

Effets de fermeture de fissure et de la plasticité sur la propagation en fatigue à rapport de charge négatif

Théotime ASSELIN^{1,2}, Olivier ANCELET¹, Valéry VALLE², Guillaume BENOIT², Florence HAMON² et Gilbert HÉNAFF²

¹ Framatome, 1 place Jean Millier, 92048 Paris La Défense, France

² Institut Pprime, UPR 3346 CNRS ENSMA Université de Poitiers, École Nationale Supérieure de Mécanique et d'Aérotechnique, Téléport 2, 1 avenue Clément Ader, 86961 Futuroscope Chasseneuil, France

Points d'intérêt.

- Un paramètre représentatif de la force motrice de propagation de fissure est proposé.
- Les effets de plasticité généralisée et de fermeture de fissure y sont intégrés.
- Le paramètre permet de d'unifier la propagation à différents niveaux de plasticité.
- Une approche simplifiée, compatible avec le code RSE-M est validée.

1 INTRODUCTION :

Les composants du circuit primaire des centrales nucléaires françaises sont dimensionnés en fatigue par le biais d'une courbe de conception. Dans les cas où cette courbe de conception ne permet pas de justifier la tenue d'un composant, des analyses plus poussées peuvent être réalisées, en étudiant l'amorçage et la propagation d'un défaut. La propagation par fatigue est alors modélisée en effectuant des combinaisons pénalisantes de transitoires, et sans prendre en compte les effets d'histoire de chargement. Les effets de retard communément observés après une surcharge ne sont donc pas intégrés dans ce type d'analyse. Un des leviers pour améliorer les modélisations et donc allonger les durées de fonctionnement des centrales pourrait donc être de considérer les effets d'histoire par l'intégration d'effets de fermeture plus réalistes dans les modélisations. En effet, à l'heure actuelle les effets de fermeture sont intégrés dans les lois de propagation par fatigue par un coefficient multiplicateur dépendant du rapport de charge :

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K_{eff})^n ; \Delta K_{eff} = f(R) \cdot \Delta K_{cp} \quad (1)$$

Où ΔK_{cp} est un facteur d'intensité de contraintes intégrant une correction de zone plastifiée, et $f(R)$ une fonction du rapport de charge égale pour l'acier 18MND5 à [1] :

$$f(R) = \max\left(\frac{1}{3}; \frac{1}{1-R}\right) \text{ si } K_{min} < 0 \text{ MPa}\sqrt{m} \quad (2)$$

Ces lois de propagation ont été déterminées à partir d'essais sur éprouvettes C(T), donc à rapport de charge positif, et dans un cadre de plasticité confinée en pointe de fissure. Or, les composants peuvent subir des transitoires de température et de pression, notamment des chocs thermiques froids qui peuvent engendrer des chargements de traction-compression. De plus, selon les transitoires, il est possible que les effets de plasticité ne soient plus confinés en pointe de fissure, mais généralisés. Il est alors nécessaire de vérifier que les lois de fatigue codifiées sont bien adaptées aux chargements à rapports de charge négatifs, pouvant engendrer de la plasticité généralisée.

Dans ce but, des essais de fatigue conduits en déformation imposée à $R_e = -1$ ont été effectués sur un acier faiblement allié 18MND5, communément employé pour la fabrication de viroles d'enveloppes sous pression pour application nucléaire. Deux niveaux de déformation sont imposés : $\Delta \varepsilon_t/2 = 0,2 \%$ et $\Delta \varepsilon_t/2 = 0,6 \%$. Le premier niveau de déformation permet de garantir des effets de plasticité confinés en pointe de fissure, tandis que le second engendre une plasticité généralisée à l'échelle de l'éprouvette.

En complément, des essais de référence sont effectués à différents rapports de charge sur des éprouvettes normalisées C(T). Ces essais visent à déterminer une loi de propagation de référence pour le matériau, et sont réalisés selon le standard ASTM E647-15^{°1} [2].

Afin de prendre en compte les effets de la plasticité et des effets de fermeture, une méthodologie de calcul d'un paramètre représentatif de la force motrice de propagation de fissure est développée, basée sur l'intégrale de Rice J . Les travaux présentés ici visent à valider la méthodologie de calcul de ce paramètre, et de le confronter aux essais normalisés de référence.

2 METHODOLOGIE :

Les essais de référence conduits sur éprouvettes C(T) sont réalisés selon le standard [2], et le taux d'ouverture de fissure est mesuré par la variation de complaisance, déterminée par un capteur d'ouverture positionné en face avant de l'éprouvette. Les courbes de propagation de référence sont donc exprimées en fonction du paramètre ΔK_{eff} . Ces essais sont effectués en milieu air, à température ambiante. Différents rapports de charge ($R=0,1$, $R=0,5$, $R=0,7$ et $R=0,8$) sont appliqués aux éprouvettes.

Les essais de fatigue pilotés en déformation à $R_\epsilon=-1$ sont conduits sur des éprouvettes uniaxiales à section rectangulaire de $4 \text{ mm} \times 8 \text{ mm}$, sollicitées à température ambiante. Un défaut semi-sphérique de rayon $300 \text{ }\mu\text{m}$ est introduit sur la face avant de l'éprouvette, de manière à amorcer un front de fissure régulier en un nombre limité de cycles. Le suivi de la propagation de la fissure est réalisé par suivi de potentiel électrique, via des fils soudés à 1 mm de part et d'autre du centre du défaut initial. La fonction de calibration du suivi de potentiel est obtenue à la fois par des marquages à l'encre réalisés en cours d'essai et par modélisation éléments finis.

En complément, un dispositif de mesure des effets de fermeture adapté aux essais sur éprouvettes uniaxiales sollicitées en traction-compression a été développé [3]. Ce dispositif mêle une mesure par corrélation d'images intégrant une discontinuité dans les fonctions de forme [4], ainsi que la méthode du suivi de potentiel électrique. Il est alors possible de déterminer l'évolution de la variation de déformation participant effectivement à la propagation de la fissure $\Delta \epsilon_{eff}$ et au taux d'ouverture associé U :

$$U = \frac{\Delta \epsilon_{eff}}{\Delta \epsilon_t} \quad (3)$$

Connaissant en différents instants au cours de la propagation la profondeur et la forme de la fissure, ainsi que le taux d'ouverture de fissure associé, il est possible de déterminer deux paramètres représentatifs de la force motrice de propagation de la fissure, intégrant ou non des effets de fermeture : ΔK_J et $\Delta K_{J,eff}$. Ces deux paramètres sont issus de l'intégrale de Rice J . La détermination de ces paramètres repose sur un modèle éléments finis 3D de l'éprouvette uniaxiale représentant explicitement la fissure. Du fait des limitations du calcul de l'intégrale J à des chargements purement monotones, un chargement équivalent est imposé à l'éprouvette. Ce chargement est déterminé de la manière suivante. Dans le cas du calcul du paramètre ΔK_J , le chargement appliqué est une déformation monotone de la partie utile de l'éprouvette de 0 à $\Delta \epsilon_t$, tandis que pour le calcul de $\Delta K_{J,eff}$, le chargement équivalent appliqué est une déformation monotone de 0 à $\Delta \epsilon_{eff}$. De cette manière, le chargement appliqué pour le calcul de $\Delta K_{J,eff}$ ne prend en compte que la portion participant effectivement à la propagation de fissure, ce qui rend ainsi compte des effets de fermeture. La loi de comportement implémentée est la loi de comportement cyclique issue des cycles stabilisés obtenus sur éprouvettes lisses à température ambiante. Les paramètres ΔK_J et $\Delta K_{J,eff}$ sont déduites des intégrales J et J_{eff} selon :

$$\Delta K_J = \sqrt{J \times E^*} \text{ et } \Delta K_{J,eff} = \sqrt{J_{eff} \times E^*} \quad (4)$$

Où :

$$E^* = \frac{E}{(1 - \nu)^2} \quad (5)$$

En complément, une approche ingénieur est évaluée, dans l'objectif de simplifier les calculs. En effet, la détermination des paramètres ΔK_J et $\Delta K_{J,eff}$ demande de réaliser deux calculs, et l'intégration du chargement effectif dans le calcul complexifie grandement la démarche. Il est alors proposé de déterminer le paramètre $\Delta K_{J,U}$, en étendant l'approche proposée par le standard [2] et le code RSE-M [1] à un cadre compatible avec la plasticité généralisée :

$$\Delta K_{J,U} = U \times \Delta K_J \quad (6)$$

La prise en compte des effets de fermeture est alors réalisée de manière simplifiée, et à partir d'une seule mise en données.

3 RESULTATS :

Les vitesses de fissuration en fonction des paramètres ΔK_{eff} (éprouvettes C(T)) et ΔK_J ou $\Delta K_{J,eff}$ sont tracées sur la Figure 1. Les valeurs de taux d'ouverture de fissure utilisées pour le calcul des paramètres $\Delta K_{J,eff}$ sont issues de [3].

En dépit des différentes valeurs de rapport de charge investiguées sur les éprouvettes C(T), la prise en compte des effets de fermeture via la force motrice ΔK_{eff} permet de réunir l'ensemble des essais sur une même pente, avec un intervalle de dispersion restreint. Le mode de pilotage (ΔK croissant ou ΔK décroissant) n'influe pas sur la loi de propagation. L'ensemble des données obtenues lors des essais effectués sur éprouvettes C(T) constituent une référence qui permet d'évaluer la pertinence des approches développées dans les équations (4) et (6).

Un effet de l'amplitude de déformation apparaît sur les essais conduits sur les éprouvettes uniaxiales. En effet, les courbes à $\Delta \varepsilon_t/2 = 0,2 \%$ (en orange, symboles creux) et les courbes à $\Delta \varepsilon_t/2 = 0,6 \%$ (en bleu, symboles creux) forment deux populations distinctes. La prise en compte des effets de fermeture permet toutefois de rapprocher les deux essais sur une même tendance. En effet, les niveaux de déformation plastique, donnés dans le Tableau 1 influencent le taux d'ouverture de fissure, ce qui corrige en conséquence le paramètre $\Delta K_{J,eff}$ en fonction de la déformation imposée. La courbe de fissuration ainsi obtenue se superpose aux essais de référence obtenus sur éprouvettes C(T), et la prolonge dans le cas des essais à $\Delta \varepsilon_t/2 = 0,6 \%$.

Les deux approches développées ici sont comparées sur la Figure 2, et mènent à des résultats similaires. En effet, les courbes obtenues pour les deux niveaux de chargement appliqués sont très proches, voire pratiquement confondues. Ce résultat est attendu pour le plus faible niveau de déformation $\Delta \varepsilon_t/2 = 0,2 \%$ pour lequel les hypothèses de la mécanique élastique linéaire de la rupture restent valides, ce qui constitue un cadre où le paramètre $\Delta K_{J,eff}$ est proportionnel au chargement appliqué. Ce n'est toutefois pas le cas pour le second niveau de chargement imposé, pour lequel les effets de plasticité généralisée invalident la linéarité du paramètre $\Delta K_{J,eff}$ vis-à-vis du chargement. La non-linéarité induite par le comportement élastoplastique du matériau reste toutefois limitée, ce qui explique la faible différence entre $\Delta K_{J,eff}$ et $\Delta K_{J,U}$. L'approche ingénieur, compatible avec le code RSE-M [4] est ainsi validée pour les chargements explorés ici.

Ainsi, dans le cas de l'acier 18MND5, l'extrapolation de lois de fatigue issues d'essais conduits à R positif sur des éprouvettes C(T) dans des domaines de plasticité généralisée est pertinente. Ceci est néanmoins conditionné à la bonne connaissance du taux d'ouverture adapté à la géométrie ainsi qu'au chargement étudiés.

4 CONCLUSION :

Des essais de fatigue uniaxiale en traction-compression ont été réalisés, dans le but de quantifier l'impact des effets de fermeture de fissure sur la propagation par fatigue, notamment dans un cadre de plasticité généralisée. Des paramètres basés sur l'intégrale de Rice J ont été développés, dont une approche adaptée à l'ingénieur, afin de prendre en compte à la fois les effets de fermeture et de plasticité non confinée en pointe de fissure sur la force motrice de propagation de fissure. Dans un premier temps, il a été montré que les paramètres $\Delta K_{J,eff}$ et $\Delta K_{J,U}$ permettent de rationaliser les effets du niveau de chargement et de fermeture en regroupant différents essais sur une même loi de propagation. En complément, des essais de référence à rapport de charge positif ont été menés sur des éprouvettes C(T), dans un but de validation de la démarche développée ici. L'approche développée à partir des paramètres $\Delta K_{J,eff}$ ou $\Delta K_{J,U}$ permet

d'étendre le domaine de validité des lois déterminées lors d'essais normalisés sur éprouvettes C(T) à des domaines de chargement engendrant de la plasticité généralisée.

$\Delta\epsilon_t/2$ [%]	$\Delta\epsilon_p/2$ [%]
0,2	0
0,6	0,308

Tableau 1. Amplitudes de déformation plastiques associées à l'amplitude de déformation totale pour l'acier 18MND5.

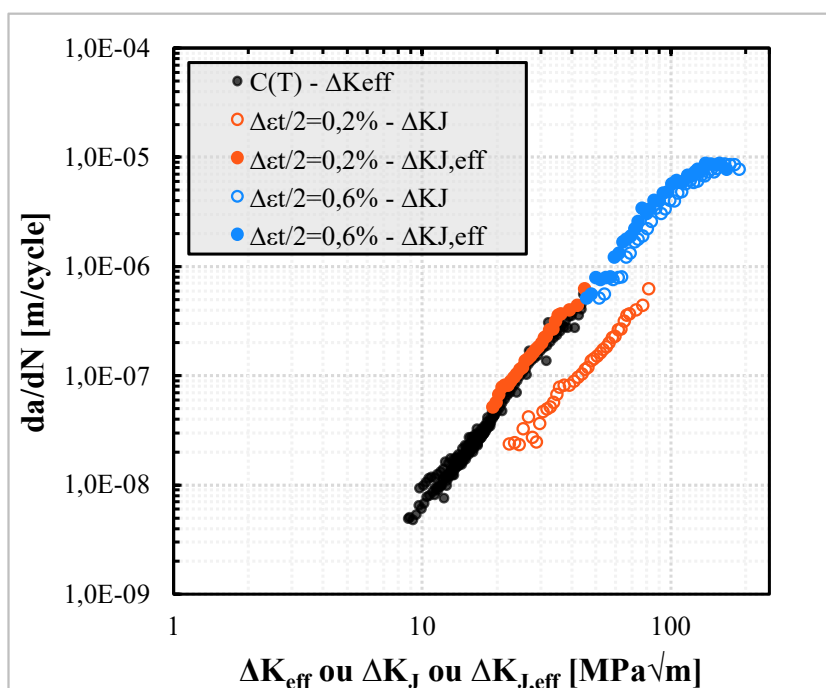


Figure 1. Évolution des vitesses de fissuration en fonction des paramètres ΔK_{eff} , ΔK_J ou $\Delta K_{J,eff}$

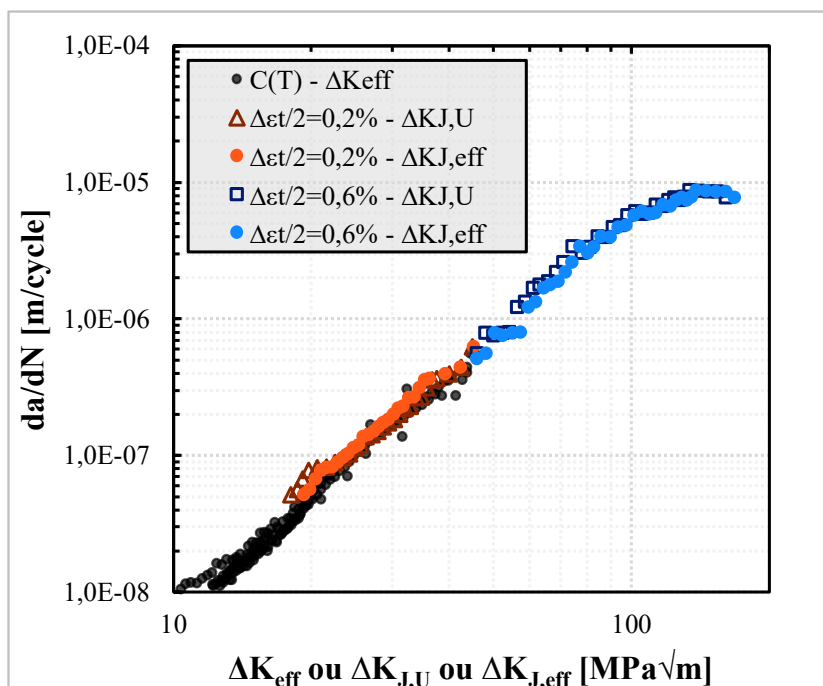


Figure 2. Comparaison des deux approches proposées

Références

1. AFCEN RSE-M
2. ASTM E647-15e1 Standard Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates (2015). doi : 10.1520/E0647-15E01.
3. T. Asselin, O. Ancelet, G. Benoit, F. Hamon, V. Valle, G. Hénaff. Crack opening and closure detection through coupled DCPD and non-continuous DIC method – Application to LCF tests. International Journal of Fatigue 210 109655 (2026). doi : [10.1016/j.ijfatigue.2026.109655](https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2026.109655).
4. V. Valle, S. Hedan, P. Cosenza, A-L Fauchille, M. Berdjane. DIC Development for the Study of Materials Including Multiple Crossing Cracks. Exp Mech 55, pp. 379-91 (2015). doi : 10.1007/s11340-014-9948-1