

Localisation de sources d'émission acoustique dans un matériau composite

Bernard CASTAGNEDE, Wolfgang SACHSE et Kwang Yul KIM

Résumé – La méthode d'optimisation décrite dans une précédente Note [1] est utilisée pour localiser des sources d'émission acoustique dans un matériau composite unidirectionnel. Les mesures sont réalisées à l'aide d'un système ultrasonore source/recepteurs ponctuels pour la caractérisation de matériaux. Il apparaît clairement que la localisation des sources est correctement effectuée dans le champ proche malgré une forte atténuation et une dispersion conséquente des ondes transitoires.

Acoustic emission source location in a composite material

Abstract – The optimization method described in a previous Note [1] is applied to locate acoustic emission sources in an unidirectional composite material. The measurements are done with an ultrasonic point-source/point-receiver materials testing system. The results clearly demonstrate that the location is properly done in the near-field, despite strong attenuation and dispersion of the transient waves.

Abridged English Version – An original numerical scheme has been recently introduced for locating acoustic emission sources in anisotropic media [1]. Generally, in the case of isotropic solids, such a localization process is done using triangulation techniques ([2], [3]). In principle, the approaches are similar for both acoustic emission source location as applied to fracture Mechanics problems and for earthquake epicenter determinations [4]. Least-square methods are already used for such problems as well as signal processing techniques using correlation methods ([5], [6]). Furthermore, in the field of isotropic materials testing, several systems already exist ([7], [8]).

To test our algorithm for anisotropic materials, an ultrasonic point-source/point-receiver materials testing system has been used in this study [9]. Recently, such an approach was successful to describe experimentally various problems in fracture mechanics ([11], [12]). The acoustic emission sources were simulated by breaking 0.08 mm o.d. capillary glass tubes. The rise time for such acoustic emission event is typically in the range of 50 ns. The sensors used here are large bandwidth piezoelectric pinducers with a 1.3 mm diameter. The material used in this study, a fiberglass reinforced unidirectional composite material [15], has a medium anisotropy and is porous. Also, it has a poor homogeneity and rough surfaces. The location process is initiated by a calibration procedure which provides the necessary elastic constants given by Equations (1) and (2), in the case of a transversely isotropic solid [13]. These preliminary measurements are done in 4 particular directions of propagation as shown in Figure 1. To obtain accurate values of the elastic constants, averages are computed for that purpose. Then, by using the optimization procedure described in [1], which involves the solution of a non-linear set of equations with a Newton-Raphson numerical method [14], the location of the source is determined. The measurements were done in the near-field to limit the influence of attenuation and dispersion of the transient waves. Figure 2 shows some characteristic waveforms. Attenuation and dispersion are clearly seen on these transient waves and might be detrimental to the precision of the results. Also, when moving to the far-field, plates modes ([16]-[18]) which become preponderant are problematic, as the bulk modes have weaker amplitudes. This last problem is

Note présentée par Michel COMBARNOUS.

directly linked to the chosen geometry — a thin plate — and can be avoided by using other configurations. Despite the limited set of data provided in the Table and their relative inaccuracy, these results clearly demonstrate the efficiency of our algorithm. An important feature is that the convergence is always better when considering the material anisotropic instead of being isotropic. For instance, sometimes there is not even convergence, showing the incompatibility of treating the data with the isotropic hypothesis.

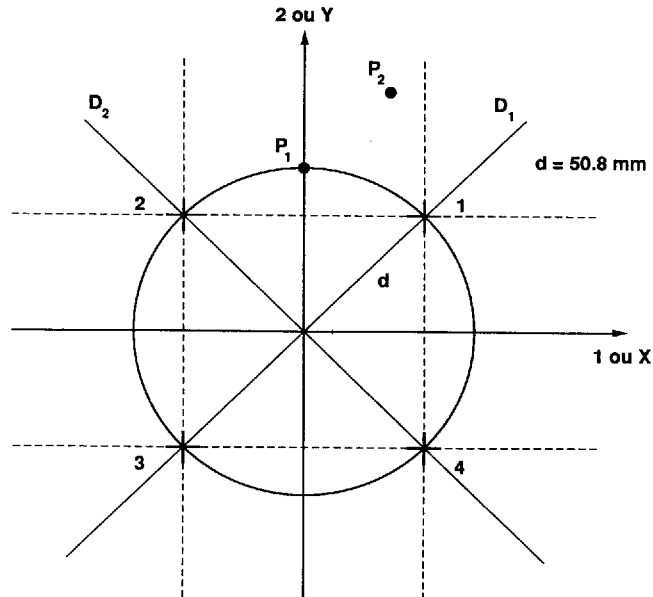
In addition, the method can be extended to the full 3-dimensional problem [19]. For this problem, the set of non-linear equations is given by Equation (3), where new fourth degree terms appear. A supplementary difficulty is due to the fact that propagation in non-principal planes has to be considered. In such a case, analytical expressions for the slowness curves are no longer available. The eigenvalues of the propagation tensor should be numerically computed, using for instance Jacobi method [14]. A stringent problem is related to the non-uniqueness of the solutions, which occur for some source/sensors configurations. These developments and further experimental data will be described elsewhere [20].

INTRODUCTION. — La localisation de sources d'émission acoustique est d'ordinaire réalisée, pour des milieux isotropes, par des techniques de triangularisation ([2], [3]). Que ce soit pour la localisation d'épicentres de tremblements de terre ou pour des applications en Science des matériaux/Mécanique de la rupture, des techniques de moindres carrés [4], et de corrélation ([5], [6]) sont couramment utilisées. Par ailleurs, il existe des systèmes de mesures spécialisés pour cette tâche ([7], [8]). Toutefois, l'anisotropie était jusqu'alors absente de ces traitements ce qui motiva l'introduction de la procédure d'optimisation décrite dans une précédente Note [1]. Cette méthode de localisation de sources ponctuelles d'émission acoustique est éprouvée dans la présente Note pour un matériau composite fibres de verre/résine polyester. Le matériau retenu dans ce but ⁽¹⁾, possède une anisotropie moyenne, et est par ailleurs très ordinaire, légèrement poreux et assez peu homogène. Ainsi, nous nous plaçons délibérément dans des conditions assez peu favorables. Notons en outre que l'état de surface du matériau est plutôt médiocre et que la condition de lame à faces parallèles requise par la modélisation apparaît tout au plus comme une approximation. Pour effectuer les mesures expérimentales, un système ultrasonore associant des sources d'émission acoustique ponctuelles à un réseau de transducteurs quasi-ponctuels fut utilisé. Des détails techniques concernant cet appareillage sont disponibles ailleurs [10]. Ce banc de mesure ouvre d'intéressantes perspectives pour des expérimentations en mécanique de la rupture ([11], [12]). Les sources d'émission acoustique sont simulées en brisant des tubes capillaires de 0,08 mm de diamètre extérieur. Le temps de montée pour les transitoires acoustiques accompagnant la rupture sont de l'ordre de 50 ns. Les transducteurs utilisés sont de minuscules capteurs piézoélectriques large bande en tête d'épingle ayant un diamètre de 1,3 mm. L'utilisation de la procédure de localisation présuppose la connaissance des constantes élastiques du matériau considéré. Cette tâche est accomplie par une procédure de calibration qui est décrite ci-dessous.

PROCÉDURE DE CALIBRATION. — Le matériau éprouvé est un composite unidirectionnel pour lequel la symétrie hexagonale est une excellente approximation. Limitant notre modélisation en considérant la propagation dans le plan principal (1, 2), qui n'est rien d'autre que la surface du matériau, met en œuvre les quatre constantes élastiques C_{11} , C_{22} , C_{12} , C_{66} [13]. Ces paramètres sont mesurés simplement en considérant quelques

Fig. 1. — Géométrie utilisée au cours des mesures expérimentales. C_{p1} et C_{p2} sont mesurées sur les droites en pointillés le long de la direction principale 1, respectivement 2. C_s est mesurée d'une manière analogue sur le mode transverse. C_{45} est mesurée le long des diagonales D_1 et D_2 .

Fig. 1. — Geometry used during experiments.



directions de propagation particulières. Ces résultats classiques sont :

$$(1) \quad \begin{cases} (C_{11}/\rho) = C_{p1}^2; & (C_{22}/\rho) = C_{p2}^2; \\ & (C_{66}/\rho) = C_s^2 \end{cases}$$

$$(2) \quad C_{12} = \{ [2\rho C_{45}^2 - (C_{11} + C_{22})/2 - C_{66}]^2 - [(C_{11} - C_{22})/2]^2 \}^{1/2} - C_{66}.$$

Pour déterminer les différentes vitesses de propagation entrant en jeu dans les équations (1) et (2), un certain nombre de mesures de différences des temps de transit pour une paire de transducteurs donné sont réalisées en différentes positions repérées sur la figure 1. Une simple moyenne arithmétique est alors calculée fournissant avec précision les valeurs des vitesses nécessaires. Dès lors, une position arbitraire est retenue pour simuler l'emplacement de la source ponctuelle d'émission acoustique, et la procédure d'optimisation peut avoir lieu [14].

RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX. — Le déroulement des calculs est indépendant du nombre de senseurs (3 est le minimum). Pour des raisons pratiques, les mêmes senseurs furent utilisés, à la fois pour la procédure de calibration et pour celle d'optimisation, bien que nous ayons la possibilité d'utiliser jusqu'à huit canaux. La figure 2 représente des ondes transitoires caractéristiques. Les mesures mettent en œuvre le tout début des formes d'ondes, correspondant au mode quasi longitudinal. L'amplitude de ces pics est très faible en comparaison avec les modes de plaques minces arrivant par la suite. Les ondes de Lamb [16] deviennent prépondérantes, spécialement dans le champ lointain pour lequel les modes de volume s'éteignent ([17], [18]). Notons en outre que les signaux sont dispersifs et atténués, ce qui ajoute une difficulté supplémentaire. Le tableau regroupe quelques résultats caractéristiques. Les vitesses de propagation des ondes acoustiques en diverses directions, ainsi que le rapport des modules d'Young dans les deux directions principales y figurent [15]. Les valeurs des constantes élastiques sont absentes. La raison vient du

Detected Waveforms - Fiberglass/Epoxy Specimen

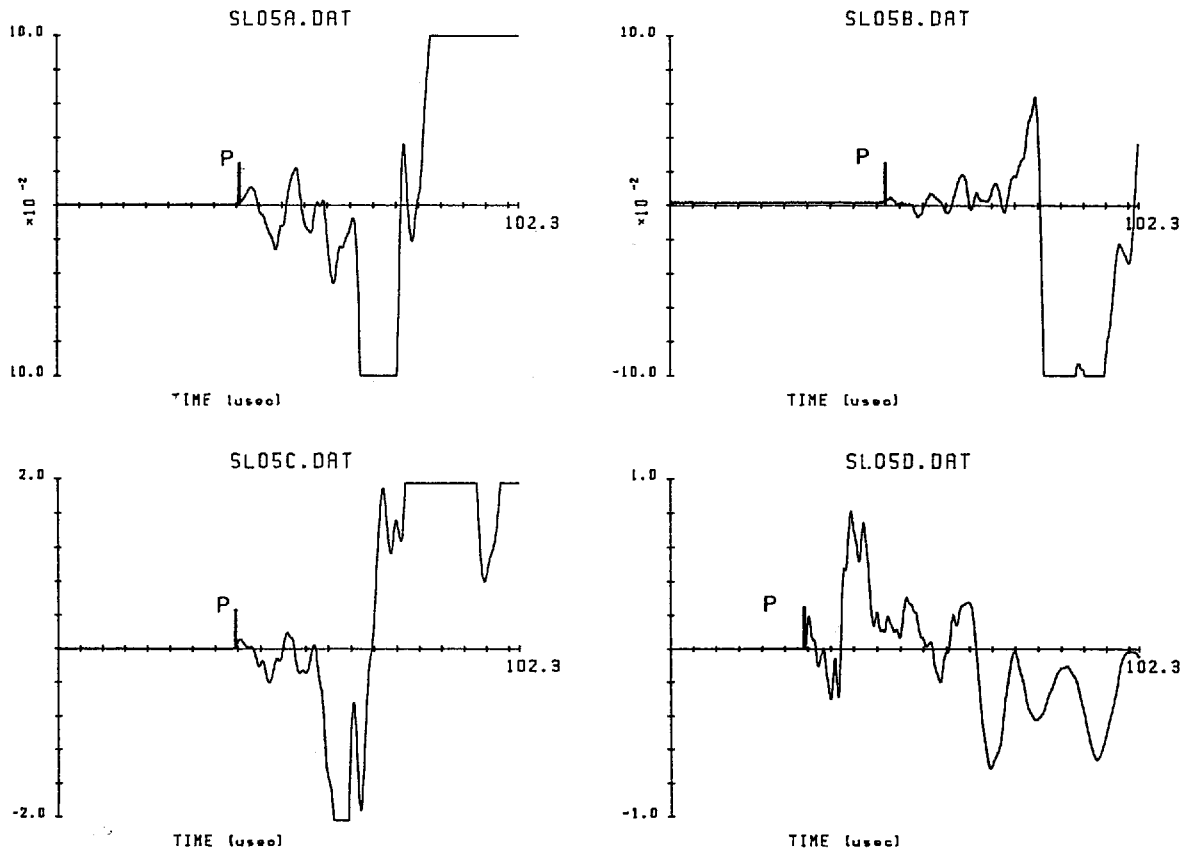


Fig. 2. — Exemple d'une série d'ondes transitoires obtenues : (a) par le senseur #1; (b) par le senseur #2; (c) par le senseur #3; (d) par le senseur #4.

Fig. 2. — Example of a set of transient waveforms obtained: (a) by sensor #1; (b) by sensor #2; (c) by sensor #3, (d) by sensor #4.

fait que la masse volumique du matériau, non indispensable pour la suite des calculs, ne fût pas mesurée. Dans ce même tableau figurent quelques résultats de la détermination optimale de la position de la source d'émission acoustique supposée ponctuelle.

Ces résultats sans être excellent démontrent clairement que la procédure d'optimisation se déroule correctement. Il faut noter par exemple que le nombre d'itérations est faible, augmentant lorsque la source est éloignée de l'origine du référentiel, résultat déjà connu en simulation [1]. De plus, la comparaison des cas isotropes/anisotropes, sans ambiguïté atteste de l'incompatibilité à considérer ce matériau isotrope, et ce malgré un rapport d'anisotropie modeste. Insistons sur le fait que la relative imprécision de ces résultats est liée à plusieurs limitations expérimentales du système tel qu'il fut utilisé, à savoir quatre senseurs au lieu de huit, une fréquence d'échantillonnage de 10 MHz qui ne permet pas d'obtenir une précision suffisante en simple chronométrie. Des expériences complémentaires sont en cours, pour divers matériaux n'ayant pas tous une dispersion et une atténuation aussi sévère.

TABLEAU

Rapport des modules d'Young, vitesses de propagation,
et localisation de sources d'émission acoustique.
Young moduli ratio, wavespeeds, and AE source location.
Module d'Young direction 1/Module d'Young direction 2 = 1,50

Vitesses de propagation

$$\begin{aligned} C_{p1} &= 3\,770 \text{ m/s} & C_s &= 1\,750 \text{ m/s} \\ C_{p2} &= 3\,350 \text{ m/s} & C_{45} &= 3\,460 \text{ m/s} \end{aligned}$$

Position de la source

Source située en :	Calcul de la position de la source		
		Isotropie	Anisotropie
p_1	$X_s = 0,000 \text{ mm}$ $Y_s = 50,800 \text{ mm}$	$X_s = 1,448 \text{ mm}$ $Y_s = 86,589 \text{ mm}$	$X_s = 0,867 \text{ mm}$ $Y_s = 51,333 \text{ mm}$
p_2	$X_s = 25,400 \text{ mm}$ $Y_s = 76,200 \text{ mm}$	Divergence $X_p, Y_s \rightarrow +\infty$	$X_s = 34,620 \text{ mm}$ $Y_s = 87,787 \text{ mm}$

EXTENSION AU CAS TRIDIMENSIONNEL. — L'extension de cette approche au problème à trois dimensions est particulièrement attractive pour détecter des défauts situés à l'intérieur d'un matériau non transparent. Sur le papier, cette généralisation ne pose pas de problème majeur : la démarche décrite en [1] reste la même. Au lieu d'obtenir le système d'équations quadratiques (2) de la référence [1], l'introduction de la troisième coordonnée aboutit à un système de degré 4 donné par l'équation :

$$\begin{aligned} (3) \quad \psi^i(X) &= A_1^i X_3^4 + A_2^i X_1 X_3^2 + A_3^i X_2 X_3^2 \\ &+ A_4^i X_3^2 + A_5^i X_1^2 + A_6^i X_2^2 + A_7^i X_1 X_2 + A_8^i X_1 + A_9^i X_2 + A_{10}^i \simeq 0 \\ & \qquad \qquad \qquad i = 1, \dots, N; \quad N = C_n^2 \end{aligned}$$

avec : n : nombre de senseurs ($n \geq 4$)

$$X \equiv (X_1, X_2, X_3) \equiv (X_s, Y_s, Z_s)$$

$$A_1 = [C_p^2(\theta_k) - C_p^2(\theta_m)]^2$$

$$A_2 = 4d [C_p^2(\theta_k) C_p^2(\theta_m) (\cos \alpha_m + \cos \alpha_k) - C_p^4(\theta_k) \cos \alpha_m - C_p^4(\theta_m) \cos \alpha_k]$$

$$A_3 = 4d [C_p^2(\theta_k) C_p^2(\theta_m) (\sin \alpha_m + \sin \alpha_k) C_p^4(\theta_k) \sin \alpha_m - C_p^4(\theta_m) \sin \alpha_k]$$

$$A_4 = 2 [K_a \{ C_p^2(\theta_k) - C_p^2(\theta_m) \}^2 - K_{km}^2 (C_p^2(\theta_k) + C_p^2(\theta_m))]$$

où $K_a = R^2 + d^2$, et $K_{km} = \Delta t_p (k, m) C_p(\theta_k) C_p(\theta_m)$, et où les autres coefficients A_p , $i = 5, \dots, 10$ sont donnés en [1] par A_p , avec $i = 1, \dots, 6$.

Une difficulté supplémentaire est qu'il faut absolument considérer la propagation s'effectuant dans des plans non principaux. Pour ce problème, les formes analytiques des courbes de lenteurs ne sont plus disponibles, et les valeurs propres du tenseur de propagation doivent être calculées numériquement à l'aide d'une méthode de Jacobi [14], par exemple. Une autre difficulté, plus sérieuse celle-là, tient au fait qu'il y a des configurations source/senseurs pour lesquelles il n'y a pas unicité des solutions [19]. Par un travail en simulation numérique analogue à celui décrit en [1], il a été possible de constater que la convergence est plus délicate. Pourtant des améliorations semblent possible, notamment par un choix judicieux de la disposition des senseurs. Des développements ultérieurs sont en cours [20].

CONCLUSION. — La localisation d'événements d'émissions acoustiques dans des solides anisotropes, et en particulier dans des matériaux composites semble possible. Des limitations dues à la réponse acoustique (atténuation et dispersion) du matériau, néanmoins existent. Celles-ci sont reliées au comportement viscoélastique du matériau, qui n'est pas pris en compte par une description strictement élastique. Pour ce faire, des modèles existent, qui pourraient éventuellement être incorporés dans notre démarche. Plusieurs applications potentielles existent en mécanique de la rupture et en contrôle non destructif.

(¹) Il s'agit de plaques de 12 mm d'épaisseur de composites à résine polyester isophthalique de la série EXTREN 500 [15], commercialisé par Joseph T. Ryerson & Son, Inc., Chicago, Illinois 60680.

Note reçue le 27 juin 1988, acceptée le 13 septembre 1988.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] B. CASTAGNEDE, W. SACHSE et K. Y. KIM, *C. R. Acad. Sci. Paris*, 307, série II, 1988, p. 1473-1478.
- [2] A. TOBIAS, *Nondestructive Testing Int.*, 10, 1976, p. 9.
- [3] M. ASTY, *Nondestructive Testing Int.* 12, 1978, p. 223.
- [4] Y. H. PAO, *Theory of acoustic emission in Elastic and nondestructive testing of materials*, A.M.D., 29, Y. H. PAO éd., A.S.M.E., New York, 1978, p. 107-127.
- [5] I. GRABEC, *Ultrasonics*, 16, 1978, p. 111.
- [6] R. N. BRACEWELL, *The Fourier transform and its applications*, McGraw-Hill, New York, 1986, p. 98-123.
- [7] S. P. YING, D. R. HAMLIN et D. TANNEBEGGER, *J. Acous. Soc. Am.*, 55, (2), 1974, p. 350.
- [8] W. SACHSE et S. SANKAR, *United States Patent*, 4, 592, 034, 1986.
- [9] W. SACHSE et K. Y. KIM, *J. Appl. Phys.* (à paraître).
- [10] W. SACHSE et K. Y. KIM, *Ultrasonics*, 25, 1987, p. 195.
- [11] K. Y. KIM et W. SACHSE, *J. Appl. Phys.*, 55, (8), 1984, p. 2847.
- [12] K. Y. KIM et W. SACHSE, *J. Appl. Phys.*, 59, (8), 1986, p. 2704.
- [13] E. DIEULESAINT et D. ROYER, *Ondes élastiques dans les solides*, Masson, Paris, 1974, p. 113-166.
- [14] W. H. PRESS, B. P. FLANNERY, S. A. TEUKOLSKY et W. T. VETTERLING, *Numerical recipes*, Cambridge University Press, New York, 1986, p. 240-269.
- [15] *Brochure Technique sur les matériaux à fibres de la série Extren 500*, J. T. Ryerson & Sons Inc., Plastics Division, Chicago, 1987.
- [16] Y. H. PAO et R. K. KAUL, *Waves and vibrations in isotropic and anisotropic plates*, in R. D. MINDLIN and *Applied Mechanics*, G. HERMANN éd., Pergamon Press, New York, 1974.
- [17] A. N. CERANOGLU et Y. H. PAO, *J. Appl. Mech.*, 48, 1981, p. 125-147.
- [18] R. L. WEAVER et Y. H. PAO, *J. Appl. Mech.*, 49, 1982, p. 821.
- [19] B. CASTAGNEDE et W. SACHSE, *31-th Meeting of the acoustic emission working group*, 1988, University of California, Los Angeles.
- [20] B. CASTAGNEDE, W. SACHSE et K. Y. KIM, *J. Acous. Soc. Am.* (à paraître).

*Department of Theoretical and Applied Mechanics,
Thurston Hall, Cornell University, Ithaca, New York, 14853 U.S.A.*