

DETERMINATION DU FACTEUR D'INTENSITE DE CONTRAINTE A
L'ARRET DE FISSURE DE PIECES FORGEES EN ACIER 16MND5 A
PARTIR DE LA PROCEDURE ASTM.
COMPARAISON AVEC LES VALEURS ISSUES D'ESSAIS DE CHOC
THERMIQUE OU PREVUES PAR LE CODE RCC-M.

J.M. FRUND - M. BETHMONT

ELECTRICITE DE FRANCE
DIRECTION DES ETUDES ET RECHERCHES
Département Etude des Matériaux
Les Renardières, Route de Sens
77250 MORET-SUR-LOING; FRANCE

Résumé : Dans le cadre de l'analyse du risque de rupture brutale, en situations accidentelles, des cuves de centrales REP, une étude du concept d'arrêt de fissure est en cours. Le premier objectif, de cette étude, est l'évaluation des valeurs de ténacité K_{Ia} caractéristiques de l'arrêt de fissure à partir d'expériences sur des éprouvettes de taille réduite. Des essais, sur une pièce forgée en acier 16MND5, ont été effectués conformément à deux méthodes expérimentales, l'une préconisée par l'ASTM, l'autre mise au point à l'Ecole des Mines de Paris. La première méthode consiste à utiliser un chargement mécanique sur des éprouvettes maintenues à température homogène, la seconde est basée sur un chargement thermique. Les essais effectués ont montré les limitations de la procédure expérimentale ASTM. Les différentes valeurs de ténacité à l'arrêt obtenues ont ensuite été analysées et comparées, entre elles, et avec celles proposées dans le code RCC-M. Les valeurs obtenues par la méthode ASTM sont supérieures aux valeurs K_{Ia} déterminées à partir d'essais basés sur un chargement thermique. Ces dernières sont en bon accord avec les valeurs proposées dans le code RCC-M.

Abstract: As part of the analysis of the risk of fast fracture of PWR vessels, in emergency conditions, a crack arrest study is under way. The first objective of this study is to evaluate the toughness which characterizes crack arrest through tests on reduced-size specimens. Some tests on a forging steel (A508 cl.3) were conducted in conformity with two experimental methods, one is recommended by the ASTM, the other has been perfected by the Ecole des Mines de Paris. The first method consists in using a mechanical loading on specimens kept under a homogeneous temperature, the second one is based on a thermal loading. The conducted tests proved the limitation of the ASTM experimental procedure. The various arrest toughness values which were obtained were then analysed and compared, between each others, and with values proposed by RCC-M code. The values obtained from ASTM method are superior to K_{Ia} values determined from tests based on thermal loading. The latter correspond to the values given in RCC-M code.

INTRODUCTION

Dans le cadre de l'analyse du risque de rupture brutale, en situations accidentelles, des cuves de centrales REP, une étude du concept d'arrêt de fissure est en cours à Electricité de France.

L'arrêt de fissure peut être étudié à partir de l'approche classique de la mécanique de la rupture. On doit évaluer un critère caractéristique du matériau appelé "facteur d'intensité de contrainte à l'arrêt de fissure" (K_{Ia}). Ainsi, l'objectif de cette étude est l'évaluation des valeurs de ténacité K_{Ia} à partir d'expériences sur des éprouvettes de taille réduite.

La détermination de K_{Ia} fait l'objet d'une norme ASTM. La méthode préconisée consiste à utiliser un chargement mécanique à déplacements imposés sur des éprouvettes, de taille réduite, maintenues à une température homogène. Dans ce cas, le facteur d'intensité de contrainte appliqué par le chargement extérieur diminue au cours de la propagation de la fissure préalablement amorcée, ainsi, l'arrêt de la fissure peut être observé.

Un autre type d'essai est basé sur l'application d'un choc thermique sur une éprouvette; l'arrêt de la fissure est alors possible grâce à l'augmentation de la ténacité au fur et à mesure que la fissure se propage. Dans ce cadre, l'Ecole des Mines de Paris a développé une méthode d'essai originale et des résultats sont disponibles.

L'objet de cette étude est d'analyser et de comparer ces deux méthodes de détermination de K_{Ia} . La méthode de chocs thermiques ayant été largement décrite en [1-3], seuls les principes en seront rappelés.

Plus particulièrement, on comparera les résultats obtenus par les deux méthodes. De plus, on vérifiera la validité des valeurs de référence actuellement proposées dans le code RCC-M. Afin d'argumenter la discussion, la méthode d'essai, source de la détermination de la courbe du code RCC-M, sera présentée de façon sommaire.

MATERIAU ETUDIE

Le matériau étudié est un acier faiblement allié de la nuance A508 classe 3 provenant d'une pièce forgée.

A l'exception des éprouvettes des essais de choc thermique, toutes les autres éprouvettes ont été prélevées en périphérie dans l'épaisseur de la pièce forgée.

La température RT_{NDT} a été déterminée selon la méthode décrite dans le RCC-M (procédure MC 1240). Cette détermination est basée sur des essais de résilience (éprouvettes KV) et des essais PELLINI (éprouvettes P3). On obtient:

$$RT_{NDT} = -40^{\circ}\text{C}$$

LES ESSAIS ISOTHERMES

La procédure d'essai utilisée est celle préconisée par la norme A.S.T.M. 1221 (88) pour mesurer la ténacité à l'arrêt K_{Ia} d'aciers ferritiques [4]. Les essais ont été effectués, à notre demande, à l'IRSID à Saint-Germain en Laye.

Le chargement est effectué par enfoncement quasi-statique d'un coin entre deux contre-coins qui s'appuient sur une éprouvette C.C.A. (figure 1). L'ouverture des lèvres de l'entaille est augmentée jusqu'au déclenchement d'un saut de fissure (figure 2). Ce système rigide permet de limiter les échanges d'énergie entre l'échantillon et la machine durant la phase de propagation [2, 4-9]. La figure 2 représente un schéma du dispositif qui est constitué:

- du coin et du contre-coin,
- d'un système de refroidissement composé de deux plaques de cuivre, parcourues par une circulation d'azote liquide,
- d'une plaque de maintien qui facilite l'extraction du coin,
- d'une enclume sur laquelle repose l'éprouvette et les refroidisseurs.

L'ensemble de ce dispositif est placé sur une machine de traction électro-mécanique de 150 kN. Les frottements sont diminués au niveau des plaques du refroidisseur du coin et des contre-coins par un graissage des surfaces en contact.

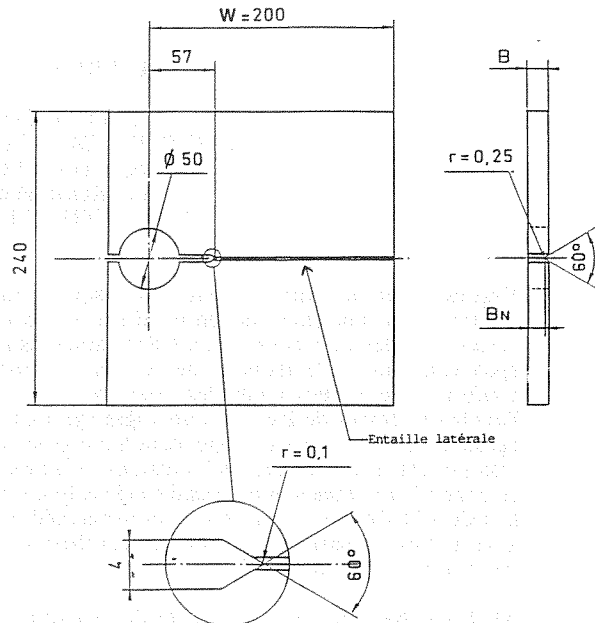


Figure 1: Géométrie de l'éprouvette C.C.A..

La géométrie des éprouvettes est proposée par l'A.S.T.M. (C.C.A.) (figure 1). La dimension caractéristique notée W a été fixée à 200 mm.

Afin d'obtenir des amorçages fragiles en clivage dans tout le domaine de température exploré et des propagations de fissure d'une longueur suffisante, la zone en pointe d'entaille est fragilisée par un point de soudure. On contrôle ainsi l'énergie élastique stockée dans l'éprouvette [4-6].

Les éprouvettes ont été réalisées à l'IRSID. La zone fragilisée obtenue a un diamètre d'environ 15 mm et présente une forme de diabolo. La dureté est comprise entre 320 et 460 HV dans toute l'épaisseur.

Chaque éprouvette présente une face plane où sont collées des jauges. L'autre comporte une entaille latérale afin de guider la fissure durant sa propagation (figure 1). La température de l'éprouvette est mesurée au niveau du point de soudure avec deux thermocouples.

Le dispositif de chargement ne permet pas d'avoir accès aux charges appliquées à l'éprouvette. Ceci est dû aux phénomènes de frottement non maîtrisés entre le coin et les contre-coins. Ainsi, pour dépouiller l'essai, nous devons utiliser le déplacement des lèvres de l'entaille de l'éprouvette. L'ouverture d de l'échantillon est mesurée à $0,25 W$ de la ligne de chargement à l'aide d'un capteur à lames. Un second capteur à lames suit l'évolution de

l'écartement des contre-coins. Cette mesure est destinée à mettre en évidence d'éventuels phénomènes parasites lors du chargement.

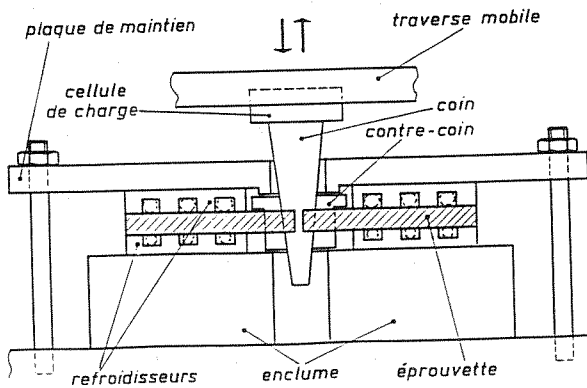
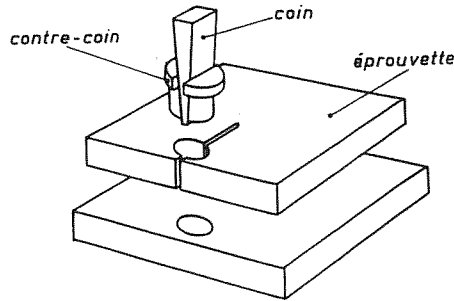


Figure 2: Principe et schéma d'ensemble du dispositif de chargement.

Les résultats des essais ont été interprétés selon la procédure décrite en [5].

L'A.S.T.M. préconise, pour le dépouillement des essais, une approche statique simplifiée introduite par CROSLY et RIPLING [10, 11]. Elle consiste à évaluer K_{Ia} à partir de la longueur de fissure à l'arrêt, a_f , et du chargement critique δ . Ces grandeurs sont mesurées après la phase de propagation.

Les valeurs du facteur d'intensité de contrainte K sont obtenues d'après la formule :

$$K = \frac{E}{\sqrt{W}} (\delta) f(a/W) \sqrt{\frac{B}{B_n}} \quad (\text{en MPa}\sqrt{\text{m}})$$

où :

δ : déplacement des lèvres de l'entaille à 0,25W de la ligne de chargement δa_0 à l'amorçage, δa_f à l'arrêt),
 E : module d'Young; W est la dimension caractéristique et B est l'épaisseur de l'éprouvette,
 a : longueur de la fissure initiale (a_0) ou à l'arrêt (a_f), (a_f est mesurée après rupture de l'éprouvette).

B_n : l'épaisseur minimale de l'éprouvette dans le plan de la fissure.

15 éprouvettes ont été testées à des températures variant entre -60°C et 0°C. Les résultats des essais sont donnés dans le tableau 2. Tous les essais respectent les conditions de validité imposées par la norme A.S.T.M.

Plusieurs difficultés ont été rencontrées aux cours des expériences :

- aux plus basses températures (essais P8, T6, P2, P7 et P5), des bifurcations de fissures en deux branches se produisirent. Pour le dépouillement il a été considéré la branche la plus longue. Ce comportement semble inhérent à l'acier testé aux températures inférieures ou égales à -40°C.

Un approfondissement de l'entaille latérale a permis de remédier à cette difficulté;

- pour les premiers essais réalisés à 0°C ainsi que l'essai effectué sur l'éprouvette P4 à la température de -20°C, la fissure s'est arrêtée en atteignant le métal de base, juste à la sortie de la zone fragilisée. Ces essais ne peuvent donc pas être considérés comme valides. L'augmentation du rayon en fond d'entaille jusqu'à 1 mm, afin d'augmenter le chargement initial, a permis de résoudre ce problème (essai T1).

REPÈRE	T° (°C)	a ₀ (mm)	a _f (mm)	a _f -a ₀ (mm)	d a ₀ (mm)	d a _f (mm)	K ₀ MPa√m	K _a MPa√m
T2	-62	64,70	121,70	57	0,90	0,94	103,89	65,7
P8	-62	64,70	113,70	49	0,90	1,02	103,89	77,24
T7	-63	64,70	107,70	43	0,75	0,80	90,01	66,68
T6	-40	64,70	107,70	43	1,15	1,22	132,74	97,81
P2	-40	64,70	112,70	48	1,41	1,43	162,76	109,3
P7	-40	64,70	121,70	57	1,08	1,13	129,62	82,21
P3	-20	76,7	129,70	53	0,96	1,10	104,79	73,62
P5	-20	75,7	131,70	56	1,40	1,42	154,06	93,0
P1	-21	64,70	76,70	12	1,29	1,39	154,82	151,7
T4	-20	64,70	145,70	81	1,97	2,00	236,44	111,2
P4	-20	64,70	69,70	5	2,02	2,02	242,44	233,2
P6	0	64,70	75,70	11	2,50	2,50	300,05	275,1
T5	0	64,70	77	12,3	2,25	2,25	270,04	245,6
T3	0	64,70	75,70	11	2,14	2,16	256,84	237,7
T1	0	64,70	141,70	77	2,89	2,99	346,85	174,7

Tableau 2: Résultats des essais selon l'ASTM.

La figure 3 présente les variations du facteur d'intensité de contrainte à l'arrêt (K_{Ia}) en fonction de la température.

LES ESSAIS ANISOTHERMES

Une installation d'essai a été développée à l'Ecole des Mines de Paris. Elle consiste à utiliser un disque ou un cylindre contenant une fissure initiale longitudinale en surface externe. On plonge cette éprouvette dans l'azote liquide et l'on chauffe à l'aide d'un inducteur sa surface interne (figure 4). Il s'établit alors un gradient de température dans l'épaisseur de l'éprouvette qui génère un champ de contrainte tendant à ouvrir la fissure [1- 3, 7].

Lorsque la valeur de la ténacité K_{Ic} est atteinte, l'amorçage de la fissure survient. Plusieurs effets viennent alors s'opposer à son avancée jusqu'à l'arrêt:

- la valeur de K après avoir augmenté se stabilise puis décroît (calculs statiques) (figure 5),
- le taux d'énergie dissipée par plasticité en pointe de fissure augmente car la fissure rencontre sur sa trajectoire des zones de plus en plus chaudes (figure 5).

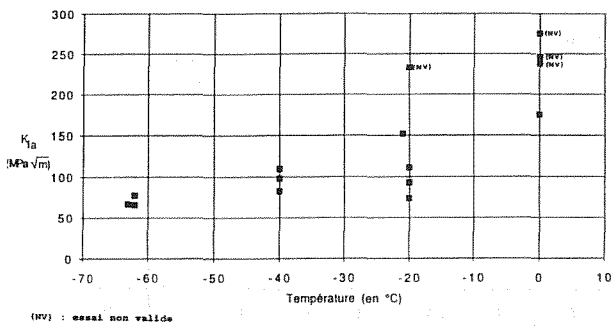


Figure 3: Variation du facteur d'intensité de contrainte à l'arrêt de fissure en fonction de la température (essais selon l'ASTM).

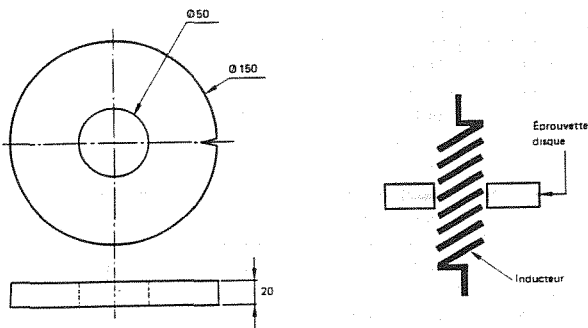


Figure 4 : Conditions expérimentales de l'essai de choc thermique à l'Ecole des Mines de Paris.

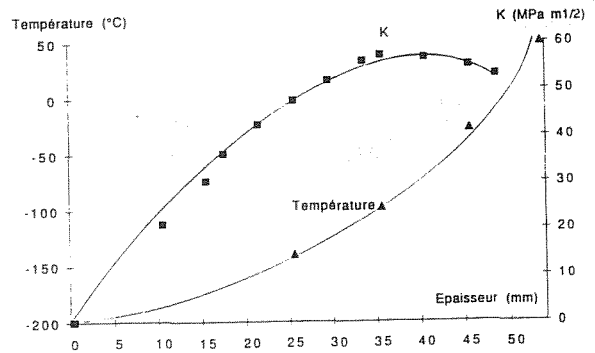


Figure 5: Variations du facteur d'intensité de contrainte et de la température en fonction de l'épaisseur de l'éprouvette.

Trois essais sur cylindre (hauteur 220 mm) et deux essais sur disque (hauteur 20 mm) ont été effectués à l'Ecole des Mines. Le tableau 3 rassemble les résultats obtenus (les températures de référence sont mesurées en fond de fissure).

Les éprouvettes A1, A2 et D1 (cylindre) ont été prélevées dans le même plan que les éprouvettes C.C.A., mais, en revanche, les sens de sollicitation et de propagation sont quelconques. Le taux de corroyage étant identique pour le sens radial et circonférentiel, il nous est impossible de retrouver les axes de sollicitation et de propagation. L'identité inclusionnaire des sens radial et circonférentiel nous permet de considérer le plan constitué par ces deux axes comme isotrope.

n° de l'essai	Type d'éprouvette	Entaille ou fissure	Température à l'arrêt (en °C)	K_{Ia} (en $MPa\sqrt{m}$)
A1	Cylindre	Entaille	11	75
A2	Cylindre	Entaille	-13	54,6
D1	Cylindre	Entaille	-74	32,3
D2A	Disque	Entaille	-36	51,2
D2B	Disque	Fissure	-53	45,1

Tableau 3: Essai de choc thermique: valeur des facteurs d'intensité de contrainte à l'arrêt de fissure.

Les éprouvettes D2A et D2B (disque) ont été prélevées suivant des axes de sollicitation et de propagation identiques aux éprouvettes C.C.A..

Seule l'éprouvette D2B a été préalablement pré-fissurée par fatigue.

LES DONNEES DU CODE RCCM

Le code RCC-M (annexe ZG) a repris à son compte la courbe de référence du code A.S.M.E.. Il est important de noter que cette dernière a été déterminée à partir d'essais

de traction sur larges plaques dans lesquelles un gradient de température est imposé (figure 6). Avec cette configuration, la fissure s'amorce dans un matériau plus froid donc plus fragile et se propage vers une zone plus chaude de meilleure ténacité [7].

L'analyse effectuée afin de déterminer la courbe référence est une analyse statique.

COMPARAISON DES VALEURS DE TENACITE A L'ARRET OBTENUES PAR LES DIFFERENTS TYPES D'ESSAI

La figure 7 rassemble sous la forme de courbes "K_{Ia}; T- RT_{NDT}" (T : température) les différents résultats obtenus par les essais isothermes (norme A.S.T.M.) et chargement thermique, et les compare avec la courbe référence du code RCC-M.

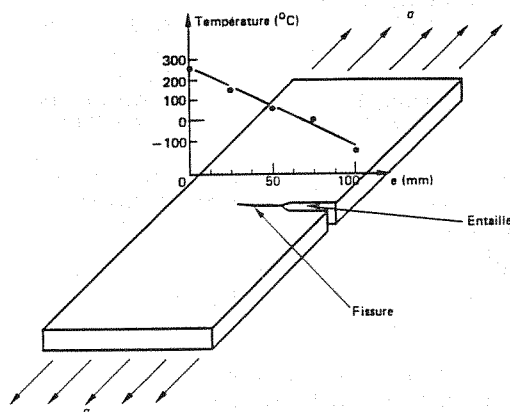


Figure 6: Description de l'essai d'arrêt de fissures sur larges plaques soumises à un gradient thermique [7].

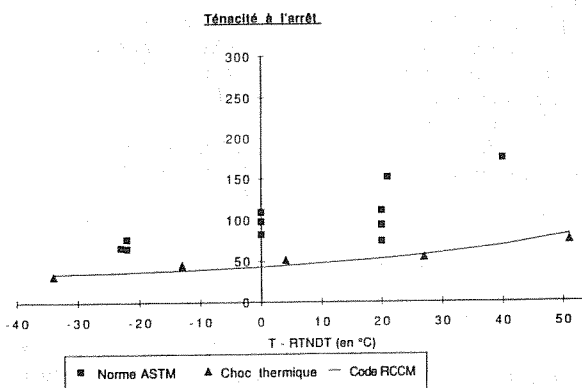


Figure 7

Deux populations de résultats apparaissent bien distinctes; une population composée des résultats d'essais isothermes, une autre, composée des résultats d'essais avec gradient de température. Plusieurs points peuvent expliquer cette dualité.

Différence de méthodologie ?

Les essais isothermes présentent deux limitations importantes. En effet, pour obtenir un amorçage par clivage une modification métallurgique locale de matériau est nécessaire. Le dépôt d'un point de soudure introduit des contraintes résiduelles dont l'influence ultérieure sur le comportement d'une fissure n'est pas connue. Par ailleurs, le chargement n'est pas correctement contrôlé. M. DI FANT [2] a mis en évidence un enfoncement supplémentaire du coin après l'amorçage. L'amplitude des perturbations qui en résultent n'est pas connue.

Dans l'expérience de choc thermique, les conditions de chargement sont maîtrisées pendant la phase de propagation. En effet, les gradients thermiques introduits dans l'éprouvette n'évoluent que très peu pendant les 100 ms que dure le saut de fissure.

Effet d'échelle ?

Un effet d'échelle (les éprouvettes A1, A2 et D1 ont une épaisseur de 220 mm) peut difficilement expliquer la différence entre les résultats des différentes méthodes, puisque les éprouvettes D2A et D2B ont une épaisseur de 20 mm (valeur identique aux éprouvettes C.C.A.).

Effet d'orientation des éprouvettes ?

La différence d'orientation des éprouvettes A1, A2 et D1 avec les éprouvettes C.C.A. n'explique pas la différence entre les deux types d'essais (les éprouvettes D2A et D2B ont la même orientation que les éprouvettes C.C.A.).

Raisons mécaniques ?

Le point, sans doute le plus important, est la différence des situations physiques correspondant aux différentes expériences. Les essais isothermes sont basés sur un chargement purement mécanique (à déplacements imposés) avec diminution du facteur d'intensité de contrainte au cours de la propagation d'une fissure préalablement amorcée, alors que les essais de type choc thermique sont basés sur un chargement thermique avec une ténacité croissante au cours de la propagation. Les essais type A.S.M.E. présentent, à la fois, un chargement mécanique (mais à effort imposé) et un chargement thermique.

Ainsi, nous pouvons remarquer la proximité des résultats obtenus par chargement thermique. D'autre part, il est important de noter que les valeurs du code RCC-M sont des valeurs réalistes; elles ne présentent pas de marge de sureté.

Résultats de la littérature

Il est à noter qu'une comparaison identique sur un acier E36 [2] n'a pas permis de dissocier deux populations. Mais, cette étude ne comportait que deux résultats expérimentaux issus d'essais de choc thermique.

Importance des effets dynamiques

Les expériences ont été interprétées à l'aide d'une approche statique négligeant les forces d'inertie dans l'analyse mécanique. Les vitesses de fissures mesurées aux températures de -60°C et -40°C (respectivement 762 et 670 m/s) sont loin d'être négligeables devant la célérité des ondes transversales (2600 m/s). A priori, une analyse dynamique serait justifiée mais des études ont montré que, d'une part il est possible de réduire cet effet dynamique en changeant la géométrie des éprouvettes C.C.A. [12], d'autre part, il apparaît que l'analyse statique se révèle toujours conservatrice [2].

Les différents aspects développés dans ce chapitre feront l'objet d'investigations ultérieures, en particulier, à partir d'une recherche bibliographique.

CONCLUSIONS

Dans le cadre de l'analyse du risque de rupture brutale des cuves REP, une étude en terme d'arrêt de fissure est en cours.

Une première étape de cette étude est d'évaluer un critère caractéristique du matériau appelé "facteur d'intensité de contrainte à l'arrêt de fissure".

Dans le cas de l'acier A508 C13, des essais ont été effectués selon la méthode préconisée par l'ASTM. Les résultats ont été comparés avec ceux de l'Ecole des Mines de Paris obtenus à partir d'essais de type choc thermique.

Les essais ont été effectués et ont montré que le procédé expérimental, défini par la norme ASTM 1221, est relativement aisé de mise en oeuvre. L'analyse statique des expériences ne comporte pas de difficultés majeures.

Cependant, cette méthode expérimentale présente deux limitations importantes :

- le dépôt d'un point de soudure en fond d'entaille introduit des contraintes résiduelles,
- il apparaît que le chargement à déplacements imposés ne peut pas être correctement contrôlé.

Les valeurs obtenues par la méthode ASTM sont supérieures à celles qui ont été obtenues par choc thermique. Des hypothèses sont suggérées pour interpréter cette différence; la validité de ces hypothèses nécessitera des compléments d'études bibliographiques et expérimentales.

On constate, d'autre part, que les valeurs provenant des essais de chocs thermiques sont les seules qui soient en

accord avec celles que propose le code RCC-M: les valeurs déduites des essais ASTM apparaissent trop "optimistes".

Remerciements: Les auteurs remercient Monsieur le Professeur PINEAU (Ecole des mines de Paris), ainsi que Messieurs DI FANT (IRSID Saint-Germain en Laye) et GENTY pour leur précieuse collaboration à cette étude.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] - A. GENTY - "Etude expérimentale et numérique de l'amorçage et de l'arrêt d'une fissure sous choc thermique dans un acier faiblement allié (16MND5)", Thèse de Doctorat en Sciences et Génie des Matériaux de l'Ecole des Mines de Paris, 1989.
- [2] - M. DI FANT - "Mécanique et mécanismes de la rupture dynamique dans un acier peu allié", Thèse de Doctorat en Sciences et Génie des Matériaux de l'Ecole des Mines de Paris, décembre 1990.
- [3] - M. DI FANT - A. GENTY - A. PINEAU - "Thermal shock induced crack arrest of two alloys steels", High temperature technology, Vol. N°8, p.105-114, mai 1990.
- [4] - Determining Plane-Strain Crack-Arrest Fracture Toughness, KIa, of Ferritic Steel. Norme ASTM E1221 - 88.
- [5] - M. DI FANT - A. FONTAINE - A. PINEAU - C. ROUX - "Conditions d'arrêt de fissures de clivage dans un acier de construction métallique", Rapport IRSID PE 89317, juillet 1989.
- [6] - M. DI FANT - E. LESUEUR - "Compte rendu d'essais de mesure de ténacités à l'arrêt d'un acier forgé 16MND5", Rapport IRSID PE5780/MDF/LT, novembre 1991.
- [7] - D. BUISINE - M. BETHMONT - "Evaluation du risque de rupture brutale des cuves REP en situation accidentelle : des défauts dans les veines sombres à l'arrêt des fissures", Procès-Verbal EDF HT-46/COM 1189-A, février 1991.
- [8] - G. T. HAHN et Coll. - "A cooperative program for evaluating crack arrest testing methods", ASTM - STP 711, 1978.
- [9] - B. MUKHERJEE - D. M. Mc CLUSKEY - "Development of a proposed ASTM method for crack arrest fracture toughness of ferritic materials", Proceedings of the International Symposium on Fracture Mechanics - CIMM vol. 6, 1987.
- [10] - P. B. CROSLY - E. J. RIPLING - "Crack arrest toughness of pressure vessel steels", Nuclear Engineering and Design, vol. 17, p. 32-45, 1977.
- [11] - P. B. CROSLY - E. J. RIPLING - "Towards development of a standard test for measuring K_{Ia} ", Fast Fracture and Crack Arrest, ASTM STP 627, p.372-397, 1977.
- [12] - J. BEINERT - J.F. KALTHOFF - "The development of a crack arrest test specimen with reduced dynamic effects", Application of Fracture Mechanics to Materials and Structures, Martinus Nijhoff Publishers, 1983.