HAL
open science

Production d'ondes acoustiques de surface focalisées et utilisation en contrôle non destructif

Mohamed Ourak, Jean-Michel Rouvaen, Bertrand Nongaillard, G. Waxin, E. Bridoux

To cite this version:

Mohamed Ourak, Jean-Michel Rouvaen, Bertrand Nongaillard, G. Waxin, E. Bridoux. Production d'ondes acoustiques de surface focalisées et utilisation en contrôle non destructif. Revue de Physique Appliquée, 1986, 21 (7), pp.417-424. 10.1051/rphysap:01986002107041700 . jpa-00245459

HAL Id: jpa-00245459

https://hal.science/jpa-00245459

Submitted on 4 Feb 2008

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Classification
Physics Abstracts
43.88 – 68.25 – 81.70

Production d'ondes acoustiques de surface focalisées et utilisation en contrôle non destructif

M. Ourak, J. M. Rouvaen, B. Nongaillard, G. Waxin et E. Bridoux

Laboratoire d'Opto-Acousto-Electronique, Université de Valenciennes, U.A. 832 C.N.R.S., F-59326 Valenciennes Cedex, France

(*Reçu le 28 janvier 1986, révisé le 13 mars, accepté le 8 avril 1986*)

Résumé. — En contrôle non destructif, l'utilisation des ondes de surface, dont l'énergie élastique reste pratiquement confinée dans une épaisseur voisine de la longueur d'onde acoustique, permet la détection des défauts peu profonds ou évoluant perpendiculairement à la surface des échantillons. De tels défauts ne sont pas aisément accessibles par d'autres techniques de contrôle non destructif, ultrasonore ou non. La focalisation de ces ondes permet, en outre, l'obtention d'une résolution spatiale correcte, de l'ordre de la longueur d'onde acoustique. La réalisation d'un dispositif ultrasonore original permettant la génération et la focalisation des ondes de surface sur matériaux non piézoélectriques est décrite dans cet article.

Abstract. — Surface acoustic waves, whose energy remains confined to a small layer typically one acoustic wavelength thick, are often used in non destructive testing applications. The detection of defects lying at a small depth inside the bulk of materials or evolving perpendiculary to their surface, which are not easily accessible by other methods, may then be performed. The focusing of these waves allows, moreover, a convenient spatial resolution, of the order of one acoustic wavelength, to be attained to. A new ultrasonic system is reported here for the generation of focused surface acoustic waves on non-piezoelectric materials.

Introduction.

Diverses techniques sont adoptées en contrôle non destructif pour la détection de défauts dans les matériaux. Parmi celles-ci nous pouvons citer les méthodes radiographiques, électromagnétiques et ultrasonores. L'apparition de matériaux nouveaux tels que les céramiques à vocation thermomécanique destinés à une utilisation dans des conditions assez sévères (contraintes élevées, hautes températures et atmosphères corrosives) exige la détection de défauts critiques dont la taille (de l'ordre du dixième de millimètre) est beaucoup plus petite que dans le cas des métaux.

Lorsqu'ils sont très proches de la surface d'un échantillon ou évoluent perpendiculairement à celle-ci, ces défauts critiques sont difficilement détectables par les deux premières techniques de contrôle citées ci-dessus (radiographiques et électromagnétiques). La microscopie acoustique à balayage (contrôle ultrasonore) utilisant les ondes de volume peut être considérée comme l'un des outils le mieux adaptés à ce type de contrôle. Cependant, cette technique échographique dépend essentiellement de l'orientation du défaut par rapport à l'axe du faisceau acoustique et de la distance de ce défaut par rapport à la surface de l'échantillon. Le premier facteur agit sur l'énergie ultrasonore réfléchie (donc sur la sensibilité). Le deuxième facteur, quant à lui, caractérise le pouvoir de détection (ou de séparation) des deux échos provenant respectivement du défaut interne et de la surface de l'échantillon.

Pour pallier ces inconvénients, on peut faire appel aux ondes de surface. L'énergie élastique de ces ondes demeure confinée dans une épaisseur voisine de la longueur d'onde au cours de leur propagation. Les sources ultrasonores habituelles utilisées pour la génération des ondes de surface présentent une sensibilité bien trop faible pour détecter les défauts décrits ci-dessus. Aussi, le but de la présente étude a-t-il été de réaliser un dispositif ultrasonore (lentille acoustique cylindrique) permettant à la fois la génération et la focalisation des ondes de surface sur des matériaux non piézoélectriques tels que les céramiques à vocation thermomécanique. Compte tenu de la particularité des défauts auxquels nous nous intéressons, seules les méthodes ultrasonores seront abordées par la suite.

Article published online by EDP Sciences and available at http://dx.doi.org/10.1051/rphysap:01986002107041700

1. Rappel des techniques ultrasonores adoptées en contrôle non destructif des matériaux non piézoélectriques.

La propagation d'une onde élastique de volume, de surface ou de plaque dans un matériau permet non seulement de détecter la présence d'un défaut, mais aussi d'en déterminer les caractéristiques tant physiques que géométriques. Il est alors possible d'évaluer la nocivité des défauts compte tenu des conditions d'utilisation future de la pièce. La présence d'un défaut (inclusion, hétérogénéité, ...) dans ce matériau se traduit par une perturbation de l'impédance acoustique ($Z = \rho . v$) du milieu considéré, ρ et v désignant respectivement la densité du milieu et la vitesse de propagation de l'onde ultrasonore.

Cette rupture d'impédance provoque la réflexion d'une partie de l'énergie incidente. Ainsi, l'analyse du signal réfléchi (contrôle échographique) ou transmis (contrôle par transmission) permet la détection des défauts superficiels ou en profondeur.

1.1 UTILISATION DES ONDES DE VOLUME. — La détection des défauts est réalisable soit par transmission [1], soit par échographie en mode A.

La première technique, grâce à l'emploi de deux sondes ultrasonores (émettrice et réceptrice) permet l'obtention de l'ombre portée du défaut sur le récepteur. Cette méthode très ancienne [2] présente peu d'intérêt du point de vue industriel.

La seconde méthode, analogue à la technique du Radar ou du Sonar, permet la représentation de l'amplitude du signal réfléchi en fonction de la distance entre la sonde et la pièce examinée [3-5]. L'inconvénient majeur de cette technique est l'absence d'informations précises sur les dimensions des défauts détectés.

L'imagerie ultrasonore [6, 7], très utilisée dans le domaine médical en raison de l'inocuité des ultrasons pour les tissus biologiques, fournit une solution aux problèmes posés par les méthodes précédentes. La détection de défauts est améliorée grâce à l'accès à des informations plus précises concernant la forme, les dimensions et la position du défaut.

On distingue classiquement deux modes d'imagerie : le mode B permet la représentation d'une section de la pièce contrôlée dans le plan formé par la direction de propagation des ultrasons et celle du déplacement de la sonde. Le mode C permet la visualisation d'une section perpendiculaire à la direction de propagation du faisceau ultrasonore grâce à un balayage de la sonde dans deux directions orthogonales, parallèlement à cette section. Dans les deux types de représentation, la luminosité du moniteur de visualisation est modulée par l'amplitude de l'écho réfléchi, le balayage de l'écran étant synchronisé avec les déplacements de la sonde.

1.2 UTILISATION DES ONDES DE SURFACE. — L'utilisation des ondes de surface en contrôle non destructif ne se limite pas uniquement à la détection des défauts mais permet aussi, vu la grande sensibilité de leur atténuation et de leur vitesse de propagation aux variations des paramètres mécaniques (ou physiques), d'analyser la surface de tout matériau (rugosité, contraintes résiduelles, profondeur de trempe en sidérurgie, ...) [8].

Les techniques permettant l'excitation et la détection des ondes de surface sur des matériaux piézoélectriques sont bien connues [9, 10]. Nous nous intéresserons ici au cas des milieux non piézoélectriques. Parmi les techniques disponibles pour ces derniers, nous pouvons citer la méthode de coin (la plus utilisée) [11], la méthode du peigne [8] et la méthode d'Ash [12]. La première technique permet la conversion d'une onde de volume incidente en une onde de Rayleigh. L'onde incidente est excitée par un transducteur piézoélectrique disposé sur la face d'un prisme en plastique ou plexiglas, dont l'angle au sommet α est tel que :

$$\sin \alpha = v_p/v_R \qquad (1)$$

où v_p et v_R sont respectivement les vitesses des ondes acoustiques dans le volume du prisme et à la surface du matériau étudié.

Les pertes de conversion, pour une fréquence de travail inférieure à 10 MHz, s'élèvent à 30 dB environ.

Dans la méthode du peigne, une plaque piézoélectrique déposée sur une pièce métallique dans laquelle on a gravé un réseau (ensemble de rainures) permet l'excitation de deux ondes de Rayleigh se propageant dans deux directions opposées. Le maximum de rendement est obtenu pour un pas du réseau égal à la longueur d'onde de Rayleigh. Les pertes de conversion sont de l'ordre de 20 dB. Dans la méthode d'Ash, une onde de volume incidente sur un réseau à dents de forme triangulaire permet l'excitation de deux ondes de surface dans deux directions opposées. Grâce au choix d'un profil de dent asymétrique, on peut privilégier la propagation de l'énergie acoustique dans une direction ou dans une autre. Les pertes de conversion sont de l'ordre de 3 dB environ.

Malgré ses pertes de conversion plus importantes, la méthode du coin, non basée sur un processus cumulatif, offre une bande passante assez large et demeure ainsi une technique plus pratique et plus efficace sur le plan industriel. Les deux autres techniques encore appelées « techniques du réseau », conduisent à des pertes de conversion plus faibles, mais sont difficiles à mettre en œuvre et leur bande passante décroît avec le nombre de dents du réseau. Pour conserver une bande passante correcte, il faut limiter le nombre de dents et donc le rendement.

Nous pouvons citer d'autres techniques utilisées pour l'excitation des ondes de surface notamment la méthode STS [13] analogue à celle du coin, la méthode hybride [14], la méthode de la plaque [15] et la méthode du pont [16].

Toutes les méthodes citées ci-dessus présentent le

même inconvénient, qui est la difficulté de focaliser les ondes de surface générées. Cette focalisation est nécessaire pour réduire les contraintes sur l'orientation des défauts par rapport à la direction de propagation des ondes acoustiques et, également, pour les applications de type imagerie.

2. Etude de la focalisation des ondes de surface et réalisation de la sonde ultrasonore.

La focalisation des ondes de surface sur matériaux piézoélectriques, tels que le niobate de lithium ou l'oxyde de zinc a été rendue possible [17] grâce au dépôt de métallisations d'épaisseurs variables suivant la direction de propagation des ondes acoustiques ou de transducteurs circulaires à doigts imbriqués. Cette opération a permis de nombreuses applications telles que l'étude des effets non linéaires [18], l'excitation de guides acoustiques et certaines applications dans le domaine de l'acousto-optique intégrée [19].

Dans les matériaux non piézoélectriques, la focalisation des ondes acoustiques de volume par des lentilles acoustiques sphériques a permis, en microscopie acoustique à balayage [7, 20], d'atteindre des résolutions comparables à celles obtenues en microscopie optique conventionnelle [21].

Récemment, l'excitation et la focalisation d'ondes de fuite sur un substrat non piézoélectrique ont été réalisées grâce à l'emploi de transducteurs semi-circulaires collés sur une lentille sphérique travaillant en position défocalisée [22], cette technique demeure au plus un moyen complémentaire très limité au contrôle par ondes de volume focalisées décrit ci-dessus. Pour pallier les inconvénients rencontrés dans les techniques précédentes, nous avons réalisé une sonde focalisante consistant en une lentille acoustique cylindrique. Pour la réaliser, on colle tout d'abord, sur une face polie d'un barreau de silice, un transducteur piézoélectrique que l'on amincit à l'épaisseur correspondante à la fréquence de travail désirée. La technique de collage à l'indium est utilisée. Une contre-électrode en or est ensuite déposée sur le transducteur, qui est adapté électriquement à 50 Ω. Dans la face opposée du barreau de silice, un dioptre cylindrique est creusé à l'aide d'une forme en laiton chargée de poudre de diamant. Le dioptre ainsi réalisé est enfin poli à l'aide de pâtes au diamant de granulométries décroissantes.

2.1 Calcul de la distance de focalisation à la surface d'un échantillon de céramique et choix des paramètres géométriques de la lentille acoustique.

— La première étape de la conception de la sonde focalisante consiste à calculer la distance de focalisation à la surface d'un échantillon de céramique. A cet effet, nous utilisons un modèle d'optique géométrique simple, basé sur la relation de phase au foyer. En effet, en utilisant les notations de la figure 1, nous pouvons écrire, en l'absence de l'échantillon :

$$k_s.y_1^2/(2.R) + k_1.M_1\,M_2 + k_1.M_2\,F_1 = k_1.f_1\,. \quad (2)$$

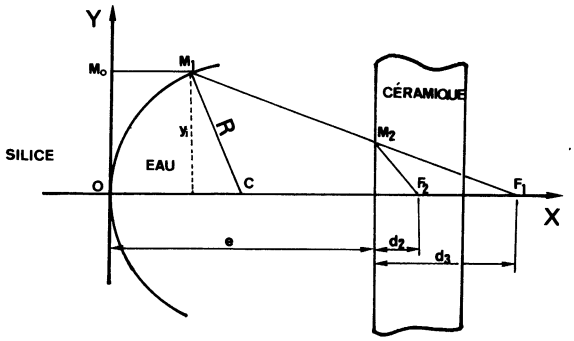


Fig. 1. — Géométrie de la lentille cylindrique.

[Geometry of the cylindrical lens.]

En présence de l'échantillon :

$$k_s.y_1^2/(2.R) + k_1.M_1\,M_2 + k_R.M_2\,F_2 = k_1.e + k_R.d_2 \quad (3)$$

où k_1, k_s et k_R représentent respectivement les nombres d'ondes dans l'eau (milieu de couplage), dans la silice (milieu de la sonde) et dans la céramique (milieu de propagation étudié), F_1, F_2 et f_1 sont respectivement les foyers dans l'eau et à la surface de la céramique et la distance focale dans l'eau, et le rayon de courbure de la lentille est désigné par R.

En posant $n_R = k_1/k_R$ et $n_1 = k_1/k_s$, les équations (2) et (3) fournissent la relation :

$$d_2 = d_3/n_R = (f_1 - e)/n_R \quad (4)$$

où e désigne l'épaisseur moyenne de la goutte d'eau, avec :

$$f_1 = n_1.R/(n_1 - 1)\,. \quad (5)$$

La relation (4) traduit le fait que la distance parcourue à la surface de l'échantillon est divisée par l'indice de réfraction relatif (n_R) pour l'onde de Rayleigh.

Il convient maintenant de choisir les paramètres géométriques de la lentille acoustique. Pour vérifier la qualité de la focalisation des ondes de Rayleigh, nous avons visualisé, grâce à une méthode optique mise en œuvre au laboratoire [23], les fronts d'onde émis par la lentille acoustique cylindrique. Pour cela, la lentille doit permettre une focalisation dans une région de l'échantillon suffisamment éloignée de la zone d'ombre apportée par celle-ci pour la sonde laser (voir Fig. 2). La distance focale minimale pour assurer cette condition doit vérifier la relation :

$$f_{min} = e + n_R.d_1 = \phi_s.[\mathrm{tg}\,\vartheta_R + n_R.\cos(2.\vartheta_R)/\cos\vartheta_R]/2 \quad (6)$$

où ϑ_R représente l'angle d'incidence de Rayleigh, égal à environ 15 degrés dans le cas d'une céramique.

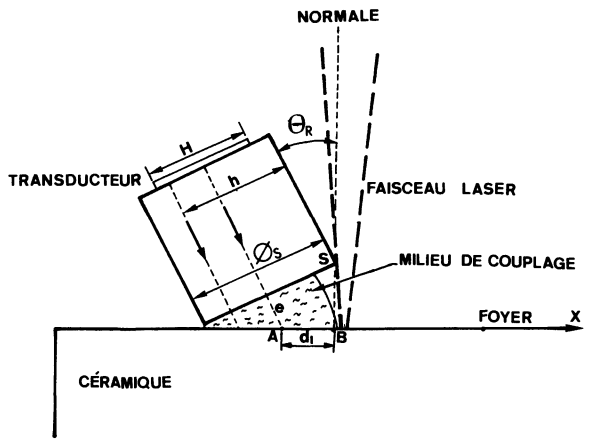


Fig. 2. — Contraintes sur les paramètres de la lentille. Le point A représente la trace du rayon acoustique moyen sur la céramique, le point B est la limite de l'ombre de la lentille pour le faisceau laser d'analyse.

[Constraints over the lens parameters. Point A is the trace of the median acoustic ray on the ceramic surface, point B is the limit of the geometrical shadow of the lens for the probing laser beam.]

Connaissant le diamètre ϕ_s de la sonde égal à 12 mm, la relation (6) donne $f_{min} = 23$ mm, ce qui correspond à un rayon de courbure minimal de la lentille $R_{min} = 17{,}5$ mm.

La lentille acoustique est creusée dans l'une des extrémités d'un barreau de silice, grâce à un cylindre tournant chargé de poudre de diamant et de diamètre égal à 48 mm. La longueur du barreau de silice (30 mm) a été choisie afin d'éviter le chevauchement des échos multiples produits lors des diverses réflexions subies par les ondes élastiques (transducteur, lentille, obstacle en surface, ...).

2.2 VARIATION DE LA DISTANCE FOCALE AVEC LA POSITION h DU TRANSDUCTEUR PIÉZOÉLECTRIQUE ET ÉVALUATION THÉORIQUE DES DIMENSIONS DE LA TACHE FOCALE. — La relation (6) a été établie pour un rayon acoustique incident situé dans l'axe du barreau de silice. Considérons maintenant le cas où le faisceau acoustique incident se trouve à la distance h du sommet S de la lentille (voir Fig. 2). La relation donnant la distance focale minimale à la surface de l'échantillon devient :

$$f_{min} = [\phi_s.\sin\vartheta_R.(1 - n_R.\sin\vartheta_R) + h \times \times (n_R - \sin\vartheta_R)]/\cos\vartheta_R\,. \quad (7)$$

Dans le cas d'un échantillon de céramique, il vient :

$$f_{min} = 3{,}87.h - 0{,}01.\phi_s\,. \quad (8)$$

Evaluons maintenant les dimensions de la tache focale à la surface de la céramique. Le diamètre ΔU de la tache focale est évalué à partir de la relation classique :

$$\Delta U = \lambda.f/a$$

avec λ longueur d'onde dans le milieu de propagation, f distance focale dans ce même milieu et a largeur du faisceau acoustique. Ceci permet d'écrire :

$$\Delta U_R = \lambda_R.f_R/a_R$$

avec λ_R longueur d'onde de Rayleigh, $f_R = (f_1 - e)/n_R$ distance focale à la surface du matériau, et $a_R = (1 - e/f_1).a$ largeur du faisceau acoustique au niveau de la céramique (si a représente la largeur du faisceau dans le milieu de couplage, pratiquement égal à celui dans la sonde).

Pour $e \ll f_1$ nous avons :

$$\Delta U_R \approx \lambda_R.f_1/(n_R.a) \quad (9)$$

soit dans notre cas environ $\Delta U_R \approx 1{,}6.\lambda_R$ ou encore 320 µm à la fréquence de 30 MHz. La profondeur de champ L_R est donnée par :

$$L_R \approx \Delta U_R/\mathrm{tg}\,\beta_R \approx 5.\lambda_R \quad (10)$$

où β_R désigne l'ouverture angulaire du faisceau acoustique au foyer (F_2) dans la céramique ($\beta_R \approx 18°$). Cet angle est relié à l'ouverture angulaire β_1 (dans l'eau) par la relation :

$$k_1.\sin\beta_1 = k_R.\sin\beta_R\,. \quad (11)$$

Compte tenu de la variation de la distance focale en fonction du paramètre h obtenue au paragraphe précédent, la hauteur H du transducteur (voir Fig. 2) doit être choisie assez faible afin d'éviter l'altération de la qualité de la tache focale d'une part et de minimiser les pertes de conversion électroacoustique au niveau du transducteur piézoélectrique d'autre part. Ajoutons que contrairement à ce que l'on pourrait penser, une valeur importante de H n'apporterait qu'une faible contribution énergétique à la surface de l'échantillon. Ceci est dû au fait que, tout en se propageant, l'onde de surface encore appelée onde de fuite [24, 25] rayonne de l'énergie dans le milieu de couplage. Cependant, il faut noter l'existence d'une hauteur H minimale afin que la sonde puisse assurer la focalisation. En effet, on peut montrer que les points sources focalisants ne sont pas sur une section droite du cylindre mais sur une courbe donnée par l'équation :

$$\sin\vartheta = v_1.[1 - \beta^2.(v_R^2/v_1^2 - 1)/2]/v_R \quad (12)$$

où v_1 et v_R représentent, respectivement, les vitesses de propagation dans l'eau et à la surface de l'échantillon et β est l'inclinaison du rayon considéré par rapport au rayon moyen dans le milieu de couplage.

3. Mise en évidence et application des ondes de surface focalisées.

3.1 DESCRIPTION DU DISPOSITIF ÉLECTRONIQUE. — Le système électronique utilisé dans l'expérience est composé d'une chaîne d'émission pour l'excitation des ondes élastiques à la surface de l'échantillon non piézoélectrique et d'une deuxième chaîne d'analyse pour la visualisation du champ acoustique autour du foyer. La méthode d'excitation des ondes élastiques est tout à fait classique. Nous allons, par conséquent, insister plus sur la chaîne de visualisation du champ acoustique par interaction acoustooptique.

La propagation d'une onde élastique à la surface d'un substrat provoque une déformation superficielle entraînant la création d'un réseau de phase mobile, qui diffracte un faisceau laser incident selon plusieurs ordres symétriques dans le régime de Raman-Nath [26]. Dans le cas des faibles intensités lumineuses diffractées, on adopte la technique hétérodyne, qui permet d'obtenir les deux informations relatives au signal reçu : amplitude et phase. Encore appelée méthode de la lame de couteau [27], son grand avantage par rapport à la méthode de détection directe se situe au niveau de la résolution inférieure à $0{,}5 . \lambda_R$.

L'information sur l'amplitude de l'onde élastique est obtenue en réalisant, à la surface du photodétecteur, un battement entre les deux ordres lumineux + 1 et 0, l'ordre − 1 étant masqué. Pour extraire l'information de phase, on réalise un battement électronique entre le signal récupéré à la sortie du photodétecteur et le signal électrique de référence. Ce dernier est prélevé au moyen d'un diviseur de puissance à partir du générateur radiofréquence. Après amplification et détection, le signal obtenu sert à moduler l'intensité du moniteur de visualisation. Pour obtenir l'image des fronts d'ondes émis par la lentille acoustique sur le moniteur, deux miroirs vibrants M_1 et M_2 permettent la déviation du faisceau laser (He-Ne) dans deux directions perpendiculaires X et Y. Les déviations X et Y du moniteur de visualisation sont synchronisées sur les balayages de ces miroirs.

3.2 RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX ET APPLICATION DES ONDES DE SURFACE FOCALISÉES. — Après avoir décrit le dispositif électronique, nous présentons les différents résultats expérimentaux et les confrontons aux prévisions des modèles théoriques simples développés dans la deuxième partie de cette étude.

La visualisation des fronts d'onde à la surface de l'échantillon nous a permis de vérifier les performances pour diverses positions h du transducteur piézoélectrique. L'évolution linéaire de la distance de focalisation avec h est confirmée. Les différentes valeurs théoriques et expérimentales sont en bon accord. La légère différence constatée peut être expliquée par le fait que la distance h est connue avec une certaine imprécision. Ceci se traduit par une incertitude au niveau de la distance de focalisation donnée par :

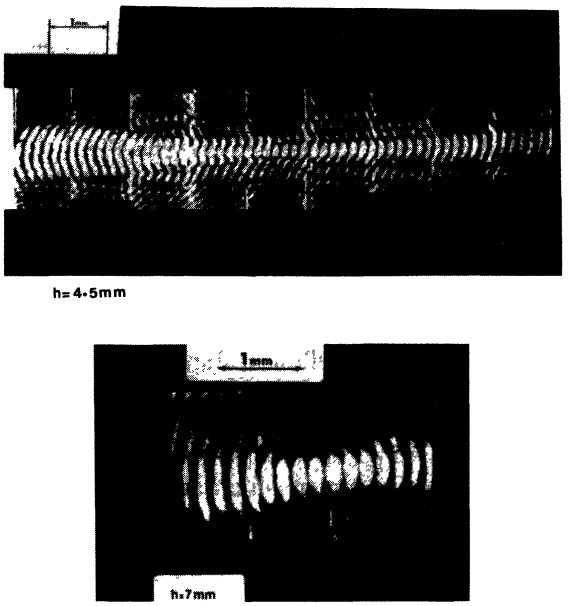


Fig. 3. — Images du champ acoustique obtenues pour diverses positions h du transducteur.

[Images of the acoustic field for several transducer positions h.]

$$\Delta f = (n_R - \sin \vartheta_R) . \Delta h / \cos \vartheta_R . \qquad (13)$$

En outre, la forme de la goutte d'eau (milieu de couplage) n'est pas totalement définie. Ceci peut avoir pour conséquence une limitation de la zone active du transducteur et donc de h.

Après cette vérification des caractéristiques de la sonde, nous avons procédé à une évaluation expérimentale des pertes du système réalisé afin d'avoir une idée sur les pertes de conversion de l'onde de volume en une onde de surface. Les pertes totales mesurées pour le système en réflexion s'élèvent à 16,5 dB. Etant donné les sources d'incertitude (dimension active du transducteur piézoélectrique, profil exact de la goutte d'eau), seule une estimation grossière des pertes théoriques, comprises entre 16 et 20 dB, peut être effectuée. Ceci conduit à des pertes estimées de l'ordre de 1 à 3 dB pour une conversion onde de volume-onde de surface.

3.3 APPLICATIONS DES ONDES DE RAYLEIGH FOCALISÉES À LA SURFACE DES MATÉRIAUX NON PIÉZOÉLECTRIQUES. — Ces applications consistent en l'évaluation de la sensibilité de la technique de détection de défauts proches de la surface. Pour cela, nous avons réalisé des échantillons minces d'alumine (Al_2O_3 et de carbure de silicium SiC) avec des défauts artificiels tels que rayures et fissures provoquées par indentation. Nous avons procédé ensuite à diverses expériences : caractérisation d'un profil, détection de défauts proches de la surface et imagerie en mode B.

3.3.1 *Caractérisation d'un profil.* — Le premier contrôle consiste à relever le profil d'une rayure creusée à l'aide d'une meule diamantée dans un échantillon d'alumine d'épaisseur égale à 0,7 mm. La rayure possède à la surface du substrat une longueur de 13 mm et une largeur apparente de 0,7 mm. Le fond de cette rayure se trouve à une profondeur de 0,46 mm de la surface. La figure 4a donne l'évolution de la profondeur h de la rayure (par rapport à la surface) relevée au moyen d'un comparateur mécanique. Le relevé acoustique, par la face cachée (voir Fig. 4b), est réalisé en déplaçant l'échantillon d'alumine dans le plan confocal de deux lentilles cylindriques L_1 et L_2 (émettrice-réceptrice). Il s'agit donc là d'une mesure par transmission permettant de relever l'amplitude A du signal acoustique recueilli au niveau de la lentille-sonde réceptrice L_2. On peut remarquer la bonne concordance des deux relevés (mécanique et acoustique).

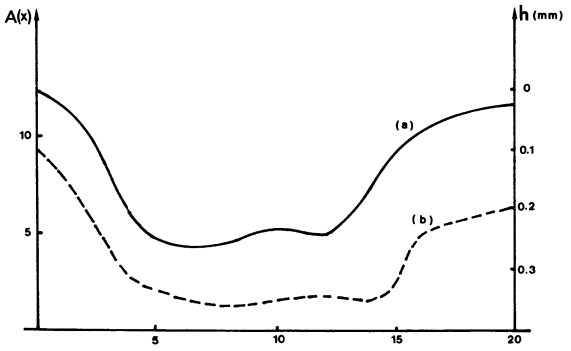
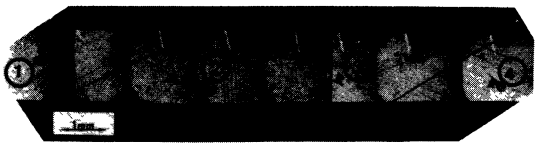


Fig. 4. — Relevés du profil d'une rayure. Courbe pleine (a) obtenue à l'aide d'un comparateur mécanique; courbe pointillée (b) obtenue à l'aide des ondes acoustiques de surface.

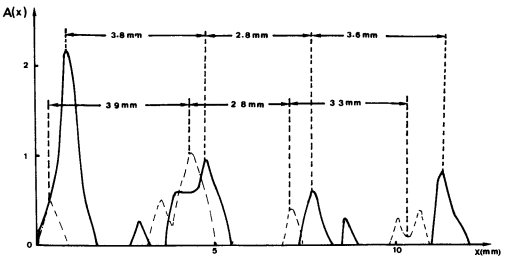
[Profile of a scratch obtained using; a mechanical comparator (solid curve a); surface acoustic waves (dashed curve b).]

3.3.2 *Détection de défauts proches de la surface.* — La figure 5a donne l'image optique de quatre motifs (1, 2, 3 et 4) réalisés par indentation à la surface d'un échantillon de carbure de silicium. L'épaisseur de ce dernier est égale à 0,3 mm soit environ 1,5 fois la longueur d'onde de Rayleigh λ_R à la fréquence de 30 MHz. D'autre part, cette même figure nous permet de connaître les distances X_{12}, X_{23} et X_{34} séparant les différents impacts, ainsi que le diamètre de chacun d'eux. Nous obtenons, pour les distances, X_{12} = 3 mm, X_{23} = 3 mm et X_{34} = 3,7 mm et, pour les diamètres, d_1 = 0,5 mm, d_2 = 1 mm, d_3 = 0,3 mm et d_4 = 0,6 mm.

Après avoir repéré la direction (Δ) suivant laquelle les quatre impacts étaient pratiquement alignés, nous avons relevé l'amplitude du signal réfléchi par chacun



a)



b)

Fig. 5. — Etude d'impacts obtenus par indentation. (a) Photographie optique; (b) relevés acoustiques. Les ondes de surface se propagent soit sur la face comportant les défauts (courbe pleine) soit sur la face opposée à cette dernière (courbe pointillée).

[Study of impacts obtained by indentation. (a) Optical photograph; (b) acoustical probings. The surface acoustic waves propagate either on the damaged surface (solid curve) or on the opposite one (dashed curve).]

d'eux. Le déplacement de l'échantillon est réalisé grâce à une table micrométrique; il faut noter que le maintien de (Δ) dans le plan focal de la lentille cylindrique est nécessaire.

La figure 5b donne l'évolution de l'amplitude du signal réfléchi, relevée sur la surface visible (région où se trouvent les défauts) et à partir de la face cachée (échantillon retourné). Nous pouvons remarquer, d'une part, le bon accord entre les deux relevés acoustiques (face cachée et face visible) et l'estimation des dimensions ainsi que les différentes positions des défauts donnés par l'image optique. D'autre part, étant donné la largeur du troisième défaut (le plus petit) qui est de 0,3 mm environ, sa détection indique la bonne sensibilité de cette technique. Il faut également noter que, vu la faible épaisseur de l'échantillon (inférieure à 2 λ_R) l'onde générée et focalisée à la surface est en fait une onde de Lamb. En effet, lors de nos expériences, nous avons mesuré deux angles d'inclinaison de la sonde par rapport à la verticale (14 et 11°) qui correspondent bien aux premiers modes symétrique et antisymétrique.

Les essais ont été effectués pour l'angle de 14° pour lequel, vu l'épaisseur de la pièce, l'onde de Lamb possède des caractéristiques très voisines de celles de l'onde de Rayleigh [8] (vitesse de propagation, champ acoustique au voisinage de la surface). Le profil de la rayure relevé par la méthode acoustique est en parfait accord avec celui obtenu par la face visible grâce à un comparateur mécanique de grande précision.

3.3.3 *Imagerie ultrasonore en mode* B. — En plus de la détection de défauts proches de la surface, nous avons étendu l'application des ondes de Rayleigh focalisées au domaine de l'imagerie ultrasonore en mode B. Vu l'inertie du support de la lentille cylindrique, c'est l'échantillon qui est déplacé. Une première dimension de l'image est donnée par la direction de propagation du faisceau acoustique. Le mouvement lent imposé à l'échantillon dans cette direction correspond au balayage image sur l'écran du moniteur. La seconde dimension est obtenue en déplaçant l'échantillon dans une direction perpendiculaire à la précédente. Ce mouvement rapide fournit le balayage ligne.

Avec le système réalisé, nous avons effectué l'image en transmission de trous de diamètre moyen égal à 0,35 mm percés dans des échantillons de céramique de 0,2 mm d'épaisseur. Ceci nous a permis de confirmer les résolutions espérées théoriquement dans les deux directions qui sont respectivement de 360 µm et 100 µm environ (à 30 MHz).

4. Conclusion.

Les méthodes traditionnelles généralement utilisées pour l'excitation des ondes élastiques à la surface des matériaux non piézoélectriques possèdent une efficacité bien trop faible pour permettre la détection des défauts de petites dimensions. Pour améliorer la sensibilité du contrôle par ondes de surface, nous avons étudié l'excitation et la focalisation de ce type d'onde à partir d'une technique originale, analogue à la méthode du coin.

Après avoir réalisé la sonde (lentille acoustique) et déterminé ses caractéristiques géométriques (distance de focalisation, largeur de la tache focale et profondeur de champ) à partir de modèles théoriques simples, nous avons mis en évidence la focalisation des ondes de surface sur un échantillon de céramique grâce à une technique de visualisation des fronts d'onde par interaction acoustooptique. L'image ainsi obtenue met bien en évidence la focalisation avec une largeur de tache focale voisine de la longueur d'onde de Rayleigh. Les autres résultats obtenus aussi bien géométriques (distance focale et profondeur de champ) que physiques (pertes du système réalisé), concordent avec ceux prévus par les modèles théoriques.

Nous avons également étudié quelques applications afin d'évaluer la sensibilité de la méthode pour la détection des défauts proches de la surface. Pour cela, nous avons relevé le profil de rayures creusées dans un échantillon d'alumine et observé des impacts obtenus par indentation à la surface d'un échantillon de carbure de silicium. La détection du plus petit impact, dont la largeur est de 1,5 fois la longueur d'onde de Rayleigh environ, traduit la bonne sensibilité de la méthode adoptée. En plus de la détection des défauts, nous avons étendu l'application des ondes de Rayleigh focalisées au domaine de l'imagerie en mode B.

Le travail, à une fréquence supérieure à celle que nous avons adoptée, permettra d'augmenter la sensibilité du système et améliorer la résolution. La méthode présentée est applicable au contrôle des céramiques, des matériaux frittés et des métaux, dans la zone proche de la surface, inaccessible aux ondes de volume. Une autre perspective ouverte est l'étude de l'adhérence de revêtements minces.

En plus des améliorations attendues dans le domaine de la détection et de l'imagerie ultrasonore, nous espérons, dans un proche avenir, étudier le problème des effets non linéaires sur des matériaux non piézoélectriques. Ces effets varient comme le carré de la densité de puissance acoustique. Une augmentation sensible de ce facteur est déjà obtenue en passant des ondes de volume bidimensionnelles aux ondes de surface, dont l'énergie est concentrée dans une couche superficielle du matériau de propagation. La focalisation accroît encore la densité de puissance, si bien que l'on peut s'attendre à observer des effets importants (génération d'harmoniques, mélanges de fréquence, déviation et modulation).

Bibliographie

[1] *Contrôle non destructif par ultrasons Niveau III*, Centre d'Actualisation Scientifique et Technique (C.A.S.T.), 1980.

[2] SOKOLOV, S. J., *Ent.* **6** (1929) 454.

[3] KRAUTKAMER, J., *Eisenhüttenwesen* **30** (1959) 693.

[4] FLAMBARD, C., RIVENEZ, J., LAMBERT, A. et PRALUS, Y., C.O.F.R.E.N.D. 01-1982, p. 273, 1982.

[5] SAGLIO, R., PROT, A. C. et TOUFFAIT, A. M., Materials Evaluation, p. 62, janvier 1978.

[6] BRUNEEL, C., Thèse de Doctorat d'Etat, Valenciennes et Paris VI, mai 1978.

[7] QUATE, C. F., *Scanned Image Microscopy* (Academic Press) 1980, p. 23.

[8] VIKTOROV, I. A., *Rayleigh and Lamb Waves* (Plenum Press) 1967.

[9] COQUIN, G. A. et TIERSTEN, H. F., *J. Acoust. Soc. Am.* **41** (1967) 921.

[10] BERTONI, H. L., *I.E.E.E. Trans. Microwave Theory Techn.* **MTT-17** (1969) 873.

[11] COOK, E. G. et VALKENBURG, H. E., *Am. Soc. Testing Mat. Bull.* **198** (1954) 81.

[12] HUMPHRYES, R. F. et ASH, E. A., *Electron. Lett.* **5** (1969) 175.

[13] KHURI-YAKUB, B. et KINO, G. S., *Appl. Phys. Lett.* **39** (1978) 513.

[14] VAN DEN HEUVEL, A. P., OWEN, D. B. et JOSHI, S. G., *I.E.E.E. Ultrasonics Symp. Proc.* (1969) 24.

[15] FIRESTONE, F. et FREDERICK, I., *J. Acoust. Soc. Am.* **18** (1946) 200.

[16] GONCHAROV, K. V., KRYSHNEVA, G. V., MAMATOVA, T. A. et SULEIMANOV, S. Kh., *Sov. Phys. Acoust.* **21** (1976) 328.

[17] HARTEMANN, P. et MENAGER, O., *I.E.E.E. Ultrasonics Symp. Proc.* (1973) 378.

[18] ROUVAEN, J. M., Thèse de Doctorat d'Etat, Valenciennes et Paris VI, janvier 1976.

[19] SCHMIDT, R. V., *I.E.E.E. Trans. Sonics Ultrason.*, **SU-23** (1976) 22.

[20] NONGAILLARD, B., Thèse de Doctorat de 3e cycle, Valenciennes, juillet 1978.

[21] QUATE, C. F., ATALAR, A. et WRICKRAMASINGHE, H. K., *Proc. I.E.E.E.*, **67** (1979) 1092.

[22] SMITH, I. R. et WRICKAMASINGHE, H. K., *Appl. Phys. Lett.* **42** (1983) 411.

[23] BRIDOUX, E., ROUVAEN, J. M., MORIAMEZ, M., TORGUET, R. et HARTEMANN, P., *J. Appl. Phys.* **45** (1974) 5156.

[24] NAYFEH, A. H., CHIMENTI, D. E., ADLER, L. et CRANE, R. L., *J. Appl. Phys.* **52** (1981) 4985.

[25] CHIMENTI, D. E., *Appl. Phys. Lett.* **42** (1983) 46.

[26] RAMAN, C. V. et NATH, N. S. N., *Proc. Indian Acad. Sci.* **2A** (1935) 406.

[27] WHITMAN, R. L. et KORPEL, A., *Appl. Opt.*, **8** (1969) 1567.