

MCours.com

PARTIE A :
ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

CHAPITRE I:

ENDOMMAGEMENT PAR FATIGUE

La fatigue se manifeste chaque fois que l'on est en présence d'efforts variables dans le temps. Elle commence par une déformation plastique localisée sans plastification de toute la structure, tout d'abord autour de défauts, à fond d'entaille, puis à l'extrémité de la fissure une fois que celle-ci s'est formée. La particularité de la fatigue, et qui en est fait le danger, est que la rupture peut apparaître pour des contraintes relativement faibles, souvent bien inférieures à la limite d'élasticité du matériau lorsque leur application est répétée un grand nombre de fois. La capacité de résistance à la fatigue des pièces définit ce qu'on appelle la *limite d'endurance*. Dans la pratique, la fatigue des matériaux est abordée de deux façons différentes, à savoir : le relevé de courbes de Wöhler et la mesure de la vitesse de fissuration. La première de ces méthodes est la plus utilisée, car elle permet de déterminer une limite d'endurance en dessous de laquelle le matériau est, en principe, à l'abri des ruptures de fatigue. Néanmoins, les expériences industrielles montrent que dans des pièces en service, il peut exister des défauts, à partir desquels une fissure peut se propager et provoquer la ruine de la pièce, même si la contrainte appliquée est inférieure à la limite d'endurance. Par conséquent, l'essai d'endurance ne suffit pas toujours à caractériser la résistance à la fatigue d'un matériau. Il est donc essentiel de lui adjoindre une deuxième méthode étudiant la propagation de fissure et permettant ainsi d'évaluer de façon précise la durée de vie résiduelle d'une pièce en service. Cette deuxième approche s'appuie sur le concept de tolérance au dommage qui considère que les structures contiennent des défauts de type fissure, dont la présence est souvent inévitable car inhérente aux procédés de fabrication des composants, qu'il s'agit de dimensionner en veillant à ce que les défauts n'atteignent pas la taille critique conduisant à la rupture brutale.

I-1 Dommage cumulatif

La notion de dommage présente un aspect physique correspondant aux variations des propriétés physiques des matériaux pendant la fatigue, reflétant les modifications structurales dues à l'action des sollicitations variables. Le dommage revêt également un aspect descriptif, important du point de vue de l'emploi des matériaux dans les structures. Cet aspect consiste dans la représentation quantitative de l'endurance des matériaux soumis à des histoires de chargement plus ou moins variées, voire tout à fait aléatoires.

I-1-1 Courbes de Wöhler

Lorsqu'un matériau est soumis un grand nombre de fois à des amplitudes de contraintes cycliques, pour des niveaux de contrainte bien inférieurs à sa limite d'élasticité, l'endommagement par fatigue apparaît. La courbe donnant la durée de vie exprimée en nombre de cycles à rupture N_R , portée en abscisse, en fonction de l'amplitude de la contrainte est appelée *courbe de Wöhler* ou *courbe d'endurance* (Figure I-1). Elle est déterminée à partir d'un lot d'éprouvettes où chacune est soumise à un effort périodique d'amplitude maximale $\Delta\sigma$ et de fréquence constante, la rupture se produisant au bout d'un nombre de cycles N_R . A chaque éprouvette correspond un point du plan ($\Delta\sigma, N_R$). D'après la Figure I-1, la rupture est atteinte après un nombre de cycles qui croît quand la contrainte décroît. Les résultats des essais de fatigue sont répartis de façon statistique, de telle sorte que l'on puisse définir des courbes

correspondant à des probabilités de rupture données selon l'amplitude de contrainte et le nombre de cycles.

Les essais classiques de détermination d'une courbe de Wöhler donnent une information globale sur l'endurance d'un matériau : amorçage d'une fissure de fatigue et sa propagation jusqu'à la rupture. Cette courbe peut généralement être décomposée en trois zones distinctes :

- ❑ Zone I : Zone de *fatigue plastique oligocyclique*, qui correspond aux contraintes les plus élevées, supérieures à la limite d'élasticité σ_E du matériau. La rupture survient après un très petit nombre de cycles variant généralement de $\frac{1}{4}$ de cycle à environ 10^4 à 10^5 cycles. Dans cette zone, on observe très rapidement une déformation plastique importante suivie d'une rupture de l'éprouvette ;
- ❑ Zone II : Zone de *fatigue ou d'endurance limitée*, où la rupture est atteinte après un nombre limité de cycles, nombre qui croît lorsque la contrainte décroît (compris entre 10^5 à 10^7 cycles environ). Cette zone peut être considérée comme linéaire en échelle semi-logarithmique ;
- ❑ Zone III : Zone d'*endurance illimitée ou zone de sécurité*, sous faible contrainte, pour laquelle la rupture ne se produit pas après un nombre donné de cycles (10^7 et même 10^8), supérieur à la durée de vie envisagée pour la pièce.

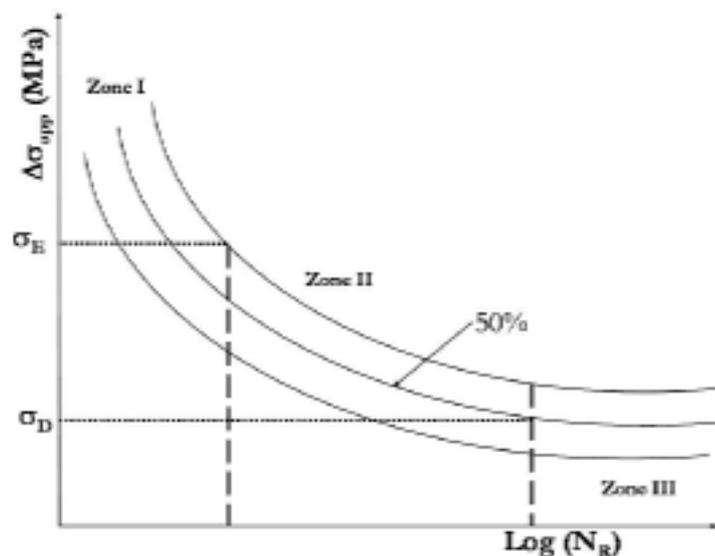


Figure I-1 : Diagramme d'endurance ou courbe de Wöhler.

Dans de nombreux cas, on peut tracer une branche asymptotique horizontale à la courbe de Wöhler : l'asymptote étant appelée *limite d'endurance* ou limite de fatigue et notée σ_D . Par contre, dans certains cas, par exemple lorsqu'il y a simultanément fatigue et corrosion, il ne semble pas y avoir d'asymptote horizontale. On définit alors une limite conventionnelle d'endurance comme la valeur de la contrainte maximale qui ne conduit pas à la rupture avant un nombre de cycles fixé (par exemple 10^7 cycles).

- ❑ Dans certains cas, les courbes de Wöhler sont représentées en fonction du nombre de cycles à l'amorçage. L'amorçage étant défini à partir de la création d'une fissure de dimensions détectables ;

- Les courbes de Wöhler sont parfois déterminées à partir d'essais sur éprouvettes entaillées. La limite d'endurance diminue alors en fonction de la sévérité de l'entaille (lorsque K_T augmente).

La notion de limite d'endurance est relative et non absolue ; sa définition dépend du problème traité ; par exemple, les limites d'endurance en traction et en torsion alternées sont différentes.

I-1-2 Représentation analytique de la courbe de Wöhler

Diverses expressions ont été proposées depuis les deux siècles derniers pour rendre compte de la forme de la courbe de Wöhler. La plus ancienne proposée par Wöhler lui-même en 1870, s'écrit :

$$\log N_R = a - b\sigma$$

où a et b sont des constantes déterminées expérimentalement.

Puis, Basquin a proposé en 1910 une relation de la forme :

$$\log N_R = a - b \log \sigma$$

soit encore :

$$N_R \sigma^b = A$$

Ces relations assimilent la zone II à une droite (endurance limitée) qui ne tend pas vers une limite σ_D lorsque N_R augmente pour décrire la zone III. Pour rendre compte de la courbure et de l'asymptote horizontale (limite d'endurance), Stromeyer a proposé en 1914 :

$$\log N_R = a - b \log(\sigma - \sigma_D)$$

ou encore :

$$N_R (\sigma - \sigma_D)^n = A$$

avec n généralement compris entre 1 et 2. Puis, Bastenaire a proposé en 1971 :

$$(N_R + B) (\sigma - \sigma_D) e^{[A(\sigma - \sigma_D)]} = C$$

avec A , B et C des constantes déterminées à partir de données expérimentales.

Dans le domaine de la fatigue oligocyclique, Basquin et Manson-Coffin proposèrent :

$$\frac{\Delta \varepsilon}{2} = \frac{\Delta \varepsilon_e}{2} + \frac{\Delta \varepsilon_p}{2} = \frac{\sigma'_f}{E} (2N_i)^b + \varepsilon'_f (2N_i)^c$$

avec σ'_f le coefficient de résistance à la fatigue, ε'_f le coefficient de ductilité en fatigue, b et c les exposants de la loi de Manson-Coffin.

I-1-3 Cumul de dommage par fatigue

La durée de vie est définie par le nombre de cycles à rupture N_R . Ainsi, l'application de n cycles ($n < N_R$) entraîne une détérioration partielle de la pièce. La connaissance de ce dommage est importante à déterminer car elle permet d'évaluer la capacité restante de durée de vie et de décider s'il faut ou non remplacer la pièce pour éviter une rupture catastrophique.

La règle la plus simple consiste à considérer une évolution linéaire du dommage. Cette approche est appelée règle de cumul linéaire de Miner [Min45]. Ainsi, le dommage associé à n_i cycles ($n_i < N_{Ri}$), pour une sollicitation donnée, est déterminé par la fraction représentant le nombre de cycles n_i divisé par le nombre de cycles à rupture N_{Ri} associé au niveau de contrainte de la sollicitation, soit :

$$D_i = \frac{n_i}{N_{Ri}}$$

Cette règle propose ensuite que le cumul de l'endommagement, associé à plusieurs niveaux de contrainte, soit donné par l'addition linéaire des dommages élémentaires :

$$D = \sum_i D_i = \sum_i \frac{n_i}{N_{Ri}}$$

où la rupture se produit lorsque D vaut 1.

La règle du Miner est souvent appliquée pour évaluer des endommagements cumulés de fatigue sous chargement à amplitude variable, grâce à sa simplicité : prise en compte de données de fatigue sous amplitude constante (courbes de Wöhler). La règle linéaire d'endommagement a été remise en question par de nombreux résultats issus des travaux de plusieurs auteurs [Ran91] lors d'essais de fatigue, sur des éprouvettes de différentes géométries, en faisant varier graduellement le niveau de chargements de type traction-compression, flexion rotative et traction répétée. Ces résultats peuvent être résumés de la manière suivante :

- la somme des dommages est inférieure à l'unité dans le sens des séquences décroissantes ;
- la somme des dommages est supérieure à l'unité dans le sens des séquences croissantes.

Les critiques importantes qui remettent en cause les lois de dommage cumulatif linéaire [Ran93, Bin98, Bha98, Age00] sont :

- l'endommagement partiel, qui s'appuie sur la notion de dommages indépendants, ne prend pas en compte les effets des séquences du chargement sur la fatigue. En effet, les résultats expérimentaux montrent que quelques cycles (n_2) à un niveau élevé de contrainte (σ_2), suivis par un cyclage à un niveau inférieur (σ_1, n_1), endommagent plus fortement que dans le cas où l'ordre est inversé. Ce phénomène peut s'expliquer par la non linéarité de l'endommagement, contrairement à l'hypothèse proposée par Miner ;
- l'utilisation de la courbe de Wöhler conduit à ignorer tous les cycles d'amplitude inférieure à la limite d'endurance dont l'endommagement partiel, selon la définition de Miner, est nul. Par conséquent, la durée de vie en fatigue du matériau est surestimée dans le cas de chargement variable.

Agerskov [Age00] considère que la raison principale de la différence entre les comportements en fatigue à amplitude constante et à amplitude variable est due à l'accélération et/ou le retard de propagation de fissure dû aux charges élevées de traction et de compression dans les histoires de chargement à amplitude variable. Les facteurs les plus importants dans ce désaccord sont les mécanismes de fermeture de fissure, le niveau des contraintes résiduelles, la valeur des concentrations de contrainte et la limite d'élasticité du matériau. Les résultats montrent que la règle de Miner donne des prévisions non conservatives des durées de vie en fatigue, puisque les sommes de Miner sont toutes inférieures à 1. Dans les séries d'essais à la fois sur des échantillons de plaques soudées et de joints tubulaires, et pour les différents spectres de chargement étudiés, Agerskov [Age00] a trouvé que la durée de vie en fatigue est en général plus courte pour le chargement à amplitude variable que pour le chargement à amplitude constante dans un intervalle de contraintes équivalent, pour des histoires de chargement en traction et en compression. Ces résultats sont observés à la fois dans les études expérimentales et dans les calculs de durées de vie en fatigue utilisant la Mécanique de la Rupture. Les résultats obtenus montrent que la règle de Miner, qui est normalement utilisée pour le dimensionnement en fatigue des structures en acier, peut donner des prévisions non conservatives de la durée de vie, et que la distribution de l'histoire de chargement en traction et compression a une influence sur la validité des résultats obtenus en utilisant la règle de Miner (Figure I-2).

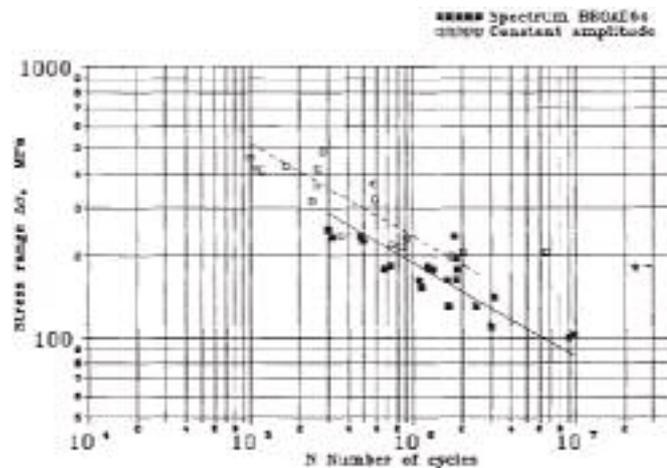


Figure I-2 : Comparaison des résultats obtenus sous chargement d'amplitude variable et constante [Age00].

Parmi les rares études qui justifient l'utilisation de la règle de Miner, nous pouvons citer celle de Tchanakov [Tch99] qui a pu établir une bonne corrélation au niveau des durées de vie obtenues pour les joints soudés.

Plusieurs améliorations de la règle linéaire d'endommagement de Miner ont été suggérées et ont rencontré des degrés différents de réussite pour des applications particulières. On peut citer par exemple la loi de Hashin et Laird [Has78] qui donne une relation d'accumulation de dommage sous deux niveaux de chargement de contrainte cyclique :

$$\left(\frac{N_1}{N_{R1}}\right)^{\log\left(\frac{N_2}{N_e}\right) / \log\left(\frac{N_1}{N_e}\right)} + \frac{N_2}{N_{R2}} = 1$$

N_e : nombre de cycles à la limite de fatigue, N_{R1} et N_{R2} : nombres de cycles à rupture pour les niveaux de chargement 1 et 2.

I-1-4 Coefficient de concentration de contrainte

La présence de discontinuités géométriques (trous, entailles, congés,...) dans une structure sollicitée cycliquement, induit des zones de concentration de contrainte dont le rôle est essentiel sur la tenue en fatigue. En effet, lorsqu'une telle structure est soumise à un chargement, localement le niveau de contrainte est nettement plus élevé par rapport au champ à l'infini (ou très éloigné de la discontinuité). Une manière prudente de prendre en compte une telle discontinuité consiste, dans un premier temps, à évaluer son coefficient de concentration de contrainte K_T (sans dimension) tel que :

$$K_T = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_{nom}}$$

où σ_{max} est la contrainte à fond d'entaille, estimée dans le domaine de l'élasticité, et σ_{nom} la contrainte nominale calculée comme la contrainte moyenne dans la section résistante. Pour une éprouvette entaillée, les contraintes dans la région de l'entaille sont ainsi multipliées par K_T . Les valeurs du K_T peuvent être trouvées dans la littérature pour les géométries les plus courantes ou bien déterminées à l'aide de calculs par éléments finis. Cependant, même si l'on constate que la durée de vie sous une sollicitation alternée donnée est plus faible pour une géométrie entaillée par rapport à une sans entaille, la limite d'endurance σ_{Dent} de la pièce entaillée n'est pas égale à $\sigma_{Dent} = \sigma_{Dis}/K_T$ (où σ_{Dis} désigne la limite d'endurance d'une éprouvette lisse du même matériau) mais est déterminée en fait grâce à la relation suivante :

$$K_F = \frac{\sigma_{Dis}}{\sigma_{Dent}}$$

où K_F est le coefficient de réduction de résistance à la fatigue. On aura toujours pour une entaille donnée :

$$K_F \leq K_T$$

Ce résultat témoigne d'une adaptation plastique du matériau. K_F peut être évalué à l'aide d'essais réalisés sur deux lots d'éprouvettes lisses et entailées possédant le même K_T que la pièce considérée. On peut alors classer les matériaux en terme de sensibilité à l'effet d'entaille. Si pour un K_T donné, K_F est beaucoup plus faible que K_T , le matériau est considéré comme étant peu sensible à l'effet d'entaille. Au contraire si la différence entre K_F et K_T n'est pas significative, le matériau y est sensible. En général, les matériaux fragiles sont plus sensibles à l'effet d'entaille que les matériaux ductiles.

Le paramètre K_F peut servir à définir cette sensibilité. On utilise d'ailleurs très souvent le facteur de sensibilité à l'effet d'entaille q tel que :

$$q = \frac{K_F - 1}{K_T - 1}$$

La détermination du facteur de sensibilité à l'effet d'entaille est assez délicate, et il n'existe pas à l'heure actuelle de méthodes exactes pour le faire. On peut toutefois trouver différentes formulations empiriques pour déterminer q . Elles font le plus souvent intervenir le rayon à fond d'entaille noté ρ ainsi que différents paramètres dépendant du matériau.

I-2 Vitesse de fissuration

L'avènement de la Mécanique Linéaire de la Rupture a permis de faire un pas en avant sur la description des mécanismes de fissuration.

I-2-1 Propagation

Cette situation donne lieu, pour l'évaluation de la tenue de pièces en fatigue, à une approche basée sur des données de propagation de fissures. Dans le cas d'un défaut préexistant dans la pièce ou de l'apparition d'une fissure, deux types de problèmes peuvent être traités :

- ❑ évaluation de la vitesse de propagation de la fissure (ou du défaut assimilé à une fissure) de manière à estimer la durée de vie résiduelle de la pièce. Ce problème se traite parfaitement en utilisant la Mécanique de la Rupture ;
- ❑ évaluation du chargement pour lequel la fissure ne se propage pas.

I-2-2 Description des courbes de propagation de fissures

L'interprétation de la courbe de dommage repose sur l'existence d'une taille critique de fissure, qui dépend de la contrainte maximale atteinte au cours des cycles, et au-dessus de laquelle la propagation serait irréversible et conduirait à la rupture.

On a donc cherché à suivre la progression des fissures au cours de la fatigue. Si elles débouchent en surface, ce qui est le cas général, et si la méthode utilisée est suffisamment sensible, leur observation est possible à partir d'une longueur de 0,01 mm à 0,1 mm suivant la résolution du système de suivi de la longueur des fissures.

La façon la plus simple de représenter la progression des fissures est de rapporter leur profondeur en fonction du nombre de cycles subis par l'éprouvette d'essai. Le nombre de cycles N pouvant être très élevé (quelques millions de cycles), on utilise l'échelle logarithmique pour le représenter. La Figure I-3 représente schématiquement ce type de courbe, où trois éprouvettes contenant une fissure de longueur initiale a_i , supposée la même pour les trois essais, sont soumises à trois contraintes alternées différentes ; la contrainte la plus élevée conduit naturellement à la durée de vie la plus faible.

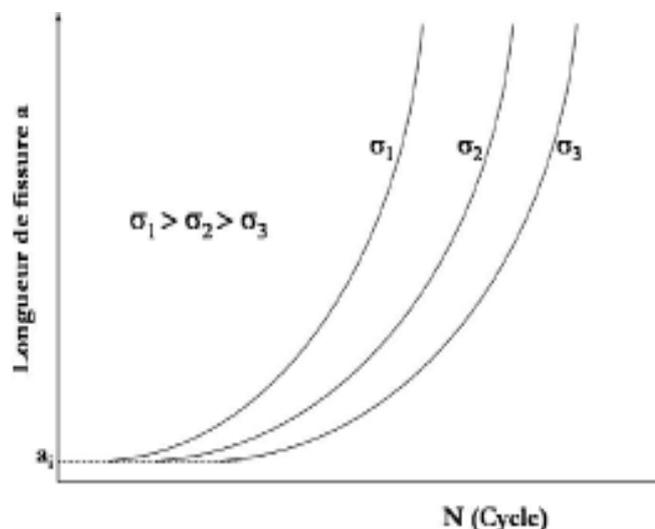


Figure I-3 : Longueur de fissure en fonction du nombre de cycles

On peut, à partir des enregistrements de la longueur de fissure a en fonction du nombre de cycles N , tracer la vitesse de fissuration da/dN en fonction d'un paramètre caractérisant le chargement (la contrainte alternée σ_a ou la déformation totale par cycle $\varepsilon\sqrt{a}$ pondérée par la longueur de fissure).

Le développement de la Mécanique de la Rupture a permis, grâce notamment à l'utilisation du facteur d'intensité des contraintes (FIC) noté K , de mieux étudier quantitativement les stades de propagation lente et de propagation brutale des fissures de fatigue. K est proportionnel à $\sigma_a\sqrt{a}$. L'approche s'appuyant sur le FIC est la plus utilisée pour décrire la propagation des fissures de fatigue, tant que la plastification en pointe de fissure qui accompagne la propagation reste confinée dans une zone de taille faible par rapport à la longueur de la fissure et aux dimensions de la structure fissurée. On a pu, avec cette approche, traiter de nombreux cas pratiques où l'on a observé des fissures préexistantes dans une structure.

Les résultats expérimentaux obtenus par cette méthode montrent que les variations de la vitesse de fissuration en fonction de l'amplitude du FIC présentent, en échelle bi-logarithmique, l'allure décrite sur la Figure I-4 :

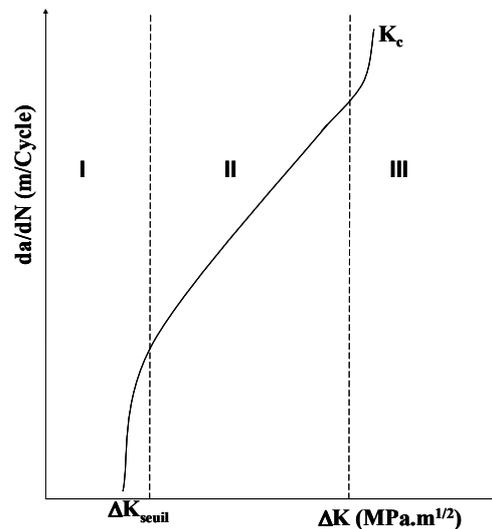


Figure I-4 : Exemple de courbe de propagation.

On distingue habituellement trois domaines dans la propagation des fissures « longues » :

- Domaine I : domaine des faibles vitesses de fissuration où les effets de l'environnement et de la microstructure sont prédominants. Pour décrire ce domaine, on effectue généralement des essais à ΔK décroissant pour déterminer la valeur de ΔK_{seuil} ;
- Domaine II : domaine des vitesses moyennes ou de Paris où la vitesse de propagation varie linéairement avec ΔK en échelle bi-logarithmique. La fissure se propage le plus souvent dans un plan perpendiculaire à la direction de l'effort appliqué. C'est le domaine où s'applique la loi de Paris ;
- Domaine III : domaine correspondant au cas des chargements élevés pour lesquels une déchirure se produit dans le matériau en pointe de fissure. Les vitesses de propagation sont très élevées et conduisent très vite à la rupture de la pièce (pour $K_{\text{max}} = K_{IC}$).

Pour décrire la partie linéaire de cette courbe (domaine II), Paris proposa la relation empirique :

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

où C et m sont des constantes dépendant du matériau, des conditions de chargement et de l'environnement.

La loi proposée par Paris ne décrit pas la totalité de la courbe ; cependant, d'autres lois empiriques ou analytiques ont été proposées pour décrire l'ensemble de la courbe de propagation. Forman, pour tenir compte de l'augmentation asymptotique de la vitesse de fissuration lorsque $K_{max} \rightarrow K_{IC}$, proposa une amélioration de la relation de Paris pour décrire les domaines II et III de la courbe de propagation :

$$\frac{da}{dN} = \frac{C (\Delta K)^m}{(1-R)(K_{IC} - K_{max})}$$

où C est une constante dépendant du matériau, pour les aciers m est de l'ordre de 4. Cette relation ne tient pas compte de l'existence d'un seuil de fissuration mais fait intervenir l'influence du rapport de charge R sur la vitesse de fissuration.

Pour rendre compte de l'effet de seuil dans la région I, Klesnil et Lucas [Kle72] proposèrent quant à eux une modification de la relation sous la forme :

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

Frost a alors proposé une relation qui rend compte de l'ensemble de la courbe de propagation, établie pour des aciers ferrito-perlitiques [Fro73] :

$$\frac{da}{dN} = B \left[\frac{(\Delta K - \Delta K_{seuil})^4}{R_m^2 (K_{IC}^2 - K_{max}^2)} \right]^n$$

K_{IC} désignant la valeur critique du facteur d'intensité de contraintes, ΔK_{seuil} est la valeur de ΔK au seuil de propagation pour un rapport de charge R donné, R_m est la résistance à la traction du matériau, B et n sont des constantes caractéristiques du matériau.

Les durées de vie en fatigue peuvent alors être calculées en intégrant ce type de lois de propagation. Par exemple, le modèle de Kaynak [Kay96(2)] pour les fissures longues suppose que la durée de vie totale en fatigue est seulement égale à la durée totale de propagation des fissures longues, qui peut être déterminée en intégrant la loi de Paris relative aux fissures longues :

$$N_{tot} = N_{FL} = \int_{a_i}^{a_f} \frac{da}{C_{FL} \Delta K^{m_{FL}}}$$

où a_f est la taille critique de la fissure et a_i la taille initiale de fissure.