Document de support à la présentation :

Conception des charpentes d’aluminium

Module 9 – Fatigue

Contenu développé par :

**Ahmed Rahem, ing., Ph. D.**

Professeur au Département des sciences appliquées de l’UQAC

Table des matières

[Note 4](#_Toc127458754)

[A- Introduction 5](#_Toc127458755)

[Diapositive 5 : 5](#_Toc127458756)

[Diapositive 8 : 6](#_Toc127458757)

[Diapositive 10 : 7](#_Toc127458758)

[Diapositive 12 : 7](#_Toc127458759)

[Diapositive 14 : 8](#_Toc127458760)

[Diapositive 15 : 9](#_Toc127458761)

[B- Mécanisme de rupture par fatigue 11](#_Toc127458762)

[Diapositive 18 et 19 : 11](#_Toc127458763)

[Diapositive 21 : 12](#_Toc127458764)

[Diapositive 22 : 13](#_Toc127458765)

[Diapositive 24 : 14](#_Toc127458766)

[Diapositive 25 : 15](#_Toc127458767)

[Diapositive 27 : 16](#_Toc127458768)

[Diapositive 30 : 18](#_Toc127458769)

[Diapositive 31 : 19](#_Toc127458770)

[C- Paramètre de la tenue en fatigue 20](#_Toc127458771)

[Diapositive 34 : 20](#_Toc127458772)

[Diapositive 35 : 21](#_Toc127458773)

[Diapositive 37 : 22](#_Toc127458774)

[Diapositive 38 : 23](#_Toc127458775)

[Diapositive 40 : 23](#_Toc127458776)

[Diapositive 41 : 24](#_Toc127458777)

[Diapositive 42 : 24](#_Toc127458778)

[Diapositive 44 : 25](#_Toc127458779)

[Diapositive 45 : 26](#_Toc127458780)

[Diapositive 46 : 26](#_Toc127458781)

[Diapositive 47 et 48 : 27](#_Toc127458782)

[Diapositive 49 : 28](#_Toc127458783)

[Diapositive 50 : 29](#_Toc127458784)

[Diapositive 51 : 29](#_Toc127458785)

[Diapositive 52 : 30](#_Toc127458786)

[Diapositive 53 : 31](#_Toc127458787)

[Diapositive 55 : 32](#_Toc127458788)

[Diapositive 56 : 33](#_Toc127458789)

[D- Résistance à la fatigue 37](#_Toc127458790)

[Diapositive 59 : 37](#_Toc127458791)

[Diapositive 61 : 37](#_Toc127458792)

[Diapositive 62 : 39](#_Toc127458793)

[Diapositive 64 : 40](#_Toc127458794)

[Diapositive 66 : 42](#_Toc127458795)

[Diapositive 67 : 42](#_Toc127458796)

[Diapositive 68 : 43](#_Toc127458797)

[Diapositive 69 : 43](#_Toc127458798)

[Diapositive 70 : 44](#_Toc127458799)

[Diapositive 71 : 45](#_Toc127458800)

[Diapositive 72 : 46](#_Toc127458801)

[Diapositive 73 : 47](#_Toc127458802)

[E- Méthodes d’intervention 49](#_Toc127458803)

[Diapositive 76 : 49](#_Toc127458804)

[Diapositive 78 : 49](#_Toc127458805)

[Diapositive 79 : 50](#_Toc127458806)

[Diapositive 81 : 51](#_Toc127458807)

[Diapositive 82 : 52](#_Toc127458808)

[Diapositive 84 : 53](#_Toc127458809)

[Diapositive 86 : 53](#_Toc127458810)

[Diapositive 88 : 54](#_Toc127458811)

[Diapositive 89 : 55](#_Toc127458812)

[F- Approche à la normalisation 57](#_Toc127458813)

[Diapositive 92 : 57](#_Toc127458814)

[Diapositive 93 : 60](#_Toc127458815)

[G- Exemples pratiques 61](#_Toc127458816)

# Note

Avec la permission de monsieur Denis Beaulieu, une certaine partie du matériel est reproduite des manuels *Calcul des charpentes d’aluminium* et *Les caractéristiques de l’aluminium structural*. Bien que l'utilisation du matériel ait été autorisée, monsieur Beaulieu n'est pas responsable de la manière dont les données sont présentées, ni de toute représentation ou interprétation.

# Introduction

## Diapositive 5 :

**9.1 Introduction**

**9.1.1 Le phénomène de fatigue**

Dans les chapitres précédents, les états limites ultimes qui caractérisent la rupture des pièces ou des charpentes en aluminium ont toujours été associés soit à une rupture ductile du matériau, soit à une instabilité locale ou globale de la pièce ou de la charpente sous les charges pondérées. Il existe un autre mode de rupture, propre aux structures métalliques, qui est caractérisé par la ruine de l’ouvrage à des niveaux de contrainte parfois nettement inférieurs à la limite élastique ou la contrainte de rupture; c’est la rupture par fatigue.

Les structures soumises à des fluctuations de charge peuvent être sujettes à des ruptures par fatigue si le nombre d’applications de la charge est grand, et cela à des contraintes plus basses que les contraintes admissibles pour des charges statiques. Les ruptures de fatigue se manifestent au voisinage des concentrations de contraintes, sous forme de fissures susceptibles de se propager à travers les éléments ou leurs assemblages. Des discontinuités, comme les trous de boulons ou de rivets, les soudures ou les changements de formes géométriques donnent naissance à ces concentrations de contraintes qui réduisent l’espérance de vie en fatigue des structures.

La fatigue est un état limite ultime vérifié en calculant les variations de contraintes sous les charges d’utilisation, c’est-à-dire les charges non pondérées. Seules les surcharges qui varient de façon cyclique contribuent à la fatigue. Les charges permanentes ne sont pas prises en compte dans les calculs. Il existe toutefois des cas particuliers, comme on le verra aux sous-sections 9.3.3[[1]](#footnote-1) et 9.3.5, où des contraintes permanentes sont susceptibles d’influencer positivement la résistance à la fatigue.

La fatigue des métaux a été identifiée pour la première fois aux environs de 1830 et les premiers essais de fatigue visaient à éliminer les ruptures observées dans les essieux de wagons de chemin de fer. Dans les applications de génie civil, ce sont surtout les ponts qui ont en premier retenu l’attention des ingénieurs pour les problèmes de fatigue. Les ponts étaient d’abord rivetés (jusqu'aux années 1950), puis assemblés à l’aide de boulons à haute résistance. Les problèmes de fatigue étaient alors peu fréquents puisque les imperfections conduisant à la fatigue étaient relativement moins importantes et que les fréquences de chargement étaient faibles, comparées à celles d’aujourd’hui. Les considérations de fatigue ont pris de l’importance avec l’utilisation croissante de la soudure dans la fabrication des ponts. Les normes de calcul pour la fatigue étaient plutôt rudimentaires, à l’origine, mais elles se sont rapidement raffinées, à partir des années 1970, pour permettre aujourd’hui un calcul relativement précis et sécuritaire de la résistance des structures à la fatigue.

## Diapositive 8 :

**9.1.2 Importance de la fatigue**

Des études révèlent que plus de 75 % des ruptures observées dans les véhicules terrestres sont attribuables à la fatigue et qu’en général, les pourcentages varient entre 50 et 90 % selon les applications structurales. Ces chiffres démontrent l’importance de bien évaluer les cas où les sollicitations variables répétées sont susceptibles d’entraîner la fatigue et, le cas échéant, de bien évaluer la résistance de la structure en fatigue.

Il est facile de dresser la liste des véhicules et des structures dont le risque de rupture par fatigue est élevé : automobiles, avions, trains, bateaux, moteurs, turbines, ponts roulants, ponts, tours, pylônes, plates-formes pétrolières en mer, lampadaires, portiques de signalisation routière, etc. En fait, dans toutes les applications de génie où il y a mouvement oscillatoire répété, forcé ou naturel, c’est-à-dire causé par le vent ou les vagues, par exemple, il faut se soucier de la possibilité d’endommagement qui se traduit par la propagation de fissures et qui conduit plus ou moins rapidement à la séparation des pièces.

De nos jours, la tendance est de construire avec des matériaux de plus en plus légers et d’optimiser au maximum les véhicules et les structures, ce qui a pour conséquence une progression constante des possibilités de rupture de fatigue. C’est surtout le besoin de légèreté des structures qui fait que l’aluminium est de plus en plus utilisé dans de nombreuses applications. À cette problématique, s’ajoutent celles du vieillissement des infrastructures et de l’utilisation de plus en plus fréquente de la soudure dans les ouvrages de génie, comme c’est le cas pour les ponts, tel que mentionné plus haut.

De toute évidence, pour le comportement d’une composante d’équipement ou d’une structure dont la rupture entraînerait des pertes de vie ou des coûts très élevés, il est important de bien évaluer les charges qui peuvent entraîner la rupture par fatigue, de bien appliquer les méthodes de calcul et de ne pas hésiter à procéder à des essais, lorsque les calculs comportent des inconnues. Même dans les applications où les pertes de vie ou les coûts directement liés à la rupture de fatigue ne sont pas déterminants, il est important de procéder à une bonne analyse de fatigue. La possibilité d’une réparation difficile, d’un rappel de produit, d’insatisfaction de la part des clients et de la perte de réputation d’une compagnie devraient amplement justifier le recours à une vérification approfondie de la fatigue.

## Diapositive 10 :

**9.1.3 Paramètres à prendre en compte**

La fissuration par fatigue se produit rarement dans le matériau de base éloigné des détails d’usinage, des soudures ou des assemblages. Même si la résistance statique de l'assemblage est supérieure à celle des éléments assemblés (ce qui est moins fréquent dans les charpentes d’aluminium que dans les charpentes d’acier), l’assemblage demeure toujours l’endroit critique du point de vue de la fatigue.

Il est bien connu que l’effet combiné des anomalies et des concentrations de contraintes sont à la source de la formation et de la propagation d’une fissure de fatigue (voir la section 9.2), même si les contraintes appliquées se situent nettement au-dessous de la limite élastique (Fy), comme on l’a déjà mentionné. La propagation d’une telle fissure peut conduire à une rupture par plastification de géométrie de l’élément, de la configuration du détail de construction (concentration des contraintes), des contraintes résiduelles, des anomalies dans les soudures, du nombre de cycles de chargement, de l'amplitude et de l’étendue des contraintes, de la vitesse de sollicitation de la section, de la température et de l’environnement (voir la section 9.3).

Certains de ces paramètres sont plus importants que les autres et ils sont fondamentaux pour le développement des outils de calcul de fatigue. Des correctifs seront ensuite apportés à la méthode de base pour tenir compte des autres paramètres et, lorsqu’elles seront requises, des méthodes alternatives seront proposées.

## Diapositive 12 :

**9.1.4 Différence de contraintes**

La figure 9.1 (voir acétate) montre la fluctuation de la contrainte σ en fonction du temps t pour une sollicitation d’amplitude constante, variant entre la contrainte minimale () et la contrainte maximale (). Les essais de fatigue, comme on le verra plus loin, ont permis d’établir que la différence de contraintes (), ou étendue de contrainte, est le paramètre le plus déterminant pour des détails de construction soudés.

 (9.1)

Par convention, les contraintes de traction sont positives et les contraintes de compression sont négatives.

Dans la plupart des cas, les autres paramètres comme les contraintes minimale () et maximale (), leur rapport (R), défini par l’équation qui suit, la contrainte moyenne (), ou encore la fréquence des cycles, par exemple, peuvent souvent être négligés pour le dimensionnement, particulièrement celui des structures soudées (voir la section 9.3).

**Figure 9.1 – Définition des contraintes et effet des contraintes résiduelles de traction**

On pourrait a priori penser que la durée de vie peut être augmentée lorsqu’une partie du cycle de contraintes est en compression. Cela n’est toutefois par le cas, en général, dans les éléments soudés à cause des contraintes résiduelles () de traction introduites par la soudure. Le comportement de la fissure est, en fait, influencé par la somme des contraintes appliquées et des contraintes résiduelles (figure 9.1b). Une durée de vie plus longue peut cependant être obtenue dans certains cas, en introduisant des contraintes résiduelles de compression à l’aide de traitements d’amélioration (ou méthodes de parachèvement) après le soudage (voir la section 9.5[[2]](#footnote-2)).

Lorsque la distribution des contraintes résiduelles est connue ou lorsque ces contraintes sont négligeables, comme dans les matériaux de base ou dans les assemblages rivetés ou boulonnés, il est possible de considérer les effets bénéfiques des paramètres et R dans le calcul de la résistance à la fatigue, comme on le verra à la section 9.3.

## Diapositive 14 :

**9.1.5 Essais de fatigue**

Afin de connaître la résistance à la fatigue d’un détail de construction, il est indispensable d’effectuer des essais de fatigue au cours desquels on soumet des éprouvettes à une sollicitation variable, la plus simple étant une variation de contraintes sinusoïdale, comme celle montrée sur la figure 9.1 (voir acétate 12). L’éprouvette doit être suffisamment grande afin de représenter le détail de construction et les contraintes résiduelles de façon adéquate. Il est également nécessaire de prévoir un nombre d’éprouvettes suffisant afin de pouvoir connaître la dispersion des résultats. En effet, même dans des conditions d’essai identiques, le nombre de cycles jusqu’à la rupture ne sera pas le même pour des éprouvettes apparemment identiques, car il y a toujours de petites différences dans les paramètres pouvant influencer la durée de vie.

Les résultats d’essais sur des éléments soudés sont normalement représentés dans un diagramme sur lequel on reporte en abscisse le nombre de cycles N observés jusqu’à la rupture (ou jusqu’à une dimension de fissure prédéfinie) et en ordonnée la différence de contraintes (figure 9.2 – voir acétate). Ce diagramme est communément appelé diagramme ou courbe S – N, la lettre S représentant la contrainte (stress). L’échelle de l’abscisse est généralement de type logarithmique alors que celle de l’ordonnée peut être soit linéaire (figure 9.2a), soit logarithmique (figure 9.2b).

**Figure 9.2 – Courbes S - N (sollicitation constante)**

## Diapositive 15 :

En choisissant une échelle logarithmique pour chacun des axes, la moyenne des résultats obtenus pour un détail de construction donné peut être exprimée, dans un domaine, compris entre et cycles environ, par une droite ayant l’équation suivante (figure 9.3):

 (9.3)

Dans cette équation, est une constante représentant l’effet du détail de construction, et est la pente de la droite de la moyenne des résultats. Cette même droite sera obtenue analytiquement avec la théorie de la mécanique de la rupture, comme on le verra à la section 9.2.

L’équation (9.3) peut être exprimée par l’équation d’une droite en utilisant les logarithmes des différentes variables :

 (9.4)

La limite supérieure de cette droite () correspond à la résistance ultime statique du matériau. Le domaine correspondant à un nombre de cycles compris entre et est appelé fatigue oligocyclique (fatigue par déformation plastique excessive). La résistance correspondante est surtout importante pour les sollicitations dues aux séismes, pour lesquelles on observe en général un faible nombre de différences de contraintes, mais de valeur très élevée.

La limite inférieure de cette droite () représente la limite d’endurance ou limite de fatigue : cela indique qu’une sollicitation inférieure à cette limite peut être appliquée un très grand nombre de fois () sans qu’une fissure de fatigue ne se produise. Cette valeur est importante pour des éléments soumis à un nombre élevé de petites différences de contraintes, tels que les éléments d’une machine. Pour l’aluminium, on relèvera cependant que l’on n’observe pas une véritable limite de fatigue, mais une droite de pente très faible. Il convient également de préciser qu’une limite de fatigue ne peut être établie qu’à partir d’essais effectués avec des sollicitations d’amplitude constante.

L’établissement d’une courbe de résistance à la fatigue doit tenir compte de la dispersion des résultats d’essais. À cet effet, on se base sur des valeurs représentant une certaine probabilité de survie, par exemple 95% avec un niveau de confiance qui peut être de 75%. La position exacte de la courbe qui en résulte dépend encore du nombre de résultats d’essais dont on dispose. Pour un nombre suffisamment grand (de l’ordre de 60 essais), cette probabilité de survie peut être approchée par une droite parallèle à celle de la moyenne des résultats, située à gauche de celle-ci, à une distance égale à deux écarts types (2s; figure 9.3 – voir acétate)

# Mécanisme de rupture par fatigue

## Diapositive 18 et 19 :

**9.2 Mécanisme de la rupture par fatigue**

**9.2.1 Théorie élastique**

La théorie de la mécanique de la rupture est une science très complexe qui permet d’étudier la propagation des fissures dans les pièces de machines, d’automobiles, d’avions, de turbines ou de structures en général, dont les principaux modes de sollicitation sont les sollicitations alternées entraînant la fatigue.

Cette théorie n’est pas indispensable pour le dimensionnement à la fatigue des structures métalliques, mais elle permet de décrire analytiquement une fissure de fatigue de même que sa propagation et de déduire ainsi la durée de vie d’un élément fissuré. Même si les ingénieurs concepteurs ne font pas souvent appel à cette théorie, il est utile d’en connaître les notions de base pour mieux comprendre le phénomène de la fatigue.

Selon la théorie élastique, on peut expliquer l’effet d’une fissure en considérant une plaque soumise à une contrainte de traction uniforme σ et comprenant un trou (figure 9.4a). Le champ des contraintes dans la plaque est influencé par la présence du trou. La figure 9.4b montre la variation des contraintes le long de l’axe x dans le cas d’un trou elliptique. Pour un trou circulaire, . Cette concentration de contrainte est plus grande pour un trou de forme elliptique et elle tend vers l’infini lorsque le demi-axe tend vers zéro (figure 9.4c). Ce dernier cas représente celui d’une fissure réelle dont le front (la pointe) est aigu.

Les relations conventionnelles contraintes-déformations ne permettant pas d’analyser les contraintes au voisinage du front de la fissure, il a été nécessaire d’introduire une nouvelle notion pour les décrire, soit le facteur d’intensité de contrainte (). Ce facteur dépend de l’amplitude des contraintes appliquées ainsi que de la dimension et de la géométrie de la fissure (figure 9.4d). Il se définit par la relation suivante dans laquelle est un facteur de correction, fonction de :

 (9.5)

**Figure 9.4 – Définition des contraintes au front d’un trou et d’une fissure (voir 18)**

Le cas de base est celui d’une fissure de largeur dans une plaque infinie ( très grand) à deux dimensions, soumise à une contrainte uniforme agissant perpendiculairement à cette fissure. Dans ce cas, . Tous les autres cas peuvent être déduits de ce cas de base par l’application d’un facteur de correction adéquat. Il est possible de trouver des valeurs de facteurs de correction dans la littérature spécialisée. Dans les applications courantes, Y varie entre 0,75 et 3,0.

## Diapositive 21 :

**9.2.2 Propagation de la fissure**

Des essais de fatigue effectués sur des éprouvettes spécialement conçues à cet effet permettent d’observer la relation entre le nombre de cycles N et la dimension de la fissure (figure 9.5a). Il est ainsi possible de distinguer trois phases d’évolution de la fissure: la phase initiale (amorce), la propagation stable et la propagation rapide. La propagation rapide est une phase instable conduisant à la rupture.

Le point initial de la fissure observé dans la première phase (figure 9.5b) est généralement situé sur la surface du spécimen, lorsqu’il n’est pas soudé. Sinon, la fissure donne naissance à un défaut de soudure dans la zone de concentration des contraintes maximales. L’apparence de cette zone est généralement lisse et soyeuse en raison du frottement des surfaces entre elles lors de la propagation des fissures.

**Figure 9.5 – Amorce et propagation d’une fissure de fatigue (voir acétate 21)**

La seconde zone, appelée zone de propagation des fissures ou zone de rupture de fatigue, s’étend de la zone initiale de la fissure à la limite de la zone de rupture. Elle est caractérisée par une symétrie radiale autour du point initial de la fissure, ce qui permet de localiser facilement l’origine de la fissure puisque cette zone est généralement visible à l’œil nu. Le plan contenant la zone de propagation des fissures de fatigue est toujours orienté perpendiculairement à la direction de la contrainte appliquée.

Lorsque la portion restante de la section n’est plus en mesure de résister à la charge appliquée, la troisième phase survient, c’est-à-dire que la rupture finale se produit soudainement. Les caractéristiques géométriques de la zone de rupture finale sont très différentes de celles de la zone de propagation des fissures. Elles s’apparentent à celles de la surface d’une éprouvette fracturée en traction sous chargement statique. Les dimensions relatives des zones de propagation et de rupture finale dépendant de l’intensité des contraintes cycliques, la zone de propagation étant davantage importante lorsque est petit.

La phase initiale peut durer très longtemps pour des pièces usinées; elle peut en revanche être très courte pour des pièces soudées contenant des anomalies importantes. La propagation de la fissure est, quant à elle, très lente au début, mais croît de manière exponentielle au fur et à mesure de l’augmentation de la dimension de la fissure. Il est possible de calculer à partir de la relation a – N (figure 9.5a) le taux de propagation , autrement dit, l’augmentation de la dimension de la fissure par cycle. Il s’agit, bien sûr, d’une valeur moyenne sur un certain nombre de cycles qui dépend de la précision de l’observation possible. Ce taux de propagation correspond à la tangente de la courbe dans le domaine de la propagation stable.

## Diapositive 22 :

Il a été possible de constater une dépendance entre le taux de propagation () et la différence de facteurs d’intensité de contrainte () qui dépend elle-même de la différence de contraintes () appliquée et de la dimension () de la fissure. La différence de facteurs d’intensité de contrainte () s’obtient en remplaçant dans l’équation (9.5) la contrainte () appliquée statiquement par la différence de contraintes () due à la sollicitation de fatigue :

 (9.6)

Différentes relations ont été proposées pour décrire la relation entre le taux de propagation () de la fissure et la différence de facteurs d’intensité de contraintes (). Parmi celles-ci, la plus simple et la plus utilisée est celle de la référence (9.11[[3]](#footnote-3)), valable dans le domaine de la propagation stable :

 (9.7)

Dans cette équation, et sont des constantes de matériau.

La figure 9.6 (voir acétate) montre schématiquement des résultats de mesures du taux de propagation ainsi que sa valeur théorique selon l’équation (9.7), qui est une droite dans la représentation habituelle d’une échelle logarithmique pour chaque axe. Pour les valeurs proches d’une valeur de seuil (threshord), le taux de propagation est très petit ou quasi inexistant. On remarque l’analogie entre la figure 9.6 et la figure 9.3 où, pour une valeur de différence de contraintes () proche de la limite de fatigue, la durée de vie devient très grande. Ainsi, une éprouvette soumise à une très petite sollicitation ou contenant une petite fissure, ou encore une combinaison des deux (car dans la différence de facteurs d’intensité de contrainte interviennent, selon l’équation (9.6), les deux paramètres et ) ne subit qu’une propagation de fissure très lente, voire pas de propagation du tout.

Pour des valeurs élevées de différences de facteurs d’intensité de contrainte (), le taux de propagation () devient très grand, ce qui conduit à la rupture de la section par plastification de la section nette restante.

**Figure 9.6 – Taux de propagation d’une fissure en fonction de la différence de facteurs d’intensité de contrainte**

## Diapositive 24 :

**9.2.3 Calcul de la durée de vie**

La durée de vie totale est essentiellement constituée par la phase initiale de la fissure et celle de la propagation stable (figure 9.5 – voir acétate 21), car la faible contribution de la propagation rapide (ou instable) peut être négligée. De plus, pour les éléments soudés, la phase initiale de la fissure de fatigue est généralement très rapide à cause de la présence d’anomalies. Donc, la durée de vie peut être obtenue analytiquement par l’intégration de l’équation (9.7) dans laquelle Nij est le nombre de cycles nécessaires pour agrandir la fissure de ai à aj, avec :

 (9.8)

Une intégration numérique de l’équation (9.8) est en général nécessaire, sauf dans le cas où l’on peut introduire l’équation (9.6) pour en admettant que le facteur de correction est constant. On obtient alors l’expression suivante dans laquelle est une constante provenant de l’intégration, :

 (9.9)

La relation (9.9), dont tous les termes ont été introduits dans les équations précédentes, permet d’évaluer l’effet sur la durée de vie d’un certain nombre de paramètres (voir la sous-section suivante), dont, par exemple :

* la dimension initiale de la fissure en introduisant (voir la figure 9.5a);
* la dimension critique de la fissure avec ;
* la différence des contraintes ;
* la géométrie et la concentration de la contrainte à l’aide de ;
* les constantes du matériau et .

## Diapositive 25 :

En se limitant pour l’instant à un seul détail de construction, en admettant que les dimensions et pour ce détail sont connues et que le facteur de correction représentant l’influence de la géométrie de la fissure et des concentrations de contrainte du détail est constant au cours de la propagation, l’équation (9.9) devient :

 (9.10)

Dans cette équation, la constante pour le détail de construction est définie par l’équation suivante :

 (9.11)

Le nombre de cycles Nij obtenu à partir de l’équation (9.10) représente la durée de vie du détail considéré, en admettant une propagation de fissure stable à partir de sa dimension initiale jusqu’à sa dimension critique . Le nombre de cycles Nij est uniquement fonction de la différence de contraintes , tous les termes intervenant dans la constante étant des constantes pour le détail considéré.

Il est intéressant de relever que la forme de l’équation (9.10) est identique à celle de l’équation (9.3) qui a été déterminée expérimentalement. La correspondance entre ces deux relations est bonne pour les éléments soudés dont la durée de vie est influencée essentiellement (de 80 à 90 %) par la phase de propagation de la fissure, donc pour lesquels peu de cycles sont nécessaires pour que débute une fissure. En conclusion, la durée de vie observée expérimentalement peut être décrite analytiquement sur la base de la théorie de la mécanique de la rupture. L’exposant utilisé dans l’équation (9.7) pour la description du taux de propagation correspond donc à la pente de la courbe de résistance exprimée par l’équation (9.3). Cet exposant est de l’ordre de 3 pour les aciers de construction, de 2 à 2,5 pour les aciers à très haute limite d’élasticité et d’environ 4 pour l’aluminium. La constante définie par l’équation (9.11) est quant à elle identique à la constante C utilisée dans l’équation (9.3). Elle représente les caractéristiques des détails de construction concernant leur comportement à la fatigue.

## Diapositive 27 :

**9.2.4 Paramètres influençant la durée de vie**

**Dimension initiale de la fissure**

La figure 9.7 (voir acétate 28) traite de l’exemple d’une plaque d’acier de 10 mm d’épaisseur sollicitée en traction, afin de mettre en évidence l’influence de la dimension initiale de la fissure (ao) et de la différence de contraintes () sur la durée de vie. Le nombre de cycles Nij nécessaires pour agrandir la fissure de dimension initiale à une valeur (correspondant à l’épaisseur de la plaque) est indiqué en abscisse. La figure 9.7a permet de montrer que la dimension initiale de la fissure est une valeur importante pour le détermination du nombre de cycles Nij, dans la mesure où une petite fissure initiale (par exemple) permet un grand nombre de cycles, tandis qu’une grande fissure initiale réduit considérablement ce nombre de cycles.

La figure 9.7a illustre également l’effet du seuil de propagation (). Avec les valeurs numériques de cet exemple et pour une différence de contraintes = 200 MPa, on voit qu’aucune fissure dont la dimension initiale est plus petite que 0,3 mm environ ne subit de propagation. Cette valeur est déduite de l’équation (9.6) avec l’exigence que reste inférieure à la valeur de seuil , égale en l’occurrence à dans cet exemple.

Il convient d’ajouter que l’épaisseur de la plaque (qui influence directement la dimension finale de la fissure) n’a que très peu d’influence sur le nombre de cycles Nij, pour autant qu’elle soit nettement plus grande (d’un facteur 10 au moins) que . Ceci ressort de l’équation (9.9), où le rapport apparaît dans le dernier terme de la relation.

**Différence de contraintes**

La figure 9.7b met en évidence l’influence prépondérante de la différence de contraintes . Pour l’exemple d’une fissure de dimension initiale = 1 mm, le nombre de cycles est nettement plus grand pour des sollicitations plus petites. En effet, selon l’équation (9.10), le nombre de cycles Nij est inversement proportionnel à la -ième puissance de la différence de contraintes .

**Figure 9.7 – Effet de la dimension initiale de la fissure et de la différence de contraintes sur le nombre de cycles Nij**

La dimension de la fissure au-dessus de laquelle aucune propagation n’a lieu (seuil de propagation) est également nettement plus grande pour une sollicitation plus petite. Cette observation met en évidence la plus grande sensibilité aux anomalies des éléments fortement sollicités et, par conséquent, la nécessité d’adapter les contrôles des soudures aux conditions d’utilisation.

**Concentration de contraintes**

Les effets de la forme de la fissure et de ses dimensions par rapport à celles (largeur et épaisseur) de la plaque sont contenus dans le facteur de correction . Ces effets sont relativement faibles par rapport à ceux qui sont dus à la différence de contraintes () ou à la dimension initiale () de la fissure. Une estimation de à l’aide de relations telles celles qui sont contenues dans la référence (9.5) ou dans la littérature plus spécialisée, est donc en général suffisante (voir la sous-section 9.2.1).

En revanche, l’effet de concentration de contraintes due, par exemple, à un gousset ou à un autre type d’attache est important, même si le gousset ou l’attache ne participe par la résistance aux charges appliquées à la pièce maîtresse. L’effet de la concentration de contraintes dépend, en réalité, de la dimension de la fissure. On peut en tenir compte en introduisant dans l’équation (9.6) un facteur de concentration de contraintes (), fonction de a. L’équation prend alors la forme suivante :

 (9.12)

Les valeurs du facteur de concentration de contrainte (), pour différentes géométries de fissure, peuvent être obtenues analytiquement, expérimentalement ou à l’aide de calculs par éléments finis. L’intégration de l’équation (9.8) est toujours possible et conduit également à l’équation (9.10) pour autant que soit constant. Dans ce cas, la constante contient toutes les données du détail de construction considéré (, , et ) et les caractéristiques du matériau (, ). Une intégration numérique est par contre nécessaire dans les cas où et/ou sont considérés comme variables au cours de la propagation de la fissure.

## Diapositive 30 :

**9.2.5 Dimension critique d’une fissure**

La propagation d’une fissure de fatigue est possible jusqu’au moment où sa dimension critique est atteinte (figure 9.5a – voir acétate 21). Cette dimension critique est définie soit par la plastification de la section nette restante (aluminium et acier), soit par sa rupture fragile (acier). Il est possible de dire qu’une fissure ne conduira pas à la rupture fragile du détail tant que la valeur de son facteur d’intensité de contrainte () reste inférieure à une valeur critique :

L’équation (9.13) est analogue à l’équation (3.1[[4]](#footnote-4)) dans la mesure où elle exprime que la « sollicitation » doit rester inférieure à la « résistance » . En y introduisant le facteur d’intensité de contrainte défini par l’équation (9.5), il devient possible d’en déduire la dimension critique de la fissure menant à la rupture fragile :

 (9.14)

Il convient de préciser que la valeur critique du facteur d’intensité de contrainte (), appelée également ténacité, est une constante du matériau et ne dépend pas de la géométrie du détail considéré (pour autant que la matériau soit isotrope). La valeur critique du facteur d’intensité de contrainte () dépend toutefois de l’épaisseur de l’éprouvette, de la température ainsi que de la vitesse de sollicitation. La détermination de se fait expérimentalement sur une éprouvette préfissurée. Il existe également des relations empiriques entre la résilience, mesurée avec l’essai Charpy (voir la sous-section 2.9.6) et la valeur .

La figure 9.8 (voir acétate 31) présente la relation entre la contrainte appliquée et la dimension critique de la fissure . Il s’agit de deux plaques d’acier soumises à de la traction, comportant chacune, en surface, une fissure elliptique de profondeur . La plaque de la figure 9.8a ne comporte pas de gousset, ce qui est par contre le cas de la plaque de figurer 9.8b.

On admet que la contrainte appliquée () est environ égale à la moitié de la limite d’élasticité () d’un acier de nuance G40.21-350W. En reportant cette valeur sur l’abscisse de la figure 9.8a, on constate que la dimension critique de la fissure est très grande (). Dans un tel cas, on peut déduire que la plastification de la section nette survient bien avant la rupture fragile.

Toutefois, ce raisonnement change si l’on considère, en plus de la contrainte appliquée , la présence de contraintes résiduelles, comme celles qui sont introduites par la soudure d’un gousset sur la plaque (figure 9.8b). Dans un tel cas, la contrainte effective (égale à la somme des contraintes appliquée et résiduelle) peut facilement atteindre la limite d’élasticité . En reportant cette valeur sur la figure 9.8b, on constate que est beaucoup plus faible () que dans le cas sans gousset. Un tel phénomène, qui a pour conséquence une diminution de la valeur de , se produit également lorsque la température de service est basse (pour les aciers; voir la sous-section 2.9.6) et/ou lorsque la vitesse de chargement est grande (réduction de ).

**Figure 9.8 – Relation entre la contrainte appliquée et la dimension de la fissure pour deux types de plaques d’acier ayant une valeur de = 3000 N.mm-3/2**

## Diapositive 31 :

**Figure 9.8 – Relation entre la contrainte appliquée et la dimension de la fissure pour deux types de plaques d’acier ayant une valeur de = 3000 N.mm-3/2**

# Paramètre de la tenue en fatigue

## Diapositive 34 :

**9.3 Paramètres de la tenue en fatigue**

De nombreuses études sur les alliages d’aluminium ont permis de montrer que, pour des nombres de cycles supérieurs à pour les assemblages soudés et pour le matériau de base et les assemblages mécaniques, l’influence d’une multitude de paramètres est prédominante sur la tenue en fatigue. Les paramètres les plus importants sont passés en revue dans cette section.

**9.3.1 Caractéristiques du matériau**

On a pu observer, lors d’essais sur des éprouvettes non soudées, que la composition chimique, les caractéristiques mécaniques ainsi que la structure microscopique des métaux avaient parfois une influence sensible sur la durée de vie. C’est ainsi qu’une grande résistance à la traction du matériau permet une durée de vie des éprouvettes plus élevée, essentiellement grâce à une augmentation de la phase initiale de la fissure, et non par celle de la propagation. Cet effet bénéfique ne se retrouve malheureusement pas dans des éléments soudés, car leur durée de vie est surtout constituée par la phase de propagation. L’effet de la résistance à la traction du matériau peut par conséquent être négligé pour le dimensionnement.

La différence fondamentale du comportement en fatigue entre un détail soudé et détail non soudé réside dans le fait que dans la composante non soudée, la fissure doit s’amorcer pour, ensuite, se propager, alors que dans la composante soudée, la fissure n'a qu’à se propager. En fait, dans un détail soudé, la fissure prend racine dans un défaut de la soudure, qui peut être considéré comme une imperfection structurale inévitable, quel que soit le dommage causé par la fatigue. En conséquence, la propagation de la fissure est seulement influencée par les conditions géométriques et ne dépend pas de la résistance statique du matériau. En effet, les essais en laboratoire ont confirmé que le taux de croissance des fissures varie en fonction de la résistance en traction du matériau, mais que le taux de propagation n’est que légèrement influencé par les propriétés mécaniques du matériau.

L’inclusion d’une entaille exercée mécaniquement ou résultant du soudage affecte le comportement en fatigue de l'aluminium, surtout des alliages traités thermiquement (séries 6000 et 7000). Des résultats expérimentaux ont montré que le matériau de base ainsi que le matériau d’apport jouent un rôle négligeable dans la tenue en fatigue d’assemblages de pièces en alliage des séries 5000, 6000 et 7000.

Seules les soudures à rainure parfaitement arasées (voir le chapitre VIII) ont démontré une légère variation de résistance en fatigue en fonction du type d’alliage. Cette variation n’existe pas pour les cordons de soudure.

À plusieurs titres, le comportement en fatigue des alliages de corroyage se compare à celui des aciers. Les résultats présentés sur la figure 9.9 (voir acétate) pour des éprouvettes uniformes, entaillées et soudées, montrent clairement que les spécimens uniformes et entaillés mais non soudés ont une tenue en fatigue qui varie en fonction de la résistance en traction du matériau de base, mais que la résistance en fatigue d’assemblages soudés est pratiquement indépendante de Fu. Ainsi, on comprend mieux la nature de la mise en garde quant à l’utilisation des valeurs présentées dans le tableau 2.10[[5]](#footnote-5) du chapitre II.

**Figure 9.9 – Résistance en fatigue d’éprouvettes d’acier soudées et non soudées à N = cycles**

## Diapositive 35 :

En conclusion, même si la courbe S – N pour un détail donné est pratiquement indépendante du type d’alliage d’aluminium, l’utilisation d’alliages avec des propriétés mécaniques améliorées est toujours recommandée dans les cas limites de sollicitations variables répétées qui suivent :

* pour , puisque c’est la résistance ultime statique du matériau qui gouverne lorsque le nombre de cycles est faible, comme on l’a vu à la sous-section 9.1.5 (fatigue oligocyclique);
* pour et élevé, puisque, dans ce cas, la condition de chargement est quasi statique (voir la sous-section 9.1.3);
* lorsque la grande majorité des cycles de charge se situé au-dessus de la limite d’endurance inférieure et que le nombre de cycles à contraintes élevées est très faible (voir la sous-section 9.4.4).

Il convient de signaler que le choix des alliages est un facteur déterminant lorsque la tenue en corrosion doit être prise en compte dans une structure sollicitée en fatigue, comme on le verra à la sous-section 9.3.9, et qu’en général, les pièces forgées et extrudées ainsi que les tôles laminées possèdent une tenue en fatigue comparable. Seules les pièces coulées montrent une tenue en fatigue souvent nettement inférieure à celle des alliages de corroyage, en raison de la présence de porosités et de discontinuités résultant du procédé de fabrication.

## Diapositive 37 :

**9.3.2 Caractéristiques des soudures**

Les caractéristiques des soudures sont un des plus importants paramètres susceptibles d'affecter la résistance en fatigue d’un détail structural puisqu’on impute à la géométrie et aux imperfections (ou anomalies) de la soudure les effets les plus dangereux des concentrations de contrainte et des entailles. Par des essais en laboratoire, on a démontré que les facteurs de concentration de contrainte (contrainte observée sur contrainte nominale) à l’interface entre la soudure et le matériau de base pouvaient varier entre 1,5 et 4,5.

L’effet est moins marqué pour les soudures à rainure en raison de leur géométrie, qui s’apparente à celle des sections soudées, mais il peut augmenter de façon importante si la convexité de la soudure est trop prononcée ou si la soudure est mal exécutée et contient des imperfections (voir le chapitre VIII). Les meilleurs résultats sont obtenus en évitant de conserver les supports envers (ou lattes de soutien) et en arasant les surfaces excédentaires pour les joints à pénétration totale. De toutes évidence, les joints à pénétration partielle sont à proscrire dans les structures soumises à des sollicitations cycliques. La figure 9.10 (voir acétate) présente les résultats d’essais réalisés sur des joints bout à bout avec soudure à rainure, qui démontrent clairement l’influence de la qualité de la fabrication des joints soudés sur la tenue en fatigue.

Le profil des soudures d’angle est aussi un paramètre qui influence grandement la résistance à la fatigue des assemblages soudés. En particulier, une réduction de l’angle du pied du cordon de soudure améliore de façon significative la résistance à la fatigue. Il a aussi été observé que la résistance à la fatigue des joints soudés en aluminium est potentiellement plus sensible à la géométrie du joint que ne l’est celle de l’acier.

Pour la fatigue, les soudures de type GTAW sont préférables aux soudures de type GMAW puisque les soudures obtenues avec le procédé GTAW sont plus régulières et moins convexes. Toutefois, des différences significatives ne semblent exister que pour des soudures à rainure exécutées avec soin, alors que le comportement en fatigue des soudures d’angle demeure pratiquement inchangé.

**Figure 9.10 – Courbe S – N pour quatre types de joints bout à bout avec soudure à rainure**

## Diapositive 38 :

Bien que la géométrie de la soudure soit de loin le paramètre le plus déterminant pour la tenue en fatigue des joints soudés, cette dernière est aussi grandement influencée par la présence d’anomalies dans les soudures. Les principales anomalies qui peuvent être présentes dans les soudures sont montrées sur la figure 9.11 (voir acétate). Du point de vue du comportement quant à la fatigue, les anomalies les plus dangereuses sont, par ordre décroissant : les fissures, les défauts de collage (manque de fusion), les défauts de pénétration, les inclusions et les porosités.

**Figure 9.11 – Anomalies dans les soudures**

Les manques de fusion et de pénétration créent une réduction de l’aire de la section soudée. À l’exemple des fissures, elles sont la cause de concentrations de contraintes importantes aux extrémités des ouvertures et sont, par conséquent, considérées comme très néfastes pour la fatigue (voir la section 9.2). Quant aux inclusions et aux pores, ils affectent négativement la résistance à la fatigue surtout lorsqu’ils sont exposés en surface à la suite d’un arasage de la soudure. Il est recommandé de consulter les chapitres II[[6]](#footnote-6) et VIII[[7]](#footnote-7) dans lesquels plusieurs directives sont émises pour obtenir des soudures qui se qualifient pour la fatigue.

Outre la géométrie et les anomalies, l’autre paramètre lié aux soudures, qui affecte grandement la résistance à la fatigue est celui des contraintes résiduelles induites dans les assemblages par le soudage et les traitements postsoudage, comme on le verra dans la sous-section qui suit.

## Diapositive 40 :

**9.3.3 Contraintes résiduelles**

Les profilés en aluminium, surtout lorsqu'ils sont constitués de pièces soudées longitudinalement, comportent des contraintes résiduelles en équilibre sur la section, tel qu’illustré sur la figure 5.14[[8]](#footnote-8). L’intensité de ces contraintes dépend largement des procédés de fabrication et de soudage. En fait, tous les détails soudés contiennent des contraintes résiduelles. Ces contraintes jouent un rôle déterminant sur la propagation des fissures de fatigue en raison de leur intensité qui, souvent, approche la limite élastique (Fy), mais surtout parce que ce sont des contraintes résiduelles de traction qui se développent dans la région de la soudure.

Pour illustrer le phénomène, on peut considérer, par exemple, la soudure longitudinale reliant les deux segments de plaque montrés sur la figure 9.12a. Lorsque la soudure refroidit, elle tend à se contracter. Cependant, puisque la plaque et la soudure doivent avoir des longueurs compatibles, la plaque résiste à la soudure au moment du refroidissement et se contracte graduellement. Cette résistance a pour effet d’induire des contraintes de traction dans la soudure ainsi que dans une portion de la plaque, afin de maintenir l’équilibre des contraintes internes. Les contraintes ainsi générées sont appelées contraintes résiduelles. La distribution finale et l’intensité des contraintes dépendent de certains paramètres dont la résistance mécanique des alliages de base et d’apport, la géométrie des pièces reliées et les dimensions relatives de la soudure et des pièces. Le facteur le plus important, toutefois, est que l’intensité de la contrainte résiduelle de traction dans la région de la soudure peut être aussi élevée que la limite élastique du matériau, comme en fait foi la figure 9.12b.

Quelques auteurs ont souligné le fait qu’il était difficile d’obtenir une évaluation acceptable de la résistance à la fatigue sans considérer l’effet des contraintes résiduelles. Cet aspect devient critique dans les structures ou détails hyperstatiques pour lesquels l’intensité des contraintes résiduelles est nettement plus grande que celle qui est mesurée dans les spécimens de laboratoire.

**Figure 9.12 – Contraintes résiduelles résultant du soudage d’une plaque (voir acétate)**

## Diapositive 41 :

L’effet principal des contraintes résiduelles est de modifier la valeur du rapport des contraintes par rapport à sa valeur nominale (valeur calculée), tel qu’illustré sur la figure 9.1 (voir acétate). De la même façon, les contraintes moyenne nominale () et maximale () sont en réalité plus élevées à cause de la présence de contraintes résiduelles dont l’intensité avoisine *Fwy*. Il en résulte que les valeurs effectives de R, de et de sont pratiquement indépendantes des valeurs nominales (résultant des charges appliquées). C’est la raison pour laquelle il est largement admis que la différence de contrainte (), définie par l’équation (9.1), est le paramètre le plus significatif susceptible d’affecter la résistance à la fatigue, du moins pour les assemblages soudés.

## Diapositive 42 :

Toutefois, quelques normes considèrent l’influence des paramètres R et pour tenir compte des effets bénéfiques des cas suivants sur la résistance à la fatigue, lorsque les courbes S – N, dérivées pour les conditions les plus critiques (, par exemple), sont utilisées :

* les assemblages ou pièces non soudés (les assemblages boulonnés ou rivetés, par exemple);
* les assemblages ayant subi une relaxation des contraintes après soudage (voir la sous-section 2.5.11);
* les assemblages sollicités partiellement en compression ( négatif ; ).

Les méthodes de calcul seront présentées à la sous-section 9.4.5.

## Diapositive 44 :

**9.3.4 Disposition constructives**

La géométrie du détail de construction est déterminante pour la localisation de la fissure de fatigue ainsi que pour sa vitesse de propagation. Elle en influence donc directement la durée de vie.

Les effets de la géométrie des éléments assemblés et des concentrations de contraintes peuvent être influencés favorablement par une bonne conception des détails de construction. Une bonne conception est en effet importante, car les changements abrupts de géométrie (dus, par exemple, à la présence d’un gousset) dérangent le flux des contraintes. Cela peut être comparé à la vitesse de l’eau dans une rivière, qui est influencée par la largeur de son lit ou par les obstacles qui s’y trouvent. De manière analogue, les contraintes au pied d’un gousset sont plus grandes que les contraintes appliquées. Ce qui explique pourquoi des concentrations de contraintes sont créées par des attachements telles que les goussets, par les trous de boulons, par les soudures ou encore par un simple changement de section.

**Assemblages soudés**

Selon les types de détails, il existe une large gamme de concentrations de contraintes, ce qui se traduit par des valeurs de résistance à la fatigue qui varient beaucoup. Généralement, on fait la distinction entre un bon et un mauvais détail, selon que la disposition géométrique produit ou ne produit pas de concentrations de contraintes sévères. Ainsi, une plaque non soudée risque moins de perturber le flux des contraintes qu’une plaque comportant une soudure à rainure, laquelle se comporte mieux qu’un joint à recouvrement, etc. La fatigue 9.13 (voir acétate) illustre bien le phénomène. On constate donc que les concentrations de contraintes augmentent considérablement lorsqu’on passe d’un détail non soudé à un assemblage soudé à géométrie complexe.

De façon similaire, la concentration des contraintes est plus sévère dans une soudure à rainure transversale que dans une soudure à rainure longitudinale puisque, dans ce dernier cas, la soudure est orientée dans la direction des charges appliquées.

**Figure 9.13 – Influence des détails de construction sur le flux de contraintes**

## Diapositive 45 :

La même remarque s’applique aux cordons de soudure. Ainsi, la concentration des contraintes est plus ou moins grande, selon que les cordons de soudure sont disposés perpendiculairement ou parallèlement à l’axe des contraintes primaires (axe de chargement: figure 9.14a), ou selon qu’ils résistent directement aux charges appliquées ou non (figure 9.14b).

Les détails structuraux donnant lieu aux plus grandes concentrations de contraintes sont, en règle générale, ceux qui comportent des soudures discontinues ou des soudures sollicitées transversalement. Dans le premier cas, les fissures apparaissent aux extrémités des soudures, là où la concentration des contraintes est maximale et, dans le second cas, les fissures apparaissent à la racine ou au pied de la soudure. Les fissures s’amorcent et croissent non seulement dans les soudures qui résistent aux charges, mais aussi dans tous les cas où un changement brusque de la section produit des concentrations de contraintes. Ainsi, certaines dispositions constructives visant à augmenter la résistance statique d’un détail structural (des raidisseurs, des renforts, des surépaisseurs de soudure, par exemple) produisent inévitablement une diminution de la résistance du détail à la fatigue.

**Figure 9.14 – Sévérité des concentrations de contraintes en fonction du type de joint contenant des cordons de soudure (voir acétate)**

## Diapositive 46 :

Dans le cas des joints avec soudures à rainure transversales, la fissure débute au pied de la soudure et se propage dans la pièce dans un plan orienté perpendiculairement à la direction des contraintes. La fissure se propage donc sur l’épaisseur de la pièce, tel qu’illustré sur la figure 9.15a. En règle générale, la fissuration se produit davantage à cause des concentrations de contraintes au pied de la soudure qu’à cause des défauts de la soudure ou du matériau de base. La forme de la soudure joue alors un rôle très important, tel qu’étudié à la sous-section 9.3.2, et il est avantageux de meuler la soudure afin d’augmenter la résistance de la pièce à la fatigue.

Dans les joints avec soudures à rainure longitudinales, les concentrations de contraintes sont moins prononcées, mais elles existent tout de même et se produisent dans les ondulations ou les points d’arrêt et de départ de la soudure. En conséquence, les fissures débutent et se propagent perpendiculairement à l’axe de la soudure lorsque la soudure est continue (figure 9.15b) ou à l’extrémité de la soudure lorsque la soudure est discontinue (figure 9.15c). La résistance à la fatigue peut être améliorée en évitant les positions d’arrêt et de départ dans les opérations de soudage ou en améliorant les conditions aux extrémités des cordons de soudure (utilisation d’appendices de départ et d’arrivée, tel qu’illustré sur la figure 2.47[[9]](#footnote-9), ou de congés, par exemple).

**Figure 9.15 – Fissuration dans les joints avec soudures à rainure (voir acétate)**

## Diapositive 47 et 48 :

L’utilisation d’un congé, pour relier un gousset à l’aile d’une poutre fléchie, peut faire toute la différence entre un bon et un mauvais détail, comme en fait foi la figure 9.16 (voir acétate 47). Le congé canalise le flux de contraintes de façon plus appropriée aux extrémités de la soudure. Le rayon de raccordement permet ainsi à la poutre de supporter, à nombre de cycles égal, une différence de contraintes deux fois plus élevée ou permet de résister, à contrainte égale, à un nombre de cycles au moins dix fois plus élevé.

En ce qui a trait à la fissuration des cordons de soudure d’angle, on peut distinguer deux cas : les joints avec cordons directement sollicités et ceux qui ne le sont pas (voir la figure 9.14b – voir acétate 45).

Lorsque les contraintes sont transmises par une plaque continue, la fissure prend source au pied de la soudure transversale et se propage sur l’épaisseur de la plaque dans un plan normal à la direction des contraintes (figure 9.17a i). La situation n’est pas meilleure lorsque les cordons de soudure d’angle sont orientés selon l’axe des contraintes, à moins que les cordons ne soient continus. Sinon, la fissure s’amorce à l’extrémité du cordon de soudure et se propage dans la plaque perpendiculairement à l’axe des contraintes (figure 9.17a ii).

Les conditions sont encore plus critiques lorsque les cordons de soudure d’angle sont directement sollicités, puisque les contraintes se concentrent au pied du cordon et que l’effet d’entaille se développe à la racine de ce dernier. En pareille situation, il est possible d’identifier trois types de fissures, lesquels sont identifiés sur la figure 9.17b. Dans le pire des cas, la fissure débute à la racine du cordon et se propage à angle dans le cordon lui-même (figure 9.17 b i). Le taux de propagation d'une fissure dans la soudure est plus élevé que celui d’une fissure dans le matériau de base, pour une différence de contraintes donnée. Le nombre de cycles de chargement conduisant à la ruine est, par conséquent, moins élevé.

**Figure 9.16 – Influence d’un congé aux extrémités d’un gousset soudé à une semelle de poutre**

**Figure 9.17 – Fissuration dans les joints avec cordons de soudure d’angle (voir acétate 48)**

Il est préférable que la fissure débute au pied de la soudure et qu’elle se propage dans la plaque en traction (figure 9.17b ii). Il suffit pour cela de fournir une plus grande pénétration () de la soudure dans la plaque d’épaisseur () ou encore, d’augmenter la dimension () du cordon de soudure.

Dans un joint en T, lorsque les contraintes de flexion dans la plaque transversale équivalent ou excèdent celles de traction dans l’autre plaque, la fissure peut se développer au pied du cordon de soudure dans la plaque transversale, tel qu’illustré sur la figure 9.17b iii).

## Diapositive 49 :

**Assemblages boulonnés et rivetés**

La résistance en fatigue des assemblages boulonnés ou rivetés en aluminium a fait l’objet de moins d’études que celle des assemblages soudés, et pour cause. La distribution des contraintes dans les assemblages boulonnés ou rivetés quoique très complexe, comme on a pu le constater dans le chapitre VII[[10]](#footnote-10), est cependant moins critique que dans les assemblages soudés. Les assemblages mécaniques comportent aussi moins d’imperfections, d’anomalies et de points critiques (points chauds) que les assemblages soudés. Leur comportement est aussi plus prévisible et leur fabrication plus facile.

C’est, bien sûr, la présence des trous qui cause les concentrations de contraintes. Le réseau de fissures se développe généralement sur la section nette critique en traction, mais certains auteurs préfèrent utiliser la section brute pour fins de comparaison. C’est le cas, du moins, pour les assemblages boulonnés anti-glissement (section 7.4). La concentration naturelle des contraintes sur la section nette critique est souvent amplifiée par les excentricités, les points de contact direct entre les éléments assemblés ou parce que les connecteurs ne distribuent pas toujours les charges de façon uniforme.

La résistance en fatigue des assemblages mécaniques dépend, entre autre, de la disposition des connecteurs, tel qu’illustré sur la figure 9.18 pour un joint à recouvrement avec une seule rangée de rivets. Plus les rivets sont espacés, plus la concentration des contraintes est grande et plus la résistance à la fatigue est réduite.

**Figure 9.18 – Influence de l’espacement des rivets sur la résistance à la fatigue (voir acétate)**

## Diapositive 50 :

Des études, rapportées dans la référence (9.18), ont conduit aux recommandations sur les dispositions constructives présentées sur la figure 9.19 (voir acétate) pour la résistance optimale en fatigue d’assemblages rivetés à simple recouvrement. Il y a tout lieu de croire que ces recommandations peuvent aussi s’appliquer aux assemblages boulonnés. L’espacement de recommandé pour les joints à simple rangée de rivets correspond pratiquement à l’espacement minimal recommandé pour la fabrication des assemblages mécaniques (voir la figure 7.4[[11]](#footnote-11)). L’espacement optimal est haussé à et la pince longitudinale à lorsque l’assemblage comporte deux rangées de rivets.

**Figure 9.19 – Dispositions constructives recommandées pour un comportement optimal en fatigue de joints rivetés à recouvrement simple**

## Diapositive 51 :

La figure 9.20 (voir acétate) démontre l’importance de la géométrie des assemblages sur la résistance à la fatigue 9.1. La symétrie des assemblages à double recouvrement élimine la flexion qui caractérise les joints à simple recouvrement et améliore la tenue en fatigue.

D’autres résultats, présentés dans la référence (9.19), démontrent que les assemblages mécaniques sont en général plus résistants à la fatigue que les assemblages soudés.

Bien entendu, l’étude en fatigue des assemblages mécaniques ne concerne pas que la section des éléments assemblés. Il faut aussi tenir compte des connecteurs eux-mêmes ainsi que du frottement qui peut se développer entre les éléments assemblés. La référence (9.1) contient une revue intéressante de la littérature sur le sujet. L’influence du frottement sur la résistance à la fatigue fait l’objet d’une courte présentation à la sous-section 9.3.7.

**Figure 9.20 – Influence de la géométrie sur la résistance à la fatigue d’assemblages rivetés en alliage 6061-T6**

## Diapositive 52 :

**Classement des détails de construction**

L’ensemble de l’information disponible sur la résistance à la fatigue des détails de construction est utilisé par les différentes normes pour en arriver à formuler des recommandations pratiques pour les calculs. La façon dont cette masse d’information est traitée varie quelque peu d’une norme à l’autre, comme on le verra plus en détail à la section 9.6. La démarche générale suivie pour la normalisation peut toutefois ressembler à l’exemple suivant, inspiré davantage du modèle européen que nord-américain, puisqu’elle est jugée plus rigoureuse.

On a vu, à la sous-section 9.1.5, que l’analyse des résultats d’essais pour un détail de construction donné permettait la définition de sa courbe de résistance (figure 9.3 – voir acétate 15). Des études ont révélé que les courbes de résistance des divers détails de construction sont en général plus ou moins parallèles. Cette observation peut être expliquée avec l’équation de la courbe (équation 9.10) obtenue à l’aide de la théorie de la mécanique de la rupture. En effet, comme l’exposant ne varie guère pour les alliages de construction couramment utilisés, les courbes S – N deviennent des droites parallèles dans une représentation utilisant une échelle logarithmique pour chacun des axes. La résistance est alors définie par la seule constante (équation 9.11) qui est propre au détail de construction.

Le nombre de détails de construction possibles étant très grand, il en résulte également un grand nombre de courbes de résistance. Cette multitude de courbes ne serait évidemment pas pratique pour le dimensionnement. Dans chaque norme, on définit d’abord une série de courbes normalisées (figure 9.21 – voir acétate) et on classe ensuite chaque détail de construction dans cette grille de courbes. Ces courbes (qui se présentent sous forme de droites en utilisant une échelle logarithmique pour chacun des axes) sont généralement parallèles, équidistantes et elles ont une pente de l’ordre de 3 à 7 pour l’aluminium.

**Figure 9.21 – Courbes de résistance à la fatigue normalisées (basées sur le modèle européen)**

Chaque courbe de résistance est ainsi définie par sa valeur de référence (en MPa) à cycles, pour . La limite d’endurance () est placée d’une façon conventionnelle à cycles, ce qui représente environ 74 % de . Cela ne correspond pas exactement aux résultats d’essais, pour lesquels on a observé des valeurs de limites d’endurance comprises entre cycles (pour les meilleurs détails) et cycles (pour les détails les plus défavorables). Cette simplification apporte toutefois de grands avantages pour le dimensionnement à la fatigue présenté à la section 9.4.

Les détails de construction sont présentés dans les normes à l’aide de croquis. Chaque détail est classé dans la catégorie correspondant à sa valeur de résistance à la fatigue à cycles (modèle européen). Celle-ci correspond à une valeur ayant une certaine probabilité de survie (environ 95 %) établie en tenant compte du nombre d’essais effectués. Pour classifier le détail, on compare ensuite cette valeur de résistance aux valeurs de référence définies à la figure 9.21. Les différents détails de construction sont répertoriés dans plusieurs tableaux selon des critères de construction et de transmission de forces.

## Diapositive 53 :

La figure 9.22 (voir acétate) illustre de façon très simplifiée une telle classification. On comprendra que chaque catégorie comporte plusieurs détails. Dans les croquis, la flèche indique la position et la direction des contraintes pour lesquelles le calcul doit être effectué. En règle générale, la fissure se produit perpendiculairement à la direction de la contrainte principale la plus grande, sauf dans les cas de cisaillement pur.

**Figure 9.22 – exemples simplifiés de détails de construction et de leur classification**

Le classement d’un détail de construction donné dans la catégorie correspondante sous-entend que les exigences mentionnées dans le tableau descriptif soient remplies, en particulier celles relatives à la géométrie (forme, épaisseur, distance au bord, etc.), au procédé de fabrication (soudure manuelle, automatique, avec support envers, etc.) ainsi qu’à la classe de qualité des cordons de soudure. Cette dernière condition comprend également le contrôle des soudures selon les exigences d’assurance de qualité. La catégorie de détail prend en considération la concentration de contraintes, la dimension et la forme de l’anomalie de soudure maximale acceptable, la direction de la contrainte appliquée, les contraintes résiduelles, la forme de la fissure de fatigue, et, dans certains cas, le procédé de soudage et le traitement d’amélioration requis.

Comme on le verra à la section 9.6, ce ne sont pas toutes les normes de calcul qui présentent autant d’information pour décrire les catégories de détails.

Pour conclure cette sous-section, il convient de souligner que les détails de construction doivent être conçus et fabriqués de manière à ce qu’il soit possible de réaliser le contrôle de fabrication (assurance de qualité), de faciliter le contrôle en service et de détecter les éventuelles fissures de fatigue avant qu’un effondrement catastrophique de l’ensemble de la structure en se produise.

## Diapositive 55 :

**9.3.5 Sollicitations**

Le passage d’un véhicule sur un pont crée des sollicitations statiques combinées à des sollicitations variables dans chaque détail de construction de la structure. La figure 9.1a (voir acétate 41) donne un aperçu simplifié de ce à quoi peut ressembler un tel type de chargement. Par contre, le passage de piétons sur une passerelle d’aluminium peut, en général, être considéré comme une charge purement statique, même si les piétons, au même titre que les véhicules, sont des charges qui se déplacent et qui engendrent des variations de contraintes.

Ces deux exemples illustrent bien la problématique à laquelle est confronté le concepteur qui, dans les toutes premières étapes de son calcul de fatigue, doit premièrement bien évaluer les charges qui solliciteront la structure pendant sa durée de vie et, deuxièmement, décider si ces charges sont susceptibles d’engendrer la fatigue des matériaux.

Il existe un grand nombre de structures pour lesquelles les considérations de fatigue sont reconnues depuis longtemps : ponts routiers ou de chemin de fer, ponts roulant, plateformes pétrolières, pylônes, tours, mâts, lampadaires, cheminées, turbines, éoliennes, véhicules routiers, navires, avions, etc. Pour certaines de ces applications, les charges de fatigue (charges variables) sont assez bien déterminées alors que pour d’autres, elles sont parfois purement aléatoires.

L’objectif poursuivi, dans la présente sous-section, n’est pas de présenter une étude exhaustive sur l’analyse des charges de fatigue, mais plutôt de faire prendre conscience de cette problématique, qui est en soi une spécialité, et de guider un tant soit peu le concepteur dans ses choix et ses calculs. Avant d’examiner comment les charges peuvent être traités pour les calculs de fatigue, il convient de définir certains cas types de chargements de fatigue.

**Sollicitations d’amplitude constante**

La charge la plus simple est une charge oscillatoire de forme sinusoïdale d’amplitude constante, telle cette qui est illustrée sur la figure 9.1 et reprise sur la figure 9.23a. C’est ce type de chargement, que l’on peut qualifier de fondamental, qui est utilisé en recherche et par toutes les normes pour générer les courbes S – N utilisées dans les calculs (figure 9.21). On a vu, à la sous-section 9.1.4, que les paramètres qui décrivent pleinement ce type de sollicitation sont la contrainte maximale (), la contrainte minimale (), la différence de contraintes () définie par l’équation (9.1), le rapport des contraintes () défini par l’équation (9.2), et la contrainte moyenne (). Il a été établi, à la sous-section 9.3.3, que la différence de contraintes () était le principal paramètre de chargement à considérer dans les calculs de fatigue des pièces et assemblages, principalement les assemblages soudés, en raison de la présence des contraintes résiduelles. Lorsque ces contraintes sont minimales ou assez bien connues, comme pour les matériaux de base non soudés, les assemblages mécaniques ou les assemblages soudés avec relaxation des contraintes, il est avantageux de considérer les paramètres et .

**Figure 9.23 – Types de sollicitations de fatigue (voir acétate)**

On constate que les charges sont invariablement transformées en contraintes, pour les fins de la discussion, puisque pour les calculs de fatigue, on utilise les contraintes.

Les charges oscillatoires de forme sinusoïdale caractérisent certains types de structures comme les moteurs et les turbines hydroélectriques ou les éoliennes, par exemple, ainsi que les charpentes conçues pour supporter ces appareils. Les vibrations sont généralement induites par un déséquilibre du moteur ou de la turbine.

**Sollicitation d’amplitude variable**

La charge de forme sinusoïdale à amplitude constante est un cas d’exception. Dans pratiquement toutes les applications, l’amplitude varie dans le temps, tel qu’illustré sur la figure 9.23b. Souvent, les sollicitations à amplitude variable ont une période de retour, comme pour un type de camion à plusieurs essieux ou en train qui traverse un pont. Généralement, la sollicitation est aléatoire comme dans pratiquement tous les cas impliquant les charges causées par le vent, les vagues et, à la rigueur, par les séismes (figure 9.23c). Le graphique montrant la variation d’une charge dans le temps est appelé spectre de charge. On verra, à la sous-section 9.4.4, comment traiter les spectres de charge pour évaluer la durée de vie ou la résistance à la fatigue des structures.

## Diapositive 56 :

**Exemples de sollicitations de fatigue**

Il est important de comprendre la relation qui existe entre les charges agissant sur une structure et les contraintes créées à l’intérieur de celle-ci. Pour étudier les sollicitations pouvant causer la fatigue, il faut considérer différents types de structures soumises à des charges de fatigue. C’est à partir de cette information qu’il sera possible, par la suite, d’analyser les contraintes en fonction du temps et de procéder au calcul de la résistance à la fatigue (section 9.4).

L’étude des charges pour différentes applications est grandement facilitée par l’utilisation des nombreuses normes de calcul publiées par des organismes officiels. Une liste assez exhaustive des normes de calcul disponibles est présentée dans les tableaux 3.12[[12]](#footnote-12) et 3.13[[13]](#footnote-13).

**Ponts-routes et ponts-rails.**

Le trafic des poids lourds constitue, du point de vue de la fatigue, la charge variable prédominante sur les ponts-routes. Le volume de trafic à prendre en considération dépend du type de route (autoroute, route principale, route collectrice ou route de desserte) ainsi que de la durée de service prévue. Dans le cas des ponts-rails, les trains de marchandises et les trains de voyageurs constituent la charge de fatigue. Le nombre de passage à prendre en compte dépend de la situation du pont dans le réseau (ligne principale ou ligne secondaire) et de la durée de service prévue de l’ouvrage.

Le comportement dynamique d’un pont est très complexe. Il est influencé par de nombreux paramètres, parmi lesquels on relèvera les caractéristiques dynamiques de la structure (fréquences propres et amortissement), la rugosité du revêtement ou des rails, les caractéristiques du trafic (géométrie, répartition des charges, etc.), les caractéristiques dynamiques des véhicules (ressorts, amortissement, fréquences propres, etc.) et la vitesse de passage. En général, il n’est pas possible d’introduire tous ces paramètres dans un calcul de la structure. Ainsi, dans un but de simplification, les charges « dynamiques » sont habituellement établies en multipliant les charges « statiques » par un coefficient dynamique, qui n’est pas forcément le même pour la vérification de la sécurité à la fatigue et pour celle de la sécurité structurale. Pour la fatigue, il ne doit en effet pas couvrir une valeur maximale, mais doit tenir compte des caractéristiques aléatoires des charges de fatigue. Les codes de calcul, tel celui de la référence (9.24), fournissent généralement toute l’information nécessaire permettant de procéder au calcul de la fatigue des structures de ponts.

**Ponts roulants et voies de roulement**

Les opérations de levage et de mouvement des charges soulevées par les ponts roulants créent des actions verticales et horizontales, lesquelles sollicitent à la fatigue les ponts roulants eux-mêmes ainsi que leurs voies de roulement. Les effets dynamiques de ces charges, dus à l’inertie des masses en mouvement lors des accélérations et des freinages, sont à considérer. Le nombre total de cycles de levage à prendre en compte dépend de la fréquence d’utilisation et de la durée de service prévue.

**Plateformes pétrolières**

Les charges de fatigue dans les plateformes pétrolières proviennent des mouvements produits par les vagues auxquelles ce type de structure est soumis. Les sollicitations engendrées dans la structure dépendent fortement du comportement statique et dynamique de la plateforme. Il faut également mentionner que la résistance à la fatigue peut être réduite par la présence de l’eau salée (voir la sous-section 9.3.9); de ce fait, une protection cathodique de la structure est en général nécessaire.

**Transport par câble**

L’oscillation des cabines de téléférique pendant leur déplacement, et surtout les fréquents chargements et déchargements sollicitent les parties de la cabine assurant leur suspension au câble. Les pylônes sont également exposés aux charges variables dues au passage des cabines, aux forces de déviation des câbles et aux effets du vent.

**Tours, mâts et cheminées, portiques de signalisation aérienne, lampadaires**

Les actions dues au vent sont à l’origine du mouvement et des sollicitations des structures telles que les tours, les mâts, les cheminées, les portiques de signalisation aérienne et les lampadaires, pour ne signaler que celles-ci. L’action combinée du vent avec le comportement statique et dynamique de la structure est prédominante pour les contraintes qui en résultent dans les différents détails de construction.

De nombreux problèmes de fatigue causés par le vent et les vibrations affectent ces structures légères en aluminium, particulièrement celles qui sont situées sur les réseaux routiers. Ce constat est à l’origine d’un effort important de recherche visant à mieux comprendre les charges aléatoires sollicitant ces structures, le comportement dynamique de la structure elle-même (analyse modale, tourbillons décalés, résonance, etc.), ainsi qu’à développer des techniques d’intervention (répartition, renforcement, amortissement, etc.).

Le comportement dynamique des structures légères en aluminium, principalement celles constituées de profilés tubulaires soudés, implique, entre autres, une bonne évaluation des problèmes de tourbillons décalés (voir la sous-section 3.7.4) et des problèmes de résonance. Il est bien connu que la fréquence de la sollicitation entre en phase avec la fréquence naturelle de la structure, les déformations s’emballent pour causer très rapidement la ruine de la structure. Pour éviter de telles situations, on modifie la rigidité de la structure pour changer sa fréquence naturelle de vibration et/ou on augmente l’amortissement du système, de façon à s’éloigner de la zone critique de résonance, tel qu’illustré sur la figure 9.24[[14]](#footnote-14) (voir l’exemple 9.1, à la sous-section 9.7.1[[15]](#footnote-15)).

# Résistance à la fatigue

## Diapositive 59 :

**9.4 Résistance à la fatigue**

**9.4.1 Étapes de calcul**

Les différentes étapes à suivre dans un calcul de résistance à la fatigue sont présentées dans cette sous-section, mais elles peuvent varier d’une application à l’autre (exemples de calcul; section 9.7) :

1. Vérifier la pertinence d’un calcul de fatigue (sous-section 9.3.5).
2. Chercher à minimiser ou à éliminer les charges cycliques (sous-sections 9.3.5 et 9.5.3).
3. Évaluer ou mesurer les charges cycliques (sous-section 9.3.5 et les sous-sections qui suivent).
4. Identifier les sites potentiellement critiques pour la fatigue et calculer les contraintes (sections 9.2 et 9.3).
5. Choisir la méthode de calcul la plus appropriée (section 9.4).
6. Procéder à un calcul préliminaire.
7. Évaluer la robustesse du design et les coûts.
8. Idéalement, procéder à des vérifications expérimentales.

## Diapositive 61 :

**9.4.2 Méthodes de calcul**

Il existe quelques méthodes éprouvées permettant le calcul de la résistance en fatigue des structures soumises à des sollicitations cycliques, mais la plupart sont adaptées à des applications spécifiques. On insistera davantage, dans cette section, sur les méthodes d’application plus générale, telle la méthode qui fait appel aux courbes S – N (figure 9.21 – voir acétate 52) et on ne présentera que brièvement les autres méthodes.

**Diagrammes ou courbes S – N**

C’est, de loin, la méthode la plus facile et la plus utilisée. Lorsque le détail de construction analysé paraît sur la liste des catégories de détails qui accompagne les diagrammes S – N, il ne faut pas hésiter à utiliser cette méthode. En cas de doute, on peut opter pour une catégorie inférieure, mais si le détail n’est pas fiché ou s’il requiert une attention particulière, il est préférable d’utiliser une autre méthode.

Toutes les normes recommandent l’utilisation de courbes S – N mais avec certaines variantes, comme on le verra dans la section 9.6. L’utilisation des courbes S – N diffère selon le type de sollicitation. Ainsi, il est nécessaire de faire la distinction entre les sollicitations à amplitude constante et les sollicitations à amplitude variable (figure 9.23 – voir acétate 55). De plus, les sollicitations à amplitude variable sont traitées quelque peu différemment selon que la sollicitation est récurrente ou non. Chaque cas sera étudié dans les sous-sections qui suivent.

La méthode varie aussi quelque peu en fonction du type de détail considéré. En effet, comme on l’a déjà mentionné à quelques reprises, les courbes S – N s’utilisent directement lorsque les détails sont soudés, mais il est possible d’apporter quelques correctifs pour tenir compte de l’influence des paramètres et lorsque les contraintes résiduelles dans les éléments sont jugées moins importantes, comme dans les assemblages mécaniques, par exemple (sous-section 9.4.5).

La méthode des diagrammes S – N est surtout utilisée pour les applications de génie civil et en aérospatiale.

**Méthode du point critique**

La méthode du point critique ou du « point chaud » (hot spot) consiste à utiliser les contraintes nominales obtenues d’une analyse statique linéaire et à les combiner avec les contraintes calculées ou mesurées à certains points critiques bien identifiés dans la structure, pour évaluer la résistance à la fatigue d’un détail soudé. La méthode fait aussi appel à des courbes S – N spécialement calibrées pour ce type d’application. Généralement une seule courbe est requise.

À l ’origine, cette technique a été développée pour les structures tubulaires soudées en acier des plateformes de forage en haute mer, mais son utilisation se répand graduellement dans d’autres secteurs d’applications structurales, dont les structures d’aluminium. La méthode du point critique est utile lorsque le détail à analyser n’apparaît pas sur les listes de catégories de détails de la méthode des diagrammes S – N.

## Diapositive 62 :

**Méthode des déformations**

La méthode fait appel à des mesures de déformations et à des données pertinentes sur différents alliages pour évaluer la résistance à la fatigue de certains détails particuliers, comme des torus ou des congés, qui sont à l’origine de concentrations de contraintes. La méthode n’est pas encore tout à fait appliquée au calcul des assemblages et c'est la raison pour laquelle elle ne sera pas étudiée dans ce chapitre. La méthode est davantage adaptée au calcul de fatigue de pièces d’automobiles, d’équipements de ferme et de véhicules tout-terrains.

**Mécanique de la rupture**

Un aperçu de cette méthode analytique puissante a été présenté à la section 9.2. La méthode est très utilisée par l’industrie aérospatiale qui a accumulé, au cours des ans, de nombreuses données sur les alliages utilisés dans ce domaine. La méthode ne sera pas davantage étudiée dans ce chapitre.

**Endommagement contrôlé**

En général, on vise à s’assurer que la structure sera en mesure de résister à la fatigue durant toute sa période de vie (variable selon les types de structures), en utilisant des valeurs sécuritaires pour les charges et les données de résistance (les courbes S – N, par exemple). Cela présuppose que les charges et le comportement de la structure en fatigue sont bien connus. En pareil cas, un programme d’inspection de la structure n’est pas essentiel pour assurer la sécurité de la structure. Les ouvrages de génie civil sont généralement traités de cette façon.

Dans un calcul à endommagement contrôlé, on accepte que la fissuration se développe et se propage dans la structure, mais à la seule condition qu’un programme d’inspection obligatoire et bien établi soit mis en place. Lorsque la fissure atteint une longueur préétablie, la pièce doit être réparée ou remplacée. Cette méthode, bien sûr, se fonde sur la théorie de la mécanique de la rupture et, pour cette raison, elle ne sera pas davantage examinée dans ce chapitre.

Le recours à la technique de l’endommagement contrôlé n’est justifié que lorsque le dimensionnement pour toute la durée de vie de la structure entraîne des coûts déraisonnables et que le risque accru de fissuration avant la fin de la vie utile de la structure est jugé acceptable.

**Méthode de bonne pratique**

La méthode de bonne pratique est la seule méthode disponible lorsque la nature, l’intensité ou la fréquence des charges n’est pas connue ou est difficile à évaluer. Le concepteur doit se fier à son jugement ou, encore mieux, doit savoir tirer profit de toute l’information qui existe sur le sujet, entre autres, de l’expérience acquise par l’utilisation de bons ou de mauvais détails structuraux dans des structures similaires à celle qu’il doit analyser. Quelques exemples intéressants sont présentés en annexe dans la référence (9.1). En effet, la méthode de bonne pratique doit être utilisée dans toutes les applications.

**Essais en laboratoire**

Généralement coûteuse, cette méthode s’impose lorsque le comportement d’un détail structural ou les caractéristiques du chargement sont mal définis ou, encore, lors du développement d’un nouveau type de structure. Chaque norme de calcul présente une série de directives sur la façon de conduire des essais de fatigue. C’est aussi une règle de bonne pratique que de procéder à quelques essais sur des prototypes avant de commercialiser un produit ou en d’autres occasions qui le justifient.

## Diapositive 64 :

**9.4.3 Sollicitation à amplitude constante**

Les courbes S – N présentées aux sous-sections 9.1.5 et 9.3.4 ont été obtenues expérimentalement en considérant des charges cycliques à amplitude constante. Ce type de sollicitation est pratique puisqu’il se reproduit facilement en laboratoire et qu’il permet de bien contrôler la différence de contraintes () considérée à juste titre comme le paramètre le plus significatif pour définir la résistance à la fatigue d’un détail de construction, comme on l’a déjà vu à quelques reprises.

Une courbe S – N typique est reproduite sur la figure 9.27 (voir acétate). On y distingue trois segments de droite. Pour des valeurs de inférieures à ( dans certains cas), on a la limite supérieure () qui correspond à la résistance ultime statique du matériau. Pour un nombre de cycles () compris entre et , la droite de pente négative est définie par l’équation (9.3). Enfin, pour supérieur à , la droite horizontale représente la limite d’endurance (), aussi appelée limite de fatigue puisque toute sollicitation d’amplitude constante dont la différence de contraintes est inférieure à cette limite peut être appliquée un très grand nombre de fois sans qu’une fissure de fatigue se produise. La limite est quelque peu arbitraire, mais elle est utilisée presque universellement pour l’aluminium.

**Figure 9.27 – Calcul de la résistance à la fatigue ou de la durée de vie d’un détail de construction pour une sollicitation d’amplitude constante**

Il y a deux façons d’utiliser les courbes S – N pour une sollicitation d’amplitude constante. Lorsqu’on connaît la différence de contraintes qui sollicite un détail de construction (un point d’un assemblage d’une charpente d’aluminium ou une pale de turbine, par exemple), on utilise la courbe avec cette valeur de et on obtient le nombre de cycles () que le détail ou élément de structure sera en mesure de subir avant la rupture par fatigue. Ainsi, pour une différence de contraintes de 50 MPa, évaluée en considérant les charges d’utilisation, c’est-à-dire les charges non pondérées, on obtient sur la courbe S – N de la figure 9.27 qui représente le plus fidèlement le détail de construction considéré.

La durée de vie de l’élément de construction ou de la structure, si l’élément de construction est identifié comme étant le plus critique pour cette dernière, est évaluée en considérant la fréquence de la sollicitation. Ainsi, à une fréquence d’un cycle par seconde de la différence de contraintes de 50 MPa, correspond une durée de vie de 11,6 jours (). On comprend, alors, qu’on a tout intérêt à garder la différence de contraintes d’un moteur déséquilibré, par exemple, à un niveau inférieur à la limite d’endurance établie pour le détail considéré critique. En pareil cas, on procède à ce qu’il est convenu d’appeler un dimensionnement pour une durée de vie infinie de la structure plutôt qu’un dimensionnement pour une durée de vie sécuritaire de cette dernière.

L’autre façon d’utiliser les courbes S – N est d’évaluer le nombre de cycles correspondant à la durée prévue d’un ouvrage et, à l’aide de la courbe S – N appropriée, d’obtenir la différence de contraintes qu’il ne faudra pas dépasser pour le détail jugé plus critique. Le dimensionnement d’une structure pour la rendre résistance à la fatigue est donc un processus itératif ou d’essais et d’erreurs qui converge assez rapidement (exemples 9.2 et 9.4; section 9.7).

## Diapositive 66 :

**9.4.4 Sollicitation à amplitude variable**

Généralement, les charges d’exploitation agissant sur les structures créent des contraintes variables dans chaque élément de la structure, tel qu’illustré sur les figures 9.23b et c (voir acétate 66). Dans le cas d’un point, par exemple, l’historique des contraintes (ou évolution de la contrainte en fonction du temps), peut être obtenu à l’aide de la ligne d’influence de la contrainte dans le détail considéré.

L’analyse de l’historique des contraintes sert essentiellement à identifier les valeurs numériques des paramètres qui sont prépondérants pour la détermination de la résistance à la fatigue, à savoir la différence de contraintes et le nombre de cycles. Une comparaison de l’historique des contraintes des figures 9.23b et c avec la variation sinusoïdale des contraintes représentée à la figure 9.23a (voir acétate 64) met en évidence le peu de ressemblance entre ces deux types de sollicitations. Il est donc nécessaire, afin de pouvoir appliquer la théorie de la fatigue exposée dans ce chapitre à des cas réels de sollicitations, d’extraire de l’historique des contraintes une série de différences de contraintes.

Sur la base de l’historique des contraintes de la figure 9.23b, on peut constater que chaque passage de train correspond à une grande différence de contraintes, suivie de plusieurs différences de contraintes plus petites. Il existe différentes méthodes permettant d’analyser les historiques des contraintes. On citera parmi celles-ci la méthode dite du réservoir et celle de la goutte d’eau. Ces deux méthodes, qui donnent des résultats identiques, si elles sont appliquées correctement, permettent une bonne définition des différences de contraintes. Pour fins d’illustration, seule la méthode du réservoir sera décrite.

## Diapositive 67 :

**Méthode du réservoir**

Le principe de la méthode du réservoir, généralement utilisée pour des sollicitations récurrentes d’amplitude variable, est illustré sur la figure 9.28 (voir acétate). L’historique des contraintes qui y est donné est identique à celui de la figure 9.23b et est répété pour plus d’un passage de train. Les différentes étapes permettant d’établir les différences de contraintes peuvent être résumées ainsi :

1. La surface au-dessus de la courbe est remplie d’eau (niveau AG).
2. Un trou est percé au point le plus bas de la courbe (point F) pour laisser écouler l’eau. La différence entre le niveau d’eau original (AG) et celui du point le plus bas (F) correspond à la plus grande différence de contraintes .
3. Le niveau d’eau restant est maintenant plus bas que le niveau original AG. Il est, de plus, différent selon les zones de l’historique des contraintes, c’est-à-dire à A’C et C’E. Un trou est percé au point le plus bas de chacune de ces zones (B, et ensuite D) et les différences de contraintes correspondantes, et , sont prises en compte.
4. Pour des historiques de contraintes plus complexes, ces opérations sont répétées jusqu’à un écoulement total de l’eau. Le résultat final est présenté en tableau sur la figure 9.28a.

**Figure 9.28 – Exemple du comptage des différences de contraintes par la méthode du réservoir**

## Diapositive 68 :

**Spectres de différences de contraintes**

Ce type de comptage est ensuite effectué pour chaque passage de train. Si c'est le seul type de train qui sollicite le pont pendant toute la durée de vie prévue de l’ouvrage, l’ensemble des différentes de contraintes () peut alors être représenté sous la forme de l’histogramme (ou spectre de différences de contraintes) illustré sur la figure 9.28b. Une autre façon de présenter les résultats est montrée sur la figure 9.28c).

Dans un cas réel, le pont de chemin de fer est sollicité par plus d’un type de train. En considérant les différents types de trains et leur nombre respectif dans le trafic à considérer pendant toute la durée de service prévue, le spectre de différences de contraintes peut alors prendre la forme de l’histogramme montré sur la figure 9.29 (voir acétate). Il convient de souligner que chaque section de pont, donc chaque détail de construction, est soumis à un histogramme de différences de contraintes et à un nombre total de cycles qui lui sont propres. Cela provient du fait qu’en général, la ligne d’influence de chaque détail de construction est différente.

**Figure 9.29 – Exemple d’un spectre de différences de contraintes (plusieurs types de trains)**

## Diapositive 69 :

Très souvent, les spectres de différences de contraintes sont complexes et peuvent comporter plusieurs niveaux de différences de contraintes placés en ordre décroissant, si le format utilisé est celui de la figure 9.28c (voir acétate 67), par exemple. Un exemple d’histogramme relativement complexe est présenté sur la figure 9.30 (voir acétate 69). Pour faciliter les calculs, il est possible de réduire le nombre de colonnes. Une approche sécuritaire consiste à combiner les colonnes en groupes plus larges contenant le même nombre de cycles, mais dont la différence est égale à celle de la colonne la plus haute du groupe. Il est toutefois plus précis de considérer la moyenne pondérée de toutes les colonnes d’un groupe en utilisant l’équation suivante dans laquelle est l’inverse de la pente de la courbe S – N considérée pour le détail structural :

 (9.16)

L’utilisation de la moyenne arithmétique va toujours s’avérer non sécuritaire et ne doit pas être considérée.

**Figure 9.30 – Spectre de différences de contraintes simplifié**

## Diapositive 70 :

**Cumul des dommages individuels**

Il convient de rappeler que les courbes permettant d’établir la résistance à la fatigue (courbes S – N des figures 9.3 (voir acétate 15) ou 9.21 (voir acétate 52), aussi appelées courbes de Wöhler, en Europe) ont été obtenues à partir d’essais effectués avec une différence de contraintes () constante. Les sollicitations réelles dans une structure, comme on vient de le voir, sont cependant constituées de différences de contraintes () différentes les unes des autres. La question se pose alors d’estimer l’influence de ces différentes sollicitations sur la durée de vie de l’ouvrage.

La courbe S – N reproduite sur la figure 9.31 (voir acétate 70) exprime, en fait, que pour chaque niveau de différence de contraintes (), le nombre de cycles jusqu’à la ruine vaut . Selon Palmgren, on peut en déduire que chaque cycle de différence de contraintes () crée un dommage individuel , et que cycles de différences de contraintes () créent un dommage partiel :

 (9.17)

 (9.18)

En présence d’un histogramme de différences de contraintes, tels ceux des figures 9.28 (voir acétate 67) et 9.29 (voir acétate 68), il faut comptabiliser l’ensemble des dommages dus aux niveaux de différences de contraintes (). Le dommage total s’exprime donc ainsi :

 (9.19)

Sur la base d’essais, Miner a trouvé que la rupture par fatigue se produisait lorsque la somme totale des dommages partiels atteignait une valeur proche de 1.0. Suivant les applications, cette valeur peut en réalité avoir une grande dispersion, comprise entre environ 0.60 et 1.5. Elle est toutefois généralisée dans beaucoup d’applications ainsi que dans les normes et elle est jugée assez précise pour un calcul préliminaire. La règle de Palmgren-Miner, souvent simplement appelée règle de Miner, s’exprime de la façon suivante :

 (9.20)

La valeur de signifie que la durée de vie est atteinte. Il est donc important de rester au-dessous de cette valeur limite lors du dimensionnement d’un détail de construction sollicité par des charges de fatigue ().

L’usage de l’équation (9.20) s’est révélé suffisamment fiable pour être utilisé de façon générale pour les éléments soudés de ponts et de ponts roulants. On sera toutefois prudent quant à son application à d’autres structures, notamment celles qui sont soumises à des surcharges occasionnelles (sollicitations nettement plus élevées que les sollicitations habituelles) telles que les plateformes pétrolières ou les avions.

## Diapositive 71 :

**Cumul des dommages**

La figure 9.32 (voir acétate 71) représente l’histogramme des différences de contraintes () de la figure 9.29 (voir acétate 68) superposé à la courbe de résistance à la fatigue de la figure 9.31, ceci dans le but d’évaluer le cumul des dommages résultant des différents niveaux de différences de contraintes (). L’histogramme est tourné de 90° et sa forme est déformée à cause de la transformation logarithmique de l’axe des . On remarque également qu’une partie des différences de contraintes () se situe au-dessous de la limite d’endurance . Se pose alors la question de l’effet de cette limite de fatigue sur le calcul des dommages. Trois différentes approches de cette question sont examinées dans les paragraphes qui suivent.

**Figure 9.32 – Histogramme des différences de contraintes et courbe S – N pour le calcul des dommages**

## Diapositive 72 :

1. **Sans considération de la limite de fatigue**

La première approche ignore la présence de la limite de fatigue en utilisant la courbe définie par l’équation (9.3) sur l’ensemble du domaine – . Autrement dit, toutes les différences de contraintes () sont comptabilisées dans le calcul des dommages, ce qui représente une approche conservatrice avec laquelle on sous-estime la durée de vie.

En utilisant l’équation (9.3) appliquée à dans l’équation (9.19), le dommage total () dû à l’ensemble des niveaux de différences de contraintes () de l’histogramme peut s’écrire ainsi :

 (9.21)

Afin de pouvoir simplifier la vérification de la sécurité à la fatigue, il est pratique de disposer d’une différence de contraintes équivalente (), qui représente l’effet de fatigue de l’ensemble des différents niveaux de différences de contraintes (). En se basant sur le nombre total de cycles , le dommage total pour cette différence de contraintes équivalente () peut être exprimé, en analogie avec l’équation (9.21) par la relation suivante :

 (9.22)

En comparant les équations (9.21) et (9.22), avec la condition que le dommage total soit identique dans les deux cas (ce qui doit être le cas, car les deux expressions sont basées sur la même courbe de la figure 9.32 – voir acétate 71), il est possible d’exprimer explicitement cette différence de contraintes équivalente () :

 (9.23)

La valeur de exprime en quelque sorte une moyenne pondérée des différences de contraintes (), où la pondération se fait avec l’exposant représentant la pente de la courbe de résistance. Autrement dit, un cycle de différence de contraintes , dont la valeur est le double d’un autre, intervient avec un poids huit fois plus grand (pour ) dans la valeur de la différence de contraintes équivalente Aoe. L’utilisation de la différence de contraintes équivalente () est pratique dans le cas où les courbes de résistance à la fatigue sont parallèles et de pente constante pour toutes valeurs de (figure 9.32). On notera la similitude entre l’équation (9.16), qui s’applique à un nombre limité de différences de contraintes sur l’histogramme (spectre) de la figure 9.30 (voir acétate 69), et l’équation (9.23), laquelle s’applique à l’ensemble des différences de contraintes de l’histogramme.

## Diapositive 73 :

**b) Avec considération de la limite de fatigue**

La deuxième approche possible tient compte du fait que les différences de contraintes () plus petites que la limite de fatigue permettent théoriquement une durée de vie infinie. Il faut toutefois prendre garde au fait que cette observation a été faite lors d’essais à amplitude constante. Une application aux amplitudes variables n’est possible que dans le cas où toutes les différences de contraintes de l’histogramme sont au-dessous de la limite d’endurance. Dans ce cas particulier seulement, une durée de vie tendant vers l’infini () peut être obtenue. Cela est important pour certains éléments de machines ou de véhicules de transport qui ont à supporter un très grand nombre de cycles.

Examinons maintenant un histogramme dont une partie des différences de contraintes () se situe au-dessus de la limite d’endurance et l’autre partie au-dessous (figure 9.33 – voir acétate 73). Si le cumul des dommages des différences de contraintes supérieures à la limite d’endurance peut s’effectuer avec l’équation (9.21), il n’en est pas de même pour les différences de contraintes inférieures à la limite d’endurance. La théorie de la mécanique de la rupture permet pour celles-ci de dire qu’elles ne contribuent pas à la propagation de la fissure aussi longtemps que la valeur de leur différence de facteurs d’intensité de contrainte , donné par l’équation (9.6), reste inférieure à la valeur du seuil de propagation , (figure 9.6 – voir acétate 22).

Il convient de rappeler que la différence de facteurs d’intensité de contraintes tient compte à la fois de la différence de contraintes () et de la dimension () de la fissure. C’est ainsi qu’une fissure ne se propage pas lorsque, pour une différence de contraintes (), la valeur de est inférieures à . Une fois que la fissure a atteint une certaine dimension, cette même différence de contraintes va contribuer à sa propagation. On ne peut, par conséquent, pas négliger complètement la partie de l’histogramme située au-dessous de la limite d’endurance supérieure (), car elle contribue au cumul des dommages lorsque la fissure devient grande. Pour éviter de devoir effectuer un calcul du taux de propagation à l’aide de la mécanique de la rupture, on utilise une courbe de résistance, ayant une pente différente de la pente de la courbe , pour le cumul des dommages des différences de contraintes situées au-dessous de la limite d’endurance (, par exemple, ce qui donne, pour , une valeur de égale à 5).

**Figure 9.33 – Effet des différences de contraintes () en dessous des limites d’endurance et**

# Méthodes d’intervention

## Diapositive 76 :

**9.5 Méthodes d’intervention**

Comme pour les structures sollicitées de façon statique, les structures sujettes à la fatigue requièrent certaines interventions dans le but d’assurer leur intégrité : inspection, amélioration, prévention, réparation et renforcement, pour ne citer que celles-là. La différence est que non seulement certaines sont particulières, mais elles sont aussi plus fréquentes.

L’objectif de cette section est de faire un survol des principales méthodes d’intervention qui caractérisent les structures sollicitées en fatigue dans le but de mettre le lecteur sur des pistes et non d’en faire un spécialiste.

## Diapositive 78 :

**9.5.1 Inspection**

L’ingénieur de conception a la responsabilité d’évaluer la durée de vie en fatigue d’une structure nouvelle ou déjà en service et, si nécessaire, d’établir un protocole d’inspection. Si l’inspection révèle la présence de fissures, sa responsabilité l’engage à proposer des recommandations sur les actions à prendre : réparation, renforcement, intervention sur les charges ou remplacement de la structure. Quelle que soit l’intervention, elle requiert une bonne connaissance de la théorie de la fatigue ou de la propagation des fissures et une bonne dose d’expérience.

Lorsqu’une fissure est identifiée dans une structure, le risque est grand qu’il y en ait d’autres. La réparation d’une seule fissure ne suffit donc pas. De plus, si aucune action n’est prise pour éliminer la cause de la fatigue, des fissures apparaîtront ailleurs dans la structure. La découverte de fissures doit donc être prise sérieusement et doit entraîner l’intervention de spécialistes.

Pour la fissuration, un protocole d’intervention acceptable comprend les étapes suivantes:

1. Procéder à une analyse pour déterminer la durée de vie d’une nouvelle structure ou la durée de vie résiduelle d’une structure existante. Les points critiques de la structure sont ainsi identifiés.
2. Localiser les points critiques sur les plans.
3. Au besoin, proposer un protocole d’inspection de la structure et insister pour que les inspections soient conduites par du personnel qualifié.
4. Si des fissures sont identifiées, proposer des méthodes adéquates de réparation et de nouvelles procédures d’inspection.

La découverte de fissures dans un ouvrage peut entraîner les actions suivantes :

1. La fermeture d’une structure lorsqu’elle n’est plus en mesure de remplir ses fonctions.
2. Une réduction des charges, pour que la structure soit utilisée sécuritairement.
3. En raison de son hyperstaticité, la structure étant jugée sécuritaire sous les charges existantes, l’établissement d’un programme d’inspection plus serré et, possiblement, des réparations mineures.

## Diapositive 79 :

L’inspection d’une structure pour la fatigue est généralement une opération difficile et coûteuse. La pré-identification des zones critiques pour la fissuration facilite cette opération, mais une inspection plus générale est parfois requise.

Plusieurs méthodes d’identification des fissures de fatigue sont mises à la disposition des inspecteurs; chacune a ses mérites et ses limites d’application.

1. **Inspection visuelle.** – La première inspection doit toujours être visuelle et être effectuée avant que les surfaces ne soient nettoyées. C’est ainsi que peuvent être rapidement identifiées les fissures les plus importantes, donc les plus critiques. Une loupe (10X) et un bon éclairage sont les outils de base de l’inspecteur pour ce mode d’investigation
2. **Liquide pénétrant coloré.** – C’est la méthode la plus courante et la moins dispendieuse.
3. **Ultrason.** – Cette méthode permet la détection de petites fissures, même cachées, dans des plaques de plus de 3 mm d’épaisseur. Elle doit toutefois être utilisée par des inspecteurs très expérimentés.
4. **Émissions acoustiques.** – la méthode utilise des ondes sonores de très haute fréquence comme dans le cas précédent, mais elle est plus limitée dans ses applications puisqu’elle ne permet pas toujours la détection des petites fissures. Elle n’est pas tout à fait adaptée à l’inspection des ponts.
5. **Rayons X.** – La méthode permet surtout de mesurer le manque de fusion des soudures à rainure et nécessite un bon contrôle.
6. **Carottage.** – L’essai n’est pas toujours destructif et permet d’interpréter les résultats obtenus par d’autres techniques, comme les ultrasons. Les bords du trou sont meulés et un liquide pénétrant est utilisé pour vérifier si la fissure ne se propage pas au-delà du trou. Un boulon en acier galvanisé à haute résistance peut être inséré dans le trou et être précontraint pour stabiliser la fissure.

## Diapositive 81 :

**9.5.2 Amélioration**

On a vu, à la sous-section 9.3.2 (figure 9.11 – voir acétate 81), que les soudures contiennent des anomalies externes (surépaisseur, sous-épaisseur, caniveaux, décalage des bords) ou internes (fissures, défauts de collage, manque de pénétration, inclusion et pores) qui constituent des fissures initiales et/ou créent des concentrations de contraintes. Ces anomalies se situent dans des zones de discontinuités géométriques créées par les changements de section dans un détail soudé. L’ensemble de ces effets se produit en général dans la zone influencée thermiquement par la soudure, dans laquelle des contraintes résiduelles, souvent de traction, sont présentes (sous-section 9.3.3). Les pieds des cordons de soudure constituent un endroit particulièrement sensible à ces concentrations de contraintes et à ces contraintes résiduelles.

Les traitements d’amélioration (ou méthodes de parachèvement) ont pour but de réduire les effets néfastes des concentrations de contrainte et des contraintes résiduelles de traction pour améliorer la résistance à la fatigue des détails de construction. La résistance d’un joint bout à bout, par exemple, peut être sensiblement augmentée (changement de catégorie de détails; voir les figures 9.21 (acétate 52) et 9.22 (acétate 53)) lorsqu’il est meulé et la résistance d’une soudure longitudinale augmente lorsque la discontinuité de la soudure est supprimée. Dans le premier cas, on supprime l’effet d’entaille du caniveau et, dans le deuxième cas, on supprime les concentrations de contraintes à chaque extrémité de petits tronçons de soudure. Une augmentation supplémentaire peut être obtenue par des soudages automatiques, qui permettent de réduire le nombre de discontinuités dues aux arrêts de soudage.

## Diapositive 82 :

Il existe par ailleurs des traitements d’amélioration pouvant être appliquées spécifiquement au pied des cordons de soudure utilisés pour fixer, par exemple, des attaches des raidisseurs ou des goussets. On distingue deux groupes de traitements :

1. Le premier groupe comprend les méthodes destinées à améliorer la forme géométrique, en enlevant en même temps, dans la mesure du possible, les anomalies situées au pied du cordon de soudure. Le meulage et le fraisage sont actuellement les méthodes les plus couramment employées, même s’il semble qu’elles ne conduisent pas toujours à de grandes améliorations. Ces techniques sont illustrées sur la figure 9.40 (voir acétate 83). D’autres techniques, telles que la refusion GTAW (sans métal d’apport) ou PAW (voir la section 8.3), qui consistent en une refonte des zones critiques, sont parfois plus efficaces, mais les opinions sont partagées, comme en font foi les résultats présentés sur la figure 9.41 (voir acétate 84).
2. Le second groupe de traitements a pour but d’introduire des contraintes résiduelles de compression, à la place de celles de traction, aux endroits contenant les anomalies de soudure. De telles contraintes résiduelles sont dues à la plastification locale créée par le martelage à l’aide d’un burin, d’aiguilles ou par grenaillage; le martelage avec un burin étant le plus efficace. Ce sont les contraintes résiduelles de compression qui ont pour effet de garder la fissure fermée pour la totalité ou une partie du cycle de différence de contrainte () appliqué (voir la figure 9.1 – voir acétate 41). Seule une partie réduite de la différence de contraintes contribue à la propagation de fissure, ce qui peut augmenter, parfois sensiblement, la durée de vie (jusqu’à 5 à 10 fois pour le martelage avec un burin).

Les trous de boulons dans les éléments en aluminium peuvent être soumis à une expansion à froid afin d’augmenter leur résistance à la fatigue.

On peut dire, d’une manière générale, que le second groupe de traitements est plus efficace que le premier, et que les traitements d’amélioration sont plus efficaces pour des détails de construction ayant une faible résistance à la fatigue. Il est cependant nécessaire de mentionner qu’il est actuellement encore difficile de contrôler la qualité des traitements d’amélioration appliqués. Une fois le détail amélioré, il est important de vérifier lequel des détails attenants devient à son tour déterminant. Il convient de répéter qu’aucun traitement d’amélioration ne peut remplacer la réflexion nécessaire au début du projet pour concevoir des détails de construction ayant une bonne résistance à la fatigue.

À l’étape de la fabrication, il est possible d’améliorer la tenue en fatigue des assemblages en exerçant un bon contrôle des paramètres de soudage pour éviter la formation de défauts et une bonne maîtrise de l’accostage et du bridage pour réduire les dénivellations, les défauts angulaires et, dans une certaine mesure, les contraintes résiduelles. Enfin, dans les structures d’aluminium, il est toujours avantageux du point de vue de la fatigue, de placer les soudures dans les zones de moindres sollicitations.

## Diapositive 84 :

**Figure 9.41 – Influence des techniques d’amélioration des cordons de soudure d’angle sur la durée de vie de l’assemblage**

## Diapositive 86 :

**9.5.3 Prévention**

Comme on l’a mentionné plus haut, lorsqu’une fissure est découverte à un endroit donné d’une structure, il est fort probable qu’il y ait fissuration ailleurs dans la structure. En conséquence, si rien n’est fait pour améliorer les conditions de fatigue à ces endroits, les fissures se propageront et entraîneront inévitablement la ruine de l’ouvrage. Il faut donc localiser ces zones potentielles de fissuration et prendre les mesures nécessaires pour améliorer leur résistance à la fatigue ou, encore mieux pour prévenir la fissuration.

Il a été prouvé que les mesures visant à diminuer les différences de contraintes dans la structure sont les plus efficaces pour prévenir le développement supplémentaire des fissures. Il faut toutefois s’assurer que la susceptibilité à la fissuration par fatigue n’est pas augmentée ailleurs dans la structure par suite des mesures qui ont été prises. C’est ce qui risque de se produire lorsque la rigidité locale de la structure est modifiée et que la réponse de la structure aux vibrations et aux charges est altérée.

Il existe une série de mesures effectives qui visent à prévenir l’accroissement de la fissuration, ou encore, à améliorer le comportement global ou local en fatigue d’une structure à l’étape de la conception :

1. Réduire les différences de contraintes.
2. Réduire le nombre des cycles de différence de contraintes critiques.
3. Réduire les risques d’amplification dynamique, tel l’impact ou la résonance. Il suffit, dans ce dernier cas, d’augmenter la rigidité pour que la fréquence propre de la structure se situe au-dessus des fréquences dangereuses ou d'ajouter du poids, pour réduire l’amplitude au-dessous du niveau dangereux (figure 9.24). Pour les structures tubulaires, installer des dispositifs de déviation (lames hélicoïdales, ailettes longitudinales) pour empêcher la formation de tourbillons alternés (figure 3.9[[16]](#footnote-16)).
4. Abaisser le niveau des vibrations en augmentant l’amortissement, en ajoutant du poids ou en intervenant au niveau des supports et des appuis de la structure. Il est ainsi possible d’introduire des éléments glissants pour absorber l’énergie par friction, d’ajouter des dispositifs de retenue, tels que des haubans ou d’introduire des dispositifs capables d’amortir ou de détruire la régularité de l’oscillation, comme :
* un simple câble suspendu dans un mât tubulaire;
* quelques masses attachées à des amortisseurs hydrauliques;
* des amortisseurs à résonance, accordés sur la fréquence propre de la structure;
* une masse, maintenue avec un certain jeu, de façon que tout mouvement provoque un choc sur la masse.
1. Utiliser des techniques pour améliorer la résistance à la fatigue de la structure à des endroits jugés critiques (sous-section 9.5.2).
2. Percer un trou à la pointe des fissures pour en ralentir ou en arrêter la propagation (sous-sections 9.5.1 et 9.5.4).
3. Prendre des dispositions contre la corrosion de façon à s’assurer que la résistance à la fatigue des structures exposées à des environnements corrosifs ne soit pas affectée (sous-section 9.3.9).

## Diapositive 88 :

**9.5.4 Réparation et renforcement**

La réparation d’un élément fissuré est une option évidente, mais il en existe d’autres qui méritent qu’on s’y attarde, tels que la stratégie d’endommagement contrôlé (sous-section 9.4.2) ou le remplacement de l’élément.

Lorsque la stratégie d’endommagement contrôlé est adoptée, aucune action immédiate n’est entreprise pour réparer la fissure ou remplacer l’élément. Parfois, cependant, un simple trou est pratiqué à la pointe de la fissure pour ralentir la propagation de cette dernière. Les réparations sont alors repoussées dans le temps et sont généralement effectuées lorsque le problème a été bien analysé ou lorsqu’une période plus propice pour les réparations se présente. Cette approche ne doit toutefois pas être utilisée lorsque l’élément fissuré est un élément principal d’une structure hyperstatique ou que la structure est isostatique. En principe, la stratégie d’endommagement contrôlé doit être évitée lorsque la rupture de l’élément fissuré peut entraîner la ruine ou l’effondrement de l’ouvrage, lorsqu’un programme d’inspection risque d’augmenter les coûts de réparation de façon significative.

Généralement, la réparation des fissures s’avère une option valable lorsque les réparations sont bien effectuées. Toutefois, lorsqu’on répare des fissures de fatigue, il faut constamment se rappeler que la réparation des soudures ne réussit pratiquement jamais et qu’en conséquence, les soudures ne doivent être réparées qu’en tout dernier recours.

## Diapositive 89 :

La liste qui suit présente, dans un ordre décroissant d'efficacité, les principales mesures auxquelles on a généralement recours pour réparer tant les structures d’acier que les structures d’aluminium :

1. Placer des plaques de recouvrement sur la fissure de façon à fournir un autre chemin pour les contraintes et réduire les mouvements de la fissure. De préférence, les plaques sont disposées sur chaque côté de la fissure et sont reliées à l’aide de boulons à haute résistance en acier galvanisé pour les structures d’aluminium. Généralement, d’autres mesures accompagnent celles-ci (voir la sous-section précédente et ce qui suit).
2. Percer un trou à la pointe de la fissure et y insérer un boulon en acier galvanisé à haute résistance. Il existe de l’information dans la littérature sur la dimension des trous à fournir pour contrer efficacement la propagation de la fissure. Le perçage d’un trou a pour effet de réduire substantiellement la concentration des contraintes à la pointe de la fissure, comme on peut le voir sur la figure 9.4. Le boulon précontraint, pour sa part, introduit des contraintes de compression qui limitent ou réduisent, en grande partie, les contraintes de traction qui cherchent à ouvrir la fissure.
3. Enlever et remplacer l’élément ou une portion de l’élément fissuré de façon à reproduire les conditions d’origine. Chercher ensuite à améliorer les conditions de fatigue (sous-sections 9.5.2 et 9.5.3). Cette mesure est efficace lorsque les fissures prennent naissance au pied d’un cordon de soudure et lorsqu’il est déterminé que la fissuration ne se produira pas ailleurs.

4. Buriner la fissure, remplir la rainure avec un métal d’apport approprié, araser la soudure, polir et inspecter la réparation à l’aide d’un appareil à rayons X.

5. À l’aide d’un burin, marteler le pied d’une extrémité de cordon qui est orientée perpendiculairement à l’axe des contraintes dans le but d’empêcher les petites fissures (moins de 3 mm de longueur) de se propager (voir la sous-section 9.5.2). Le détail se trouve ainsi généralement amélioré d’une catégorie.

6. Refusionner le pied des cordons à l’aide de la méthode GTAW, tel que déjà mentionné à la sous-section 9.5.2. Cette technique a aussi pour effet d’améliorer le détail structural d’une catégorie. Toutefois, la technique est difficile à appliquer sur le site à cause des vibrations de la structure.

Il convient de rappeler, en terminant, que quelle que soit la méthode de réparation ou de renforcement utilisée, il faut toujours chercher à améliorer la résistance du détail ou à abaisser le niveau des sollicitations (sous-sections 9.5.2 et 9.5.3). De plus, il faut s’assurer que la fissuration ne se produira pas ailleurs dans la structure, comme conséquence de l’intervention.

# Approche à la normalisation

## Diapositive 92 :

**9.6 Approche à la normalisation**

Dans cette section, les recommandations pour la fatigue des trois normes auxquelles on a souvent fait référence dans les chapitres précédents sont passées en revue : la norme canadienne CAN/CSA-S157-03, Strengh Design in aluminium; la norme américaine, Specification for aluminium structures – Load and resistance factor design for building and similar type structures, Aluminium Design Manuel (ADM), The Aluminium Association; la norme européenne, Eurocode 9 : Design of aluminium structures – Part 2 : Structures susceptible to fatigue.

Puisque les fondements théoriques de ces normes ont été, pour l’essentiel, introduits dans les autres sections de ce chapitre, la présentation sera brève et plutôt schématique afin d’éviter les répétitions. Seule la norme canadienne sera présenté au complet. On se limitera, pour les autres, à présenter l’essentiel des recommandations et à commenter. On évitera aussi les dédoublements qui auraient eu pour effet de rendre le texte beaucoup trop lourd. Il sera donc essentiel de posséder une copie de la norme américaine ou européenne pour quiconque voudra procéder à un calcul de fatigue sur la base des recommandations de l’une ou l’autre de ces normes.

De toute évidence, c’est la norme européenne qui est la plus complète, la plus détaillée, mais aussi la plus complexe à utiliser. La matière présentée dans le présent chapitre devrait toutefois en faciliter la compréhension. Les exemples présentés à la section 9.7 permettent de comparer les différentes recommandations pour le calcul de la résistance des structures à la fatigue.

**9.6.1 Recommandation canadiennes**

La référence (9.22) recommande l’utilisation du diagramme S – N présenté sur la figure 9.42 (voir acétate 92). Ce diagramme contient six catégories de détails structuraux (sept, dans les faits) qui sont représentées sur la figure 9.43 (voir acétate 93) et définies dans le texte qui suit.

**Figure 9.42 – Courbes S – N de la référence**

**Catégorie A**

* Métal de base présentant une surface laminée, extrudée ou une surface usinée équivalente exempte d’imperfection évidente pouvant être le lieu de concentration de contraintes.

**Catégorie B**

* Soudures à rainure mécaniques, à pénétration complète réalisés sur les deux bords, présentant un léger renforcement et dont la tangente au pied du cordon n’excède pas 30°;
* Contraintes sur la section nette du métal de base dans les assemblages rivetés ou boulonnés à double recouvrement.

**Catégorie B\***

* Soudures de la catégorie B mais de qualité supérieure, avec renforcement arasé et intégrité vérifiée par un contrôle de qualité non destructif.

**Catégorie C**

* Soudures d’angle continues, sollicitées longitudinalement et réalisées sans interruption pendant le soudage;
* Soudures à rainure, manuelles, longitudinales ou transversales, à pénétration complète réalisée sur les deux bords et présentant un renforcement normal ou plus épais du cordon. La tangente au pied du cordon transversal ne doit pas excéder 50°. Les cordons transversaux avec un angle de la tangente au pied supérieur à 50° appartiennent à la catégorie D.

**Catégorie D**

* Soudures à rainure à pénétration complète réalisées d’un seul côté, avec ou sans support envers permanent;
* Métal de base au droit des soudures d’angle transversales directement sollicitées ou non;
* Soudures d’angle continues, sollicitées longitudinalement et présentant des interruptions de réalisation;
* Pièces comportant des joints en T soudés sur les deux bords à l’aide de soudures à rainure à pénétration complète.

**Catégorie E**

* Pièces comportant des joints en T soudés sur les deux bords à l’aide de soudure sans pénétration complète ou soudés sur un seul bord avec une soudure à rainure à pénétration complète;
* Pièces dont l’âme et les semelles sont reliées à l’aide de soudures d’angle intermittentes
* Pièces avec tenons (goussets, raidisseurs) longitudinaux non chargés, reliés à l’aide de soudures à rainure ou soudures d’angle;
* Soudures à rainure avec support envers permanent, sollicitées transversalement.

**Catégorie F**

* Contrainte moyenne exercée sur la gorge des soudures d'angle longitudinales ou transversales;
* Contrainte dans le métal de base à l’extrémité de soudures d’angle longitudinales directement chargées.

Il n’existe toutefois pas de catégorie confirmée pour plusieurs types courants d’assemblages, tels les assemblages mécaniques autres que les joints à double recouvrement ou les assemblages entre profilés tubulaires. Le concepteur doit alors faire appel à son jugement ou utiliser l’information véhiculée par d’autres normes ou la littérature. Pour les assemblages entre profilés tubulaires, il est souvent préférable d’utiliser la méthode du point critique, décrite à la sous-section 9.4.6, pour évaluer la résistance à la fatigue de l’assemblage.

Lorsque c’est le spectre de charge qui peut difficilement être évalué (sous-section 9.4.4), il est recommandé, pour le détail structural considéré, d’utiliser de façon sécuritaire la valeur de la limite d'endurance supérieure, définie à cycles, pour toutes les amplitudes de contraintes dont le nombre de cycles risque d’être supérieur à cycles. Bien entendu, lorsque le spectre de charge est connu et que la catégorie de détails est bien identifiée, les méthodes décrites aux sous-sections 9.4.3 et 9.4.4 s’appliquent, y compris la règle de Miner (équation 9.20[[17]](#footnote-17)), pour la détermination de la résistance à la fatigue ou de l’espérance de vie de la structure.

Les courbes de la référence (9.22) ont été dérivées en considérant essentiellement des spécimens de la laboratoire à échelle réduite, bien que la provenance des résultats d’essai ne soit pas clairement établie dans la norme. C’est une des raisons pour laquelle l’utilisation de l’équation (9.15[[18]](#footnote-18)) est recommandée pour les plaques épaisses. De plus, les courbes n’ont pas été obtenues statistiquement, selon la méthode décrite à la sous-section 9.1.5 (figure 9.3 – voir acétate 15), mais elles ont été tracées graphiquement en considérant les limites inférieures des résultats d’essais.

On constate aussi, sur la figure 9.42, que les courbes ont été extrapolées jusqu’à cycles où elles peuvent être requises pour certains assemblages soudés. Il convient toutefois de souligner que les contraintes à faibles cycles de chargement ( cycles pour les pièces et assemblages non soudés et pour les assemblages soudés 9.22 – voir acétate 92) peuvent être contrôlées par les états limites ultimes statiques plutôt que les états limites de fatigue. Il faut alors appliquer les facteurs de pondération appropriés (voir la section 4.5).

Rappelons que la référence (9.22) recommande l’utilisation de la courbe de catégorie C dans une méthode comme celle du point critique (sous-section 9.4) lorsque la contrainte géométrique () ou le facteur de concentration des contraintes () définies par l’équation (9.26[[19]](#footnote-19)), peuvent être déterminés par une analyse numérique ou à l’aide d’essais en laboratoire.

Lorsque les courbes de la figure 9.42 sont utilisées et que la membrure susceptible de fissurer en fatigue est une membrure principale de la structure, c’est-à-dire une membrure qui entraînerait l’effondrement de la structure si elle se fracturait, il est recommandé d’appliquer un coefficient des tenue () égal à 0.75 aux amplitudes de contraintes admissibles. Dans tous les autres cas, est égal à l’unité. Il est enfin utile de rappeler que le coefficient d’amplification des charges () est aussi toujours égal à l’unité.

## Diapositive 93 :

**Figure 9.43 – Catégories de détails structuraux de la référence**

# Exemples pratiques

Voir PowerPoint.

1. Les Presses de l’Aluminium PRAL, *Calcul des charpentes d’aluminium,* Denis Beaulieu, Section 9.3, pp 706-734 [↑](#footnote-ref-1)
2. Les Presses de l’Aluminium PRAL, *Calcul des charpentes d’aluminium,* Denis Beaulieu, p 754 [↑](#footnote-ref-2)
3. Les Presses de l’Aluminium PRAL, *Calcul des charpentes d’aluminium,* Denis Beaulieu, Références, pp 800-803 [↑](#footnote-ref-3)
4. Les Presses de l’Aluminium PRAL, *Calcul des charpentes d’aluminium,* Denis Beaulieu, p 158 [↑](#footnote-ref-4)
5. Les Presses de l’Aluminium PRAL, *Calcul des charpentes d’aluminium,* Denis Beaulieu, p 79 [↑](#footnote-ref-5)
6. Les Presses de l’Aluminium PRAL, *Calcul des charpentes d’aluminium,* Denis Beaulieu, pp 9-137 [↑](#footnote-ref-6)
7. Les Presses de l’Aluminium PRAL, *Calcul des charpentes d’aluminium,* Denis Beaulieu, pp 603-687 [↑](#footnote-ref-7)
8. Les Presses de l’Aluminium PRAL, *Calcul des charpentes d’aluminium,* Denis Beaulieu, p 297 [↑](#footnote-ref-8)
9. Les Presses de l’Aluminium PRAL, *Calcul des charpentes d’aluminium,* Denis Beaulieu, p 100 [↑](#footnote-ref-9)
10. Les Presses de l’Aluminium PRAL, *Calcul des charpentes d’aluminium,* Denis Beaulieu, pp 499-600 [↑](#footnote-ref-10)
11. Les Presses de l’Aluminium PRAL, *Calcul des charpentes d’aluminium,* Denis Beaulieu, p 507 [↑](#footnote-ref-11)
12. Les Presses de l’Aluminium PRAL, *Calcul des charpentes d’aluminium,* Denis Beaulieu, pp 171-172 [↑](#footnote-ref-12)
13. Les Presses de l’Aluminium PRAL, *Calcul des charpentes d’aluminium,* Denis Beaulieu, p 173 [↑](#footnote-ref-13)
14. Les Presses de l’Aluminium PRAL, *Calcul des charpentes d’aluminium,* Denis Beaulieu, p 727 [↑](#footnote-ref-14)
15. Les Presses de l’Aluminium PRAL, *Calcul des charpentes d’aluminium,* Denis Beaulieu, Section 9.7, pp 774-797 [↑](#footnote-ref-15)
16. Les Presses de l’Aluminium PRAL, *Calcul des charpentes* d’aluminium, Denis Beaulieu, p 186 [↑](#footnote-ref-16)
17. Les Presses de l’Aluminium PRAL, *Calcul des charpentes d’aluminium*, Denis Beaulieu, p 743 [↑](#footnote-ref-17)
18. Les Presses de l’Aluminium PRAL, *Calcul des charpentes d’aluminium*, Denis Beaulieu, p 729 [↑](#footnote-ref-18)
19. Les Presses de l’Aluminium PRAL, *Calcul des charpentes d’aluminium*, Denis Beaulieu, p 752 [↑](#footnote-ref-19)