



**EIGHTH WORLD CONFERENCE  
ON NONDESTRUCTIVE TESTING**  
HUITIEME CONFERENCE MONDIALE  
SUR LES ESSAIS NON DESTRUCTIFS

FRANC CONF-180  
FR 7701144

**3J12**

**PERFECTING ULTRASONIC DETECTION OF DEFECTS BY THE MASTERING AND USE OF  
FOCUSED ACOUSTIC WAVES**  
L'AMELIORATION DU CONTROLE DES DEFAUTS PAR ULTRASONS, PAR LA MAITRISE ET  
L'UTILISATION DE LA FOCALISATION DES FAISCEAUX ACOUSTIQUES

FLAMBARD C.  
LAMBERT A.

SEMLIS

1811

C. E. T. I. N.

FRANCE

**SUMMARY:** This paper shows it is possible to define and to focus an ultrasonic beam, taking into account the shape of test pieces and the kind of ultrasonic waves, when conforming to simple rules of physical and optical geometry.

**RESUME :** La communication décrit, à partir des règles simples de l'optique géométrique, et physiquement comment il est possible de définir et d'obtenir la focalisation d'un faisceau d'ondes ultrasonores, compte tenu de la forme des pièces contrôlées et de la nature des signaux ultrasonores utilisés.

**1. INTRODUCTION**

L'une des préoccupations actuelles dans le domaine des essais non destructifs est la caractérisation et la mesure de la dimension des défauts décelés. Actuellement, dans le cas du contrôle par ultrasons, la précision avec laquelle il est possible de définir la dimension d'un défaut, dépend essentiellement des dimensions du faisceau acoustique. Dans le cas d'un défaut important (dont les dimensions sont plus grandes que les dimensions latérales du faisceau) il est possible de suivre le contour apparent du défaut en déplaçant le contour de mesure. Pour des petits défauts, cette procédure n'est pas applicable ; on a alors recours à des techniques comparatives basées sur la mesure de l'amplitude de l'écho de défaut par rapport à l'amplitude d'un écho réfléchi par un obstacle connu. Toutefois, dans la pratique, ces techniques ne sont pas très satisfaisantes. Elles permettent seulement de déterminer les dimensions d'un défaut artificiel donnant une amplitude d'écho équivalente. (ce qui conduit généralement à une sous-estimation du défaut) et à condition que les caractéristiques exactes de la sonde aient été mesurées expérimentalement (fréquence de résonance - champ proche - diamètre de pastille équivalent).

Il faut également reconnaître que dans la réalité le problème n'est pas vraiment posé par les défauts importants qui sont généralement rédhibitoires, mais par les petits défauts dont l'acceptabilité peut être envisagée. Pour ces derniers, il est nécessaire de disposer de sonde ultrasonore dont le faisceau acoustique doit avoir une configuration parfaitement définie et dont les dimensions latérales sont si possible aussi petites que les plus petits défauts recherchés.

Les deux exigences suivantes qui découlent de ce qui précède, à savoir :

- parfaite connaissance du faisceau et de sa reproductibilité d'un

.../...

sonde à l'autre.

- réduction optimale des dimensions latérales du faisceau,

peuvent être parfaitement obtenues par l'utilisation convenable de sondes à faisceau focalisé.

Les lois de l'optique physique (diffraction) et de l'optique géométrique (propagation rectiligne) peuvent être transposées facilement pour l'étude des conditions de focalisation et pour l'estimation du champ acoustique d'une onde focalisée. Elles sont bien entendu directement applicables dans le cas d'ondes ininterrompues ou de trains d'ondes de longue durée. Il sera nécessaire de tenir compte de l'influence de la durée très brève des impulsions ultrasonores.

Le but de la présente communication est de permettre à l'utilisateur de prendre connaissance de ces problèmes physiques qui sont présentés successivement par l'étude des phénomènes de diffraction puis des corrections d'aberrations géométriques et de l'influence de la forme du signal.

## II. CARACTERISTIQUES D'UN FAISCEAU FOCALISE DANS L'EAU

Pour caractériser la figure de diffraction produite au voisinage du foyer, il est intéressant de calculer la valeur de la pression acoustique le long de l'axe de la sonde et dans le plan focal, en considérant la propagation dans le liquide servant de couplage entre la sonde et la pièce.

Ce calcul a été effectué <sup>1</sup> en considérant uniquement la focalisation d'une sonde constituée d'une pastille piézoélectrique circulaire sur laquelle est collée une lentille plan concave de courbure R.

La loi de répartition de l'amplitude diffractée peut être calculée en appliquant le principe de HUYGENS, c'est-à-dire en sommant dans l'espace les vibrations produites par toutes les surfaces élémentaires constituant la pastille :

$$p = A e^{i\omega t} \int_S \frac{e^{-ikr}}{r} ds$$

avec  $k^2$  : nombre d'onde de la vibration dans le milieu liquide

$r$  : trajet acoustique entre la surface élémentaire  $ds$  et le point  $p$  considéré.

Dans le cas d'une pastille circulaire de diamètre  $D$ , il est possible de calculer la répartition de pression le long de l'axe de la sonde et dans le plan focal défini à une distance  $F = R/(1-n)$  ( $n$  est l'indice du matériau constituant la lentille par rapport au liquide). Les résultats sont reportés sur la figure 1.

Bien qu'il soit toujours possible d'ajouter une lentille devant une sonde ultrasonore et de modifier ainsi le champ acoustique, l'étude ci-dessus a montré qu'il était nécessaire de tenir compte de certaines règles pour que l'effet de focalisation (concentration efficace d'énergie dans une zone déterminée) soit réel. En particulier, il est nécessaire que la convergence apportée par la lentille soit suffisante vis à vis des phénomènes de diffraction. En pratique, ceci se traduit par un choix de la distance focale pour que celle-ci soit inférieure à la valeur du champ proche obtenue dans le cas d'une même sonde non focalisée. D'autre part, les aberrations géométriques doivent être rendues négligeables devant la longueur d'onde.

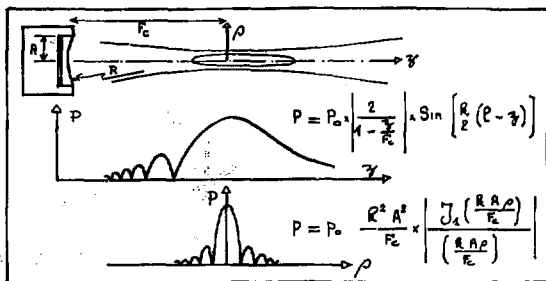


FIGURE 1 : Répartition de la pression acoustique le long de l'axe et dans le plan focal.

Le respect de ces conditions permet de définir d'une façon simple le champ acoustique utile de la sonde ultrasonore, en calculant à l'aide de formules approchées les dimensions de la tache focale qui se présente généralement sous la forme d'un ellipsoïde très allongé.

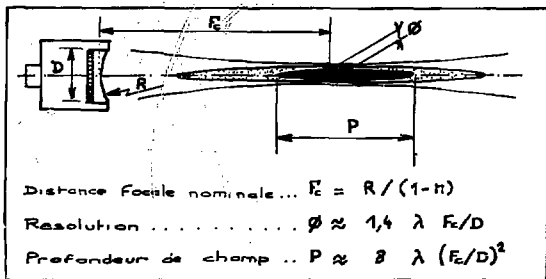


FIGURE 2 : Caractéristiques d'une sonde focalisée.

REMARQUES : Les relations données sur la figure 2 sont valables pour décrire le faisceau dans l'eau. Quant le faisceau pénètre dans le matériau, on peut considérer que la résolution ou diamètre de la tache focale reste inchangée, et que la profondeur de champ est divisée par l'indice du matériau.

.../...

III. MODIFICATION DU TRAJET ET CORRECTION D'ABERRATIONS DUES A LA PENETRATION DANS LA PIECE

La surface des pièces soumises au contrôle constitue, pour les ondes acoustiques, un dioptre à travers lequel le faisceau est réfracté. Tout comme en optique, le parcours de l'onde acoustique est modifié par le passage de la surface séparant deux milieux différents (lois de DESCARTES), il dépend de l'incidence, de l'ouverture du faisceau et bien entendu, de la forme de la surface de séparation. Généralement, ceci conduit à la présence d'aberrations géométriques.

En optique, les aberrations sont étudiées séparément dans deux cas limites :

- aberration de grande ouverture : le faisceau avant ou après réfraction présente une ouverture angulaire très grande mais les rayons moyens s'écartent très peu de l'axe du système,
- aberration de grand champ ou de systèmes non centrés : le faisceau présente une faible ouverture mais il est très incliné sur l'axe du système,

Dans le cadre de l'application aux ondes acoustiques focalisées, le problème se simplifie dans la mesure où l'on cherche seulement à concentrer l'énergie autour du foyer, sans chercher à former une image.

III.1. Aberration de grande ouverture

Cette aberration se produit chaque fois que l'ouverture de la sonde (diamètre de la pastille) est trop importante par rapport à la distance focale. En pratique, étant donné les valeurs importantes des longueurs d'onde en acoustique, on peut admettre que, contrairement aux lentilles optiques, un rapport distance focale sur ouverture, de l'ordre de 5 à 10, pour des lentilles plan concave, est tout-à-fait acceptable :

Dans les cas où il est nécessaire de connaître parfaitement l'influence des aberrations de grande ouverture, ont fait appel au tracé géométrique du faisceau à partir d'un calculateur, compte tenu de la forme de la pièce contrôlée.

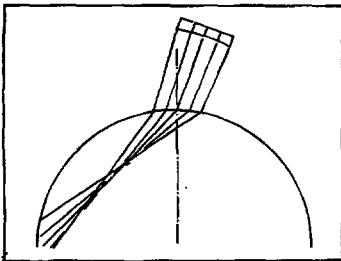


FIGURE 3 : Tracé automatique du trajet géométrique d'un faisceau acoustique.

III.2. Aberration de systèmes non centrés

Dans les cas les plus fréquents, le contrôle est effectué en ondes transversales, l'incidence du faisceau est oblique et le système (sonde-pièce) n'est pas centré. Si la lentille est plan concave (à courbure sphérique) l'aberration se traduit par deux foyers linéaires étendus et séparés ; l'un est situé dans le plan d'incidence et est perpendiculaire à la surface dioptrique, l'autre est perpendiculaire au plan d'incidence (droites focales sagittales et tangentielles)

La position de la droite focale sagittale est déterminée en imaginant tous les rayons incidents tels que M I rencontrant le dioptré sous la même incidence. Ils constituent après réfraction une portion de cône d'axe A S et passent par un même point F's de A S qui engendre la focale sagittale lorsqu'on fait varier i.

Quand le point d'incidence se déplace, dans le plan de figure de i en j très voisins, le rayon réfracté semble tourner autour d'un point fixe Ft', qui engendre la focale tangentielle si on fait tourner la figure autour de A S. Les variations angulaires qui permettent de déterminer la position de Ft' sont obtenues en différenciant la loi de DESCARTES :

$$\cos i \, di = n \cos r \, dr$$

L'aberration peut être corrigée en raisonnant et en procédant de la manière suivante :

On considère d'abord le point de la pièce vers lequel on désire concentrer l'énergie acoustique comme point objet, et on détermine les images de ce point au travers du dioptré constitué par la surface de la pièce. On obtient ainsi, en général, deux images focales sagittales et tangentielles. La lentille est ensuite calculée de sorte qu'elle admette pour foyer les deux images définies plus haut. Dans la pratique, le calcul de la lentille est simplifié par le choix d'une solution approchée qui consiste par exemple à employer des lentilles sphéro-cylindriques ou plan toriques qui sont caractérisés par deux focales semblables aux focales sagittales et tangentielles.

Toutes ces remarques faites à propos de l'exemple d'un faisceau incliné par rapport à une surface plane sont directement applicables au cas des surfaces sphériques ou cylindriques, quelque soit l'incidence du faisceau focalisé.

III.3. Calcul pratique

D'une façon pratique, le calcul peut être effectué en considérant une focalisation cylindrique ou à deux dimensions, successivement et d'une façon indépendante, dans le plan d'incidence et dans les demi-plans perpendiculaires à ce dernier et contenant l'axe du faisceau (l'angle d'incidence étant dans le deuxième cas considéré comme nul)

Compte tenu de conventions de signe sur les rayons de courbures ( $R^> 0$  : courbure convexe ;  $R < 0$  : courbure concave ;  $1/R = 0$  : surface plane) et sur les distances focales ( $F > 0$  : faisceau convergent ;  $F < 0$  : faisceau divergent ;  $1/F = 0$  : faisceau parallèle), les formules à utiliser sont les suivantes :

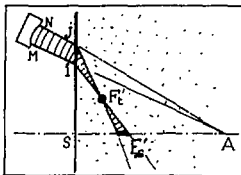


FIGURE 4 : Focales sagittales et tangentielles

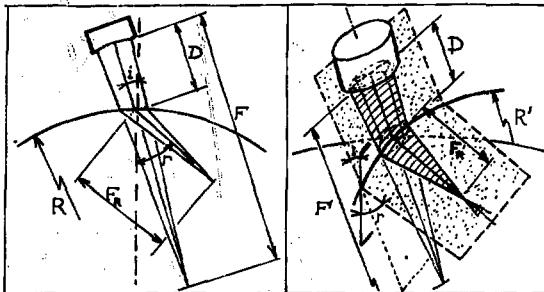


FIGURE 5 : Détermination des paramètres géométriques de focalisation

$$\text{Dans le plan d'incidence : } \frac{1}{F_R} - \frac{1}{R \cos r} = \frac{1}{N} \cdot \frac{\cos^2 i}{\cos^2 r} \left( \frac{1}{F-D} - \frac{1}{R \cos i} \right)$$

$$\text{Dans le plan perpendiculaire : } \frac{1}{F_R} - \frac{1}{R'} = \frac{1}{N} \left( \frac{1}{F-D} - \frac{1}{R'} \right)$$

- Pour lesquelles :
- F et F' sont les deux focales nominales de la lentille à utiliser,
  - R et R' sont les rayons de courbures principaux de la pièce dans le plan d'incidence et dans le plan perpendiculaire,
  - i et r sont les angles d'incidence et de réfraction,
  - D est la distance sonde-pièce,
  - F<sub>R</sub> est la distance focale choisie dans l'acier,
  - N est l'indice du matériau.

#### IV INFLUENCE DE LA FORME DU SIGNAL ULTRASONORE

Les calculs de répartition d'énergie ultrasonore présentés dans le paragraphe 3 ne sont valables en toute rigueur que pour les ondes monochromatiques. En fait, les appareils de contrôle non destructifs délivrent généralement une impulsion brève à la sonde qui résonne alors principalement à sa fréquence propre pendant un temps plus ou moins long selon que l'amortissement mécanique de la pastille est plus ou moins important.

L'impulsion ultrasonore peut être caractérisée par un spectre de fréquence plus ou moins large qui conduit à une modification du faisceau acoustique et généralement à une augmentation de la dimension de la tache focale.

.../...

D'une façon générale, que la sonde soit focalisée ou non, l'utilisation de sonde très amortie fournissant un signal acoustique très bref conduit à une diminution et même à une disparition de la zone perturbée du champ proche.

Pour les applications où la connaissance précise du champ acoustique produit par la sonde est indispensable, il sera nécessaire de ne pas considérer la sonde seule, mais de la considérer en liaison avec l'émetteur-récepteur, en tenant compte de la fréquence et de la bande passante du signal acoustique, compte tenu éventuellement de la bande passante des étages de réception des appareils de contrôle.

Ces considérations sont illustrées sur la figure 6, où on a reporté des traces de faisceau acoustique produit par une même sonde focalisée en tenant compte de la forme du signal et des caractéristiques des étages de réception.

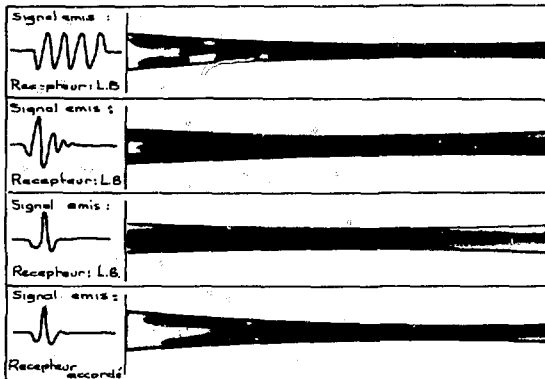


FIGURE 6 : Influence du signal et des étages de réception.

L.B. signifie : large bande

#### V. CONCLUSION

Les contrôles effectués, sur des défauts artificiels et des défauts réels, avec des sondes ultrasonores à faisceau focalisé, ont permis de dégager un certain nombre d'avantages dont les plus importants qui peuvent être résumés ainsi :

- Meilleure définition de la géométrie du faisceau,
- Meilleure reproductibilité des caractéristiques des sondes,
- Meilleure résolution du contrôle,
- Meilleure pénétration dans les matériaux.

VI. BIBLIOGRAPHIE

- 1) U. SCHLÉNGERMAN, Configuration du champ d'une source ultrasonore plane munie d'une lentille focalisante. *Acustica* - Vol. 30 - N° 6 - 1974
- 2) SAGLIO R., Perspectives des possibilités du contrôle ultrasonore par l'utilisation des automatismes et des palpeurs focalisés. *Revue Pratique de Contrôle Industriel* n° 67 - Juin 1974
- 3) P.D. HANSTEAD, A new ultrasonic focusing system for materials inspection. *J. Phys. D: Appl. Phys.* - Vol. 7 - n° 2 - 1974
- 4) FOLDS D.L., Design, construction and evaluation of liquid and solid ultrasonic lenses. *Naval Coastal systems laboratory report 117 72* Juin 1972
- 5) GODD J., Les Lentilles Acoustiques<sup>®</sup> - Ingénieurs et techniciens 275 Mai 1973
- 6) Mac ELROY J.T., Focused ultrasonic beams. *International J. of NDT* Vol 3 1971.