1

Introduction : fatigue gigacyclique

Ce chapitre constitue le bilan de plusieurs décennies de recherche au sujet de la fatigue gigacyclique des métaux. Pour plus d'information, le lecteur se reportera aux [BAT 04] et [BAT 10].

1.1. Limites de fatigue et d'endurance et résistance à la fatigue

Les limites de fatigue et d'endurance et la résistance à la fatigue sont des termes utilisés pour décrire la capacité d'un métal à subir une charge cyclique, définie comme étant l'amplitude (ou l'étendue) d'une *contrainte cyclique* appliquée au matériau, le tout sans donner lieu à une *rupture de fatigue.* Un nombre précis de cycles (de l'ordre de 10^7) est, d'ailleurs, défini pour représenter cette résistance normalisée.

Selon la norme E1150 de la Société américaine pour les tests et matériaux (ASTM), la *fatigue* est définie comme étant « le processus de détérioration progressive, permanente, structurelle et localisée d'un matériau soumis aux charges et contraintes variables dans un ou plusieurs sites, pouvant donner lieu à des fissures ou même à une rupture totale après un nombre suffisant de fluctuations ». La déformation plastique résultant du chargement cyclique amorce la fissuration ; la contrainte de tension entretient la propagation de la fissure. La déformation plastique peut aussi exister au niveau microscopique lorsque la valeur de la contrainte est basse et quand la déformation parait être entièrement élastique. L'ASTM définit *la résistance à la fatigue*, S_{Nf}, comme étant la valeur de la contrainte imposée lorsqu'une rupture se produit, pour un nombre donné N_f de cycles, et la *limite de fatigue* S_f, comme étant la valeur limite de la contrainte imposée à laquelle une

rupture se produit lorsque N_f est très grand. L'ASTM ne définit pas une *résistance à la fatigue*, mais la valeur de la contrainte en dessous de laquelle le matériau résistera à un grand nombre de cycles, ce qui implique néanmoins une similitude à la limite de la fatigue.

Plusieurs auteurs utilisent le terme *résistance à la fatigue* pour définir, comme dans le cas de l'acier, la valeur de la contrainte en dessous de laquelle une rupture ne se produira jamais, même pour un nombre infini de cycles. De même, la *limite de fatigue* et la *résistance à la fatigue*, sont définies comme étant les valeurs de la contrainte à laquelle une rupture se produit après un nombre de cycles spécifié, par exemple, dans le cas de l'aluminium, 500 millions de cycles. D'autres ne font aucune différence entre les deux expressions, même s'ils distinguent les métaux cubiques à face centrée (CFC) et les métaux cubiques centrés (CCC) [BAT 10].

L'emploi du terme « fatigue » fut proposé d'abord par Braithwaite, donc A. Wöhler, à la moitié du XIX^{e} siècle, instaura la première définition de la résistance à la fatigue des métaux alors que les essieux à train et les machines à vapeur (pour trains et bateaux) constituaient les principales applications industrielles [BAT 10]. La rotation lente d'une machine à vapeur était, plus ou moins, de 50 cycles par minute. Pour cette application, Wöhler définit la résistance à la fatigue comme étant située entre 10^6 et 10^7 cycles. En revanche, Basquin s'imposa comme le promoteur de la courbe d'endurance quasi-hyperbolique (SN) [BAS 10]. Aujourd'hui la durée de vie en fatigue d'un train à grande vitesse est de l'ordre d'un gigacycle, soit de 10^9 cycles, et celle d'une turbine aéronautique est d'environ 10^{10} cycles, selon sa vitesse de rotation qui est de plusieurs milliers de tours par minute.

Les courbes de fatigue ou courbes SN sont définies en référence à celle de l'acier et sont généralement limitées à 10^7 cycles. Elles admettent, selon la norme, une asymptote horizontale qui permettra de déterminer la limite de fatigue pour des contraintes alternées subies comprises entre 10^6 et 10^7 cycles. Au-delà de 10^7 cycles, la durée de vie sera considérée comme étant infinie. Pour d'autres types d'alliages, on considèrera que l'asymptote de la courbe n'est pas horizontale.

Un certain nombre de limites de fatigue déterminées à 10^9 cycles existent dans la littérature [BAT 10]. Une méthode probabiliste peut permettre de prévoir la forme de la courbe SN au-delà de 10^7 cycles ; ceci s'applique aussi à la limite de fatigue. En principe, la limite de fatigue est donnée en fonction du nombre de cycles aboutissant à une rupture (figure 1.1). Par exemple, si l'on emploie la méthode de l'escalier, la limite de fatigue est donnée par la valeur moyenne de la contrainte alternée σ_D et la probabilité de rupture par l'écart type de la dispersion (s).

Traditionnellement, la limite de fatigue infinie est définie à partir d'une fonction de dispersion Gaussienne et l'on dira que σ_D moins 3s équivaut à une probabilité de rupture presque nulle. Si l'on suppose que s est égale à 10 MPa, alors la valeur de la limite de fatigue infinie est égale à $\sigma_D - 30$ MPa. Cependant, les expériences démontrent que pour une valeur de σ_D entre 10^6 et 10^9 cycles, la différence est supérieure à 30 MPa pour beaucoup d'alliages.

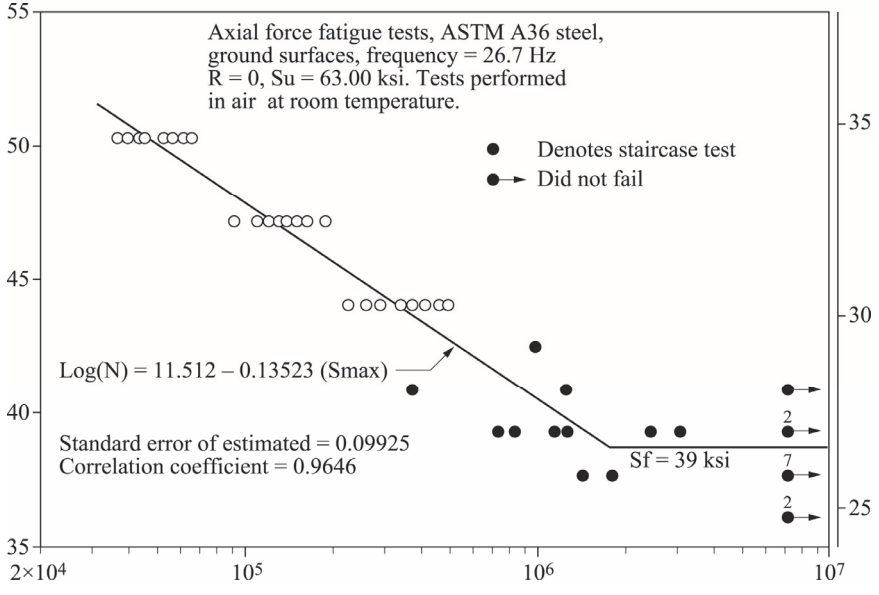

Figure 1.1. *Norme internationale de la courbe SN et la limite de la fatigue*

Cette estimation de la valeur moyenne de la limite de fatigue, dénommée celle de l'écart-type (SD), n'est certainement pas la meilleure pour réduire le risque d'une rupture en fatigue. Il faut prendre conscience du fait que cette technique n'est qu'approximative et que seule l'expérimentation grâce à des essais accélérés, permettra de déterminer la fatigue à très grand nombre de cycles. Aujourd'hui, les machines de fatigue piézoélectriques sont à la fois fiables et capables de produire 10^{10} cycles en moins d'une semaine, comparées aux systèmes traditionnels qui nécessitent plus de trois ans pour tester un seul échantillon.

La situation de nos jours se résume en reconnaissant que le concept d'une limite de fatigue est lié à l'hypothèse de l'existence d'une asymptote horizontale à la courbe SN, située entre 10^6 et 10^7 cycles (figure 1.1). De cette manière, un échantillon

ayant subi 10^7 cycles sans rupture est considéré comme ayant une résistance infinie ; ceci dit, même si cette approximation est à la fois pratique et accessible, elle produit aussi un résultat discutable. Il est important de concevoir que si la méthode d'essai de l'escalier est aujourd'hui habituelle, c'est en grande partie dû à la simplicité de cette approximation. Déterminer une limite de fatigue à 10^7 cycles avec cette méthode requiert 30 h de tests avec une machine à 100 Hz pour traiter un seul échantillon. Pour 10^8 cycles, 300 h de tests sont nécessaires, ce qui revient cher. Remplacer cette machine par une machine de fatigue piézoélectrique à 20 kHz, aboutit à des durées de 14 h pour obtenir 10^9 cycles, 6 jours pour 10^{10} cycles et enfin 58 jours pour 10^{11} cycles. La conception basique de ces machines est la même à 20 kHz et 30 kHz, où la vibration de l'échantillon est produite par un convertisseur piézocéramique qui génère une onde acoustique transmise par une sonotrode à une éprouvette. Ceci provoque le déplacement souhaité aussi bien que l'amplification de la contrainte [WU 93]. La fréquence de résonance de l'échantillon et le facteur de concentration de la contrainte dans l'éprouvette sont calculés par la méthode des éléments finis (FEM) pour 20 et 30 kHz [WU 93]. De telles machines piézoélectriques (contrôlées informatiquement) sont capables de fonctionner en sollicitation sous traction-compression, traction-traction, flexion et torsion (figure 1.2). Il est important de noter la nécessité de maintenir à la fois la température de l'échantillon à l'ambiante et l'amplitude de contrainte pendant un test à 20 kHz de façon à pouvoir comparer les résultats obtenus. Une description entière du procédé se trouve au sein de l'ouvrage [BAT 04].

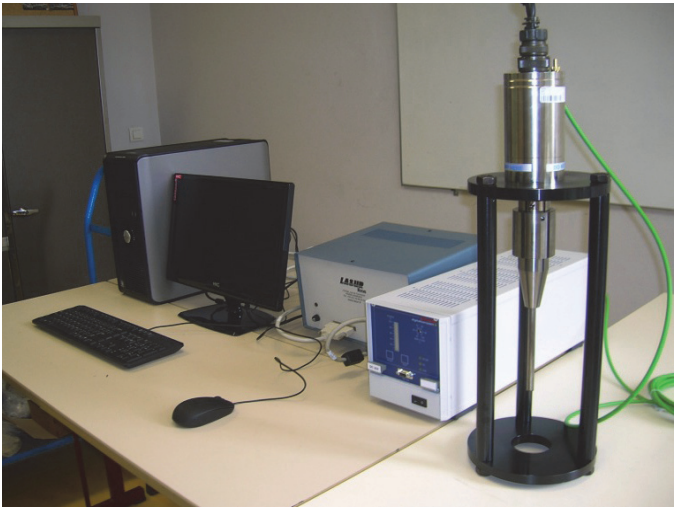

Figure 1.2. *Système expérimental de fatigue ultrasonore à 20 kHz*

1.2. Absence d'une asymptote à la courbe SN

Généralement, les courbes SN diffèrent d'un métal à l'autre. Pour obtenir un aperçu du comportement en fatigue gigacyclique, plusieurs alliages, dont l'acier, seront évoqués dans ce chapitre. Quelques résultats des courbes SN à 10^9 cycles peuvent être trouvés dans la littérature, dont un grand nombre proviennent de notre laboratoire [BAT 04]. Les autres proviennent de chercheurs japonais tels que Naito [NAI 84], Kanazawa [NIS 97], Murakami [MUR 99] ou Sakai [SAK 07] et sont limités à 10^8 cycles. De plus, plusieurs courbes SN pour des alliages légers proviennent du laboratoire de S. Stanzl-Tschegg et H.R. Mayer [STA 99]. Ils se limitent à 10^9 cycles.

Une durée de vie sûre normalisée basée sur le critère de la limite de fatigue infinie fût établie à partir de l'approximation de Wöhler, qui prend en compte l'allure asymptotique de la courbe d'endurance de l'acier. Plusieurs matériaux ont une limite de fatigue ou « d'endurance » après un grand nombre de cycles (généralement>10^6), mais la plupart n'ont pas ce comportement ; leur durée de vie en fonction de la contrainte appliquée décroît continuellement, même à un grand nombre de cycles (10^6–10^9). Ceci conduit à préférer la définition d'une résistance à la fatigue pour un nombre de cycles donnés.

La courbe SN entre 10^6 et 10^{10} cycles permet de mieux prédire le risque de fissures dû à la fatigue (figure 1.3).

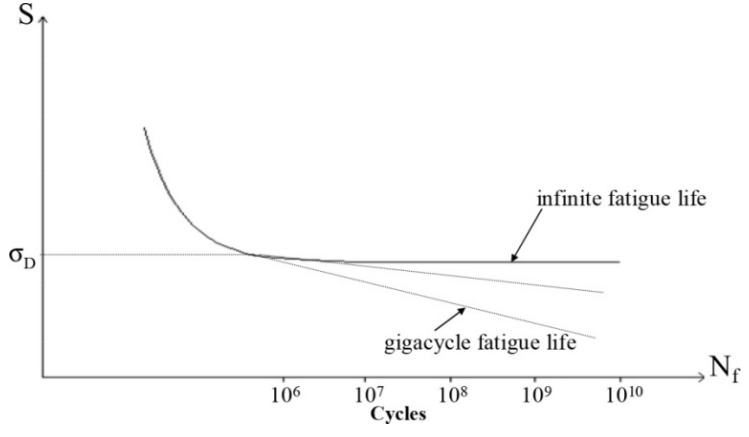

Figure 1.3. *Concept de la courbe SN pour un gigacycle*

Depuis Wöhler, la norme est de représenter les courbes SN par une hyperbole plus ou moins modifiée, comme l'indiquent les relations suivantes :

Hyperbole Ln Nf = Log a – Ln σ a

d'autres relations peuvent être décrites comme :

– Wöhler Ln Nf = $a - b\sigma a$;

– Basquin Ln Nf = $a - b$ Ln σa ;

– Stromeyer Ln Nf = $a - b$ Ln ($\sigma a - c$).

Mais seule la détermination expérimentale de la durée de vie entre 10^6 et 10^{10} cycles permettra une approximation plus sûre dans la modélisation.

1.3. Initiation et propagation

Pouvoir à la fois comprendre et prédire la durée de vie d'un matériau en fonction de sa résistance à l'initiation et à la propagation des fissures est d'une grande importance. Généralement, lorsque la contrainte est grande, la résistance à la fatigue est déterminée par la propagation des fissures ; lorsque celle-ci est plus courte, la majorité de la durée de vie dépendra de la formation des fissures. Pour la fatigue oligocyclique, il est dit qu'environ 50 % de la durée de vie est consacrée au développement des microfissures, alors qu'un grand nombre de spécialistes ont démontré que la fraction de durée de vie attribuée à l'amorçage des fissures est de plus de 90 % lorsque la durée de vie est élevée (10^6–10^7 cycles) pour l'acier, l'aluminium, le titane et les alliages de nickel. Lorsque l'amorçage de la fissure est dû à un défaut, tel qu'une inclusion ou un pore, on peut supposer qu'une relation existe entre la limite de fatigue et le seuil de propagation des fissures.

Cependant, la relation entre la propagation et l'initiation d'une fissure n'est pas évidente, ceci pour plusieurs raisons. Premièrement, il n'y a aucune certitude qu'une fissure due à la fatigue se propage immédiatement à partir d'un défaut. Deuxièmement, lorsque le défaut est de petite taille, la fissure se propagera de façon différente que si elle était plus grande. Notons particulièrement que l'importance du rapport R ou l'effet de fermeture varie selon la longueur de la fissure, par conséquent, la relation entre ΔK_{th} et σ_D est difficile à déterminer [BAT 00].

Un autre concept à retenir est celui de la durée de vie infinie en fatigue : en dessous de ΔK_{th} et de σ_D la résistance à la fatigue est infinie. En général, σ_D, la limite de fatigue, est déterminée pour un nombre Nf = 10^7 de cycles. Mais lorsque la rupture due à la fatigue apparait au-delà de 10^9 cycles la différence entre la résistance à la fatigue après 10^7 et 10^9 cycles peut-être de plus de 100 MPa. Ceci signifie que la relation entre σ_D et ΔK_{th} doit être établie dans le régime gigacyclique, à condition qu'elle existe.

1.4. Limite de fatigue ou résistance à la fatigue

Comment peut-on modéliser la limite de fatigue ou la résistance à la fatigue gigacyclique d'alliages industriels ?

La procédure sera décrite dans les paragraphes suivants.

Premièrement, une nouvelle courbe SN doit être déterminée pour une valeur maximale de 10^{10} cycles, un nombre de cycles qui excède la résistance de la plupart des machines et structures.

Deuxièmement, une nouvelle résistance à 10^9 cycles doit être établie avec les calculs statistiques habituels.

Plus précisément, la prédiction de la fatigue gigacyclique est faite à partir de deux mécanismes différents :

– une initiation liée aux défauts (inclusions, pores) : la prédiction prendra en compte la concentration de contrainte, les mécanismes d'initiation de la fissure et approximation de fissure courte ;

– une initiation qui n'est pas liée aux défauts : dans ce cas la microstructure est le paramètre clé, par exemple la taille des grains, l'interface, transfert de la contrainte et micro-plasticité.

Par conséquent, la prédiction de la fatigue gigacyclique se fait de deux façons. La première sera réservée aux alliages avec défauts.

1.5. Courbes SN jusqu'à 10^9 cycles

Dans la littérature spécialisée, peu de résultats à ce sujet apparaissent jusqu'à ce que « Euromech 382 » fût organisé à Paris en Juin 1998. Des courbes SN typiques du domaine gigacyclique sont données en exemple.

Les expériences (figures 1.4-1.6) montrent que la rupture des échantillons peut se produire jusqu'à 10^9 cycles et même au-delà, et donc que la courbe SN ne montre aucune asymptote. Alors, le concept de la durée de vie infinie à la fatigue est fausse et la définition de la limite de fatigue équivalente à 10^6–10^7 cycles est discutable [BAT 99]. Dans les figures 1.4–1.6, nous remarquons la présence d'une rupture au-delà de 10^{10} cycles pour l'aluminium et la fonte SG et l'acier à roulement. En fonction de l'alliage, la différence entre la résistance à la fatigue entre 10^6 et 10^9 cycles peut varier entre 50 et 200 MPa. D'un point de vue pratique, la résistance à la

fatigue gigacyclique deviendra le meilleur moyen de prédire une longue durée de vie du matériau [BAT 10].

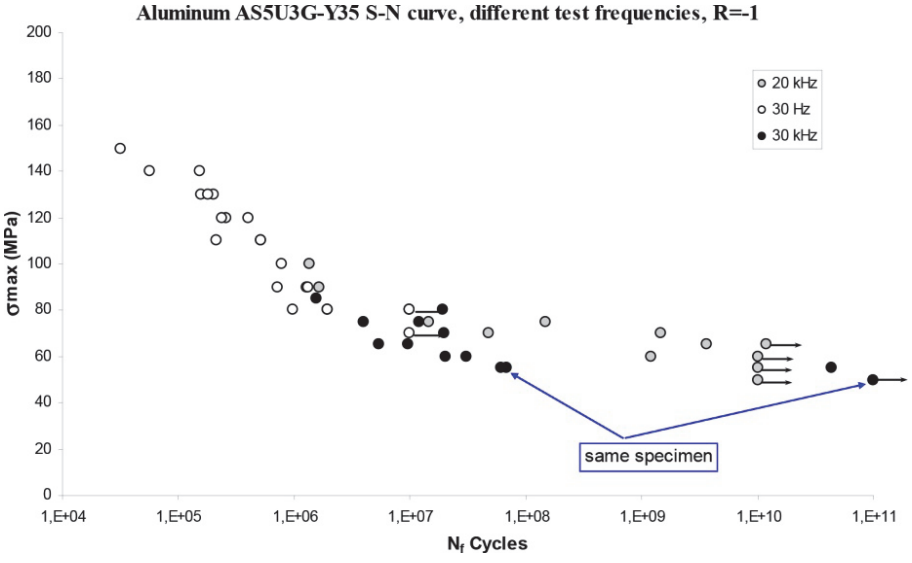

Figure 1.4. *Courbe SN gigacyclique pour un alliage aluminium moulé*

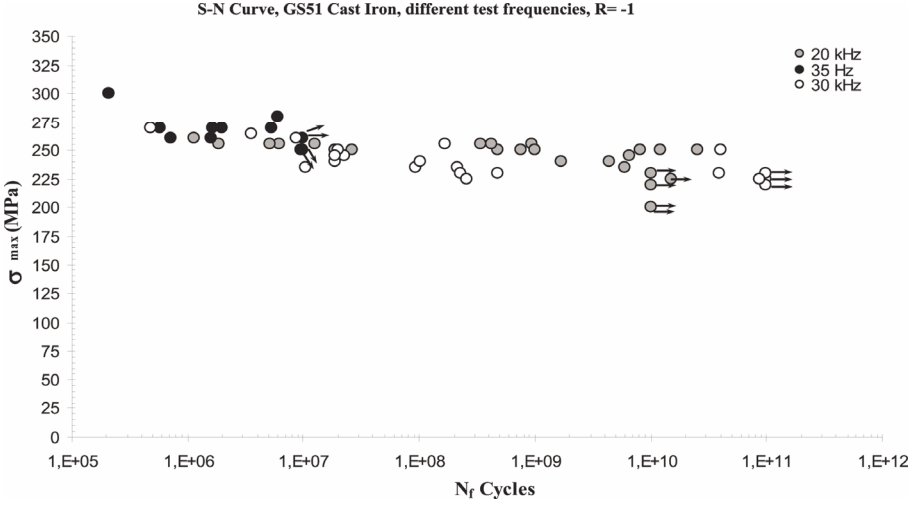

Figure 1.5. *Courbe SN gigacyclique pour une fonte de fer SG à R = –1*

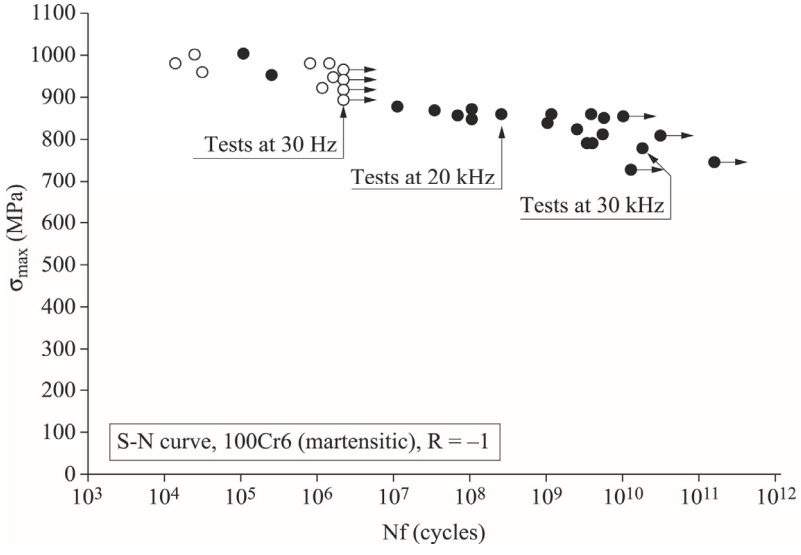

Figure 1.6. *Courbe SN gigacyclique, 51200 acier à roulement, R = –1*

Il n'existe que deux moyens pour obtenir des données pour la fatigue gigacyclique : les essais en flexion rotative (limités à 10^8 cycles) et à haute fréquence, contrairement à la fatigue mégacyclique où les données sont obtenues à partir de machines à basse fréquence (entre 1 et 100 Hz). Plusieurs questions se posent :

– quel effet aura la fréquence à 20 kHz ?

– quel sera l'effet d'une élévation de la température à 20 kHz ?

– quelle sera la réponse du métal à haute fréquence ?

– quel sera l'effet (si même il existe) de la flexion rotative, connue pour sa capacité à accentuer la plasticité de la surface, pendant la flexion ?

Davantage de précisions doivent être apportées à ces questions et des nouvelles normes pourraient être nécessaires pour la détermination des courbes SN.

Souvent, une transition du site d'initiation est présente de la surface, au-delà de 10^7 cycles, vers l'intérieur à cause de défauts microstruturels. Avant 10^6 cycles, l'initiation de la fissure se déroule à la surface. Ce mécanisme est loin d'être unique, ce qui signifie que la détérioration de la surface n'est pas toujours le mécanisme

clé, comme nous aurions pu le supposer. Dans le cas où aucun défaut critique n'affecte l'intérieur, dans le régime de fatigue gigacyclique, l'amorçage peut apparaitre à la surface comme dans le cuivre ou le fer pur.

1.6. Prédiction déterministe de la résistance à la fatigue gigacyclique

Pour un grand nombre de composants, d'un point de vue pratique on dit que la durée de vie infinie à la fatigue est de 10^9 ou 10^{10} cycles et il semblerait donc que la résistance à la fatigue gigacyclique soit une caractéristique clé des métaux. Ces données peuvent être déterminées soit par une approche statistique (de l'escalier) soit par une relation déterministe entre contrainte et défauts.

Peu de techniques de modélisation permettent de prédire l'effet des inclusions non-métalliques sur la résistance à la fatigue, ce qui s'explique par l'insuffisance de données fiables à ce propos. Murakami *et al*. [MUR 99] ont recherché les effets de ces défauts et inclusions sur la fatigue de l'acier à haute résistance et ont exprimé cette limite comme étant une fonction de la dureté Vickers (HV) (Kgf/mm^2) et de la racine carrée de la surface de projection d'une inclusion ou d'un défaut de petite taille : √aire (μm). Murakami propose la limite de fatigue comme étant :

$$\sigma_w = \frac{C(HV+120)}{(\sqrt{area})1/6}\left[\frac{(1-R)}{2}\right]\alpha$$

avec :

C = 1.45 pour une inclusion ou un défaut de surface ;

C = 1.56 pour une inclusion ou défaut à l'intérieur ;

$\alpha = 0.226 + \mathrm{HV} \times 10^{-4}$.

Le nombre de cycles considéré à la contrainte σ_w n'est pas précisé.

Selon les données expérimentales, une équation basée sur celle de Murakami, empirique et modifiée, fut proposée afin d'approximer l'amorçage de la fatigue gigacyclique à partir des inclusions ou des défauts. Elle marche particulièrement bien pour l'acier à haute résistance [WAN 99]. L'équation paramétrique de Murakami est à la fois intéressante et pratique pour les ingénieurs, cependant l'on trouvera dans les résultats une différence de valeurs entre la prédiction et l'expérience, qui peut atteindre jusqu'à 26 %. Une difficulté majeure est d'estimer la surface du défaut

par la racine carrée de l'aire de projection. Le tableau 1.1 compare la résistance à la fatigue prédite par l'équation de Murakami et les résultats expérimentaux (méthode de l'escalier) du régime gigacyclique.

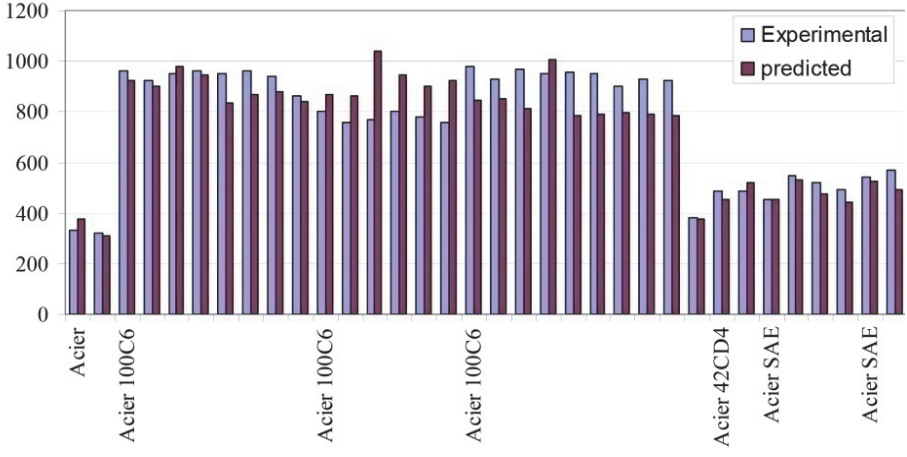

Tableau 1.1. *Comparaison entre les valeurs prédites et réelles de la résistance à la fatigue à 10^9 cycles*

1.7. Fatigue gigacyclique des alliages sans défauts

Comment se comportent les alliages sans inclusions dans le régime de la fatigue gigacyclique ?

Les alliages de titane sont reconnus pour l'absence de pores et d'inclusions. Dans ce cas, l'amorçage des fissures dues à la fatigue ne part pas des défauts. Cependant, nous pouvons trouver dans ces alliages des ruptures à des durées de vie proches de 10^9 cycles, malgré l'absence d'inclusions et de pores. La figure 1.7 montre l'évolution des courbes SN en fonction du traitement thermique de l'alliage Ti6246.

Soulignons le fait qu'il n'existera pas dans chaque cas un lien unique entre la fatigue gigacyclique et les défauts du métal. Pour l'alliage Ti6246, la résistance à la fatigue gigacyclique est liée à la quantité transformée du pourcentage volumique de la phase alpha secondaire. L'initiation de la fatigue intérieure sur des facettes de quasi-clivage dans la phase alpha primaire a été démontrée [JAG 99, TAO 96].

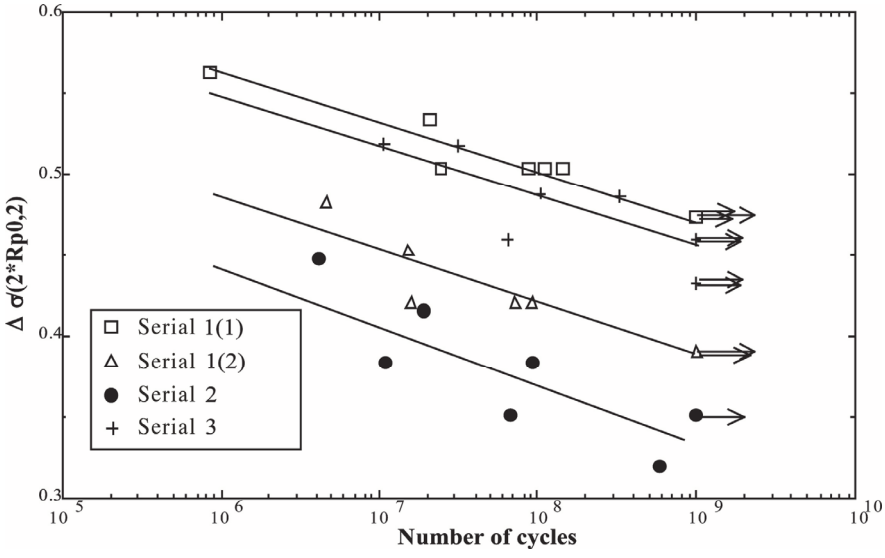

Figure 1.7. *Courbes SN d'alliage de titane ayant plusieurs microstructures [JAG 99]*

1.8. Mécanismes de propagation à 10^9 cycles

Il reste à préciser comment et pourquoi certaines fissures dues à la fatigue peuvent se propager à l'intérieur du métal pendant la fatigue gigacyclique ; ceci ne s'explique pas facilement. Il semblerait que la déformation plastique par sollicitation cyclique sous contrainte plane devient négligeable dans le régime gigacyclique. Dans ce cas, les défauts et la grande taille des grains jouent un rôle important en concurrence avec celui de l'endommagement en surface. Cela signifie aussi que l'environnement aura un effet très diffèrent lors du régime gigacyclique vu que l'amorçage des fissures courtes se déroule à l'intérieur de l'échantillon. Alors, si la surface d'un alliage industriel est lisse, elle jouera un rôle secondaire. Dû à la présence des défauts microstructuraux, l'effet de la déformation plastique est mineur par rapport à celui de la microplasticité, signifiant que l'amorçage intérieur est une fonction de la concentration des contraintes ou du transfert de celle-ci.

1.9. Conclusion

Au-delà de 10^7 cycles, les ruptures dues à la fatigue sont souvent possibles dans un grand nombre d'alliages. Dans certains cas, la résistance à la fatigue peut diminuer par 100, parfois même 200 MPa, entre 10^6 et 10^9 cycles. Selon nos observations, le concept de la durée de vie infinie avec une courbe SN qui admet une

asymptote est fausse. Sous les conditions décrites, une limite de fatigue définie par analyse statistique entre 10^6 et 10^7 cycles ne pourra pas garantir une résistance infinie.

Si l'on suppose que la durée de vie des composants et structures en ingénierie peut être supérieure à 10^8 cycles, il est important de déterminer une limite sûre et prudente de la résistance à la fatigue au-delà de 10^9 cycles. D'un point de vue pratique, la seule manière d'étudier le domaine de la fatigue gigacyclique est d'utiliser une machine de fatigue piézoélectrique à haute fréquence.

1.10. Bibliographie

[BAS 10] BASQUIN O.H., « The exponential law of endurance tests », *Proceedings of the American Society for Testing and Material*, vol. 10, p. 625-630, 1910.

[BAT 99] BATHIAS C., « There is no infinite fatigue life in metallic materials », *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures,* vol. 22, p. 559-565, 1999.

[BAT 00] BATHIAS C., « Relation between endurance limits and thresholds in the field of gigacycle fatigue », *American Society for Testing and materials/Special Technical Publication*, vol. 1372, p. 135-154, 2000.

[BAT 04] BATHIAS C., PARIS P.C., *Gigacycle Fatigue in Mechanical Practice*, Section 7, Marcel Dekker, New York, 2004.

[BAT 10] BATHIAS C., PINEAU A., *Fatigue of Materials and Structures*, ISTE, Londres, John Wiley and Sons, New York, 2010.

[JAG 99] JAGO G., BECHET J., « Relation between microstructure and properties in Ti alloys », *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures*, vol. 22, p. 647-655, 1999.

[KAN 97] KANAZAWA K., NISHIJIMA S., « Fatigue fracture of low alloy steel at ultra-high cycle regime under elevated temperature conditions », *Journal of the Society for Materials Science,* vol. 46, n° 12, p. 1396-1401, 1997.

[MUR 99] MURAKAMI Y., NAMOTO T., UEDAT., « Factors influencing the mechanism of superlong fatigue failure in steels », *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures*, vol. 22, p. 581-590, 1999.

[NAI 84] NAITO T., UEDA H., KIHUSHI M., « Fatigue behavior of carburized steel with internal oxides and non-martensitic microstructure near the surface, » *Metall. Trans. A*, vol. 15, n° 7, p. 1431-1436, 1984.

[SAK 07] SAKAI T., « Review and prospects for current studies on very high cycle fatigue of metallic materials for machine structural use », *4th International Conference on Very High Cycle Fatigue (VHCF-4),* TMS (The Minerals, Metals & Materials Society), 2007.

[STA 99] STANZL-TSCHEGG S., « Fracture mechanisms and fracture mechanics at ultra-sonic frequency », *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures*, vol. 22, p. 567-579, 1999.

[TAO 96] TAO H., Ultrasonic fatigue at cryogenic temperature, Thèse de doctorat, CNAM, Paris, 1996.

[WAN 99] WANG Q.Y., BERARD J.Y., BATHIAS C., « Gigacycle fatigue of ferrous alloys », *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures,* vol. 22, n° 8, p. 667-672, 1999.

[WU 93] WU T.Y., NI J.G., BATHIAS C., « Automatic in ultrasonic fatigue machine to study low crack grow that room and high temperature », *ASTM STP*, vol. 1231, p. 598-607, 1993.