

Etat de l'art des matériaux « Intelligents » et leur Application dans la Maintenance industrielle Intelligente

NECIB Brahim, GHARBI Abderezak et SAHLI Mohamed Saleh

Département de Génie Mécanique, Laboratoire de Mécanique, Faculté des Sciences de l'Ingénieur,
Université Mentouri Constantine, Campus Chaab Ersas 25000 Constantine, ALGERIE

E-mail: necibbrahim2004@yahoo.fr, Tel/Fax: 00 213 31 81 88 53

Résumé:

Les structures internes des technologies modernes dans les domaines des systèmes mécaniques, aéronautiques, génie civil ou même de la biomécanique, sont souvent composées de matériaux anisotropes vu leur légèreté leur état de fabrication et leur souplesse. De nos jours, le contrôle de santé de ces structures devient indispensable afin d'éviter leur déformation maximale, leur fissuration ou même leur ruine pour augmenter leur durée de vie et prédire leur destruction qui peut apparaître à tout moment. Pour cela des matériaux adaptables intelligents ou « smart materials » sont utilisés pour contrôler l'état de santé de ces systèmes mécaniques ou médicaux. En fait, ces matériaux ont connus une grande évolution dans ce domaine et ils sont utilisés pour prévenir la déformation maximale des structures, leur fissuration ou même leur endommagement et leur ruine sous l'effet des forces d'excitation extérieures, d'impacts, de choc ou de vibrations à haute fréquence (glissement de terrain ou tremblement de terre). Pour détecter et surveiller l'état de santé de ces structures, des matériaux intelligents sont introduits dans les matériaux composites afin de déterminer les contraintes limites élastiques dans le corps et d'éviter sa totale déformation ou sa totale destruction, et ce par la production des charges impulsives capables de remettre le corps à sa position ou à son état initial. De ce fait, l'emplacement des matériaux « intelligents » tels que les pastilles piézoélectriques de type PZT dans une structure composite permet de détecter les différents types de défauts dans la structure et qui peuvent être aménagés et remédiés en conséquence : d'où la maintenance industrielle.

De ce fait, l'emplacement des matériaux « intelligents » tels que les pastilles piézoélectriques de type PZT dans une structure composite ou dans un système mécanique permet de détecter les différents types de défauts et qui peuvent être aménagés et remédiés en conséquence, tout en produisant une tension électrique lorsqu'ils subissent des contraintes ou des forces mécaniques. Aussi, soumis à un courant électrique, ils peuvent aussi se déformer mécaniquement et l'emplacement des pastilles piézoélectriques de type PZT sur une structure permet de détecter les différents types de défauts. En fait, sous l'effet d'une contrainte, il apparaît des charges électriques (effet direct). L'application d'une tension engendre une déformation. Ce phénomène s'observe uniquement dans les matériaux non conducteurs. Le déplacement des charges se fait dans une direction privilégiée sous les efforts de traction ou de compression dans la structure cristalline de la céramique (effet inverse).

Dans notre étude, la définition générale des différents types de matériaux intelligents, leur concept, avantage et inconvénient, leur application ainsi que leur état de l'art sera considérée. Un exemple de contrôle de santé utilisant le matériau adaptable intelligent de type « piézoélectrique » pour prédire la fissuration d'un stratifié verre E/époxyde sous l'effet des efforts extérieurs sera considéré et analysé par la méthode des éléments finis. Il a été constaté que durant l'apparition de la fissuration dans la matrice, une discontinuité de la courbe contrainte/déformation est observée, aussi cette apparition des fissures augmente d'une façon plus particulière quand les charges sont appliquées perpendiculairement aux fibres. Il a été noté que dans le cas de la présence d'un délaminage, la capacité statique du PZT se traduit par une augmentation brutale de tension.

Mots clefs: Maintenance intelligente, Matériaux intelligents, sollicitations extérieures, Fissuration des stratifiés, Éléments finis.

1. Introduction

Le développement et les changements rapides des produits, des pratiques technologiques et industrielles sont accompagnés par de nouvelles générations de matériaux. Parmi ces matériaux, les composites ne cessent d'évoluer vers des produits qui sont, soit le moins coûteux possible, soit le plus performant, ou bien les deux à la fois [1]. De plus, dans un souci de protection de l'environnement et de santé publique, les composites tendent à intégrer un caractère écologique. Ces matériaux occupent aujourd'hui une place importante dans les produits manufacturables. Les matériaux piézoélectriques, produisent une tension électrique lorsqu'ils subissent une contrainte mécanique. Soumis à un courant électrique, ils peuvent aussi se déformer mécaniquement [2]. L'emplacement des pastilles piézoélectriques de type PZT sur une structure composite permet de détecter différents types de défauts.

2. Etat de l'art des matériaux « intelligents » et leurs applications

Les matériaux orthotropes, précisément les composites, les sandwichs, et les matériaux piézoélectriques ainsi que leurs procédés d'élaboration utilisant les éléments de base d'autres types de matériaux sont bien connus [3] et leurs domaines d'applications sont très vastes dans l'industrie moderne. Cependant l'opération de recherche sur les matériaux piézoélectriques entre dans un cadre plus large des matériaux « intelligents » et/ou des structures multifonctionnelles, spécialement aux structures piézoélectriques constituées de poutres et de plaques multi-couches dont le comportement varié, leur confèrent des applications dans le domaine des technologies avancées telles que : les structures adaptatives, contrôle de formes et de vibrations en aérospatiale et même en biomécanique. Sous l'effet d'une contrainte, il apparaît des charges électriques (effet direct). L'application d'une tension engendre une déformation. Ce phénomène s'observe uniquement dans les matériaux non conducteurs. Le déplacement des charges se fait dans une direction privilégiée sous les efforts de traction ou de compression dans la structure cristalline de la céramique (effet inverse)

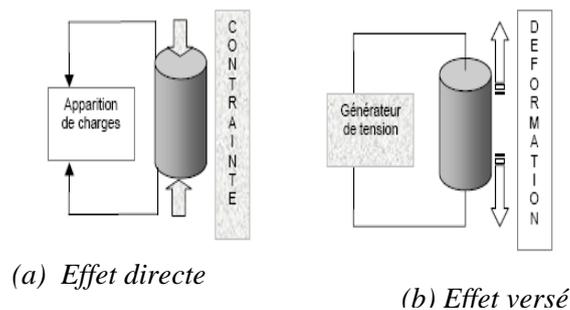


Figure 1. Effet directe et versé

L'application de ces types de matériaux se concentre essentiellement dans les structures internes des technologies modernes tels que les systèmes mécaniques, aéronautiques, génie civil ou même de les systèmes biomécaniques vu leur légèreté, leur souplesse, leur état de fabrication et même leur rapidité de réponse. Ce qui permet le contrôle de santé de ces structures technologiques qui est indispensable afin d'éviter leur déformation maximale, leur fissuration ou même leur ruine pour augmenter leur durée de vie et prédire leur destruction qui peut apparaître à tout moment du à des excitations extérieures telles que les forces d'impacts, de choc ou de vibrations à haute fréquence (vibration des ailes d'avions ou des tremblements de terre). L'état de l'art de ces matériaux intelligents est donc de surveiller et de détecter l'état de santé des structures de ces technologies. Ils sont spécialement introduits dans des matériaux anisotropes ou composites afin de déterminer les contraintes limites

élastiques dans les corps et d'éviter leur totale déformation ou leur totale destruction et ce par la production des charges impulsives capables de remettre le corps à sa position ou à son état initial d'où la maintenance industrielle intelligente.

3. Théorie d'élasticité des matériaux orthotropes et avancés

Une structure composite est construite de plusieurs plis unidirectionnels dans un ordre indiqué d'orientation. C'est-à-dire, les directions principales de chaque pli font un angle différent avec l'ensemble des axes de référence. Chaque pli est orthotrope et obéit à des relations *contrainte/déformation* qui se rapportent aux axes principaux [3]. La loi de Hooke généralisé pour un matériau orthotrope permet de définir la relation contrainte/déformation comme suit :

$$\begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_{23} \\ \tau_{31} \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & Q_{13} & 0 & 0 & 0 \\ Q_{12} & Q_{22} & Q_{23} & 0 & 0 & 0 \\ Q_{13} & Q_{23} & Q_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & Q_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & Q_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & Q_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{31} \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} \quad (1)$$

Dans le cas bidimensionnel, toutes les constantes qui sont reliées à l'axe x_3 peuvent être mises à zéro. La relation contrainte/déformation est la suivante :

$$\begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & 0 \\ Q_{12} & Q_{22} & 0 \\ 0 & 0 & Q_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} \quad (2)$$

Nous avons donc respectivement la matrice de rigidité et de souplesse :

Une structure composite est construite de plusieurs plis unidirectionnels dans un ordre indiqué d'orientation (figure . 2). Les matrices de rigidité et de souplesse pour un stratifié orthotrope dans un système d'axes de référence arbitraires sont :

$$[\bar{Q}] = \begin{bmatrix} \bar{Q}_{11} & \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{16} \\ \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{22} & \bar{Q}_{26} \\ \bar{Q}_{16} & \bar{Q}_{26} & \bar{Q}_{66} \end{bmatrix} \quad \text{et} \quad [\bar{S}] = \begin{bmatrix} \bar{S}_{11} & \bar{S}_{12} & \bar{S}_{16} \\ \bar{S}_{12} & \bar{S}_{22} & \bar{S}_{66} \\ \bar{S}_{16} & \bar{S}_{26} & \bar{S}_{66} \end{bmatrix}. \quad (3)$$

Le calcul d'homogénéisation des composites consiste à déterminer les caractéristiques mécaniques du matériau en fonction de celles de ses composants (fibre-matrice). Dans la plupart des cas, ces calculs se réduisent uniquement au calcul du module d'Young. Il existe divers modèles d'homogénéisations pour l'obtenir. Une cellule élémentaire de fraction volumique ($V = 1$) constituée de fibres et de matrice avec : V_m : Fraction volumique de matrice et V_f : Fraction volumique de fibre, d'où la loi des mélanges :

$$V = V_m + V_f = 1 \quad (4)$$

Le phénomène piézoélectrique se manifeste par la conversion de l'énergie électrique en énergie mécanique et réciproquement. Les huit équations d'état (tableau 1), relie des variables électriques (induction électrique D ou champ électrique E) à des variables mécaniques (déformations ε ou contraintes σ). Elles illustrent le phénomène de couplage entre l'énergie élastique et l'énergie électrique d'un matériau piézoélectrique [2]. L'utilisation de ces relations permet de calculer l'admittance électrique d'un PZT, ainsi que leur capacité statique :

$$C_S = \{P\}^T \cdot [K]^{-1} \cdot \{P\} + C \quad (5)$$

Tableau1 : Relations de comportements piézoélectriques

<i>Variables indépendantes</i>	<i>Grandeurs mécaniques</i>	<i>Grandeurs électriques</i>
σ_{ij}, E_q	$\sigma_{ij} = K_{ijkt}^E \varepsilon_{kl} - e_{ijq} E_q$	$D_p = e_{pkt} \varepsilon_{kl} + \varepsilon_{pq}^E E_q$
σ_{ij}, D_q	$\sigma_{ij} = K_{ijkt}^D \varepsilon_{kl} - h_{ijp} D_p$	$E_q = h_{qkt} \sigma_{ij} + \varepsilon_{qp}^E D_p$
ε_{kl}, E_k	$\varepsilon_{kl} = S_{klif}^E \sigma_{ij} + d_{klq} E_q$	$D_p = d_{pij} \sigma_{ij} + \varepsilon_{pq}^E E_q$
ε_{kl}, D_q	$\varepsilon_{kl} = S_{klif}^D \sigma_{ij} + g_{klq} D_q$	$E_q = g_{qij} \sigma_{ij} + \varepsilon_{qp}^E D_p$

4. Analyse des stratifiés comportant des pastilles Piezoélectrique

Avant d'étudier les stratifiés comportant des pastilles piézoélectrique, il faut présenter une analyse complète sur la théorie des stratifiés, ainsi que les différents types de stratification. L'utilisation d'une cinématique de type Kirchoff-Love permet de trouver l'équation constitutive d'une plaque stratifiée :

$$\begin{bmatrix} N_x \\ N_y \\ T_{xy} \\ M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{16} & B_{11} & B_{12} & B_{16} \\ A_{12} & A_{22} & A_{26} & B_{12} & B_{22} & B_{26} \\ A_{16} & A_{26} & A_{66} & B_{16} & B_{26} & B_{66} \\ B_{11} & B_{12} & B_{16} & D_{11} & D_{12} & D_{16} \\ B_{12} & B_{22} & B_{26} & D_{12} & D_{22} & D_{26} \\ B_{16} & B_{26} & B_{66} & D_{16} & D_{26} & D_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \\ K_x \\ K_y \\ K_{xy} \end{bmatrix} \quad (6)$$

Avec: $[A] = A_{ij} = \sum_{k=1}^n (\bar{Q}_{ij})_k \cdot (h_k - h_{k-1}) \longrightarrow membrane$

$$[A] = A_{ij} = \sum_{k=1}^n (\bar{Q}_{ij})_k \cdot (h_k - h_{k-1}) \longrightarrow traction / flexion$$

$$[D] = D_{ij} = \frac{1}{3} \sum_{k=1}^n (\bar{Q}_{ij})_k (h_k^3 - h_{k-1}^3) \longrightarrow flexion$$

Pour le cas d'un stratifié qui comporte une pastille piézoélectrique (figure 3) l'équation constitutive d'une plaque stratifiée devient comme suit :

$$\begin{cases} [N] = [A][\varepsilon^0] + [B][K] - [F]E_z \\ [M] = [B][\varepsilon^0] + [D][K] - [G]E_z \\ [D_{ij}]_p = [P][\varepsilon^0] + [R][K] + [J]E_z \end{cases}, \text{ avec } \begin{cases} [F] = (h_{p+1} - h_p)[\bar{Q}]_p \cdot [d] \\ [G] = \frac{h_{p+1}^2 - h_p^2}{2} \cdot [\bar{Q}]_p \cdot [d] \\ [P] = [d]^T \cdot [\bar{Q}]_p \\ [R] = \left(\frac{h_{p+1} + h_p}{2} \right) \cdot [d]^T \cdot [\bar{Q}]_p \cdot [K] \\ [J] = (\varepsilon_{zz}^\sigma - [d]^T \cdot [\bar{Q}] \cdot [d]) \end{cases} \quad (7)$$

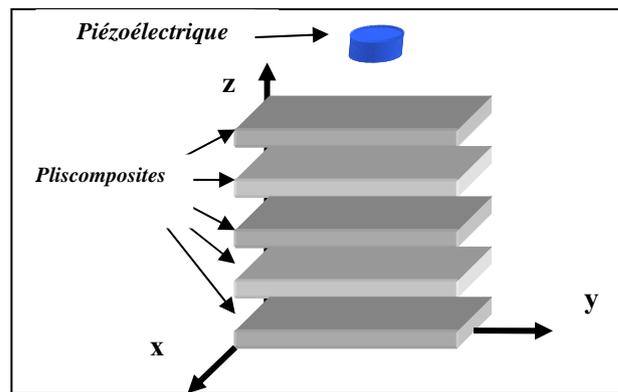


Figure 3 : Stratifié piézoélectrique

5. Analyse de fissuration des matériaux composites

L'inhomogénéité et l'anisotropie des matériaux composites rendent leurs mécanismes d'endommagement plus nombreux et plus complexes. Au sein d'une structure composite, on peut avoir un endommagement constitué de micro-décohésion, de micro-fissures, ruptures de pli, ruptures des fibres et des matrices, décohésion de l'interface, glissement et frottement des fibres dans la matrice figure 4). Ces mécanismes qui mettent en jeu les propriétés physiques et mécaniques de chaque constituant soulignent dès à présent le rôle déterminant joué par la liaison fibre/matrice. Dans cette optique, il faut considérer le matériau comme un système hétérogène constitué d'au moins deux phases homogènes que sont les fibres et la matrice [4]. De plus, ces deux phases sont géométriquement réparties ainsi : les fibres sont continues, parallèles entre elles et séparées les unes des autres par la matrice.

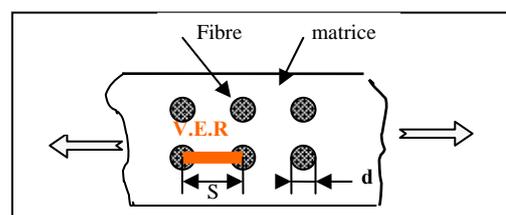
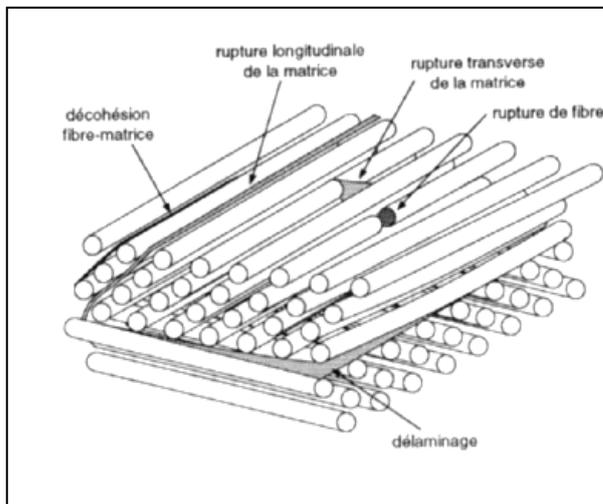


Figure 4 : Mécanisme de rupture d'un stratifié

Figure 5 : rupture en traction transversale

Pour le chargement transverse, une approche simplifiée consiste à considérer que la rupture résulte de la concentration des contraintes autour des fibres. La déformation à la rupture transverse ε_{ry} est alors reliée à la déformation à rupture ε_{rm} de la matrice par un facteur de concentration des contraintes F défini comme suit : $\varepsilon_{ry} = \frac{\varepsilon_{rm}}{F}$; Où le coefficient de concentration des contraintes est donné par :

$$F = \frac{1}{V_f \cdot \left(\frac{E_m}{E_f} - 1 \right) + 1}$$

L'évolution du facteur de concentration des contraintes avec le taux de fibre pour un stratifié constitué par des plis unidirectionnels, Verre E/Epoxyde est résumée dans la figure 6, cela signifie que l'augmentation du fraction volumique des fibres diminue la résistance du stratifié.

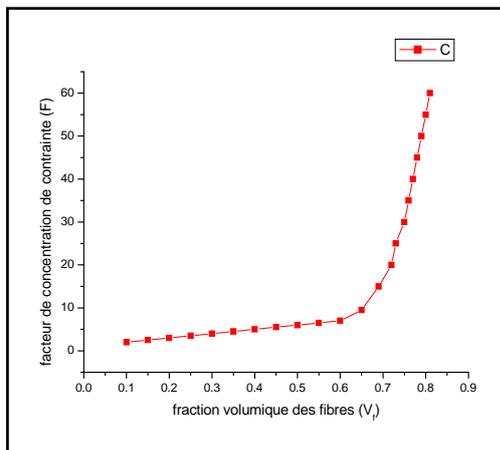


Fig.6 : évolution du facteur de concentration de contrainte avec le taux de fibre

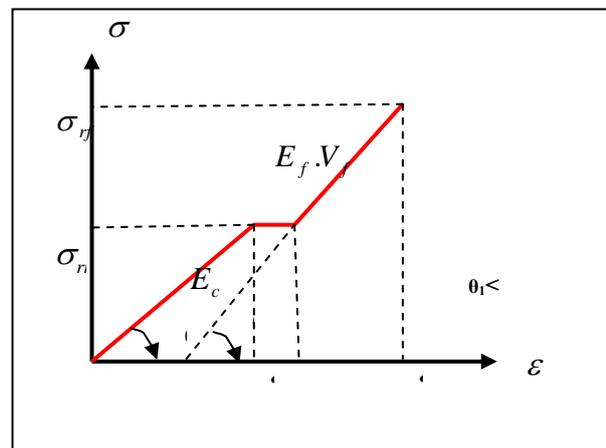


Fig. 7 : Courbe contraintes/déformations

Pour le chargement longitudinal sur le même stratifié, il y'a une apparition de la fissuration matricielle, la résistance a la rupture de la matrice est inférieure à celles des fibres (matrice fragile), la courbe contrainte-déformation dans ce cas est une superposition des trois parties linéaires (fig. 7).

6. Surveillance d'un délaminage par un matériau intelligent

L'emplacement des pastilles piézoélectriques de type PZT sur une structure composite permet de détecter différents types de défauts, pour cela nous avons considéré dans notre étude une poutre intelligente constituée de 5 transducteurs piézoélectriques situés au dessus d'une structure composite carbone/époxyde (figure 8).

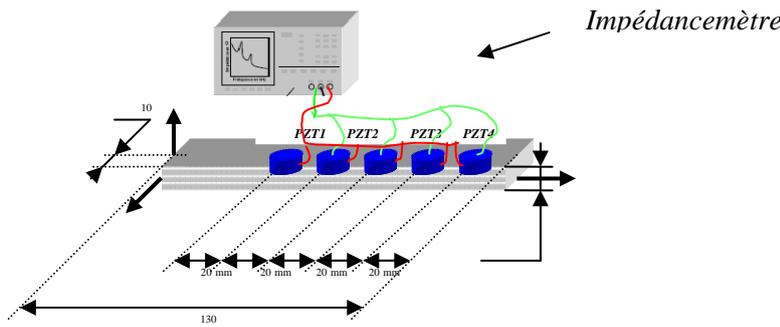


Figure 8: Câblage d'une poutre intelligente

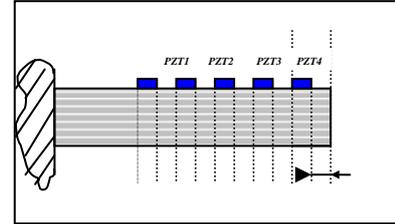


Fig.9 : Modèles des poutres étudiées : le délaminage

L'utilisation de la méthode des éléments finis permet dynamiques au noeuds de discrétisation, le calcul de la capacité électrique et une piezoelectrique est fait par la connaissance de ces grandeurs :

$$\begin{cases} Y = \frac{V^+}{I} \\ I = \int_+ \bar{D}_{PX} \cdot ds = j \cdot \bar{\omega} \int_+ D_{PX} \cdot ds = j \cdot \bar{\omega} \cdot b \int_{n_p}^{n_{p+1}} D_{PX} \cdot dx \end{cases} \quad (8)$$

La capacité statique est donc:

$$C_s = \frac{(P^D \cdot \Delta \bar{W} + J^D \cdot d_p)}{e_p} \quad (9)$$

Des délaminages de différentes longueurs (selon l'emplacement des transducteurs) entre le 8^{em} et 9^{em} pli sont supposés (figure 9). Cette étude montre que la capacité des matériaux piézoélectrique permet de détecter les délaminages produits dans les structures composites (figure 10), on peut alors les utilisés comme des capteurs de santé, surtout dans les domaines sensibles.

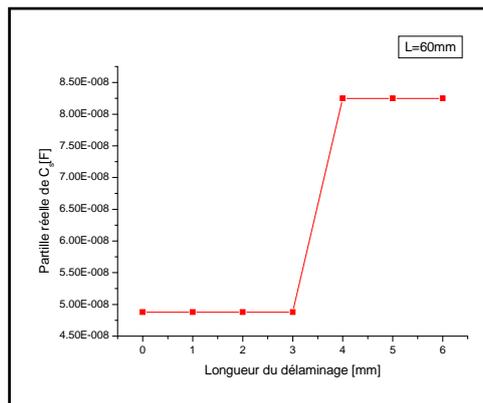


Figure 10 : Délaminage de 60mm

7. Conclusion

La maintenance industrielle est d'une grande importance dans les différents domaines de la technologie moderne afin de prévenir leur totale déformation ou leur destruction. Elle se base essentiellement sur l'intégration des matériaux intelligents infiniment petits pour détecter leur

déformation ou leur fissuration afin de prévenir leur totale destruction ou totale rupture. Dans notre exemple, un stratifié verre E/époxyde où la déformation à rupture de la matrice est inférieure à celle des fibres est considérée. Le contrôle de la structure du matériau et de son délaminage est basé sur l'intégration d'un matériau intelligent adaptable du type PZT (transducteur) qui sont placés sur la poutre afin de détecter le délaminage de leurs plis. Il a été constaté qu'il y a eu une présence d'une fissuration matricielle avant l'endommagement des fibres où la courbe contrainte-déformation est une superposition des trois parties linéaires. L'apparition d'un délaminage sous un transducteur génère une augmentation brusque de sa capacité statique et tous les transducteurs offrent la même sensibilité ce qui met en évidence l'importance du couplage des transducteurs à la structure. Cette augmentation brusque de la capacité du transducteur permet automatiquement de détecter l'existence du délaminage dans la structure. Aussi la méthode des éléments finis est utilisée pour modéliser cette poutre ainsi que l'emplacement des capteurs, ce qui permet de déterminer leur capacité statique utilisant les déplacements aux noeuds. Il a été noté que dans le cas de la présence d'un délaminage au dessous d'un PZT, la capacité statique de ce dernier se traduit par une augmentation brutale.

Bibliographie

- [1] BERTHLOT J.M, *Matériaux composites – Comportement mécanique et Analyse des structures*. Tec&Doc Eds. Paris 1999
- [2] BAKER A.A. *Advances in bonded composite repair of metallic aircraft structures* Volume 2, Editors: Defence Science and Technology Organisation.
- [3] SROE M., MODARESSI A. *Lois de comportement* Laboratoire de Mécanique des sols, Structures et Matériaux Ecole Centrale, Paris.
- [4] HERMES N.R.. *Rupture par fissuration des structures*. Traités des nouvelles technologies, Série Matériaux.
- [5] REBIERE J.L. *Evaluation de l'endommagement par fissuration et délaminage dans des stratifiés croisés à l'aide de l'approche variationnelle*.
- [6] SARAVANAN M.P; NAGI G.N. *Impact identification for metallic plate using distributed smart materials*, 2001
- [7] A.SAIDI and Al, *Solution 3D par homogénéisation d'une structuresandwich et retour à l'échelle macroscopique*, LMCA Université de Picardie Jules Verne 2001.
- [8] J.PAYAN, *Etude du comportement de composites stratifiés sous chargement statique et de fatigue*, These de PhD Université de la Méditerranée Marseille.
- [9] M.GEOFFREY, A.TESSIER, *A 1.2 order bending theory for laminated composite and sandwich beam*, Structure Division USA 1998 PP 565-576.