

## CHAPITRE XII: DUREES DE VIE

Nous nous intéressons dans ce chapitre à l'étude de la durée de vie estimée à partir des lois de propagation des fissures courtes et longues. Plusieurs études ont montré que la prévision de la durée de vie à partir des seuls résultats portant sur les fissures longues seules conduisait à une surestimation de celle-ci. Par conséquent, le but principal de ce chapitre est d'étudier l'impact potentiel de l'effet des fissures courtes observées dans l'acier S355NL sur la durée de vie totale.

Nous commencerons ce chapitre par l'utilisation de la règle de Miner pour les chargements variables afin de calculer la durée de vie totale  $N_R$  de l'échantillon (amorçage et propagation). Puis, à partir d'une modélisation du comportement des fissures courtes et longues, nous calculerons cette fois la durée de propagation  $N_P$  d'une fissure entre la taille initiale  $a_0$  détectée par nos moyens de mesure et la rupture de l'éprouvette.

### XII-1 Règle de Miner

Ne disposant pas de la courbe de Wöhler de l'acier S355NL, nous avons souhaité représenter, dans la Figure XII-1, le nombre de cycles à rupture  $N_R$  en fonction de la contrainte maximale  $\sigma_{max}$  pour plusieurs essais réalisés sous amplitude de contrainte constante et pour un rapport de charge  $R = -1$ . L'interpolation des points de la courbe nous permet d'écrire une loi de type Basquin de la forme suivante :

$$\sigma_{max} = 2200(N_R)^{-0.15} \quad (XII-1)$$

Dans le cas d'un chargement d'amplitude variable, nous utiliserons uniquement cette loi dans le domaine où elle a été définie (entre 250 et 450 MPa) pour estimer le nombre de cycles à rupture  $N_R$  aux niveaux de contraintes rencontrés. Ensuite, nous calculerons l'endommagement partiel  $D_i$  défini par Miner par la relation :

$$D_i = \frac{n_i}{N_{Ri}} \quad (XII-2)$$

où  $n_i$  et  $N_{Ri}$  représentent respectivement le nombre de cycles appliqué et le nombre de cycles à rupture pour une contrainte  $\sigma_i$ . D'après la règle de Miner, lorsque la somme de ces endommagements élémentaires vaut 1, la rupture se produit.

Les résultats de calcul de l'endommagement total  $D$  sont donnés dans les Tableau VII-1 et Tableau XII-2. Dans ces tableaux, nous avons comparé le nombre de cycles à rupture mesuré expérimentalement et le nombre de cycles à rupture calculé à partir des relations XII-1 et XII-2. Nous pouvons alors constater que le nombre de cycles à rupture prévu pour les différents chargements est largement inférieur à celui mesuré expérimentalement : ce qui correspond à une valeur de l'endommagement totale  $D$  supérieure à l'unité. En revanche, dans le Tableau XII-2, la

rupture s'est produite avant que la valeur de l'endommagement  $D$  n'atteigne 1. Nous pouvons justifier cette remarque par le fait que les résultats présentés dans le Tableau XII-1 proviennent de fissures de surface alors que celles présentées dans le Tableau XII-2 proviennent de fissures de coin. En effet, comme nous l'avons vu auparavant les fissures de coin entraînent une durée de vie plus courte que celle liée aux fissures de surface sous le même chargement.

Les conclusions que nous pouvons tirer de cette étude sont que d'une part, la règle de Miner est conservatrice dans le cas de fissures de surface mais d'autre part, celle-ci surestime assez largement la durée de vie dans le cas de fissures de coin.

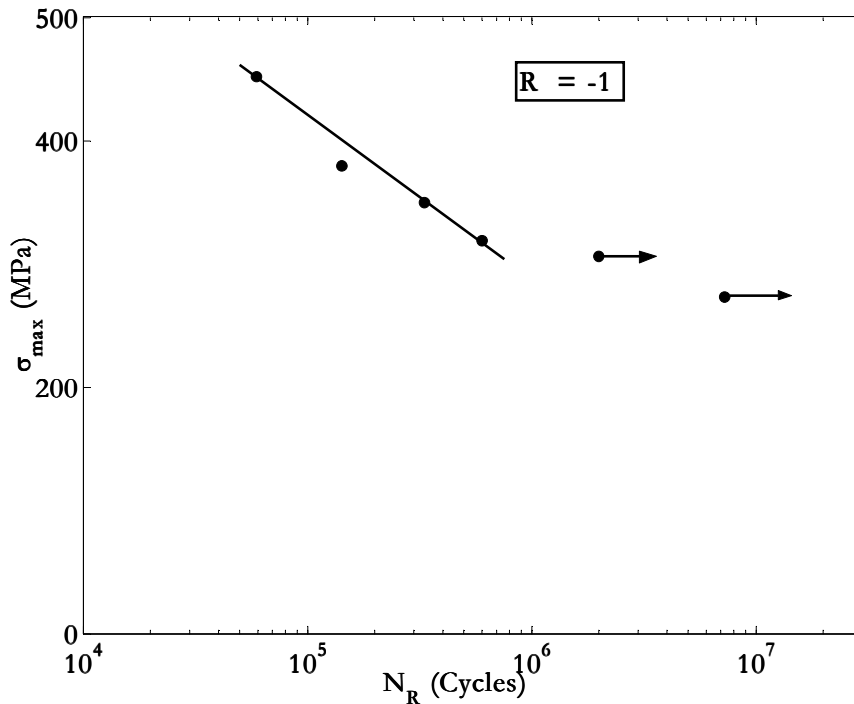


Figure XII-1 : Courbe  $\sigma_{\max} - N_R$  ( $R = -1$ )

Type de chargement	Nombre de cycle		Endommagement D
	expérimental	équation (XII-1)	
croissant	632 300	370 000	2,32
décroissant	288 670	190 000	1,23
bloc 1	282 500	210 000	1,43
bloc 2	612 900	508 000	1,23

Tableau XII-1 : Durées de vie totale expérimentale et calculée (fissure de surface)

Type de chargement	Nombre de cycle		Endommagement D
	expérimental	équation (XII-1)	
décroissant	66 700	130 000	0,45
bloc 1	200 000	265 000	0,78

Tableau XII-2 : Durées de vie totale expérimentale et calculée (fissure de coin)

Dans la suite, nous calculerons les durées de vie par intégration des lois de propagation obtenues à partir des essais expérimentaux réalisés sur éprouvettes destinées à l'étude des fissures courtes et longues pour différents rapports de charge.

## XII-2 Lois de propagation

### XII-2-1 Fissures longues

La Figure XII-2 illustre l'évolution de la vitesse de propagation  $da/dN$  des fissures longues en fonction de l'amplitude du facteur d'intensité de contrainte efficace  $\Delta K_{eff}$ . Nous avons choisi d'interpoler cette courbe par une loi puissance déjà employée par Klesnil et Lucas :

$$\frac{da}{dN} = C_1 \left[ (\Delta K)^{m_1} - (\Delta K_{seuil,eff})^{m_1} \right] \quad (\text{XII-3})$$

La partie linéaire de la courbe peut également être représentée par une loi puissance de type Paris :

$$\frac{da}{dN} = C (\Delta K_{eff})^m \quad (\text{XII-4})$$

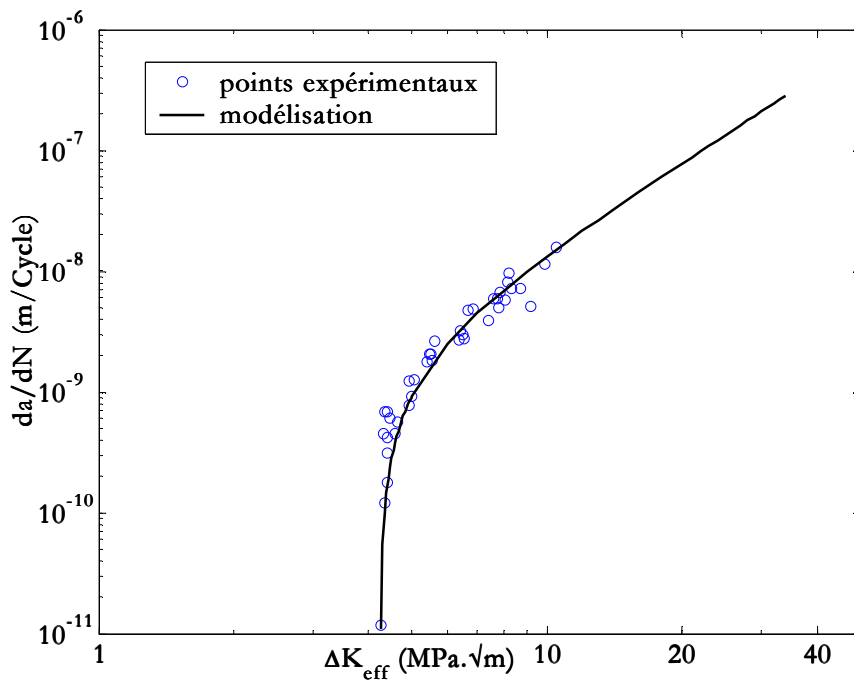


Figure XII-2 : Loi de propagation pour les fissures longues ( $FL_{eff}$ )

Les valeurs de  $C_1$ ,  $m_1$ ,  $\Delta K_{seuil,eff}$  et  $C$ ,  $m$  obtenues pour des vitesses de propagation exprimées en m/cycle sont données dans le Tableau XII-3 :

$C_1$	$m_1$	$\Delta K_{seuil,eff}$ (MPa.√m)	$C$	$m$
$6.10^{-11}$	2,40	4,25	$6.10^{-12}$	3,40

Tableau XII-3 : Constantes des lois de Klesnil/Lucas et Paris

## XII-2-1 Fissures courtes

L'ensemble des résultats d'essais, obtenu lors de l'étude du comportement des fissures courtes pour des chargements d'amplitude constante, a été rassemblé dans la Figure XII-3 où nous avons représenté la vitesse de propagation en fonction du facteur d'intensité de contrainte. Nous pouvons alors noter une bande de dispersion commune à tous ces essais. Nous avons donc choisi de considérer une enveloppe supérieure ( $FC_{sup}$ ) et une enveloppe inférieure ( $FC_{inf}$ ) pour caractériser l'ensemble de ces résultats. Les relations utilisées pour décrire ces enveloppes, inspirées des lois proposées précédemment sont de la forme :

$$\text{Enveloppe inférieure : } \frac{da}{dN} = C_{inf} \left[ (\Delta K)^{m_{inf}} - (\Delta K_p)^{m_{inf}} \right] \quad (\text{XII-5})$$

$$\text{Enveloppe supérieure : } \frac{da}{dN} = C_{sup} \left[ (\Delta K)^{m_{sup}} - (\Delta K_p)^{m_{sup}} \right] \quad (\text{XII-6})$$

où les valeurs des constantes  $C_{inf}$ ,  $m_{inf}$ ,  $C_{sup}$ ,  $m_{sup}$  et  $\Delta K_p$  sont rassemblées dans le Tableau XII-4 :

$C_{inf}$	$m_{inf}$	$C_{sup}$	$m_{sup}$	$\Delta K_p$ (MPa. $\sqrt{m}$ )
$2,90 \cdot 10^{-11}$	2,65	$4,75 \cdot 10^{-11}$	2,85	1,75

Tableau XII-4 : Constantes des lois  $FC_{sup}$  et  $FC_{inf}$

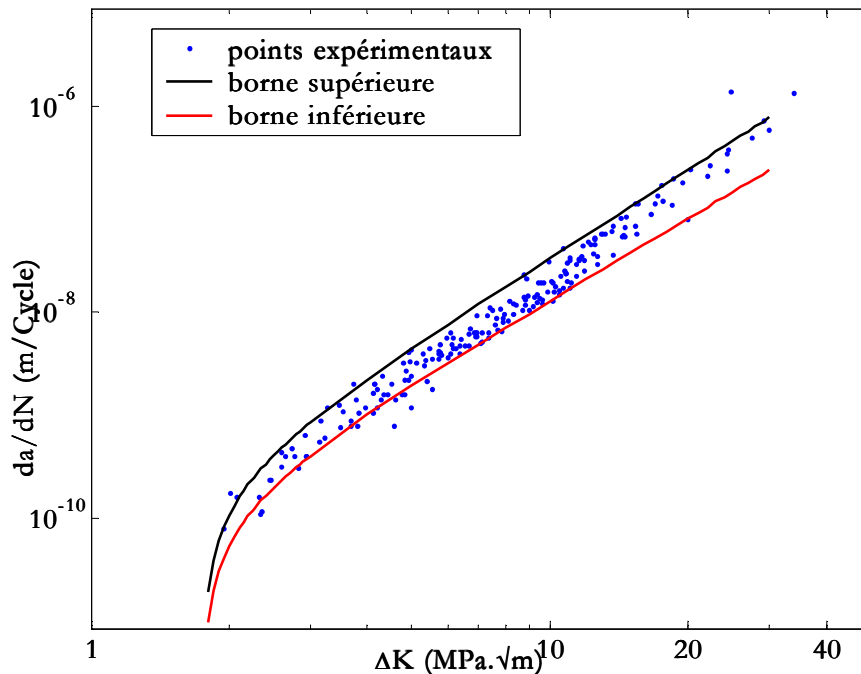


Figure XII-3 : Enveloppes supérieure ( $FC_{sup}$ ) et inférieure ( $FC_{inf}$ ) pour les fissures courtes

Dans la suite de l'étude, nous ne prendrons donc pas en compte les décélérations observées lors de l'étude du comportement des fissures courtes.

## XII-3 Chargement d'amplitude constante

### XII-3-1 Durée de vie

Les courbes de propagation ont montré une différence de comportement entre fissures courtes et longues pour des valeurs du facteur d'intensité de contrainte inférieures au seuil de propagation des fissures longues  $\Delta K_{seuil,eff}$  (chapitre X). En outre, cela laisse entendre que l'utilisation des résultats d'études menées sur les fissures longues peut conduire à des prévisions surestimées lorsqu'il s'agit de petits défauts et l'application à des structures peut alors devenir dangereuse.

Dans le Tableau XII-5, nous avons présenté le nombre de cycles expérimental ( $N_{exp}$ ) et celui calculé à partir d'une fissure de longueur détectable par les méthodes utilisées : répliques plastiques ou microscope à longue distance focale, pour différents rapports de charge ( $R = 0,1$ ,  $R = 0,3$  et  $R = -1$ ). Pour le calcul du nombre de cycles, nous avons utilisé les lois déterminées dans le paragraphe précédent. Pour montrer l'influence des fissures courtes, nous avons calculé les durées de propagation  $N_p$  d'une fissure de différentes façons en utilisant :

- la loi des fissures longues ( $FL_{eff}$ ) ;
- l'enveloppe supérieure ( $FC_{sup}$ ) des fissures courtes ;
- l'enveloppe inférieure ( $FC_{inf}$ ) des fissures courtes ;
- une combinaison des lois de fissures longues et de l'enveloppe supérieure des fissures courtes ( $FL_{eff}+FC_{sup}$ ) ;
- une combinaison des lois de fissures longues et de l'enveloppe inférieure des fissures courtes ( $FL_{eff}+FC_{inf}$ ).

La combinaison de ces deux lois, fissures courtes ( $FC_{inf}$  ou  $FC_{sup}$ ) et fissures longues, a été établie de la manière suivante : dans un premier temps la loi des fissures courtes est intégrée entre les valeurs  $a_0$  et  $a_i$  puis, la loi des fissures longues entre les valeurs  $a_i$  et  $a_f$  :

- $a_0$  désigne la longueur initiale de la fissure détectée ;
- $a_i$  représente la valeur pour laquelle la courbe de propagation des fissures courtes rejoint la courbe de propagation des fissures longues :
  - $a_i$  est de l'ordre de 300  $\mu m$  pour les rapports de charge positif ( $R > 0$ ) ;
  - $a_i$  est de de l'ordre de 500  $\mu m$  pour  $R = -1,0$ .
- $a_f$  est la longueur de la fissure à rupture de l'échantillon.

Les deux expressions suivantes présentent un exemple de la procédure employée lors de cette intégration :

$$\square N_p = \int_{a_0}^{a_f} \frac{da}{C_1 \left[ (\Delta K)^{m_1} - (\Delta K_{seuil,eff})^{m_1} \right]} \text{ pour le calcul de la durée de propagation d'une}$$

fissure, en utilisant la loi de propagation des fissures longues ( $FL_{eff}$ ).

$$\square N_p = \int_{a_0}^{a_i} \frac{da}{C_{inf} \left[ (\Delta K)^{m_{inf}} - (\Delta K_p)^{m_{inf}} \right]} + \int_{a_i}^{a_f} \frac{da}{C_1 \left[ (\Delta K)^{m_1} - (\Delta K_{seuil,eff})^{m_1} \right]} \text{ pour le calcul de la}$$

durée de propagation d'une fissure, en utilisant la loi de propagation des fissures longues et celle de l'enveloppe inférieure des fissures courtes ( $FL_{eff}+FC_{inf}$ ).

Dans cette étude, l'évolution de la répartition des contraintes dans l'éprouvette a été prise en compte dans le calcul du facteur d'intensité de contraintes pour chaque cas de chargement : élastique et élastoplastique (polynômes du chapitre VI) et les expressions de Newman et Raju ont été employées pour déterminer  $\Delta K$ .

Afin de vérifier la pertinence de ces différents outils, nous avons tout d'abord voulu estimer les durées de vie dans le cas de chargements d'amplitude constante.

Les résultats de calculs des différentes prévisions (Tableau XII-5) montrent que l'utilisation des lois  $FL_{eff}$ ,  $FC_{inf}$  et  $FL_{eff}+FC_{inf}$  entraîne une surestimation de la durée de propagation des fissures. Par contre, les prévisions réalisées à partir de la loi supérieure des fissures courtes ( $FC_{sup}$ ) sous-estime légèrement la durée de propagation. Nous constatons que les meilleures estimations sont obtenues pour une combinaison des lois de propagation des fissures longues et de l'enveloppe supérieure des fissures courtes ( $FL_{eff}+FC_{sup}$ ).

R	Mesure	Intégration				
	Exp.	$FL_{eff}$	$FC_{inf}$	$FC_{sup}$	$FL_{eff} + FC_{sup}$	$FL_{eff} + FC_{inf}$
-1,0	<b>299 000</b>	632 000	545 000	<b>246 000</b>	<b>304 000</b>	528 000
-1,0	<b>154 000</b>	306 000	265 000	<b>110 000</b>	<b>152 000</b>	247 000
0,1	<b>129 000</b>	253 000	200 000	<b>87 000</b>	<b>94 500</b>	201 000
0,1	<b>87 000</b>	205 000	165 000	<b>71 000</b>	<b>76 500</b>	166 000
0,1	<b>50 000</b>	70 000	77 000	<b>30 000</b>	<b>40 000</b>	77 400
0,3	<b>270 000</b>	525 000	415 000	<b>188 000</b>	<b>209 000</b>	400 000
0,3	<b>115 000</b>	227 000	198 000	<b>82 000</b>	<b>102 000</b>	182 000
0,5	<b>395 000</b>	807 000	595 000	<b>265 000</b>	<b>352 000</b>	600 000

Tableau XII-5 : Durées de vie calculées et mesurées expérimentalement (chargement d'amplitude constante)

### XII-3-2 Longueur de fissures

Nous avons pu constater que les meilleures estimations furent établies en utilisant les lois ( $FC_{sup}$ ) et ( $FL_{eff}+FC_{sup}$ ), nous avons donc voulu comparer l'évolution de la longueur de fissure tout au long de sa propagation. La Figure XII-4 illustre une comparaison des résultats de l'avancée d'une fissure en fonction du nombre de cycles mesuré expérimentalement d'une part et du nombre de cycles calculé en utilisant les lois ( $FC_{sup}$ ) et ( $FL_{eff}+FC_{sup}$ ) d'autre part.

Cette figure montre une différence d'évolution de la fissure entre les résultats expérimentaux et les estimations en intégrant la loi de fissures courtes ( $FC_{sup}$ ). Ce décalage diminue lorsque nous prenons en compte la loi de propagation des fissures longues. Nous pouvons par ailleurs noter une très bonne correspondance des longueurs de fissures en fin d'essai.

Les mêmes observations peuvent être effectuées à partir des courbes présentant la longueur de fissure en fonction du nombre de cycles de propagation pour les rapports de charge  $R = 0,1$  et  $R = 0,3$  (Figure XII-5 et Figure XII-6). Nous signalons que ces différences vont systématiquement dans le « bon » sens puisque les résultats établis sont conservatifs.

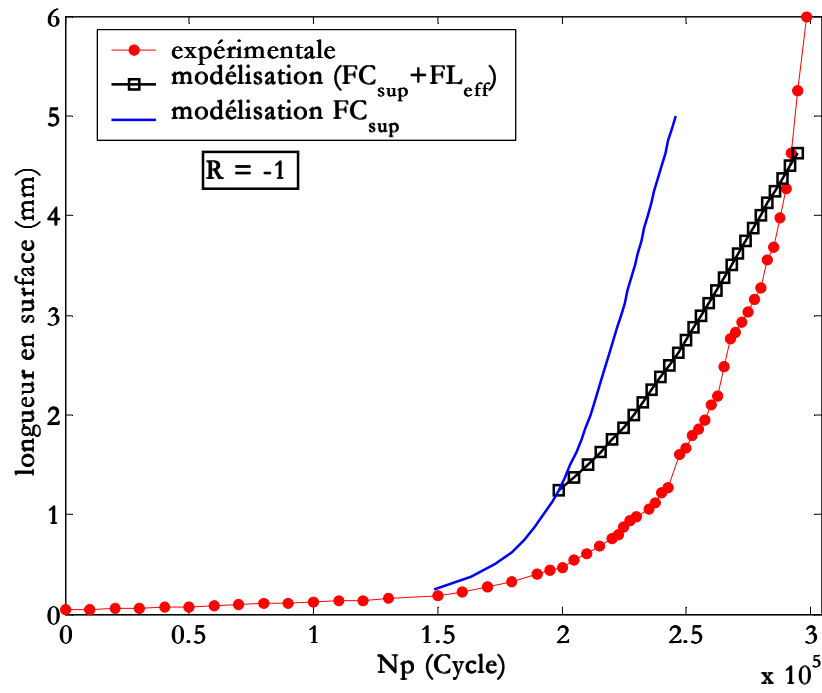


Figure XII-4 : Evolution de la longueur de fissure calculée et mesurée en fonction de la durée de propagation ( $R = -1$ )

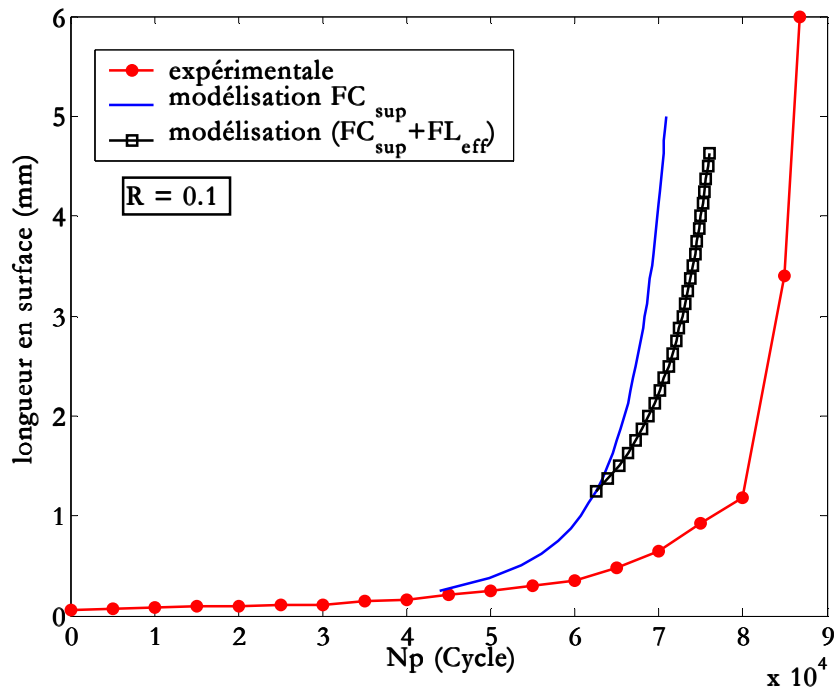


Figure XII-5 : Evolution de la longueur de fissure calculée et mesurée en fonction de la durée de propagation ( $R = 0,1$ )

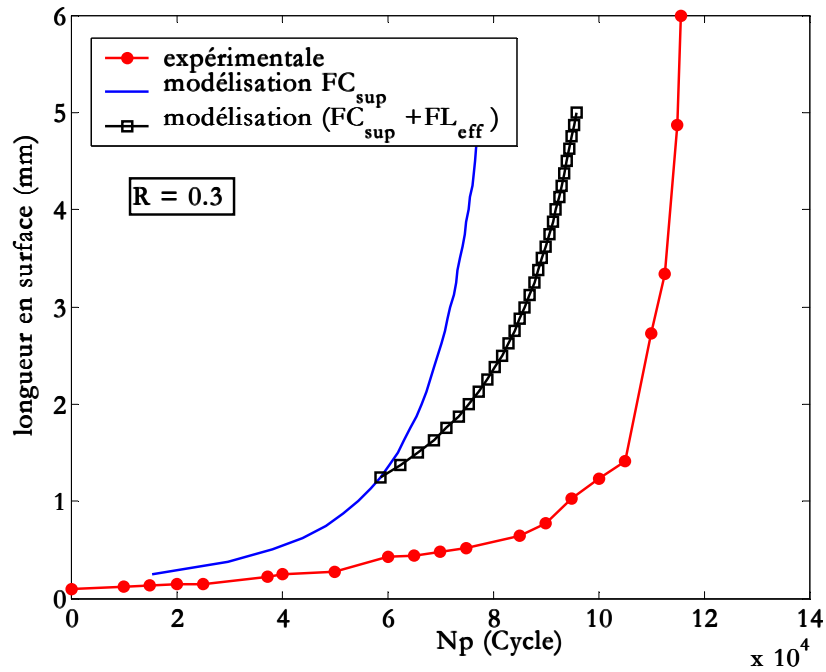


Figure XII-6 : Evolution de la longueur de fissure calculée et mesurée en fonction de la durée de propagation ( $R = 0,3$ )

Dans la Figure XII-7, nous avons tracé la contrainte appliquée en fonction du nombre de cycles calculé avec les lois  $FL_{eff}$ ,  $FC_{sup}$  et  $FL_{eff}+FC_{sup}$  nécessaire pour propager une fissure de  $20 \mu m$ . Cette figure montre que la durée de propagation expérimentale est inférieure à celle prévue en utilisant la loi  $FL_{eff}$ , par contre les lois  $FC_{sup}$  et  $FL_{eff}+FC_{sup}$  donnent des durées de propagation inférieures à celle obtenue expérimentalement. Ce résultat montre que les prédictions effectuées à partir des fissures longues surestiment les durées de propagation tandis qu'une prise en compte des fissures courtes est indispensable pour avoir une durée de propagation plus proche de la réalité.

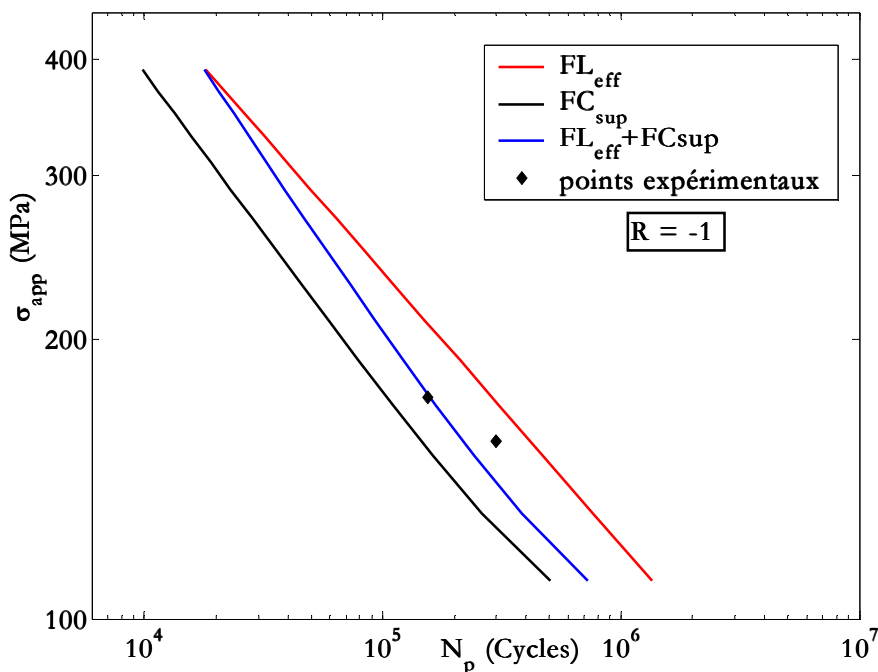


Figure XII-7 : Courbe  $\sigma_{appl} - N_R$  ( $R = -1$ )



## XII-4 Chargement d'amplitude variable

### XII-4-1 Durée de vie

Dans le cas de chargements variables, la même démarche que celle employée dans le cas du chargement d'amplitude constante a été appliquée pour les différentes amplitudes de chargement à savoir l'intégration des lois de propagation. Afin de prendre en compte la nature variable du chargement, nous avons décidé d'appliquer la règle de Miner aux longueurs de fissures. Nous considérerons que la progression totale de la fissure  $\Delta a$  pour un chargement d'amplitude variable est égal à la somme des accroissements de fissures  $\Delta a_i$  pour toute amplitude de chargement  $\sigma_i$ . Nous pouvons alors calculer la vitesse de propagation du chargement variable en déterminant une vitesse moyenne pour les différentes amplitudes de la forme suivante (XII-7) :

$$\frac{da}{dN} = \frac{\sum_i n_i \left( \frac{da}{dN} \right)_i}{\sum_i n_i} \quad (\text{XII-7})$$

où  $n_i$  et  $\left( \frac{da}{dN} \right)_i$  représentent respectivement le nombre de cycles appliqué et la vitesse de propagation sous un chargement d'amplitude constante  $\sigma_i$ . Les résultats de calculs (Tableau XII-6), montrent que :

- ❑ Utilisation de la loi des fissures longues seule,  $FC_{\text{inf}}$  et  $FL_{\text{eff}}+FC_{\text{inf}}$  surestime la durée de propagation ;
- ❑ L'utilisation de la loi des fissures courtes ( $FC_{\text{sup}}$ ), donne une bonne estimation, en particulier pour les essais bloc1 et bloc2 ;
- ❑ L'utilisation de la combinaison ( $FL_{\text{eff}}+FC_{\text{sup}}$ ) donne une bonne prédiction de la durée de propagation pour les chargements croissants et décroissants par contre, elle surestime la durée de propagation pour les chargements par blocs.

Nous n'expliquons pas complètement cet effet que dans le cas du chargement par blocs (*bloc1* et *bloc2*). L'intégration des lois combinées ( $FL_{\text{eff}}+FC_{\text{sup}}$ ) surestime la durée de propagation puisque les courbes de propagation des fissures courtes ne rejoignent pas celles des fissures longues (Figure VI-8) pour des longueurs de fissures de l'ordre de  $a_i = 500 \mu\text{m}$  mais pour des valeurs supérieures que nous n'avons malheureusement pas pu déterminer.

Chargement	Mesure	Intégration				
	Exp.	$FL_{\text{eff}}$	$FC_{\text{inf}}$	$FC_{\text{sup}}$	$FL_{\text{eff}}+FC_{\text{sup}}$	$FL_{\text{eff}}+FC_{\text{inf}}$
croissant	<b>92 000</b>	161 000	161 000	<b>65 000</b>	<b>89 000</b>	143 000
décroissant	<b>229 000</b>	516 000	384 000	<b>168 000</b>	<b>220 000</b>	374 000
bloc1	<b>113 000</b>	288 000	254 000	<b>106 000</b>	<b>138 000</b>	234 000
bloc2	<b>185 000</b>	475 000	102 000	<b>171 000</b>	<b>227 000</b>	380 000

Tableau XII-6 : Durées de vie calculées et mesurées expérimentalement (chargement d'amplitude variable)

## XII-4-2 Longueur de fissures

Dans le cas de chargements variables, nous avons également calculé l'évolution de la longueur de fissure en fonction du nombre de cycles de propagation calculé en intégrant les lois ( $FC_{sup}$ ) et ( $FL_{eff}+FC_{sup}$ ). Les résultats de ces calculs sont représentés dans les Figure XII-8 et Figure XII-9. Nous avons également reporté sur ces figures les résultats mesurés expérimentalement.

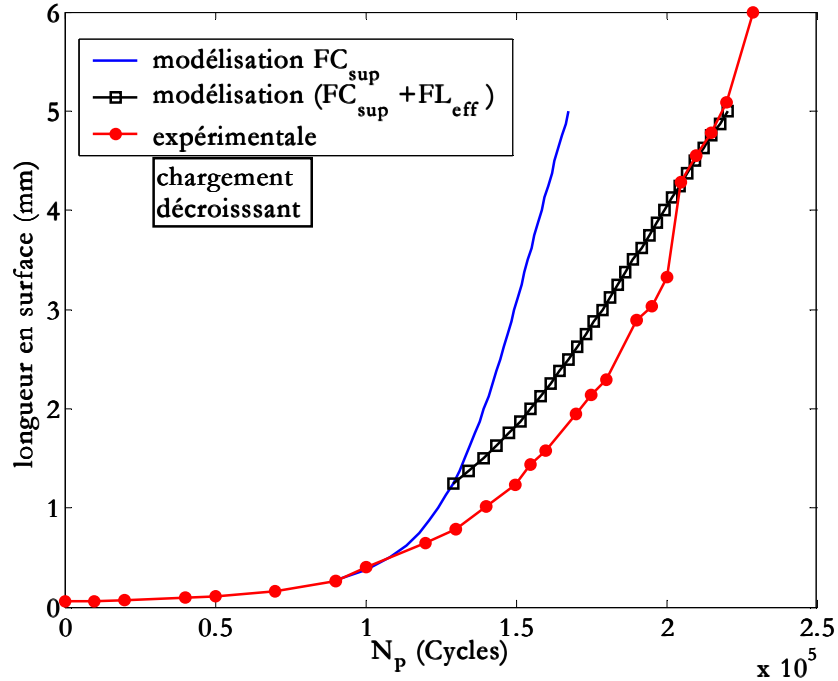


Figure XII-8 : Evolution de la longueur de fissure calculée et mesurée en fonction de la durée de propagation (chargement décroissant)

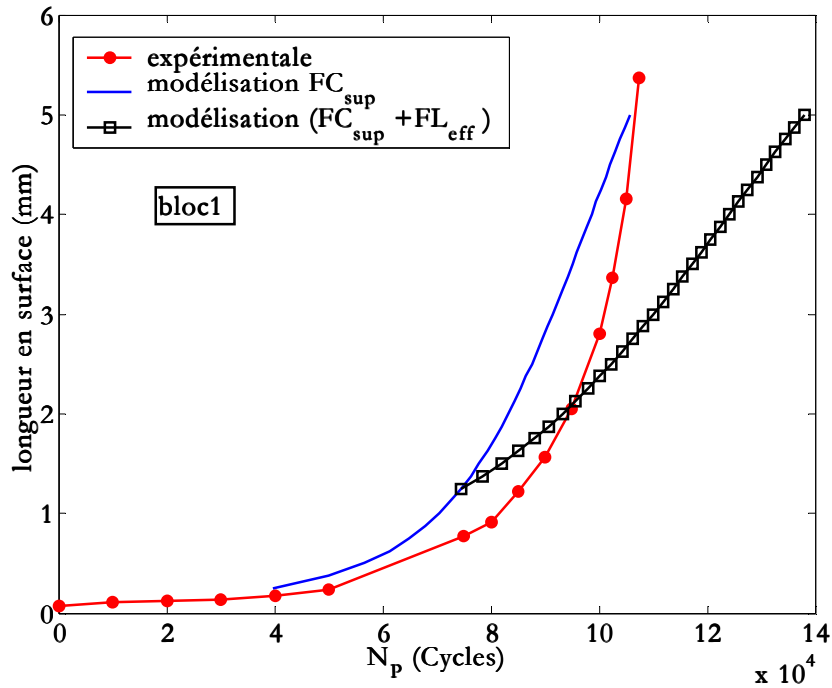


Figure XII-9 : Evolution de la longueur de fissure calculée et mesurée en fonction de la durée de propagation (*bloc1*)

Ces résultats montrent une bonne corrélation entre le nombre de cycles mesuré expérimentalement et les calculs en utilisant les lois ( $FL_{\text{eff}}+FC_{\text{sup}}$ ) dans le cas d'un chargement croissant. Par contre, il surestime le nombre de cycles pour des fissures de longueur supérieure à 2 mm dans le cas d'un chargement avec surcharges répétées.

En résumé, dans le cas de chargements d'amplitude constante, croissant et décroissant, la durée de propagation d'une fissure pourra être estimée en utilisant l'intégration de la loi  $FC_{\text{sup}}$  ou  $FL_{\text{eff}}+FC_{\text{sup}}$ . En revanche, pour un chargement avec surcharges répétées, la durée de propagation sera calculée par intégration de la loi  $FC_{\text{sup}}$ .

# CONCLUSIONS

Le but de cette étude fut de caractériser le comportement des fissures courtes de fatigue dans l'acier S355NL largement utilisé dans le domaine de la construction navale et notamment employé dans les bâtiments de surface. Dans ce travail, nous avons essayé d'apporter des éléments de réponses aux différences de comportement observées entre les fissures courtes et longues de fatigue.

Les travaux présentés dans ce mémoire ont été consacrés à l'étude de l'influence de différents chargements sur l'amorçage et la propagation des fissures courtes amorcées naturellement en surface avec comme objectif la comparaison du comportement des fissures courtes avec celui des fissures longues dans l'acier S355NL en prenant notamment en compte les effets de fermeture.

Notre premier travail a donc consisté à faire effectuer une étude générale des propriétés mécaniques et microstructurales de cet acier. Pour étudier l'amorçage et la propagation de fissures de fatigue deux types d'éprouvette ont été utilisés : des éprouvettes munies d'un congé destinées à l'étude de l'amorçage et des premiers stades de la fissuration et des éprouvettes à entaille latérale (type SENT), plus classiques, destinées à la réalisation d'essais de propagation de fissures longues avec détermination du seuil de propagation.

Avant d'entreprendre ces campagnes expérimentales, nous avons modélisé ces échantillons et mené un certain nombre de calculs par éléments finis, à l'aide du code Abaqus, en prenant en compte les comportements élastique et élastoplastique du matériau. Dans un premier temps, ces calculs, réalisés pour une éprouvette munie d'un congé, nous ont permis de connaître la répartition des contraintes dans l'épaisseur de l'échantillon. Puis, dans le but de représenter les résultats expérimentaux dans un diagramme  $da/dN - \Delta K$ , nous avons effectué des calculs d'intégrale de contour. Ces calculs ont été réalisés par la méthode du zoom structural. Les résultats obtenus ont alors été comparés à ceux issus des normes ASTM dans le cas de fissures longues et des relations proposées par Newman et Raju dans le cas de fissures courtes dans le cas d'un chargement uniforme : des différences maximales de l'ordre de 10% ont été relevées. L'ensemble de ces calculs a été effectué dans le cas de chargements élastiques et élastoplastiques et pour des fissures de surface de formes circulaires et elliptiques de différentes tailles.

Tout au long de ce travail, deux configurations d'essais ont été considérées :

- des essais sur éprouvettes normalisées SENT, l'objectif de ces essais était de déterminer le comportement de « référence » des fissures longues en termes de facteur d'intensité de contrainte efficace.

A l'aide de ces essais, nous avons pu vérifier l'influence du rapport de charge  $R$  (0,1, 0,3 et 0,5). En effet, l'augmentation du rapport de charge conduit à des vitesses de propagation plus élevées pour les fissures longues et par conséquent à une diminution du seuil de propagation  $\Delta K_{seuil}$ . La prise en compte de l'effet de fermeture nous a permis de mettre en évidence une unique courbe pour les fissures longues considérée par la suite comme « courbe de référence » et par conséquent un seuil de propagation indépendant du rapport de charge  $\Delta K_{eff,seuil}$ .

- des essais sur éprouvettes munies d'un congé central, ces essais ont permis d'étudier le comportement des fissures courtes et de s'intéresser aux premiers stades de la propagation.

Contrairement aux fissures longues, le rapport de charge  $R$  (0,1, 0,3, 0,5 et -1) présente peu d'influence sur le comportement des fissures courtes ce qui peut s'expliquer par l'absence de phénomène de fermeture pour ce type de fissure.

Ce travail a permis de mettre en évidence un comportement tout à fait spécifique des fissures courtes. Ces fissures se propagent pour des valeurs de  $\Delta K$  inférieures à la valeur seuil  $\Delta K_{eff,seuil}$  et les vitesses de fissuration observées pour les fissures courtes sont supérieures à celles obtenues pour les fissures longues (à  $\Delta K$  fixée).

L'utilisation du facteur d'intensité de contrainte efficace  $\Delta K_{eff}$  pour décrire la vitesse de propagation en fatigue, permet de réduire les différences de comportement entre fissures longues et fissures courtes. Nous pouvons conclure que l'application du critère de fermeture pour les données des fissures longues réduit l'écart entre les fissures courtes et longues. Malgré cela, les fissures courtes se propagent pour des valeurs de  $\Delta K$  inférieures au seuil de propagation des fissures longues  $\Delta K_{seuil,eff}$ . Nous avons également pu mettre en évidence l'existence d'accélération ou de décélération dans les courbes de propagation de fissures courtes avant de rejoindre finalement le comportement de référence obtenu pour les fissures longues. Ces résultats ont été observés pour tous les rapports de charge appliqués (amplitude constante) ainsi que pour les chargements croissants et décroissants ; par contre, lors de l'application des chargements par blocs (bloc1 et bloc2) nous n'avons pas pu vérifier la réunion de ces deux comportements.

Lors des essais visant à étudier le comportement des fissures courtes, la présence de plusieurs fissures dans le congé a été détectée et le suivi de leur propagation a pu être effectué. Toutefois, au final une seule de ces fissures conduit à la rupture de l'éprouvette. Dans ce cas de fissuration multiple, la présence d'une fissure de coin entraîna systématiquement une rupture de l'échantillon à partir de celle-ci. Cependant, si les fissures sont assez proches, c'est leur coalescence qui conduira à la rupture plutôt que la propagation d'une seule fissure même en cas de présence d'une fissure de coin.

Cette étude nous a permis de dégager quelques explications du ralentissement et même de l'arrêt des fissures, parmi lesquelles :

- influence de la microstructure ;
- influence de la zone plastique de l'entaille ;
- phénomène d'interaction entre fissure ou effets de décharge ;
- trajet tortueux de la fissure ;
- bifurcation à la pointe de la fissure ;
- propagation en mode mixte ;
- caractère tridimensionnel du front de la fissure ;
- présence de fissure de coin.

Dans cette étude, nous avons observé que l'amorçage des fissures de fatigue s'effectuait généralement en surface sur des sites préférentiels tels que les inclusions. Ce type d'amorçage s'effectue d'après trois mécanismes : contournement de l'inclusion, cisaillement de l'inclusion ou bien fissuration de part et d'autre de celle-ci. D'autres types d'amorçage ont été observés :