

26

APPROCHE EXPERIMENTALE DU COMPORTEMENT D'UNE PLAQUE COMPOSITE SOUS EFFET D'UN CHOC PERFORANT*

P.A.PARIS¹, D. GENIN¹, P. HAMELIN¹

Résumé - Cette étude est consacrée au comportement au choc de plaques en matériaux composites renforcés par un tissu de verre satin de 8. La première partie traite des résultats expérimentaux effectués en utilisant une machine servo-hydraulique. Le vérin hydraulique peut être programmé pour perforer une éprouvette à une vitesse choisie entre quelques dixièmes de millimètres par minute et 20 m/s. Dans la seconde partie, ces résultats expérimentaux sont comparés avec les résultats numériques d'un code de calcul utilisant les différences finies bidimensionnel AUTODYN. Ce programme permet la simulation numérique de la pénétration de plaques de composite par des projectiles.

Mots clés : impact, plaque composite, simulation numérique, réponse dynamique, essai de choc.

INTRODUCTION

Des structures construites en matériaux composites sont utilisées de plus en plus fréquemment par les industries de pointe telles que l'aéronautique, la construction navale et dans la fabrication de composants de série pour les automobiles, les équipements domestiques, les industries de loisir, etc.

Il existe de nombreuses situations dans lesquelles les structures composites sont sujettes à des collisions ou à des impacts de forte intensité qui produisent des dommages et des perforations. Le comportement à l'impact des plaques composites a été modélisé dans de nombreuses études précédentes (Sun *et coll.*, 1975), (Tan *et coll.*, 1985) (Shivakumar *et coll.*, 1985) (Doan *et coll.*, 1989). Cependant, ces modèles ont seulement été développés pour des cas non perforants. La

* traduit de l'anglais

¹Laboratoire Mécanique et Matériaux, Université Claude Bernard - Lyon I, I.U.T. A - Département Génie Civil, 43 Bd du 11 novembre 1918, F-69622 Villeurbanne Cedex.

prédiction d'une réponse élastique-plastique en grand déplacement d'une structure est beaucoup plus difficile à cause de la présence de non-linéarités importantes de propriétés du matériau et géométriques. Et c'est la raison pour laquelle seulement peu de simulations numériques de la perforation de plaques multicouches peuvent être trouvées dans la littérature.

Le but de cet article est de comparer quelques uns des résultats expérimentaux d'essais de perforation de plaques sous choc perforant et les prédictions du programme AUTODYN.

APPAREILLAGE EXPERIMENTAL

Cette étude a été effectuée à l'aide d'une machine servo-hydraulique Zwick REL (figure 1). C'est une machine d'essai universelle avec un choix infini de vitesse d'essai jusqu'à 20 m/s pour les essais de traction et de chocs perforants.

Un capteur inductif de déplacement (LVDT) fournit un enregistrement continu de la vitesse et du déplacement, tandis que la force est mesurée grâce à une cellule piézoélectrique de capacité 20 kN. Le montage représenté à la figure 2 est utilisé pour effectuer des essais de choc sur des plaques circulaires encastrées.

La cellule de force est montée sur l'impacteur, et seulement séparée de l'éprouvette à tester par une pointe hémisphérique. Ce montage réduit le bruit de fond et fournit une meilleure reproductibilité du signal charge-temps (Genin *et coll.*, 1991a et 1991b). Les signaux transmis par le LVDT et la cellule de force piézoélectrique sont tout d'abord recueillis par un enregistreur transitoire Maurer Adam 0210 avec une fréquence d'échantillonnage variant entre 2 MHz correspondant à une mesure toutes les 500 nanosecondes et $1,6 \cdot 10^{-3}$ Hz, correspondant à une mesure toutes les 600 secondes. Les données sont ensuite traitées par un micro-ordinateur HP 9000.

MATERIAU

Pour cette étude, nous avons utilisé une plaque de stratifié fabriquée par Hexcel Genin à partir de préimprégnés verre/époxy 1581/ES67. Ces préimprégnés ont été fabriqués à partir de tissu satin de 8 de 300 g/m². Tous les stratifiés étaient constitués de 12 plis (0°/90°/0°/90°/0°/90°)s et avaient une épaisseur nominale de 3 mm. La fraction volumique de fibres, déterminée par calcination à 800°C, était de 41%.

ESSAIS DE PERFORATION

Le système expérimental représenté à la figure 2 est utilisé pour tester des plaques circulaires encastrées de 40 mm de diamètre et de 3 mm d'épaisseur. La pointe est semi-sphérique et a un diamètre de 20 mm.

La figure 3 montre l'évolution de la force de contact en fonction du temps pour des essais de choc effectués à différentes vitesses. L'observation de ces courbes montre que, quand la vitesse du projectile augmente, la durée du contact diminue tandis que la force maximale augmente.

La figure 4 montre l'évolution de la force de contact en fonction du déplacement au centre de la plaque pour des essais de choc effectués à différentes vitesses. La force de contact est toujours plus élevée pour un essai de choc que pour un essai statique, bien que la variation de l'allongement à la force maximale reste faible. Les courbes obtenues montrent beaucoup d'oscillations ; nous pensons que ce phénomène est dû à la fréquence naturelle de l'éprouvette et de l'appareillage.

EQUATIONS GOUVERNANTES

Nous considérons le problème de deux corps B1 et B2 qui peuvent entrer en collision. Les équations de mouvement sous forme de tenseur cartésien sont données par Germain (1973) :

$$\sigma_{ij,j} + \rho f_j = \rho \ddot{u}_j \quad (1)$$

où σ_{ij} est le tenseur de contrainte de Kirchhoff, ρ est la masse volumique, f_j sont les forces par unité de volume et u_j sont les composantes du déplacement. Les trémas indiquent une différentiation partielle en fonction du temps t .

Les relations contrainte-déformation peuvent être exprimées comme suit :

$$\epsilon_{ij} = F_{ij}(\sigma_{kl}) \quad (2)$$

Pour les matériaux linéaires, l'équation (2) devient :

$$\sigma_{ij} = a_{ijkl} \epsilon_{kl} \quad (3)$$

et la relation non-linéaire déformation-déplacement peut être écrite :

$$\epsilon_{ij} = u_{i,j} + u_{j,i} + u_{k,i} u_{k,j} \quad (4)$$

Les trois relations qui suivent expriment la conservation de la

masse, de la quantité de mouvement et de l'énergie au front de choc :

$$\rho (c_n - \dot{u}_i n_i) = \rho_0 c_n \quad (5)$$

$$[(\delta_{ij} + u_{i,j}) \sigma_{kj}] n_i = -\rho_0 c_n \dot{u}_i \quad (6)$$

$$\dot{u}_i [(\delta_{ij} + u_{i,j}) \sigma_{kj}] n_i = \rho_0 c_n \left(e + \frac{1}{2} \dot{u}_i \dot{u}_i \right) \quad (7)$$

où ρ_0 est la masse volumique initiale, n_i est le vecteur normal extérieur à la surface de choc, e est l'énergie interne spécifique, c_n est la composante normale de la vitesse de propagation de l'onde de choc et δ_{ij} est le delta de Kronecker.

Les conditions limites pour n'importe quel point en contact avec la surface sont données par :

$$\sigma_{ij}^{B1} n_i^{B1} n_j^{B1} + \sigma_{ij}^{B2} n_i^{B2} n_j^{B2} \leq 0 \quad (8)$$

$$\dot{u}_i^{B1} n_i^{B1} + \dot{u}_i^{B2} n_i^{B2} \leq 0 \quad (9)$$

L'équation (8) établit que la contrainte normale au travers de la surface de contact doit être une compression et l'équation (9) que deux points en coïncidence à la surface de contact doivent rester en contact ou commencer à s'éloigner.

MODELISATION

Le code de calcul lagrangien à deux dimensions AUTODYN a été utilisé pour simuler le problème de l'impact avec une plaque. AUTODYN est un programme interactif pour l'analyse de réponse dynamique en grandes déformations des solides non linéaires (Birnbaum *et coll.*, 1987). Ce programme fournit des solutions pour :

- la dynamique, non-linéarités incluses ;
- la dynamique des solides, fluides et gaz ;
- l'interaction fluide-structure ;
- les problèmes de grandes déformations et grands déplacements ;
- les problèmes d'impact, de contact, de pénétration ;
- les explosions, chocs, souffles.

Le projectile et la cible sont discrétisés dans l'espace et les équations de champ de la physique des milieux continus sont évaluées les techniques de différences finies. L'interaction des corps en impact-pénétration est traitée par des algorithmes "slideline", qui imposent la contrainte que les deux corps ne peuvent pas occuper le même espace au même moment. Pour prendre en compte la compressibilité des matériaux qui interagissent, des lois de contact spéciales sont utilisées pour

modéliser l'interaction entre le projectile et la cible. Un remaillage interactif peut être adopté pour éliminer l'importante distorsion de maille et pour redéfinir un nouveau maillage numérique. Le matériau et les propriétés cinématiques de chaque élément du nouveau maillage sont choisis de telle façon que la masse, la quantité de mouvement et l'énergie interne sont gardés constants, et que les équations constitutives soient satisfaites.

L'analyse est fondée sur une idéalisation axisymétrique à deux dimensions. L'hypothèse d'axisymétrie n'est pas exacte, car le stratifié n'est pas isotrope en flexion. Cependant, dans cette analyse, les déformations de plaque sont supposées axisymétriques sous la charge centrale de la plaque. De précédentes études (Tan *et coll.*, 1985) (Genin *et coll.*, 1991b) ont montré que pour interpréter les signaux fournis par capteur de force placé sur l'appareillage d'essai par impact, il est nécessaire de traiter le projectile comme un corps élastique. Le projectile est idéalisé par un matériau élastique linéaire en utilisant la discrétisation lagrangienne et la plaque circulaire est modélisée par un matériau linéaire élastique-parfaitement plastique en utilisant la discrétisation lagrangienne. Avec ce modèle, le critère de Von Mises est utilisé avec l'équation linéaire d'état donnée par :

$$P = K \left(\frac{P}{P_0} - 1 \right) \quad (10)$$

où K est le module de compression hydrostatique du matériau et P_0 est la densité du matériau froid à la pression zéro. L'équation linéaire d'état est aussi caractérisée par une limite de traction hydrodynamique. La résistance ultime du composite a été utilisée pour ce paramètre. Quand la pression dans une cellule tombe au-dessous de la limite de traction hydrodynamique, la pression et le champ de contrainte sont ramenés à zéro, et la cellule peut par la suite supporter des pressions positives mais n'aura plus ni de résistance, ni la capacité de supporter la traction. Les propriétés élastiques et de résistance sont données au tableau 1.

La plaque, fixée dans son cadre et soumise à une charge en son centre au moyen d'un impacteur à embout hémisphérique est modélisée à la figure 5. Le projectile est en acier, d'un diamètre de 20 mm. La plaque circulaire a un diamètre de 40 mm et une épaisseur de 3 mm. Le nombre de points de calcul est égal à 72 pour le pénétrateur et à 70 pour la plaque.

Chaque calcul prend environ 90 minutes sur un PC 386-40 MHz. La figure 6 montre l'évolution de la force calculée au niveau du capteur de force pour une vitesse d'impacteur de 5,8 m/s. Le capteur de force est placé à 25 mm du point de contact. Sur cette figure, on remarque la présence d'un signal de haute fréquence, superposé au signal de force, qui est aussi visible à la figure 3, pour la courbe force-temps enregistrée par le capteur de force placé sur la machines servo-hydraulique. Pendant le premier stade, des oscillations sont créées par contact entre le projectile et la plaque. Après rupture de la plaque, des oscillations apparaissent,

dont la fréquence est proche de celle observée lors de la montée en charge.

Dans les simulations, la fréquence et l'amplitude des oscillations sont plus élevées que dans les essais de choc. Pour les essais de pénétration, le signal a été obtenu avec une fréquence d'échantillonnage de 330 MHz correspondant à une mesure toutes les 3 μ s. En conséquence, selon le critère de Nyquist, la fréquence du signal de sortie sera au plus égal à 165 kHz. Ceci explique la fréquence plus basse d'oscillations du signal fourni par le capteur de force. La fréquence et l'amplitude des oscillations sont aussi atténuées par le temps de réponse du capteur de force et par l'instrumentation électronique. L'évolution du problème est représentée à la figure 7.

CONCLUSION

Cette étude permet de comprendre comment un matériau composite renforcé par un tissu de fibres de verre satin de 8 se comporte sous sollicitations statiques et en choc. L'utilisation d'une machine servo-hydraulique fournit une vitesse constante pendant toute la durée de l'essai, et nous pouvons déterminer les lois de comportement du matériau en fonction de la vitesse de chargement.

A la vue des hypothèses et approximations admises, la modélisation du comportement d'une plaque circulaire encastrée et soumise à une charge transversale donne des résultats satisfaisants. Cette modélisation permet une meilleure compréhension des phénomènes qui se produisent pendant un choc perforant. Ces résultats prouvent que les matériaux composites sont d'un intérêt particulier pour les structures marines soumises à des sollicitations de choc pour les principales raisons suivantes :

- absorption d'énergie ;
- déplacements importants ;
- dommages localisés ;
- propagation complexe de fissure.

BIRNBAUM N.K., COWLER M.S., ITOH M., KATAYAMA M., OBATA H., 1987, AUTODYN - An interactive non.linear dynamic analysis program for microcomputers through supercomputers, 9th International Conference on structural mechanics in reactor technology, paper B8.

DOAN C., HAMELIN P., 1989, Résistance au choc à faible vitesse de structures composites, DYMAT, 5me Journée nationale, Polymères et composites - résistance à l'impact, Bordeaux, décembre 1989.

GENIN D., HAMELIN P., 1991a, Effet du vieillissement sur les propriétés mécaniques des plaques renforcées par des fibres courtes, Matériaux et Techniques, mars-avril 1991, pp 45-49.

GENIN D., HAMELIN P., 1991b, Experimental approach and modelling of the damage incurred by a composite plate under low velocity impact, Composite Structures 6, Proceedings of the 6th International Conference, edited by I.H. Marshall, Elsevier Science.

GERMAIN P., 1973, Mécanique des milieux continus, Masson et Cie, Paris.

SHIVAKUMAR K.N., ELBER W., ILLG W., 1985, Prediction of low-velocity impact damage in thin circular laminates, AIAA Journal, vol. 23, n°3, mars 1985, pp 442-449.

SUN C.T., CHATTOPADHYAY S., 1975, Dynamic response of anisotropic laminate plates under initial stress impact of a mass, Journal of Applied Mechanics, sept. 1975, pp 693-698.

TAN T.M., SUN C.T., 1982, Wave propagation in graphite/epoxy laminates due to impact, rapport NASA CR 168057, déc. 1982.

	projectile	plate
density (kg/m ³)	7800	1850
Bulk modulus (MPa)	200000	19000
Shear modulus (MPa)	80000	4000
Yield stress (MPa)	900	290
Ultimate stress (MPa)		300

Tableau 1: Propriétés mécaniques du projectile et de la plaque.
Table 1: Elastic and strength properties of plate and impactor



Figure 1.
Machine d'essai
Testing apparatus.

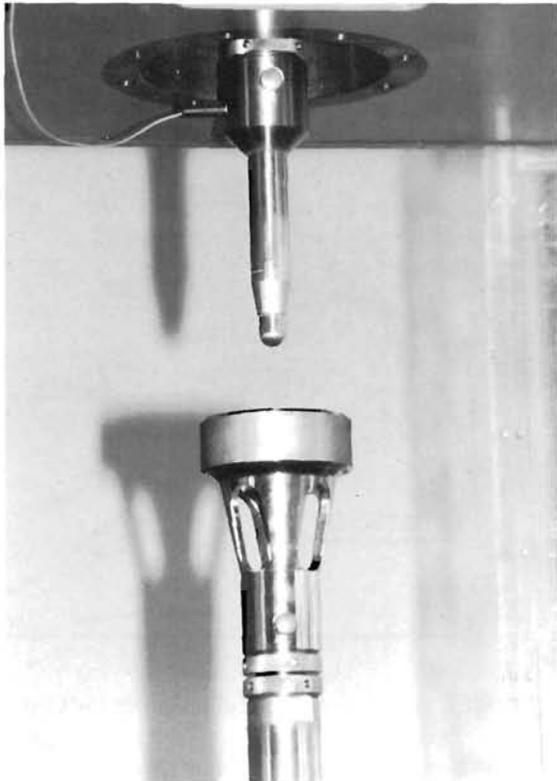


Figure 2.
Montage expérimental
Testing setup.

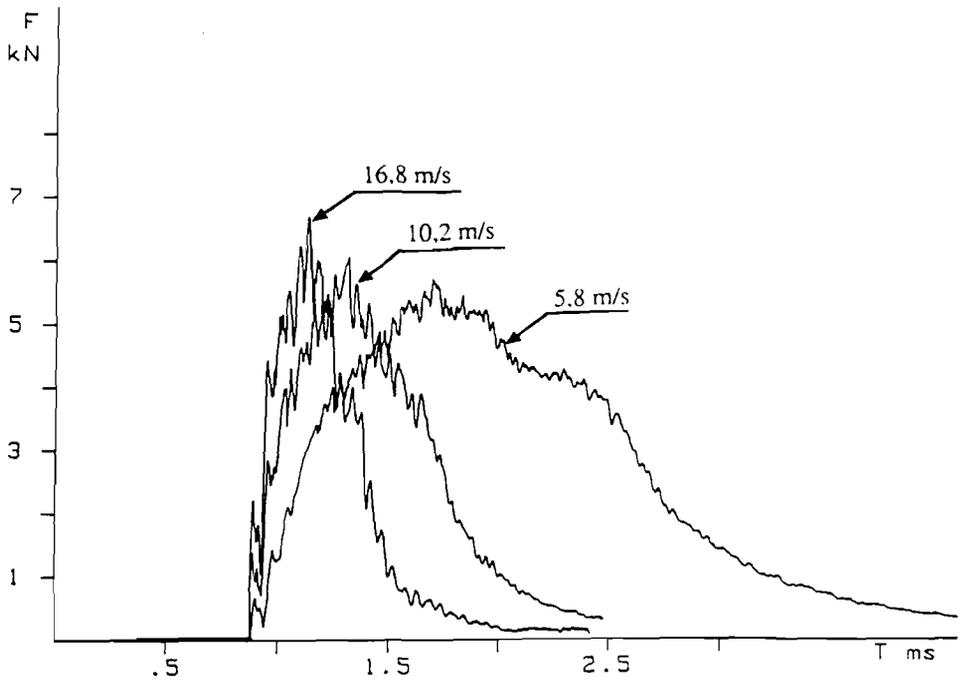


Figure 3: Evolution de la force de contact en fonction du temps.
Evolution of the contact force as a function of time.

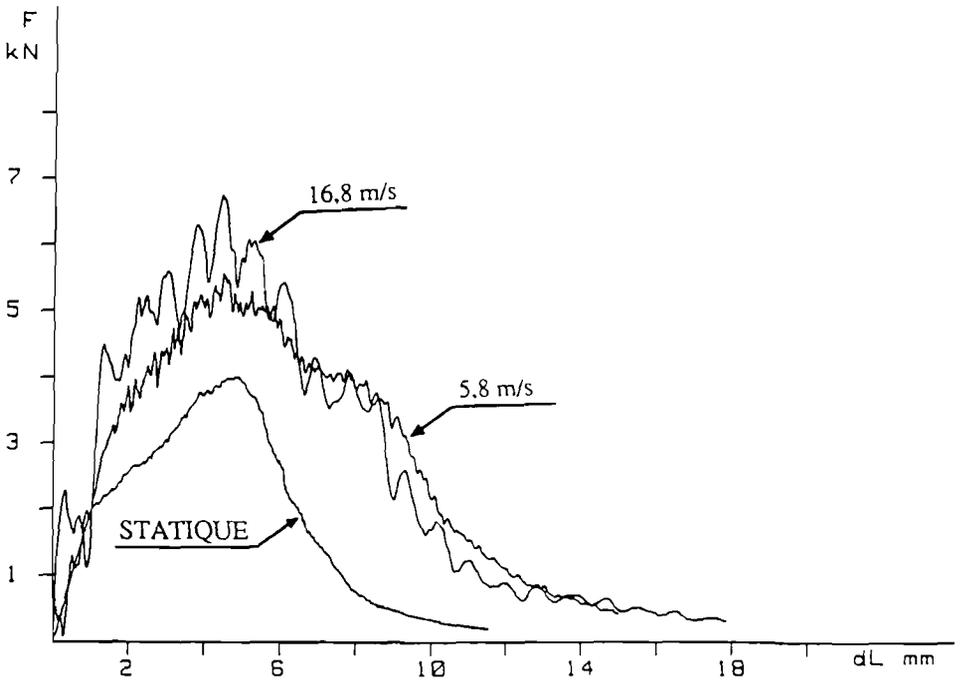


Figure 4: Evolution de la force de contact en fonction du déplacement mesuré au centre de la plaque.
Evolution of the contact force as a function displacement measured at the centre of the panel.

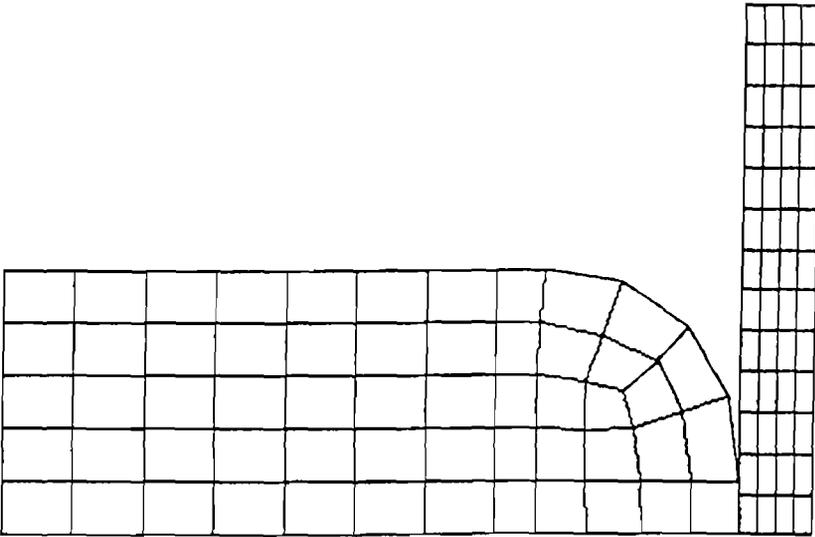


Figure 5: Discrétisation du probleme
Schematic idealization of the problem

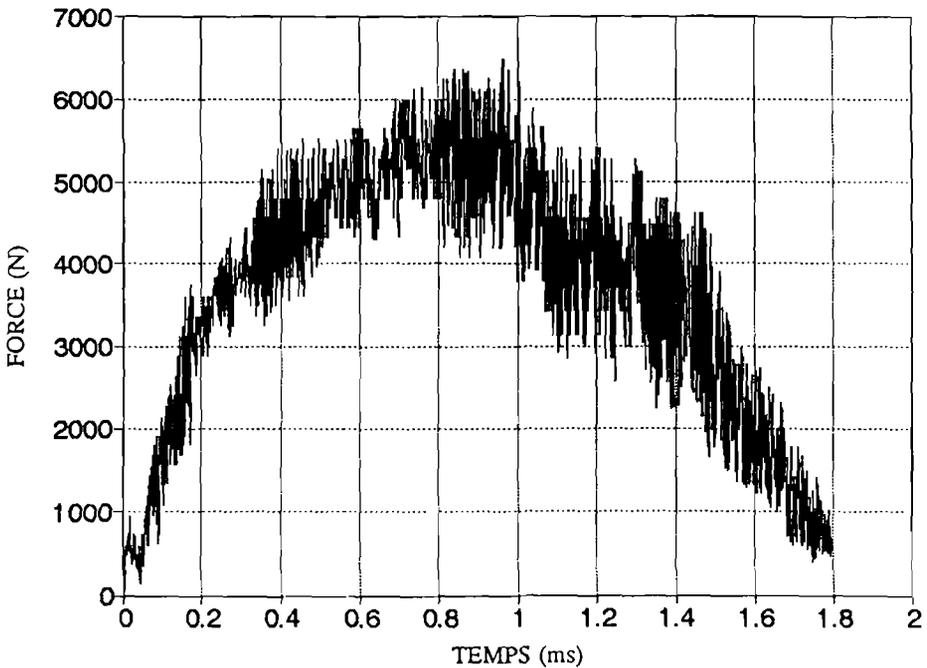


Figure 6: Evolution de la force en fonction du temps, calculée au point où est positionné le capteur de force
Time history of the load calculated at the level of the load cell

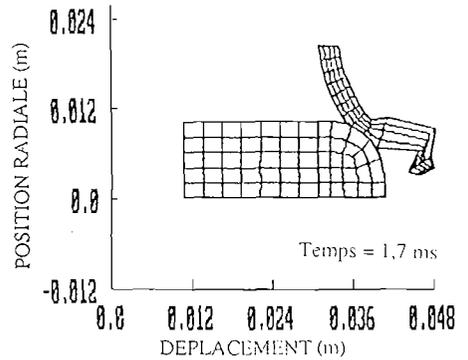
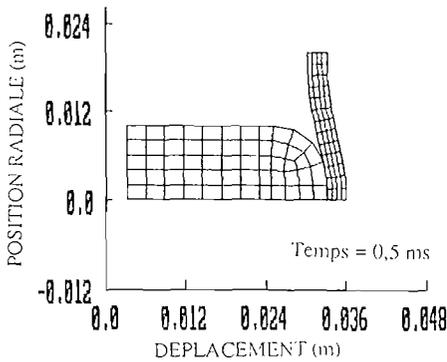
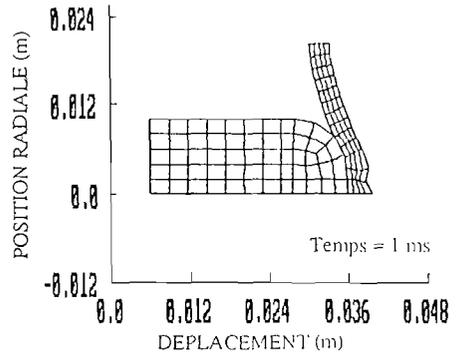
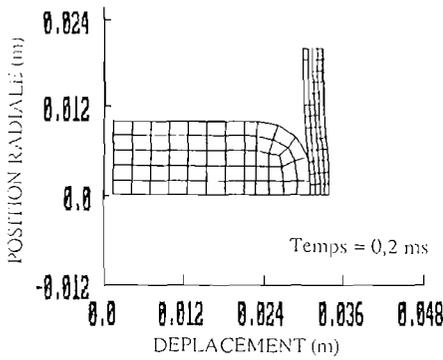


Figure 7: Evolution des déformations d'une plaque circulaire soumise à un choc perforant du à un perforateur se déplaçant à une vitesse constante de 5.8 m/s

Evolution of strains in a circular panel subjected to perforation impact by an impactor travelling at a constant speed of 5.8 m/s.