

# Détermination expérimentale de la tenacité dynamique des matériaux fragiles : une nouvelle approche

## Experimental determination of the dynamic fracture toughness of brittle materials : a new approach

H. MAIGRE\*, D. RITTEL\*, H.-D. BUI\*\*

### RÉSUMÉ

On présente une nouvelle approche expérimentale de la détermination de la ténacité dynamique des matériaux fragiles. Cette approche utilise les propriétés d'invariance par contour de l'intégrale  $H$  qui relie forces et déplacements au facteur d'intensité des contraintes de la structure entaillée. L'ensemble expérimental comprend l'Éprouvette Compacte de Compression (et sa jauge de rupture) spécialement adaptée au dispositif de chargement dynamique et mesures du type barre d'Hopkinson. On mesure ainsi les forces et déplacements appliqués au bords de l'éprouvette. La ténacité est ensuite déterminée par la résolution d'une équation linéaire de convolution temporelle. On dispose donc d'une méthode, validée par des résultats expérimentaux, qui permet d'accéder aisément et avec exactitude à la ténacité dynamique des matériaux.

### ABSTRACT

We introduce a new experimental approach to the determination of the dynamic fracture toughness of brittle materials. This approach relies on the path independent integral  $H$  which relates the forces and displacements on the boundary of a cracked structure to the stress intensity factor. The experimental setup comprises the Compact Compression Specimen (and its fracture gage) which were especially designed to be inserted into a split Hopkinson bar apparatus for dynamic experiments. With measured boundary forces and displacements, the dynamic toughness is thus determined by solving a linear convolution equation. This new method which has been validated in a series of experiments enables easy and accurate assessment of the dynamic fracture toughness of materials.

**MOTS-CLEFS** Ténacité dynamique - Facteur d'intensité dynamique des contraintes - Expériences - ECC - intégrale- $H$

**KEY WORDS** Dynamic fracture toughness - Dynamic stress intensity factor - Experiments - CCS -  $H$ -integral.

## 1. INTRODUCTION

Les divers aspects de la détermination de la ténacité statique  $K_{Ic}$  sont aujourd'hui bien maîtrisés tant au point de vue théorique qu'expérimental. On dispose à cet effet de procédures standardisées qui sont bien connues des industriels [1]. En revanche, il n'en est pas de même quant à la ténacité dynamique  $K_{Id}$  et l'on peut distinguer trois types d'approches globales. La première est essentiellement empirique et vise à corréliser des propriétés mécaniques diverses telles que la limite d'élasticité, la striction etc. avec tant  $K_{Ic}$  que  $K_{Id}$  [2, 3]. La seconde, plus rigoureuse, fait appel à des méthodes optiques de caractérisation du fond de fissure en propagation et la déduction du  $K_{Id}$  (pour une revue détaillée, voir [4]). La dernière recourt à des simulations numériques par éléments finis des expériences de rupture dynamique et il s'agit donc d'une approche hybride expérimentale-numérique [5]. Le point commun à toutes ces études est qu'elles concernent surtout la détermination de  $K_{Id}$  pendant la phase de propagation en extrapolant jusqu'à l'initiation pour déterminer la ténacité dynamique.

En France, une nouvelle approche théorique du problème a été développée par Bui et coll. [6, 7]. Cette approche a été mise en pratique récemment au Laboratoire de Mécanique des Solides [8]. Fondamentalement différente des autres, cette méthode repose sur une théorie exacte et elle est, de plus, relativement facile à mettre en œuvre.

Dans cet article, nous présentons en

détail notre nouvelle approche en insistant plus particulièrement sur les aspects expérimentaux et les résultats obtenus à ce jour.

## 2. DÉTERMINATION DE LA TENACITÉ DYNAMIQUE

### 2.1 THÉORIE - FACTEUR D'INTENSITÉ DES CONTRAINTES EN DYNAMIQUE

Avant d'aborder les aspects pratiques de la méthode, il est souhaitable de présenter succinctement quelques résultats essentiels sur lesquels elle est fondée.

Rappelons tout d'abord que pour un solide élastique entaillé soumis à un chargement quelconque, les champs de contraintes et de déformations sont singuliers en fond de fissure et la mesure de cette singularité est caractérisée par le facteur d'intensité des contraintes  $K_I$  [9]. La résistance du matériau à la fissuration correspond à la valeur critique de  $K_I$  au moment de la rupture. Cette valeur, la ténacité du matériau, est notée  $K_{Ic}$  pour un chargement statique et  $K_{Id}$  pour un chargement dynamique.

Considérons maintenant un solide de bord  $S$ , comprenant une fissure de longueur  $a$ . Soient  $u(t)$  et  $T[u(t)]$  les champs de déplacement et de forces formant le chargement dynamique appliqué sur  $S$ . On définit de même un champ auxiliaire  $v$  semblable à  $u$ . Les singularités correspondantes sont notées  $K_{Id}^u$  et  $K_{Id}^v$  respectivement. Pour un matériau élastique-linéaire, on montre dans le cas dynamique (par analogie au cas statique), l'existence d'une intégrale invariante par rapport au contour  $H$  définie par :

$$H := \frac{1}{2} \int_S T[u] * \frac{\partial v}{\partial a} dS = \frac{1-v^2}{E} K_{Id}^u * K_{Id}^v$$

où le symbole \* indique un produit de convolution temporelle.  $H$  peut donc être indifféremment évaluée suivant deux contours : sur le bord extérieur de la structure (contour 1) ou bien près du fond de fente (contour 2).  $H$  contient explicitement :

- à gauche de l'égalité des grandeurs globales (forces & déplacements) - accessibles expérimentalement (contour 1) ;
- à droite de l'égalité un produit de convolution de deux grandeurs, dont l'une d'entre elles  $K_{Id}^u$  est la grandeur recherchée (contour 2).

Pour déterminer le facteur d'intensité des contraintes, il suffit donc de :

- mesurer  $T$  et  $u$  sur une structure entaillée,
- déterminer les grandeurs auxiliaires  $v$  et  $K_{Id}^v$  pour cette structure, par exemple au moyen d'un calcul par éléments finis,
- enfin évaluer  $H$  et résoudre l'équation de convolution linéaire menant au  $K_{Id}$ .

### 2.2 DÉTERMINATION EXPÉRIMENTALE DE LA TENACITÉ DYNAMIQUE

#### 2.2.1. Dispositif expérimental

Le dispositif connu sous le nom de « barres d'Hopkinson » permet d'appliquer un chargement dynamique modulable à un spécimen tout en mesurant les efforts et les déplacements des faces impactées [10]. Ce dispositif est fréquemment employé pour l'étude du comportement dynamique des matériaux, cependant il est parfaitement adapté à des structures entaillées [11]. Dans ce cas, il est nécessaire d'adapter le dispositif ou le spécimen afin d'assurer un chargement d'ouverture de fis-

\* Laboratoire de Mécanique des Solides, URA 317 - CNRS, Ecole Polytechnique, F-91128 Palaiseau Cedex, France  
\*\* Electricité de France, D.E.R.-I.M.A.-M.M.N F-92141 Clamart Cedex, France

sure de type mode I. Pour nos études, nous avons conçu une éprouvette originale, l'Éprouvette Compacte de Compression (ECC). Grâce à sa géométrie la fissure s'ouvre avec un chargement en compression. On s'affranchit ainsi de dispositifs encombrants qui inversent la compression en traction. Le dispositif expérimental est représenté en figure 1 : il s'agit des 2 barres d'Hopkinson avec une ECC intercalée

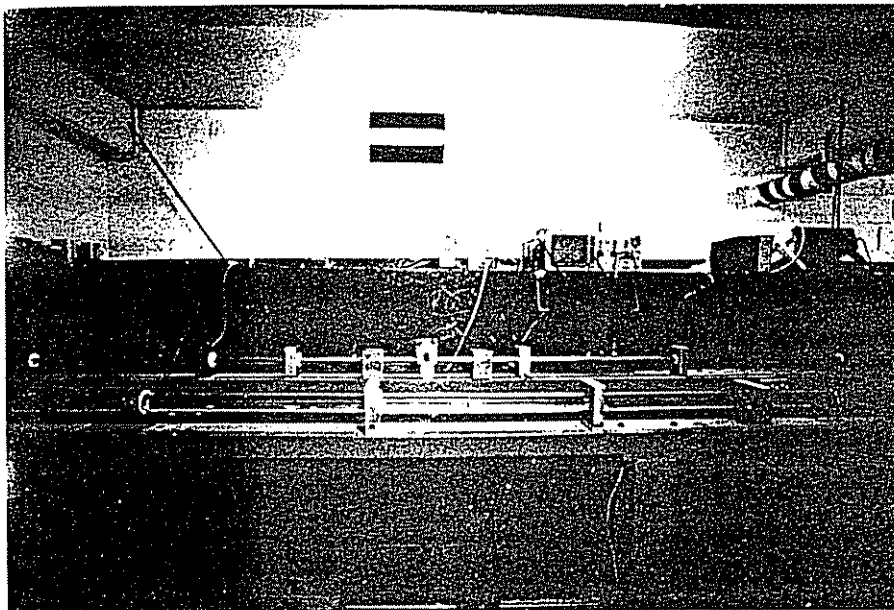
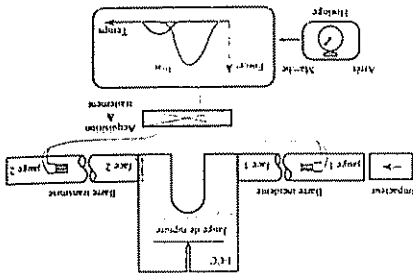


Figure 1a : Représentation schématique du dispositif expérimental barres d'Hopkinson et éprouvette ECC avec sa jauge de rupture. On mesure ainsi les forces et vitesses aux interfaces 1 et 2 de même que le temps de rupture  
Schematic view of the experimental SHB-CCS (ECC) apparatus. Forces and displacements are measured at 1 and 2 interfaces as well as the time to fracture.

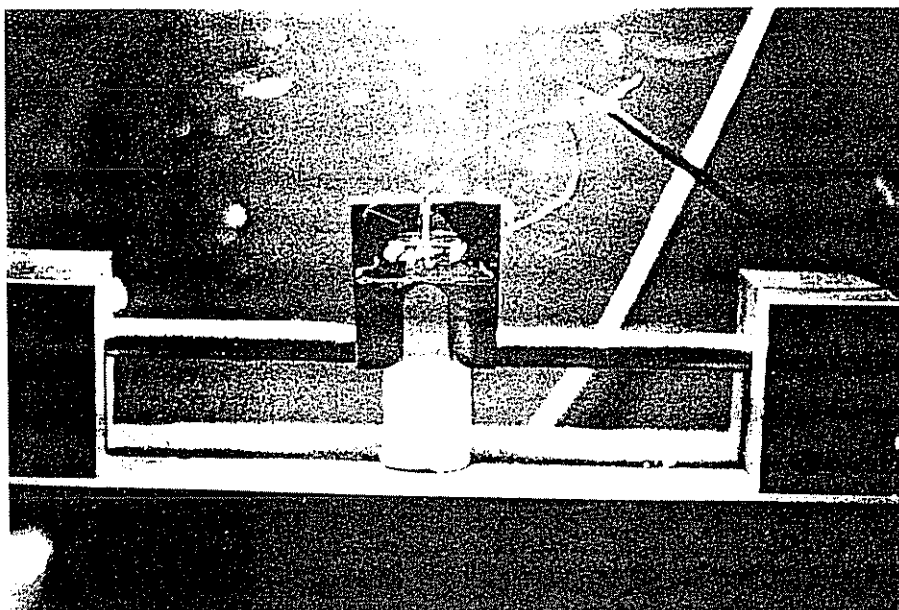


Figure 1b : Le dispositif expérimental utilisé au LMS.  
The experimental setup used in our lab (LMS).

Sans entrer dans le détail du principe de fonctionnement des barres d'Hopkinson on retiendra les points suivants :

- on distingue 2 interfaces : l'interface barre entrante-spécimen et l'interface spécimen-barre sortante.
- une jauge de déformation est collée sur chacune des barres : elle mesure le signal incident (et réfléchi) et le signal transmis par le spécimen respectivement. Ces signaux permettent de déterminer les efforts et les vitesses aux interfaces mentionnées.

On accède ainsi à  $T$  et  $u$  évoqués dans la théorie. La ténacité dynamique correspond à la valeur du facteur d'intensité des contraintes à l'instant de la rupture. Ce dernier est signalé par une jauge de rupture constituée d'un fin fil conducteur placé en fond de fissure et reliée à une horloge. Celle-ci est déclenchée par l'impulsion incidente et arrêtée lorsque le fil est rompu suite au départ de la fissure.

## 2.2.2. Référence numérique

Comme on l'a dit précédemment, on réalise le calcul d'un demi-ECC (pour raisons de symétrie) afin d'obtenir le couple  $\frac{dV}{da}$  et  $K_{I0}$  de référence. L'évolution du chargement est choisie arbitrairement mais il est appliqué sur l'interface conformément à l'expérience. La longueur de fissure,  $a$  et son incrément  $da$ , sont choisis de manière à encadrer les longueurs de fissure des spécimens. On veille cependant à limiter  $da$  pour maintenir une précision satisfaisante. Le facteur d'intensité des contraintes  $K_{I0}$  est calculé sur la base de l'ouverture du fond de fissure (COD) en utilisant la relation classique :

$$COD(r, \theta = \pi) = K_{I0} \frac{8(1-\nu^2)}{E} \sqrt{\frac{r}{2\pi}}$$

Ces références sont générées une seule fois pour un type de matériau, quelque soit la longueur de fissure (entre  $a$  et  $a + da$ ) et le chargement. Ceci permet une grande variété d'exploration expérimentale.

## 3. EXEMPLE D'APPLICATION

Une première série d'expériences a été menée sur un acier doux (0,35 % vol C, HRB 65). Plusieurs éprouvettes entaillées ont été impactées sans rupture [8]. D'autres ont été cassées et un enregistrement complet de la rupture avec jauge de rupture a été réalisé sur une ECC de 16,5 mm d'épaisseur avec une entaille de 18,33 mm. Ceci correspond à une profondeur relative de 0,52. Le rayon de courbure du fond de fissure était d'environ 0,17 mm. On n'a pas cherché dans cet essai à créer une fissure de fatigue bien plus pointue comme requis dans les standards d'évaluation de la ténacité statique. La longueur de l'impacteur était de 10 cm ce qui correspond à une durée de chargement d'environ 40  $\mu$ s. La détermination des vitesses et des efforts aux interfaces a été faite au moyen du logiciel de dépouillement de signaux sur barres d'Hopkinson, DAVID [13].

La figure 2 représente l'ECC testée. Pour cette éprouvette, on a enregistré la rupture 57  $\mu$ s après que l'impulsion a atteint l'interface entrante. Sur la figure 3 on présente les signaux bruts enregistrés par les jauges. Les efforts et les vitesses aux interfaces se trouvent en figure 4a et 4b respectivement. On remarquera que la rupture survient bien au-delà du maximum de force ce qui illustre bien le caractère dynamique du problème.

Le  $K_{I0}(t)$  expérimental a été déterminé par notre méthode, la résolution de l'équation de convolution linéaire. On trouve qu'à l'instant de rupture la ténacité dynamique était d'environ de 180  $MPa \sqrt{m}$  (à  $K_{I0} = 10^8 MPa \sqrt{m/s}$ ).

Afin d'établir une comparaison, on a simulé l'ensemble échantillon-barres dans un calcul par éléments finis. Le chargement dynamique imposé étant celui de l'expérience. On a ainsi déterminé les vitesses aux interfaces en supposant des interfaces parfaites. Comme on peut le voir en figure 5, les résultats expérimentaux et ceux de la simulation numérique sont en excellent accord jusqu'à l'instant de la rupture. Dans le même calcul on a déterminé le COD ce qui permet d'évaluer numériquement l'évolution de  $K_{I0}(t)$ .

En figure 6 on représente l'évolution de  $K_{I0}(t)$  déterminé par notre méthode et par la simulation numérique. On

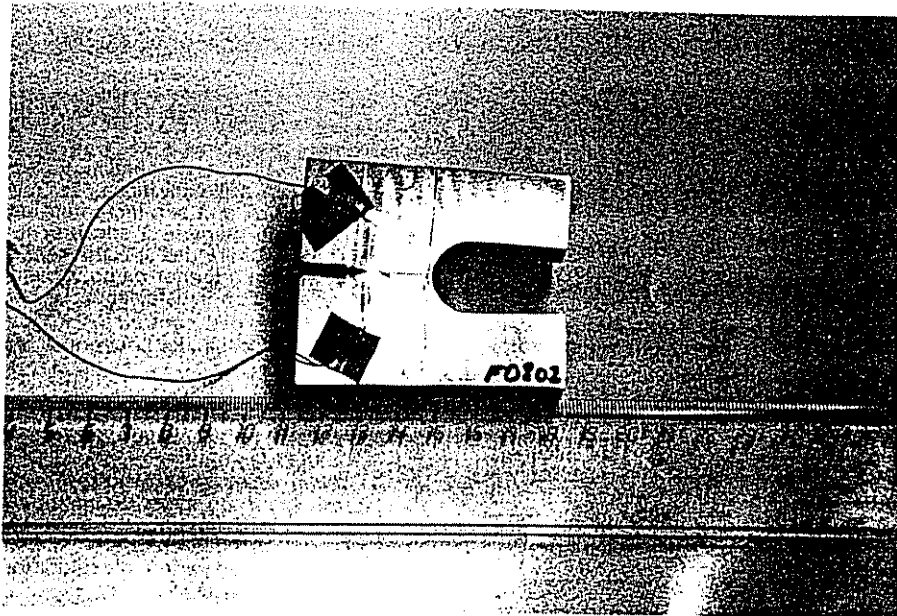


Figure 2 : Éprouvette ECC après essai. La fissure s'est propagée de quelques millimètres. On distingue la jauge de rupture déposée sur une couche isolante.  
The CCS (ECC) specimen after testing. The crack propagated for a few millimeters. Note the fracture gage on its insulating layer.

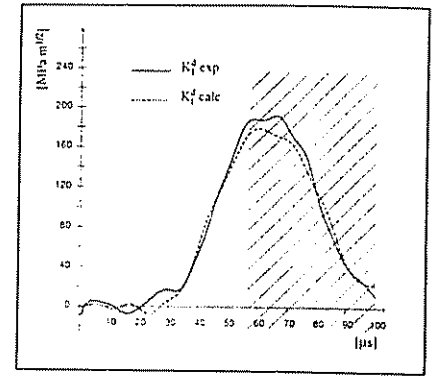


Figure 6 : Facteur d'intensité des contraintes dynamiques déterminé par notre méthode et à partir de la simulation de l'expérience.  
Dynamic stress intensity factor determined using our method with experimental and numerically determined values.

constate un excellent accord entre les deux méthodes.

#### 4. DISCUSSION ET CONCLUSION

On a présenté une nouvelle méthode de détermination exacte de la ténacité dynamique. Cette méthode qui s'applique au problème d'amorçage en dynamique ne traite pas de propagation de la fissure. Sa mise en œuvre est relativement simple : en comparaison avec les autres méthodes elle s'adapte facilement dans un cadre d'essais dynamiques existants tout en ne nécessitant qu'un minimum de calculs numériques. Ceci implique des conséquences au niveau de la conception mécanique découlant entre autres de la relation entre les valeurs statiques et dynamiques de la ténacité.

Il est à noter que le type de chargement choisi génère certainement une composante d'ouverture de fissure en mode II (cisaillement). Dans la détermination de la ténacité dynamique on « filtre » cette composante pour ne faire ressortir que le mode I qui est de loin le mode principal.

Les résultats présentés constituent une première validation de la méthode dans son ensemble ainsi que pour chacune de ses composantes. De même on notera qu'une simulation numérique de l'expérience n'est nullement requise : elle ne sert qu'à fournir des points de comparaison.

L'acier testé ne fait pas l'objet d'une étude détaillée - d'autres essais sont en cours sur des matériaux plus fragiles, des roches notamment avec des premiers résultats encourageants. On peut alors envisager des études jusque-là difficiles à réaliser, telles que la caractérisation sous chocs de matériaux y compris les matériaux très fragiles (céramiques, verres...).

#### RÉFÉRENCES

- [ 1 ] Standard E399. Standard test method for plane strain fracture toughness of metallic materials. *Annual Book of ASTM Standards*, ASTM, Philadelphia PA.
- [ 2 ] J. MALKIN, and A.S. TETELMAN, (1971), Relation between  $K_{Ic}$  and microscopic strength for low alloy steels. *Engng. Fract Mech.* 3. pp. 151-167.

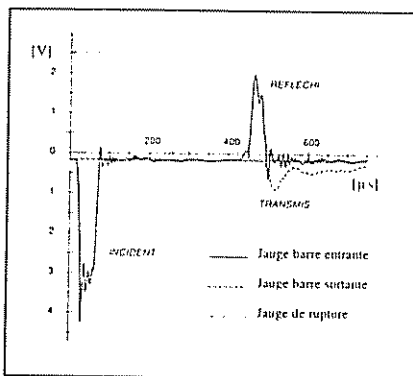


Figure 3 : Signaux bruts caractéristiques enregistrés par les jauges.  
Typical gage signals.

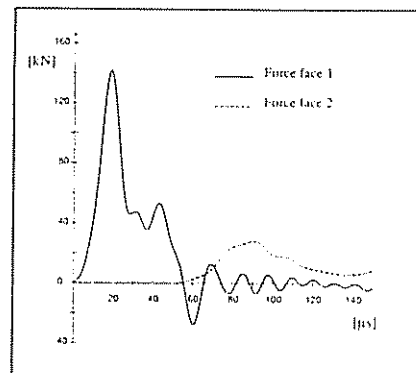


Figure 4b : Vitesses expérimentales interfaciales correspondantes.  
Corresponding interfacial velocities.

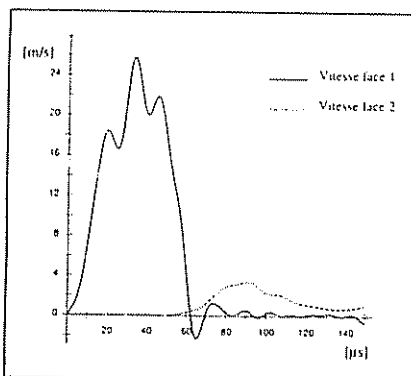


Figure 4a : Forces expérimentales aux interfaces.  
Typical interfacial forces recorded during a test.

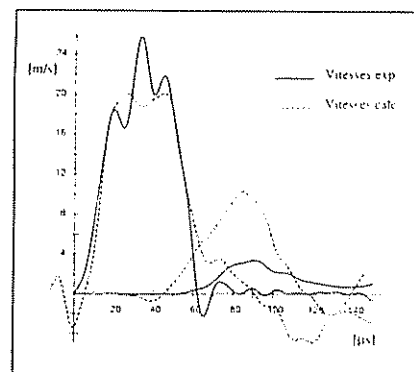


Figure 5 : Vitesses interfaciales mesurées et calculées (MEF) en simulant l'expérience par éléments finis. On remarque l'excellent accord jusqu'à l'instant de la rupture.  
Interfacial velocities, measured and calculated (FEM) by simulation of the experiment. Note the excellent agreement until fracture time.

- [ 3] B. NAGESWARA RAO, and A.R. ACHARYA, (1992), A comparative study on evaluation of fracture toughness from Charpy V-notch impact energy and reduction-in-area, *Engng. Fract. Mech.*, 41 No. 1, pp. 85-90.
- [ 4] J.F. KALTHOFF, (1985), On the measurement of dynamic fracture toughnesses - a review of recent work, *Int. J. Frac.*, 27, pp. 277-298.
- [ 5] A.S. KOBAYASKI, (1987), *Handbook on Experimental Mechanics*, Prentice-Hall Inc. Englewood Cliffs NJ.
- [ 6] H.D. BUI, et H. MAIGRE, (1988), *C.R. Acad. Sc. Paris*, tome 306. Série II, pp. 1213-1216.
- [ 7] H. MAIGRE, (1990). Contribution théorique à l'identification des grandeurs caractéristiques en mécanique de la rupture dynamique, *Thèse de Doctorat*. École Polytechnique, Palaiseau.
- [ 8] H.D. BUI, H. MAIGRE, D. RITTEL, (1991), soumis à *Int. J. Solids & Structures*.
- [ 9] H.D. BUI, (1978), *Mécanique de la Rupture Fragile*, Masson, Paris.
- [ 10] P.S. FOLLANSBEE, (1985). The Hopkinson bar, *ASM Metals Handbook*, Vol. 8, 9th edtn., Metals Park, OH.
- [ 11] J.R. KLEPACZKO, M.N. BASSIM, T.R. HSU, (1984), Fracture toughness of coal under quasi-static and impact loading, *Engng. Fract. Mech.*, 19 No. 2, pp. 305-316.
- [ 12] R.E. SWANSON, A.W. THOMPSON, I.M. BERNSTEIN, (1986), Effect of notch root radius on stress intensity in mode I and mode III loading, *Metal. Trans.*, 17A, September 1986, pp. 1633-1636.
- [ 13] G. GARY, J.R. KLEPACZKO, (1988), DAVID. - *Dépouillement Automatique et Visualisation pour compression/traction Dynamique*, LMS Palaiseau-Université de Metz.

\*

\* \*