

NORME
INTERNATIONALE

ISO
7539-6

Première édition
1989-12-15

**Corrosion des métaux et alliages — Essais de
corrosion sous contrainte —**

Partie 6 :

Préparation et utilisation des éprouvettes préfissurées

iTeh STANDARD PREVIEW
(standards.iteh.ai)

Corrosion of metals and alloys — Stress corrosion testing —

Part 6: Preparation and use of pre-cracked specimens

<https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/e62cb586-0651-4ccb-bb28-bd48157233f6/iso-7539-6-1989>



Numéro de référence
ISO 7539-6 : 1989 (F)

Avant-propos

L'ISO (Organisation internationale de normalisation) est une fédération mondiale d'organismes nationaux de normalisation (comités membres de l'ISO). L'élaboration des Normes internationales est en général confiée aux comités techniques de l'ISO. Chaque comité membre intéressé par une étude a le droit de faire partie du comité technique créé à cet effet. Les organisations internationales, gouvernementales et non gouvernementales, en liaison avec l'ISO participent également aux travaux. L'ISO collabore étroitement avec la Commission électrotechnique internationale (CEI) en ce qui concerne la normalisation électrotechnique.

Les projets de Normes internationales adoptés par les comités techniques sont soumis aux comités membres pour approbation, avant leur acceptation comme Normes internationales par le Conseil de l'ISO. Les Normes internationales sont approuvées conformément aux procédures de l'ISO qui requièrent l'approbation de 75 % au moins des comités membres votants.

La Norme internationale ISO 7539-6 a été élaborée par le comité technique ISO/TC 156, *Corrosion des métaux et alliages*.

<https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/e62cb586-0651-4ccb-bb28-6a4615725516/iso-7539-6-1989>

L'ISO 7539 comprend les parties suivantes, présentées sous le titre général *Corrosion des métaux et alliages — Essais de corrosion sous contrainte* :

- *Partie 1: Guide général des méthodes d'essai*
- *Partie 2: Préparation et utilisation des éprouvettes pour essais en flexion*
- *Partie 3: Préparation et utilisation des éprouvettes cintrées en U*
- *Partie 4: Préparation et utilisation des éprouvettes pour essais en traction uniaxiale*
- *Partie 5: Préparation et utilisation des éprouvettes en forme d'anneau en C*
- *Partie 6: Préparation et utilisation des éprouvettes préfiessurées*
- *Partie 7: Essais à faible vitesse de déformation*
- *Partie 8: Préparation et utilisation des éprouvettes présentant un cordon de soudure*

L'annexe A fait partie intégrante de la présente partie de l'ISO 7539.

© ISO 1989

Droits de reproduction réservés. Aucune partie de cette publication ne peut être reproduite ni utilisée sous quelque forme que ce soit et par aucun procédé, électronique ou mécanique, y compris la photocopie et les microfilms, sans l'accord écrit de l'éditeur.

Organisation internationale de normalisation
Case postale 56 • CH-1211 Genève 20 • Suisse

Imprimé en Suisse

Introduction

La présente partie de l'ISO 7539 fait partie intégrante d'une série de normes couvrant les procédures de définition, de préparation et d'utilisation de différentes formes d'éprouvettes destinées à la réalisation d'essais permettant d'évaluer la résistance des métaux à la corrosion sous contrainte.

Chaque norme de la série doit être lue conjointement avec l'ISO 7539-1. Cette dernière permet de choisir la méthode d'essai appropriée, adaptée aux cas particuliers, et fournit des directives pour évaluer la portée des résultats d'essais.

iTeh STANDARD PREVIEW (standards.iteh.ai)

[ISO 7539-6:1989](https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/e62cb586-0651-4ccb-bb28-bd48157233f6/iso-7539-6-1989)

<https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/e62cb586-0651-4ccb-bb28-bd48157233f6/iso-7539-6-1989>

Page blanche

iTeh STANDARD PREVIEW
(standards.iteh.ai)

ISO 7539-6:1989

<https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/e62cb586-0651-4ccb-bb28-bd48157233f6/iso-7539-6-1989>

Corrosion des métaux et alliages — Essais de corrosion sous contrainte —

Partie 6 : Préparation et utilisation des éprouvettes préfissurées

1 Domaine d'application

1.1 La présente partie de l'ISO 7539 couvre les procédures de définition, de préparation et d'utilisation d'éprouvettes préfissurées, servant à évaluer la sensibilité d'un métal à la corrosion sous contrainte. Des recommandations visant les éprouvettes entaillées sont données dans l'annexe A.

Pour les besoins de la présente partie de l'ISO 7539, le terme « métal » inclut également les alliages.

1.2 Comme il est nécessaire de maintenir une contrainte élastique en front de fissure, les éprouvettes préfissurées ne se prêtent pas à l'évaluation des produits minces tels que les tôles minces et les fils, et sont généralement utilisées pour des produits plus épais tels que les tôles fortes, les barres et les pièces forgées. Elles peuvent aussi être utilisées pour des pièces assemblées par soudage.

1.3 Les éprouvettes préfissurées peuvent être soumises à une contrainte quantitative à l'aide d'appareils exerçant une charge constante ou une charge uniformément croissante, ou bien comprenant un dispositif qui engendre un déplacement constant aux points d'application de charge.

1.4 Les éprouvettes préfissurées présentent l'avantage de permettre l'acquisition de données dont on peut déduire les tailles critiques de défaut au-delà desquelles une fissuration par corrosion sous contrainte peut se produire au niveau de pièces de géométrie connue soumises à des efforts connus. Ces éprouvettes permettent également de déterminer la vitesse de propagation des fissures de corrosion sous contrainte.

2 Référence normative

La norme suivante contient des dispositions qui, par suite de la référence qui en est faite, constituent des dispositions valables pour la présente partie de l'ISO 7539. Au moment de la publication, l'édition indiquée était en vigueur. Toute norme est sujette à révision et les parties prenantes des accords fondés sur la présente partie de l'ISO 7539 sont invitées à rechercher la possibi-

lité d'appliquer l'édition la plus récente de la norme indiquée ci-après. Les membres de la CEI et de l'ISO possèdent le registre des Normes internationales en vigueur à un moment donné.

ISO 7539-1 : 1987, *Corrosion des métaux et alliages — Essais de corrosion sous contrainte — Partie 1: Guide général des méthodes d'essai.*

3 Définitions

Pour les besoins de la présente partie de l'ISO 7539, les définitions données dans l'ISO 7539-1 ainsi que les suivantes s'appliquent.

3.1 longueur de fissure, a : Longueur réelle de la fissure mesurée entre sa pointe et selon la géométrie de l'éprouvette, soit les lèvres de l'entaille, soit l'axe du point de chargement.

3.2 largeur de l'éprouvette, W : Largeur réelle de l'éprouvette mesurée entre sa face arrière et selon la géométrie de l'éprouvette, soit la face entaillée, soit le plan de chargement.

3.3 épaisseur de l'éprouvette, B .

Terme autodescriptif.

3.4 épaisseur réduite aux rainures latérales, B_n .

Terme autodescriptif.

3.5 demi-hauteur de l'éprouvette, H .

Terme autodescriptif.

3.6 charge appliquée, P .

Terme autodescriptif.

3.7 flèche au niveau de l'axe du point d'application de la charge, V_y .

Terme autodescriptif.

3.8 flèche par rapport à la ligne de chargement, V .

Terme autodescriptif.

3.9 module d'élasticité, E .

Terme autodescriptif.

3.10 coefficient de facteur d'intensité de contrainte, Y : Facteur déduit de l'analyse de contrainte pour une géométrie d'éprouvette particulière, qui associe le facteur d'intensité de contrainte pour une longueur de fissure donnée à la charge et aux dimensions de l'éprouvette.

3.11 facteur d'intensité de contrainte en régime de déformation plane, K_I : Fonction de la charge appliquée, de la longueur de la fissure et de la géométrie de l'éprouvette, ayant les dimensions du produit d'une contrainte par une longueur; il définit de façon univoque l'intensification du champ de contrainte élastique à la pointe d'une fissure soumise à des déplacements associés aux modes d'ouverture en jeu :

$$K_I = \text{contrainte appliquée} \cdot \sqrt{\text{longueur}}, \text{ en } N \cdot m^{-3/2}$$

3.12 facteur d'intensité de contrainte initiale, K_{Ii} .

Terme autodescriptif.

3.13 ténacité à la rupture en régime de déformation plane, K_{Ic} : Valeur critique de K_I pour laquelle survient la première propagation significative de la fissure indépendamment de l'environnement, sous l'effet d'une intensité de contrainte croissante en régime de forte résistance à la déformation plastique.

3.14 valeur provisoire de K_{Ic} , K_Q : $K_Q = K_{Ic}$ si les critères de validité de prédominance du régime de déformation plane sont satisfaits.

3.15 facteur d'intensité de contrainte limite pour la sensibilité à la propagation de fissures de corrosion sous contrainte, K_{ISCC} : Facteur d'intensité de contrainte au-delà de laquelle la propagation des fissures de corrosion sous contrainte se manifeste et s'étend dans les conditions d'essai prescrites correspondant à une forte résistance à la déformation plastique, c'est-à-dire dans des conditions prédominantes de déformation plane.

3.16 valeur provisoire de K_{ISCC} , K_{QSCC} : $K_{QSCC} = K_{ISCC}$ si les critères de validité de prédominance du régime de déformation plane sont satisfaits.

3.17 facteur d'intensité de contrainte de fatigue, K_f : Intensité de contrainte pour un régime de déformation plane correspondant à l'amplitude maximale de la force mise en jeu dans le cycle d'endurance.

3.18 plage d'intensité de la contrainte de fatigue, ΔK_f .

Terme autodescriptif.

3.19 limite conventionnelle d'élasticité à 0,2 %, $R_{p0,2}$.

Terme autodescriptif.

3.20 contrainte appliquée, σ .

Terme autodescriptif.

3.21 facteur de correction géométrique, Q .

Terme autodescriptif.

3.22 quotient d'amplitude des forces impliquées dans le cycle de fatigue, R : Rapport algébrique de la force minimale à la force maximale d'un cycle d'endurance.

3.23 vitesse de propagation de la fissure: Vitesse instantanée de propagation d'une fissure mesurée par une technique de suivi en continu.

3.24 vitesse moyenne de propagation d'une fissure: Vitesse moyenne de propagation d'une fissure calculée en divisant la longueur de fissure imputable à la corrosion sous contrainte par la durée de l'essai.

3.25 orientation de l'éprouvette: Plan de rupture de l'éprouvette identifié tout d'abord en référence au sens d'application de la contrainte puis par référence au sens de propagation de la fissure exprimé par rapport aux trois axes de référence: X, Y, et Z. Z coïncide avec l'effort principal exercé pendant la fabrication du matériau (axe travers court); X coïncide avec le sens du fibrage (axe longitudinal); et Y est perpendiculaire aux axes X et Z (voir figure 6).

4 Principe

4.1 L'utilisation d'éprouvettes pré-fissurées témoigne de la difficulté à garantir l'absence totale de défauts assimilables à des fissures, introduits soit en cours de fabrication, soit en service, dans les constructions de structures. La présence de tels défauts permet en outre de mettre en évidence une sensibilisation à la fissuration par corrosion sous contrainte qui, dans certains matériaux (par exemple le titane), pourrait ne pas être révélée par des essais à charge constante sur éprouvette lisse. Les principes de la mécanique de la rupture en régime élastique linéaire permettent de quantifier la contrainte existante en front d'une fissure sur une éprouvette ou une structure pré-fissurée à partir d'intensité de contrainte en régime de déformation plane.

4.2 L'essai consiste à soumettre une éprouvette dans laquelle on a créé une fissure par fatigue à partir d'une entaille usinée, soit à une charge ou à un déplacement constant(e) aux points de chargement, soit à une charge croissante par ailleurs soumise à un environnement chimiquement agressif. Le but est de quantifier les fissures en milieu donné, en termes de facteur d'intensité de contrainte limite, K_{ISCC} , et de cinétique de la propagation des fissures.

4.3 Des données empiriques peuvent servir lors de la conception ou des prévisions de durée de vie, car elles permettent d'assurer, soit que les contraintes agissant sur des structures importantes ne suffiront pas à favoriser la fissuration en environnement donné quels que soient les défauts préexistants, soit que l'importance de la vitesse de propagation qui se produirait pendant la durée de vie calculée ou au cours de contrôles peut être tolérée sans risque d'instabilité conduisant à la défaillance.

5 Éprouvettes

5.1 Généralités

5.1.1 On peut utiliser des éprouvettes de géométrie fort différentes, du type de celles qu'on emploie pour les essais de ténacité à rupture. Le type d'éprouvette choisi sera fonction de la forme, de la résistance et de la sensibilité à la fissuration par corrosion sous contrainte du matériau à essayer ainsi que de l'objectif de l'essai.

5.1.2 Il faut absolument que les dimensions de l'éprouvette soient suffisantes pour maintenir des conditions triaxiales dominantes (régime de déformation plane), qui finissent la déformation plastique au voisinage de la pointe de fissure. Les essais de ténacité à rupture révèlent que, pour obtenir une estimation valable de K_{Ic} , il convient que la longueur de la fissure, a , et l'épaisseur, B , ne soient pas inférieures à

$$2,5 \left(\frac{K_{Ic}}{R_{p0,2}} \right)^2$$

et qu'il est recommandé de choisir des éprouvettes plus importantes dans lesquelles a et B sont au moins égaux à

$$4 \left(\frac{K_{Ic}}{R_{p0,2}} \right)^2$$

pour obtenir un état mécanique adéquat.

Du point de vue de la mécanique de la rupture, on ne peut prescrire pour l'heure d'épaisseur minimale conduisant à l'obtention d'une valeur invariante de K_{Isc} . Un environnement agressif pendant les essais de corrosion sous contrainte peut réduire l'ampleur de la plasticité associée à la rupture et donc les dimensions requises pour l'éprouvette assurant la limitation de la déformation plastique. Toutefois, afin de réduire au minimum le risque de régime mécanique inadéquat, il est recommandé de retenir des critères équivalents à ceux observés lors des essais d'endurance à la rupture, en ce qui concerne les dimensions des éprouvettes, c'est-à-dire qu'il convient que a et B ne soient pas inférieurs à

$$2,5 \left(\frac{K_I}{R_{p0,2}} \right)^2$$

et qu'il soient de préférence au moins égaux à

$$4 \left(\frac{K_I}{R_{p0,2}} \right)^2$$

où K_I est la valeur de l'intensité de contrainte à garantir pendant l'essai.

Pour tester la validité de la première de ces expressions, il convient remplacer K_I par le facteur d'intensité de contrainte limite déterminé de cette façon.

5.1.3 Si les éprouvettes doivent servir à déterminer K_{Isc} , il convient que la taille initiale de l'éprouvette résulte d'une estimation du K_{Isc} du matériau (il est préférable, dans un premier temps, de surestimer la valeur K_{Isc} et donc d'utiliser une éprouvette plus importante que celle à laquelle on finirait par aboutir). Si les exigences de service impliquent le recours à un matériau d'épaisseur insuffisante pour remplir les critères de

validité, il est permis d'utiliser des éprouvettes de semblable épaisseur dès lors qu'on indique clairement que le facteur d'intensité de contrainte limite obtenu, K_{QSCC} , ne vaut que pour l'application prescrite. Quand on doit déterminer les modalités de propagation des fissures de corrosion sous contrainte, en fonction du facteur d'intensité de contrainte, il convient que la taille de l'éprouvette résulte d'une estimation de l'intensité maximale de contrainte à laquelle on doit mesurer les vitesses de propagation de fissure.

5.1.4 On peut utiliser deux types principaux d'éprouvettes :

- les premières, pour les essais à déplacement constant, qui sont chargées à l'aide de boulons incorporés;
- les secondes, pour les essais à charge constante, qui nécessitent un dispositif extérieur de chargement.

5.1.5 Les éprouvettes soumises à un déplacement constant, autochargées, présentent l'avantage d'être économiques étant donné qu'aucun matériel extérieur de mise en charge n'est requis. Leur forme compacte facilite également leur exposition à des environnements de service réel. Elles peuvent servir à déterminer K_{Isc} , soit par l'amorçage de fissures de corrosion sous contrainte à partir de pré-fissures de fatigue, auquel cas on doit utiliser une série d'éprouvettes pour repérer précisément la valeur limite, soit par arrêt de la propagation d'une fissure étant donné que, dans des conditions d'essai à déplacement constant, l'intensité de la contrainte décroît progressivement avec la propagation de la fissure. Une seule éprouvette suffira en principe dans ce cas, mais dans la pratique, il est souvent recommandé d'en utiliser plusieurs (au moins trois), si l'on veut tenir compte des inconvénients cités en 5.1.6.

5.1.6 Les inconvénients liés aux éprouvettes à déplacement constant sont les suivants :

- on ne peut mesurer les charges imposées qu'indirectement par des changements de déplacement;
- les produits d'oxydation ou de corrosion peuvent soit favoriser l'ouverture des lèvres de la fissure par effet de coin modifiant ainsi le déplacement imposé et la charge correspondante, soit bloquer les lèvres de la fissure en empêchant la pénétration de l'agent corrosif, ce qui nuit à la précision des mesures de longueur de fissure par des méthodes de résistance électrique;
- des phénomènes de ramification d'émoussage de front de fissure ou de croissance hors du plan de propagation peuvent invalider les résultats;
- l'arrêt de la fissure doit être défini par la croissance de la fissure ou d'une valeur arbitraire de vitesse qu'il peut être difficile de mesurer avec précision;
- la relaxation élastique du système de contrainte pendant la propagation de la fissure peut provoquer un déplacement et des efforts supérieurs à ceux prévus;
- la relaxation plastique dans l'éprouvette liée à des processus dépendant du temps peut aboutir à des efforts inférieurs à ceux prévus;
- il est parfois impossible de placer l'éprouvette dans son environnement d'essai avant de commencer à exercer la contrainte, ce qui peut retarder l'amorçage de la fissuration lors de la poursuite de l'essai.

5.1.7 L'avantage des éprouvettes à charge constante est que les paramètres de contrainte peuvent être quantifiés avec rigueur. Comme la propagation de la fissure entraîne une ouverture croissante de celle-ci, il est moins probable que des couches d'oxyde obstruent la fissure ou exercent un effet d'entaille. On peut alors effectuer directement les mesures de longueur de fissure en faisant appel à certaines méthodes de contrôle continu. On dispose d'un vaste éventail d'éprouvettes à charge constante adapté à la forme du matériau d'essai, aux installations disponibles et aux buts de l'essai. Cela signifie qu'on peut étudier la propagation des fissures dans des conditions, soit de flexion, soit de traction. Les éprouvettes peuvent servir soit à déterminer K_{ISCC} par l'amorçage d'une fissure de corrosion sous contrainte à partir d'une fissure de fatigue précréée, à l'aide d'une série d'éprouvettes, soit par la mesure de la vitesse de propagation des fissures. Les éprouvettes à charge constante peuvent recevoir cette charge pendant l'exposition en milieu d'essai, ce qui évite l'inconvénient d'inutiles périodes d'incubation.

5.1.8 L'inconvénient principal des éprouvettes à charge constante est le poids matériel et financier des systèmes de mise en charge extérieurs requis. Les éprouvettes pour essais en flexion peuvent être testées dans des systèmes à poutres encastrees relativement simples, mais les éprouvettes soumises à des efforts de traction exigent des machines d'essai de rupture en fluage à charge constante ou des machines semblables. Dans ce cas, on peut réduire la dépense en testant des éprouvettes associées en série par des chaînes de chargement conçues pour ne pas être déchargées lors de la rupture des éprouvettes. La taille de ces systèmes de mise sous contrainte signifie qu'il est difficile de tester des éprouvettes à charge constante dans des conditions réelles, mais qu'on peut le faire dans des milieux extérieurs aux systèmes en service.

5.2 Définition de l'éprouvette

La figure 1 illustre certains types d'éprouvettes pré-fissurées qui servent aux essais de corrosion sous contrainte.

5.2.1 On distingue deux types d'éprouvettes à charge constante :

- a) celles où l'intensité de la contrainte augmente avec la longueur de la fissure;
- b) celles où ces deux paramètres ne sont absolument pas liés.

Les éprouvettes de type a) se prêtent à la détermination de K_{ISCC} et à l'étude du rythme de propagation des fissures en fonction de K_I , tandis que celles de type b) conviennent à l'étude fondamentale des mécanismes de corrosion sous contrainte.

5.2.2 Les éprouvettes à charge constante et K croissant peuvent être soumises à des efforts de traction ou de flexion. Selon leur définition, les éprouvettes soumises à un effort de traction peuvent subir des contraintes en front de fissure, qui sont en majorité des contraintes de traction (comme les tôles épaisses à fissure centrale) ou comporter une composante de flexion significative (comme les éprouvettes compactes pour essais en traction chargées au niveau du front de fissure). La présence d'une contrainte de flexion significative en front de fissure peut être néfaste à la stabilité du parcours de propagation de la fissure pendant les essais de corrosion sous contrainte et peut

favoriser la ramification avec certains matériaux. Les éprouvettes pour essais en flexion peuvent être chargées en trois points, quatre points ou en porte-à-faux.

5.2.3 Les éprouvettes à charge constante et K constant peuvent être soumises à des efforts de torsion (par exemple tôles à fissure unilatérale en double torsion) ou de traction (par exemple double poutre profilée, encastree). Bien que subissant un effort de traction, la définition de ces dernières engendre un infléchissement du parcours de la fissure avec tendance de la fissure à sortir du plan de propagation initial, ce qu'on évite par la présence de rainures latérales.

5.2.4 Les éprouvettes à déplacement constant sont généralement autochargées par un boulon placé sur l'une des deux parties qui vient heurter soit une enclume, soit un second boulon de chargement sur la partie opposée. Deux types sont disponibles :

a) celles qui sont sensibles à ($W-a$), comme les éprouvettes compactes de type T à ouverture latérale par effet de coin (T-WOL) dans lesquelles la proximité de la face opposée au front de fissure influe sur le champ de contrainte du front de fissure;

b) celles qui sont insensibles à ($W-a$), comme les éprouvettes (DCB) pour essais en flexion à double poutre dans lesquelles la face opposée est suffisamment éloignée du front de la fissure pour que cette position reste sans effet sur le champ des contraintes en front de fissure.

5.2.5 Certaines géométries des éprouvettes décrites ci-dessus présentent des avantages particuliers qui font qu'on les utilise fréquemment pour les essais de corrosion sous contrainte. On retiendra :

a) les éprouvettes de type poutre encastree pour flexion qui sont d'un usinage aisé permettant des essais peu coûteux à charge constante;

b) les éprouvettes compactes (CTS) pour essais en traction qui limitent au minimum les exigences en matière de matériel d'essai à charge constante;

c) les éprouvettes de type double poutre pour flexion (DCB), autochargées, qui sont faciles à tester dans des conditions de service à déplacement constant;

d) les éprouvettes de type T à ouverture latérale par effet de coin (T-WOL) qui sont également autochargées et minimisent la quantité de matériau nécessaire pour des essais à déplacement constant;

e) les éprouvettes en forme de C qui peuvent être usinées à partir de cylindres à parois épaisses pour étudier la propagation radiale de fissures longitudinales sous charge constante.

La figure 2a) à e) représente successivement les différents types d'éprouvettes standards.

5.2.6 S'il s'avère difficile, par exemple, de maîtriser l'amorçage et/ou la propagation de la fissure de fatigue, on peut réaliser une entaille en chevron comme le montre la figure 3. Si besoin est, son angle de dégagement peut être porté de 90° à 120° .

5.2.7 Quand il est nécessaire de mesurer les déplacements associés à l'ouverture de fissure, comme pendant l'application d'une flèche à des éprouvettes à déplacement constant, des tranchants de couteau permettant de placer les jauges de déplacement peuvent être usinés entre les lèvres de l'entaille, comme le montre la figure 4a). Des tranchants de couteau séparés peuvent être soit vissés, soit collés sur l'éprouvette sur les bords opposés de l'entaille, comme le montre la figure 4b). La figure 4c) donne les détails de réalisation d'une jauge de déplacement d'une poutre conique.

5.3 Considérations concernant le facteur d'intensité de contrainte

5.3.1 La théorie de l'élasticité permet de démontrer que l'intensité de la contrainte, K_I , agissant au front d'une fissure sur des éprouvettes ou des structures de géométries différentes peut être exprimée par des équations du type

$$K_I = Q\sigma\sqrt{a}$$

où

Q est la constante géométrique;

σ est la contrainte appliquée;

a est la longueur de la fissure.

5.3.2 On peut établir la valeur K_I des éprouvettes de géométrie particulière en effectuant une analyse de contrainte par éléments finis, ou par calcul expérimental ou théorique de la compliance de l'éprouvette.

5.3.3 On peut calculer les valeurs de K_I en appliquant un coefficient d'intensité de contrainte (sans dimension), Y , relatif à la longueur de fissure et exprimé par a/W ou a/H pour ($W-a$) sur différentes éprouvettes, où W est la largeur et H la demi-hauteur de l'éprouvette :

$$K_I = \frac{YP}{B\sqrt{W}}$$

pour les éprouvettes compactes pour essais en traction ou en forme de C

ou

$$K_I = \frac{YP}{B\sqrt{a}}$$

pour les éprouvettes de type T chargées pour ouverture par effet de coin

ou

$$K_I = \frac{YP}{B\sqrt{H}}$$

pour les éprouvettes à double poutre pour flexion.

5.3.4 Lorsqu'il est nécessaire d'utiliser des éprouvettes à rainures latérales pour freiner les tendances à la ramification, on peut employer des rainures latérales peu profondes (généralement 5 % de l'épaisseur de l'éprouvette, des deux côtés). On peut prévoir des rainures semi-circulaires ou en V à 60° mais on notera que, même en présence de rainures latérales semi-

circulaires d'une profondeur égale à 50 % de l'épaisseur de l'éprouvette, il n'est pas toujours possible de maintenir la fissure dans le plan de propagation voulu. En présence de rainures latérales, l'effet d'épaisseur réduite, B_n , sur l'intensité de la contrainte peut être pris en compte en remplaçant B par $\sqrt{B \cdot B_n}$ dans les expressions ci-dessus. Il demeure que l'effet d'un rainurage latéral sur le facteur d'intensité de contrainte est loin d'être connu et les facteurs de correction sont à manier avec précaution, notamment en présence de rainures latérales profondes.

5.3.5 La figure 5a) à e) propose des solutions de Y pour les éprouvettes de géométrie courante en matière d'essai de corrosion sous contrainte.

5.4 Préparation des éprouvettes

5.4.1 Si possible, il convient d'usiner les éprouvettes ayant l'orientation requise (voir figure 6) après traitement thermique final. En ce qui concerne les éprouvettes d'un matériau qui ne peut être usiné complètement à l'état traité, le traitement final peut avoir lieu avant la réalisation de l'entaille et la finition, si on enlève au moins 0,5 mm d'épaisseur de matière par face à l'usinage final. La trempe peut toutefois avoir lieu sur des éprouvettes déjà usinées, lorsque ce traitement ne dégrade pas l'état des surfaces et n'entraîne ni contrainte résiduelle, ni fissure de trempe, ni déformation.

5.4.2 Après usinage, il convient de dégraisser complètement les éprouvettes afin de s'assurer qu'aucune contamination du front de fissure ne se produise pendant des essais ultérieurs de pré-fissuration de fatigue ou de corrosion sous contrainte. Lorsqu'il est nécessaire de fixer des électrodes à l'éprouvette par brasage tendre ou fort pour contrôler la fissure par des mesures de résistance électrique, il convient de dégraisser l'éprouvette au terme de cette opération et avant la pré-fissuration, afin d'ôter toute trace de flux résiduel.

5.5 Identification des éprouvettes

Les marques d'identification des éprouvettes peuvent être poinçonnées ou gravées soit sur le côté entaillé de l'éprouvette, soit sur les faces opposées parallèles à l'entaille.

6 Amorçage et propagation de la fissure de fatigue

6.1 Il convient que la machine de fissuration par fatigue exerce une contrainte répartie symétriquement par rapport à l'entaille et de connaître la force exercée à $\pm 2,5$ % près.

6.2 Les conditions d'environnement existant pendant la pré-fissuration de fatigue ainsi que les conditions de contrainte peuvent influencer sur le comportement ultérieur de l'éprouvette pendant les essais de corrosion sous contrainte. Avec certains matériaux, l'introduction du milieu d'essai pendant les opérations de pré-fissuration favorisera un changement du mode normal transcrystallin ductile de fissuration par fatigue à un mode ressemblant davantage à une fissuration de corrosion sous contrainte. Ceci peut faciliter l'amorçage ultérieur d'une fissuration de corrosion sous contrainte et conduire à la détermination de valeurs d'amorçage homogènes de K_{ISCC} . Sauf s'il est possible d'entreprendre les essais de corrosion sous contrainte immédiatement après la pré-fissuration, des traces d'agent corrosif en

front de fissure peuvent favoriser une tendance de celle-ci à s'émousser. La reproductibilité des résultats peut en outre être amoindrie lorsque la préfissuration a lieu dans un environnement agressif, les conditions de charge cyclique favorisant davantage la rupture de fatigue par corrosion. Des dispositifs plus élaborés peuvent s'avérer nécessaires pour mieux contrôler l'environnement pendant la préfissuration. Sauf accord contraire des parties, il est par conséquent recommandé d'effectuer la préfissuration de contrainte dans l'ambiance normale du laboratoire.

6.3 Il convient de préfissurer les éprouvettes par effort de fatigue avec une valeur de R comprise entre 0 et 0,1, jusqu'à ce que la fissure se propage d'au moins 2,5 % W ou 1,25 mm au-delà de l'entaille sur les plans latéraux. La fissure peut être amorcée à des valeurs supérieures de K_I , mais sur les derniers 0,5 mm de la propagation de la fissure, il est bon que la préfissuration de fatigue se poursuive pour une intensité de contrainte maximale aussi faible que possible (si possible en dessous du K_{ISCC} prévu).

6.4 Il est souhaitable que la longueur définitive de la fissure de fatigue soit telle que la condition de prédominance d'un régime de déformation plane soit remplie, c'est-à-dire

$$a > 2,5 \left(\frac{K_I}{R_{p0,2}} \right)^2$$

Cette relation est optimale si le rapport final a/W est compris entre 0,45 et 0,55 [sauf dans le cas d'éprouvettes insensibles à ($W-a$)].

6.5 Pour éviter une interaction entre le champ de contrainte associé à la fissure et celui qui résulte de l'entaille, il convient que la fissure soit comprise dans l'enveloppe décrite par la figure 7.

6.6 Pour s'assurer de la validité de l'analyse d'intensité de contrainte, on inspecte la fissure de fatigue de chaque côté de l'éprouvette pour vérifier qu'aucune partie de la fissure ne présente une pente de plus de 10° par rapport au plan de l'entaille et que la différence des longueurs ne dépasse pas 5 % W .

7 Mode opératoire

7.1 Généralités

7.1.1 Avant les essais, l'épaisseur B et soit la largeur W , soit la demi-hauteur H [dans le cas d'éprouvettes de caractéristiques insensibles à ($W-a$)] doivent être mesurées à 0,1 % W (ou H) près, selon un axe n'étant pas distant du plan de la fissure de plus de 10 % W (ou H). La longueur moyenne de la préfissure de fatigue de part et d'autre de l'éprouvette doit également être déterminée, valeur qui servira à évaluer l'effort requis pour produire l'intensité de contrainte initiale voulue, K_I (voir ISO 7539-1).

7.1.2 Les conditions d'environnement d'essais sélectionnées dépendent de l'objet de l'essai, mais doivent généralement reproduire d'aussi près que possible les conditions de service prévues pour l'alliage ou être assimilables.

7.1.3 On peut appliquer une polarisation électrochimique aux éprouvettes exposées à des environnements aqueux conducteurs à l'aide de contre-électrodes. Il est bon de noter toutefois qu'un contrôle potentiostatique en front de fissure de corrosion sous contrainte peut être aléatoire, étant donné que la longueur de la fissure augmente et doit être prise en compte lorsqu'on étudie les mécanismes de la fissuration de corrosion sous contrainte.

7.1.4 Si cela est possible, il est recommandé de mettre les éprouvettes sous contrainte après les avoir placées dans l'environnement d'essai ou, sinon de les y placer dès que possible après la mise en charge.

7.1.5 Dans la mesure du possible, il est recommandé d'éviter de mettre en contact les points d'appui avec l'environnement de corrosion. Si cela n'est pas possible, les problèmes suivants peuvent survenir :

- a) des effets galvaniques peuvent influencer les résultats, si le système de contrainte ou tout dispositif auxiliaire (comme les électrodes utilisés avec contrôle de fissuration par résistance électrique) est constitué d'un matériau différent de celui de la pièce d'essai; un isolement électrique est alors nécessaire;
- b) une corrosion par crevasse peut se produire dans les petits interstices entre les systèmes de mise en charge et les éprouvettes, qui peut conduire à une rupture prématurée des amarrages, etc.

On peut surmonter ces problèmes en recourant à des cellules d'étude de corrosion locale (voir figure 8) dans lesquelles le milieu circule à proximité de l'entaille, de la préfissure et de la zone prévue de propagation de la fissure dans l'éprouvette. Des problèmes de crevasse peuvent également se produire à l'endroit où l'éprouvette sort de la cellule d'essai; ils seront cependant évités par une conception appropriée de la cellule ou l'utilisation de revêtements de protection en des endroits spécifiques. Si l'on envisage une immersion totale en milieu corrosif, il convient de protéger les points d'application de la charge contre la corrosion.

7.2 Détermination de K_{ISCC} par la méthode d'arrêt de la fissuration

7.2.1 Les éprouvettes à déplacement constant peuvent servir à déterminer K_{ISCC} par la méthode d'arrêt de la fissuration. Une seule éprouvette suffit en principe, mais il est recommandé d'en utiliser plusieurs pour réduire la probabilité d'erreurs.

7.2.2 Pour déterminer K_{ISCC} par caractérisation de l'arrêt de la fissuration, on fixe l'éprouvette préfissurée dans un dispositif de serrage et on laisse, si possible, le milieu corrosif agir dans la zone du fond de l'entaille.

7.2.3 On écarte ensuite les bras de l'éprouvette en faisant tourner un boulon pour obtenir une valeur de K_{II} prédéterminée dépassant la valeur prévue de K_{ISCC} . On doit éviter une déformation trop grande. La déformation, V_y , sur l'axe de contrainte peut être rapportée à la déformation, V_x , mesurée par des jauges de déplacement aux tranchants de couteau situés aux lèvres de l'entaille selon la méthode illustrée à la figure 9. Il convient que la sensibilité de la jauge de déplacement ne soit pas inférieure à 20 mV/mm, pour réduire au minimum les erreurs imputables à

la suramplification d'un signal faible. Il est bon que la linéarité de la jauge soit telle que l'écart par rapport au déplacement réel ne dépasse pas 0,003 mm pour des déplacements n'excédant pas 0,5 mm et 1 % au maximum de la valeur enregistrée pour des déplacements plus importants.

7.2.3.1 En ce qui concerne les éprouvettes à double poutre pour flexion (DCB), insensibles à ($W-a$), la déformation requise pour obtenir l'intensité de contrainte voulue, K_{II} , pour une valeur donnée de a/H peut être calculée d'après le rapport existant entre K_I et V_y indiqué à la figure 5a).

7.2.3.2 Dans le cas d'éprouvettes du type T-WOL, sensibles à ($W-a$), il importe de connaître l'étalonnage de la compliance pour calculer la déformation requise pour produire une intensité de contrainte donnée pour une valeur particulière du rapport de longueur de fissure a/W , en appliquant la relation énoncée à la figure 5b). Des courbes types d'étalonnage de la compliance pour les éprouvettes lisses et à rainure latérale T-WOL sont représentées à la figure 10. Après chargement, il convient de retirer la jauge de déplacement.

7.2.4 Une fois l'éprouvette plongée dans le milieu d'essai, on contrôle l'évolution de la longueur de fissure en fonction du temps. On peut effectuer une mesure optique directe ou indirecte en recourant à des mesures de déformation sur la face arrière, etc. Le facteur d'intensité de contrainte décroît au cours de la propagation de la fissure. La pente de la courbe associant la longueur de la fissure à la durée, définit la vitesse de propagation de la fissure que l'on détermine généralement de façon graphique. La fissure peut éventuellement s'arrêter de se propager, ce qui donne K_{ISCC} . Mais généralement, la fissure croît extrêmement lentement et l'on désigne K_{ISCC} par référence à une valeur de vitesse de propagation définie de façon arbitraire. La valeur la plus appropriée de l'arrêt de propagation dépend du couple métal-environnement considéré et doit faire l'objet d'un accord entre les parties. En ce qui concerne les alliages à haute résistance, on a suggéré des vitesses d'environ 10-7 mm/s, mais l'expérience montre que des fissures de corrosion sous contrainte peuvent se propager à une vitesse inférieure à 10⁻⁹ mm/s. On peut faire diminuer considérablement le temps nécessaire à l'arrêt de la fissuration en choisissant des niveaux de K_{II} proches de K_{ISCC} , si l'on connaît cette valeur approximativement.

7.2.5 Quand on juge que la fissure ne se propage plus, il convient de déterminer la longueur de la fissure et de calculer l'intensité de la contrainte pour obtenir un K_{ISCC} provisoire. On peut confirmer cette valeur en remplaçant la jauge de déplacement et en notant la déformation. L'éprouvette peut alors être déchargée, puis placée dans une machine de traction permettant de mesurer la charge correspondante. Il y a lieu de rompre ensuite l'éprouvette et de mesurer les longueurs maximale et minimale finale de la fissure de corrosion sous contrainte au niveau de 0,5 % W , de même qu'aux trois positions suivantes :

25 % B ; 50 % B ; et 75 % B .

La moyenne de ces trois dernières mesures sert de mesure de la longueur réelle de la fissure entrant dans le calcul de K_{ISCC} .

L'essai n'est pas valable si

a) la différence entre deux des trois dernières mesures dépasse 2,5 % W ;

b) la différence entre les longueurs maximale et minimale de la fissure dépasse 5 % W ;

c) une partie quelconque de la surface de la fissure se situe dans un plan dont la pente dépasse 10° par rapport au plan de l'entaille;

d) le coefficient $2,5 \left(\frac{K_{ISCC}}{R_{p0,2}} \right)^2$ est supérieur à l'épaisseur de l'éprouvette et/ou à la longueur de la fissure.

7.3 Détermination de K_{ISCC} par amorçage de la fissure

7.3.1 On peut utiliser des éprouvettes à charge ou à déplacement constant pour déterminer K_{ISCC} par amorçage de la fissure.

7.3.2 Plusieurs éprouvettes sont nécessaires pour déterminer K_{ISCC} par amorçage de la fissure. On peut adopter ici deux démarches, comme décrit en 7.3.2.1 et 7.3.2.2.

7.3.2.1 Lorsqu'on ne dispose pas de beaucoup de temps, mais par contre d'éprouvettes et de matériel d'essai en abondance, il est tout à fait recommandé d'exposer simultanément une série d'éprouvettes à des contraintes de niveau K_{II} différents qui décrivent une plage dont on suppose qu'elle comprendra la valeur prévue de K_{ISCC} .

7.3.2.2 Si l'on dispose de suffisamment de temps, on peut déterminer K_{ISCC} avec une plus grande certitude et des ressources moindres en éprouvettes et en matériel d'essai, en appliquant une méthode de recherche binaire. Une première éprouvette sert dans ce cas à déterminer la ténacité à la rupture du matériau, K_{Ic} (ou K_Q si cette valeur est inapplicable), selon les méthodes recommandées. Cette valeur définit la limite supérieure de K_{ISCC} . Il convient alors d'effectuer le premier essai de corrosion sous contrainte à une intensité de contrainte initiale égale à la moitié de K_{Ic} , puis d'autres essais à d'autres intensités fractionnaires de K_{Ic} conformément, par exemple, au plan défini dans l'ISO 7539-1, selon que la rupture (ou la propagation de la fissure) est survenue ou non au cours des essais précédents.

7.3.3 En présence d'éprouvettes à déplacement constant, il convient d'exercer la déformation conformément aux recommandations formulées en 7.2.2 et 7.2.3. Avec les éprouvettes à charge constante, la charge requise pour obtenir la contrainte voulue peut être calculée à l'aide d'équations semblables à celles qui accompagnent la figure 5c) et d). Il convient que la machine d'essai servant à appliquer la contrainte permette de mesurer la force appliquée à ± 1 % près et que les dispositifs de fixation soient conçus pour réduire au minimum les frottements au niveau des amarrages de chargement. Il y a lieu d'appliquer l'effort aussi progressivement que possible après exposition au milieu d'essai.

7.3.4 L'essai proprement dit commence dès qu'on applique la charge ou le déplacement requis. On choisit une durée d'essai arbitraire pour déterminer une valeur préliminaire de K_{ISCC} au-delà de laquelle commence la fissuration par corrosion sous contrainte. Cette durée dépend du matériau et de l'environnement considérés et doit faire l'objet d'un accord entre les parties,

mais l'on considère que, pour des essais préalables, 10 h pour les alliages de titane, 100 h pour les aciers faiblement alliés à très haute résistance et 1 000 h pour ceux de résistance plus faible, les aciers fortement alliés de type maraging et les alliages d'aluminium constituent des minima appropriés.

7.3.5 Pendant l'essai, on peut contrôler optiquement la longueur de la fissure à intervalles réguliers ou en continu à l'aide d'une résistance électrique, par extensiométrie sur la face opposée, jauge de déplacement ou d'autres techniques, selon les données de l'expérience. Ces mesures peuvent faciliter la détection de l'amorçage de la fissure et permettre de déterminer sa vitesse de propagation en fonction de l'intensité de contrainte.

7.3.6 Au terme de la période d'essai, il convient de rechercher les signes de défaillance de l'éprouvette. Si celle-ci est intacte, il y a lieu de rompre l'éprouvette et de mesurer les longueurs minimale et maximale de la préfissure de fatigue, si possible au niveau de 0,5 % W , de même qu'aux trois positions suivantes :

25 % B ; 50 % B ; et 75 % B .

La moyenne de ces trois dernières mesures sert de mesure de la longueur réelle de la fissure entrant dans le calcul de K_{QSCC} .

L'essai est valable, c'est-à-dire que $K_{QSCC} = K_{ISCC}$ sauf si

- a) la différence entre deux des trois dernières mesures dépasse 2,5 % W ;
- b) la différence entre les longueurs maximale et minimale de la fissure dépasse 5 % W ;
- c) une partie quelconque de la surface de la fissure de fatigue se situe dans un plan dont la pente dépasse 10° par rapport au plan de l'entaille;
- d) la fissure de fatigue n'est pas dans un seul plan, c'est-à-dire si l'on constate les effets d'un multi-amorçage;
- e) le coefficient $2,5 \left(\frac{K_{QSCC}}{R_{p0,2}} \right)^2$ est supérieur à l'épaisseur de l'éprouvette et/ou à la longueur de la fissure;
- f) il existe une incertitude quant à la longueur de la fissure de fatigue.

Toute trace de propagation d'une fissure de corrosion sous contrainte indique que K_{II} a dépassé K_{ISCC} . Au terme de la série d'essais, la valeur K_{ISCC} est la valeur K_{II} la plus élevée pour laquelle on n'a pas constaté de propagation de la fissure.

7.3.7 Si le temps le permet, on peut contrôler la fiabilité de la valeur préliminaire de K_{ISCC} par un autre essai de corrosion sous contrainte à une intensité de contrainte égale à cette valeur, mais en augmentant l'endurance d'un ordre de grandeur. D'autres essais ne sont nécessaires que si l'on a constaté une propagation de la fissure. Dans le cas contraire, on peut avoir une idée de l'évolution de K_{ISCC} en fonction du temps, en reportant sur un diagramme le temps de rupture des éprouvettes, rupture survenue pendant l'exposition, en fonction de K_{II} pour établir si la courbe obtenue est asymptotique à la valeur K_{ISCC} , comme le montre la figure 11.

8 Rapport d'essai

Il convient que le rapport d'essai contienne les informations énumérées en 8.1 à 8.6.

8.1 Description complète du matériau d'essai, de sa composition, de son état structurel, de ses caractéristiques mécaniques, du type de produit et de l'épaisseur de la section de la pièce dans laquelle on a prélevé les éprouvettes.

8.2 Environnement d'essai, composition chimique, conditions électrochimiques, température, pression et méthode de mise en contact (par exemple immersion totale, brouillard, etc.).

8.3 Pour chaque éprouvette

- a) type d'éprouvette et méthode de mise en charge;
- b) épaisseur B , en millimètres (B_n en cas de rainures latérales);
- c) largeur W , en millimètres;
- d) demi-hauteur H , en millimètres [seulement pour les éprouvettes insensibles à ($W-a$)];
- e) fissuration par fatigue
 - 1) facteur d'intensité de contrainte de fatigue, K_f , pendant la propagation de la portion finale de la fissure;
 - 2) quotient d'amplitude des forces impliquées dans le cycle de fatigue, R ;
 - 3) température et environnement pendant la préfissuration;
- f) longueur de la préfissuration de fatigue, a ;
- g) facteur de contrainte initiale, K_{II} ;
- h) durées initiales d'exposition au milieu et de contrainte; enfin, durée totale d'exposition;
- i) indication de la propagation de la fissure (ou arrêt de la fissure dans le cas d'éprouvettes à déplacement constant);
- j) indication de défaillance éventuelle et, dans ce cas, durée avant défaillance correspondante;
- k) plan et direction de propagation de la fissure, identifiés comme le montre la figure 6.

8.4 K_{Ic} (ou K_Q si les critères de validité ne sont pas observés), quand on l'a déterminé.

8.5 K_{ISCC} (ou K_{QSCC} si les critères de validité ne sont pas observés), en indiquant si cette valeur a été obtenue par amorçage ou arrêt de la fissure et les critères utilisés.

8.6 Le cas échéant, données relatives à la propagation de la fissure (valeurs moyennes ou fonction de l'intensité de la contrainte).