

MCours.com

PARTIE B :
TECHNIQUES
EXPERIMENTALES

Le but de cette partie du mémoire est de présenter les méthodes expérimentales employées pour caractériser la propagation des fissures de fatigue courtes et longues dans l'acier S355NL utilisé dans la construction navale. Les résultats issus de ces techniques permettront de prédire la tolérance au dommage de l'acier S355NL et de comparer le comportement des fissures courtes et longues en tenant compte des conditions de sollicitation (plusieurs rapports de charge R, blocs et spectres de chargement issus d'enregistrements sur des bâtiments de surface) et des effets de fermeture.

L'étude de la propagation de fissures longues, et plus particulièrement la détermination du seuil de non fissuration par la procédure de seuil normalisée, a été réalisée sur des éprouvettes en forme de plaque avec entaille latérale usinée par électroérosion. Pour les essais portant sur l'étude des fissures courtes, des éprouvettes parallélépipédiques avec un congé circulaire ont été utilisées. La détection et le suivi des microfissures ont été réalisés avec deux méthodes : réplique plastique et microscope optique à longue distance focale. Les mesures de fermeture ont été effectuées à l'aide d'un extensomètre et de jauges de déformation.

Avant de présenter les résultats de propagation des fissures de fatigue en fonction des différents chargements utilisés, nous commencerons par une étude générale des propriétés mécaniques et microstructurales de l'acier en question, suivie d'une description des éprouvettes et du dispositif expérimental ayant permis de réaliser ces essais. Enfin, le déroulement des essais suivant différents chargements sera présenté.

CHAPITRE IV:

CARACTERISATION DU MATERIAU

IV-1 Matériau et composition chimique

Nous avons débuté cette étude par une analyse microstructurale du matériau puis, nous avons étudié les caractéristiques mécaniques statiques de l'acier *S355NL*. Le matériau sur lequel porte ce travail nous a été fourni par DCN Lorient sous la forme d'une tôle grenillée peinte d'épaisseur 12 mm. Il s'agit d'un acier normalisé à grains fins laminé à chaud et destiné à la construction soudable. Sa limite d'élasticité minimale est de 355 MPa.

Le *grenillage* consiste à projeter un abrasif, plus couramment de type métallique, dont la forme, la dureté et la vitesse de projection vont être adaptées au travail à effectuer et au résultat à obtenir. L'abrasif est souvent métallique, mais peut aussi être d'autre nature telle que la silice, le corindon, des billes de verre, un média plastique, la glace carbonique, ... Dans ce cas, le procédé est communément appelé *sablage*. Cette opération entraîne l'apparition de contraintes résiduelles de compression qui tendent à diminuer la contrainte moyenne liée à la sollicitation de fatigue. Le grenillage a donc un effet très bénéfique sur la résistance à la fatigue.

Compte tenu de l'interaction forte qui existe entre la propagation des fissures courtes et la microstructure du matériau, nous avons tout d'abord réalisé une étude microstructurale de celui-ci. Cet acier à bas carbone possède la composition nominale suivante (Tableau IV-1) :

Composition	C	Mn	P	S	Si	Al	Cr	Cu	Ni
Pourcentage massique (%)	0,11	1,46	0,016	0,01	0,44	0,041	0,02	0,01	0,01

Tableau IV-1 : Composition chimique de l'acier S355NL [DCN].

Il s'agit d'un acier au manganèse à structure ferrito-perlitique.

IV-2 Microstructure et précipités

Afin de réaliser l'étude microstructurale de ce matériau par examen micrographique, nous avons effectué plusieurs prélèvements suivant les directions transverse et longitudinale avec repérage du sens de l'échantillon et marquage. Les prélèvements ont été effectués avec soin et sans échauffement. Puis, chaque échantillon découpé est poli à l'aide de papiers abrasifs humides de plus en plus fins (grade 180-800) suivi d'un polissage à la pâte diamantée de 9, 3 et 1 μm . L'analyse micrographique de l'acier *S355NL*, réalisée à l'aide d'un microscope optique (MO), a été effectuée après attaque chimique au moyen de réactif Nital (95% alcool + 2 à 5% acide nitrique). Comme premier résultat, nous avons comparé les images suivant les différentes orientations pour plusieurs grossissements (x100, x500, x800 et x1000), nous n'avons alors trouvé aucune différence notable dans l'orientation et la forme des grains entre les divers prélèvements (Figure IV-1). Puis, en appliquant les recommandations de la norme AFNOR [NF

A04-102] et en comparant une image réalisée à grossissement $G = 100$ à une série d'images types, nous avons pu déterminer l'indice de grain, celui-ci est de VIII : ce qui correspond à une taille moyenne de grain de l'ordre de $15 \mu\text{m}$. Les plus gros grains ont cependant une taille d'environ $60 \mu\text{m}$.

Des observations ont également été réalisées à l'aide d'un microscope électronique à balayage (MEB) afin de visualiser les joints de grains et d'effectuer un examen complet des différents composants constitutifs du matériau, notamment des inclusions. Les analyses au MEB montrent la présence de rares inclusions d'une taille comprise entre 2 et $5 \mu\text{m}$. Ces examens permettent de suggérer que ces inclusions soient du type : MnS et FeMnO (Figure IV-2). La Figure IV-3 présente un exemple des résultats de l'analyse des spectres en pourcentage massique des deux inclusions de la Figure IV-2.

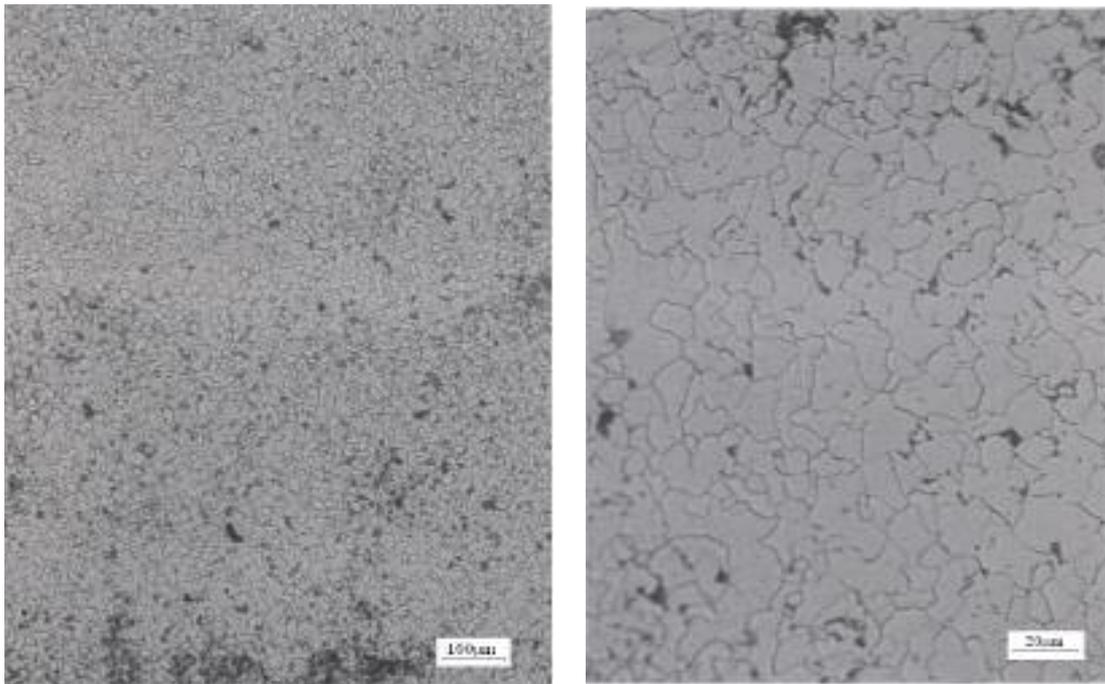


Figure IV-1 : Microstructure de l'acier S355NL observée au microscope optique avec deux grossissements ($G = 100$ et 500)

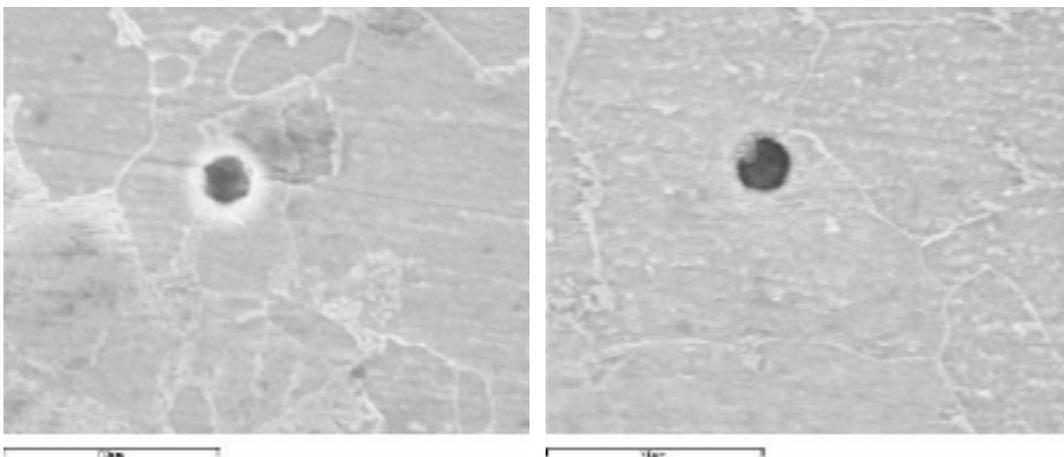
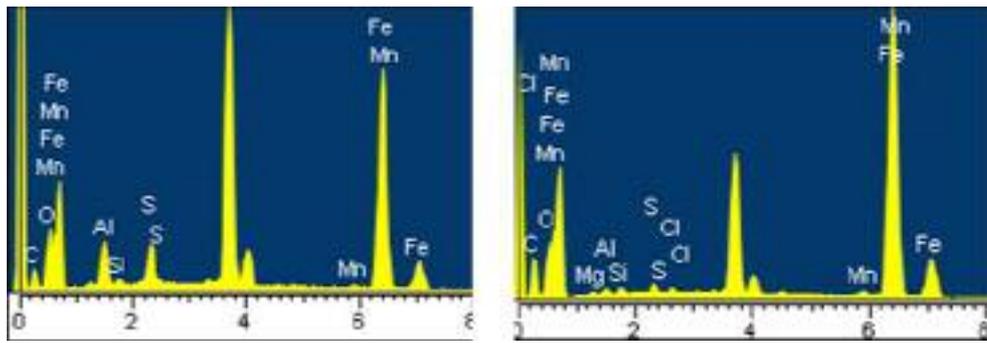


Figure IV-2 : Observations d'inclusions au microscope électronique à balayage (MEB).



Spectre	C	O	Mg	Al	Si	S	Cl	Mn	Fe	Total
Spectre 1	12.41	7.08	0.49	0.71	0.75	1.29	0.53	5.91	70.82	100
Spectre 2	8.39	8.76	-	5.39	0.67	6.94	-	5.15	64.69	100

Figure IV-3 : Composition chimique des inclusions (analyse au MEB).

IV-3 Caractéristiques mécaniques

Les principales caractéristiques mécaniques de l'acier *S355NL* ont été déterminées par des essais de traction réalisés à l'aide d'une machine de traction uniaxiale de type UTS200 (capacité 200 kN) commandée par un PC. Le pilotage s'effectue à vitesse de déplacement imposée et constante.

IV-3-1 Eprouvettes de traction

La tôle en acier *S355NL*, grenillée et peinte, fournie par DCN Lorient a tout d'abord été mise sous la forme de tôles de 400 x 400 mm². Des éprouvettes de traction ont alors été systématiquement prélevées à mi-épaisseur de cette tôle dans le sens du laminage. Après usinage, elles ont de plus été rectifiées afin de disposer d'un bon état de surface. De forme géométrique indiquée sur la Figure V-4, elles ont une longueur utile de 50 mm, une largeur de 10 mm et une épaisseur de 5 mm. Quatre essais de traction uniaxiale ont été réalisés afin de s'assurer d'une bonne reproductibilité des résultats (Annexe 2).

Le système d'acquisition des données utilise une carte IEEE qui permet l'enregistrement de l'allongement de l'extensomètre, du signal de force produit par la cellule de charge et du déplacement de la traverse. Il permet ainsi de suivre en temps réel l'évolution de l'essai. Les données saisies par l'utilisateur avant l'essai sont la forme et les dimensions de l'éprouvette, les paramètres d'acquisition et la précharge quand il y a lieu. Les mesures sont effectuées à l'aide d'un extensomètre à lames fixé à l'éprouvette par des couteaux. L'écartement de ces couteaux est choisi égal à la longueur utile des éprouvettes (50 mm) et un soin particulier a été apporté durant la préparation de l'essai afin d'éviter la création de sites de concentration de contraintes sur la longueur utile de l'éprouvette. L'essai est validé lorsque la rupture se produit en milieu d'échantillon.

IV-3-2 Courbe de traction conventionnelle

La courbe de traction est dite *conventionnelle* lorsque l'on rapporte respectivement les mesures de force et d'allongement aux valeurs initiales de l'aire de la section S_0 et de la longueur L_0 de l'éprouvette. Ainsi, la courbe de traction conventionnelle représente l'évolution de la contrainte :

$$R = \frac{F}{S_0}$$

en fonction du taux d'allongement :

$$e = \frac{\Delta L}{L_0}$$

Les caractéristiques mécaniques ont été déterminées à partir de ce type de courbe (Figure IV-5). Les valeurs moyennes des quatre essais, ainsi que les variations observées, sont données dans le Tableau IV-2 :

ν	E (MPa)	$R_{p0.2}$ (MPa)	R_m (MPa)	A_m (%)	A_r (%)
0,30	207 000	400±5	565±10	15±5	25%±2

Tableau IV-2 : Valeurs des caractéristiques mécaniques moyennes de l'acier S355NL.

Limite d'élasticité : $R_e = F_e / S_0$

Limite d'élasticité conventionnelle : $R_{p0.2} = F_{p0.2} / S_0$

Résistance à la rupture : $R_m = F_{max} / S_0$

Allongement homogène : $A_m = \Delta L_h / L_0$

Allongement à rupture : $A_r = \Delta L_r / L_0$

avec S_0 : l'aire de la section initiale, L_0 : la longueur utile de l'éprouvette, F : la charge appliquée et ΔL : la variation de la longueur.

Ces valeurs restent proches de celles trouvées dans la littérature [Pic84, Qui02].

IV-3-3 Courbe de traction rationnelle

La courbe *rationnelle* est une représentation de la courbe de traction avec en ordonnée la contrainte vraie, et en abscisse la déformation vraie. La contrainte vraie σ tient compte de la variation de section au cours de l'essai et est égale à la charge rapportée à l'aire de la section instantanée :

$$\sigma = \frac{F}{S}$$

En admettant que le volume de la partie calibrée de l'éprouvette reste constant au cours de la déformation (incompressibilité plastique du matériau), nous avons :

$$S_0 L_0 = S L = S (L_0 + \Delta L)$$

$$S = \frac{S_0}{1 + \Delta L / L_0} = \frac{S_0}{1 + e}$$

d'où finalement :

$$\sigma = \frac{F}{S_0} (1 + e)$$

L'allongement relatif instantané est égal à $\frac{\Delta L}{L}$ et la déformation vraie ε est :

$$\varepsilon = \int_{L_0}^L \frac{dL}{L} = \text{Ln} \left(\frac{L}{L_0} \right) = \text{Ln} \left(\frac{L_0 + \Delta L}{L_0} \right)$$

$$\varepsilon = \text{Ln}(1 + e)$$

Dans la suite de cette étude, nous supposons que l'acier S355NL demeure un matériau homogène et isotrope. La loi de comportement, déterminée à partir de ces essais de traction, sera introduite dans le code de calcul Abaqus\Standard en vue du calcul aux éléments finis.

Toutefois, nous avons également déterminé les paramètres de la loi de Ramberg-Osgood en considérant la loi de *comportement monotone du matériau* de la forme suivante :

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} + m \left(\frac{\sigma}{E} \right)^{1/n}$$

m	n
7.10^{15}	0,15

Tableau IV-3 : Valeurs moyennes des paramètres de la loi de Ramberg-Osgood pour l'acier S355NL

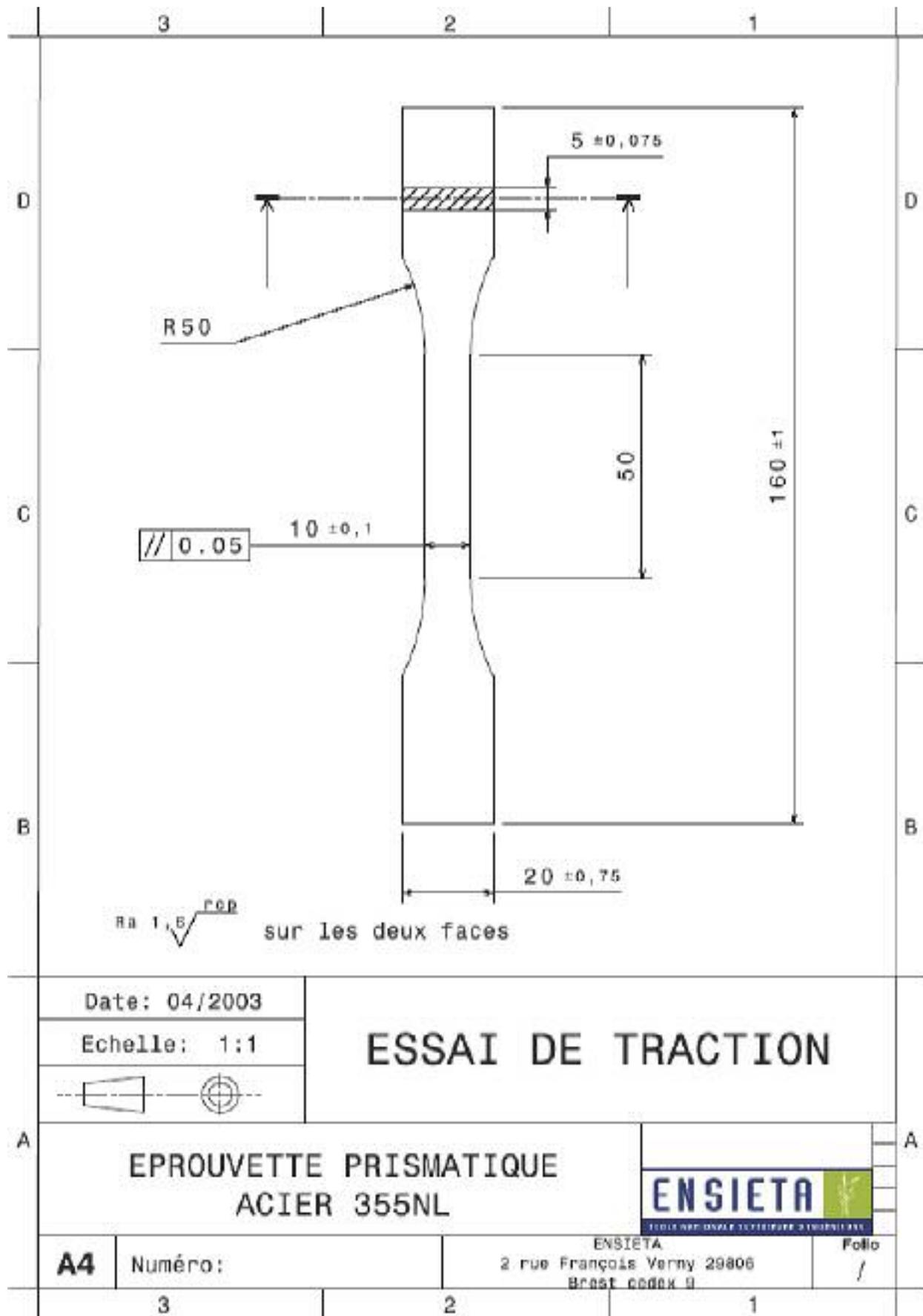


Figure IV-4 : Epreuve d'essai de traction

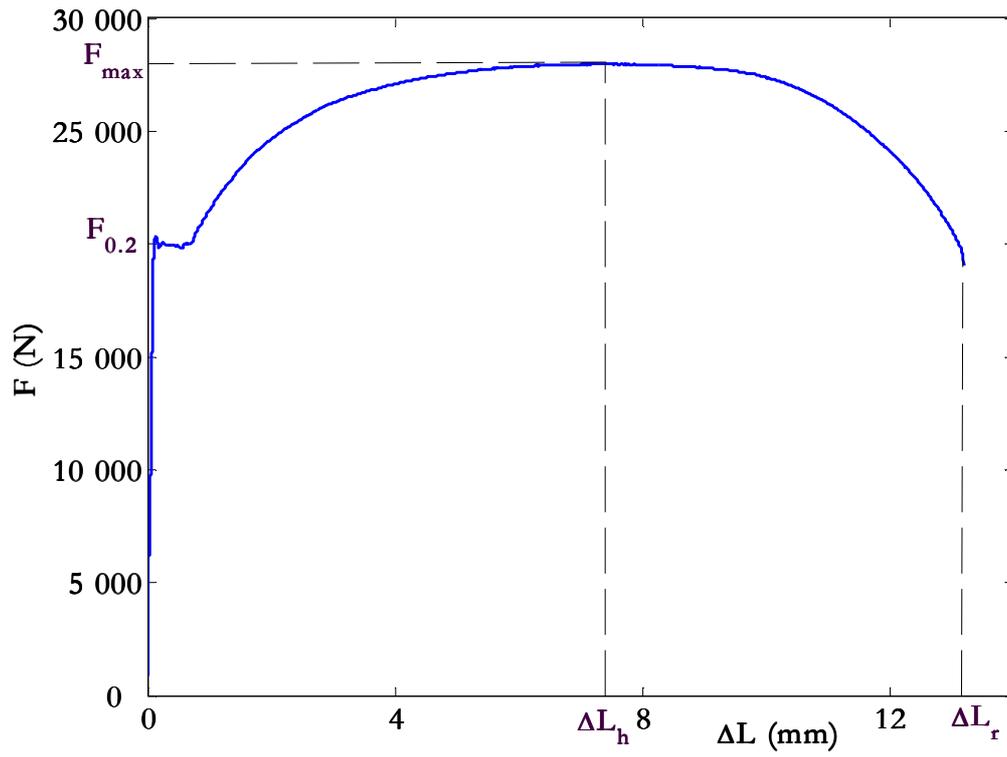


Figure IV-5 : Courbe de traction conventionnelle

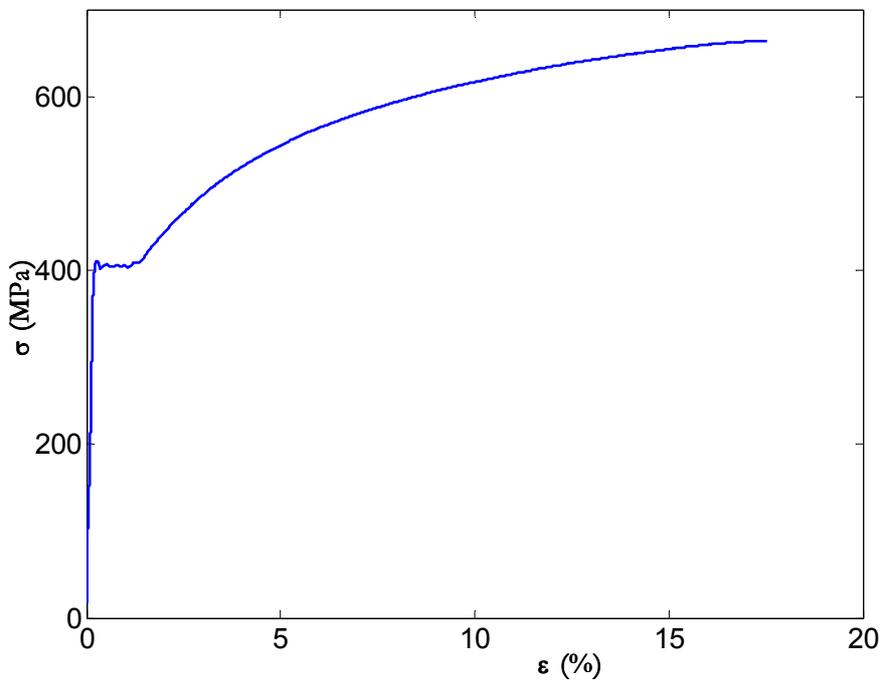


Figure IV-6 : Courbe de traction rationnelle

CHAPITRE V:

PROCEDURE EXPERIMENTALE

V-1 Problématique

D'un point de vue expérimental, l'étude de la propagation des fissures de petites dimensions pose essentiellement deux types de problèmes :

- ❑ celui de l'obtention de telles fissures dans une zone d'observation prédéterminée ;
- ❑ celui de l'instrumentation notamment vis-à-vis de la taille du défaut.

Tout d'abord, en ce qui concerne l'obtention de ces fissures, deux techniques sont généralement employées :

- ❑ l'une visant à obtenir des fissures courtes de manière artificielle, à partir d'une fissure longue bidimensionnelle dont la longueur est ensuite réduite par usinage, ou encore amorcées à partir d'entailles « sévères » réalisées par différents procédés (usinage, laser, électroérosion,...) ;
- ❑ l'autre visant à obtenir des fissures courtes de manière naturelle, amorcées en surface d'éprouvettes lisses ou ayant une forme en « sablier ».

Il apparaît alors clairement que la réalisation d'entailles « sévères » peut présenter un certain nombre d'inconvénients à garder à l'esprit lorsqu'on étudie la propagation de fissures à partir de celles-ci. En effet, obtenir des entailles près desquelles le matériau n'est pas endommagé est une opération difficile. Les entailles réalisées par électroérosion ont une zone de métal fondu à leur extrémité et celles usinées posent souvent le problème des contraintes résiduelles. L'usinage d'une fissure longue n'est, quant à lui, pas évident car le front de fissure est rarement uniforme ce qui peut entraîner une fissure courte non régulière.

V-2 Eprouvettes utilisées

Deux types d'échantillons ont été utilisés pour mener à bien cette étude : l'un à ligament court et l'autre à ligament long.

V-2-1 Fissures courtes

Nous avons opté pour un amorçage naturel des fissures courtes de fatigue. Nous avons ainsi décidé d'entreprendre des essais sur des échantillons parallélépipédiques munis d'une faible zone de concentration de contrainte mais suffisante pour localiser l'amorçage des fissures et réduire ainsi la zone d'observation. Pour cela, une entaille de rayon 20 mm a été usinée sur l'une des faces de l'éprouvette, la zone d'amorçage sera par la suite systématiquement polie. L'aire de la section résistante de l'éprouvette est alors de 30 mm². Le plan détaillé de ce type d'éprouvette est représenté sur la Figure V-2. Pour ces éprouvettes, aucune pré-fissuration n'a donc été réalisée.

Le choix de ne pas utiliser d'éprouvettes symétriques (munies de deux congés) repose sur le fait que nous ne souhaitons pas multiplier par deux le nombre de répliques plastiques à manipuler.

Cette zone comprendra également une empreinte d'environ 20 μm qui servira d'origine à un repère lié à l'échantillon mais qui ne constituera pas a priori un site privilégié d'amorçage. Cette empreinte sera réalisée à l'aide d'un microduromètre afin de maîtriser la reproductibilité de l'empreinte tant au niveau du positionnement que de la taille. Les avancées de fissure seront mesurées jusqu'à une longueur en surface d'environ 5,5 mm.

V-2-2 Fissures longues

Les essais de propagation de fissures longues ont été conduits sur des éprouvettes de traction à entaille latérale (type SENT), dont le plan est représenté sur la Figure V-3. Le choix de cette éprouvette repose sur une volonté d'utiliser le même montage et une configuration d'essai similaire pour les deux types d'échantillons. Les dimensions ont été fixées en respectant les normes ASTM [ASTM, ASTM86] couramment utilisées pour réaliser des essais de fatigue. Ceci nous permettra également de calculer le facteur d'intensité de contrainte à l'aide des relations vérifiées par calculs aux éléments finis (chapitre VII). Ces éprouvettes sont munies d'une entaille traversante de longueur 4 mm réalisée par électroérosion à l'aide d'un fil de diamètre 290 μm (Figure V-3).

V-3 Moyens de détection et de suivi de la fissuration

Du fait du caractère tridimensionnel de la propagation des fissures courtes, les mesures expérimentales peuvent poser certains problèmes. Ceux-ci proviennent du fait qu'il n'existe pas de méthode complète capable de mesurer à la fois la longueur en surface et en profondeur. Toutefois, différentes techniques de mesure de longueur de fissures ont déjà été utilisées par différents auteurs. On trouve fréquemment l'utilisation de moyens d'observations directes ou indirectes, des méthodes électriques, l'utilisation de techniques basées sur l'émission acoustique ou ultrasonore ou encore de méthodes électrochimiques. Enfin, plus récemment des études mettant en œuvre la microtomographie X [Fer03] ont vu le jour. Trois techniques sont actuellement disponibles au Laboratoire de Mécanique des Structures Navales.

V-3-1 Technique des répliques plastiques

Ces techniques sont très utiles lorsqu'on ne sait pas où va s'amorcer la fissure qui conduira à la rupture, notamment dans le cas de fissures courtes (Figure V-1). Cette technique consiste à appliquer un film d'acétate de cellulose, dilué dans une solution d'acétone, sur la surface de l'éprouvette. Afin d'obtenir les répliques, les essais de fatigue ont été périodiquement interrompus chaque 2500-10000 cycles, en fonction de l'amplitude de contrainte appliquée et de la durée de vie en fatigue des éprouvettes. L'intervalle cyclique a été choisi de telle sorte qu'environ 30 à 40 répliques puissent être obtenues durant un essai. Signalons que les répliques sont prises au niveau moyen de la charge quel que soit le rapport de charge employé (selon différentes études, la fissure est totalement ouverte pour 60% de la charge maximale [Che88]) sauf pour le rapport de charge $R = -1$ où elles sont prises à 75% de la charge maximale. Après rupture de l'éprouvette, il est possible de remonter à l'historique de la fissure qui a conduit à la rupture. Il en est d'ailleurs de même pour les fissures non propageantes. Ces répliques, observées au microscope optique à fort grossissement, permettent de déterminer le nombre de cycles à l'apparition des premiers signes d'endommagement et de caractériser l'avancée d'une fissure. La méthode des répliques plastiques permet d'assurer une bonne sensibilité lors de la prise de

mesure mais également de disposer d'un seuil de détection très faible (de l'ordre de 30 à 40 μm). Cette méthode a donc été choisie pour contrôler l'amorçage et la propagation des fissures courtes de fatigue sur la surface des éprouvettes. Ces mesures étant uniquement réalisables en surface, des hypothèses seront par ailleurs nécessaires quant à la forme du front de fissure.

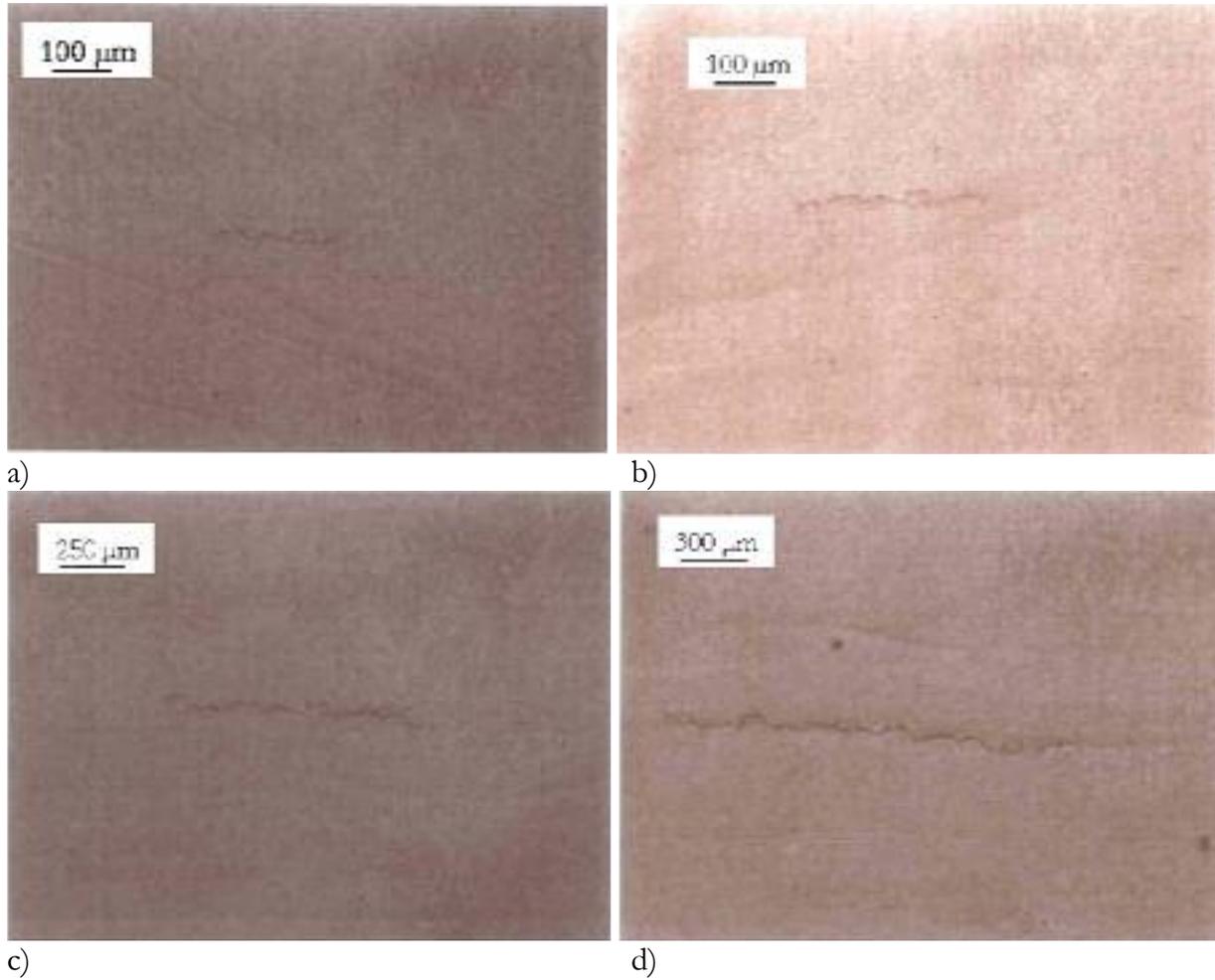


Figure V-1 : Exemple de suivi de fissure à l'aide de répliques plastiques

Remarque : Dans toutes les images de cette page, la direction du chargement est verticale.

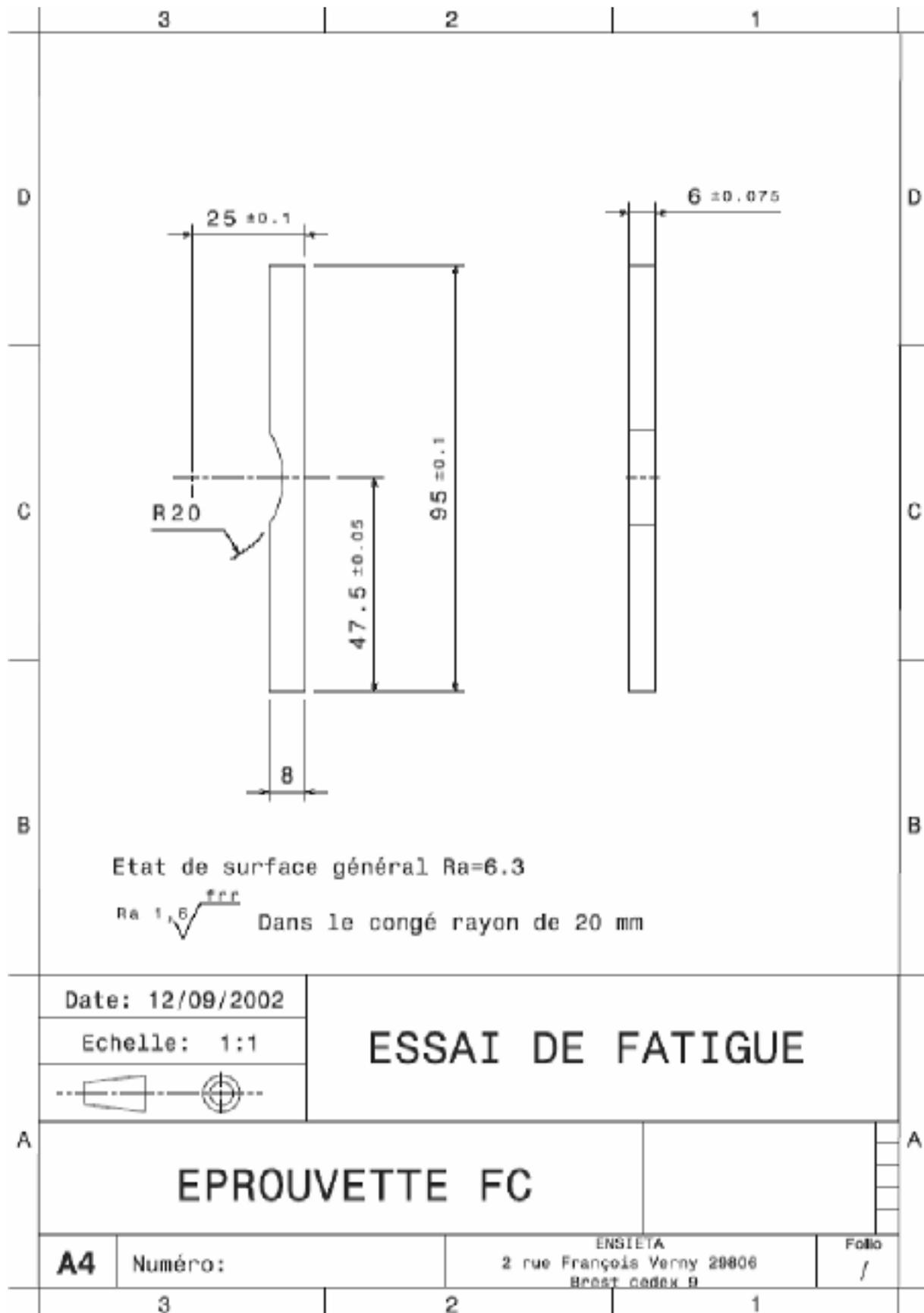


Figure V-2 : Eprouvette destinée à l'étude des fissures courtes

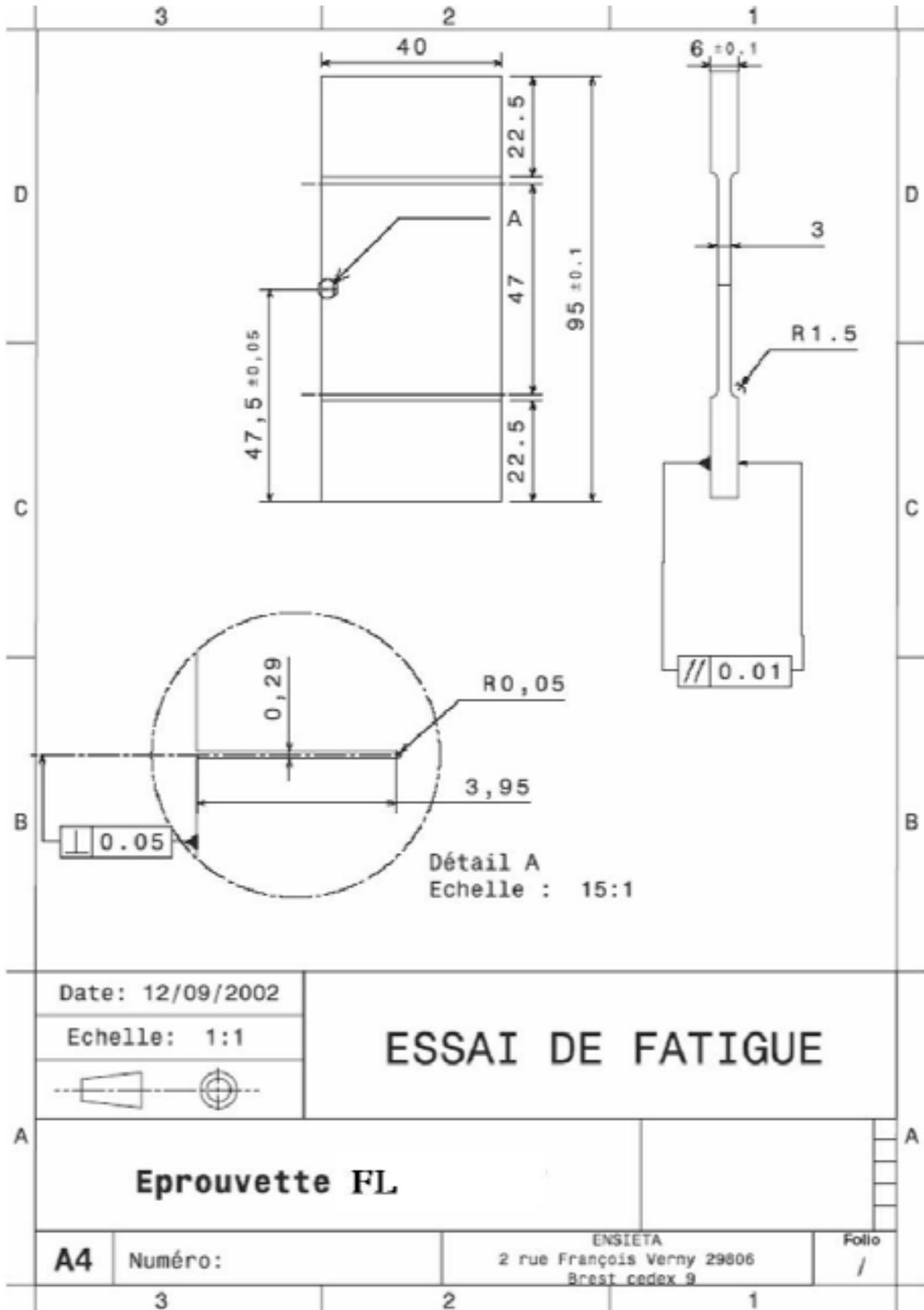


Figure V-3: Epreuve destinée à l'étude des fissures longues

V-3-2 Microscope à longue distance focale

Ces techniques, basées sur le principe du télescope, utilisent un fort grossissement pour visualiser et photographier, à l'aide d'une caméra, la propagation des fissures jusqu'à rupture. Le montage (Figure V-4) permet de balayer la zone en fond d'entaille lors des arrêts réguliers effectués pendant le « cyclage » (les observations sont facilitées par le fait que les microfissures restent ouvertes sous la charge statique de traction appliquée pendant l'arrêt). Avec cette technique, la recherche de fissures de l'ordre de quelques dizaines de microns est quasiment impossible, c'est pourquoi nous continuons à utiliser les répliques jusqu'à une longueur de fissure de l'ordre de 150 à 200 μm en surface avant d'utiliser le microscope à longue distance.

Plusieurs études ont montré que les fissures naturelles amorcées en surface ont une forme semi-circulaire mais ont tendance à se propager vers l'intérieur du métal en devenant de plus en plus semi-elliptique. Par ailleurs, la forme des fissures naturelles est variable et l'approximation faite pour déterminer la profondeur n'est qu'une valeur statistique de la forme réelle de cette fissure, d'où l'importance d'une méthode de suivi de fissure qui prendrait en compte la globalité de la forme : par exemple, la méthode de chute de potentiel.



Figure V-4 : Microscope à longue distance focale

V-3-3 Technique du potentiel électrique

Cette technique utilise la variation de résistance électrique liée à l'avancée de la fissure dans une éprouvette traversée par un courant continu ou alternatif. Elle consiste à faire passer un courant électrique stabilisé dans l'éprouvette conductrice et isolée de la machine d'essai. La différence de potentiel mesurée, due à la variation de résistivité, est provoquée par l'apparition ou la progression d'une discontinuité dans le matériau et en particulier, par l'apparition d'une fissure dans l'éprouvette sollicitée en fatigue. Finalement, cette chute de potentiel électrique peut être reliée à une aire de surface fissurée à l'aide d'une courbe d'étalonnage, ce qui permet de donner une indication sur la profondeur de la fissure. Par ailleurs, cette méthode ne permet pas de vérifier quelle fissure est mesurée car, dans la surface de fissuration, il peut exister plusieurs fissures, qui peuvent coexister simultanément. Faute de temps, cette dernière technique n'a malheureusement pas pu être utilisée dans le cadre de ce travail.

En résumé, les deux méthodes utilisant des répliques ou un microscope à longue distance permettent de mesurer uniquement les longueurs en surface, des hypothèses sont nécessaires sur la forme du front de fissure. Les techniques de répliques sont en outre difficiles d'emploi dans des environnements agressifs et à haute température ; par contre, le microscope à longue distance et la méthode de mesure de chute de potentiel présentent l'avantage d'être opérationnels sous environnement agressif ou à haute température.

V-4 Mesure de vitesse de fissuration

Après avoir relevé les longueurs de fissures (a_i) et le nombre de cycles correspondant (N_i) à chaque longueur, les vitesses de fissuration sont calculées à l'aide de la méthode dite *sécante*, selon laquelle nous avons considéré deux couples successifs (a_i, N_i) et (a_{i+1}, N_{i+1}). Nous avons adopté la longueur moyenne $a = (a_i + a_{i+1})/2$ qui sert au calcul de l'amplitude du facteur d'intensité de contrainte ΔK (partie C). La vitesse de fissuration, pour la longueur a est évaluée par l'expression suivante :

$$\frac{da}{dN} \approx \frac{a_{i+1} - a_i}{N_{i+1} - N_i}$$

Un exemple de suivi de fissure longue est présenté dans la Figure V-5 où nous avons indiqué la longueur de fissure, le nombre de cycles correspondant, les valeurs de l'amplitude du facteur d'intensité de contrainte et de la vitesse de propagation.



$N = 115.10^3$ cycles, $\Delta K = 13,76 \text{ MPa.m}^{1/2}$ et $da/dN = 1,33.10^{-8} \text{ m/cycle}$



$N = 335.10^3$ cycles, $\Delta K = 10,91 \text{ MPa.m}^{1/2}$ et $da/dN = 5.10^{-9} \text{ m/cycle}$

Figure V-5 : Exemple de suivi de fissure longue par microscope à longue distance en utilisant la méthode à ΔK décroissant ($R = 0,5$)

V-5 Mesure de fermeture de fissure

Il est de plus en plus admis que les lèvres d'une fissure de fatigue, restent en contact même lorsqu'une charge est appliquée. L'analyse de l'ouverture de la fissure a été effectuée par la méthode de variation de complaisance sur les éprouvettes SENT grâce à deux techniques : soit par utilisation d'un extensomètre mécanique à lames placées de part et d'autre de l'entaille, soit par l'emploi de micro-jauges [EA] collées sur la face arrière (état de déformations planes) ou sur le côté de l'éprouvette (état de contraintes planes). L'enregistrement des données issues de ces différents capteurs a été réalisé grâce à un système d'acquisition de données de type Spider8 (HBM).

Avec le capteur mécanique, nous mesurons l'écartement des deux « demi-éprouvettes » en bout d'entaille. La charge à l'ouverture est caractérisée par une diminution de la rigidité de l'éprouvette par rapport à la configuration avec fissure fermée. En effet, lorsque le phénomène de fermeture de fissure se produit, la courbe charge-écartement (P, δ) montre un changement de pente. Nous avons utilisé la technique différentielle pour mesurer la charge à l'ouverture P_{ouv} . Cette technique consiste à mesurer la quantité $\delta' = \delta - \alpha P$, α étant la complaisance de l'éprouvette avec la fissure ouverte (partie efficace du cycle du point de vue de la propagation) et P_{ouv} est définie comme étant la charge à laquelle la courbe $\delta' - P$ devient horizontale [Oh97] (Figure V-6). La méthode employée lors de l'usage de micro-jauges demeure similaire mais les déplacements sont alors remplacés par des déformations.

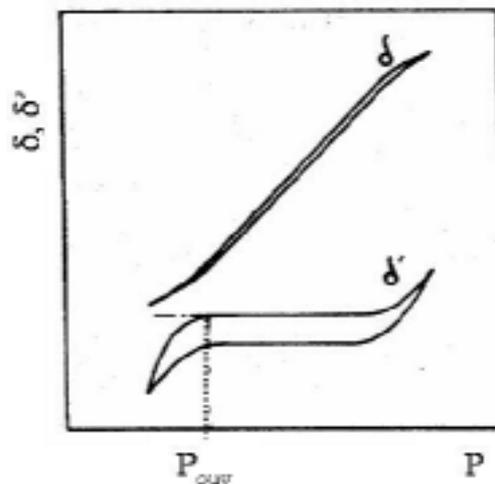


Figure V-6 : Exemple d'enregistrement de fermeture

En ce qui concerne la détermination pratique de la complaisance (pente α), seule la moitié supérieure du cycle fut utilisée. Une régression linéaire a alors été effectuée sur l'ensemble des points après avoir ôté ceux correspondant aux parties basse et haute de la courbe qui ne sont pas alignés sur la partie centrale : le coefficient de corrélation généralement admis était de 0,99.

La charge à l'ouverture P_{ouv} , déterminée à partir de ces courbes, pour laquelle la fissure est totalement ouverte, nous permet alors de calculer l'amplitude efficace du facteur d'intensité de contraintes : $\Delta K_{eff} = K_{max} - K_{ouv}$.

V-6 Mesure du coefficient de concentration de contrainte

La valeur maximale de la contrainte dans la direction de sollicitation a été déterminée de deux façons : expérimentalement et numériquement.

A l'aide de micro-jauges de déformation [EA] placées à deux endroits distincts sur la surface de l'échantillon, il a été possible de mesurer les déformations nominale (longitudinale) et à fond d'entaille (congé) et de remonter ainsi au coefficient de concentration de contrainte K_T :

$$K_T = \frac{\sigma_{ent}}{\sigma_{nom}} = \frac{\varepsilon_{ent}}{\varepsilon_{nom}}$$

Les valeurs expérimentales du K_T ont été comparées à des valeurs numériques issues d'un calcul par éléments finis réalisé avec le code Abaqus\Standard v6.3. Une bonne corrélation a pu alors être relevée (voir chapitre VI).

V-7 Sollicitations

L'ensemble des essais de fatigue a été réalisé sur une machine hydraulique de type Instron 1342 pilotée par un PC. Cette machine mono-axiale possède une capacité de 100 kN et le serrage de l'échantillon est assuré par des mors hydrauliques (Figure V-7).

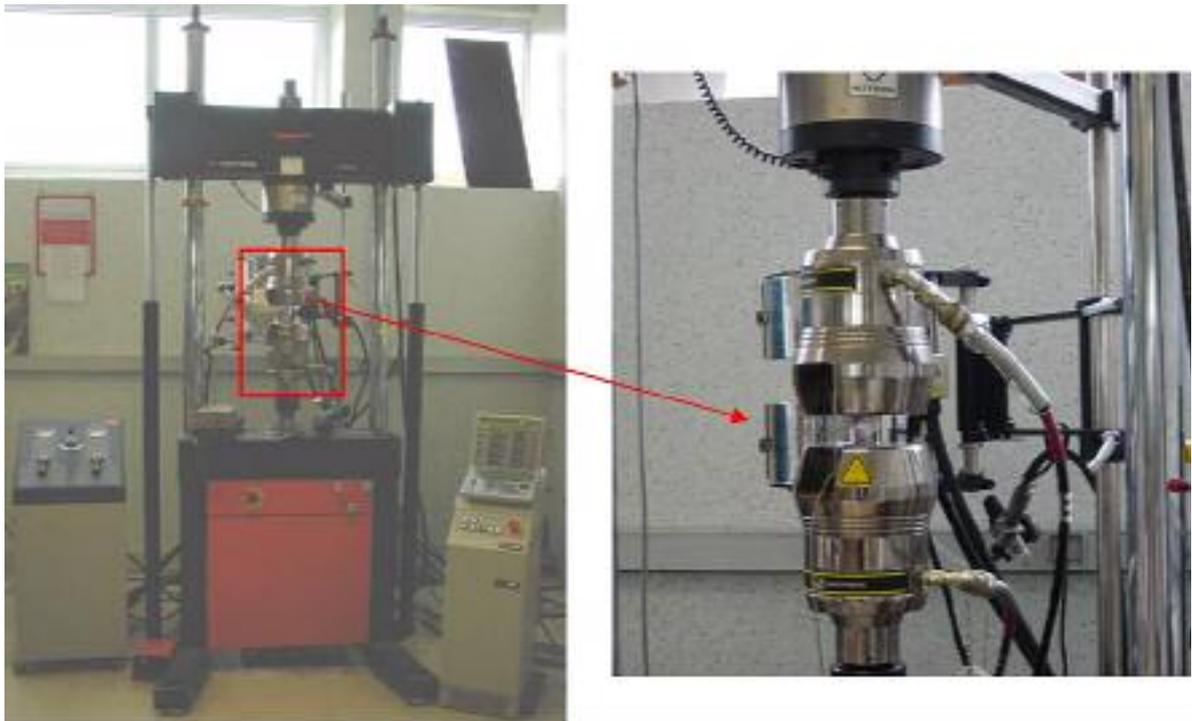


Figure V-7 : Machine de fatigue Instron

Les contraintes périodiques, qui seront utilisées tout au long des essais de fatigue, seront des contraintes sinusoïdales. Elles peuvent être considérées comme la superposition d'une contrainte alternée et d'une contrainte statique appelée contrainte moyenne. En appelant σ_{min} et σ_{max} les valeurs algébriques (positives en traction et négatives en compression) prises périodiquement par

la contrainte, la contrainte moyenne σ_m et l'amplitude de la contrainte appliquée σ_a s'écrivent respectivement :

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2} \text{ et } \sigma_a = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2}$$

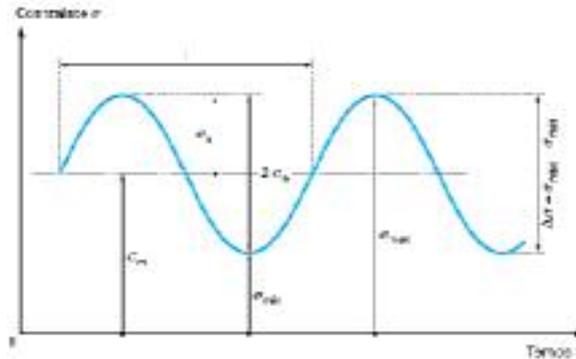


Figure V-8 : Sollicitation sinusoidale appliquée (amplitude constante)

Les contraintes seront généralement définies par rapport à l'amplitude maximale de la contrainte atteinte au cours d'un cycle σ_a et par la valeur de la contrainte moyenne σ_m . Le rapport des contraintes ou rapport de charge R , est défini par $R = \sigma_{\min} / \sigma_{\max}$.

V-8 Essais de fissuration

Pour chaque essai de fissuration par fatigue destiné au suivi de fissures courtes ou longues, une attention particulière est apportée aux systèmes de fixation des éprouvettes pour éviter l'influence de tout type d'effet parasite, lié à l'alignement de l'éprouvette (flexion, torsion...), qui pourrait perturber la progression de la fissure. En cours d'essai, des contrôles périodiques des valeurs maximale et minimale ainsi que de la valeur moyenne du cycle imposé, sont réalisés afin d'assurer le maintien de la charge appliquée.

Dans le but d'améliorer la mesure optique de l'avancée de fissure et de faciliter la prise de répliques, le plan de fissuration de chaque éprouvette est minutieusement poli et attaqué légèrement au Nital avant chaque essai afin de révéler la microstructure. Le polissage est fait mécaniquement, en évitant toutes sortes de rayures dans la direction perpendiculaire à l'axe de sollicitation, de la manière suivante :

- un polissage aux papiers abrasifs humides de plus en plus fins (grade 180-800) ;
- un polissage à la pâte diamantée de 9 microns, 3 microns et 1 micron.

V-8-1 Types de fissures

Les fissures de fatigue qui apparaissent en surface sont globalement de deux types. On distingue en effet, comme le montre la Figure V-9, des fissures traversantes pour lesquelles le front de fissure est linéaire (fissure bidimensionnelle) et des fissures de surface pour lesquelles celui-ci est semi-elliptique (fissure tridimensionnelle). Ces caractéristiques ne définissent en rien le fait qu'une fissure soit courte ou longue. Par contre, ce qui les différencie, c'est leur comportement.

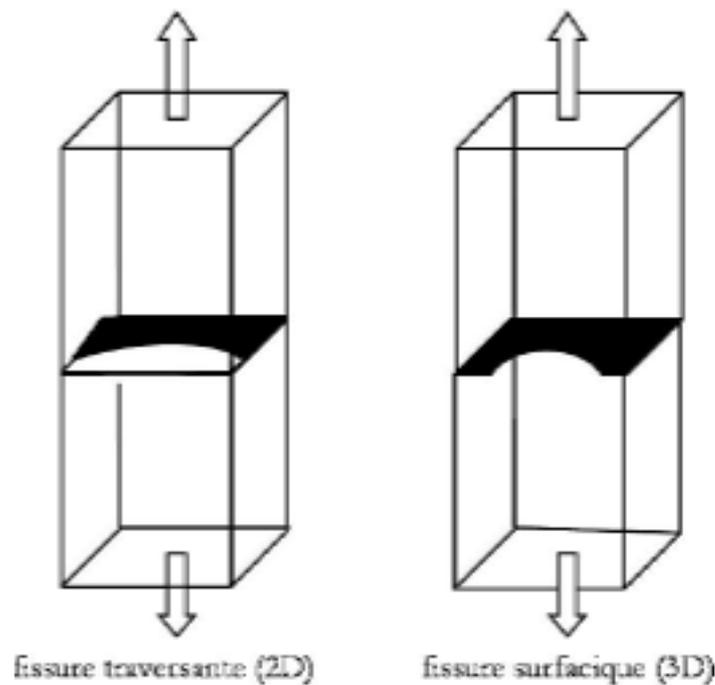


Figure V-9 : Types de fissures

V-8-2 Essais de fissures longues

La propagation des fissures de fatigue a été étudiée à l'aide d'essais sur des éprouvettes pré-fissurées (éprouvette SENT). Un chargement par paliers à amplitude décroissante a été utilisé pour déterminer la valeur du seuil du facteur d'intensité de contrainte ΔK_{seuil} , en dessous de laquelle une fissure de fatigue relativement longue ne se propage plus. Avant d'effectuer une réduction de charge, nous avons besoin de connaître la valeur de l'avancée de la fissure, la taille de la zone plastique et le taux de réduction de la charge afin de ne pas bloquer complètement la fissure. L'avancée de la fissure a été mesurée par les répliques plastiques et le microscope à longue distance, chaque essai a été amené jusqu'à une longueur de propagation d'environ 20 mm ($a/w = 0,5$). Les essais de seuil de propagation ont été réalisés en respectant les normes ASTM [AST86]. Celles-ci sont :

- avant la première réduction de la charge appliquée, la fissure doit dépasser la zone plastique créée par l'entaille ;
- avant chaque réduction de la charge, l'avancée de la fissure Δa doit dépasser la dimension de la zone plastique créée par la charge appliquée précédemment, soit :
 $\Delta a > r_{pc}$ avec :

- $r_{pc} = \frac{1}{6\pi} \left(\frac{\Delta K_I}{\Delta \sigma} \right)^2$ en déformation plane ;

- $r_{pc} = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{\Delta K_I}{\Delta \sigma} \right)^2$ en contrainte plane.

- enfin, le seuil est validé lorsque la fissure avance d'une longueur inférieure à 50 μm pour 5.10^6 cycles.

Les essais de propagation de fissures longues ou les essais de seuil, ont été réalisés pour un chargement sinusoïdal à une fréquence $f = 35$ Hz pour les rapports de charge suivants : $R = 0,1$, $R = 0,3$ et $R = 0,5$. La méthode de variation de complaisance (jauge de déformation et extensomètre) a permis de décrire les courbes de fissuration en termes de ΔK efficace. La courbe de propagation de fissures longues ainsi obtenue (unique pour les différents rapports de charge) sera choisie par la suite comme *courbe de référence* lors des comparaisons réalisées avec les fissures courtes.

V-8-3 Essais de fissures courtes

L'objectif de cette partie de mémoire est d'explorer l'étude des fissures courtes amorcées naturellement en surface dans l'acier *S355NL*. Ceci est accompli par la comparaison des résultats de fissures courtes avec ceux de fissures longues obtenus précédemment. Pour simuler les deux comportements, les mêmes conditions de chargement que celles appliquées lors des essais de propagation de fissures longues, ont été appliquées aux essais de fissures courtes. Les rapports de charge utilisés pour ces essais de traction répétée ou traction compression furent $R = 0,1$, $R = 0,3$, $R = 0,5$ et enfin $R = -1$ à la fréquence $f = 35$ Hz.

Bien que la plupart des résultats de fatigue ait été obtenu dans des conditions de chargement à amplitude constante, le plus souvent les structures sont soumises en service à des sollicitations (contraintes ou déformations) qui varient rarement entre des limites constantes mais qui peuvent avoir différents niveaux d'amplitude au cours de leurs durées de vie. De ce fait et de manière à se rapprocher des conditions opérationnelles de service impliquant un chargement à amplitude variable, d'autres essais ont été réalisés sous blocs programmés. Ces blocs seront établis à partir d'enregistrements réalisés en conditions opérationnelles.

Dans le cadre de l'étude sur la tenue en fatigue sur houle de frégates, une campagne de mesures en mer a été menée sur l'une d'entre elles à la fin de l'année 1994 durant laquelle le Centre Technique de Systèmes Navals (CTSN) a réalisé un nombre important de mesures des mouvements du navire ainsi que des déformations et contraintes associées. Ce bâtiment a fait l'objet d'une instrumentation importante par l'intermédiaire de jauges de déformation unidirectionnelles et de rosettes réparties à différents endroits dans le navire : soixante dix voies de mesures d'extensométrie ont alors été utilisées à cet effet. L'ensemble des points de mesure est représenté sur la Figure V-10. Parmi les très nombreux enregistrements disponibles, l'intérêt s'est porté en particulier sur un relevé dont les conditions de mer associées, telles qu'identifiées à partir des mouvements, sont idéalement décrites de la manière suivante :

- ❑ Nature de la mer : unidirectionnelle (décrite par un spectre de Bretschneider) ;
- ❑ Hauteur significative de mer : 3,7 m (correspondant à un état de mer 5) ;
- ❑ Période modale : 10 s.

Dans ces conditions, les caractéristiques de la navigation étaient par ailleurs, navire stabilisé, les suivantes :

- ❑ Cap : $1/4$ avant tribord ;
- ❑ Vitesse : 10 nœuds.

A partir de l'ensemble des résultats portant sur ce relevé, nous avons alors choisi de nous pencher sur les résultats de la voie n°17 (Figure V-11). Celle-ci se situe en effet dans une zone proche de l'endroit où ont été détectées des fissures de fatigue dans un bâtiment similaire.

Enfin, il est important de noter que les enregistrements temporels qui vont nous intéresser ici portent sur les déformations longitudinales mesurées dans des zones hors toute concentration de contrainte.

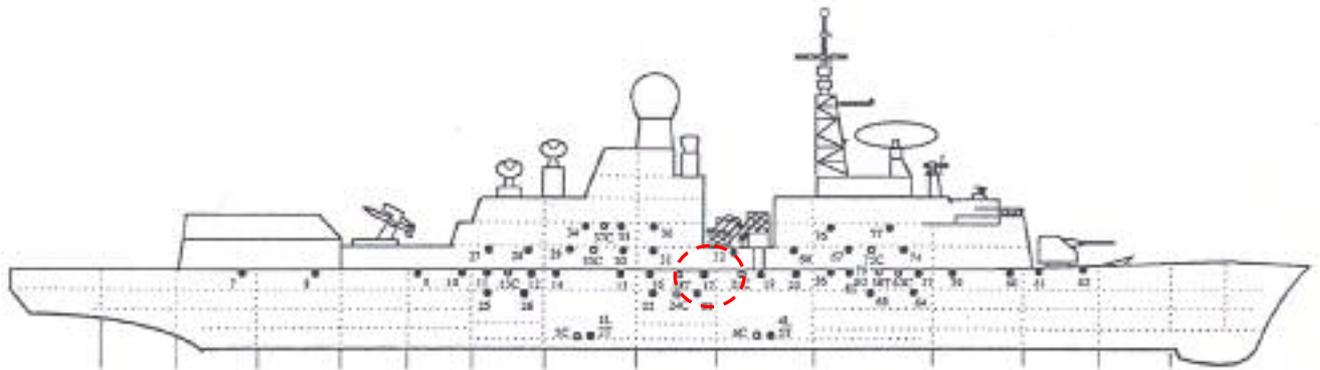


Figure V-10 : Implantation des jauges longitudinales.

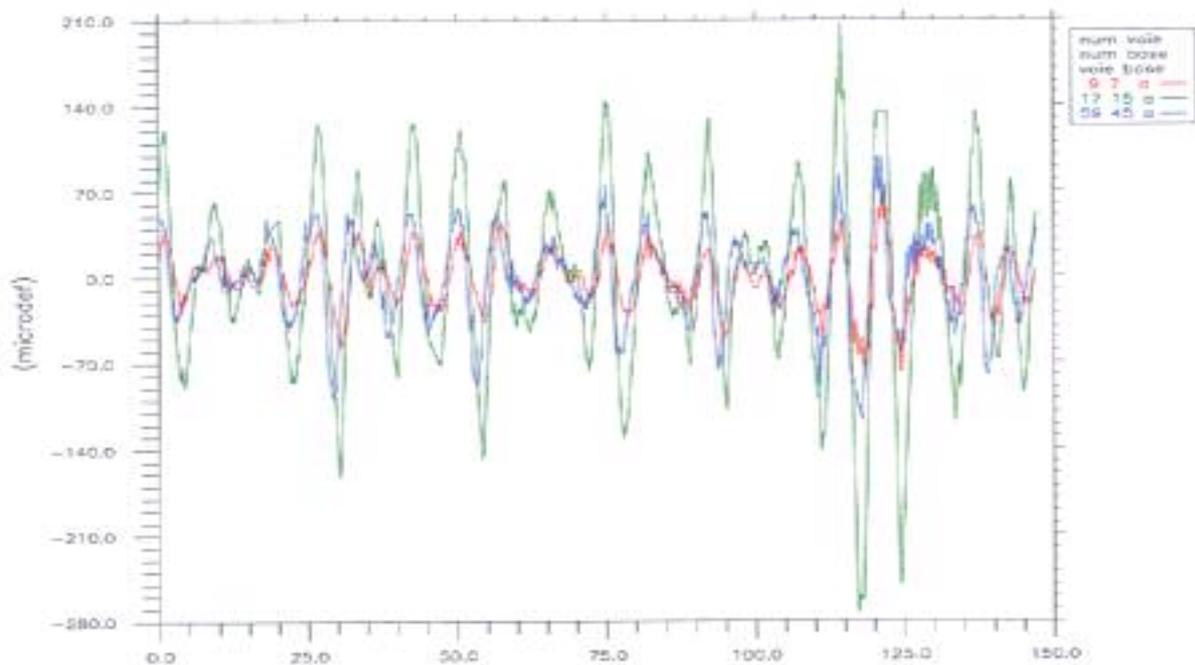


Figure V-11 : Exemples de spectres d'enregistrement du chargement à amplitude variable.

Afin de comparer les résultats obtenus sous spectre et sous chargement d'amplitude constante, nous avons cherché à écrire une contrainte équivalente. Ce chargement équivalent sous amplitude de chargement constante doit conduire à la même avancée de la fissure que le chargement d'amplitude variable initial. Pour un chargement d'amplitude constante, le calcul est effectué de la façon suivante :

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^m \text{ avec } \Delta K = f\left(\frac{a}{w}\right) \Delta P_{eq} a^{1/2}$$

Pour un chargement d'amplitude variable, nous utiliserons la notion de contrainte équivalente P_{eq} définie de la manière suivante :

$$\Delta K = f\left(\frac{a}{w}\right) \Delta P_{eq} a^{1/2} \quad \text{avec} \quad \Delta P_{eq} = \left[\frac{\sum_i n_i (\Delta P_i)^m}{\sum_i n_i} \right]^{1/m}$$

où n_i désigne le nombre de cycles sous amplitude ΔP_i , l'expression de $f(a/w)$ dépend du type de fissure (voir partie C).

L'aspect chargement variable sera davantage détaillé dans le chapitre IX.

MCours.com