

CHAPITRE X:

COMPARAISON ENTRE FISSURES COURTES ET LONGUES

Les travaux que nous avons présentés auparavant ont été consacrés à l'étude de la propagation des fissures courtes amorcées naturellement en surface (fissures courtes) ainsi que des fissures amorcées à partir d'entailles aiguës dans l'acier *S355NL*. L'objectif de ce chapitre est de comparer les comportements en propagation des fissures courtes et longues en relation avec les effets de fermeture et les effets d'interaction avec la microstructure.

X-1 Chargement d'amplitude constante

Les courbes de propagation de la Figure X-1 représentent l'évolution de la vitesse de propagation des fissures courtes et longues (da/dN) en fonction de l'amplitude du facteur d'intensité de contrainte nominale (ΔK) pour un rapport de charge R égal à 0,1. Il est important de noter que la vitesse de propagation des fissures courtes est supérieure à celles des fissures longues pour le même facteur d'intensité de contrainte. La figure montre aussi que la propagation des fissures courtes, initialement rapide, s'effectue à des niveaux de ΔK inférieurs à la valeur seuil ΔK_{seuil} déterminée pour des fissures longues. Enfin, la chute de vitesse des fissures courtes est détectée pour une valeur inférieure au seuil de propagation des fissures longues. Les mêmes observations sont également valables pour le rapport de charge $R = 0,3$ (Figure X-2) et pour $R = 0,5$ (Figure X-3).

Pour les différents rapports de charge, nous constatons que les vitesses de propagation sont supérieures pour les fissures courtes, et que la différence de comportement entre les fissures courtes et longues s'amenuise lorsque la valeur de ΔK croît. Ce comportement spécifique est en contradiction avec le concept de similitude généralement accepté en Mécanique de la Rupture.

Les points relatifs aux fissures courtes sont dispersés dans une bande, particulièrement dans le domaine des faibles valeurs de ΔK , qui correspond à l'amorçage et au stade de propagation précoce des fissures courtes. L'analyse des résultats précédents permet d'admettre que cette dispersion est due en grande partie aux effets microstructuraux.

La différence de comportement des fissures courtes et longues diminue chaque fois que l'on augmente le rapport de charge ce qui nous laisse penser que cette différence est aussi liée au phénomène de fermeture.

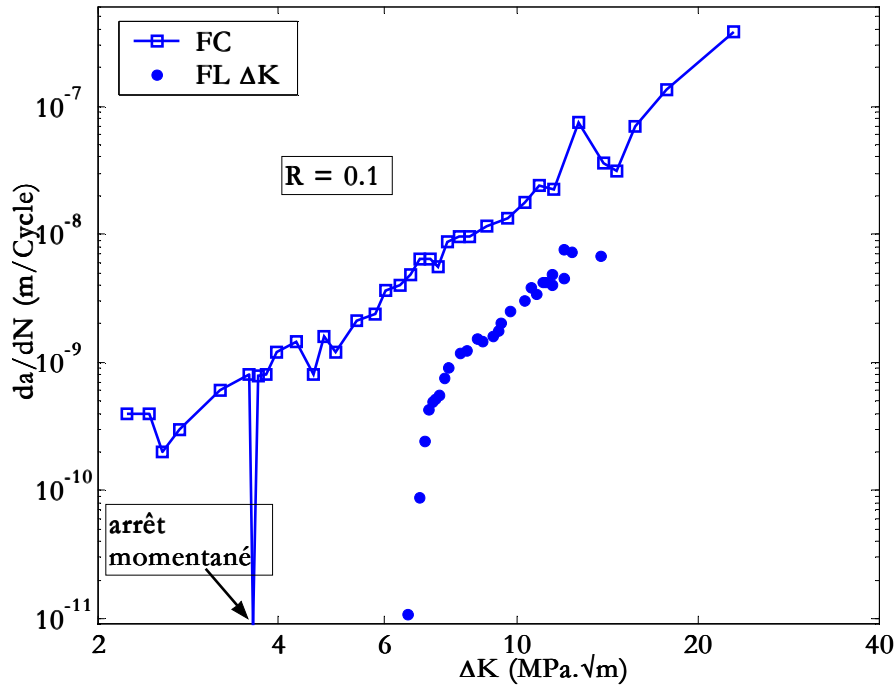


Figure X-1 : Propagation des fissures courtes et longues à $R = 0,1$ exprimée en termes de ΔK [sp05 et spl03]

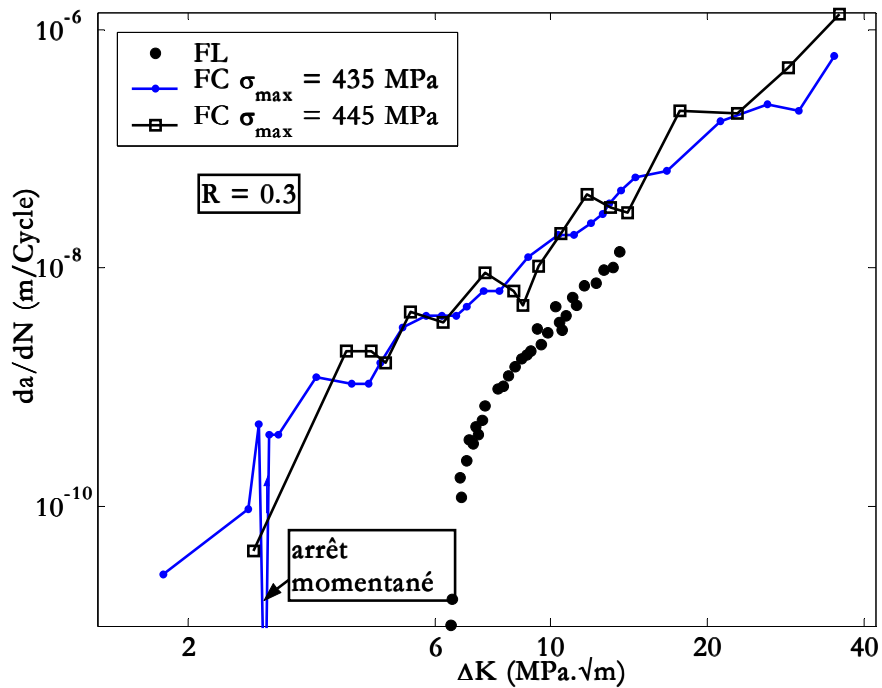


Figure X-2 : Propagation des fissures courtes et longues à $R = 0,3$ exprimée en termes de ΔK [sp07, sp06 et spl05]

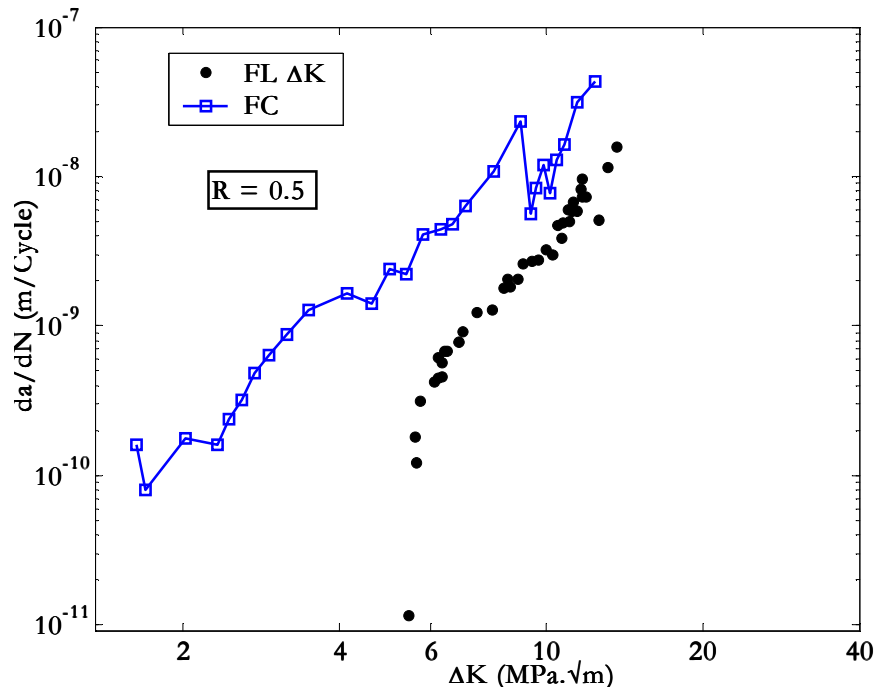


Figure X-3 : Propagation des fissures courtes et longues à $R = 0,5$ exprimée en termes de ΔK [sp11 et spl06]

X-2 Prise en compte de l'effet de fermeture

Dans cette étude, afin de corréliser la propagation des fissures courtes et longues, un critère de fermeture de fissure a été appliqué à travers l'utilisation de ΔK_{eff} pour les données de fissures longues. Les courbes de fissuration comparant les fissures courtes et longues ont été retracées en utilisant les valeurs de ΔK_{eff} calculées par la relation $\Delta K_{eff} = K_{max} - K_{ouv}$, où K_{ouv} est le facteur d'intensité de contrainte à l'ouverture de fissure.

Les Figure X-4 à Figure X-7 représentent une comparaison des comportements entre fissures courtes et fissures longues ; pour les fissures longues, les symboles en triangle sont relatifs aux données corrélées avec ΔK_{eff} , alors que les points représentent le comportement des fissures longues sans prendre en compte l'effet de fermeture (utilisation de ΔK). Ces courbes montrent que la corrélation utilisant ΔK_{eff} pour les données concernant les fissures longues se traduit par une similitude des comportements de propagation des fissures longues et courtes lorsque le ΔK est supérieur au $\Delta K_{eff,seuil}$: l'utilisation de ΔK_{eff} translate la courbe de propagation des fissures longues vers la gauche et rapproche la zone de propagation des fissures courtes de la courbe de propagation des fissures longues, ce qui signifie que la vitesse de propagation anormalement plus élevée des fissures courtes diminue. Par conséquent, on peut conclure que l'application du critère de fermeture de fissure par l'utilisation de ΔK_{eff} pour les données des fissures longues réduit l'écart entre les fissures courtes et longues. Cependant, il n'a pas de similitude dans la région située sous le seuil de propagation des fissures longues, puisque les fissures courtes s'amorcent et se propagent alors avec une vitesse accélérée ou décélérée, bien en dessous des valeurs de $\Delta K_{eff,seuil}$ des fissures longues.

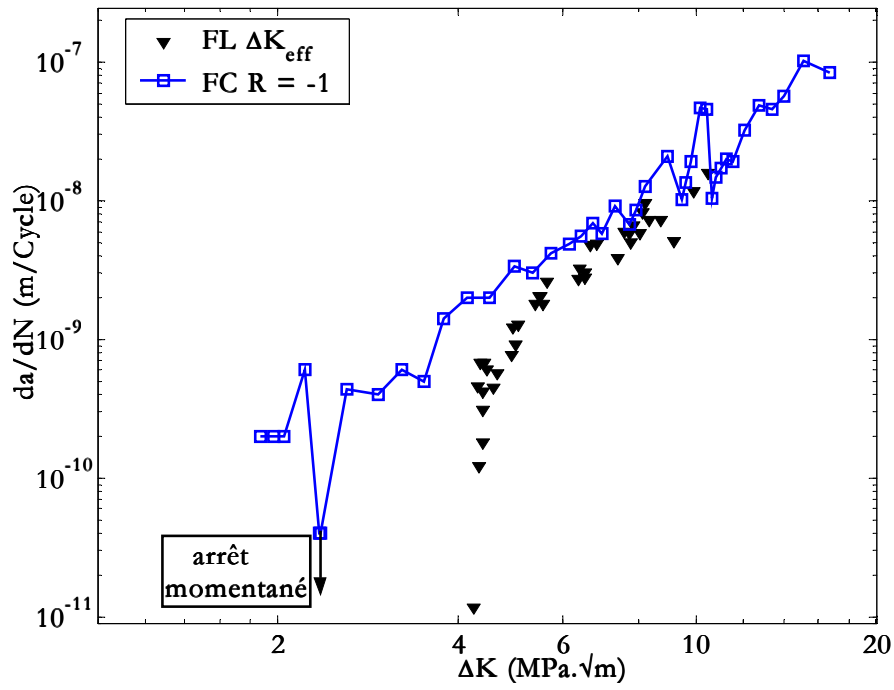


Figure X-4 : Propagation de fissures courtes en termes de ΔK et longues en termes de ΔK_{eff} [sp17 et spl06]

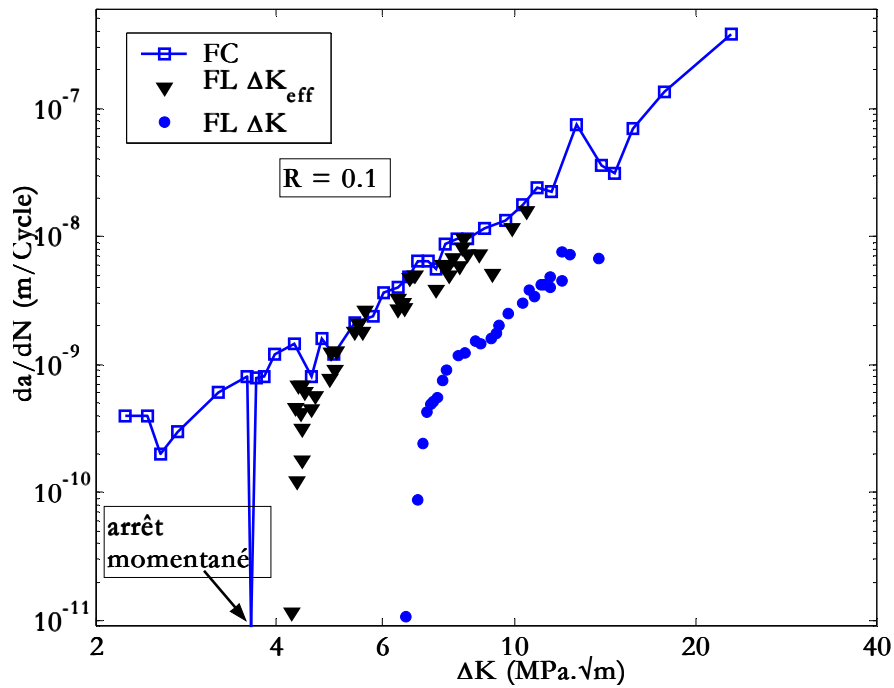


Figure X-5 : Comparaison de vitesses de propagation des fissures courtes et longues (prise en compte de la fermeture de fissure – $R = 0,1$) [sp05, spl03 et spl06]

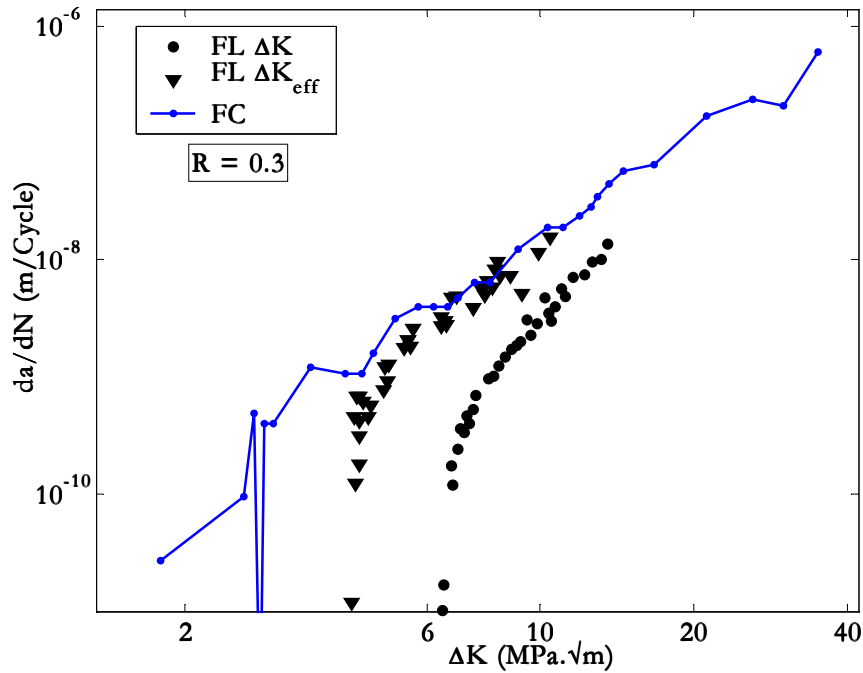


Figure X-6 : Comparaison de vitesses de propagation des fissures courtes et longues (prise en compte de la fermeture de fissure – $R = 0,3$) [sp07, spl05 et spl06]

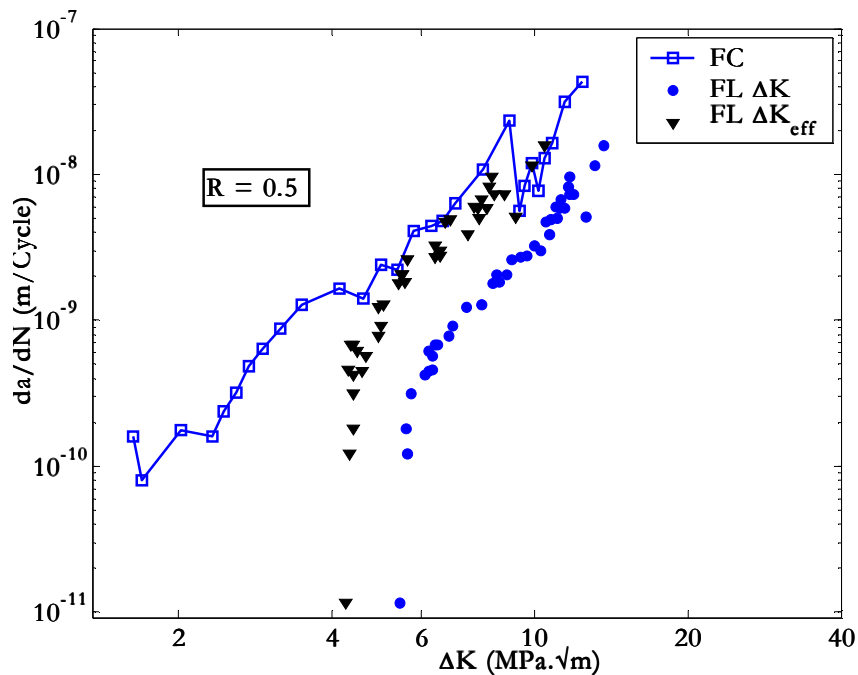


Figure X-7 : Evolution de la vitesse de propagation des fissures courtes et longues (prise en compte de l'effet de fermeture – $R = 0,5$) [sp11, et spl06]

Les fissures courtes se propagent à des vitesses initialement décroissantes avant d'accélérer et de rejoindre la tendance des fissures longues. Ces résultats ne nous permettent pas de conclure que les différences entre fissures courtes et longues sont seulement liées au phénomène de fermeture, mais d'autres effets doivent être considérés pour expliquer ces différences lorsque l'amplitude de l'intensité des contraintes est inférieure au $\Delta K_{eff,seuil}$. D'après les Figure X-4 à Figure X-7, on remarque que pour une profondeur de fissure de l'ordre de 50 à 120 μm , tous les points expérimentaux de la vitesse de fissuration des petites fissures, sont légèrement en dessous

de la valeur seuil de propagation du matériau (déterminé à partir d'essais fissures longues), de plus la vitesse de propagation des petites fissures diminue jusqu'à un minimum, avant de croître progressivement avec l'augmentation de la longueur de fissure pour rejoindre la courbe de propagation des grandes fissures. La réunion des deux courbes se fait pour des valeurs de ΔK de l'ordre de 5 à 8 $\text{MPa}\cdot\sqrt{\text{m}}$, soit une longueur de l'ordre de 300 à 500 μm lorsque le rapport de charge passe de $R = 0,5$ à $R = -1$.

X-3 Chargement variable

Dans ce paragraphe, nous allons comparer les résultats issus des essais de propagation de fissures courtes sous chargement d'amplitude variable (surcharge répétée, chargement croissant ou décroissant) avec celui des fissures longues sans effets de fermeture (ΔK_{eff}). Nous avons représenté dans les Figure X-8 à Figure X-10, les vitesses de propagation des fissures courtes sous chargement variable en fonction de l'amplitude du facteur d'intensité de contrainte. Pour analyser les résultats de propagation des fissures courtes et longues de fatigue, nous avons reporté dans cette figure les résultats concernant les fissures longues en utilisant ΔK_{eff} comme paramètre.

Comme dans le cas de chargements d'amplitude constante, les fissures courtes se propagent pour des amplitudes du facteur d'intensité de contrainte inférieures au seuil des fissures longues. Les vitesses de propagation des fissures courtes sous chargement variable rejoignent celles des fissures longues à l'exception du chargement *bloc1* pour lequel la vitesse de propagation des fissures courtes reste supérieure dans un rapport de 2 à 3 à la vitesse de propagation des fissures longues jusqu'à rupture (Figure X-8). Les accélérations observées, après application de surcharges répétées, ont été attribuées à une modification du champ de contraintes résiduelles en pointe de fissure. L'effet de fermeture est souvent évoqué comme responsable des différences entre fissure courte et longue, ce paramètre paraît là encore insuffisant pour expliquer une telle différence.

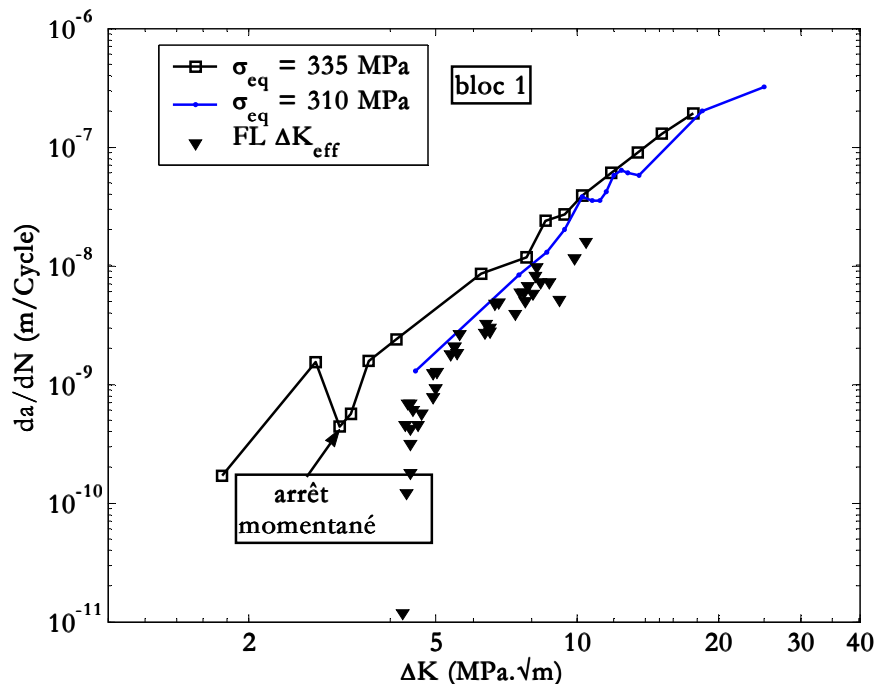


Figure X-8 : Influence des surcharges répétées sur la vitesse de propagation [sp21, spl20 et spl06]

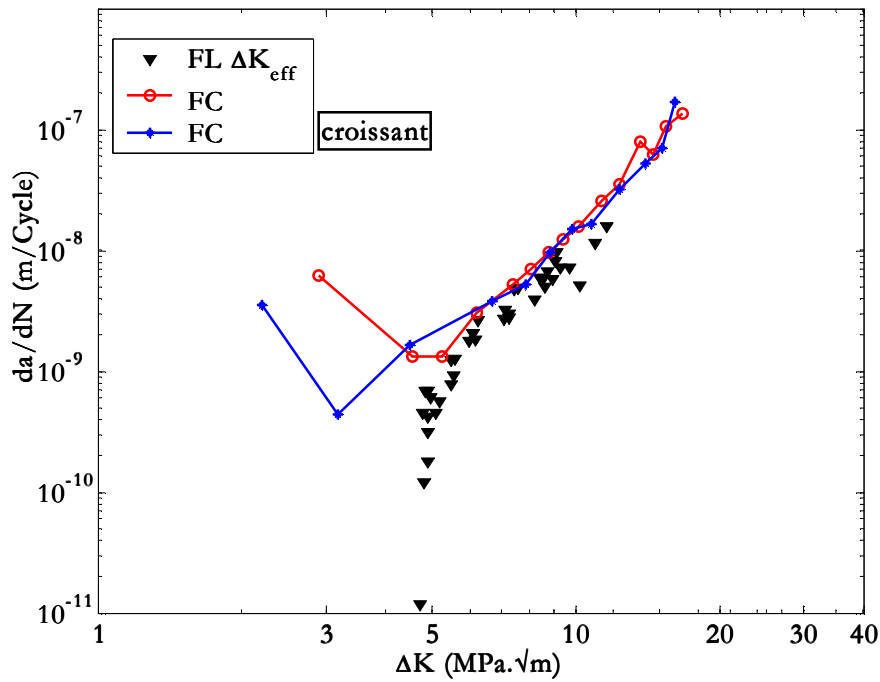


Figure X-9 : Comparaison de l'évolution de fissures courtes sous chargement variable et courbe de référence [sp23 et spl06]

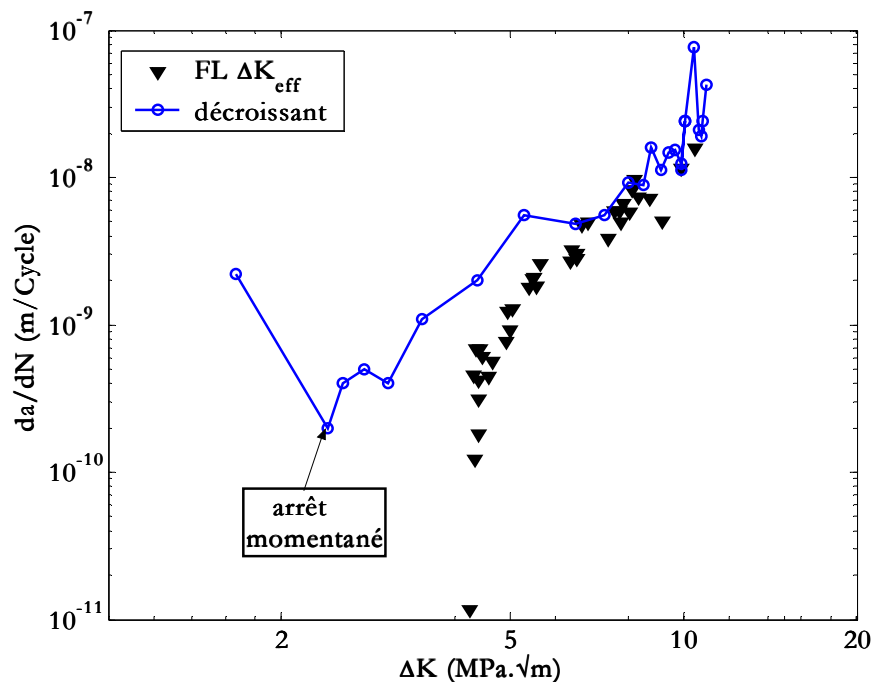


Figure X-10 : Comparaison des vitesses de propagation des fissures courtes (chargement décroissant) et longue fonction de ΔK_{eff} [sp25 et spl06]

X-4 Approche énergétique

Nous avons montré dans cette étude que sous un chargement d'amplitude constante ou variable, les fissures courtes de fatigue dans l'acier *S355NL* se propagent pour des amplitudes du facteur d'intensité de contrainte (ΔK) situées en dessous des valeurs seuil des fissures longues ΔK_{seuil} et même $\Delta K_{\text{eff,seuil}}$.

La prise en considération de l'effet de fermeture de fissure réduit, pour des valeurs de ΔK supérieures à $\Delta K_{eff,seuil}$, dans une large proportion les écarts de vitesses entre fissures courtes et longues, mais pas totalement comme le montrent les courbes de propagation représentées dans les Figure X-4 à Figure X-10. L'effet de fermeture à lui seul ne peut donc expliquer pour les fissures courtes des valeurs seuils inférieures à $\Delta K_{eff,seuil}$.

Afin d'expliquer ces différences, nous nous pencherons plutôt sur un critère énergétique. Nous allons donc nous intéresser au calcul de l'énergie nécessaire à la propagation d'une fissure et à la condition seuil intrinsèque dans un matériau liée à l'énergie spécifique de création de surface.

Dans la théorie initiale de Griffith, l'énergie ΔU correspondant au taux de restitution d'énergie élastique emmagasinée lorsqu'on opère à déplacement imposé, est rapportée à la surface fissurée. L'énergie spécifique G de Griffith est ainsi définie à partir de l'énergie ΔU dépensée pour un accroissement élémentaire ΔA de la surface fissurée, par la relation :

$$G = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta U}{\Delta A} = \frac{\partial U}{\partial A}$$

ΔA est égale au produit de l'accroissement de la longueur de fissure Δa par l'épaisseur de l'échantillon ; l'énergie spécifique est parfois rapportée directement à l'accroissement de longueur de fissure lorsqu'on considère une épaisseur unitaire de l'échantillon. Dans un matériau ayant un comportement purement fragile, la condition seuil intrinsèque de propagation est définie par l'égalité entre l'énergie de Griffith et l'énergie spécifique de création de surface libre γ_s , soit :

$$G = \frac{\partial U}{\partial A} = 2\gamma_s$$

L'existence du coefficient 2 provient du fait que deux surfaces sont en fait créées lors de la rupture. Dans les matériaux fragiles, où la plasticité est inexistante, une fissure pourra donc se propager dès lors que :

$$G \geq 2\gamma_s$$

L'énergie G de Griffith s'exprime, dans un état de déformations planes, en fonction du facteur d'intensité de contraintes K sous la forme suivante :

$$G = \frac{1-\nu^2}{E} K^2$$

Nous pouvons alors définir une valeur seuil intrinsèque $K_{int,seuil}$ pour les matériaux fragiles par :

$$K_{seuil.int} = \sqrt{\frac{2\gamma_s}{1-\nu^2}} E$$

Pour les aciers, la valeur de l'énergie spécifique γ_s donnée dans la littérature [Mur84] est proche de $2 \text{ J}/\text{m}^2$, ce qui conduit, compte tenu des valeurs du module d'Young et du coefficient de Poisson de l'acier *S355NL*, à un seuil intrinsèque $K_{int,seuil}$ d'environ :

$$K_{seuil,int} \approx 1 \text{ MPa}\cdot\sqrt{\text{m}}$$

Pour les matériaux ductiles, l'énergie dépensée pour propager une fissure est bien entendu plus importante que celle mise en œuvre lors de la création d'une surface libre dans un matériau fragile. S'appuyant sur la démarche de Griffith, Irwin proposa d'inclure dans le bilan énergétique de propagation, outre l'énergie spécifique γ_s , les énergies dépensées dans les processus dissipatifs qui précèdent la propagation, telle que la plastification de l'extrémité d'une fissure. Dans ces conditions, la propagation de la fissure se produira lorsque l'énergie spécifique de propagation G atteindra la valeur :

$$G = 2(\gamma_s + \gamma_p)$$

γ_s : énergie spécifique de création de surface, égale à $2 \text{ J}/\text{m}^2$ pour un acier ;

γ_p : énergie spécifique de plastification de l'extrémité de la fissure dissipée avant propagation.

En utilisant ce principe et à partir des résultats expérimentaux de ce chapitre, nous pouvons alors évaluer l'énergie spécifique minimale de plastification γ_p nécessaire à la propagation d'une fissure dans l'acier *S355NL* (Tableau X-1) :

$$\gamma_p = \frac{1-\nu^2}{2E} \left(\frac{\Delta K_0}{1-R} \right)^2 - \gamma_s$$

Un calcul similaire peut également être mené dans le but de déterminer γ_{puits} pour les valeurs obtenues lors de l'arrêt ou d'un ralentissement prononcé de la fissure courte :

$$\gamma_{puits} = \frac{1-\nu^2}{2E} \left(\frac{\Delta K_{puits}}{1-R} \right)^2 - \gamma_s$$

Les valeurs de l'intensité des contraintes ΔK_0 à l'amorçage d'une microfissure sont supérieures au $K_{seuil,int}$. Les énergies spécifiques de plastification correspondantes γ_p , si on excepte le rapport $R = -1$, sont comprises entre environ $5\gamma_s$ pour le rapport de charge $R = 0,3$ et $10\gamma_s$ pour les autres rapports de charge. Sans entrer dans le détail des mécanismes d'amorçage dans l'acier *S355NL* qui sont multiples, comme nous le verrons dans la suite de cette étude, nous pouvons raisonnablement considérer que les valeurs $2(\gamma_p + \gamma_s)$ déterminent des conditions seuil en terme d'énergie pour les fissures courtes.

S'agissant des valeurs de $(\gamma_{puits} - \gamma_p)$ déterminées lors du ralentissement voire de l'arrêt momentané de la propagation de la microfissure, elles peuvent être reliées à l'interaction avec les barrières cristallographiques et notamment les joints de grains ; elles sont comprises, si on excepte encore une fois le rapport de charge $R = -1$, entre environ $4,5\gamma_s$ et $13\gamma_s$. Ces différences peuvent être attribuées aux désorientations plus ou moins marquées entre grains adjacents.

R	a_o (μm)	ΔK_o (MPa. $\sqrt{\text{m}}$)	K_o^{max} (MPa. $\sqrt{\text{m}}$)	γ_p (J/m ²)	a_{puits} (μm)	ΔK_{puits} (MPa. $\sqrt{\text{m}}$)	γ_{puits} (J/m ²)	$\gamma_{\text{puits}} - \gamma_p$ (J/m ²)
0,1	27	2,90	3,22	20,5	38	3,45	29,8	9,3
0,1	37	2,95	3,28	21,3	78	4,30	47,5	26,2
0,3	22	2,25	2,50	11,5	56	3,55	31,7	20,2
0,3	18	1,70	2,43	10,8	42	2,60	27,9	17,1
0,5	36	1,65	3,30	21,6	--	--	--	--
-1,0	19	1,85	1,85	5,4	30	2,30	9,5	4,1

Tableau X-1: Energies de surface

On peut étendre l'approche de Griffith en incluant dans le bilan énergétique l'énergie spécifique de franchissement d'un joint de grain $\gamma_G = \gamma_{\text{puits}} - \gamma_p$. Dans ces conditions et après amorçage, la microfissure franchira un joint de grain dès lors que son énergie spécifique G atteindra la valeur :

$$G = 2(\gamma_s + \gamma_p + \gamma_G)$$

où γ_p dépend du mécanisme d'amorçage et γ_G de la désorientation entre grains adjacents.

Pour le rapport de charge $R = -1$ où on ne considère que la partie positive du cycle de fatigue, les valeurs des énergies sont plus faibles (de l'ordre de $2,7\gamma_s$ pour γ_p et de $2\gamma_s$ pour γ_G) : dans un calcul de structure, ces valeurs peuvent définir un seuil intrinsèque pour les rapports de charge négatifs. Néanmoins, il est difficile de ne pas admettre que la partie négative du cycle participe aussi à l'endommagement par fatigue notamment lorsqu'il s'agit de l'amorçage et du premier stade de propagation d'une fissure. Une prise en compte de cet endommagement conduirait probablement à des valeurs des énergies spécifiques γ_p et γ_G plus élevées ce qui réduira d'autant les différences observées avec les rapports de charge positifs.

CHAPITRE XI:

AMORCAGE DE FISSURATION

Dans ce chapitre nous allons présenter les observations réalisées au microscope optique (MO) de type Olympus Vanox-T et au microscope électronique à balayage (MEB) de type Hitachi S-2300. L'ensemble des observations a été réalisé principalement en surface de l'échantillon (dans le congé) et sur le faciès de rupture. Nous avons observé les faciès de rupture à des grossissements G compris entre 100 et 9000. Les éprouvettes ont été examinées systématiquement afin de déterminer les causes responsables de la rupture. Ces observations ont pu être menées sur toutes les éprouvettes de traction ($R > 0$) et quelques éprouvettes de traction-compression ($R = -1$). En effet, le matage des surfaces fissurées des éprouvettes de traction-compression a considérablement gêné les examens des faciès de rupture.

XI-1 Amorçage de fissures par fatigue

Tout mode de fabrication introduit dans les pièces et structures mécaniques des imperfections (défauts de fabrication, inclusions...) qui peuvent modifier considérablement leurs performances en service et notamment leur résistance à la fatigue. La présence de ces imperfections va également modifier la répartition des contraintes notamment dans les couches superficielles où s'amorcent le plus souvent les fissures de fatigue. Le processus de ruine par fatigue comporte deux étapes : une phase d'amorçage, dont la définition exacte soulève quelques problèmes, et une phase de propagation, dont la cinétique peut présenter des caractéristiques spécifiques : accélération ou décélération pouvant aller jusqu'à l'arrêt de la fissure.

L'examen des répliques nous a permis d'obtenir à différents instants la longueur en surface de la fissure principale qui mènera l'éprouvette à la rupture. Les sites d'amorçage ont alors pu être identifiés. Par ailleurs, les examens micrographiques réalisés au MEB permettent de mesurer les dimensions du défaut responsable. Dans tous les cas de figures, nous avons pu observer un amorçage dans le congé de l'éprouvette. Cependant, le site précis de l'amorçage ne fut que très rarement le même. La présence d'inclusions demeure, dans le cas de la fatigue, un site privilégié pour l'amorçage de fissures. Toutefois, il est important de noter que l'acier *S355NL* ne comporte pas une proportion très importante d'inclusions. De ce fait, l'amorçage ne s'est pas produit systématiquement à partir de celles-ci.

Nous pouvons également noter que, dans certains cas, l'inclusion ne se trouvait pas directement en surface mais légèrement sous la surface libre : même dans cette configuration, l'analyse des surfaces de rupture a révélé que cette inclusion représentait tout de même un site privilégié pour l'amorçage et a permis de comprendre qualitativement comment des fissures peuvent se former préférentiellement sur certaines inclusions, à la surface (Figure XI-1) ou juste en dessous de la surface (Figure XI-2 et Figure XI-3). La Figure XI-1 confirme d'ailleurs bien les résultats observés par plusieurs auteurs : les fissures de fatigue s'amorcent généralement en surface. La même constatation a pu être établie (Figure XI-2 et Figure XI-3) où l'inclusion sous-jacente à la surface est attirée par un effet de « *surface libre* ». En effet, la configuration critique d'une inclusion, située juste en dessous de la surface, fait que le faible volume situé au-dessus de celle-

ci est sollicité de façon très sévère. L'apparition d'une fissure y est alors favorisée. La vitesse de propagation initiale est élevée dans ces conditions, et elle a tendance à ralentir à mesure que le front de fissure se stabilise. Cette décélération d'origine mécanique, peut être suivie d'un arrêt de la fissure selon la répartition de contrainte autour de l'inclusion.

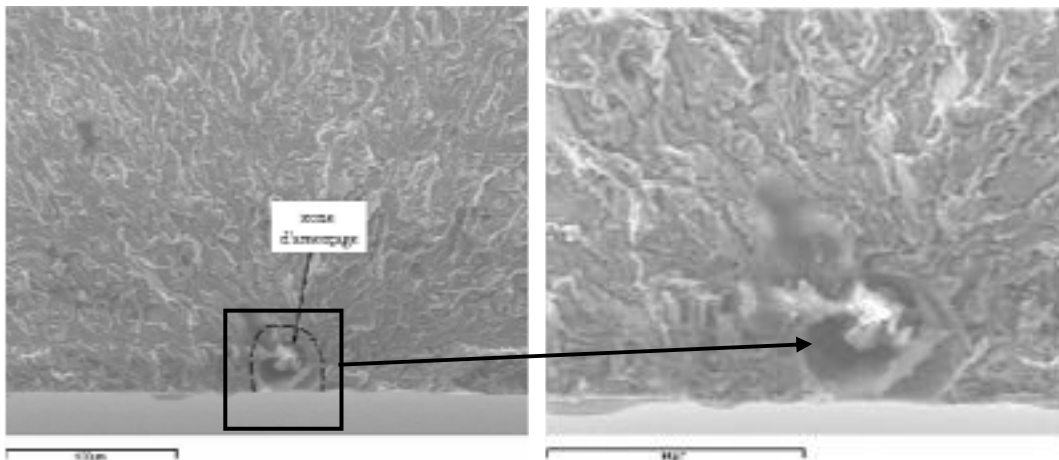


Figure XI-1 : Fissure de fatigue amorcée à partir d'une inclusion en surface

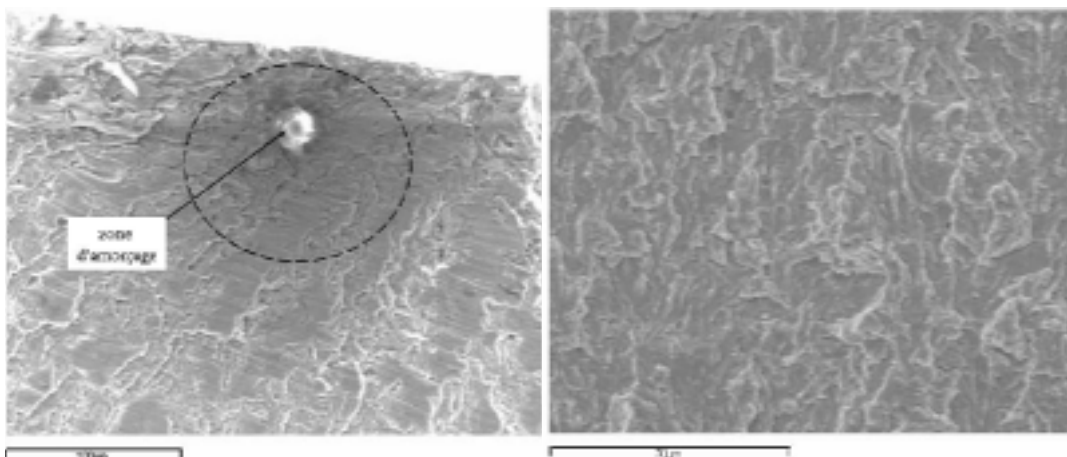


Figure XI-2 : Fissure de fatigue amorcée à partir d'une inclusion en dessous de la surface à $R > 0$ et faciès de clivage lors de la propagation ultérieure

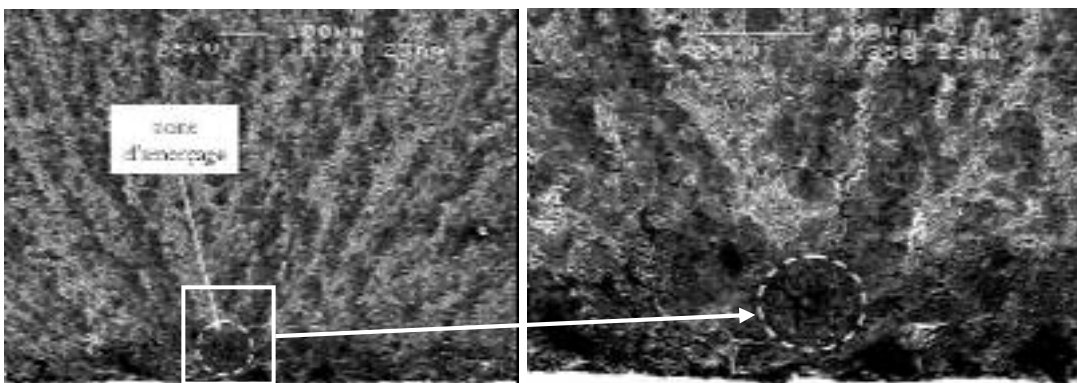


Figure XI-3 : Fissure de fatigue amorcée à partir d'une inclusion sous-surface à $R = -1$

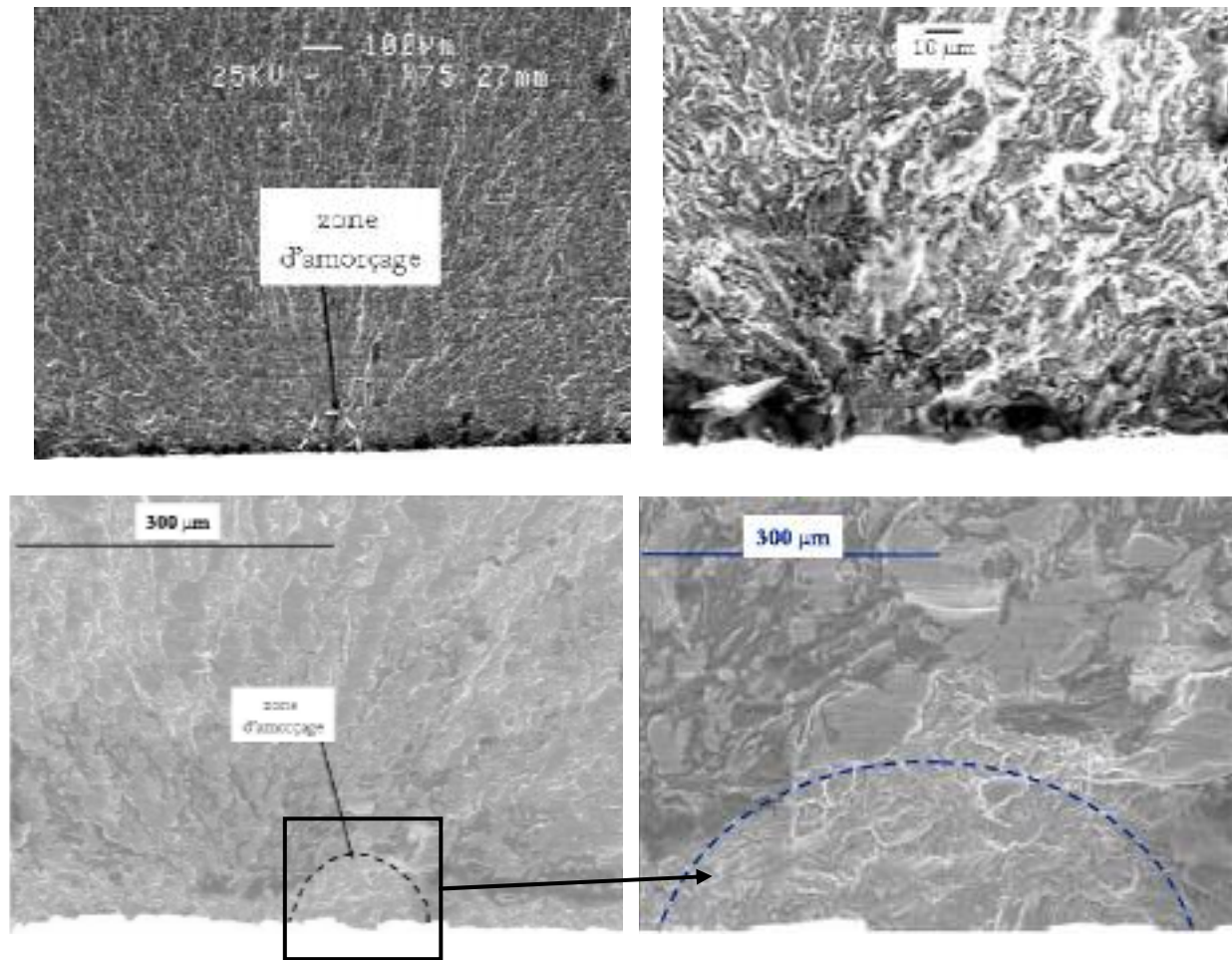


Figure XI-4 : Fissures amorcées en surface par clivage

Les fissures peuvent s'amorcer dans cet acier en surface sans que ce soit près d'une inclusion. Cet amorçage se fait le plus souvent par rupture de clivage comme on peut l'observer sur les faciès de rupture de la Figure XI-4. L'amorçage peut aussi se produire à partir d'une imperfection de surface. La Figure XI-5 montre une fissure amorcée sur une empreinte de microdureté introduite artificiellement avant essai.

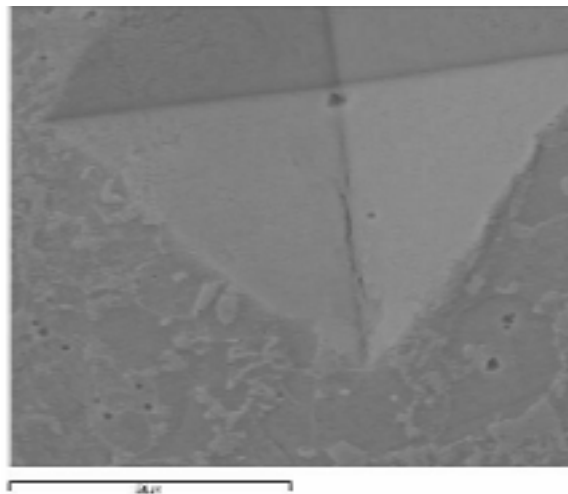


Figure XI-5 : Fissure amorcée au fond d'une empreinte de microdureté

Lors de cette étude, des observations plus détaillées au MEB de fissures s'amorçant près d'inclusions, ont indiqué trois principaux types de mécanismes d'amorçage :

- amorçage par *contournement* d'inclusion. La microfissure s'amorce alors par décohésion de l'interface matrice-inclusion puis s'ensuit la propagation d'une microfissure dans la matrice (Figure XI-6). On observe parfois un arrachement de l'inclusion et la fissure ainsi amorcée se propage ensuite dans la matrice (Figure XI-7) ;
- amorçage par *rupture* d'inclusion suivi de la propagation de la microfissure de part et d'autre de l'inclusion (Figure XI-8) ;
- amorçage de fissure de part et d'autre des deux « pôles » de l'inclusion, sans rupture ni décohésion de l'inclusion (Figure XI-9).

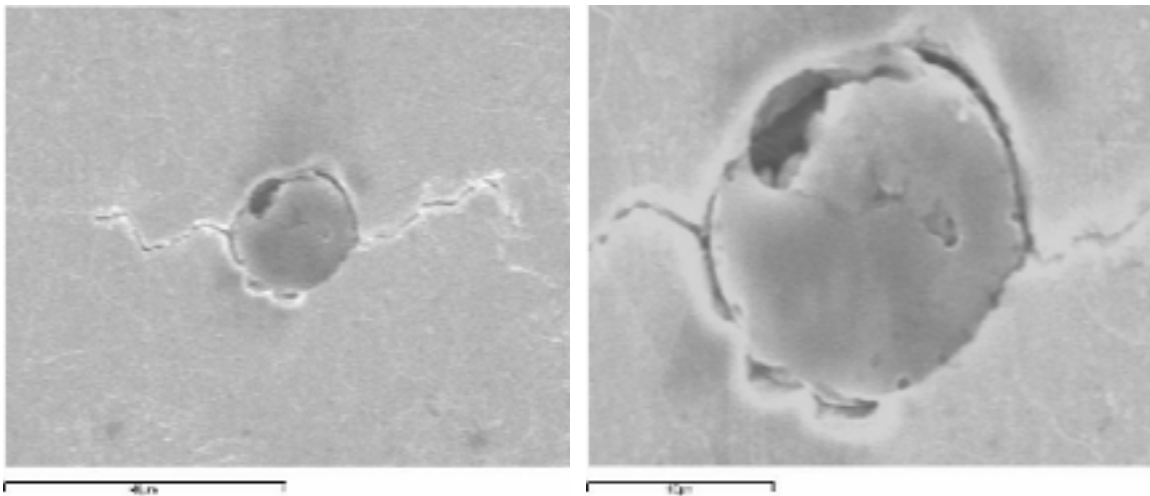


Figure XI-6 : Amorçage par contournement d'inclusion

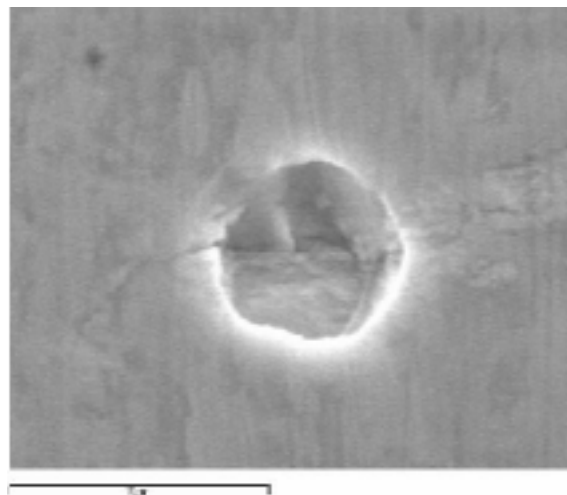


Figure XI-7 : Amorçage de la fissure après arrachement d'inclusion

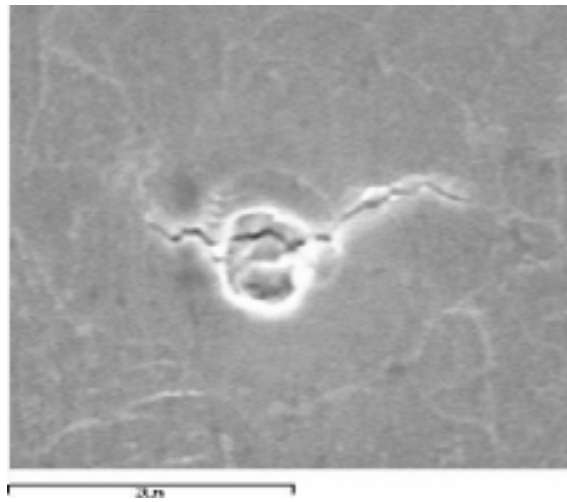


Figure XI-8 : Amorçage par rupture d'inclusion

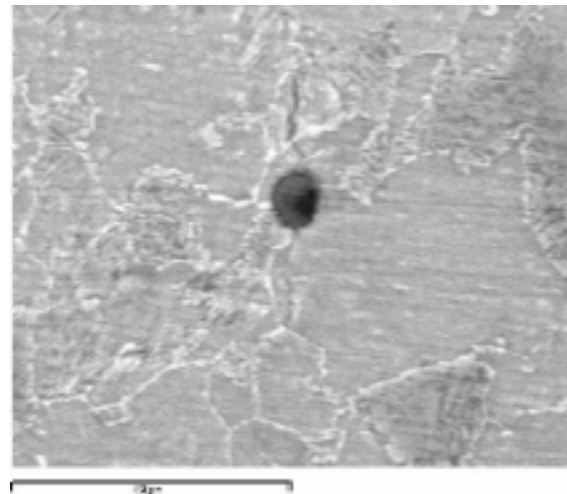


Figure XI-9 : Amorçage de part et d'autre des pôles de l'inclusion

XI-2 Premiers stades de la fissuration par fatigue

Les observations nous ont également permis de nous intéresser aux premiers stades de la propagation, deux mécanismes de propagation de fissures ont été mis en évidence. Des fissures débutent leur propagation principalement à 45° (stade I) de l'axe de chargement sur la surface du congé juste après l'amorçage puis deviennent perpendiculaires à cet axe (stade II) lors de leur croissance (Figure XI-10) ; cet effet de nature mécanique s'explique facilement par les calculs de Mécanique de la Rupture (annexe A). Cependant, dans certains cas, l'orientation des fissures reste globalement perpendiculaire à l'axe de chargement de l'amorçage à la rupture (Figure VI-12) : le stade I de la fissuration est alors quasiment inexistant. Les mêmes observations ont été établies par d'autres auteurs [Jin03].

Dans d'autres cas, un « *bâillement* » important de la fissure a été observé en l'absence de toute sollicitation (Figure XI-12). Nous pouvons alors penser que la fissure s'est tout d'abord propagée en mode mixte combinant le mode d'ouverture (mode I) et le mode de cisaillement plan (mode II). La propagation de la fissure a en effet débuté à 45° de l'axe du chargement mais cette fois à l'intérieur même du matériau.

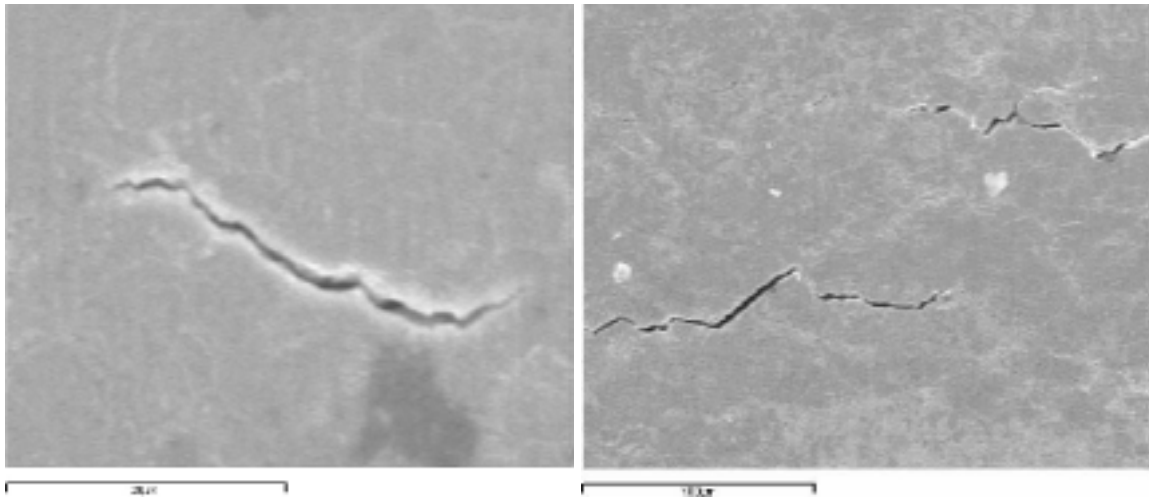


Figure XI-10 : Fissures orientée à 45° après amorçage

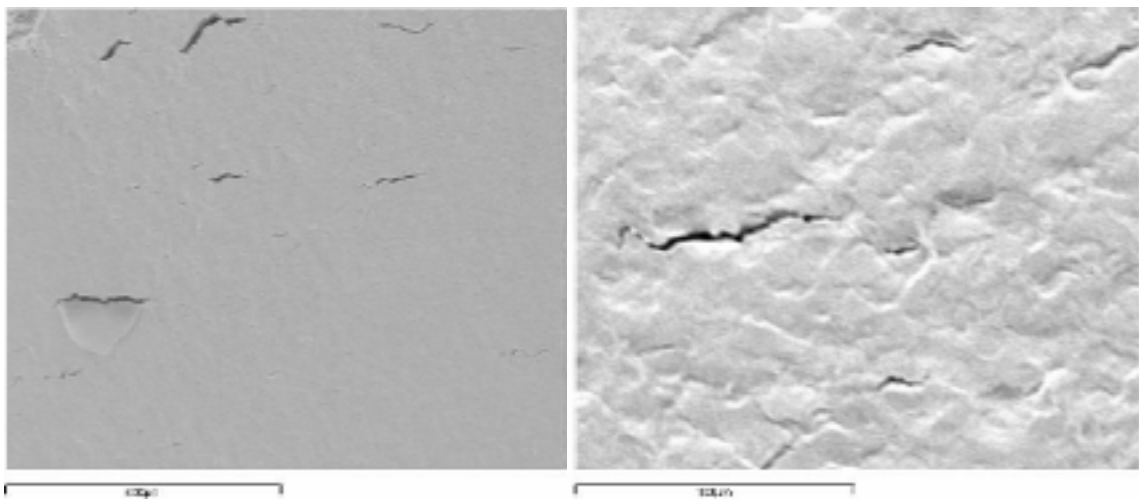


Figure XI-11 : Fissure perpendiculaire à l'axe de chargement dès l'amorçage

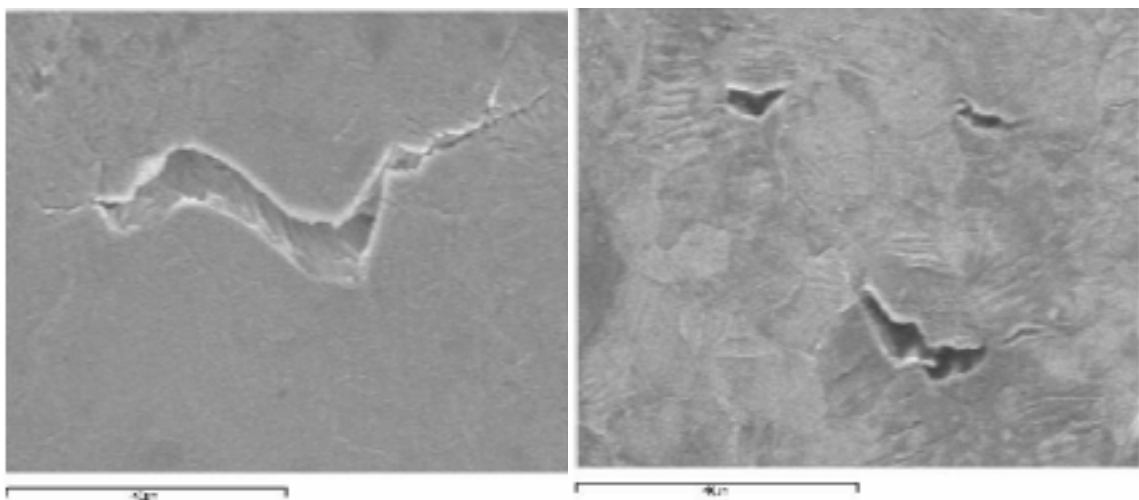


Figure XI-12 : Propagation en mode combiné I+II (bâillement)

Dans le premier stade de propagation, la fissure interagit fortement avec les joints de grains. On observe fréquemment un changement de direction de propagation lors du franchissement d'un joint de grain comme l'illustre la Figure IX-16 et la Figure XI-13. Le joint de grain agit dans ce cas comme un obstacle et son franchissement s'accompagne d'une forte diminution de la vitesse de propagation voire d'un arrêt de la fissure qui est une caractéristique des courbes de propagation des fissures courtes (chapitre IX).

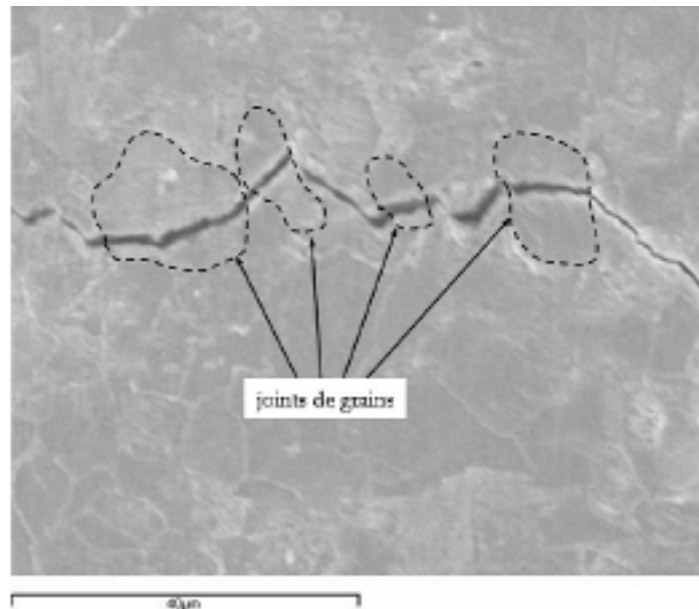


Figure XI-13 : Interaction entre fissures et joints de grains

XI-3 Arrêts de fissures de fatigue

Les observations détaillées lors des essais nous ont permis de repérer des fissures présentant un comportement particulier. Il s'agit de fissures bloquées ou de fissures non propageantes. L'examen des courbes de propagation des fissures courtes établies dans le chapitre IX, montre un comportement irrégulier en début de propagation rejoignant les résultats fournis par d'autres auteurs. Pour expliquer un tel comportement : une vitesse initiale importante, une décélération ou même un blocage, il nous paraît nécessaire de faire intervenir plusieurs éléments. L'inventaire des phénomènes pouvant être à l'origine de cette décélération ou d'un arrêt de la fissure se résume en quatre points :

- *Interactions entre fissures* : dans un domaine de forte densité de fissures, de part et d'autre d'une fissure donnée, la contrainte appliquée au matériau est fortement diminuée. La propagation d'une fissure située dans cette zone peut être considérablement ralentie voire même stoppée. Par exemple dans la Figure XI-14, la propagation de la fissure située au centre s'est arrêtée parce qu'elle se situe entre deux fissures de tailles plus importantes. Mais ce phénomène n'est pas à sens unique et la propagation des plus grandes fissures peut également être ralentie. L'arrêt de fissure est parfois provoqué par un phénomène de bifurcation à l'une des extrémités de la fissure : la Figure XI-15 montre une fissure qui s'est arrêtée après développement de deux branches à son extrémité ce qui provoque une intensité des contraintes moindre au bout de chaque branche. Enfin, la présence de plusieurs fissures voisines dans un petit domaine favorise leur coalescence et peut provoquer une accélération de la vitesse de propagation (Figure XI-16 et Figure XI-17) ;

- *Interactions entre fissures et microstructure* : les paramètres microstructuraux et plus particulièrement les joints de grains, peuvent influencer fortement la propagation des fissures, voire même conduire à leur arrêt. Des observations microscopiques ont montré que lorsque la fissure est de très faible taille, elle interagit fortement avec les joints de grains (Figure IX-16 et Figure XI-13) ;
- *Contraintes résiduelles autour des inclusions* : lorsque ces contraintes sont de compression, l'inclusion oppose plus de résistance à la fissuration ; dans ces conditions, l'amorçage de fissures opère après arrachement ou rupture de l'inclusion (Figure XI-7 et Figure XI-8). En revanche, lorsque les contraintes résiduelles autour de l'inclusion sont de traction, l'interface inclusion-matrice rompt plus facilement et l'amorçage opère alors par contournement de l'inclusion (Figure XI-6) ;
- *Caractère tridimensionnel de la fissure* : la taille de la fissure en surface ne conditionne pas à elle seule sa propagation ; en effet, la valeur du rapport longueur en surface sur profondeur, qui rend compte de l'état d'équilibre de la fissure, est en fait un paramètre prépondérant. Comme nous l'avons montré (chapitre VII), le facteur d'intensité de contrainte calculé pour une fissure circulaire est plus important en surface qu'à cœur. Dans ces conditions, la fissure se propagera plus rapidement en surface de façon à adopter une forme d'équilibre mécanique correspondant à une valeur du rapport longueur en surface sur profondeur voisine de 0,8.

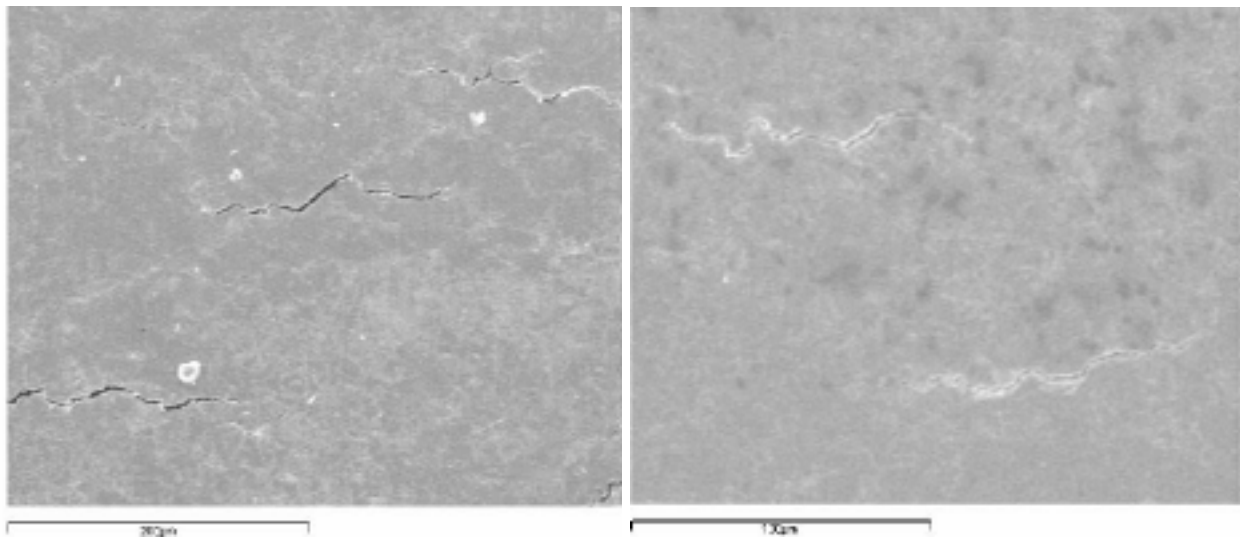


Figure XI-14 : Interaction entre fissures conduisant à l'arrêt de propagation

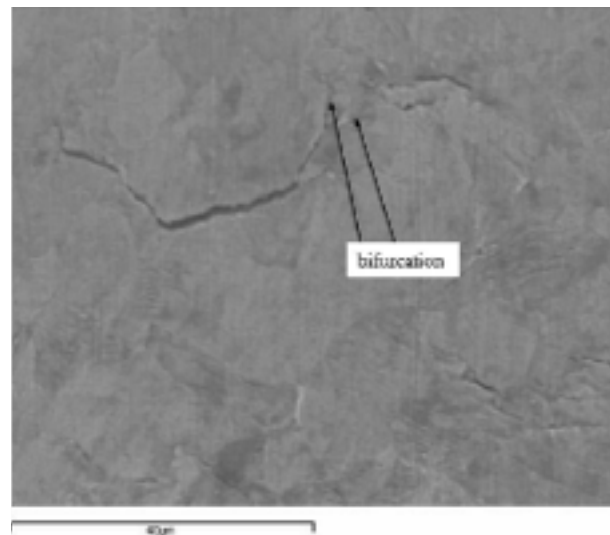


Figure XI-15 : Arrêt de la fissuration dû au phénomène de bifurcation

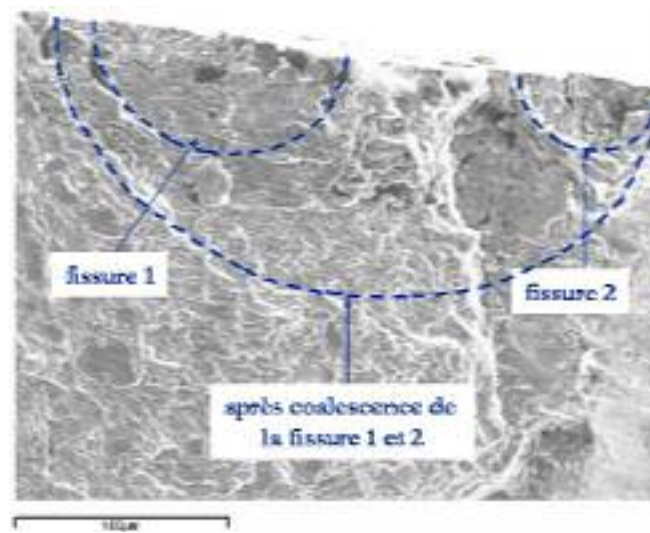


Figure XI-16 : Examen du faciès de rupture montrant une coalescence de fissures

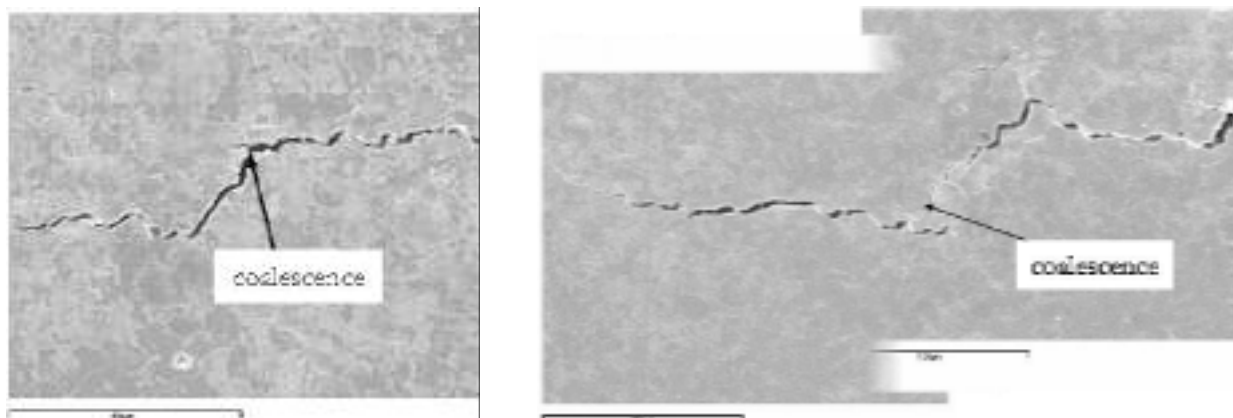


Figure XI-17 : Coalescence de fissures observée en surface d'éprouvette