

MCours.com

PARTIE D :
RESULTATS ET DISCUSSIONS

La présente partie de mémoire sera consacrée à l'étude de deux types de fissures de fatigue. Nous nous intéresserons dans un premier temps aux fissures de fatigue traversantes pour lesquelles la zone plastique demeure plus grande que les dimensions microstructurales mais bien plus petite que l'épaisseur et la longueur du ligament de l'éprouvette, de telle sorte que la Mécanique Linéaire de la Rupture et la notion de ΔK s'applique. Ce type de fissure de fatigue est souvent appelé fissure longue. Dans un deuxième temps, nous nous intéresserons aux fissures de fatigue dont la longueur et la taille de la zone plastique sont du même ordre de grandeur que les dimensions microstructurales, ce type de fissures est souvent dénommé fissure courte. Ensuite, nous effectuerons une comparaison entre ces deux types de fissures sous différents chargements employés. Nous prendrons en compte le phénomène de fermeture. Enfin, dans le dernier chapitre de cette partie, nous proposons des lois pour prédire la propagation de fissure par fatigue.

L'étude sera effectuée sous différents rapports de charge : 0,1, 0,3, 0,5 et -1 sous chargement d'amplitude constante puis sous chargements d'amplitude variable issus d'enregistrements effectués sur des bâtiments de surface. Finalement, nous étudierons l'influence des chargements par paliers d'amplitude croissante et décroissante sur la propagation de fissures courtes de fatigue.

CHAPITRE VIII:

COMPORTEMENT DES FISSURES LONGUES

Pour étudier le comportement des fissures longues, un échantillon normalisé de type SENT a été utilisé (Chapitre V). Tous les essais ont été réalisés à l'air ambiant avec une fréquence de 35Hz et sous chargement sinusoïdal d'amplitude constante avec un rapport de charge R compris entre 0,1 et 0,5. Le but de ces essais est de caractériser le comportement des fissures longues dans l'acier *S355NL* en déterminant le seuil de propagation et les coefficients de la loi de Paris. Pour cela, nous avons utilisé les éléments proposés dans les normes ASTM E647-78T concernant les essais de seuil à ΔK décroissant. Au début de la fissuration, l'amplitude du facteur d'intensité de contraintes ΔK est diminuée de 10 à 20%, jusqu'à atteindre une vitesse de fissuration de 10^{-7} m/cycle, puis diminuée de 5% jusqu'au seuil de propagation ΔK_{seuil} obtenu pour 10^{-11} m/cycle. Chaque palier a été appliqué en s'assurant que l'avancée de la fissure (Δa) respecte les deux conditions mentionnées dans les normes ASTM. (Chapitre V). La méthode prévoit que le seuil soit atteint lorsque la fissure avance de $\Delta a < 50 \mu\text{m}$ en $5 \cdot 10^7$ cycles. A cette étape de l'essai, celui-ci est arrêté et le seuil de propagation à partir de la dernière amplitude de charge utilisée est alors calculé. La détermination du facteur d'intensité de contrainte d'ouverture K_{om} , nécessaire au calcul de l'amplitude efficace ΔK_{eff} , a été réalisée par mesure de variation de complaisance (micro-jauge ou extensomètre). Enfin, dans le but de s'assurer d'une bonne reproductibilité des résultats, la plupart des essais sur éprouvettes SENT a été dupliquée.

VIII-1 Influence du rapport de charge

L'évolution du nombre de cycles N en fonction de la longueur de la fissure a , est présentée dans la Figure VIII-1 pour le rapport de charge $R = 0,1$. Cette courbe montre que la fissure se propage progressivement jusqu'à une longueur de 10,55 mm où elle reste « bloquée » pendant près de $5 \cdot 10^6$ cycles (asymptote verticale de la courbe).

Cette partie met en évidence l'existence d'une valeur en dessous de laquelle la fissure ne se propage plus sous un chargement donné même exécuté pendant des millions de cycles. Cette longueur de fissure et la charge appliquée permettront de calculer le seuil de propagation des fissures longues pour un rapport de charge donné. Nous pourrions tirer les mêmes conclusions à partir de la Figure VIII-2 qui montre l'évolution de la fissure par rapport au nombre de cycles effectués pour les rapports de charge $R = 0,3$ et $R = 0,5$.

Les résultats d'essais de propagation seront présentés sous forme de courbes en échelle bi-logarithmique décrivant la vitesse de propagation da/dN (en m/cycle) en fonction de l'amplitude du facteur d'intensité de contrainte ΔK (en $\text{MPa} \cdot \sqrt{\text{m}}$) pour un rapport de charge R donné. Les essais ont été réalisés dans des conditions telles que le rayon de la zone plastifiée reste très inférieur à la longueur de fissure, ce qui permet de vérifier l'hypothèse de plasticité confinée en pointe de fissure et d'utiliser ainsi le principe de similitude.

Remarque : Dans toutes les images de cette partie, la direction du chargement est verticale. Sur chaque courbe, les éprouvettes sont nommées comme suite : sp suivi par le numéro de l'éprouvette (Annexe 2).

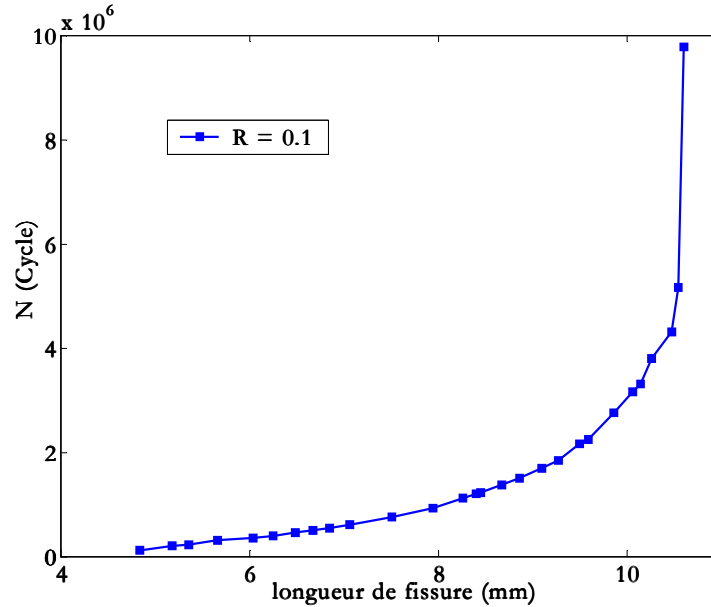


Figure VIII-1 : Evolution de la longueur de fissure en fonction du nombre de cycles ($R = 0,1$) [spl03]

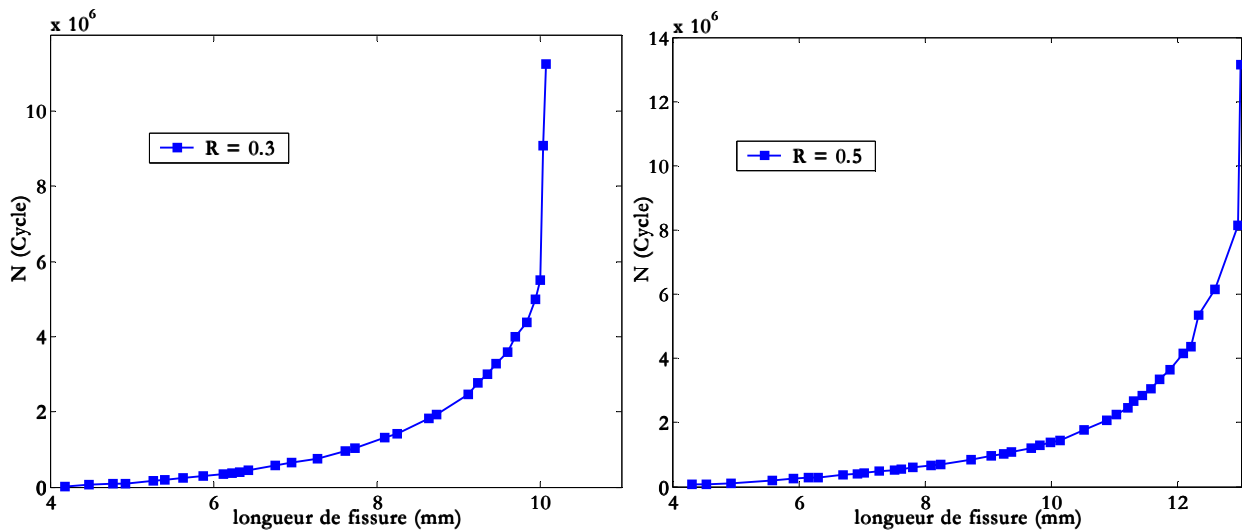


Figure VIII-2 : Evolution de la longueur de fissure en fonction du nombre de cycles ($R = 0,3$ et $R = 0,5$) [spl05 et spl06]

Dans les Figure VIII-3 et Figure VIII-4, nous avons présenté la vitesse de propagation (da/dN) dans l'acier S355NL en fonction de l'amplitude du facteur d'intensité de contrainte (ΔK) respectivement pour les deux rapports de charge $R = 0,1$ et $R = 0,5$. Nous pouvons diviser l'allure de ces courbes en deux parties : la première désigne la partie verticale de la courbe, ($a-N$) (Figure VIII-1 et Figure VIII-2) où la vitesse de fissuration est très faible ($da/dN < 5 \cdot 10^{-10}$ m/cycle). La deuxième partie de la courbe présente une progression quasiment linéaire correspondant au domaine de Paris : elle peut alors être décrite par une loi puissance.

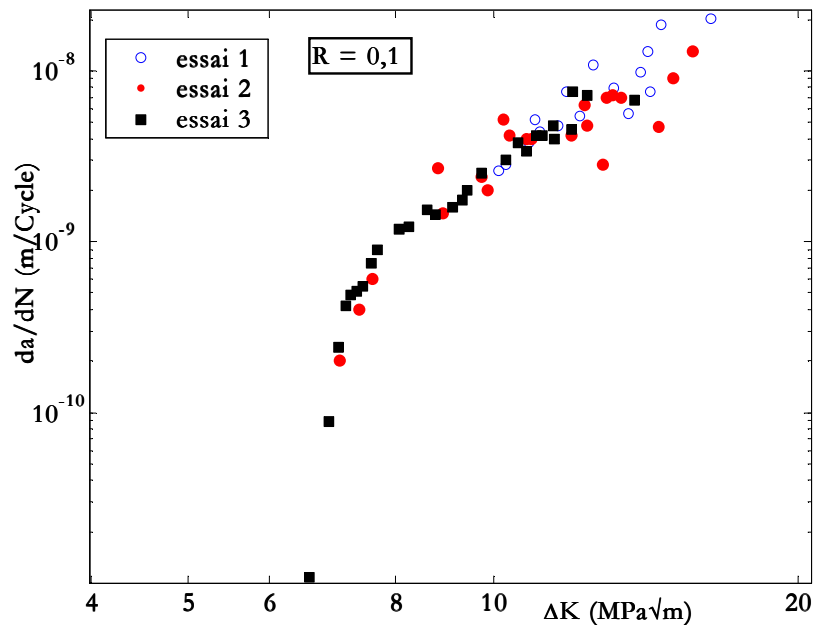


Figure VIII-3 : Courbes de fissuration pour le rapport de charge $R = 0,1$ [spl01, spl02 et spl03]

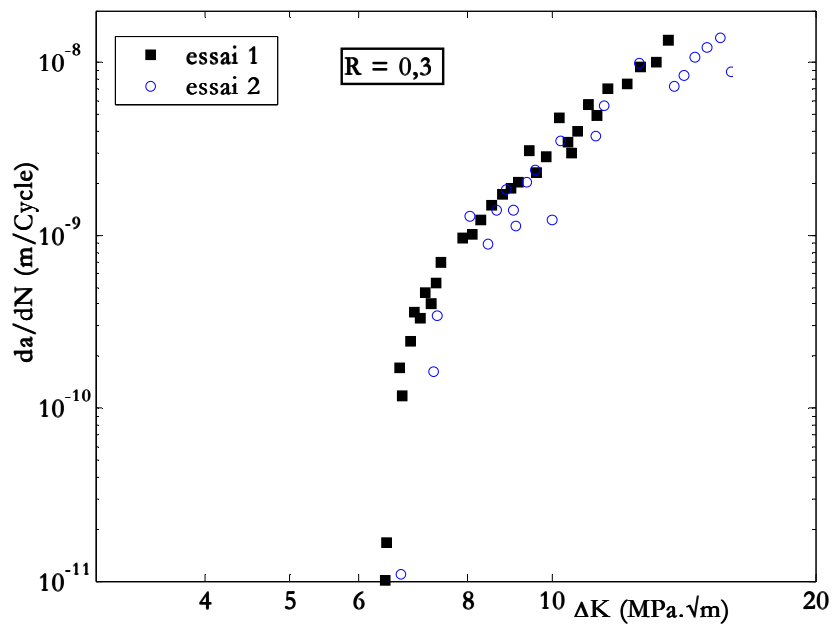


Figure VIII-4 : Courbes de fissuration pour le rapport de charge $R = 0,3$ [spl04 et spl05]

L'influence classique du rapport de charge sur la vitesse de fissuration a également pu être vérifiée à savoir une augmentation de la vitesse de fissuration, pour un même ΔK , lorsque le rapport de charge augmente. Nous avons tracé sur le même graphe (Figure VIII-5) les courbes représentant la vitesse de fissuration par rapport à l'amplitude du facteur d'intensité de contrainte $\Delta K = K_{max} - K_{min} = K_{max}(1-R)$ pour les différents rapports de charge étudiés.

Il apparaît clairement, sur cette figure que les vitesses de propagation varient en fonction du rapport de charge. Toutefois, nous noterons que la courbe correspondant à $R = 0,3$ est très proche de celle obtenue pour $R = 0,1$. Dans le domaine des vitesses plus élevées ($da/dN > 10^{-9}$ m/cycle), il y a peu de différences entre les vitesses de propagation pour les différents rapports de charge à ΔK donné.

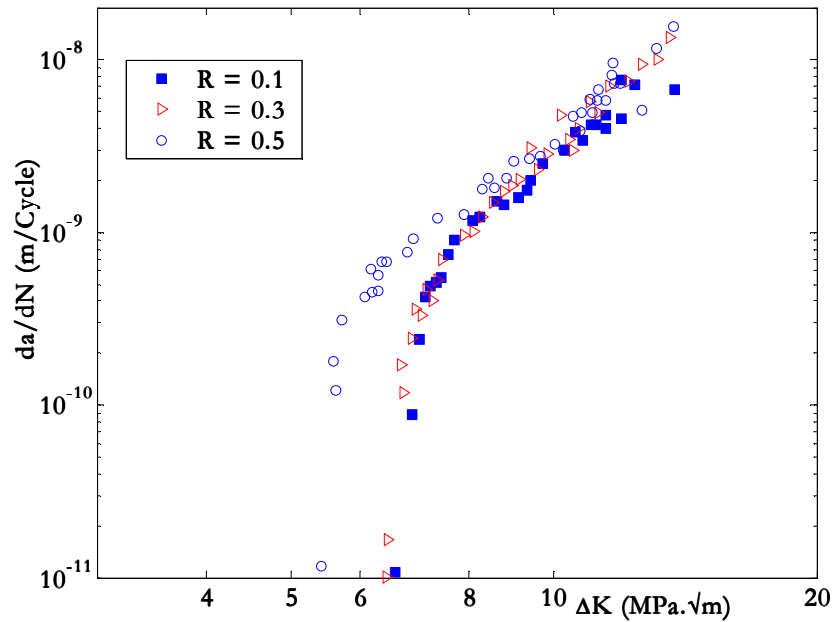


Figure VIII-5 : Influence du rapport de charge sur le seuil de propagation [spl03, spl05 et spl06]

Ces résultats montrent que pour chaque rapport de charge, il existe un seuil de propagation en dessous duquel la croissance des fissures de fatigue cesse de se produire. Cette valeur diminue lorsque le rapport de charge augmente. Pour cet acier, les seuils de croissance des fissures longues (estimée pour $da/dN \approx 10^{-11}$ m/cycle) varie entre 6,6 et 5,4 $MPa \cdot \sqrt{m}$ quand R prend les valeurs entre 0,1 à 0,5.

L'effet du rapport de charge est très important, en effet, la vitesse de propagation à $R = 0,5$ est nettement plus importante qu'à $R = 0,1$ dans le domaine $5,4 MPa \cdot \sqrt{m} < \Delta K < 8,0 MPa \cdot \sqrt{m}$. Par exemple, pour $\Delta K = 7,4 MPa \cdot \sqrt{m}$, la vitesse de propagation pour $R = 0,1$ est de l'ordre de $5 \cdot 10^{-10}$ m/cycle, alors qu'elle est plus de deux fois plus grande pour $R = 0,5$ ($da/dN = 1,2 \cdot 10^{-9}$ m/cycle).

Nous pouvons décrire la partie linéaire des courbes de propagation par la loi de Paris :

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

Pour l'acier S355NL, les constantes établies, à partir de l'ensemble des essais réalisés pour chaque niveau de chargement, sont données dans le Tableau VIII-1 :

R	C	m	$\Delta K_{seuil} (MPa \cdot \sqrt{m})$
0,1	$2 \cdot 10^{-13}$	4,23	6,57
0,3	$8 \cdot 10^{-14}$	4,62	6,43
0,5	$2 \cdot 10^{-13}$	4,16	5,42

Tableau VIII-1 : Valeurs du seuil de propagation et des constantes de la loi de Paris pour différents rapports de charge (da/dN en m/cycle)

Nous expliquons l'écart des courbes présentant la vitesse d'avancement de fissures sous différents rapports par les effets de fermeture. Dans la suite, nous montrerons après élimination des effets de fermeture, l'existence d'une courbe unique ainsi qu'une seule valeur pour le seuil de propagation des fissures longues pour tous les rapports de charge. Les valeurs de fermeture seront déterminées à partir de mesures de complaisance.

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

Comme nous avons déjà mentionné auparavant, les mesures de fermeture seront établies à partir de deux moyens : extensomètre et jauge de déformation. Traditionnellement, dans le cas de la méthode de complaisance un extensomètre est placé de part et d'autre de l'entaille. Par ce moyen, nous avons alors trouvé que la charge de fermeture est plus faible que celle obtenue lors de l'emploi de jauges (Figure VIII-7). En effet, la charge déterminée à l'aide d'un extensomètre correspond principalement à la charge de fermeture de la fissure dans la zone de déformations planes (cœur de l'éprouvette) alors que la charge mesurée par des jauges permet de déterminer la charge de fermeture de la fissure en surface (zone de contraintes planes) : la fissure traversante bidimensionnelle se referme progressivement de la surface vers le cœur de l'éprouvette du fait de la différence des tailles des zones plastifiées à cœur et à peau d'éprouvette (Figure VIII-6). Ce résultat est confirmé par plusieurs auteurs qui ont montré que la fermeture de fissure est d'autant plus importante que l'on se rapproche d'un état de contraintes planes [Che88, Clé79, San00]. Finalement, les mesures par extensomètre semblent insuffisantes pour décrire ces effets tridimensionnels car elles ne fournissent qu'une mesure moyenne de la fermeture sur le front de la fissure. Par conséquent, tous les résultats présentés dans la suite selon établis à partir des mesures faites en utilisant des jauges de déformation.

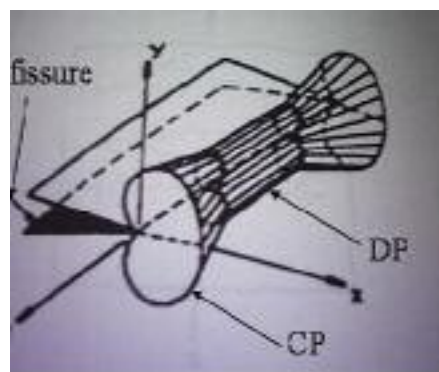


Figure VIII-6 : Evolution de la zone plastique dans un état de contraintes planes (CP) et déformations planes (DP)

Les mesures de fermeture que nous avons effectuées en plaçant une succession de micro-jauges le long du plan de fissuration nous ont permis de tracer la courbe de fissuration en fonction de l'amplitude efficace du facteur d'intensité de contrainte ΔK_{eff} (Figure VIII-7).

Cette figure montre que si l'on tient compte de l'effet de fermeture de fissure un seuil unique de propagation subsistait dans la courbe $da/dN - \Delta K_{eff}$: $\Delta K_{eff,seuil} = 4,7 \text{ MPa} \cdot \sqrt{m}$ où l'amplitude effective ΔK_{eff} , est la différence entre les facteurs d'intensité de contrainte au maximum de la charge et à la fermeture de fissure $\Delta K_{eff} = K_{max} - K_{om}$. Ces résultats montrent que la vitesse de propagation ne présente aucune dépendance vis à vis du rapport de charge dès qu'elle est représentée en fonction de l'amplitude effective du facteur d'intensité de contrainte. Par conséquent, pour les rapports de charge $R = 0,1$ et $R = 0,3$ la « translation » de la courbe (vers la

gauche) due à l'utilisation de l'amplitude ΔK_{eff} n'est pas uniforme pour tous les points de la courbe $da/dN - \Delta K$. En d'autres termes, cette translation est plus importante pour les valeurs proches du seuil de propagation ΔK_{seuil} que pour des valeurs de ΔK plus élevées. Ce qui confirme que le phénomène de fermeture de fissure est plus amplifié dans la région proche du seuil que dans le domaine de Paris. En effet, le comportement des fissures longues au niveau du seuil est beaucoup plus sensible à la microstructure, à la contrainte moyenne et à l'environnement que le comportement de propagation. Par contre, pour le rapport de charge $R = 0,5$, l'amplitude du phénomène de fermeture est sensiblement équivalente pour les différents stades de la courbe, cela peut être justifié par la diminution de la contribution de la charge moyenne près du seuil de propagation.

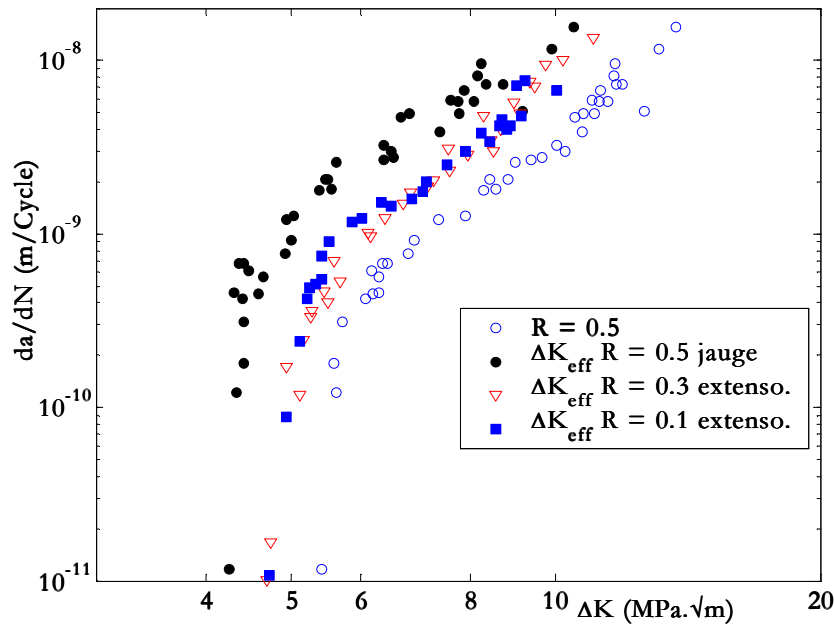


Figure VIII-7 : Comparaison des résultats de propagation de fissures longues en fatigue avec et sans effet de fermeture [spl03, spl05 et spl06]

Finalement, la partie linéaire de la courbe $da/dN - \Delta K_{eff}$ nous permet de calculer les paramètres de la loi de Paris-Elber (Tableau VIII-2) :

$$\frac{da}{dN} = C \left(\Delta K_{eff} \right)^m$$

C	m	$\Delta K_{seuil,eff} (MPa. \sqrt{m})$
6.10^{-12}	3,40	4,25

Tableau VIII-2 : Constantes de la loi de Paris (sans effets de fermeture).

CHAPITRE IX:

COMPORTEMENT DES FISSURES COURTES

Dans ce chapitre, nous utiliserons une procédure qui ne sort pas du cadre général de la méthode employée pour les fissures longues. L'éprouvette et le montage utilisés auparavant (Chapitre V) nous ont permis de suivre l'évolution de microfissures de fatigue dès leur amorçage jusqu'à rupture de l'éprouvette. Les mesures que nous effectuerons lors d'arrêts réguliers au cours du cyclage seront le nombre de cycles et la longueur de fissure en surface. Dans la pratique, nous définissons l'amorçage comme l'apparition d'une microfissure de très petite taille par rapport aux autres dimensions de l'éprouvette mais déjà détectable par la méthode d'observation (répliques plastiques). Nous étudierons le cas de chargements d'amplitude constante pour différents rapports de charge, ainsi que l'influence de chargements d'amplitude variable. Ces derniers seront de deux types : des chargements par paliers d'amplitude croissante ou décroissante seront tout d'abord utilisés puis, des chargements par blocs simplifiés établis à partir d'un spectre réel seront appliqués.

Qu'il s'agisse de fissures de surface ou de coin, le calcul du facteur d'intensité de contrainte sera effectué par l'utilisation des expressions de Newman et Raju (Chapitre V), représentatives des conditions de chargements, évaluées en mode I d'ouverture pour une fissure en stade II de propagation. Ainsi, quel que soit l'essai réalisé, la valeur de la contrainte appliquée à l'échantillon sera prise en compte et utilisée dans un calcul aux éléments finis. Celui-ci nous permettra alors de connaître l'évolution de la contrainte principale maximale à introduire dans les expressions de Newman et Raju. Toutefois, en fonction de l'essai réalisé, nous utiliserons l'hypothèse suivante pour le calcul de ΔK :

- $R > 0$, $\Delta K = K_{max} - K_{min}$
- $R < 0$, $\Delta K = K_{max}$

Autrement dit, nous supposons que la partie négative du cycle n'intervient pas au cours de la propagation de la fissure.

Les dispersions des résultats d'essais de fatigue observées résultent des causes physiques que l'on peut répartir en trois classes :

- Internes au matériau : inclusions, hétérogénéité de structure...
- Dues ou liées à la préparation des éprouvettes : usinage, rectification, polissage...
- Extérieures à l'éprouvette : incertitude de montage dans la machine, qualité des répliques...

IX-1 Présentation des résultats

Les longueurs en surface ont été mesurées par la méthode des répliques plastiques ou bien en utilisant le microscope à longue distance. Ces valeurs seront par la suite utilisées lors de la détermination des variations de vitesses de fissuration (en profondeur da/dN et en surface dc/dN), ainsi que lors du calcul du facteur d'intensité de contrainte ΔK . Dans cette étude, pour calculer ΔK , nous avons utilisé des relations qui tiennent compte du type (surface ou coin) et de la profondeur de fissure ainsi que des dimensions de l'éprouvette. Ces expressions analytiques proposées par Newman et Raju ont été validées à partir d'une analyse tridimensionnelle par éléments finis pour des fissures de surface et de coin semi-elliptique et semi-circulaire dans des éprouvettes entaillées soumises à des chargements élastique et élastoplastique (Chapitre VII).

Nous avons employé et utilisé les hypothèses suivantes pour le calcul du facteur K :

- l est la longueur mesurée de la fissure considérée ici comme la longueur projetée perpendiculairement à l'axe de sollicitation ;
 - $l = 2c$ dans le cas d'une fissure de surface (Figure IX-1) ;
 - $l = c$ pour une fissure de coin.
- a est la profondeur de la fissure ;
- le front de fissure est considéré comme semi-elliptique avec un rapport profondeur sur longueur en surface de 0,4 pour une fissure de surface et de 0,8 pour une fissure de coin.

Afin de valider la dernière hypothèse, nous avons observé la géométrie du front de fissure de plusieurs éprouvettes après rupture par fatigue : la Figure IX-3 montre un exemple d'analyse de la surface d'une éprouvette rompue après un essai de fatigue. L'ensemble des observations réalisées après rupture confirme l'hypothèse du front semi-elliptique d'une fissure naturelle de surface avec un rapport $a/c \approx 0,8$. Ce rapport, comme l'ont d'ailleurs montré les calculs réalisés au Chapitre VII, correspond à une fissure mécaniquement stable c'est-à-dire avec une valeur du facteur d'intensité de contraintes quasiment identique tout le long du front de fissure.

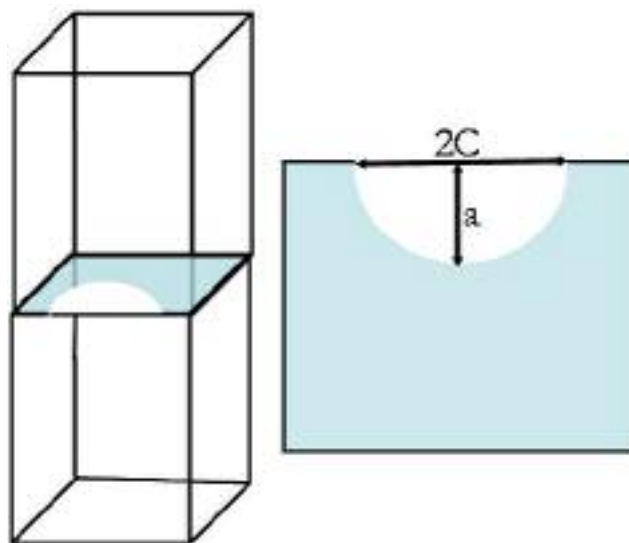


Figure IX-1 : Schématisation du front de fissure de surface

La Figure IX-2 montre un exemple de croissance d'une fissure sous chargement cyclique, suivie par le microscope à longue distance focale.

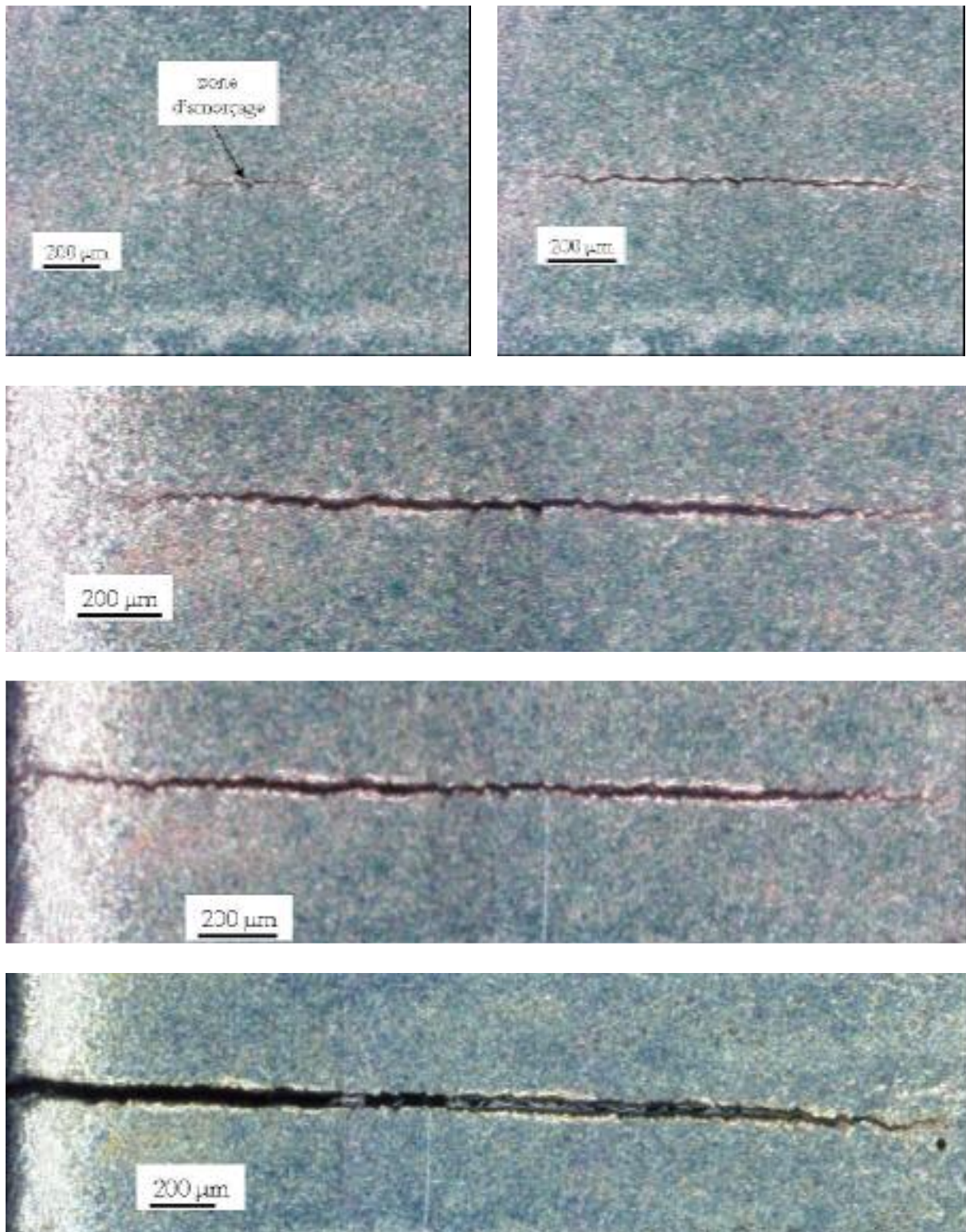


Figure IX-2 : Exemple de suivi de longueur de fissure mesurée à l'aide du microscope à longue distance focale

Les vitesses de propagation des fissures ont été calculées de la même manière que pour les fissures longues :

$$\frac{da}{dN} = \frac{a_N - a_{N-\Delta N}}{\Delta N}$$

où a_N et $a_{N-\Delta N}$ sont les profondeurs de fissures entre deux mesures successives.

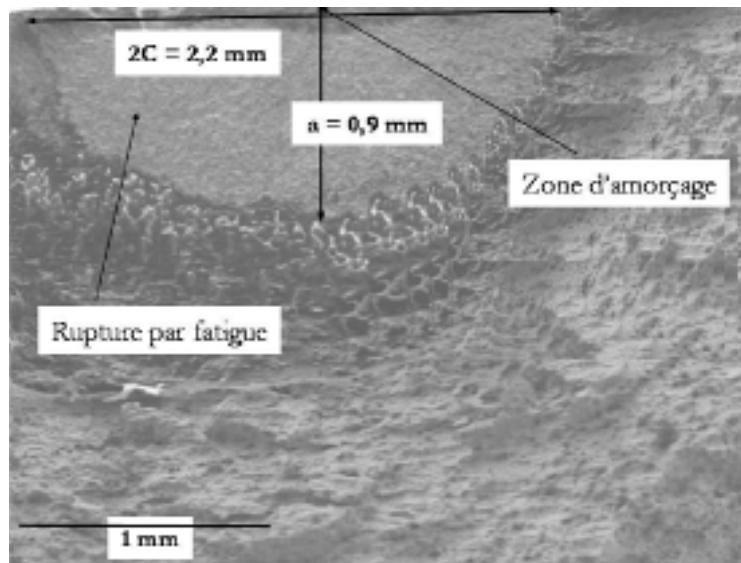


Figure IX-3 : Front de fissure de surface après rupture par fatigue

IX-2 Essais sous chargements d'amplitude constante

Les résultats d'essais de fissuration par fatigue sur éprouvettes munies d'un congé nous ont permis d'observer que l'endommagement par fatigue se fait en deux étapes. Dans un premier temps, il y a amorçage d'une ou plusieurs fissures dans la zone où la concentration de contrainte est la plus forte (partie centrale) (Figure IX-4). Ensuite, cette ou ces fissures se propagent à partir de la zone d'amorçage en entraînant sa propre zone plastique dans un matériau globalement sous une charge élastique, il s'agit alors d'une fissuration en régime élastoplastique.

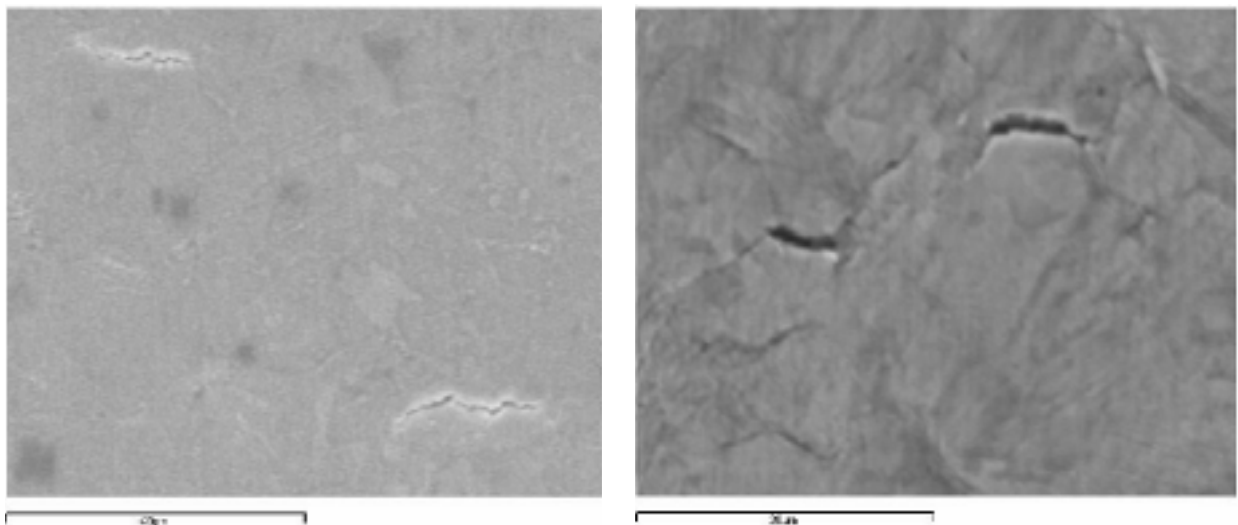


Figure IX-4 : Exemples d'amorçage de fissures

IX-2-1 Influence du rapport de charge

IX-2-1-a Fissures propageantes

A partir de la Figure IX-5, qui résume l'évolution des longueurs de fissures en surface en fonction du nombre total de cycles à rupture ($a - N_R$) pour un rapport de charge $R = -1$ et sous différentes amplitudes de chargement, nous remarquons que la propagation des fissures est semblable, aussi les durées de vies des éprouvettes diminuent considérablement chaque fois que nous augmentons la charge appliquée. En effet, le nombre de cycles à rupture est multiplié par trois lorsqu'on diminue la contrainte maximale (au niveau du congé) de 385 MPa à 340 MPa et jusqu'à cinq fois si la charge est de 310 MPa.

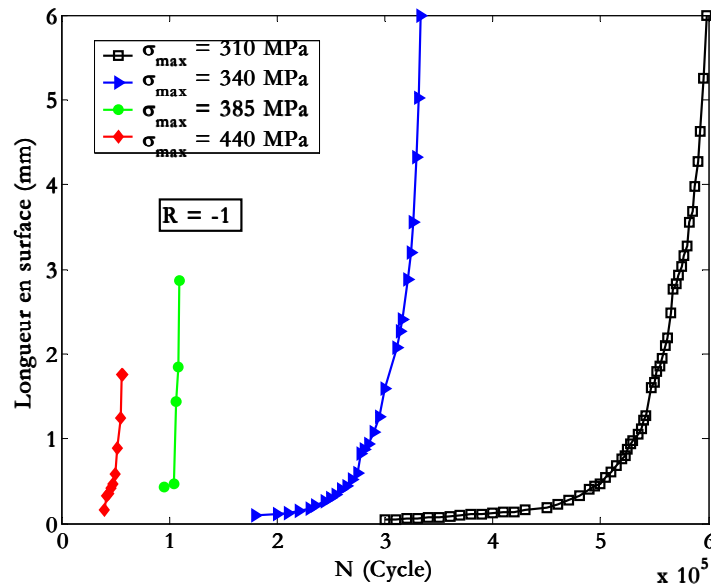


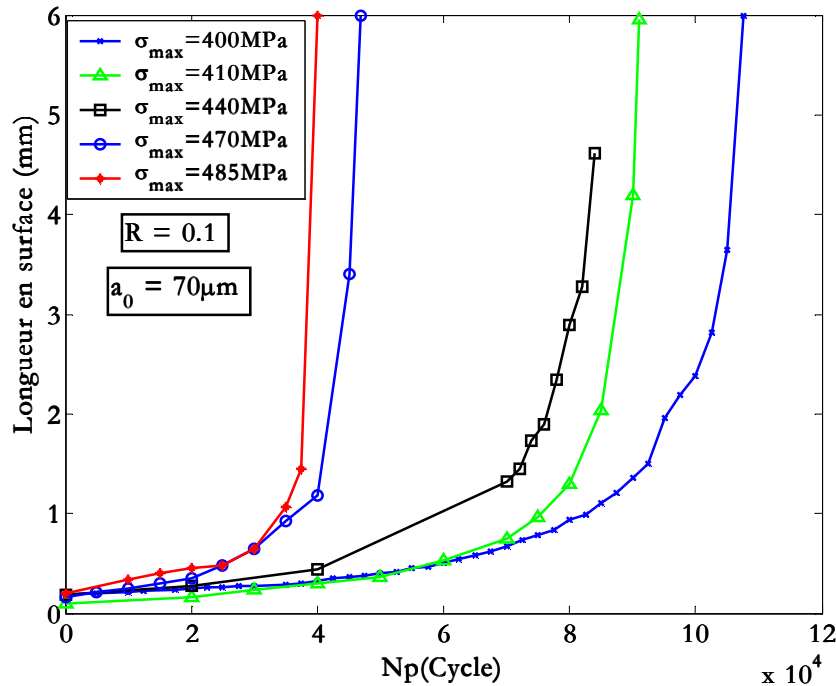
Figure IX-5 : Longueur de fissure en fonction du nombre de cycles total sous différents chargements ($R = -1$) [sp17, sp16, sp15 et sp12]

Nous notons que le nombre de cycles à l'amorçage augmente de plus en plus lorsque la contrainte diminue. Ainsi, la part de la période d'amorçage d'une fissure de longueur inférieure ou égale à $70 \mu\text{m}$ est importante par rapport à la période de propagation (Tableau IX-1). Nous pouvons expliquer la longue durée de la phase d'amorçage par la très faible présence d'inclusion dans l'acier *S355NL* : c'est en effet dans cette phase qu'un matériau « sain » oppose la plus grande résistance à la fatigue, en revanche la phase de nucléation est très courte dans les matériaux qui contiennent un nombre significatif de porosités même si la majeure partie de ces fissures s'arrête [Buf01].

Dans le Tableau IX-1, nous avons rassemblé quelques résultats relatifs aux durées de vie mesurées. N_{70} représente le nombre de cycles nécessaire pour avoir une fissure de $70 \mu\text{m}$ et N_R le nombre de cycles à rupture.

Dans les Figure IX-6 et Figure IX-7, nous avons représenté le nombre de cycles nécessaire pour propager une fissure de $70 \mu\text{m}$ jusqu'à rupture de l'éprouvette respectivement pour les rapports de charges 0,1 et 0,3 sous différents chargements. A partir de ces deux figures, nous pouvons tirer la même conclusion que pour la Figure IX-5, c'est-à-dire que le nombre de cycles nécessaire pour propager la fissure jusqu'à rupture de l'éprouvette augmente lorsque la charge maximale diminue.

σ_{max} (MPa)	a_i (μm)	N_i (détection)	N_{70} (70 μm)	N_R	N_i/N_R	N_{70}/N_R
440	---	---	40 000	59 400	---	67%
385	---	---	81 000	113 600	---	71%
340	40	180 000	230 000	333 500	54%	69%
310	20	300 000	430 000	598 500	60%	72%

Tableau IX-1 : Période d'amorçage par rapport à la durée de vie totale ($R = -1$)Figure IX-6 : Longueur de fissure en fonction du nombre de cycles à partir d'une longueur de 70 μm ($R = 0,1$) [sp05, sp04, sp03, sp02 et sp01]

Les Figure IX-8 à Figure IX-10 présentent les variations de la vitesse de propagation en fonction de l'amplitude du facteur d'intensité de contrainte respectivement pour les rapports de charge $R = 0,1$, $R = 0,3$ et $R = 0,5$ calculée en utilisant les relations présentées précédemment (Partie C). Dans le cas où $R < 0$, l'expérience montre que la vitesse de fissuration ne dépend que de la partie du cycle correspondant à la traction. Nous avons donc tracé la vitesse da/dN en fonction de K_{max} (Figure IX-11). Pour bien visualiser les accélérations et les décélérations observées en surface pour les différentes fissures, nous avons relié les points entre eux. L'arrêt momentané de la propagation est indiqué sur la courbe. Nous pouvons diviser les courbes en deux parties distinctes. La première partie, correspondant aux faibles valeurs de ΔK inférieures à $4 \text{ MPa}\cdot\sqrt{m}$, fait apparaître des ralentissements jusqu'à une valeur très faible de vitesse (*puits de vitesse*). La deuxième partie, pour des valeurs supérieures à $4 \text{ MPa}\cdot\sqrt{m}$, où la vitesse est régulière et croissante jusqu'à rupture. Plusieurs essais ont été entrepris afin d'assurer la reproductibilité de la fissure propageante. Qu'il s'agisse de fissures amorcées en « coin » ou en « surface », il apparaît alors que le comportement global de la fissure propageante reste identique pour un même rapport de charge et ce quelle que soit la contrainte appliquée. Cette remarque reste valable en ce qui concerne les valeurs des vitesses de propagation et la position du puits de vitesse.

Indépendamment du rapport de charge et de la contrainte appliquée, un ralentissement de la vitesse de propagation des fissures courtes est observé. Ce ralentissement est surprenant, car la grandeur ΔK , qui exprime la fissuration, augmente avec la longueur fissurée, ce qui devrait donc

conduire à une vitesse de propagation plus élevée. La décélération signifie que la fissure s'est momentanément arrêtée. Dans certains cas, la décélération n'a pu être obtenue car les répliques ont pu être trop espacées en termes de cycles. Ces résultats sont apparus dans les premiers essais qui nous servaient à estimer la période d'amorçage.

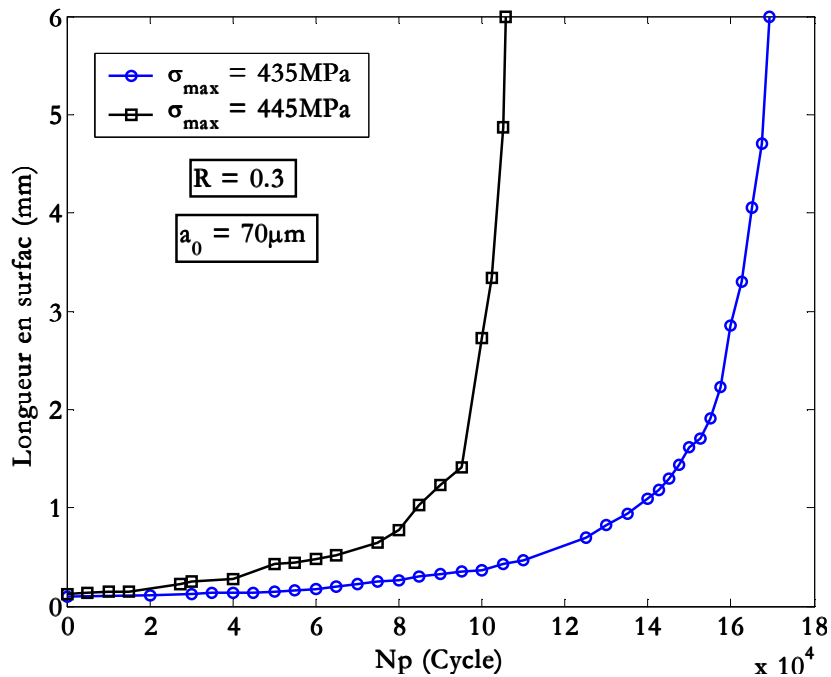


Figure IX-7 : Longueur de fissure en fonction du nombre de cycles à partir d'une longueur de $70 \mu\text{m}$ ($R = 0,3$) [sp07 et sp08]

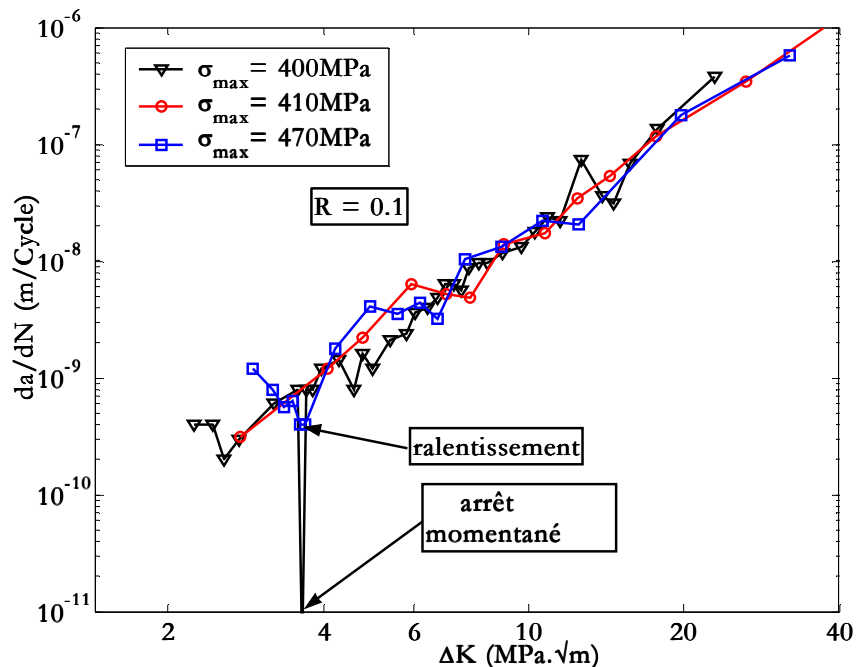


Figure IX-8 : Courbes de propagation sous chargement d'amplitude constante à $R = 0,1$ [sp05, sp04 et sp02]

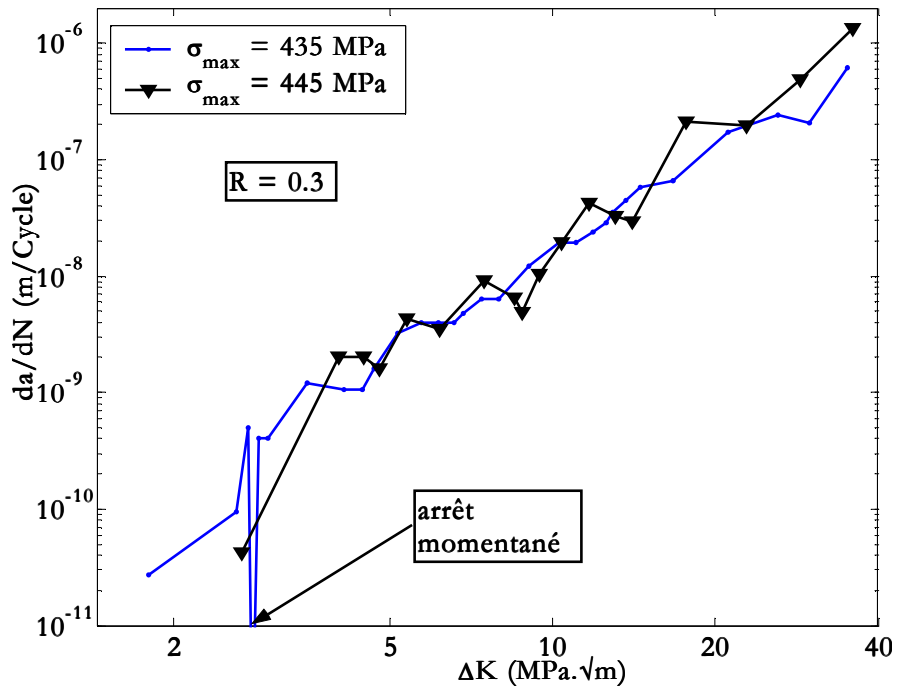


Figure IX-9 : Courbes de propagation sous chargement d'amplitude constante à $R = 0,3$ [sp07 et sp06]

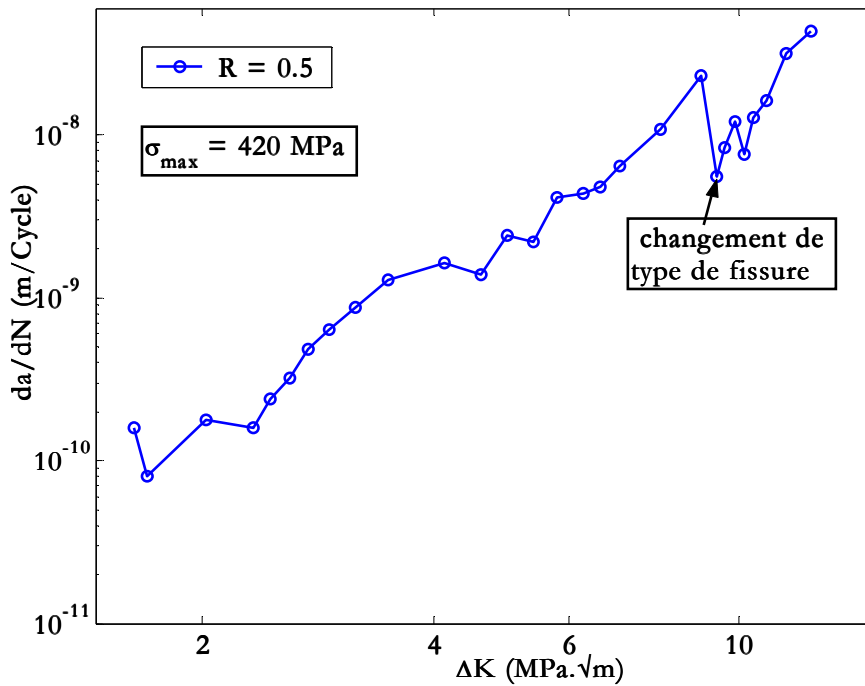


Figure IX-10 : Courbes de propagation sous chargement d'amplitude constante à $R = 0,5$ [sp11]

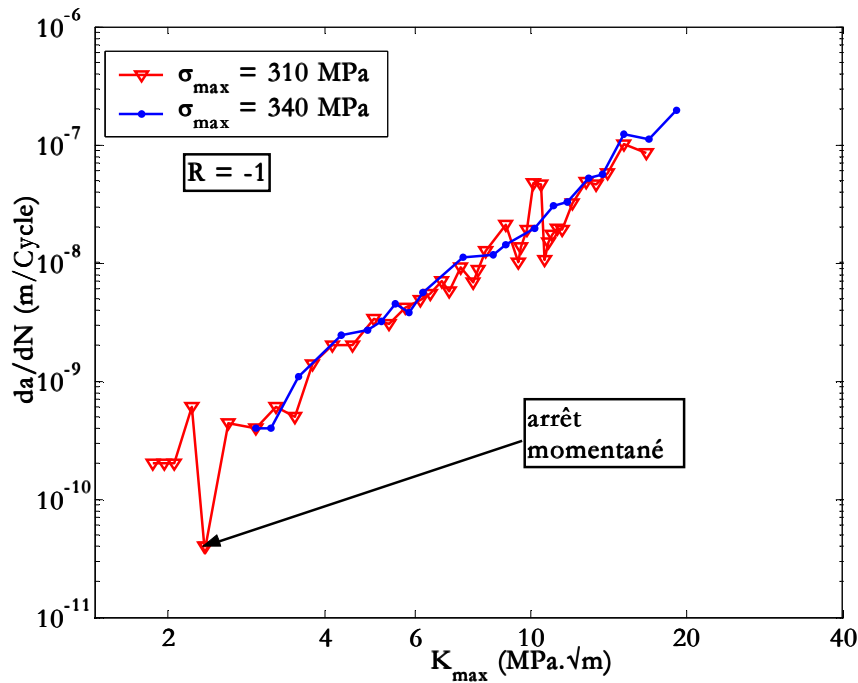


Figure IX-11 : Courbes da/dN en fonction de K_{max} à $R = -1$ [sp17 et sp16]

L'évolution de la vitesse (da/dN) en fonction de la profondeur de fissure (a) a également été représentée. Nous noterons l'allure particulière des courbes de propagation en fonction de la profondeur de la fissure (Figure IX-12 à Figure IX-15) constituées d'une série d'accélération et de décélérations pour des valeurs de profondeurs de fissures inférieures à $60 \mu m$. Ce phénomène que l'on appellera, *puits de vitesse*, est justifié par l'influence des paramètres microstructuraux et particulièrement les joints de grains (Figure IX-16), car la taille des grains peut varier de 10 à $60 \mu m$. Au dessus de cette valeur, ce phénomène n'apparaît pratiquement plus : les vitesses croissent. D'une manière plus générale, ces résultats montrent l'importance de mesurer avec précision la longueur des fissures lorsqu'elles sont de très petite taille. Pour les sollicitations élevées, nous n'avons pas détecté de ralentissement de fissure. Nous avons justifié cette observation par l'importance de la charge appliquée : celle-ci en effet conduit à une énergie de propagation dépassant l'énergie de franchissement des joints de grains qui peuvent bloquer la fissure. Ce résultat confirme d'autres recherches qui ont montré que l'arrêt des fissures par des joints de grains se produit pour des charges assez faibles [Buf01, Che00]. Plusieurs auteurs ont présenté cette phase comme une phase de transition entre les stades I et II de propagation (Figure IX-17). Par ailleurs, d'autres travaux ont expliqué cette chute de vitesse par l'aspect tridimensionnel de la fissure. En effet, celle-ci doit croître en profondeur et en largeur à travers plusieurs grains de tailles et d'orientations cristallographique différentes [Buf01]. Généralement, deux plans de clivage dans des grains voisins ne se rencontrent pas le long d'une ligne commune au joint. Cette désorientation oblige une fissure traversant un joint de grain à continuer dans le grain voisin sur plusieurs plans de clivage parallèles, donnant ainsi naissance à des marches entre ces plans appelées *lignes de rivières* (Figure IX-18). Ce type de propagation conduit à un faciès de rupture caractéristique du clivage (Figure IX-19).

Au cours de la sollicitation, le nombre de fissures augmente [Mur00] ce qui nous permet de supposer que les ralentissements (ou arrêts) que subissent certaines fissures au début de la fissuration voire même à la fin de la durée de vie de l'éprouvette (prochain paragraphe), sont probablement causés par des phénomènes d'interaction entre fissures. L'étude effectuée par Jiang et al. [Jia91, Zha92] montre que, lorsque la distance séparant deux fissures non coplanaires

de taille comparable est inférieure à trois fois leur longueur en surface, l'interaction entre les fissures devient significative.

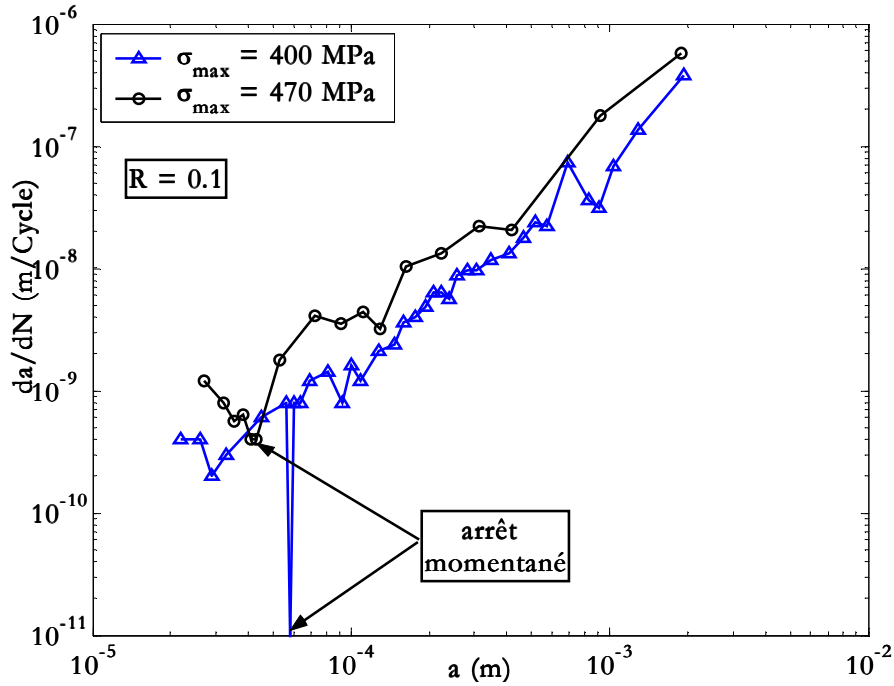


Figure IX-12 : Influence du chargement sur la vitesse de propagation ($R = 0,1$) [sp05 et sp02]

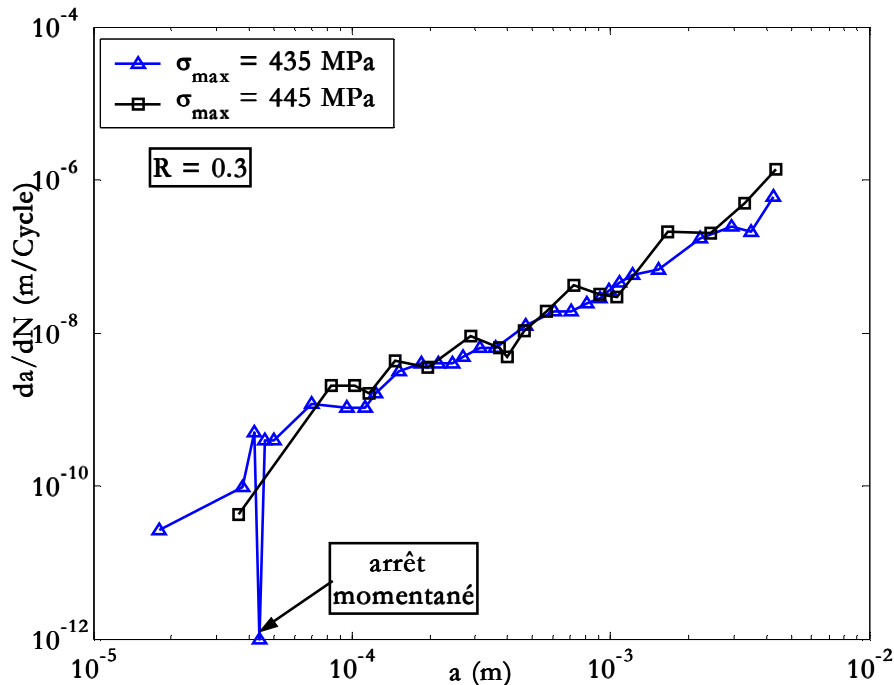


Figure IX-13 : Courbes $da/dN - \Delta K$ pour fissures courtes sous chargement d'amplitude constante ($R = 0,3$) [sp07 et sp06]

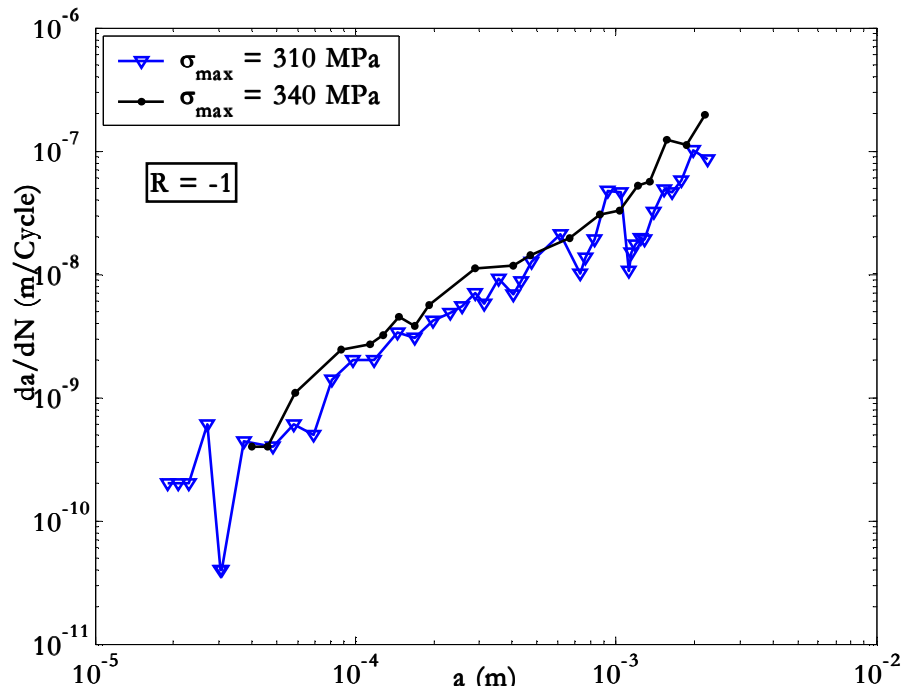


Figure IX-14 : Influence de chargement sur la vitesse de propagation ($R = -1$) [sp17et sp16]

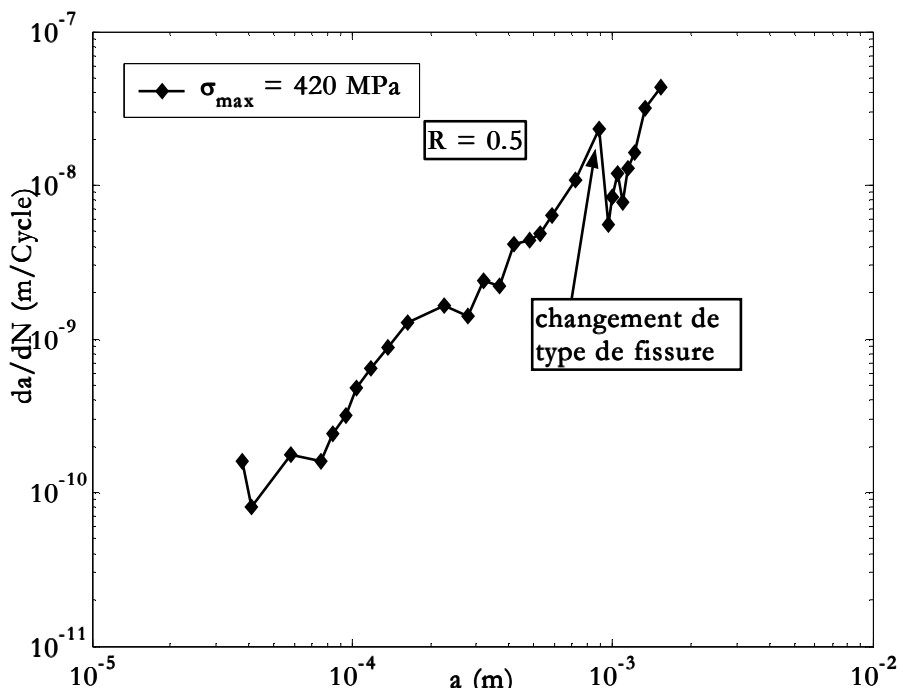


Figure IX-15 : Vitesse de propagation en fonction de la profondeur de fissure ($R = 0,5$) [sp11]

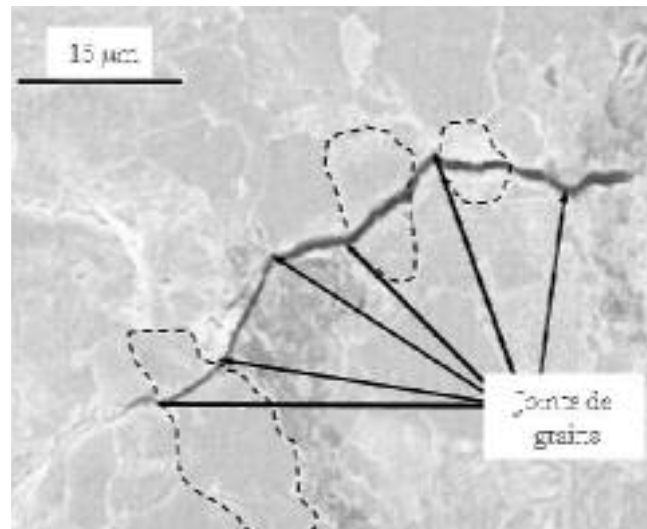


Figure IX-16 : Déviation de la fissure à la traversée des joints de grains

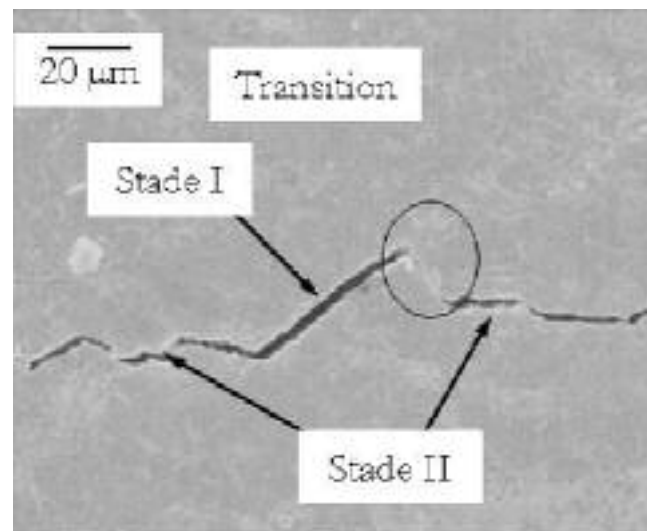


Figure IX-17 : Transition entre stades de propagation I et II

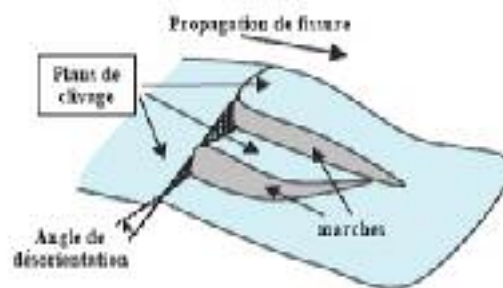


Figure IX-18 : Mécanisme de formation des marches ou lignes de rivières lors du franchissement d'un joint de grain

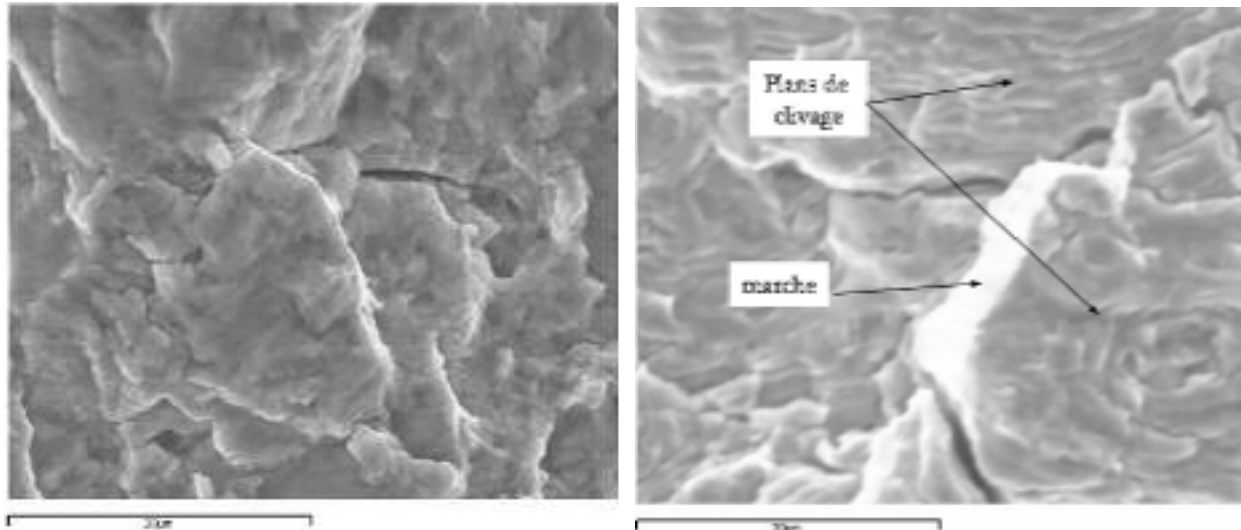


Figure IX-19 : Fissures de clivage

IX-2-1-b Fissures non propageantes (FNP)

Dans la plupart des essais de fissuration, nous avons observé l'amorçage de plusieurs microfissures le long de la partie utile de l'éprouvette après un certain nombre de cycles. Une ou deux fissures deviennent plus dominantes et les autres restent bloquées. Pendant le contrôle de l'amorçage et de la croissance des fissures courtes par les différentes méthodes de suivi, nous avons enregistré leurs longueurs et leurs emplacements en fonction du nombre de cycles. A cause des difficultés que nous avons rencontrées pour suivre toutes les fissures, nous avons procédé au suivi de quelques unes d'entre elles (sept fissures au maximum). Dans ce cas de fissuration multiple, les résultats de propagation ne sont validés que si les fissures sont suffisamment éloignées pour que l'on puisse considérer qu'elles n'interagissent pas entre elles. La Figure IX-20 montre un exemple de suivi de quelques fissures non propageantes (FNP) dans la même éprouvette pour un rapport de charge $R = 0,1$ et sous une contrainte maximale de 400 MPa.

D'une façon générale, le nombre de fissures évolue au cours de l'essai, mais dès qu'une fissure domine au niveau de la propagation, la création de fissures ainsi que leur propagation s'arrête. Nous expliquons l'arrêt de ces fissures par plusieurs phénomènes parmi lesquels :

- ❑ les interactions entre fissures ;
- ❑ les interactions entre fissures et barrières microstructurales.

Généralement, pour tous les rapports de charge étudiés, nous avons constaté que dans le cas d'une faible charge et de la présence dans l'éprouvette d'une fissure de surface et d'une fissure de coin, c'est cette dernière qui entraînera la rupture. Un exemple de cette remarque est illustré dans la Figure IX-21 où nous avons tracé la longueur de fissure en surface en fonction du nombre de cycles pour trois fissures. D'autre part, sous un chargement élevé, nous avons remarqué qu'il y a création ininterrompue de fissures qui peuvent se rejoindre en formant un réseau : c'est cette multiplication de petites fissures plutôt que leur propagation qui conduit à la rupture finale (Figure IX-22 et Figure IX-23). Nous avons également constaté que la coalescence disparaissait pour les faibles amplitudes. Les mêmes observations ont été réalisées par Nguedjio [Ngu89]. Enfin, un élément important est à noter dans l'ensemble des essais : ce n'est pas forcément la première fissure amorcée qui entraînera la rupture, il peut en effet s'agir d'une autre fissure

débouchant ultérieurement et se trouvant dans une zone favorable à sa propagation, qui dominera la propagation jusqu'à rupture (Figure IX-21 et Figure IX-22).

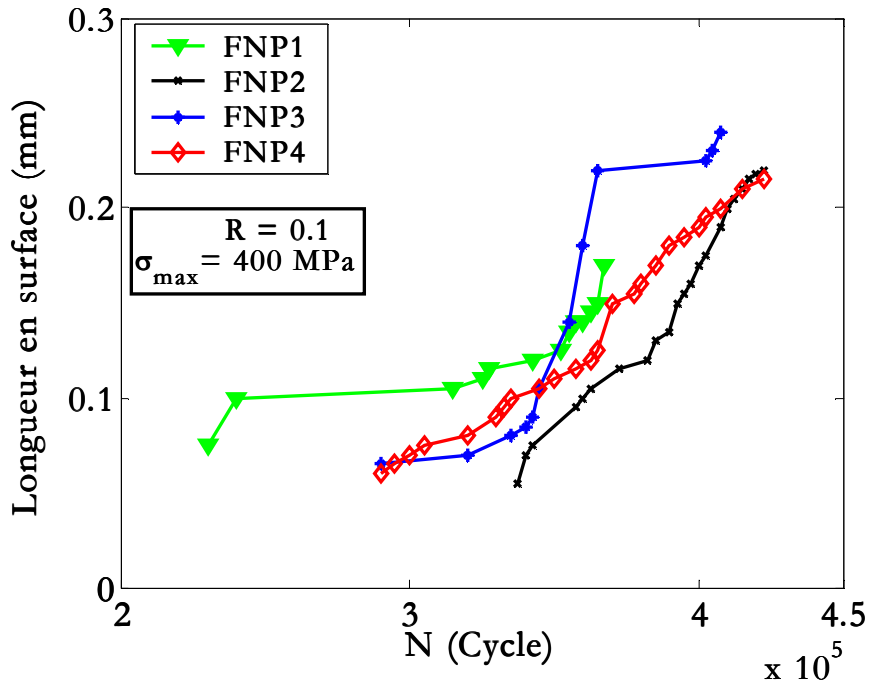


Figure IX-20 : Longueur de fissure en fonction du nombre de cycles (fissures non propageantes) [sp05]

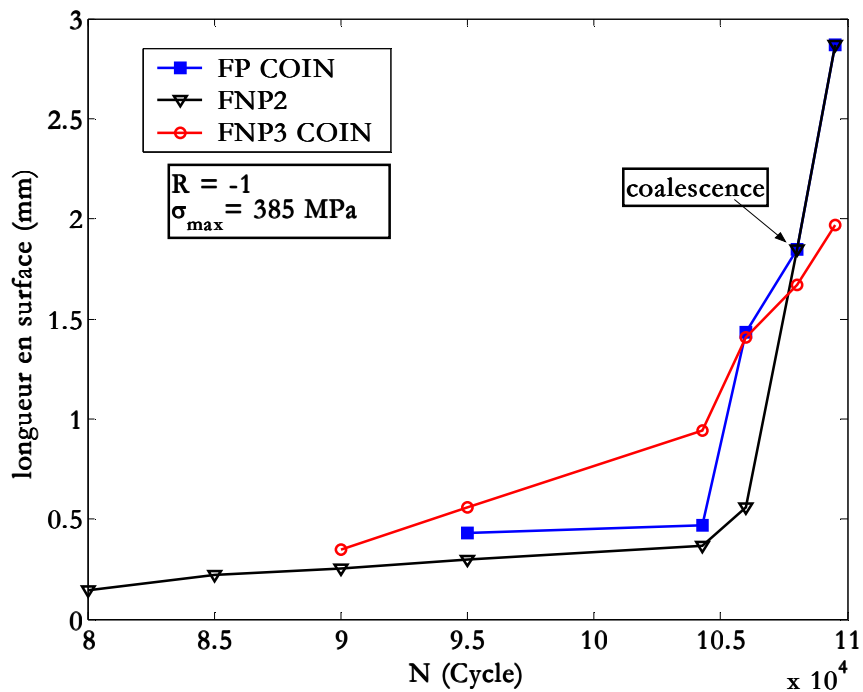


Figure IX-21 : Longueur de fissure en fonction du nombre de cycles (rupture sur fissure de coin) [sp14]

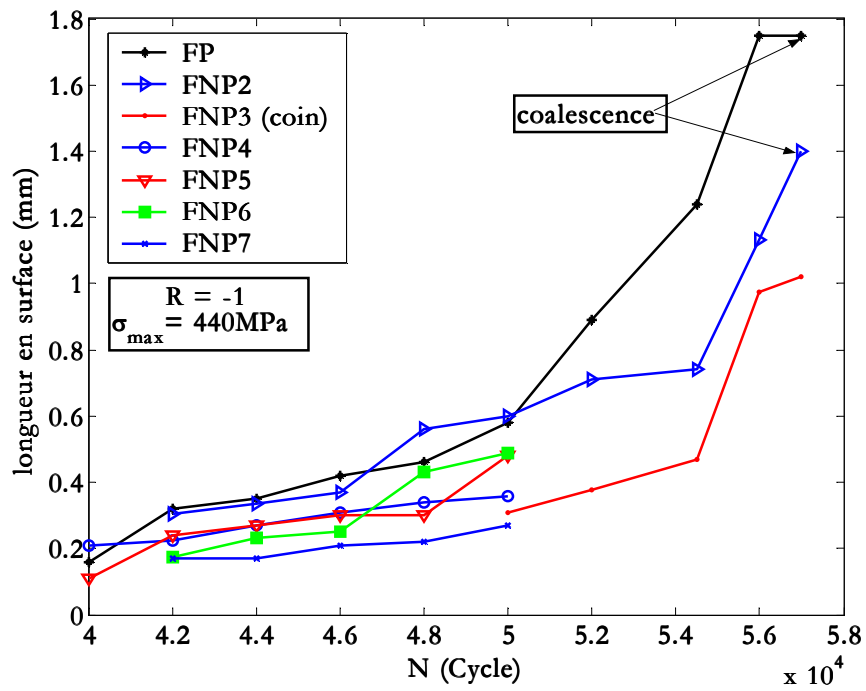


Figure IX-22 : Longueur de fissure en fonction du nombre de cycles (rupture par coalescence de fissures) [sp12]

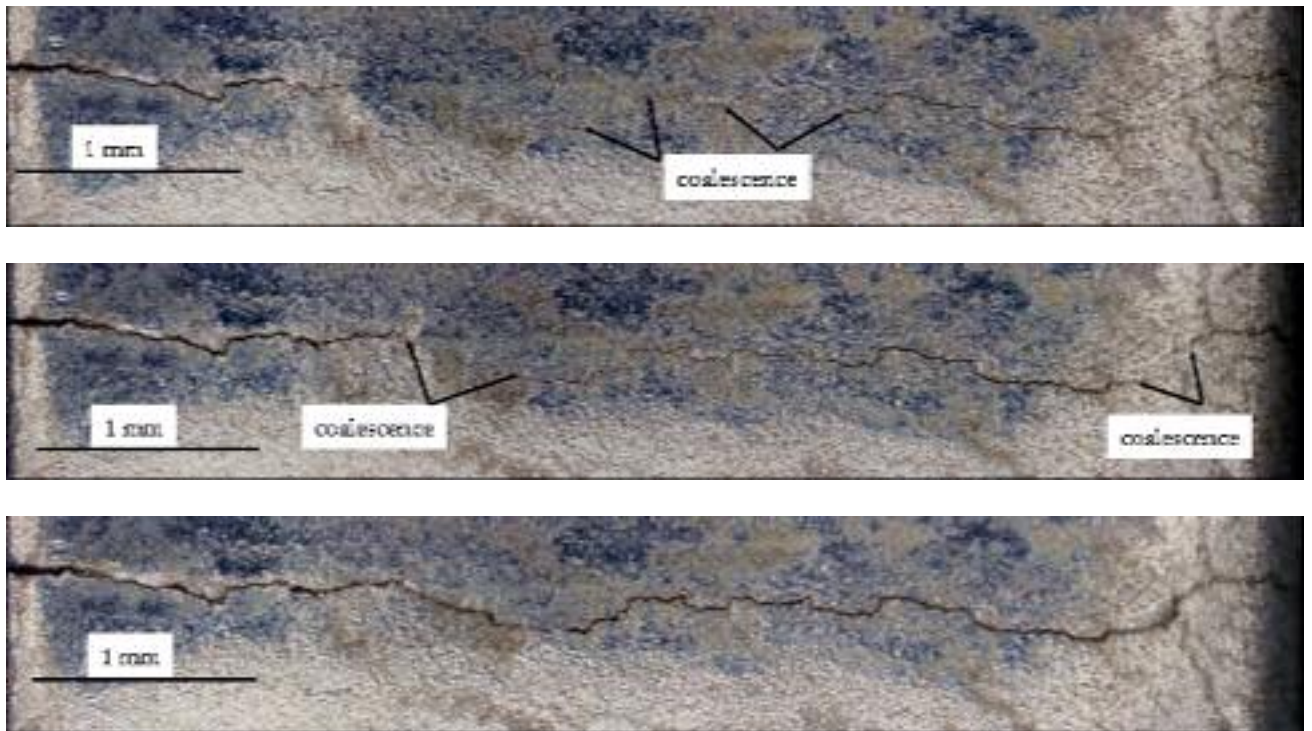


Figure IX-23 : Coalescence multiple conduisant à la rupture

IX-2-1-c Corrélation entre fissures propageantes et non propageantes

Les courbes indiquant l'évolution des longueurs de fissures non propageantes en fonction du nombre de cycles sont données dans les Figure IX-20 à Figure IX-22. Les courbes de propagation de fissures en fonction du facteur d'intensité de contrainte sont représentées dans les Figure IX-24 à Figure IX-28. Au cours des différents essais, nous avons détecté un nombre important de fissures qui s'arrêtent définitivement pour ne laisser place qu'à la propagation de la fissure propageante. Dans la pratique, afin de donner une meilleure lisibilité, nous avons tracé dans chaque figure l'évolution de la fissure propageante avec une ou deux fissures non propageantes (Figure IX-24 à Figure IX-28).

Nous remarquons que dans la majorité des cas, les fissures non propageantes sont les premières fissures à se propager mais au bout de quelques milliers de cycles elles s'arrêtent (Figure IX-25 et Figure IX-28). Généralement l'arrêt de ces fissures peut être expliqué par :

- *effet de décharge.* Lorsque des fissures sont suffisamment proches l'une de l'autre, elles peuvent soit coalescer entre elles ou se décharger l'une sur l'autre. Dans ce dernier cas, la diminution de l'intensité de contrainte peut être telle qu'on observe un arrêt des fissures (la Figure XI-14 est une illustration de l'effet de décharge) ;
- *influence de la zone plastique de l'entaille.* La propagation de la fissure depuis le fond d'une entaille est contrôlée par la zone plastique de l'entaille et celle de la fissure elle-même. L'importance relative de chacune des contributions dépend du niveau de chargement ainsi que de la longueur de la fissure. La contribution de l'entaille décroît au fur et à mesure que la fissure se propage alors que celle de la fissure croît. Si la contribution de l'entaille diminue plus vite que la contribution de la fissure n'augmente, la propagation ralentira, et la fissure deviendra non propageante. Par contre, si au sortir de la zone plastique de l'entaille, la plasticité de la fissure est suffisante la fissure continue de se propager jusqu'à rupture ;
- *présence d'une fissure de coin.* En effet, toutes choses par ailleurs étant égales, ces fissures se propagent plus vite que les fissures de surface car l'intensité des contraintes est plus élevée ;
- *trajet tortueux de la fissure.* A chaque fois que la fissure rencontre une barrière microstructurale, elle change de direction en cherchant le chemin le plus facile à franchir. Ces multiples déviations créent des surfaces rompues plus rugueuses qui ralentissent la propagation et peuvent conduire à l'arrêt définitif de la fissure (Figure IX-29) ;
- *bifurcation à la pointe de la fissure.* La présence de plusieurs chemins à la pointe de la fissure conduit à une diminution locale de la contrainte qui devient alors insuffisante pour propager la fissure, ce qui conduit à l'arrêt de celle-ci (Figure IX-30) ;
- *propagation en mode mixte.* En effet, les fissures de fatigue ne se propagent pas toujours perpendiculairement à la direction de la charge appliquée mais peuvent subir des déviations à l'échelle microscopique. Quand l'extrémité de fissure s'incline par rapport à la charge appliquée, la fissure commence à être sollicitée par un mode combiné I et II. La Figure IX-31 illustre le cas d'une fissure qui s'est propagée en profondeur dans un plan incliné, et qui s'est arrêtée en restant ouverte (bâillement de la fissure) du fait de l'existence d'un mode mixte de sollicitation ;

- *influence de la microstructure*, comme nous avons vu précédemment si la charge appliquée est insuffisante pour que la fissure traverse les barrières microstructurales (joints de grains notamment), on observe un arrêt de la fissure.

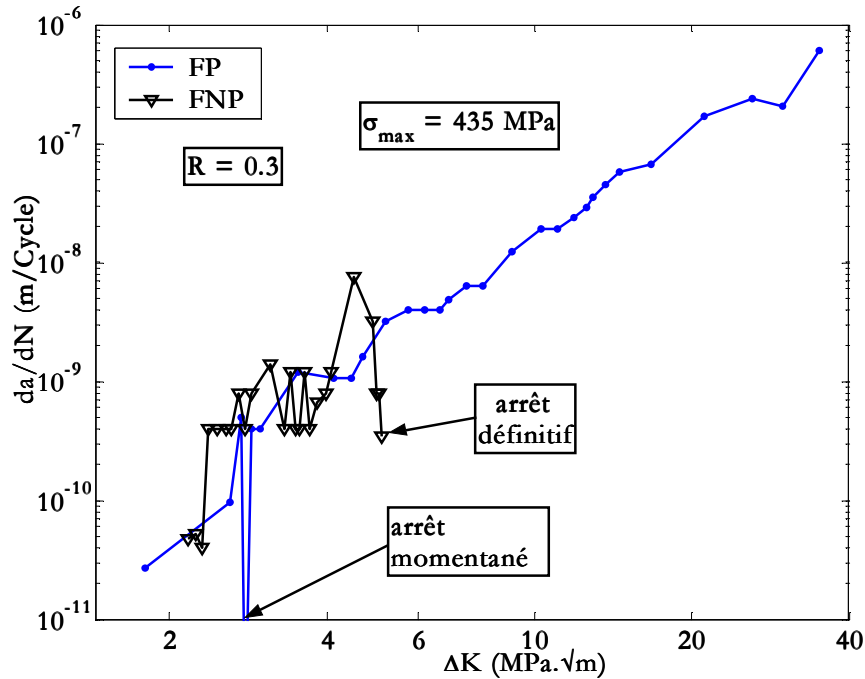


Figure IX-24 : Comparaison de l'avancée de fissure principale et non propageante ($R = 0,3$) [sp07]

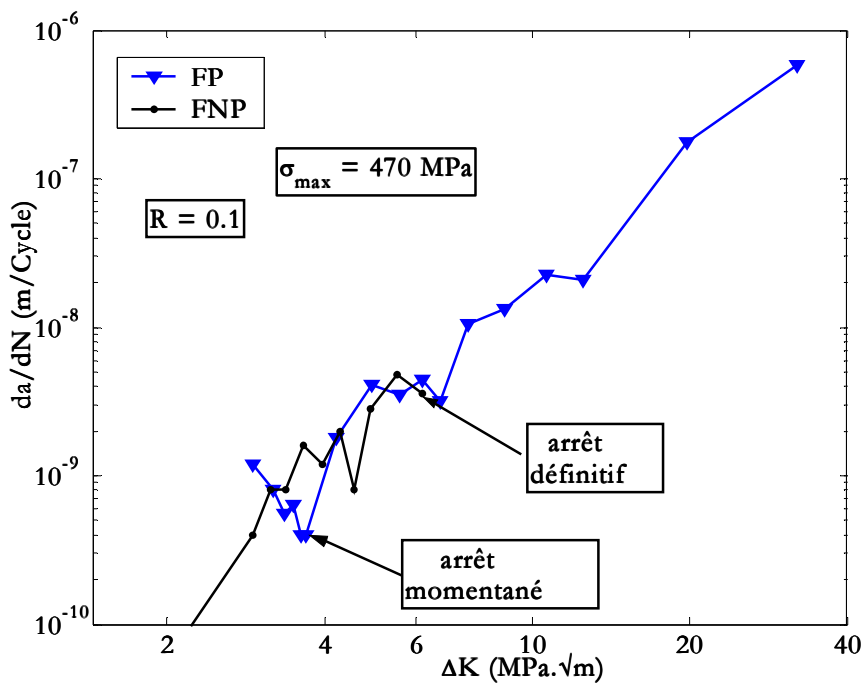


Figure IX-25 : Propagation de fissures propageante et non propageante en termes de ΔK ($R = 0,1$) [sp02]

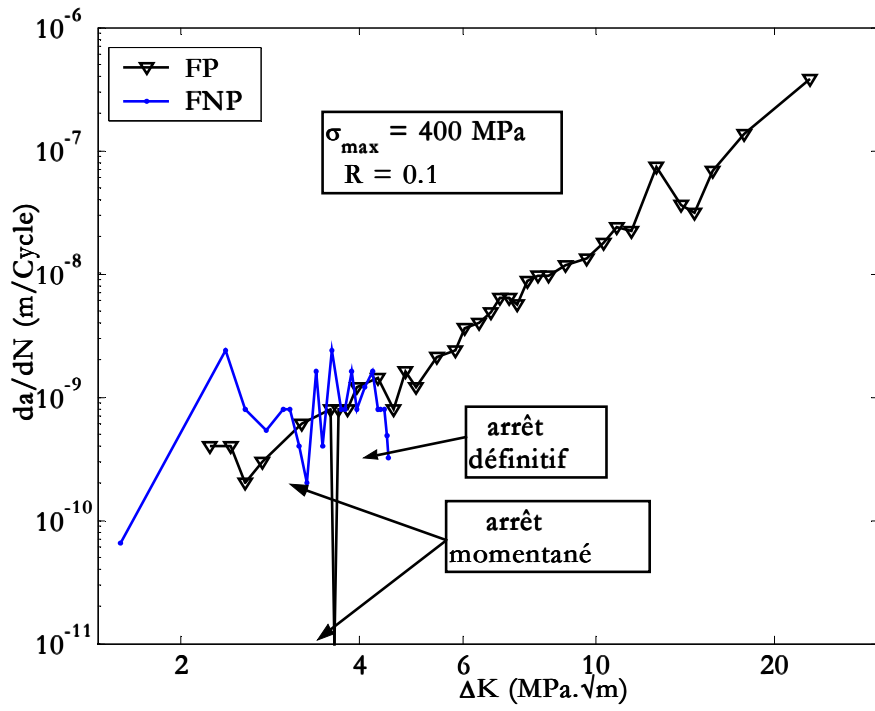


Figure IX-26 : Décélération de la fissure non propageante avant l'arrêt définitif ($R = 0,1$) [sp05]

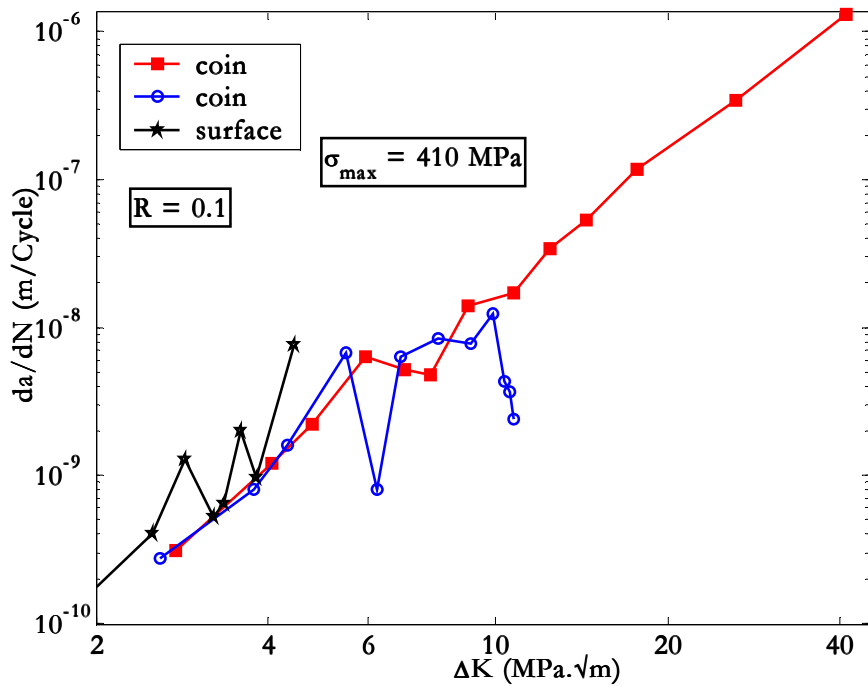


Figure IX-27 : Propagation de fissures de coin et de surface ($R = 0,1$) [sp04]

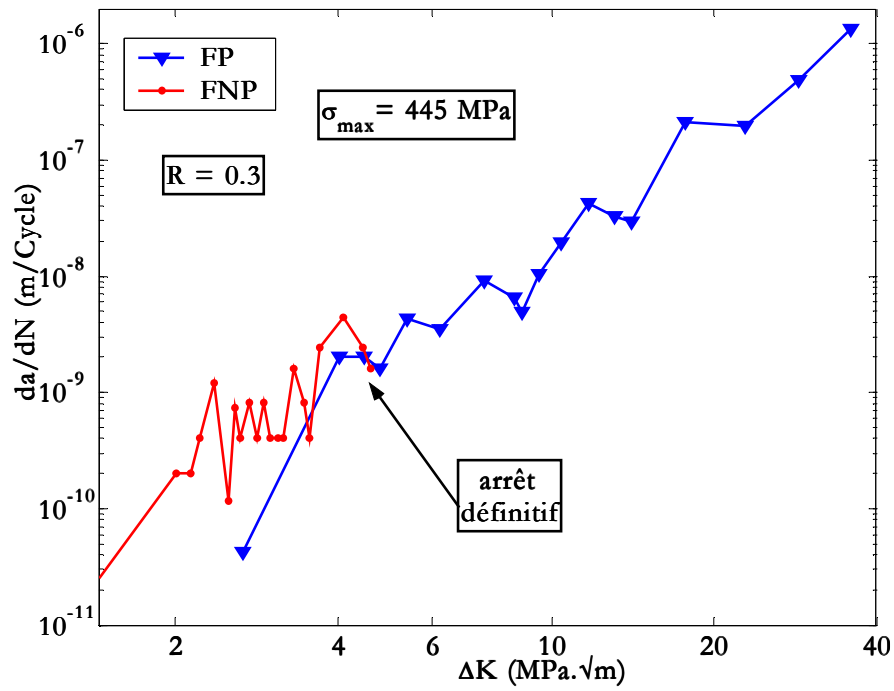


Figure IX-28 : Vitesse de propagation en fonction de ΔK (fissures propageante et non propageante, $R = 0,3$) [sp06]

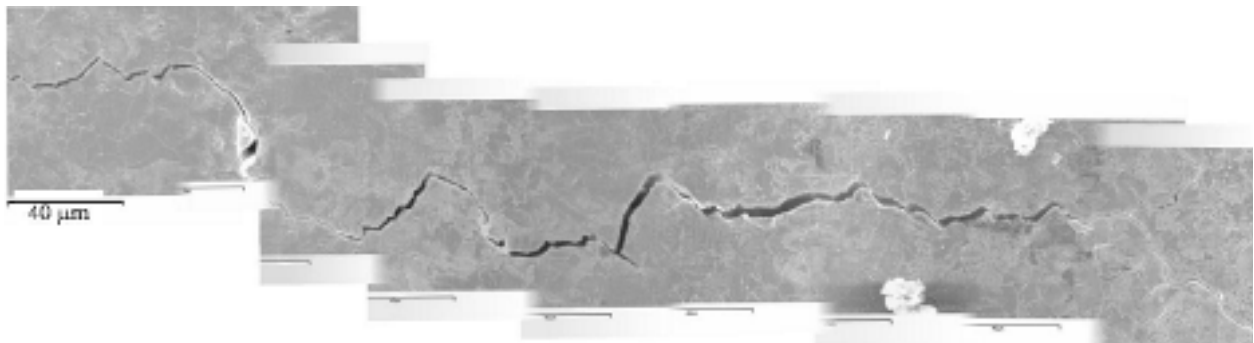


Figure IX-29 : Multiples déviations conduisant à l'arrêt de la fissure

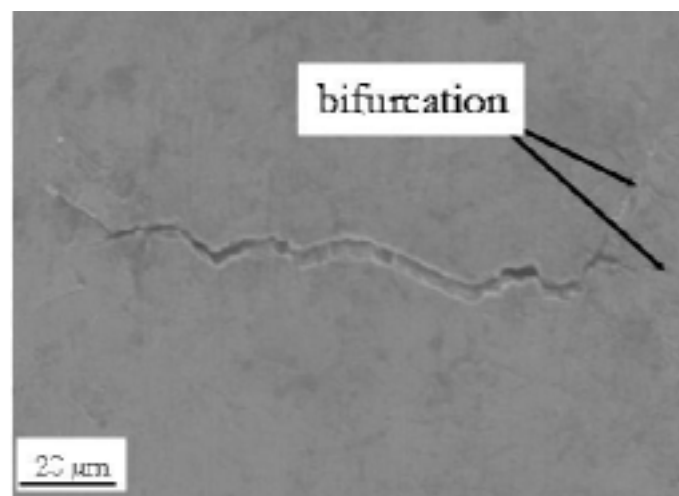


Figure IX-30 : Phénomène de bifurcation

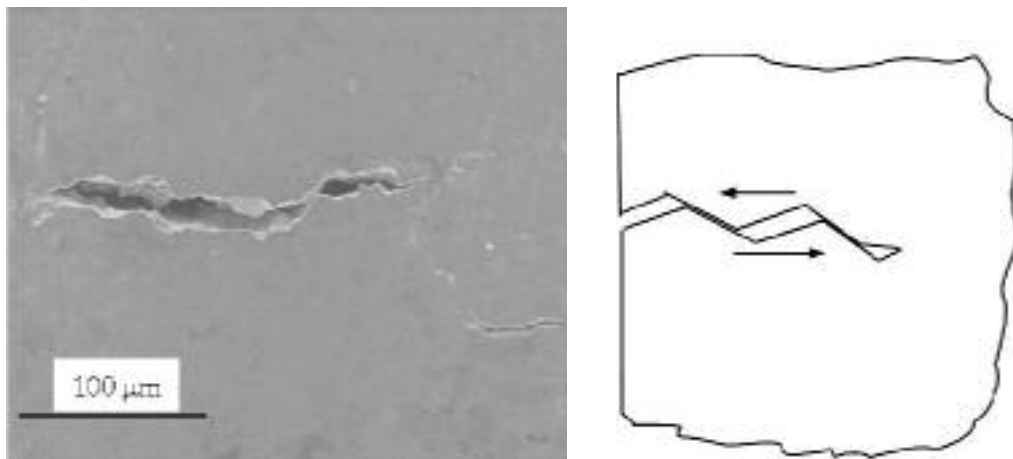


Figure IX-31 : « Bâillement » de fissure (mode I et II)

Dans le cas de deux fissures co-planaires, les résultats montrent qu'avant coalescence les fissures se propagent indépendamment, lorsque la coalescence a lieu, le facteur d'intensité de contrainte au niveau du point de contact augmente alors brutalement. Après coalescence, le facteur d'intensité de contrainte diminue de nouveau et la forme de la fissure se stabilise progressivement [Jia91(2)].

Nous avons constaté un autre phénomène : sous le même niveau de contrainte et sur la même éprouvette, nous observons une propagation plus rapide de certaines fissures. Nous avons expliqué ce phénomène par deux raisons :

- le type de fissure (surface ou coin). En effet, si la fissure s'amorce en coin, elle se propage pour le même niveau de chargement, plus rapidement que si elle s'était amorcée en surface ;
- la zone d'amorçage. Si la fissure est amorcée dans un plan incliné par rapport à la direction de sollicitation, elle se propage moins vite que lorsqu'elle s'amorce à partir d'une inclusion.

IX-2-2 Comparaison entre les différents rapports de charge

Pour étudier l'influence du rapport de charge sur la durée de propagation d'une fissure de fatigue, nous avons tracé dans la Figure IX-32 la propagation d'une fissure de 70 μm en fonction du nombre de cycles pour les rapports de charge -1, 0,1, 0,3 et 0,5 sous une contrainte maximale de 440 MPa. Les résultats nous montrent que le nombre de cycles augmente avec le rapport de charge : c'est-à-dire que la résistance à la fissuration est d'autant plus grande à même σ_{\max} que le rapport de charge est plus élevé.

Les résultats des essais de propagation pour un rapport $R = 0,1$ sont représentés sur la Figure IX-33. Nous avons également reporté sur cette figure les résultats obtenus pour $R = 0,3$. Nous constatons une bonne correspondance des vitesses de propagation pour les deux rapports. Les mêmes observations peuvent être effectuées si nous comparons les différents rapports de charge $R = 0,1$ et $R = 0,5$ (Figure IX-34), $R = -1$ et $R = 0,3$ (Figure IX-36) et enfin $R = -1$ et $R = 0,5$ (Figure IX-35). Cette absence de différences entre les résultats obtenus à $R > 0$ et $R < 0$ nous permet véritablement de supposer que la partie négative du cycle n'intervient pas au cours de la propagation de la fissure, ce qui tend ainsi à vérifier notre hypothèse de travail. La seule différence est la valeur de l'amplitude du facteur d'intensité de contrainte au niveau du puits de

vitesse. Cette différence est justifiée par le fait que les essais ont été réalisés sous différentes amplitudes de contrainte ; de plus, l'inhomogénéité de la taille des grains ($15 \mu\text{m} < d_G < 60 \mu\text{m}$) donnent des fissures de différentes tailles à l'amorçage. Ces résultats confirment que le rapport de charge n'a pas d'influence sur la propagation des fissures courtes en fatigue, si nous comparons la vitesse de propagation en fonction du facteur d'intensité de contrainte. Ce résultat est fondamental pour supposer l'inexistence des effets de fermeture pour les fissures courtes.

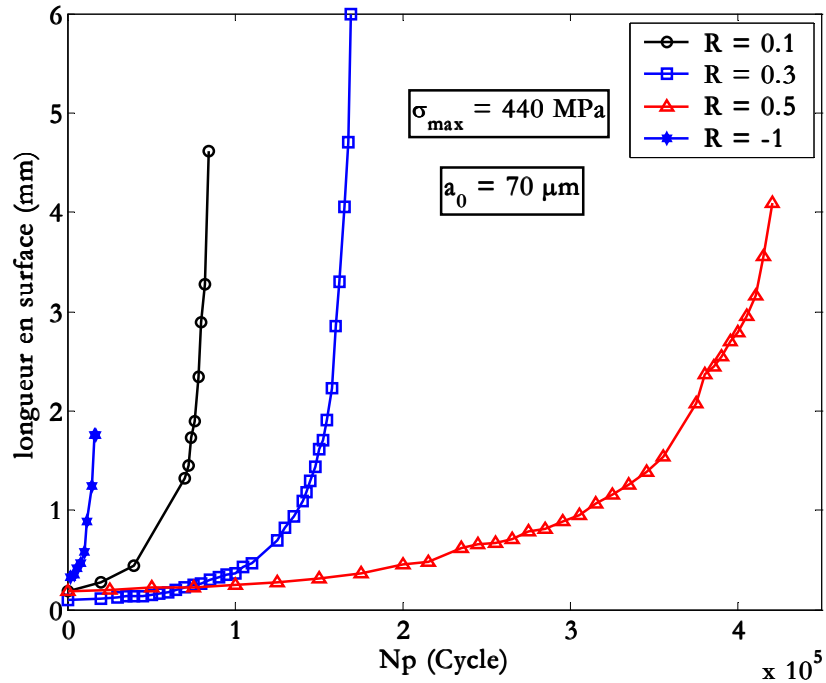


Figure IX-32 : Durée de propagation d'une fissure de $70 \mu\text{m}$ pour différents rapports de charge [sp03, sp06, sp11 et sp12]

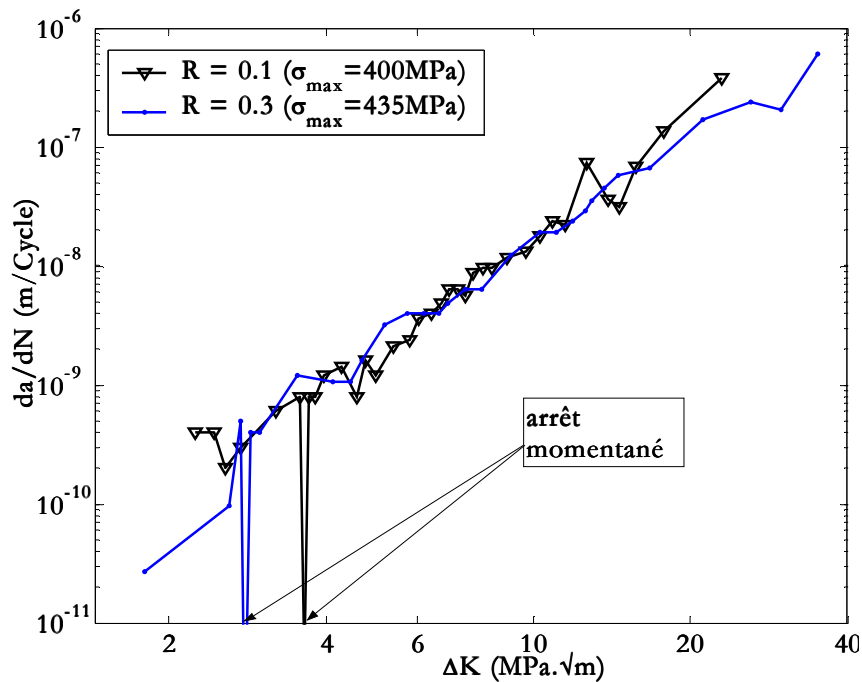


Figure IX-33 : Influence du rapport de charge sur la propagation de fissures courtes [sp05 et sp07]

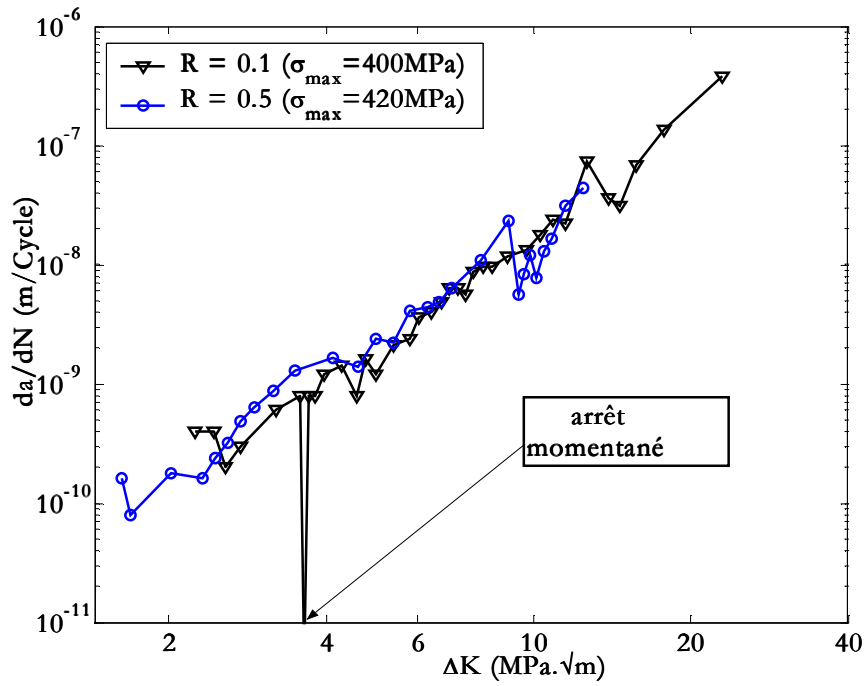


Figure IX-34 : Vitesse de propagation de fissures courtes pour deux rapports de charge ($R = 0,1$ et $0,5$) [sp05 et sp11]

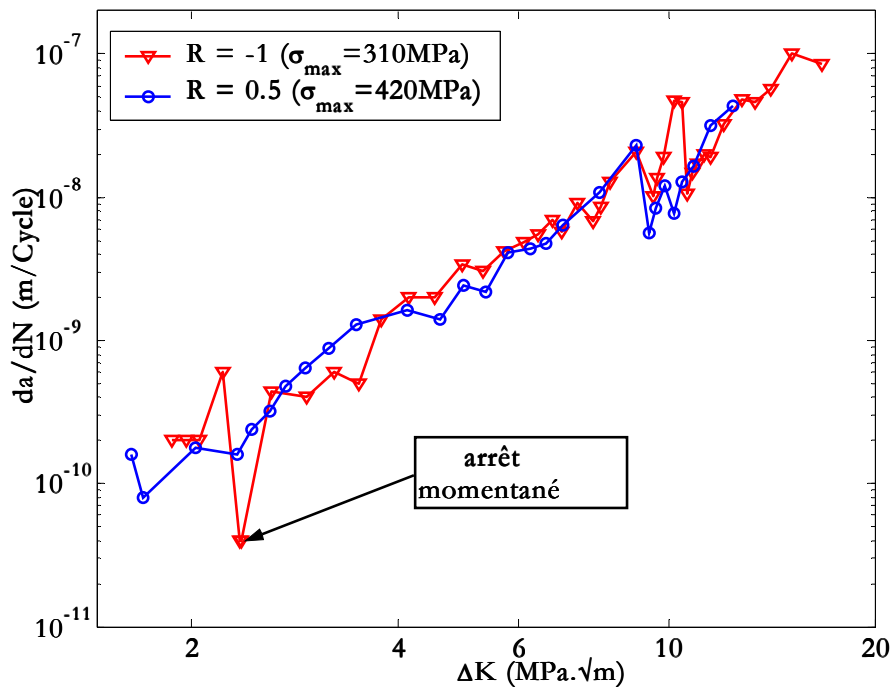


Figure IX-35 : Propagation de fissures courtes pour les différents rapports de charge [sp17 et sp11]

La Figure IX-37 permet de montrer l'influence du rapport de charge sur la vitesse de propagation pour une longueur de fissure donnée. Dans cette figure, nous avons tracé la vitesse de propagation (da/dN) en fonction de la profondeur de la fissure (a) pour les rapports de charge $R = -1$, $R = 0,1$, $R = 0,3$ et $R = 0,5$. Tous ces essais ont été réalisés sous la même contrainte maximale ($\sigma_{max} = 440 \text{ MPa}$). Pour une taille de fissure donnée, cette figure montre que lorsque le rapport de charge augmente, la vitesse de fissuration diminue. Nous pouvons

expliquer ces observations par les résultats de la Figure IX-32 qui montre que le nombre de cycles augmente avec le rapport de charge R , c'est-à-dire que pour une avancée de fissure Δa , si nous augmentons R le nombre de cycle nécessaire augmente ; ce qui conduit à une diminution de la vitesse de propagation.

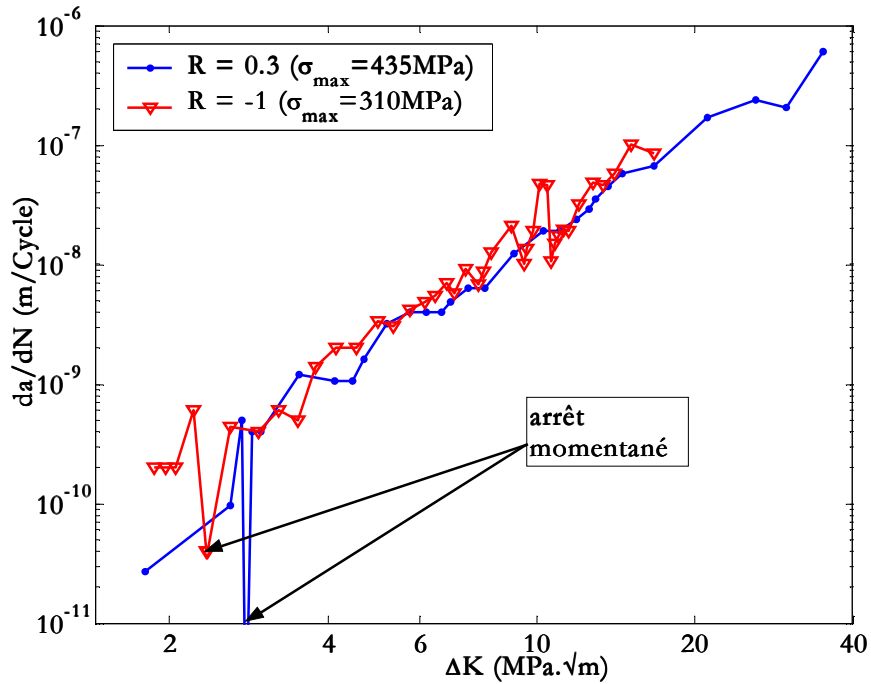


Figure IX-36 : $da/dN - \Delta K$ pour les rapports de charge 0,3 et -1 [sp07 et sp17]

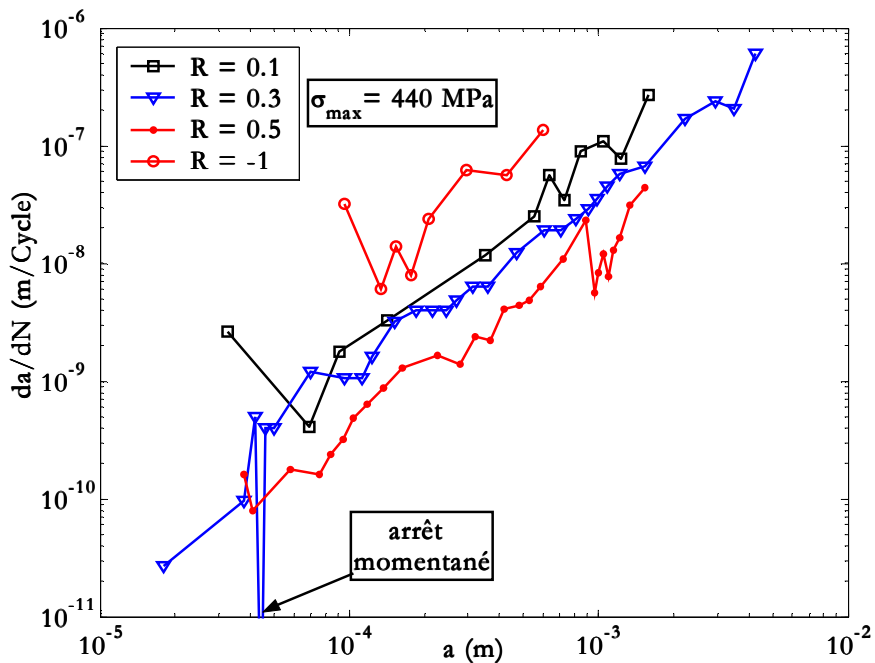


Figure IX-37 : Influence du rapport de charge sur les vitesses de propagation des fissures courtes [sp03, sp06, sp11 et sp12]

IX-3 Essais sous chargements d'amplitude variable

Les structures navales (bâtiments de surface...) sont soumises en service à des chargements variables dus aux états de mer, au vent, aux vagues... Ainsi, il est nécessaire d'acquérir une meilleure compréhension du comportement en fatigue dans des conditions de chargement réelles. C'est pour cette raison que nous allons maintenant étudier le comportement de l'acier S355NL sous plusieurs chargements d'amplitude variable.

Dans un premier temps, nous avons voulu examiner le comportement des fissures courtes à travers l'application d'un chargement progressif en s'inspirant des travaux de Miller [Mill86]. Cependant, n'ayant pas la capacité logicielle d'appliquer un signal évoluant de manière linéaire dans le temps, nous avons effectué des essais en appliquant une succession de paliers (durée variable) d'amplitude croissante ou décroissante avec une évolution de la charge de $\pm 2,5\%$.

Dans un deuxième temps, à partir d'un spectre de chargement réel issu d'enregistrements en service (Figure V-11), nous avons extrait deux types de chargements variables représentatifs. Nous avons alors procédé en deux étapes :

- nous avons éliminé tous les cycles qui avaient une amplitude inférieure à la moitié de l'amplitude maximale du spectre. Pour les cycles restants, nous avons trouvé que le rapport entre la moyenne des amplitudes qui vérifient cette condition et l'amplitude maximale du spectre est égal à 1,40. Nous avons alors construit le premier chargement comme une succession de blocs : chaque bloc est constitué de neuf cycles suivis d'un cycle avec un taux de surcharge de 1,4. Ceci est équivalent à une sollicitation avec des surcharges/souscharges répétées (Figure IX-38). Nous appellerons ce chargement *bloc1*.
- puis, nous avons pris en compte l'influence des cycles restants : nous avons fait la moyenne des charges maximales de ces cycles. Le chargement que nous avons trouvé est cette fois constitué de cinq cycles suivis de neuf cycles et enfin un cycle avec un taux de surcharge à chaque fois de 1,40 (Figure IX-38). Nous appellerons ce chargement *bloc2*.

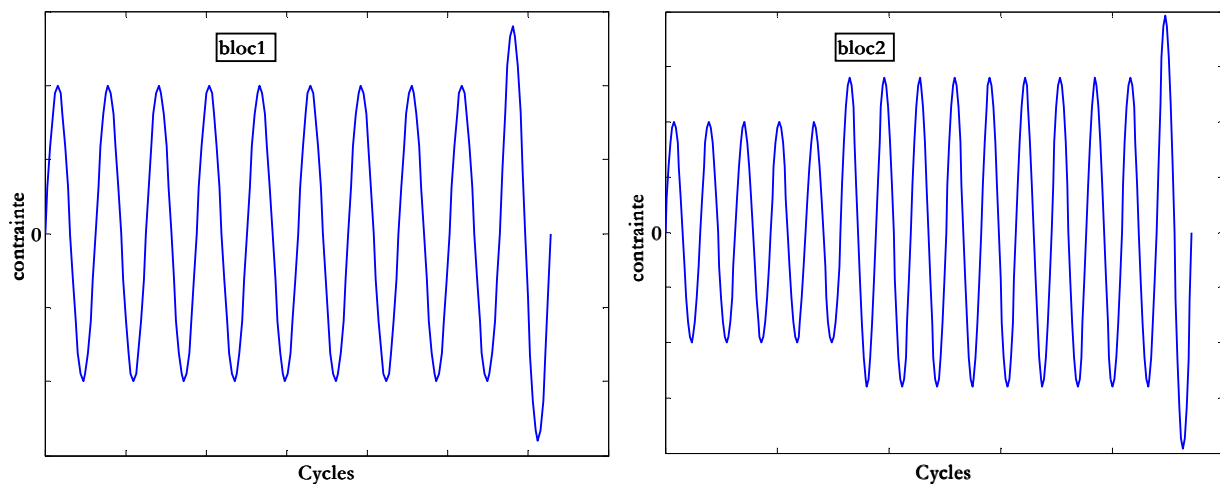


Figure IX-38 : Chargements employés issus du spectre (*bloc1* et *bloc2*)

En ce qui concerne l'amplitude du chargement, nous avons tout d'abord effectué un essai en respectant l'amplitude de chargement mesuré lors d'un état de mer 5, à savoir 45 MPa pour un rapport de charge égal à -1. Au bout de $5 \cdot 10^6$ cycles, aucune fissure, même non propageante, n'est apparue sur la surface de l'échantillon. Ce résultat était clairement attendu puisque la limite

d'endurance de l'acier *S355NL* établie pour $R = -1$ est voisine de 200 MPa. Aussi, à la vue des résultats obtenus à $R = -1$ pour des chargements d'amplitude constante, nous avons décidé d'appliquer un coefficient multiplicateur à cette valeur de l'amplitude. Nous avons choisi d'employer deux niveaux de chargement différents : 285 MPa (surcharge : 400 MPa) puis 305 MPa (surcharge : 425 MPa) au cours d'un autre essai. Ces valeurs correspondent respectivement à des contraintes équivalentes (Partie B) de 310 MPa et 335 MPa pour le chargement de type *bloc1*.

Pour ce qui est du chargement de type *bloc2*, nous avons choisi d'effectuer également des essais avec deux chargements équivalents différents. Ce spectre utilise quant à lui trois niveaux d'amplitude distincts : 205 et 280 MPa (surcharge : 420 MPa).

Dans la Figure IX-39, nous avons présenté l'évolution de la longueur de fissure en surface en fonction du nombre de blocs pour deux essais effectués avec des surcharges/souscharges répétées (*bloc1*). Les essais sont effectués pour des contraintes équivalentes de 310 MPa et à 335 MPa. Comme dans le cas des chargements d'amplitude constante, la longueur de fissure augmente avec le nombre de blocs. Nous constatons que ces courbes montrent une certaine incohérence par rapport aux essais effectués sous chargement constant. En effet, pour une contrainte équivalente de 310 MPa, nous avons appliqué 19 500 blocs alors que pour la contrainte équivalente de 335 MPa il a fallu 28 250 blocs pour rompre l'éprouvette. C'est à dire que le nombre de blocs augmente avec la contrainte appliquée, ce qui est tout à fait contradictoire avec les résultats issus des chargements d'amplitude constante (Figure IX-5). Cette incohérence n'est pas dû aux chargements variables, mais nous pouvons la justifier par le type de fissure, car pour l'éprouvette sous la charge 310 MPa, c'est une fissure de coin qui a dominée la propagation jusqu'à rupture, tandis que pour 335 MPa, c'est une fissure de surface qui a conduit à la rupture. Ces résultats confirment le fait que les fissures de coin entraînent une durée de vie inférieure à celles des fissures de surface.

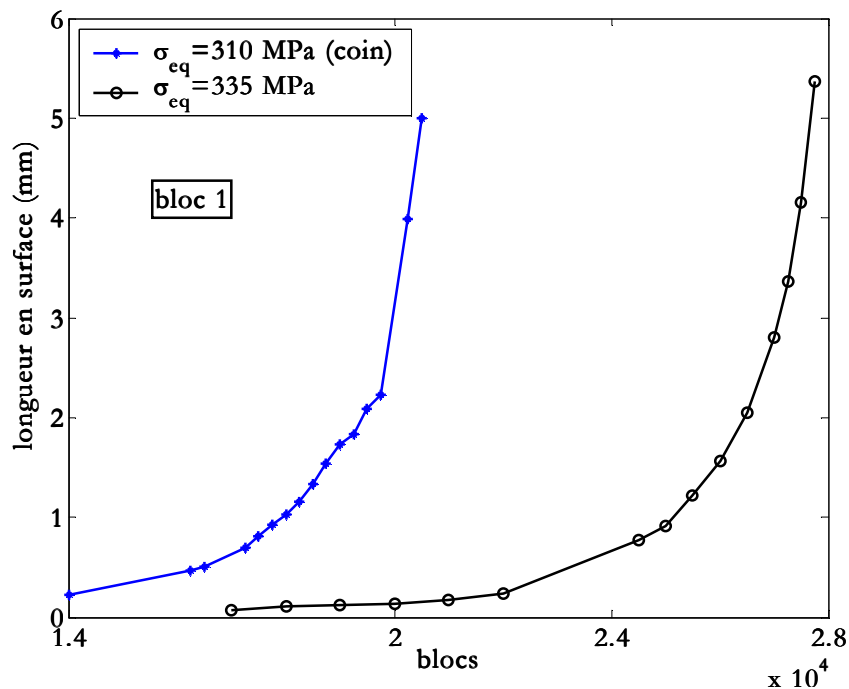


Figure IX-39: Longueur de fissure en fonction du nombre de blocs pour deux chargements [sp20 et sp21]

Lors d'un chargement par blocs, comme dans le cas des chargements d'amplitude constante, nous avons pu constater le développement de plusieurs fissures le long de la partie centrale de l'éprouvette. Dans la Figure IX-40, nous avons représenté l'évolution de la longueur de la fissure en surface en fonction du nombre de blocs pour une fissure propageante et une autre non propageante. Cette figure montre une croissance nettement plus rapide de la fissure qui entraîne la rupture au moment où la fissure non propageante s'arrête.

Dans la Figure IX-41, nous avons tracé l'évolution de la vitesse de propagation en fonction de l'amplitude du facteur d'intensité de contrainte pour deux essais sous chargement par blocs (bloc1). Ces résultats nous montrent un arrêt momentané de la fissure propageante pour $\Delta K = 3,1 \text{ MPa}\cdot\sqrt{\text{m}}$, ce qui correspond à une longueur de fissure de l'ordre de $46 \text{ }\mu\text{m}$ (Figure IX-42) ainsi qu'à une vitesse de propagation légèrement supérieure pour l'essai avec la charge équivalente 335 MPa . La faible différence entre vitesse de propagation devient nulle lorsque ΔK augmente.

Les résultats des essais réalisés avec chargement par paliers croissants et décroissants sont présentés respectivement dans la Figure IX-43 et Figure IX-44. Ces deux figures confirment la tendance générale des fissures courtes. Sous chargement par paliers croissants ou décroissants, les fissures courtes s'amorcent avec une vitesse élevée suivie d'une décélération ou d'un arrêt momentané avant de repartir avec une vitesse croissante jusqu'à rupture. Des chutes de vitesse ont été observées pour des longueurs de fissure de la taille d'un à trois grains.

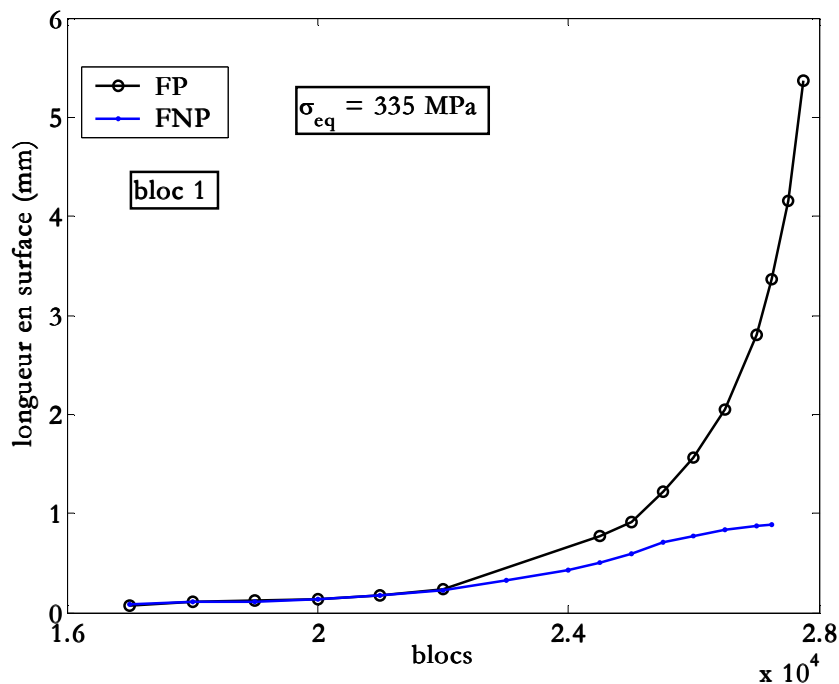


Figure IX-40 : Longueur de fissure propageante et non propageante en fonction du nombre de blocs [sp21]

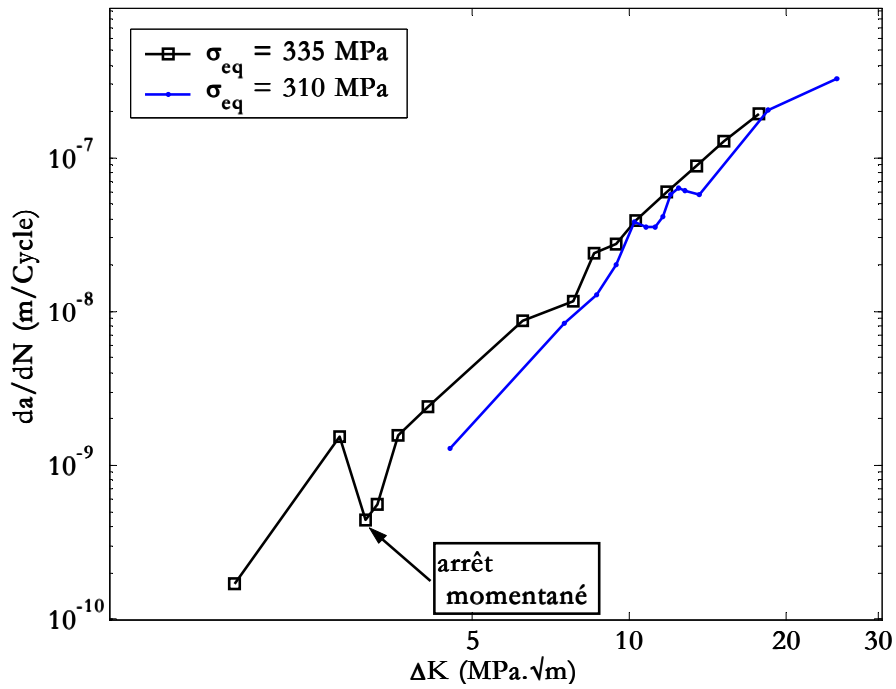


Figure IX-41 : da/dN en fonction de ΔK sous chargement variable (*bloc1*) [sp21 et sp20]

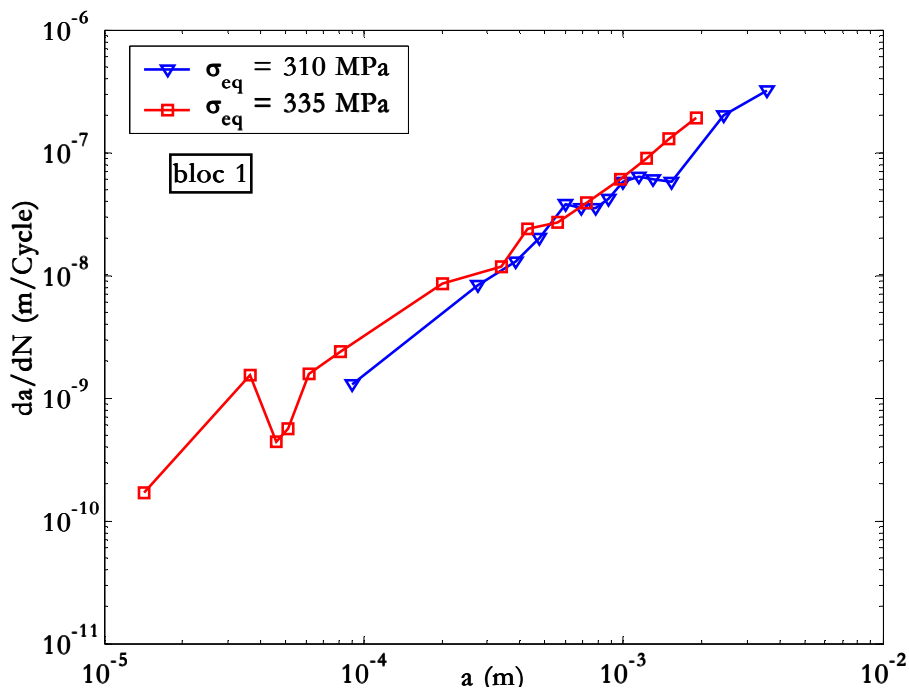


Figure IX-42 : Influence du chargement variable (*bloc 1*) sur l'avancée de fissure [sp20 et sp21]

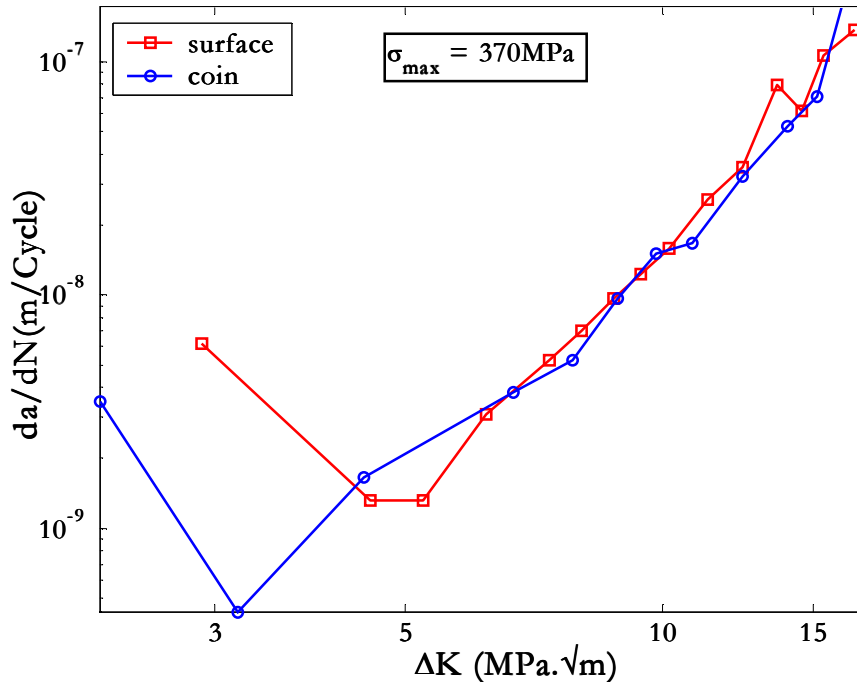


Figure IX-43 : Vitesse d'avancée de fissure sous chargement croissant par paliers [sp23]

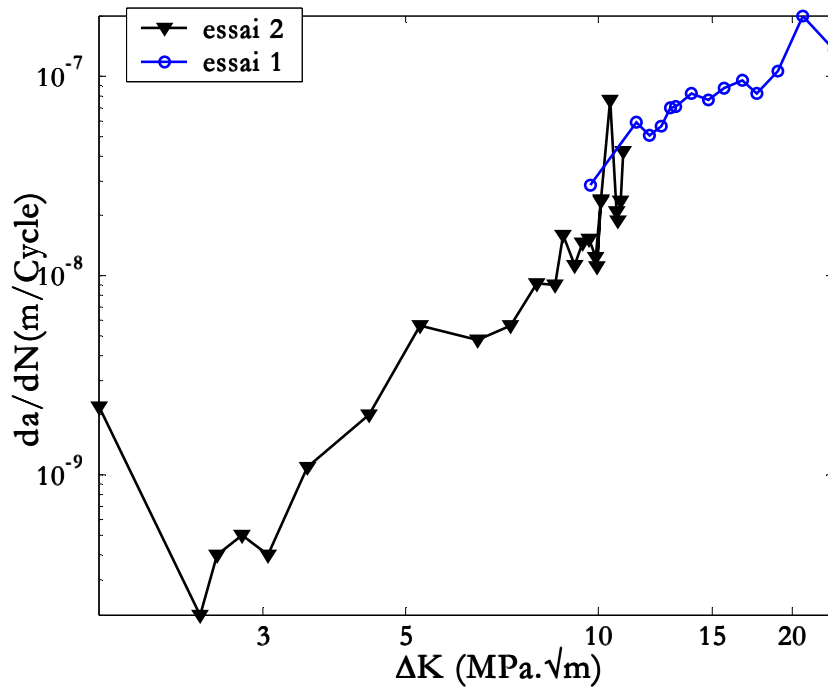


Figure IX-44 : Vitesse d'avancée de fissure sous chargement décroissant par paliers [sp25 et sp24]

IX-4 Comparaison des résultats obtenus à partir des différents chargements

L'effet réducteur de durée de vie lié à l'application des surcharges répétées, apparaît explicitement dans la Figure IX-45 qui décrit l'évolution de la longueur de fissure en fonction du nombre de cycles pour deux essais sous la même contrainte équivalente. Cette figure met en évidence la différence de fissuration obtenue sous chargement d'amplitude constante à $R = -1$ et sous chargement par blocs pour la même contrainte équivalente. Ces résultats montrent que les surcharges répétées ont un effet accélérateur sur la durée de vie. En effet, ces courbes montrent qu'à partir d'une longueur de fissure en surface égale à $200 \mu\text{m}$, l'influence des surcharges est de plus en plus marquée. Par exemple, pour avoir une fissure de $1,5 \text{ mm}$, il aura fallu $26\ 000$ blocs ($260\ 000$ cycles) pour atteindre cette valeur alors qu'avec un chargement d'amplitude constante, à $R = -1$ et pour la même contrainte, $300\ 000$ cycles auront été nécessaires.

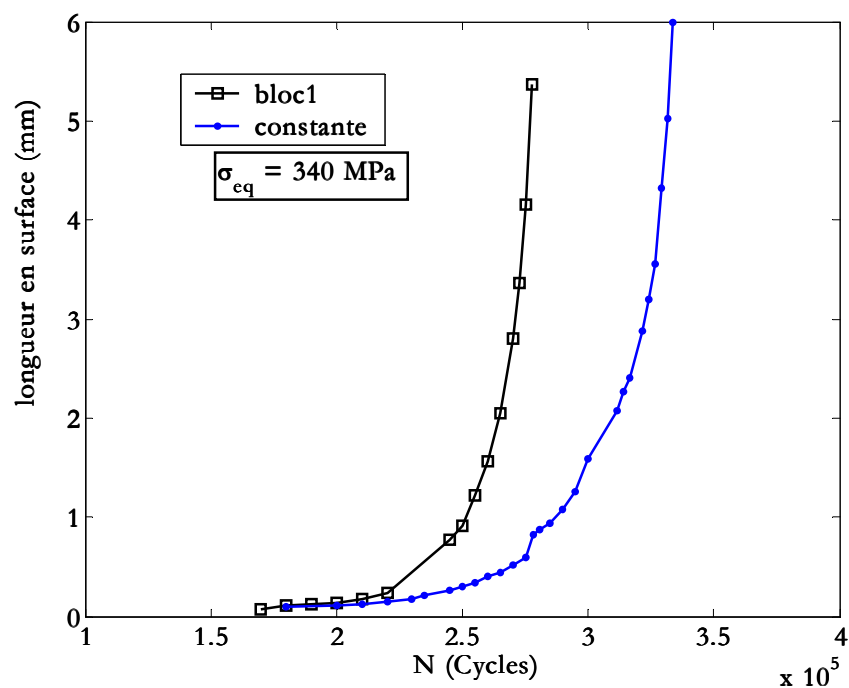


Figure IX-45 : Durées de vie sous chargements d'amplitude constante ($R = -1$) et variable (même contrainte équivalente) [sp21 et sp16]

Pour montrer l'influence des surcharges répétées sur l'évolution de la fissure, nous avons tracé sur le même graphe la vitesse de propagation en fonction de la longueur de fissure pour la même contrainte équivalente sous chargement d'amplitude constante ($R = -1$) et sous chargement par surcharges répétées (Figure IX-46). Cette figure montre une vitesse de propagation plus importante sous blocs pour des longueurs de fissure supérieures à $90 \mu\text{m}$, par contre en dessous de cette valeur les vitesses sont identiques. Nous pouvons expliquer cette différence par l'influence de la zone plastique. En effet, lorsque la fissure est petite sa propagation est contrôlée par la zone plastique de l'entaille, et dès que la fissure sort de cette zone elle se propage en fonction de sa propre zone plastique créée en fonction de la charge appliquée. La présence d'une surcharge permet d'augmenter la taille de la zone plastique de la fissure par rapport à un chargement d'amplitude constante de même contrainte équivalente, ainsi on justifie une propagation plus rapide sous chargement par surcharge répétée.

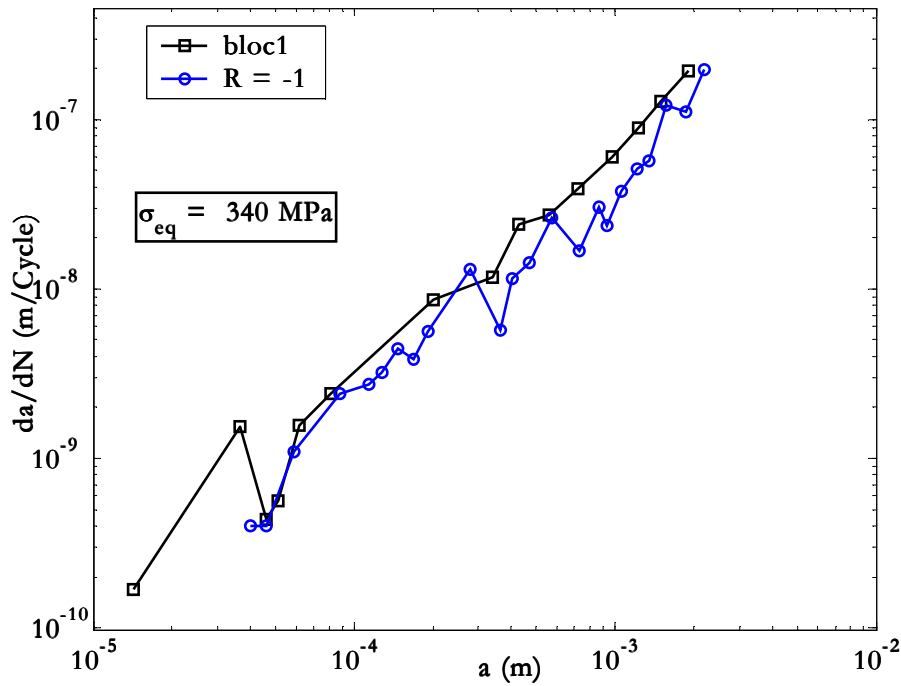


Figure IX-46 : Vitesse de propagation sous chargements d'amplitude constante ($R = -1$) et variable (*bloc1*) [sp21 et sp16]

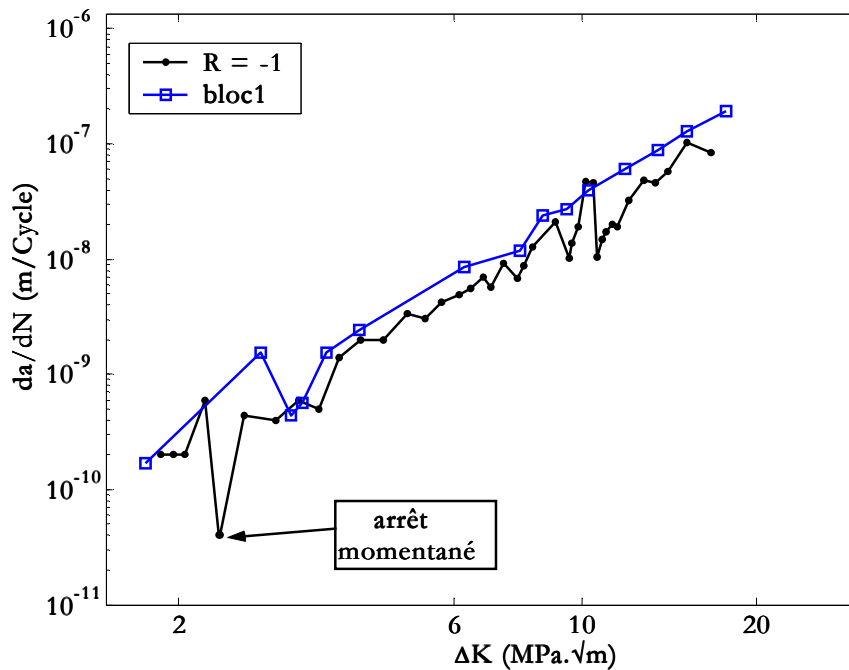


Figure IX-47 : Vitesse d'avancée de fissures courtes sous chargement d'amplitude constante ($R = -1$) et variable fonction de ΔK [sp16 et sp21]

Dans les Figure IX-47 et Figure IX-48, nous avons comparé les courbes de propagation des fissures courtes pour des essais avec surcharges répétées et d'autres sous chargement d'amplitude constante. Nous avons constaté que sous chargement avec surcharge, la courbe des vitesses de propagation est au-dessus de celle observée pour les rapports de charge $R = -1$ et $R = 0,3$. Cette différence est due aux effets de surcharges répétées qui créent de plus grandes

zones plastiques dans les extrémités de la fissure. Cette séquence se comporte donc comme si tous les cycles se comportaient comme des surcharges dans la propagation de la fissure. D'ailleurs, lorsque nous utilisons la valeur de la contrainte de surcharge au lieu de la contrainte équivalente, nous retrouvons les courbes issues du chargement d'amplitude constante.

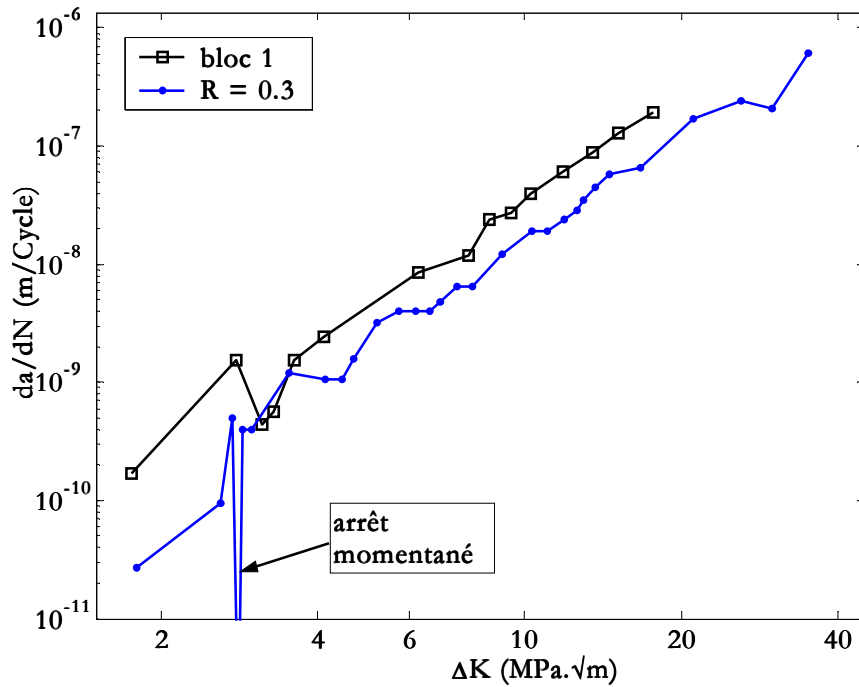


Figure IX-48 : Comparaison chargement par blocs (*bloc1*) et d'amplitude constante ($R = 0,3$) [sp21 et sp07]

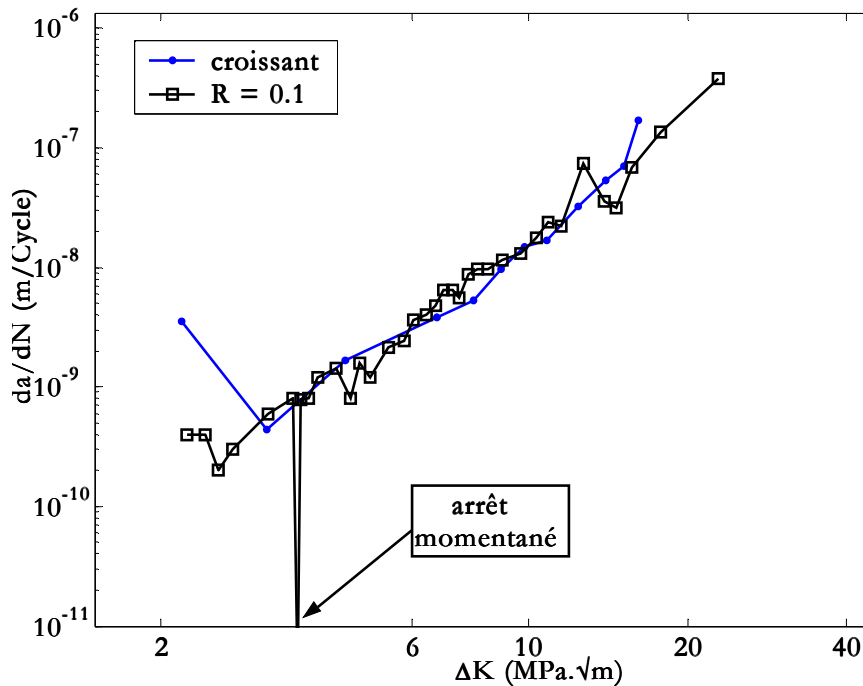


Figure IX-49 : Vitesse de propagation de fissures courtes sous chargement d'amplitude constante ($R = 0,1$) et croissant fonction de ΔK [sp23 et sp05]

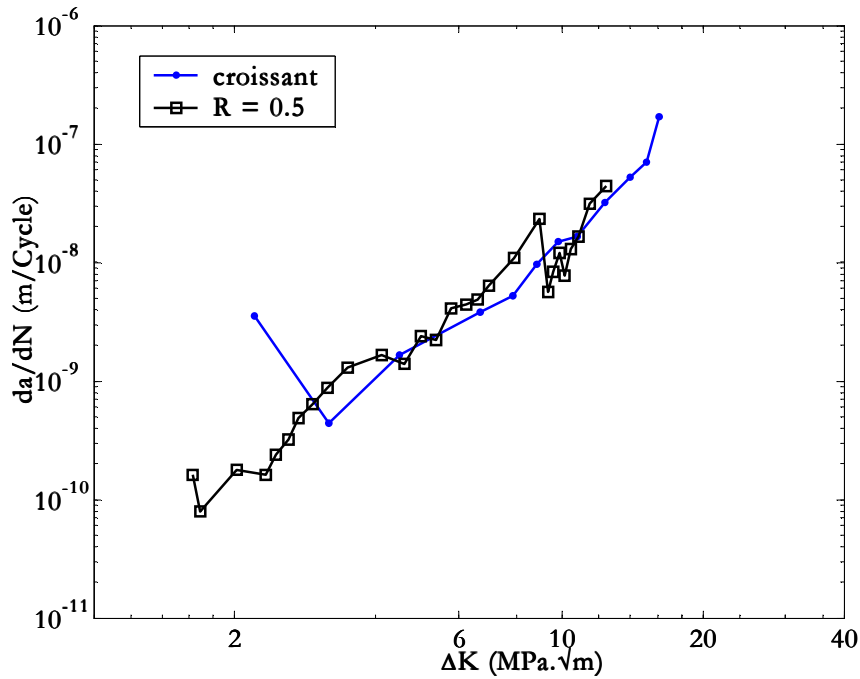


Figure IX-50 : Comparaison chargement d'amplitude croissante et constante ($R = 0,5$) [sp23 et sp11]

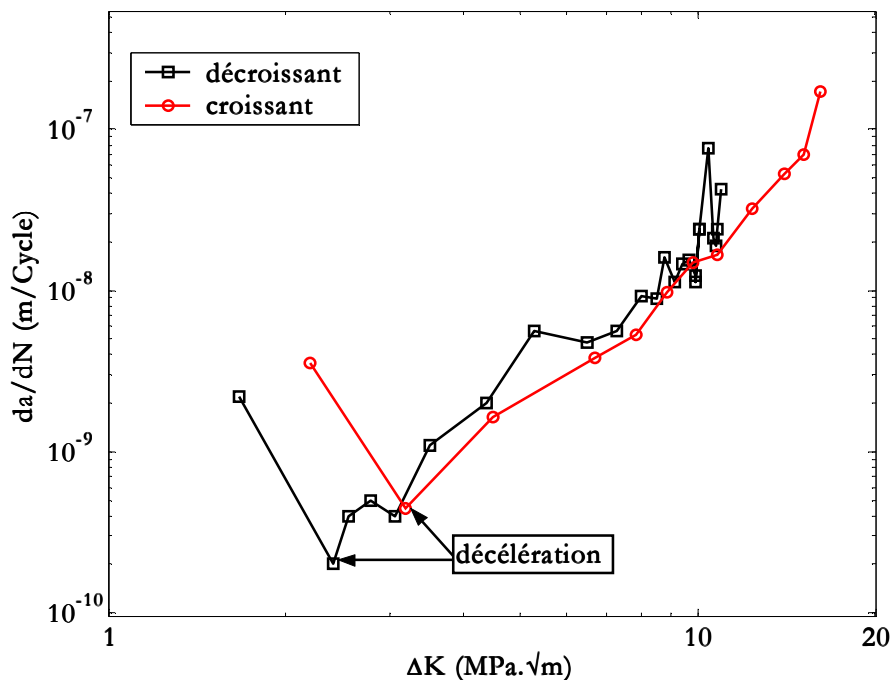


Figure IX-51 : Vitesse d'avancée de fissure pour chargements croissant et décroissant [sp25 et sp23]

Les résultats des essais avec le chargement variable *bloc2* montrent peu de différence avec ceux obtenus pour le *bloc1*. La Figure IX-52 représente la vitesse de propagation en fonction de la longueur de fissure pour les blocs 1 et 2. Il s'agit d'une fissure de surface dans les deux cas. La vitesse de fissuration à longueur de fissure égale est légèrement supérieure pour le *bloc1* car la contrainte équivalente du *bloc1* est supérieure à celle du *bloc2*. En revanche, les courbes de propagation en termes de ΔK représentées sur la Figure IX-53 montrent une similitude de comportement.

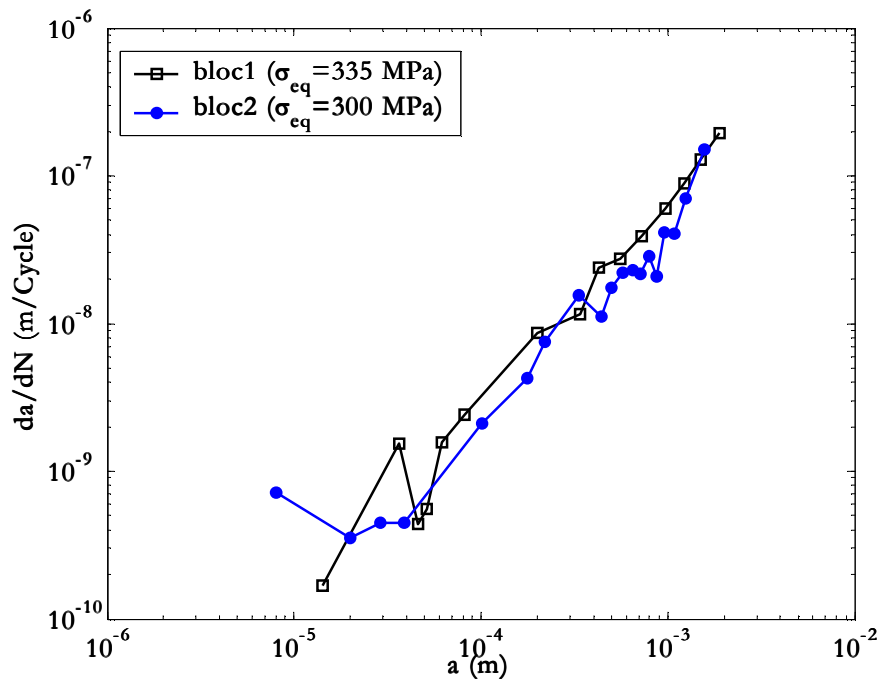


Figure IX-52 : Comparaison des chargements d'amplitude variable (*bloc1* et *bloc2*) [sp21 et sp22]

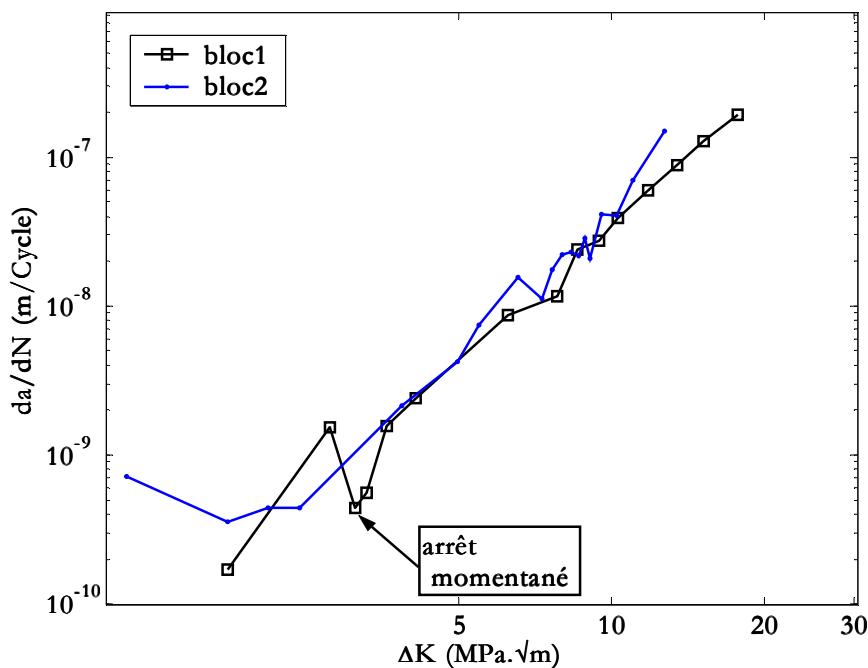


Figure IX-53 : Vitesse d'avancée de fissures courte sous deux chargements d'amplitude variable (*bloc1* et *bloc2*) fonction de ΔK [sp21 et sp22]

Dans la Figure IX-54, nous comparons les vitesses de propagation obtenues pour un essai sous chargement par paliers croissants à celles obtenues pour des surcharges répétées (*bloc1*). Ces deux courbes nous conduisent aux résultats trouvés sous chargements d'amplitude constante, car on note la présence d'une décélération et même d'un arrêt momentané de la fissure propageante pour ΔK de l'ordre de 3 MPa. \sqrt{m} . Les puits de vitesses sont détectés pour des longueurs de fissure variant entre 40 et 60 μm , ce qui indique une influence des joints de grains pour des faibles valeurs de ΔK . Les vitesses de fissuration sous chargement d'amplitude

croissante ou décroissante sont inférieures à celles mesurées pour le chargement sous surcharges répétées au même ΔK .

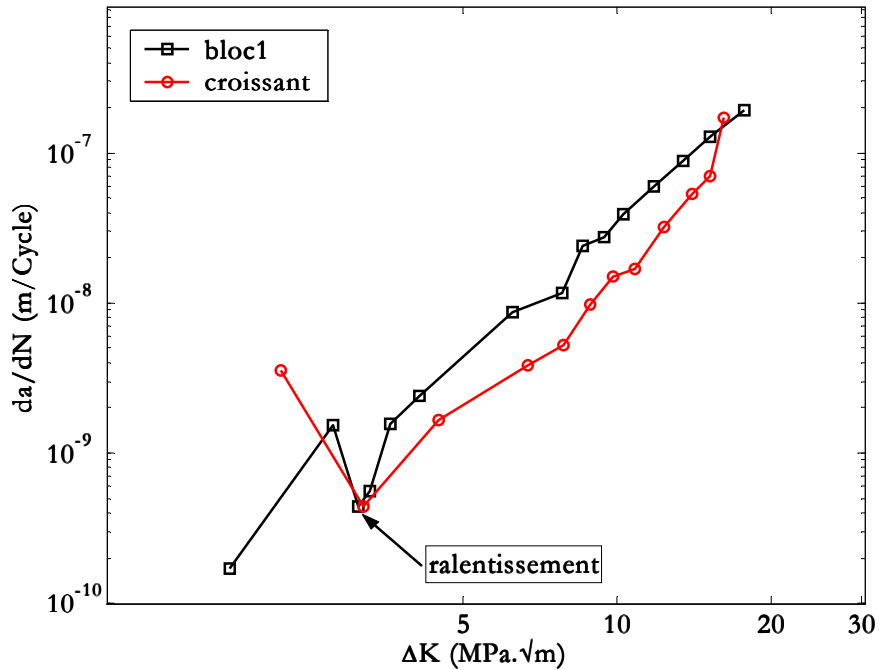


Figure IX-54 : Comparaison entre chargements par blocs et par paliers croissants [sp21 et sp23]

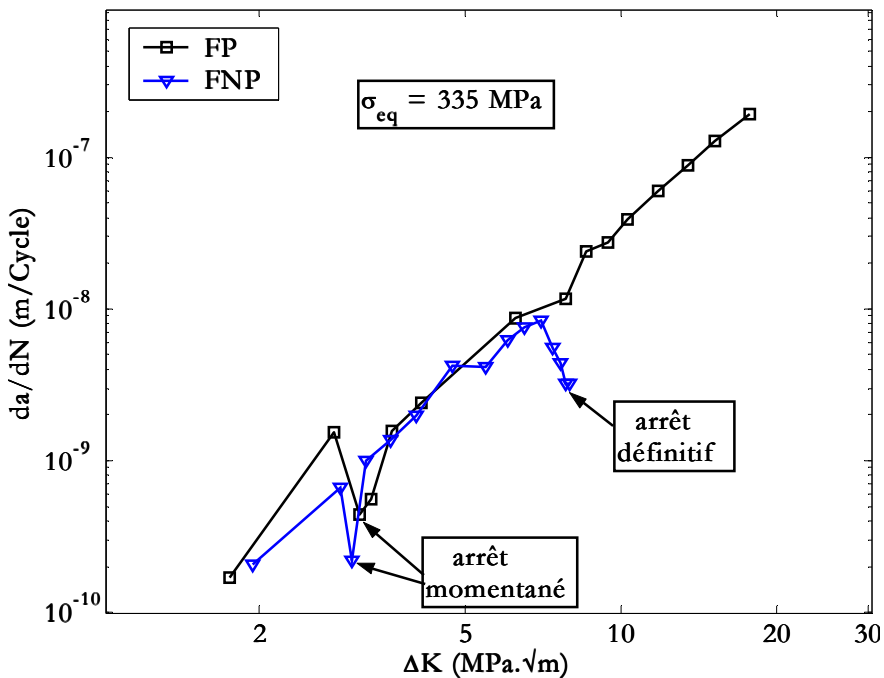


Figure IX-55 : Evolution de la fissure propageante et non propageante sous blocs de chargement (*bloc1*) [sp21]

Un autre résultat important, déjà observé lors des essais sous chargement d'amplitude constante, a été de nouveau observé : la fissure non propageante présente aussi un arrêt momentané avant de s'arrêter définitivement (Figure IX-55). Cette décélération est observée pour des longueurs de fissures comparables à la taille des grains.

En résumé, le processus d'apparition d'une fissure macroscopique dans une éprouvette se déroule comme suit :

- ❑ après un certain nombre de cycles, on observe une modification des caractéristiques mécaniques du matériau et l'apparition de microfissures en nombre croissant, indépendamment les unes des autres. Ces microfissures se propagent jusqu'à une dimension comparable à la taille d'un voire de quelques grains avec une vitesse accélérée et décélérée ;
- ❑ puis, il y a propagation d'une fissure ou coalescence de plusieurs fissures suivant le niveau de chargement :
 - sous un faible chargement :
 - une seule fissure domine la propagation jusqu'à rupture;
 - s'il y a présence d'une fissure de coin, c'est elle qui conduit à la rupture ;
 - sous un chargement élevé :
 - c'est la coalescence de plusieurs fissures qui crée la fissure principale, même lors de la présence d'une fissure de coin ;
- ❑ une fissure principale apparaît, sa vitesse de propagation croît sans ralentissement jusqu'à rupture.

Les fissures courtes superficielles se propagent rapidement et irrégulièrement, avec des variations importantes de leur vitesse. Ces variations sont souvent dues à l'interaction de la fissure avec les joints de grains ou aux déviations de la fissure dues aux changements de plans de propagation lors du franchissement des joints de grains. Les caractéristiques du comportement des fissures courtes résumées ci-dessus corroborent les observations faites par d'autres auteurs [Gra92, Ber96, Sri99, Boy99, Zha00].