

**MODUL MIXT DE PROPAGARE A
FISURILOR ÎN LEMN**

**MIXED-MODE CRACK GROWTH IN
WOOD**

Octavian POP

Assist.Prof.Dr.Eng. – GEMH Laboratory, Civil Engineering and Durability, University of Limoges
Centre Universitaire de Génie Civil,
Adresa/Address: Boulevard Jacques Derche 19300 Egletons, France
E-mail: ion-octavian.pop@unilim.fr

Rostand MOUTOU PITTI

Researcher, dr.eng. – Clermont Université, Université Blaise Pascal, Institut Pascal
Adresa/Address: BP 10448, F-63000 CLERMONT-FERRAND, France
E-mail: rostand.moutou_pitti@univ-bpclermont.fr

Frédéric DUBOIS

Prof.Dr.Eng. – GEMH Laboratory, Civil Engineering and Durability, University of Limoges
Centre Universitaire de Génie Civil,
Adresa/Address: Boulevard Jacques Derche 19300 Egletons, France
E-mail: frederic.dubois@unilim.fr

Rezumat:

În elemente din lemn modul mixt de rupere depinde în mod esențial de anatomia lemnului și de configurația solicitării. În aceste condiții, în scopul de a evalua comportamentul materialului și al procesului de fisurare, este necesar să se studieze influența fiecărui mod. În lucrarea de față, este studiată posibilitatea separării modurilor de fisurare în cazul unei epruvete realizată din lemn de Douglas, cu geometrie caracteristică studiului modului mixt de fisurare. Procesul de separare a modurilor este analizat cu ajutorul metodei optice de urmărire a mărcilor. Pe baza măsurătorilor experimentale s-au calculat energiile de fisurare caracteristice celor două moduri de rupere, cel de deschidere al fisurii și cel de forfecare plană.

Cuvinte cheie: lemn; mecanica ruperii; mod mixt; metode de urmărire a mărcilor.

INTRODUCERE

În general, elementele din lemn fisurate sunt supuse la încărcări complexe, iar procesul de fisurare se caracterizează prin cinematici de propagare în mod mixt (Moutou Pitti ș.a. 2006a; Moutou Pitti ș.a. 2006b). Neglijarea efectelor modului mixt de fisurare în proiectarea elementelor din lemn poate duce la erori semnificative în aprecierea capacităților de rezistență a elementelor structurale și poate conduce la ruperi catastrofale. Cel mai adesea modul mixt de fisurare este rezultatul suprapunerii modului de deschidere al fisurii (modul I) peste modul de forfecare plană (modul II). În scopul de a evalua influența fiecărui mod în procesul de fisurare, este necesar să se dezvolte metode de evaluare analitică și experimentală care să permită separarea modurilor. Plecând de la aceste

Abstract:

In timber elements the mixed mode depends essentially of wood anatomy and load configuration. In these conditions, in order to evaluate the material behavior and the fracture process, it's necessary to separate the part of each mode. The mixed mode separation allows evaluating the amplitude of fracture mode. In the present paper, using a mixed-mode crack growth specimen made in Douglas fir, the mixed mode crack growth process is study thanks to marks tracking method. Using the marks tracking method the characteristic displacements associated to opening and shear mode are measured. From the experimental measurements, the energy release rate associated to opening and shear modes is calculated into to account the crack advancement during the test.

Key words: wood; fracture mechanics; mixed mode; marks tracking method.

INTRODUCTION

Generally, the cracked timber elements are subject of complex loadings and the fracture process is characterized by the mixed modes propagation (Moutou Pitti *et al.* 2006a; Moutou Pitti *et al.* 2006b). The negligence of mixed-mode effects, in timber design, may lead to significant errors in strength prediction and the catastrophic failures. Most often the fracture process results from the addition between the opening and shear modes (i.e. mode I and II). So, in order to evaluate the part of each mode in fracture process, it's necessary to develop analytical and experimental tools allowing the mixed-mode separation. From these observations the aims of this study is to develop the experimental tools using the optical techniques in order to separate the mixed modes fracture. Associated with full-field

considerente, obiectivele acestui studiu este dezvoltarea de metode experimentale folosind tehnici optice, în scopul de a separa cele două moduri de fisurare. Asociate tehnicilor de câmp, metodele optice de măsurare pot fi ușor corelate aspectelor energetice din mecanica ruperii, cum ar fi invarianții integrali sau metoda complianței. Printre metodele optice folosite astăzi în caracterizarea mecanică, corelarea de imagini digitale și metoda de urmărire a mărcilor par a fi cele mai bine adaptate metode în caracterizarea elementelor din lemn (Rethore ș.a. 2005; Sutton ș.a. 1983; Bretagne ș.a. 2005). În studiul de față procesul de creștere al fisurii ca urmare a unei solicitări în mod mixt este evaluat cu ajutorul metodei de urmărire a mărcilor asociată cu metoda complianței.

Studiul este structurat în trei părți. În prima parte sunt prezentate condițiile experimentale și principiile metodei de măsurare. În cea de a doua parte, sunt descrise geometria specimenului din douglas și configurațiile în mod mixt. Rezultatele experimentale sunt prezentate în ultima parte a studiului. Rezultatele prezentate în acest studiu corespund unei configurații în mod mixt la 15° .

MATERIALE ȘI METODE

Pentru testul experimental, modul mixt de creștere al fisurii a fost studiat pentru o epruvetă din lemn de Douglas, solicitat la 15° . Modul mixt la 15° este definit de unghiul dintre direcția de încărcare și orientarea fisurii. Calculul energiei de fisurare este rezultatul combinării dintre metoda complianței cu metoda optică de urmărire a mărcilor. Această metodă optică permite măsurarea deplasărilor punctelor de aplicare a încărcării epruvetei și al decuplării deplasărilor corespunzătoare modului de deschidere al fisurii și cel al forfecării plane.

Metoda de urmărire a mărcilor (Bretagne ș.a. 2005)

Modul mixt de fisurare este caracterizat de cuplajul dintre modul de deschidere al fisurii și cel de forfecare plană. În aceste condiții, în scopul de a separa partea de deplasare corespunzătoare fiecărui mod, măsurarea experimentală a deplasării punctului de încărcare este analizată prin metoda de urmărire a mărcilor. Principiul metodei este analog cu cel al metodei de corelare de imagini digitale (Rethore ș.a. 2005; Sutton ș.a. 1983; Bretagne ș.a. 2005). Diferența dintre cele două metode fiind înlocuirea modelului aleator alb-negru, folosit în corelarea de imagini digitale, prin mărci de culoare neagră.

techniques, optical methods can be easily correlated with energetic approaches such as integral invariants or the compliance method. Among the optical methods use today in mechanical characterization, digital image correlation and markers tracking method seem to be best to characterize the mechanical behavior of timber elements (Rethore *et al.* 2005; Sutton *et al.* 1983; Bretagne *et al.* 2005). In the present study the mixed crack growth process in wood sample is evaluate using the markers tracking method and the compliance method.

The paper is structured in three parts. In the first section, the experimental setup and the principles of markers tracking method are presented. In second section, in order to realize the experimental test the wood sample description and the set-up configurations are aborted. And, finally, the experimental results in terms of energy release rate are presented. In the present study the energy release rate is performed for a loading configuration corresponding at 15° .

MATERIALS AND METHODS

For experimental test, the mixed-mode crack growth specimen made in Douglas fir is tested in mixed mode at 15° . The mixed mode is defined by the angle between the loading direction and the crack orientation. As the energy release rate is calculated from the compliance method the displacement of the loading points is measured thanks to markers tracking method. The markers tracking allow separating the displacement corresponding to opening and shear modes.

Markers tracking method (Bretagne *et al.* 2005)

The mixed mode fracture is characterized by a coupling between the opening and the shear modes. In this case, in order to separate the part of displacement corresponding to each mode the experimental measurement of loading point's displacement is realized by markers tracking method. The principle of the method is analog with the digital image correlation (Rethore *et al.* 2005; Sutton *et al.* 1983; Bretagne *et al.* 2005). The difference between two methods is the replacement of the black and white speckle pattern by the black markers.

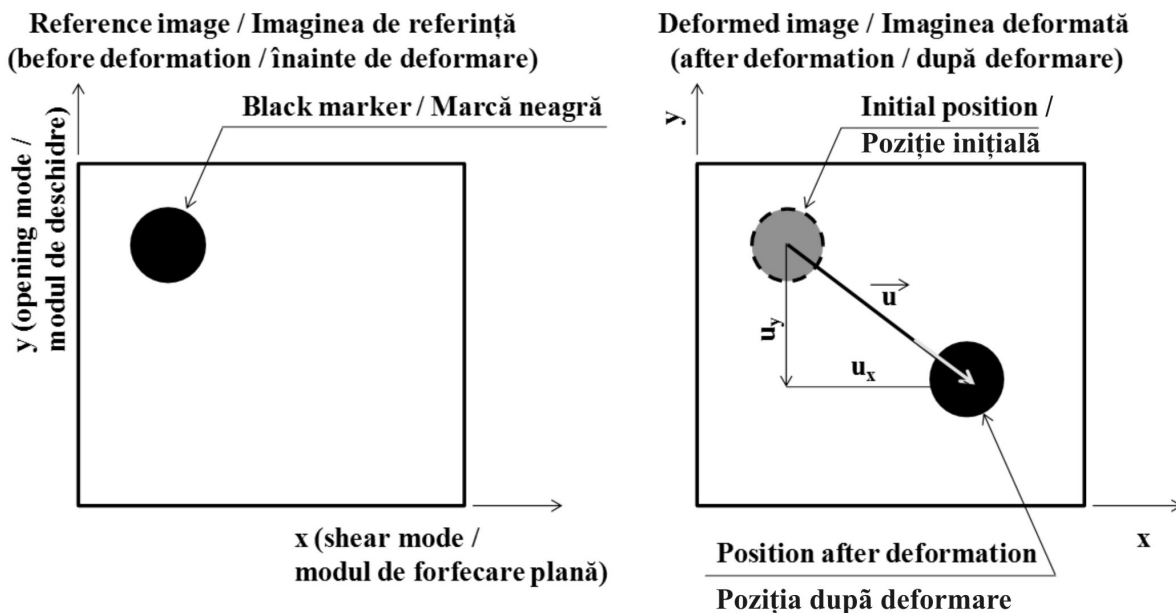


Fig. 1.
Principiul metodei de urmărire a mărcilor / Principle of markers tracking method.

Bazat pe comparația dintre două imagini filmate în timpul testului, una înainte de deformare (imaginea de referință) și alta după deformare (imaginea deformată), algoritmul metodei detectează deplasările locale ale centrelor mărcilor (Fig.1).

Based on comparison between two images acquired during the test, one before deformation (i.e. the reference image) and the other one after (i.e. the deformed image), the algorithm of method detects the local displacements of the marker centers (Fig.1).

Geometria specimenului (Mixed-Mode Crack Growth - 2MCG)

În scopul de a obține o propagare stabilă a fisurii pentru o solicitare în mod mixt este propusă o geometrie cu inerție variabilă. Această geometrie regrupează două modele: modelul DCB – Double Cantilever Beam cu secțiune variabilă (Dubois ș.a. 2002; Moutou Pitti ș.a. 2007) și modelul CTS – Compact Tension Specimen (Valentin și Caumes 1989). Geometria specimenului reținut pentru testarea experimentală este ilustrată în Fig. 2.

Mixed-mode crack growth specimen

The specimen geometry is defined, in order to obtain a stable mixed-mode crack growth (2MCG). For this reason a specimen with variable inertia is proposed. Note that this geometry regrouped two specimen models: DCB - Double Cantilever Beam with variable section (Dubois *et al.* 2002; Moutou Pitti *et al.* 2007) and CTS – Compact Tension Shear (Valentin and Caumes 1989). The geometry of specimen retained for experimental test is illustrated in Fig. 2.

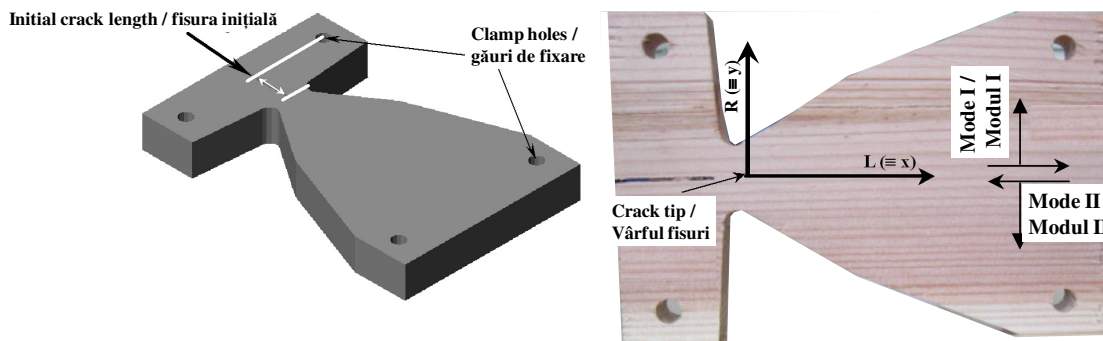


Fig. 2.
Geometria specimenului 2MCG / Mixed-mode crack growth specimen (2MCG).

Specimenul este fabricat din Douglas. În scopul inițierii fisurii, specimenul 2MCG este pregătit prin realizarea unei creștături inițiale în sistemul RL. Așa cum se arată în Fig. 2, lungimea fisurii este definită ca fiind distanța dintre linia de încărcare și de vârful fisurii. Fisura inițială este realizată folosind o piramida metalică.

Montaj experimental

Încărcare specimenului se realizează cu ajutorul unei prese electromecanice pilotată în deplasare. Deplasarea traversei este stabilită la 0,01 mm/s. Așa cum este ilustrat în Fig. 3, modul mixt este generat prin folosirea unui sistemul de prindere de tip Arcan.

The specimen is made in Douglas fir. In order to initiate the crack, the 2MCG specimen is prepared by cutting an initial crack in the RL crack propagation system. As is shown in Fig. 2 the crack length is defined as the distance between the loading line and crack tip. The initial crack length is realized using a metallic pyramid.

Experimental Setup

The loading of wood sample is realized using an electromechanical press under displacement control. The displacement of the cross-bar is fixed at 0.01 mm/s. As illustrated in Fig. 3, the mixed mode is generated using the Arcan fixture system.

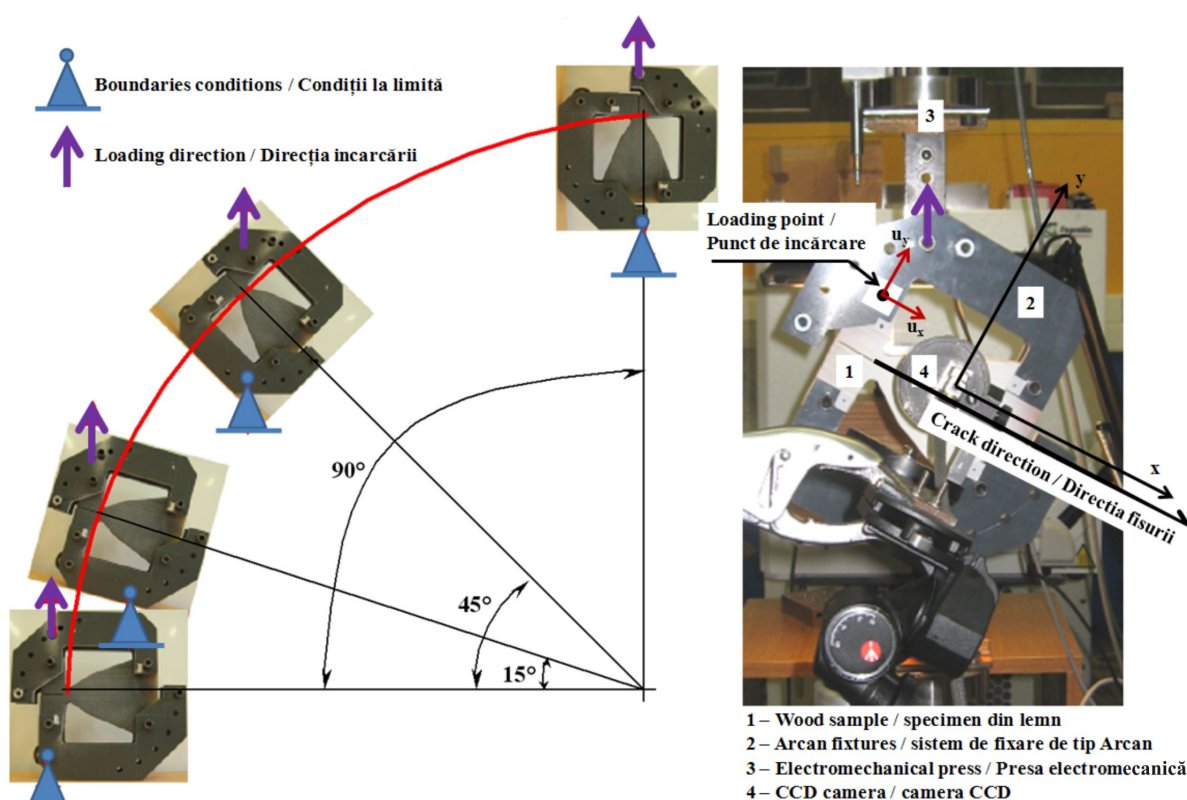


Fig. 3.
Montaj experimental / Experimental setup.

În paralel cu dispozitivele experimentale de măsurare ale mașini de testare (LVDT- traductor de deplasare și un captor de forță), o camera CCD înregistrează procesul de creștere a fisurii și deplasarea punctelor de încărcare. Viteza de înregistrare a camerei este fixată la 5 imagini/secundă. În scopul corelării măsurătorilor presei cu măsurătorile video, achiziția video este sincronizată cu deplasarea traversei. În plus, camera CCD este orientată paralel cu direcția fisurii, în scopul de a măsura deplasările în referențialul (sistemul de coordonate) RL al fisurii.

In parallel with experimental devices of testing machine (LVDT- displacement transducer and a load cell) a CCD camera records the crack growth process and the displacement of the loading points. The frame rate of camera is fixed 5fps. In order to correlated the electromechanical measurement in terms of load-displacement the video acquisition is synchronized with the displacement of the testing machine. Moreover, the CCD camera is oriented parallel with the crack direction in order to measure displacements according to the crack tip referential.

REZULTATE

Evoluțiile experimentale ale încărcării și deplasărilor în timpul testului sunt reprezentate în Fig. 4. Rezultatele experimentale sunt obținute pentru un unghi între direcția fisurii și orientarea încărcării de 15° . S-a analizat deplasarea mărcilor în scopul de a separa partea de deplasare corespunzătoare modului de deschidere și cea a modului de forfecare. Evoluțiile deplasărilor în modul de deschidere și în modul de forfecare sunt ilustrate în Fig. 4. Imaginile 1, 2, 3 și 4 indică avansarea fisurii corespunzătoare fiecărui vârf de încărcare vizualizat în evoluția încărcării în funcție de timp. Evoluția energiei de fisurare determinată ca urmare a propagării fisurii corespunzătoare fiecărui mod este reprezentată grafic în figurile 5 și respectiv 6.

RESULTS

The experimental evolutions of load and the displacements during the test are plotted in Fig. 4. The experimental results are obtained for an angle between the crack direction and the loading orientation of 15° . In order to separate the part of displacement in opening mode and in shear mode, the displacement of markers is analyzed. The evolutions of displacements in opening mode and in shear mode are illustrated in Fig. 4. The images 1, 2, 3 and 4 show the crack advancement corresponding for each peak of loading visualized on the loading evolution versus time. Using this correlation between the loading evolution and the part of displacement mode the compliance corresponding of each mode can be determined. The energy release rate determined by experimental test using for each mode of fracture is plotted in Figs. 5 and 6 respectively.

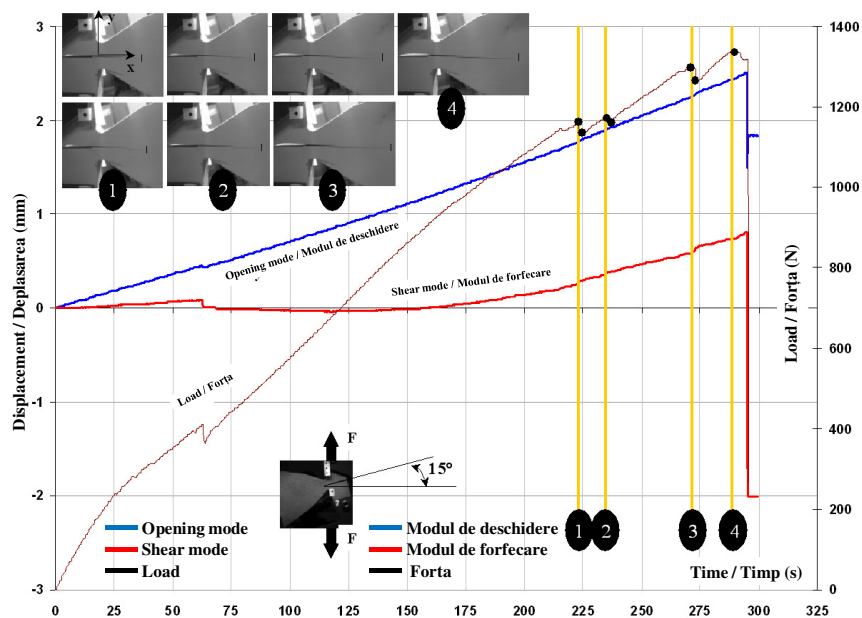


Fig. 4.
Separarea modului mixt / Mixed mode separation.

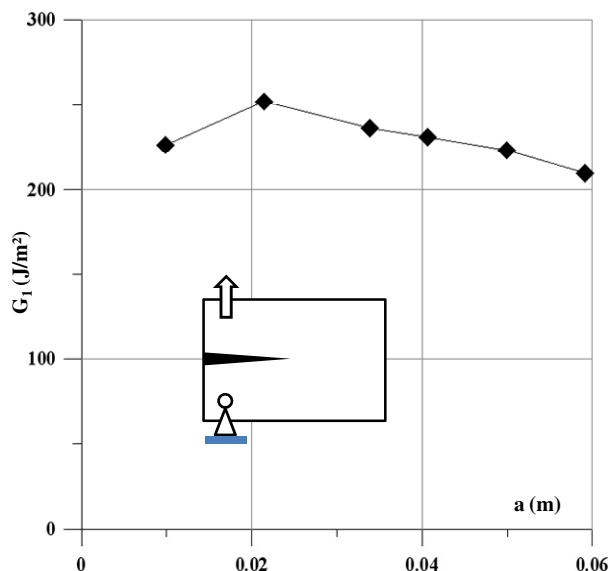


Fig. 5.

Energia de fisurare corespunzătoare modului de deschidere al fisurii în funcție de lungimea fisurii / Energy release rate in opening mode vs. crack length.

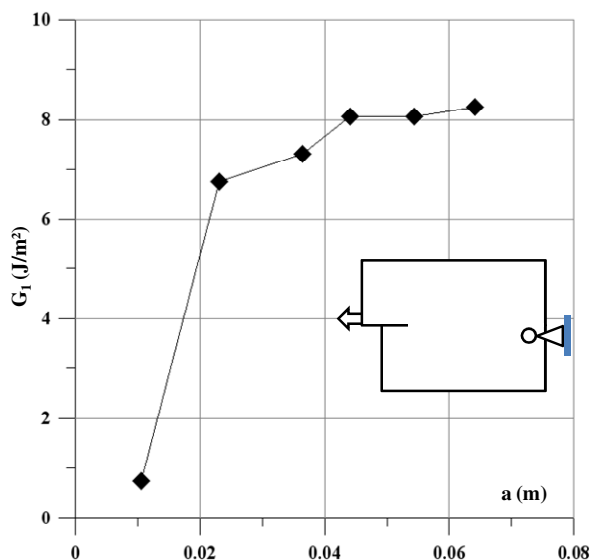


Fig. 6.

Energia de fisurare corespunzătoare modului de forfecare plană al fisurii în funcție de lungimea fisurii / Energy release rate in shear mode vs. crack length.

Evoluțiile energiilor arată, că pentru un unghi de 15° între direcția fisurii și cea a forței (încărcării), modul I de propagare a fisurii este preponderent în procesul de fisurare. Așa cum este arătat în Fig. 4, amplitudinea deplasărilor în modul de deschidere este mult mai importantă.

CONCLUZIE

Prin acest studiu este propusă o nouă tehnică experimentală în vederea analizării modul mixt de fisurare. Tehnica propusă se bazează pe metoda de urmărire video a mărcilor. Asociate metodelor de câmp, metodele optice pot fi ușor corelate cu metoda

The energy release rate evolution show, that for an angle between the crack line and the load of 15° the part of mode I is preponderant in the fracture process. As is shows in Fig. 4 the amplitude of displacement in opening mode is most important.

CONCLUSION

In this study, a new technique is proposed for the experimental mixed mode fracture analysis. The proposed technique is based on markers tracking method. Associated with full-field techniques, optical methods can be easily correlated with compliance method, in order to calculate the energy release rate.

compliancei, în scopul calculării energiei de fisurare. Folosind un specimen (o epruvetă) specific modului mixt de creștere al fisurilor procedura de separare a modurilor de deschidere a fisurii și cel al forfecării plane este prezentată pentru o configurație la 15° . Utilizând deplasările măsurate experimental ale punctelor de încărcare, sunt calculate deplasările specifice celor două moduri de fisurare, precum și energiile de fisurare corespunzătoare. Avansarea fisurii este, de asemenea, măsurată utilizând imaginile înregistrate în timpul testului.

Using a mixed mode crack growth specimen the separation mode is realized for a loading configuration at 15° . From the experimental displacements of loading points the displacement part in opening and shear modes are calculated. The energy release rate calculation is based on the compliance method and the displacement separation. The crack advancement is also measured from the images recorded during the test.

BIBLIOGRAFIE / REFERENCES

Bretagne N, Valle V, Dupre JC (2005) "Development of the marks tracking technique for strain field and volume variation measurements". *NDT&E Int*, 38:290–298.

Dubois F, Chazal C, Petit C (2002) Viscoelastic crack growth process in wood timbers: An approach by the finite element method for mode I fracture. *Int J Fract* 113:367-388.

Moutou Pitti R, Dubois F, Petit C, Sauyat N (2006a) "Fracture of wood under mixed mode loading: numerical approach by the $M\theta$ - integral", 9th World Conference of Timber Engineering (WCTE), Portland OR, USA, August 6-10, 2006.

Moutou Pitti R, Dubois F, Petit C, Sauvat N (2006b) "Long term fracture of wood under mixed mode loading: numerical approach by the $M\theta$ - integral", Pre-Proceeding, International Conference on Integrated Approach to Wood Structure, Behaviour and applications, Florence, Italy, May 15-17, 2006, 259-262.

Moutou Pitti R, Dubois F, Petit C, Sauvat N (2007) "Mixed mode fracture separation in viscoelastic orthotropic media: numerical and analytical approach by the $M\theta$ - integral", *International Journal of Fracture*, 125(3):181-193.

Réthoré J, Gravouil A, Morestin F, Combescure A (2005) "Estimation of mixed-mode stress intensity factors using digital image correlation and an interaction integral", *International Journal of Fracture*, 132:65–79 DOI 10.1007/s10704-004-8141-4.

Sutton MA, Wolters WJ, Peters WH, Rawson WF, McNeill SR (1983) Determination of displacements using an improved digital image correlation method. *Image and Vision Computing* 1(3):133-139.

Valentin G, Caumes P (1989) "Crack propagation in mixed mode in wood: a new specimen", *Wood Science and Technology*, 23(1):43-53.