et/ou correspondant aux classes de détail les plus faibles, soit de réaliser un recalcul en fatigue de l'ouvrage en appliquant la démarche retenue pour la conception d'un ouvrage neuf s'il n'a pas été fait d'étude en fatigue lors des études d'exécution.

Cette dernière démarche permet de bien identifier les zones les plus sensibles, mais se révèle pénalisante pour les ouvrages anciens dans la mesure où les méthodes actuelles pour ouvrages neufs sont très sécuritaires.

ÉTAPE 3
ÉVALUATION PRÉLIMINAIRE EN FATIGUE ET AUSCULTATION

Une approche plus fine par cumul d'endommagement de l'ouvrage depuis sa mise en service est plus pertinente, mais elle nécessite d'avoir suffisamment d'informations sur la composition et le volume du trafic supporté. La caractérisation du trafic réel par comptage et pesage en marche peut alimenter les études.

3.2 - Auscultation et instrumentation

Objectifs : (1) recherche de la présence de fissures liées à la fatigue dans les zones les plus critiques et (2) caractérisation des sollicitations (trafic, vent, etc.) en termes d'étendue de contrainte et de nombre de cycles

3.2.1 - Contrôle non destructif des assemblages les plus critiques

La (ou les) méthode(s) de contrôle retenue(s) doit (doivent) être capable(s) de :

– déceler un défaut ;
– le qualifier en taille et en forme ;
– le situer « géographiquement » dans le cordon de soudure ;
– déterminer son orientation.

Les trois difficultés principales d'application des méthodes pour la détection des fissures de fatigue sont :

– l'application des méthodes sur des aciers généralement revêtus de peinture ou de tout autre système de protection anticorrosion ;
– la recherche d'un défaut dès son apparition, donc de faible dimension, d'ouverture très faible et dont les faciès des lèvres ne sont pas de bons réflecteurs car comportant les stries de propagation ;
– la localisation des défauts (cas des plaques médianes pour les assemblages rivetés, de même les méthodes par ressuage et magnétoscopie ne donnent accès qu'aux défauts de surface).

Il peut être fait appel à plusieurs méthodes normalisées et non destructives de détection de fissures, dont certaines permettent de caractériser les dimensions des fissures :

– examen visuel, même si le revêtement anti-corrosion peut masquer certaines fissures peu ouvertes ;
– ressuage (sur la base des normes NF EN ISO 23277, NF EN 3452-1 à NF EN ISO 34542-6) ;
– magnétoscopie (sur la base des normes NF EN ISO 17638, NF EN ISO 9934-1 à NF EN ISO 9934-3) ;
– ultra-sons (sur la base des normes NF EN ISO 17640, NF EN ISO 23279, NF EN ISO 11666, document IS US 319-21 de juin 1995) ;
– ACFM ;
– radiographie/gammagraphie (sur la base des normes NF EN ISO 10675-1 et 10675-2, NF EN ISO 17636-1et 17636-2), utilisées notamment pour les éléments d'assemblage où les défauts peuvent être localisés sur les plaques médianes et donc non détectables par les méthodes précédentes, exemple : cas des cornières rivetées, etc.

Parmi les méthodes de contrôle non destructif et suivant les conclusions du Projet National MIKTI [5], le contrôle par ultra-sons offre les capacités de détection de défaut de fatigue les plus performantes dans le cas des assemblages soudés.

Les contrôles par ultra-sons ne fonctionnent pas sur la majorité des fers puddlés.

> Toutes les méthodes surfaciques (magnétoscopie, ressuage) peuvent permettre de déterminer la longueur des fissures, ainsi que les méthodes US et radiographie ; pour déterminer la profondeur des fissures, il faut recourir aux ultrasons et éventuellement à la radiographie.
>
> La magnétoscopie, l'ACFM, la radiographie peuvent être mises en œuvre sur la plupart des revêtements anticorrosion.
>
> Il peut être judicieux de profiter d'une opération de remise en peinture d'un ouvrage pour procéder à ces auscultations

3.2.2 - Instrumentation de l'ouvrage

L'estimation de l'endommagement par fatigue nécessite de connaître les sollicitations subies.

Pour cela, une instrumentation d'assemblages par jauges de déformation disposées dans la direction des contraintes étudiées peut être réalisée. Dans certains cas, on peut être amené à utiliser des rosettes de jauges.

Les courbes S-N de résistance à la fatigue des détails constructifs classés sont basées sur le concept mécanique des **contraintes nominales**, celles-ci négligent les concentrations de contrainte engendrées par le joint soudé.

Une instrumentation par jauges de déformation permet de mesurer les variations de **contraintes nominales**. Il est alors possible d'identifier les cycles d'étendues de contraintes. Les jauges doivent être positionnées suffisamment loin de l'assemblage pour que les déformations ne soient pas influencées par sa présence (figure 2).

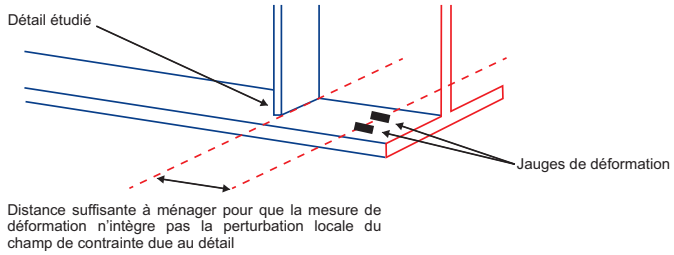


Figure 2 : Principe de mesure des contraintes nominales à distance du détail étudié

La contrainte géométrique comprend tous les effets de concentration de contrainte d'un détail constructif sauf les concentrations de contraintes dues à la forme de la soudure elle-même (figure 5). L'analyse en termes de contraintes géométriques est recommandée pour les joints soudés dont les contraintes nominales ne sont pas clairement définies à cause des effets d'une géométrie complexe ainsi que pour les joints dont la discontinuité géométrique est différente de celle des détails constructifs classés.

Pour l'évaluation des **contraintes géométriques**, on utilise de préférence des chaînettes de jauges qui permettent d'évaluer le gradient de déformation existant à proximité du cordon de soudure.

Cette instrumentation doit permettre de caractériser le nombre de cycles subis sur une période de référence donnée et l'étendue de contrainte moyenne. Pour cela, on fait appel à une méthode de comptage des cycles.

Pour être pertinent, le comptage doit reposer sur une durée minimale d'enregistrement à une fréquence d'échantillonnage appropriée. Il est recommandé de procéder à des enregistrements d'au minimum 3 semaines, correspondant à un trafic fréquent représentatif. La fréquence d'échantillonnage est à adapter en fonction de la fréquence des sollicitations déterminantes (par exemple pour les poutres longitudinales, le maximum de la fréquence de vibration de l'ouvrage et de la fréquence de sollicitation qui dépend de la vitesse du trafic et de la portée).

Trois méthodes sont couramment utilisées pour le comptage des cycles : le comptage de pics, le comptage d'étendue et le comptage de rainflow [8]. La méthode du rainflow qui fournit les meilleurs résultats, est la plus couramment utilisée.

ÉTAPE 3
ÉVALUATION PRÉLIMINAIRE EN FATIGUE ET AUSCULTATION

À défaut de pouvoir disposer des résultats d'une instrumentation par jauges de déformation, il est possible de recueillir les données de station de pesage automatique de véhicules sur l'itinéraire sur lequel se trouve l'ouvrage dans le but de requalifier le niveau du trafic qu'il subit (figure 3).

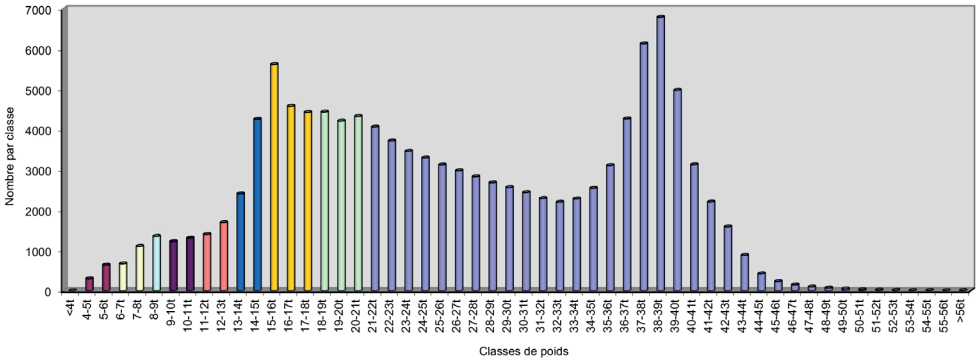


Figure 3 : Exemple de courbe du nombre de véhicules par classe de poids total donnée par une station de pesage automatique

3.3 - Calcul de l'endommagement en fatigue

Les deux approches les plus couramment utilisées pour la vérification à la fatigue sont :

– l'approche par contraintes ou **approche S – N** ; cette approche est généralement basée sur la contrainte nominale déterminée à partir de la résistance des matériaux mais il est également possible de se baser sur la contrainte géométrique ;
– l'approche par la **mécanique élastique linéaire de la rupture (MELR)**.

Dans le cas où on souhaite prendre en compte la présence d'une fissure et la caractérisation de ses dimensions dans le cadre d'un modèle d'endommagement, il est nécessaire de faire appel à la mécanique de la rupture.

L'approche basée sur la mécanique de la rupture est souvent délicate à conduire du fait des difficultés à réunir les informations nécessaires. Le domaine très complexe de la mécanique de la rupture permet de comprendre le fonctionnement d'un matériau fissuré et d'évaluer la puissance mécanique à mobiliser pour propager une fissure.

ÉTAPE 3
ÉVALUATION PRÉLIMINAIRE EN FATIGUE ET AUSCULTATION

À défaut de pouvoir prédire la durée de vie résiduelle d'une structure présentant des fissures, deux approches complémentaires peuvent apporter des éléments pour la gestion de l'ouvrage :

– analyse de la vitesse de propagation de la fissure à l'aide de la mécanique de la rupture (en fonction notamment de la résilience du matériau), permettant de planifier les opérations de surveillance (suivi par CND) et de réparation de l'ouvrage ;
– analyse de la robustesse de la structure en cas de défaillance de la pièce, avec évaluation de la capacité portante résiduelle de l'ouvrage.

3.3.1 - Approche S – N

Dans l'approche S - N, la géométrie et l'exécution des assemblages sont caractérisées par la notion de catégorie de détail d'assemblage (figure 1). La durée de vie à la fatigue est établie au moyen des courbes de Wöhler ou S - N (figure 4). Les courbes de Wöhler sont généralement données en échelle bi-logarithmique.

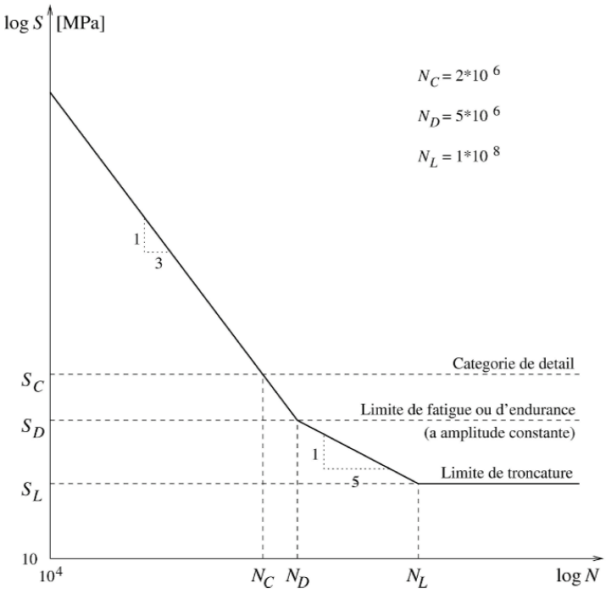


Figure 4 : Courbe conventionnelle de Wöhler

Malheureusement, on ne dispose pas des catégories de détail pour tous les assemblages et notamment pour les assemblages anciens. Dans le cas d'un assemblage soudé non répertorié dans l'Eurocode, il est possible de mettre en œuvre la méthode du point chaud selon les recommandations de l'International Institute of Welding [4].

La contrainte au point chaud (contrainte géométrique) peut être déterminée soit par mesure, soit par un calcul aux éléments finis. Le pic non linéaire de contrainte est éliminé par linéarisation de la contrainte dans l'épaisseur de la tôle (figure 5) ou par extrapolation au pied de cordon de la contrainte de surface.

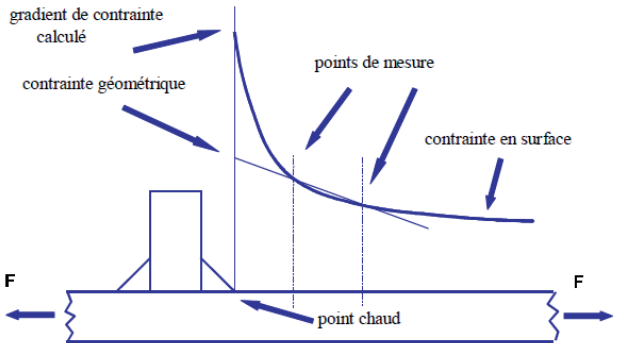


Figure 5 : Définition de la contrainte géométrique (au point chaud) selon [4]

Les recommandations de l'International Institute of Welding [4] fournissent les courbes S - N adaptées à l'utilisation de la contrainte géométrique.

Pour les assemblages rivetés, on pourra s'appuyer sur la documentation existante sur le sujet ([10] à [15]). La classe de détail à considérer est la classe de détail 71 avec une limite d'endurance à amplitude constante de 52 MPa et une limite de troncature à 29 MPa, les étendues de contraintes étant calculées sur la section nette des pièces. Cette classe de détail couvre tous les types d'assemblages. On trouve dans la littérature des valeurs affinées pour différents types d'assemblages [15].

ÉTAPE 3
ANALYSE DU FONCTIONNEMENT DES SECTIONS DE L'OUVRAGE ET AUSCULTATION

L'endommagement en fatigue d'un élément est ensuite décrit par une loi qui précise la contribution de chaque cycle d'étendue de contrainte à l'endommagement de cet élément. Le modèle de Miner [7] (postulé par Palmgren en 1924) forme la loi la plus couramment utilisée. Très simple, elle n'est pas générale et ne tient pas compte de l'ordre de succession des étendues de contrainte.

Le dommage D est donné par :

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

où Ni et ni sont respectivement le nombre de cycles à la rupture (suivant la courbe de Wöhler du détail) et le nombre de cycles subis pour l'étendue de contrainte Si. Lorsque le dommage D vaut 1, l'élément est dit en état de ruine par fatigue.

Pour reconstituer l'historique des cycles d'étendues de contraintes, des hypothèses doivent être faites sur l'intensité du trafic passé (bases de données de l'historique du trafic, etc.).

Pour se projeter dans l'avenir, des hypothèses doivent être faites sur l'évolution du trafic futur.

3.3.2 - Approche par la mécanique élastique linéaire de la rupture

Le modèle le plus classiquement retenu pour décrire la propagation d'une fissure est la loi cinétique de Paris ([16]) correspondant à l'ouverture d'une fissure semi-elliptique :

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^m$$

où a est la longueur de la fissure, N le nombre cycles, ΔK la variation du facteur d'intensité de contrainte, C et m deux paramètres intrinsèques du matériau. On notera que ce modèle n'est valable que dans la phase de propagation stable de la fissure, i.e. après l'initiation de la fissure et avant une propagation trop importante entraînant la ruine de la structure (figure 6). Cette loi de propagation peut être appliquée à chacun des 3 modes de fissuration (mode I, II et III), le mode de fissuration rencontré le plus fréquemment étant le mode I.

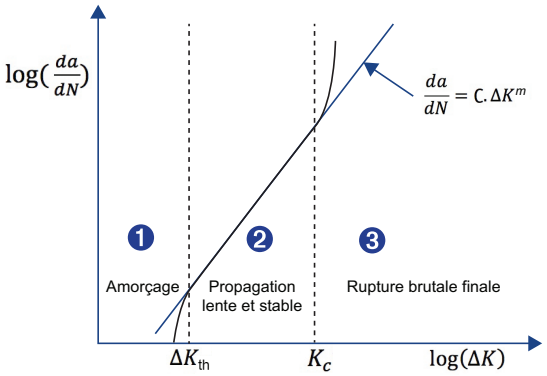


Figure 6 : Représentation schématique de la loi de Paris [17]

Il est possible de déterminer les coefficients matériaux C et m à partir de la littérature ou d'essais sur prélèvements en laboratoire [17], On notera qu'il est essentiel d'adapter ces coefficients au matériau en présence (acier doux, fer puddlé, etc.) et que ceux-ci sont très variables dans le cas des matériaux les plus anciens. De même, il est possible de se référer à la littérature pour déterminer la valeur seuil ΔKth au-dessous de laquelle la fissure ne se propage pas [17].

Il est plus difficile d'évaluer la variation du facteur d'intensité de contrainte qui est corrélée à la sollicitation appliquée, à l'état initial de contraintes lié au mode d'élaboration (laminage, soudage), à la longueur de la fissure et à un facteur de forme dépendant de la géométrie locale. Dans le cas de géométries simples, ce facteur peut être évalué sur la base de données de la littérature à condition que les sollicitations de service soient connues. Dans le cas de géométries plus complexes, il est nécessaire de recourir à un modèle de la structure fissurée (comme par exemple un modèle aux éléments finis) ou à des essais spécifiques.

RÉFÉRENTIEL

[1] Ponts métalliques et mixtes. Résistance à la fatigue - Guide de conception et de justifications. Sétra CTICM SNCF, 1996.

[2] Guide « Conception des réparations structurales et des renforcements des ouvrages d'art ». Cerema, 2016.

[3] Instruction technique pour la surveillance et l'entretien des ouvrages d'art. Fascicule 33 : ponts métalliques et mixtes, Cerema, 2017.

[4] Recommendations for fatigue design of welded joints and components. IIW-1823-07, IIW, 2008.

[5] MIKTI, Ponts mixtes acier-béton : un guide pour des ouvrages innovants. Presses de l'Ecole Nationale Des Ponts et Chaussées, Paris, France, 2010.

[6] Cremona C. Reliability updating of welded joints damaged by fatigue. International, Journal of Fatigue, 18(8), 567-575, 1996.

[7] Miner M.A. Cumulative damage in fatigue. Journal of Applied Mechanics, 12 A159-A164, 1945.

[8] NF A03-406, Fatigue sous sollicitations d'amplitude variable : Méthode Rainflow de comptage des cycles, AFNOR, 1993.

[9] NF EN 1993-1-9, Eurocode 3, Calcul des structures en acier, Partie 1-9 : fatigue, 2005.

[10] Assessment of Existing Steel Structures: Recommendations for Estimation of Remaining Fatigue Life. Background documents in support to the implementation, harmonization and further development of the Eurocodes, 2008.

[11] Commentary And Worked Examples to EN 1993-1-10 Material toughness and through thickness properties and other toughness oriented rules in EN 1993, 2008.

[12] Improved Assesment Methods for Static and Fatigue Resistance of Old Steel Railway Bridges. Background document D4.6, 6th Framework Programme, Sustainables Bridges.

[13] Cremona, C., Eichler; B., Johansson; B. et Larsson, T. Improved Assesment Methods for Static and Fatigue Resistance of Old Metallic Railway. Journal Of Bridge Engineering, November 2013.

[14] Guideline for Load and Resistance Assessment of Existing European Railway Bridges, Advices on the use of advanced methods, 6th Framework Programme, Sustainables Bridges.

[15] Taras, A. et Greiner R. Development and Application of a Fatigue Class Catalogue for Riveted Bridge Components. TU GRAZ, 2009.

[16] Paris P. et Erdogan F. A critical analysis of crack propagation laws. Journal of Basic Engineering Transactions of the ASME, series D, n°4, vol.85, pp. 528-534, 1963.

[17] Lepretre E. Efficacité du renforcement par composites collés vis-à-vis de la propagation de fissures de fatigue pour une application aux structures rivetées. Thèse de Doctorat Université Bretagne Loire, 2017.

B3-1 Contrôle visuel et dimensionnel des soudures

B3-3 Examen par ressuage

B3-4 Contrôle par magnétoscopie

B3-5 Contrôle par radiographie des soudures

B3-6 Contrôle de compacité des tôles et des soudures par ultrasons

C3-5 Mesure de déformation par jauge

LOGIGRAMME

Un logigramme visualisant de façon séquentielle et logique les actions à mener et les décisions à prendre pour aboutir au diagnostic résume cette méthodologie de diagnostic. Compte tenu du caractère synthétique de ce logigramme, il convient de noter que dans certains cas spécifiques, l'enchaînement des actions peut être différent. À titre d'exemple, on peut réparer des fissures détectées puis faire une évaluation « classique » vis-à-vis de la fatigue pour confirmer l'origine du désordre et identifier les assemblages les plus sensibles et enfin définir le programme de surveillance, surtout si la structure est redondante ou l'assemblage peu critique ; dans ce cas l'analyse de l'ouvrage peut aussi comprendre une évaluation de sa robustesse en cas de défaillances de pièces.

E3-2 : ÉVALUATION DE LA DURÉE DE VIE EN FATIGUE D'UNE STRUCTURE MÉTALLIQUE

